



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

ANÁLISIS DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN EL PARQUE
NACIONAL TINGO MARÍA - PERÚ UTILIZANDO ALGORITMOS DE
INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Línea de Investigación:
Biodiversidad, ecosistema y conservación

Tesis para optar el Grado Académico de
Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor:
Puerta Tuesta, Ronald Hugo

Asesor:
Iannacone Oliver, José Alberto
(ORCID: 000-0003-3699-4732)

Jurado
Zambrano Cabanilla, Abel Walter
Zamora Talavera, Noé Sabino
Rodríguez Rodríguez, Ciro

Lima – Perú
2023

Dedicatoria:

A mis hijos: Joanna Ofelia, Luciana Romina y Ronald Joaquín, y a mi señora Yéssica quienes me impulsan a salir adelante cada día.

A mis padres Ronaldo y Ofelia (+) que me han conducido por las sendas de la vida.

A mis hermanos Jorge Martín y Ofelia María; y a toda mi familia que me han acompañado en este largo camino.

Agradecimientos

A Dios por darme la vida y la salud para culminar con satisfacción este proceso de mi vida.

A toda mi familia por su apoyo incondicional y comprensión para acompañarme en los días más duros de mi existencia.

A mi asesor, Ph.D. José Iannacone Oliver por su orientación y motivación durante la concepción, ejecución y redacción de la presente investigación. Mi eterno agradecimiento.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), mi alma mater; en especial a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, sin su apoyo no hubiera sido posible llevar a cabo esta travesía.

Al personal del Parque Nacional Tingo María (SERNANP) por todas las facilidades brindadas para el desarrollo de esta tesis.

A todas las personas que de una u otra manera han hecho posible el presente trabajo.

Índice de contenido

	Pág.
Dedicatoria:.....	ii
Agradecimientos	iii
Índice de contenido	iv
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Descripción del problema.....	4
1.3. Formulación del problema.....	4
1.3.1. Problema general	4
1.3.2. Problemas específicos.....	5
1.4. Antecedentes	5
1.4.1. Antecedentes nacionales.....	5
1.4.2. Antecedente internacionales	6
1.5. Justificación de la investigación.....	7
1.5.1. Implementaciones prácticas y de desarrollo	7
1.5.2. Utilidad metodológica	7
1.5.3. Relevancia social	7
1.5.4. Valor teórico o de conocimiento	8
1.6. Limitaciones de la Investigación	8

1.7.	Objetivos	8
1.7.1.	Objetivo general	8
1.7.2.	Objetivos específicos	9
1.8.	Hipótesis	9
1.8.1.	Hipótesis general	9
1.8.2.	Hipótesis específicas.....	9
II.	MARCO TEÓRICO	10
2.1.	Marco conceptual	10
2.1.1.	Bosque y deforestación.....	10
2.1.2.	Áreas Naturales Protegidas.....	10
2.1.3.	Algoritmos para clasificación de imágenes satelitales	13
2.1.4.	Misión Sentinel-2	14
III.	MÉTODO	16
3.1.	Tipo de Investigación	16
3.2.	Población y muestra	16
3.3.	Operacionalización de variables.....	16
3.3.1.	Variable cobertura boscosa (ha)	16
3.4.	Instrumentos	17
3.5.	Procedimientos	18
3.5.1.	Cobertura boscosa del PNTM y ZA para los años 2017, 2019 y 2021	18
3.5.2.	Cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021	20
3.5.3.	Grado de fragmentación de bosques.....	21
3.6.	Análisis de datos.....	23

3.7. Consideraciones éticas	25
IV. RESULTADOS	26
4.1. Cobertura boscosa del PNTM y su ZA para los años 2017, 2019 y 2021.....	26
4.1.1. Ubicación y accesibilidad.....	26
4.1.2. Coberturas encontradas.....	27
4.1.3. Exactitud temática de la clasificación	34
4.2. Cambio de bosque a no bosque en los períodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021	35
4.3. Grado de fragmentación de los bosques.....	39
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
VI. CONCLUSIONES.....	44
VII. RECOMENDACIONES	45
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
IX. ANEXOS.....	54

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Lista resumida de las Áreas Naturales en el Perú.	11
Tabla 2. Lista de los Parques Nacionales en el Perú	12
Tabla 3. Zonificación del PNTM según los Planes Maestros desde el 2002 al 2022.....	13
Tabla 4. Descripción de las bandas de los satélites S-2	15
Tabla 5. Operacionalización de variables.....	17
Tabla 6. Características de las imágenes S-2 empleadas en la clasificación.....	18
Tabla 7. Coberturas identificadas en la zona de estudio	19
Tabla 8. Imágenes utilizadas en la medición de la exactitud temática.....	20
Tabla 9. Fuerza de concordancia según el Índice de Kappa.....	23
Tabla 10. Matriz de transición.....	24
Tabla 11. Valores para el Índice de fragmentación.....	24
Tabla 12. Vías de acceso al Parque Nacional Tingo María.....	27
Tabla 13. Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2017	27
Tabla 14. Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2019	29
Tabla 15. Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2021	31
Tabla 16. Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2017	34
Tabla 17. Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2019	34
Tabla 18. Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2021	35
Tabla 19. Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2017 al 2019 (ha)	35
Tabla 20. Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZA 2017 al 2019 (ha)	36
Tabla 21. Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2019 al 2021 (ha)	37
Tabla 22. Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZAs 2019 al 2021 (ha).....	37

Tabla 23. Métricas de fragmentación del bosque dentro del PNTM y su ZA al 2021	39
Tabla 24. Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2017	57
Tabla 25. Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2019	60
Tabla 26. Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2021	63

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1. Flujograma de los procedimientos empleados	22
Figura 2. Ubicación del área de estudio	26
Figura 3. Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2017	28
Figura 4. Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2019	30
Figura 5. Mapa de coberturas del PNTM y ZA al 2021	32
Figura 6. Visualización de las coberturas dentro del área de estudio.....	33
Figura 7. Detección del cambio de cobertura.....	38
Figura 8. Entrevista con comuneros y personal del PNTM sector La Quinceañera.....	55
Figura 9. Ingreso principal al PNTM sector Cueva de las Pavas	55
Figura 10. Río Tres de Mayo luego del deslizamiento de tierras ocurrido el 2021	56
Figura 11. Catarata Gloriapata en el sector Tres de Mayo – PNTM.....	56

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo analizar la dinámica de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María (PNTM) y su zona de amortiguamiento (ZA) ubicados en la selva alta de la región Huánuco, Perú utilizando algoritmos de inteligencia artificial (IA). Para lo cual se utilizó como insumo principal imágenes Sentinel-2 que fueron clasificadas utilizando el algoritmo de IA Random Forest. Como resultado, se elaboró los mapas de cobertura de la zona de estudio que corresponde a los años 2017, 2019 y 2021 con una exactitud temática considerable. Durante el periodo de evaluación, la tasa de cambio de bosque a no bosque dentro del PNTM se incrementó de -0,26 (2017 – 2019) a -1,24 (2019 – 2021) como consecuencia de fenómenos naturales. Mientras que los bosques de la ZA han sufrido una transición dinámica, con tasas de cambio de -2,97 a -4,39 derivado del cambio de uso de las tierras. Las métricas del paisaje sugieren que los bosques del PNTM se encuentran moderadamente fragmentados y los bosques de la ZA se encuentran fuertemente fragmentados, por lo que se concluye que el área natural protegida ha cumplido con el objetivo de mantener la cobertura vegetal.

Palabras clave: Fragmentación, Random Forest, Sentinel-2, Tasa de cambio.

ABSTRACT

The objective of the research was to analyze spatially and temporally the forest cover of Parque Nacional Tingo María and its buffer zone located in the high jungle of the Huánuco region, Peru. For which Sentinel-2 images were used as the main input, which were classified using the Random Forest artificial intelligence algorithm. As a result, the coverage maps of the study area corresponding to the years 2017, 2019 and 2021 were prepared with considerable thematic accuracy. During the evaluation period, the rate of change from forest to non-forest within the PNTM increased from -0.26 (2017 - 2019) to -1.24 (2019 - 2021) as a consequence of natural phenomena. While the forests of the AZ have undergone a dynamic transition, with rates of change from -2.97 to -4.39 derived from the change in land use. The landscape metrics suggest that the PNTM forests are moderately fragmented and the ZA forests are strongly fragmented, so it is concluded that the protected natural area has fulfilled the objective of maintaining plant cover.

Keywords: Fragmentation, Random Forest, Sentinel-2, Rate of change.

I. INTRODUCCIÓN

La deforestación es uno de los problemas ambiental más recurrentes que aqueja actualmente a la humanidad. Se ha calculado a nivel mundial que la tasa de deforestación es de 10 millones de ha anuales durante el quinquenio 2015 - 2020 (FAO - PNUMA 2020). En el Perú la situación de los bosques es muy similar, desde el inicio del nuevo milenio la deforestación avanza a una velocidad impresionante, y el 2020 alcanzó un pico histórico de 203 272 ha de bosques destruidos en un solo año (MINAM, 2022).

El establecimiento de las áreas naturales protegidas es una estrategia clave para contrarrestar la deforestación, la fragmentación del paisaje y conservar la biodiversidad. Las Áreas Protegidas representan casi el 15 % de la superficie terrestre de la Tierra y protegen el 5 % de la cubierta arbórea mundial (Wade et al., 2020). En el territorio peruano, las áreas naturales protegidas actualmente protegen el 17,89% de la superficie terrestre y 7,76% de la superficie marina (SERNANP, 2022a). Sin embargo; a pesar de su importancia para mantener los servicios ecosistémicos, estas se encuentran en constante amenaza debido al avance de la agricultura y ganadería, la minería ilegal y la construcción de carreteras, lo que impide el cumplimiento a cabalidad de su propósito de creación (Aguirre et al., 2021; Cotrina et al., 2021).

Ante esta situación, surge la necesidad de realizar evaluaciones periódicas y cartografiar las tierras degradadas dentro de las áreas naturales protegidas y sus zonas de amortiguamiento tal como lo recomiendan los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) trazados al 2030 (Giuliani, 2020). Por lo que se requiere generar datos continuos y actualizados del estado de la cobertura boscosa dentro del territorio nacional y sobre todo dentro de las áreas naturales protegidas que permitan a las autoridades competentes tomar las mejores decisiones.

Es así como se gesta el presente trabajo: Análisis de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María (PNTM) - Perú, utilizando algoritmos de inteligencia artificial (IA), que

se inicia con el análisis de cómo se encuentra distribuido espacialmente la cobertura boscosa dentro del PNTM y su zona de amortiguamiento (ZA), posteriormente el análisis temporal entre el 2017 al 2019 y del 2019 al 2021 y finalmente un análisis de la fragmentación del bosque utilizando métricas del paisaje.

La investigación se desarrolla en 7 capítulos, en el CAPITULO I trata los aspectos que abarcan los antecedentes en temas de cuantificación y monitoreo de la cobertura boscosa; además del planteamiento, descripción y formulación de los problemas a investigar, los objetivos, la hipótesis, variables y su operacionalización por cada objetivo planteado. En el CAPITULO II, que desarrolla el marco teórico, donde se definen diferentes términos relacionados a los bosques y la deforestación, el sistema de áreas naturales protegidas en el Perú, los algoritmos de inteligencia artificial utilizados para clasificar imágenes satelitales y aspecto sobre los productos Sentinel-2. El CAPITULO III, se detallan los materiales cartográficos y Software libres utilizados, así como procedimientos empleados para resolver los objetivos planteados. El CAPITULO IV se muestran los resultados encontrados en el desarrollo de la investigación, desde la ubicación del área de estudio, la cobertura boscosa de PNTM y su ZA de los años 2017, 2019 y 2021, los cambios de bosque a no bosque y las métricas del paisaje encontradas. Finalmente, en los CAPITULOS V, VI y VII se muestran la discusión de los resultados, conclusiones y recomendaciones.

1.1. Planteamiento del problema

Los bosques naturales son ecosistemas de vital importancia para los seres humanos en todo el mundo, debido que brindan una serie de bienes y sobre todo beneficios conocidos como servicios ecosistémicos (McMurray et al., 2017). En el Perú, más de las dos terceras parte de su territorio nacional están cubiertas de bosques; aun así, a pesar de los esfuerzos gubernamentales por conservar los bosques, la deforestación está avanzando a una velocidad increíble (MINAM, 2022), lo que constituye uno de los problemas ambientales más recurrente

en nuestro país.

Debido a esta preocupación, muchas instituciones gubernamentales y privadas han venido realizando el monitoreo de la cobertura boscosa, la deforestación y el cambio del uso del suelo empleando geotecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección, no obstante; para la elaboración de mapas de deforestación utilizan como insumo principal imágenes satelitales de resolución espacial media, lo que trae como resultado una cartografía a escala nacional (MINAM, 2019).

Para analizar la dinámica del bosque, se requiere de una data histórica y actualizada del territorio, además de herramientas informáticas para el tratamiento de toda la data colectada, por lo que las geotecnologías de acceso libre son una alternativa económicamente viable para cumplir con esta tarea. Por una parte, podemos mencionar a la corriente Open Data, que a través de diversos portales ofrece en la web información de la observación de la Tierra como es el caso del Programa espacial Copernicus, diseñado para suministrar imágenes de la Misión Sentinel-2, que son gratuitas, de resolución espacial mediana y fácil acceso. Por otra parte la corriente Open Source, ofrece un sinnúmero de Software libres para procesamiento digital de imágenes satelitales, los cuales hacen posible calcular en forma global y regional el avance de la deforestación (Kim et al., 2014).

Finalmente, en la última década los especialistas están utilizando métodos complejos y robustos de clasificación de imágenes satelitales que permitan ubicar y delimitar con la mayor exactitud los bosques y la pérdida de éstos, utilizando los algoritmos de IA, que se presentan como una opción efectiva ante las técnicas tradicionales de mapeo del uso y cobertura de la tierra (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2012). Estos algoritmos se basan en métodos no paramétricos para procesar ingentes cantidades de datos, siendo los más notables: Árboles de decisiones (AD), Random Forest (RF), Redes Neuronales Artificiales (RNA) y Máquinas de Vector Soporte (MVS) (Jensen, 2015).

1.2. Descripción del problema

El Parque Nacional Tingo María (PNTM) cuenta con una extensión de 4 777 ha, que en su totalidad son bosques típicos de Selva Alta y cumplen un rol significativo en la provincia Leoncio Prado, por una parte, en lo económico; debido que esta área natural protegida posee atractivos turísticos y recreativos como Cueva de las Lechuzas y el circuito de Cataratas (Román, 2014), y por otro lado en lo ambiental; al capturar y almacenar reservas de carbono (Vargas, 2019).

No obstante; en la última década el avance de la deforestación en esta parte del país se ha incrementado paulatinamente (Puerta y Fajardo, 2022), convirtiéndose en una amenaza que puede perturbar la integridad de los bosques, lo que afectaría la biodiversidad y los recursos naturales que se encuentran en su interior, siendo prioritario determinar el estado actual de la cobertura del PNTM para establecer una línea base y analizar su dinámica en el tiempo (SERNANP, 2022b). En este contexto, para determinar el grado de fragmentación de un ecosistema respecto a la pérdida de cobertura se emplea métricas del paisaje que nos aportan datos numéricos sobre la proporción de cada cubierta del suelo, indicando la superficie o forma de los elementos del paisaje (McGarigal et al., 2009).

Es así, que el presente trabajo tiene por finalidad analizar la dinámica de la cobertura boscosa del PNTM y su zona de amortiguamiento, a partir de la clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2 de los años 2017, 2019 y 2021 utilizando algoritmos de inteligencia artificial, examinar el cambio de bosque a no bosque y estimar el grado de fragmentación.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. *Problema general*

¿Cómo ocurre la dinámica de la cobertura boscosa dentro del PNTM y su zona de amortiguamiento (ZA), Tingo María, Perú?

1.3.2. Problemas específicos

¿Cuál es la superficie de la cobertura boscosa para los años 2017, 2019 y 2021 dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú?

¿De qué manera ocurre el cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021 dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú?

¿Cuán fragmentado se encuentra actualmente el bosque dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú?

1.4. Antecedentes

1.4.1. Antecedentes nacionales

Desde la puesta en funcionamiento del Programa Copernicus, se han venido utilizando las imágenes Sentinel-2 en la clasificación de usos de suelo tanto en lugares de Europa como en Latinoamérica (Borrás et al., 2017), así también estas imágenes son utilizadas para cartografiar áreas quemadas (Fernández-Manso et al., 2017). En el Perú, recientemente se ha empezado a emplear estas imágenes en el monitoreo de la pérdida de bosques en la Amazonía (Chahua, 2019), aunque, la estimación de la deforestación ocurre desde décadas atrás utilizando imágenes Landsat, que son las imágenes satelitales más utilizadas en todo el mundo.

En cuanto a la determinación de cambio de cobertura vegetal dentro de las áreas protegidas, se han realizado trabajos utilizando imágenes Landsat como en el mapeo del área protegida de la reserva de vida silvestre Krau en Malasia (Shaharum et al., 2018) o en el caso de seguimiento de la eficacia de la conservación en la Reserva de la Biósfera de Vhembe en Sudáfrica (Jauro et al., 2020).

Igualmente, en el Perú se han realizado estudios, pero en periodos prolongados; por ejemplo en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe San Ignacio en la región Cajamarca, donde se encontró una leve recuperación del bosque denso alto, que ocupaba una superficie de

74,36% del total del área en 1989 y alcanzó 75,48% en el 2018 (Alberca y Pintado, 2019). Lo mismo se encontró en el Área de Conservación Privada Comunal Hierba Buena-Allpayacku en la región Amazonas, donde se cuantificó los usos de suelos y cobertura vegetal natural, determinándose que para el año 1989 la superficie de pastos y cultivos fue de 0,76 ha y ésta se reducía en el periodo 2003 al 2017, sin embargo; el área circundante mostró un incremento de la superficie que fueron ocupadas por pastos y cultivos, suelo desnudo y zona urbana (Delgado, 2018).

Mientras que en el Parque Nacional Cerros de Amotape de Tumbes durante el periodo 2000 hasta el año 2014 las áreas cubiertas con árboles y arbustos frondosos y vigorosos tuvieron una tendencia negativa como consecuencia de la agricultura y pastoreo (Campos et al., 2018).

1.4.2. Antecedente internacionales

Se ha cuantificado la pérdida de los bosques dentro de las áreas naturales protegidas de la Amazonía peruana y sus áreas de amortiguamiento durante los años 2001 al 2019 utilizando Google Earth Engine, los resultados mostraron que las pérdidas de cobertura forestal dentro de las áreas protegidas fueron de 114 463 ha y de 782 781 ha en sus zonas de amortiguamiento, siendo las zonas de alto riesgo de deforestación las que se encuentran en las partes central y suroeste de la Amazonía peruana (Cotrina et al., 2021).

Por último, se observa a nivel mundial que las geotecnologías son ampliamente utilizadas como herramientas eficaces para evaluar el proceso de fragmentación de bosques, basándose en los índices del paisaje es posible cuantificar las características biofísicas de las áreas boscosas (De Luque et al., 2019). El análisis de la fragmentación forestal a través de métricas espaciales nos ayuda a comprender los patrones espacio-temporales de los cambios en el uso de la tierra para el manejo sostenible de los bosques tropicales en la India (Ramachandra et al., 2019).

1.5. Justificación de la investigación

1.5.1. Implementaciones prácticas y de desarrollo

La información cartográfica y metodológica generada sirve de línea base para la implementación y ejecución de programas y proyectos de inversión y de investigación, que conlleven a buscar y acceder a estrategias regionales y nacionales para la Reducción de Emisiones de Carbono por Deforestación y Degradación Forestal evitada, Conservación de bosques y ecosistemas frágiles, Gestión Forestal Sostenible y aumento de reservas de carbono de los bosques (REDD+).

1.5.2. Utilidad metodológica

La metodología implementada proporciona un protocolo que permita cartografiar la cobertura boscosa con el mayor grado de exactitud en los próximos años, detectar cambios históricos en la cobertura, predecir la afectación a futuro y estimar las emisiones y remoción de CO₂ provenientes de la intervención de bosques. Con el avance tecnológico de la inteligencia artificial es de imperiosa necesidad utilizar estas herramientas digitales que hace posible poder representar con el mayor grado de detalle el territorio y los recursos naturales como son los bosques.

1.5.3. Relevancia social

Los resultados de la presente investigación contribuyen a la conservación y por ende a la valoración económica ambiental de las áreas boscosas y otras asociaciones vegetales que se encuentran dentro del PNTM, permitiendo a las poblaciones aledañas a estos ecosistemas desarrollar actividades económicas y mejorar la calidad de vida de sus familias, así como sensibilizar a los pobladores que hacen usos directo e indirecto del área natural protegida a continuar con las buenas prácticas en aras de mantener la integridad del área natural protegida.

1.5.4. Valor teórico o de conocimiento

Aporta al conocimiento científico sobre el uso de algoritmos de inteligencia artificial para procesar imágenes Sentinel 2 y posterior análisis de la fragmentación mediante métricas del paisaje, considerando que existen escasas experiencias sobre el tema a nivel nacional. Esta investigación es importante porque considera a la educación ambiental como el pilar fundamental para alcanzar el desarrollo sostenible, el mismo que está orientada a formar ciudadanos activos y comprometidos en la construcción de una sociedad más justa, democrática y solidaria; es por ello que la Universidad es un espacio privilegiado para llevar adelante acciones que partiendo de realidades complejas, tengan como horizonte un desarrollo económicamente viable, justo y ecológicamente equilibrado.

1.6. Limitaciones de la Investigación

Debido principalmente al escaso tiempo con lo que se contó para ejecutar la tesis, en la presente investigación solo se trabajó con un algoritmo de inteligencia artificial para clasificar las imágenes Sentinel-2. Este clasificador conocido mundialmente como Random forest, actualmente se encuentran entre los métodos más utilizados para calcular bosques, áreas deforestadas, áreas quemadas y otros. Además, teniendo en cuenta que en el ciberespacio existen diversos algoritmos y debido al avance tecnológico de la inteligencia artificial pudieron aparecer nuevos clasificadores de imágenes durante la ejecución de la presente tesis.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Analizar la dinámica de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María (PNTM) y su zona de amortiguamiento (ZA) a partir de la clasificación de imágenes Sentinel-2 utilizando un algoritmo de inteligencia artificial.

1.7.2. *Objetivos específicos*

- Calcular la cobertura boscosa al 2021 del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento de acuerdo a la clasificación de imágenes Sentinel-2 utilizando un algoritmo de inteligencia artificial, Tingo María, Perú.
- Examinar el cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021 dentro del PNTM y su ZA, Tingo María, Perú.
- Estimar el grado de fragmentación de los bosques del PNTM y su ZA al 2021 mediante métricas del paisaje, Tingo María, Perú.

1.8. Hipótesis

1.8.1. *Hipótesis general*

Es posible analizar la dinámica de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento a partir de la clasificación de imágenes Sentinel-2 utilizando un algoritmo de inteligencia artificial, Tingo María, Perú.

1.8.2. *Hipótesis específicas*

- La cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento al 2021 es superior al 50% del área total, Tingo María, Perú.
- El cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021 se ha incrementado dentro del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento, Tingo María, Perú.
- Los bosques del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento al 2021 se encuentran fuertemente fragmentados, Tingo María, Perú.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. *Bosque y deforestación*

En base a la ley forestal y de fauna silvestre vigente, se define al bosque como el ecosistema en que predominan especies arbóreas en cualquier estado de desarrollo, cuya cobertura de copa supera el 10% en condiciones áridas o semiáridas o el 25% en circunstancias más favorables (DS 018-2015-Minagri). Mientras que la FAO define el bosque como una zona con una cobertura de dosel mínima del 10%, altura mínima de los árboles de 5 m, superficie mínima de 0,5 ha y donde la agricultura no es el uso predominante de la tierra. La CMNUCC permite una definición de bosque más flexible: cobertura de dosel mínima de 10 a 30 %, altura mínima de los árboles de 2 a 5 m y superficie mínima de 0,1 ha (Argotty et al., 2018).

Por otro lado, la deforestación es la eliminación de la cobertura forestal de un bosque por causa del ser humano o de la naturaleza (DS 018-2015-Minagri). También se precisa como la conversión de tierra con bosque a tierra sin bosque. En los Acuerdos de Marrakech la deforestación se define como “la conversión directa, producida por la mano del hombre, de tierra forestal en tierra no forestal”. La FAO define la deforestación como “la conversión de bosque a otro uso de la tierra o la reducción a largo plazo de la cobertura arbórea por debajo del umbral mínimo del 10%” (Argotty et al., 2018). No obstante, instituciones mundiales como Global Forest Watch indica que la pérdida de cobertura arbórea no es lo mismo que la deforestación, debido que cobertura forestal abarca no solo bosques sino también plantaciones forestales (GFW, 2020).

2.1.2. *Áreas Naturales Protegidas*

Se define como los espacios continentales y/o marinos del territorio nacional, expresamente reconocidos y declarados como tales, incluyendo sus categorías y zonificaciones,

para conservar la diversidad biológica y demás valores asociados de interés cultural, paisajístico y científico, así como por su contribución al desarrollo sostenible del país. Las Áreas Naturales Protegidas constituyen patrimonio de la Nación. Su condición natural debe ser mantenida a perpetuidad pudiendo permitirse el uso regulado del área y el aprovechamiento de recursos, o determinarse la restricción de los usos directos (Ley N° 26834).

Hasta el 30 de mayo del 2022, el número total de áreas naturales protegidas en el Perú fue de 252, que ocupan una superficie total de 29 635 814,06 ha (Sernanp, 2022a). En la lista oficial de áreas naturales protegidas encontramos las de administración nacional con categoría definida y las transitorias, así como las de administración regional y privada, las cuales se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1

Lista resumida de las Áreas Naturales en el Perú.

Categorías	Número	Superficie (ha)
Parques Nacionales	15	10 394 366,70
Santuarios Nacionales	9	317 366,47
Santuarios Históricos	4	41 279,38
Reservas Nacionales	17	10 928 608,08
Refugio de Vida Silvestre	3	20 775,11
Reservas Paisajísticas	2	711 818,48
Reservas Comunes	10	2 166 588,44
Bosque de Protección	6	389 986,99
Cotos de Caza	2	124 735,00
Zonas Reservadas	8	588 302,67
Áreas de Conservación Regional	32	3 599 519,17
Áreas de Conservación Privada	144	378 371,65
Total	252	29 635 814,06

2.1.2.1. Parques Nacionales. Áreas que constituyen muestras representativas de la diversidad natural del país y de sus grandes unidades ecológicas. En ellos se protege con carácter intangible la integridad ecológica de uno o más ecosistemas, las asociaciones de la flora y fauna silvestre y los procesos sucesionales y evolutivos, así como otras características, paisajísticas y culturales que resulten asociadas (Ley N° 26834). El Perú cuenta con quince parques nacionales las que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Lista de los Parques Nacionales en el Perú

Parque Nacional	Creación	Región	Superficie (ha)
Cutervo	08.09.1961	Cajamarca	8 214,23
Tingo María	14.05.1965	Huánuco	4 777,00
del Manu	29.05.1973	Cusco y Madre de Dios	1 716 295,22
Huascarán	01.07.1975	Ancash	340 000,00
Cerros de Amotape	22.07.1975	Tumbes y Piura	151 767,49
del Río Abiseo	11.08.1983	San Martín	274 520,00
Yanachaga - Chemillén	29.08.1986	Pasco	122 000,00
Bahuaja - Sonene	17.07.1996	Madre de Dios y Puno	1 091 416,00
Cordillera Azul	21.05.2001	S. Martín, Huánuco, Loreto y Ucayali	1 353 190,85
Otishi	14.01.2003	Junín y Cusco	305 973,05
Alto Purús	18.11.2004	Ucayali y Madre de Dios	2 510 694,41
Ichigkat Muja - Cordillera del Cóndor	09.08.2007	Amazonas	88 477,00
Güepipi-Sekime	15.10.2012	Loreto	203 628,51
Sierra del Divisor	09.11.2015	Loreto y Ucayali	1 354 485,10
Yaguas	10.01.2018	Loreto	868 927,84

2.1.2.2. Parque Nacional Tingo María (PNTM). Fue establecido el 14 de mayo de 1965 mediante Ley N° 15574. Actualmente cuenta con una superficie de 4 777 ha. El Plan Maestro 2022 – 2026 tiene como objetivos: mantener la cobertura vegetal del ecosistema selva alta, mantener el estado poblacional de guácharos de la cueva de las pavas, las poblaciones de especies de mariposas registradas para el PNTM así como las poblaciones de abejas nativas para beneficio del caserío Río Oro, y desarrollar un turismo diversificado y sostenible (SERNANP, 2022b).

Tabla 3

Zonificación del PNTM según los Planes Maestros desde el 2002 al 2022

Zonas del PNTM	Superficie (ha)			
	2002	2012	2017	2022
Zona de Protección Estricta	2 531,24	1 788,06	1 785,46	1 785,46
Zona Silvestre	1 650,71	2 491,54	2 531,95	2 530,67
Zona de Recuperación	268,33	162,81	154,05	158,63
Zona de Uso Especial	265,63	235,97	224,70	219,25
Zona de Uso Turístico	61,89	99,43	80,84	82,99
Total	4 777,80	4 777,50	4 777,00	4 777,00
Zona de Amortiguamiento	6 453,04	6 453,04	4 125,72	4 125,72

2.1.3. Algoritmos para clasificación de imágenes satelitales

Para poder cartografiar las diferentes coberturas del suelo utilizando datos procedentes de la teledetección, existe una gran variedad de algoritmos que se les puede agrupar de la siguiente manera (Jensen, 2015):

2.1.3.1. Algoritmos para clasificación no supervisada. Podemos mencionar a Isodata y K-medias.

2.1.3.2. Algoritmos para clasificación supervisada. Estos algoritmos se pueden dividir en dos grupos: Paramétricos, con su representante Máxima probabilidad y los No paramétrico como Paralelepípedo, Distancia mínima y Vecino más cercano.

2.1.3.3. Algoritmos híbridos que implica inteligencia artificial. En este grupo encontramos a los Árboles de decisión, Máquina de vector de soporte y Redes neuronales artificiales.

Árboles de decisión. Una de las maneras más efectiva de representar un sistema es mediante la estructura en forma de árbol. Cuando los árboles de decisiones se organizan como hipótesis, reglas y condiciones; las hipótesis pueden considerarse como el tronco del árbol, las reglas cada una de las ramas y finalmente las condiciones pueden ser consideradas como hojas. La finalidad de esta organización jerárquica es comprender a fondo las relaciones entre objetos a diferentes escalas de observación (Jensen, 2015).

Random forest. Es un clasificador que utiliza árboles de decisión como clasificadores base. Este algoritmo es una combinación de predictores de árboles de manera que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio muestreado de forma independiente y con la misma distribución para todos los árboles del bosque (Breiman, 2001). Es así que utiliza un procedimiento denominado bagging para la creación de datos de entrenamiento que remuestra aleatoriamente el conjunto de datos originales con reemplazamiento (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2012).

2.1.4. Misión Sentinel-2

Es una de las misiones del Programa Copernicus dedicado a la observación y monitoreo de la Tierra, administrado por la Agencia Espacial Europea (ESA). La misión Sentinel-2 cuenta con dos satélites ópticos multiespectrales: S-2A y S-2B. Gracias a su corredor de 290 km de ancho tiene una cobertura mundial de las tierras emergidas en tan solo cinco días (ESA, 2022).

Las imágenes S-2 son entregados al público en dos niveles: el Nivel 1C, ortoimágenes en Proyección UTM/WGS84 con valores de reflectancia en el Tope de la Atmósfera (TOA) y el Nivel 2A, que son imágenes de reflectancia en el fondo de la atmósfera (BOA) derivadas del nivel 1C. Estas últimas se generan sistemáticamente en el segmento terrestre para todo el mundo desde diciembre del 2018 lo que significa un ahorro de tiempo considerable para los especialistas y público en general que obtienen imágenes con mejor aspecto visual y libre de influencia de la atmósfera (Puerta et al., 2021).

Los productos S-2 cuentan con 13 bandas, que van desde el espectro visible y el infrarrojo cercano (NIR), hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), cuyas características espectrales, de longitud de onda y de resolución espacial se describen en la Tabla 4 (IGNE, 2020).

Tabla 4

Descripción de las bandas de los satélites S-2

Nº de banda	Descripción de la banda	Longitud de onda central (µm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol costero	0,443	60
2	Azul	0,490	10
3	Verde	0,560	10
4	Rojo	0,665	10
5	Vegetación Red Edge	0,705	20
6	Vegetación Red Edge	0,740	20
7	Vegetación Red Edge	0,783	20
8	Infrarrojo cercano NIR	0,842	10
8A	Vegetación Red Edge	0,865	20
9	Vapor de agua	0,945	60
10	SWIR (Cirros)	1,375	60
11	SWIR	1,610	20
12	SWIR	2,190	20

III. MÉTODO

3.1. Tipo de Investigación

En principio, la investigación es aplicada debido que integra los principios físicos, geométricos y estadísticos que utilizan las geotecnologías para identificar uno de los problemas ambientales que aquejan al PNTM, Tingo María, Perú, como es la pérdida de cobertura boscosa. Además, la investigación es de enfoque cuantitativo de tipo no experimental, debido que se ejecutó sin manipulación deliberada de la variable. El carácter es longitudinal, que permitió analizar los cambios de la cobertura boscosa a través del tiempo, con un diseño de tipo panel (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018), donde el mismo ecosistema fue medido en los tres años 2017, 2019 y 2021.

3.2. Población y muestra

Para la presente investigación se consideró como población y muestra al área del PNTM, ubicado en la región Huánuco, Perú. Ecológicamente se encuentra dentro de la región yunga o selva alta.

El área en estudio tiene una superficie de 4 777 ha, las mismas que fueron observadas en su totalidad.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1. *Variable cobertura boscosa (ha)*

Correspondió a la vegetación boscosa en pie dentro del PNTM que pertenece al ecosistema de Selva Alta, con la finalidad de determinar cómo se encontraba espacial y temporalmente, así como el grado de fragmentación que ha sufrido a través del tiempo (Tabla 5).

Tabla 5*Operacionalización de variables*

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Definición operativa	Indicador	Unidad
Cobertura boscosa	Es el ecosistema en que predominan especies arbóreas en cualquier estado de desarrollo, cuya cobertura de copa supera el 10% en condiciones áridas o semiáridas o el 25% en circunstancias más favorables (DS 018-2015-Minagri)	Espacial	La cartografía de coberturas consistió en identificar, delimitar y cuantificar la cobertura boscosa mediante la clasificación supervisada de imágenes Sentinel 2 utilizando el algoritmo Random Forest.	Clases de cobertura	ha
		Temporal	La detección del cambio entre los años 2017, 2019 y 2021 consistió en calcular las pérdidas (deforestación) o ganancias (crecimiento secundario) de la cobertura boscosa utilizando la matriz de cambio.	Tasas de cambio de cobertura	ha/año
		Grado de fragmentación	El grado de intervención de la cobertura boscosa se estimó calculando la proporción y configuración de ésta respecto al área total utilizando datos numéricos.	Métricas del paisaje	Varios

3.4. Instrumentos

Para la colecta de información, se utilizó como instrumento el esquema Corin Land Cover propuesto por la Unión Europea (Pérez y Muñoz, 2006). Esta leyenda ha sido adaptada para Colombia, y da un marco de comparabilidad internacional para la construcción de mapas de cobertura y uso de la tierra (Ideam et al., 2008). Del mismo modo, el Ministerio del Ambiente del Perú validó y acondicionó este esquema para ser utilizado en el territorio nacional (MINAM, 2014).

3.5. Procedimientos

Para poder cumplir con los objetivos específicos, en primer lugar, se realizó visitas al PNTM con el apoyo de los guardaparques, en los cuales se recorrió los principales senderos a fin de tener una idea global de las coberturas existentes dentro del PNTM y su ZA. Asimismo, se dialogó con personas directamente involucradas con el parque.

3.5.1. Cobertura boscosa del PNTM y ZA para los años 2017, 2019 y 2021

3.5.1.1. Pre procesamiento de imágenes. Se obtuvo gratuitamente productos S-2 desde la plataforma Copernicus Open Access Hub (ESA, 2021). En total se descargaron tres imágenes, para los tres años evaluados. Se seleccionaron imágenes con la menor cantidad de cobertura nubosa, que se consiguieron principalmente en la época seca de la zona de estudio (Tabla 6).

Tabla 6

Características de las imágenes S-2 empleadas en la clasificación

Sensor	Fecha de captura	Corrección atmosférica	Fuente
Sentinel-2	04 de agosto 2017	No	Copernicus (ESA)
Sentinel-2	08 de setiembre 2019	Sí	Copernicus (ESA)
Sentinel-2	12 de octubre 2021	Sí	Copernicus (ESA)

Luego se acondicionaron las bandas 12,8A,3, obteniendo un juego de tres bandas con una resolución espacial de 10 metros. Para el año 2017 fue necesario realizar la corrección atmosférica, mediante el método Dark Object Subtraction (DOS1)

3.5.1.2. Procesamiento. En esta etapa se realizó la clasificación propiamente dicha, asignando cada pixel de la imagen Sentinel-2 a una clase de cobertura de acuerdo al esquema

Corin Land Cover (Tabla 7). Las áreas de entrenamiento se obtuvieron a partir de la combinación de 2,3,4, que nos permitió hacer visualizaciones en RGB (IGNE, 2020) para poder identificar las coberturas existentes dentro del área de estudio.

Seguidamente, se realizó la clasificación supervisada en el software SAGA 7.4.0 (Conrad et al., 2015) utilizando el algoritmo Random Forest para agrupar las áreas espectralmente similares y asignarle a una determinada clase de cobertura.

Tabla 7

Coberturas identificadas en la zona de estudio

Nivel I	Nivel II	Nivel III	Leyenda en el Mapa
1. Área artificializada	1.1 Áreas urbanas	1.1.2 Tejido urbano discontinuo	Población
2. Áreas agrícolas	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas		Vegetación secundaria
3. Bosques y áreas mayormente naturales	3.1 Bosque	3.1.3 Bosque denso alto	Bosque
		3.1.4 Bosque abierto alto	
		3.1.5 Bosque fragmentado	
		3.3.3 Vegetación secundaria o en transición	
	3.4 Áreas sin o con poca vegetación	3.4.3 Tierras desnudas (incluyen áreas erosionadas naturales y también degradadas)	Tierras desnudas
5. Superficies de agua	5.1. Aguas continentales	5.1.1 Ríos (50 m)	Ríos

3.5.1.3. Exactitud. Para medir la exactitud temática de los mapas de coberturas, se comparó las coberturas encontradas en la clasificación con una imagen de alta resolución espacial del mismo año de la evaluación (Tabla 8). Para lo cual se verificó 98 puntos en la

imagen; 49 puntos para bosques y 49 para las restantes, que fueron establecidos a través de un muestreo aleatorio sistemático no alineado estratificado según lo establecido por el MINAM (2014). Las coincidencias encontradas fueron transcritas a una matriz de confusión. Posteriormente, se determinó el nivel de concordancia calculando las métricas: Exactitud global y el Índice de Kappa.

Tabla 8

Imágenes utilizadas en la medición de la exactitud temática

Sensor	Fecha de Adquisición	Resolución espacial	Fuente
Spot 6	02 de agosto 2017	1,5 m	Airbus
Planet	30 de noviembre 2019	3 m	PlanetScope
Planet	30 de octubre 2021	3 m	PlanetScope

Por último, se realizó el ajuste temático de las coberturas, según lo encontrado en las imágenes de alta resolución y se procedió a convertir la clasificación mejorada en formato vectorial, Los polígonos de las diversas coberturas fueron generalizados a una unidad mínima cartografiable (UMC) de 0,2 ha obteniendo una cartografía forestal a escala 1:25 000. Los mapas de coberturas fueron elaborado a escala 1: 75 000, utilizando Datum WGS 1984 en coordenadas UTM en la zona 18 s.

3.5.2. Cambio de bosque a no bosque en los periodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021

A partir de las coberturas 2017, 2019 y 2021 se conoció la dinámica del bosque, en el que se utilizó matrices de transición de primer orden para determinar las pérdidas y ganancias del bosque y las demás coberturas del suelo en los periodos 2017 – 2019 y 2019 – 2021.

Además, se calculó las tasas de cambio entre cada periodo, utilizando la siguiente fórmula (FAO, 1996):

$$TC = \left\{ \left[\frac{S2}{S1} \right]^{1/n} - 1 \right\} \times 100$$

Donde:

TC = tasa de cambio (en %)

S1 = superficie en la fecha inicial

S2 = superficie en la fecha final

n = diferencia de años entre fecha inicial y final

3.5.3. Grado de fragmentación de bosques

Para conocer cuán fragmentados se encuentran los bosques del PNTM y su ZA al 2021, se utilizó métricas del paisaje. Se calcularon las siguientes métricas:

3.5.3.1. Índice de continuidad de Vogelmann (FCI):

$$FCI = \ln (\Sigma A / \Sigma P)$$

Donde:

ΣA = Área total de parches de bosque del paisaje, en metros cuadrados (m²) y

ΣP = Perímetro total de parches de bosque del paisaje en metros (m).

Valores altos implicaron mayor continuidad del bosque y valores bajos reflejaron mayor fragmentación y discontinuidad de los parches de bosque.

3.5.3.2. Distancia media al fragmento vecino más cercano (MNN). Se calculó sumando la distancia que separa un fragmento de su vecino más cercano, dividiendo luego el resultado por el número de fragmentos. El indicador se aproxima a cero cuando todos los fragmentos en que está dividido un ecosistema, en un área de interés y en un tiempo dado, están cercanos unos de otros, y aumenta, $MNN \geq 0$, cuando dichos fragmentos están separados.

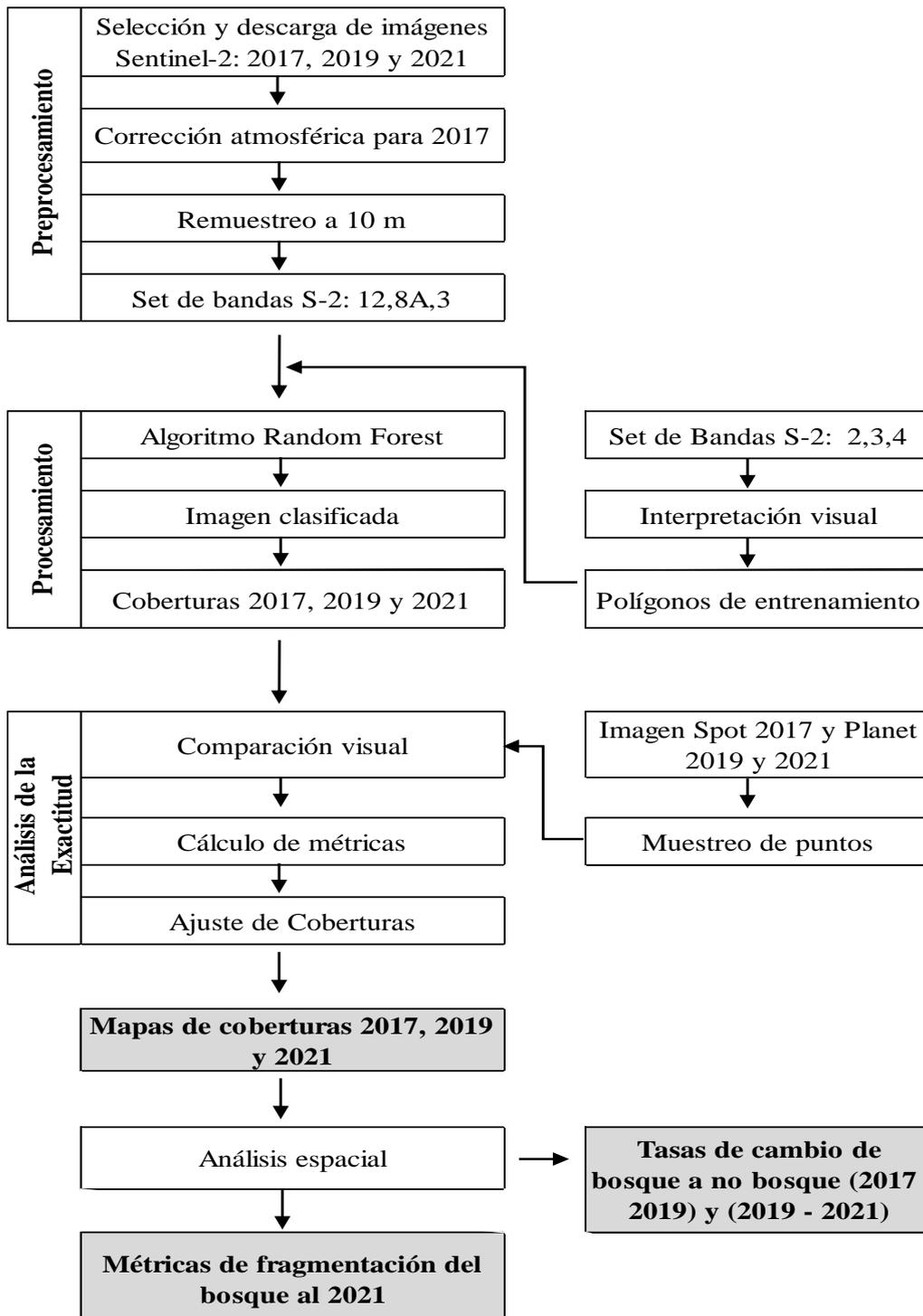
3.5.3.3. Grado de fragmentación (F). La fragmentación total del PNTM se estimó

a través de la relación entre la cobertura boscosa y el área total y su definición es:

$$F = \text{Área de cobertura boscosa (ha)} / \text{Área total (ha)}$$

Figura 1

Flujograma de los procedimientos empleados



3.6. Análisis de datos

Para analizar la exactitud temática de las coberturas encontradas, además de la Exactitud global se calculó el Índice de Kappa a partir de la matriz de confusión, según la fórmula siguiente (Bishop et al., 1977):

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde:

P_o : es el número de aciertos entre n

P_e : se calculó desde la matriz de confusión.

Para interpretar el valor de K se usó la escala propuesta por Landis y Kock (1977) como se muestra en la Tabla 9:

Tabla 9

Fuerza de concordancia según el Índice de Kappa

Coeficiente de Kappa	Fuerza de concordancia
0	Nula
0,01 - 0,2	Leve
0,21 - 0,40	Aceptable
0,41 - 0,60	Moderada
0,61 - 0,80	Considerable
0,80 - 1,00	Casi perfecta

Luego, las coberturas encontradas fueron sometidas a un análisis espacial; primero sometidas a la detección del cambio utilizando el Plugin Semi-Automatic Classification versión 7.10.5 (Congedo, 2021) dentro del software Qgis 3.16.13, cuyos datos resultantes se transcribieron a la matriz de transición por cada periodo de tiempo evaluado (Tabla 10).

Tabla 10*Matriz de transición*

		Año 2				Total	Pérdidas
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Año 2	
Año 1	Clase 1	p11	p12	p13	p14	p1+	(p1+)-p11
	Clase 2	p21	p22	p23	p24	p2+	(p2+) - p22
	Clase 3	p31	p32	p33	p34	p3+	(p3+) - p33
	Clase 4	p41	p42	p43	p44	p4+	(p4+) - p44
	Total Año 1	p+1	p+2	p+3	p+4	1	
Ganancias		(p+1) - p11	(p+2) - p22	(p+3) - p33	(p+4) - p44		

Posteriormente, se realizó la estimación del grado de degradación del bosque mediante el análisis de fragmentación, donde las coberturas fueron ingresadas en formato ráster al Software Fragstats v.4.2.1 (McGarigal et al., 2012). Para una mejor interpretación de cuan fragmentados se encuentra el ecosistema boscosa, los datos se caracterizaron de acuerdo con el rango de valores presentados en la Tabla 11 (Díaz, 2003).

Tabla 11*Valores para el Índice de fragmentación*

Rangos F	Grado de fragmentación
1,0	Sin fragmentación
$< 1 \leq 0,7$	Fragmentación moderada
$0,7 \leq 0,5$	Altamente fragmentado
$< 0,5$	Insularizado

3.7. Consideraciones éticas

Se consideraron los siguientes aspectos éticos:

1. Se cumplió con todos los ítems y capítulos exigidos en la estructura de Tesis Doctoral de la Escuela Universitaria de Posgrado de la Universidad Nacional Federico Villarreal.
2. Se solicitó con la debida anticipación al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas del Perú (SERNANP) y a la Jefatura del Parque Nacional Tingo María la autorización correspondiente para el ingreso al área natural protegida, la cual fue concedida con Resolución Jefatural del Parque Nacional Tingo María N°05-2021-SERNANP-JEF.
3. Se generó información espacial y temporal del PNTM y su ZA ubicados en la zona montañosa de la Amazonía peruana, a partir del procesamiento digital de imágenes Sentinel-2, las cuales son de acceso directo, gratuito y abierto.
4. Para la clasificación supervisada de las imágenes Sentinel-2 se utilizó el algoritmo de inteligencia artificial Random Forest para lo cual se empleó Software libre como Qgis y SAGA.
5. Toda información mencionada como referencia está debidamente citada respetando la autoría correspondiente de acuerdo con las Normas APA vigente.
6. La presente investigación es original y producto del esfuerzo intelectual del tesista y se encuentra libre de algún tipo de conflicto para su difusión y publicación.

IV. RESULTADOS

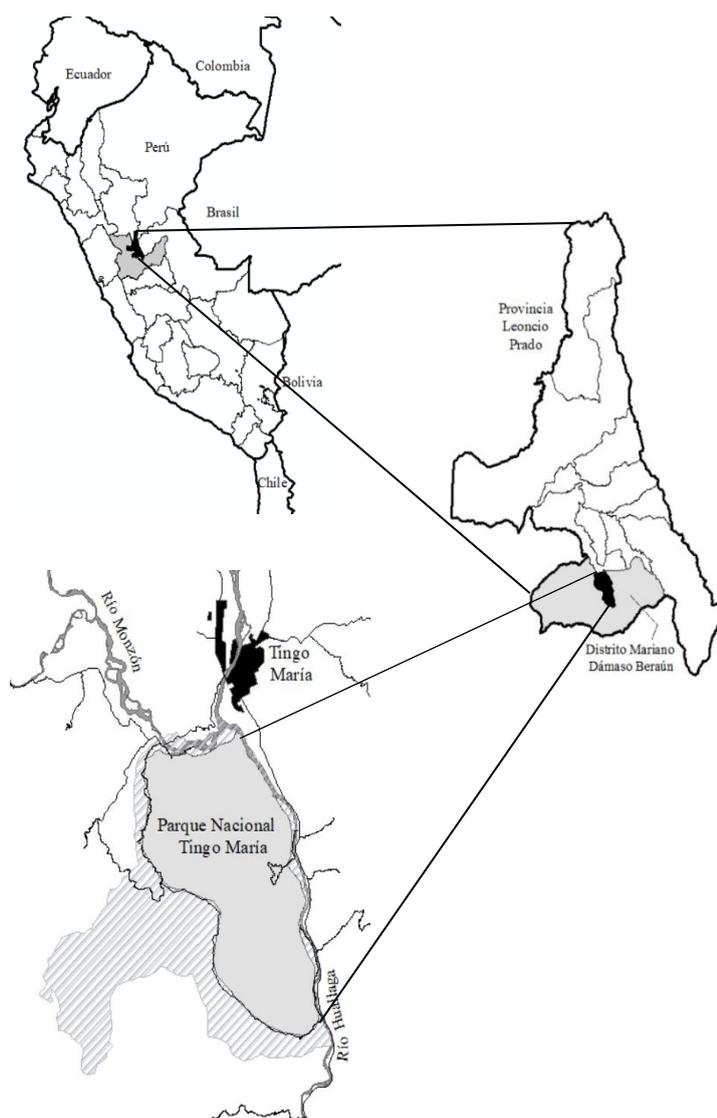
4.1. Cobertura boscosa del PNTM y su ZA para los años 2017, 2019 y 2021

4.1.1. Ubicación y accesibilidad

El Parque Nacional Tingo María está ubicado en el distrito Mariano Dámaso Beraún, provincia Leoncio Prado y región Huánuco, entre los 640 y 1 800 msnm. Esta área natural protegida se sitúa en la margen izquierda del río Huallaga, geográficamente pertenece a la región Selva Alta.

Figura 2

Ubicación del área de estudio



Para acceder al PNTM es necesario llegar a la ciudad de Tingo María, desde allí hay dos ingresos principales: Por la Cueva de las Pavas, que es el principal atractivo turístico de la provincia y por el Sector Tres de Mayo.

Tabla 12

Vías de acceso al Parque Nacional Tingo María

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo aproximado
Lima - Tingo María	Asfaltado	500	11 h
Tingo María - Cueva de las Pavas	Asfaltado	6	15 min
Tingo María - Tres de Mayo	Asfaltado	14	25 min

4.1.2. Coberturas encontradas

La clasificación de la imagen Sentinel-2 para cuantificar las coberturas del PNTM y su ZA utilizando el algoritmo Random Forest arrojó los siguientes resultados: Para el año 2017, los bosques cubren 4 641,30 ha dentro del PNTM y 3 162,73 ha de la zona de amortiguamiento, siendo la cobertura más representativa; ocupando el 97,16% y 76,66% respectivamente del área de estudio (Tabla 13). El mapa de coberturas al 2017 se muestra en la Figura 3.

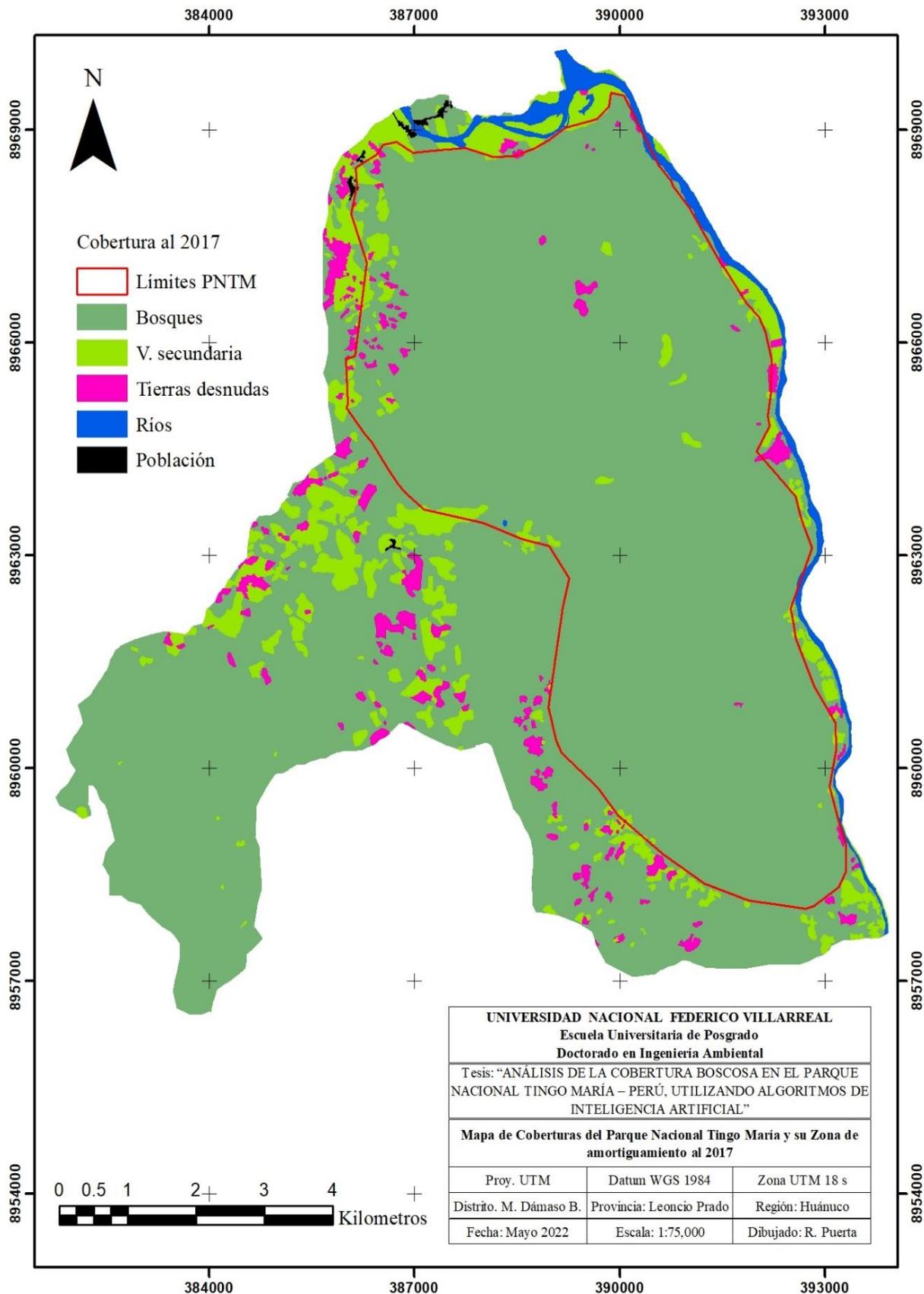
Tabla 13

Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2017

Cobertura	PNTM		Zona de Amortiguamiento	
	ha	%	ha	%
Bosque	4 641,30	97,16	3 162,73	76,66
V. secundaria	99,41	2,08	581,87	14,10
Tierras desnudas	31,61	0,66	197,18	4,78
Ríos	4,44	0,09	171,32	4,15
Población	0,25	0,01	12,62	0,31
Total	4777,00	100,00	4 125,72	100,00

Figura 3

Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2017



Para el año 2019 los bosques cubren la mayor parte de la zona de investigación, que son catalogados como bosques de tipo montañosos, seguido de la cobertura de la vegetación secundaria que cubren 139,16 ha dentro del PNTM y 709,42 ha en la zona de amortiguamiento, lo que representa el 2,91% y 17,19% respectivamente (Tabla 14). La vegetación secundaria, que se han identificado como áreas que se encuentran en un proceso de sucesión secundaria, a consecuencia de la pérdida total o parcial del bosque.

Luego, encontramos a las tierras desnudas que son las zonas fuertemente degradadas, donde los bosques fueron remplazados drásticamente por cultivos agrícolas o pastos para ganado vacuno; de las cuales 15,41 ha se encuentran dentro del PNTM y 247,61 ha en su zona de amortiguamiento. Respecto a la hidrografía de la zona, que se encuentra en casi su totalidad en la zona de amortiguamiento; el río Huallaga lo recorre de sur a norte, mientras que el río Monzón lo hace de oeste a este por la parte norte del parque, donde desemboca al río Huallaga.

Como última cobertura, encontramos a la población constituida por zona con población rural dispersa, dentro del parque se encuentra 0,25 ha mientras que 13,57 en la zona de amortiguamiento. La distribución espacial de las coberturas se muestra en la Figura 4.

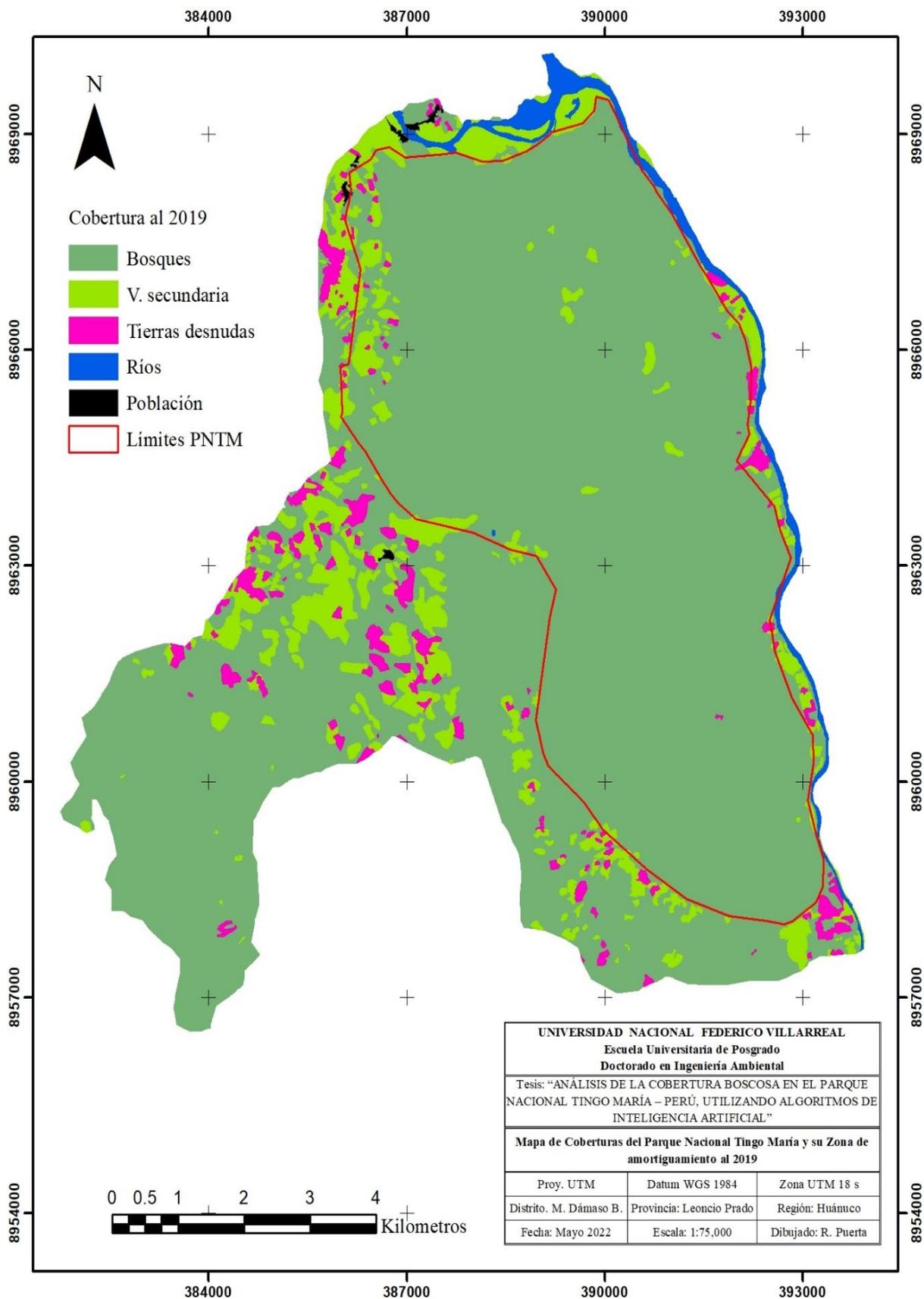
Tabla 14

Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2019

Cobertura	PNTM		Zona de Amortiguamiento	
	ha	%	ha	%
Bosque	4 617,74	96,67	2 977,73	72,17
V. secundaria	139,16	2,91	709,42	17,19
Tierras desnudas	15,41	0,32	247,61	6,00
Ríos	4,44	0,09	177,39	4,30
Población	0,25	0,01	13,57	0,33
Total	4 777,00	100,00	4 125,72	100,00

Figura 4

Mapa de coberturas del PNTM y su ZA al 2019



Mientras que para el año 2021, aunque disminuida en comparación a los años anteriores; los bosques siguen siendo la cobertura más representativa tanto para el área natural protegida con 94,29 % como para su zona adyacente con 65,97%. Es así, que la pérdida de la cobertura boscosa trae consigo un incremento en cuanto a tierras desnudas en la parte sur del parque, que ascendieron a 31,76 ha, las cuales fueron provocadas principalmente por causas naturales.

En la zona de amortiguamiento en cambio, el incremento de las zonas con suelos desnudos se presentó en la parte centro occidente que alcanzaron una superficie acumulada de 256,80 ha (Tabla 15).

Otras de las coberturas que se ha visto incrementada en superficie es la zona poblada, sobre todo en la zona de amortiguamiento del parque en estudio que alcanzó las 21,87 ha. Para una mejor visualización de cómo se encuentran distribuidas espacialmente los bosques dentro del PNTM y su respectivo ZA, se muestra el Mapa de Coberturas cuya escala es de 1:75 000 (Figura 5).

Tabla 15

Superficie y ocupación de las coberturas encontradas al 2021

Cobertura	PNTM		Zona de Amortiguamiento	
	ha	%	ha	%
Bosque	4504,21	94,29	2721,81	65,97
V. secundaria	231,45	4,85	951	23,05
Tierras desnudas	31,76	0,66	257,78	6,25
Ríos	9,17	0,19	173,26	4,2
Población	0,41	0,01	21,87	0,53
Total	4777	100,00	4125,72	100,00

Figura 5

Mapa de coberturas del PNTM y ZA al 2021

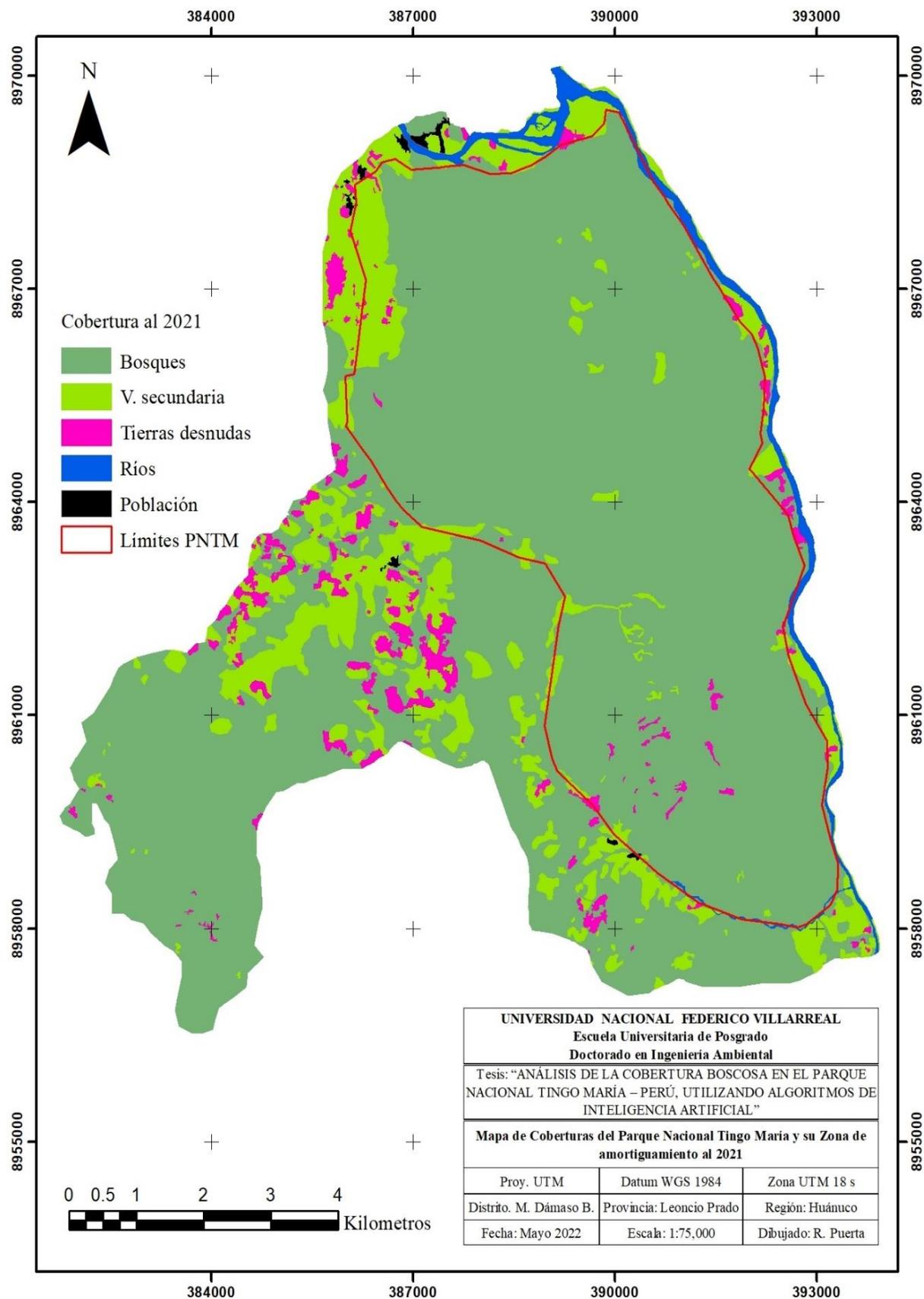


Figura 6*Visualización de las coberturas dentro del área de estudio*

	Vista frontal de la cobertura	Vista desde Spot Escala 1:8 000
Bosques		
Vegetación secundaria		
Tierras desnudas		
Río Huallaga		

4.1.3. Exactitud temática de la clasificación

En la medición de la confiabilidad del mapa de coberturas al 2017 dentro del PNTM y su zona de amortiguamiento, se obtuvo una exactitud global de 84,7% y un Índice de Kappa de 0,77; lo que indica que tuvo un grado de concordancia considerable al utilizar el algoritmo Random Forest para clasificar las imágenes Sentinel-2. En la Tabla 16 se muestra la matriz de confusión indicando los aciertos por cada cobertura encontrada.

Tabla 16

Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2017

Coberturas		Verdad Terreno				Total
		Bosques	V. secund.	T. desnudas	Ríos	
Clasificación	Bosques	47	2	0	0	49
	V. secund	2	12	5	1	20
	T. desnudas	0	5	15	0	20
	Ríos	0	0	0	9	9
Total		49	19	20	10	
		Exactitud global 84,7 %		Índice de Kappa 0,77		

Asimismo, en la confiabilidad del Mapa de coberturas del 2019 se encontró una exactitud global de 89,8% y un índice de Kappa de 0,84; lo que indica un grado de concordancia casi perfecto (Tabla 17).

Tabla 17

Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2019

Coberturas		Verdad Terreno				Total
		Bosques	V. secund.	T. desnudas	Ríos	
Clasificación	Bosques	48	1	0	0	49
	V. secund	3	16	1	0	20
	T. desnudas	1	4	15	0	20
	Ríos	0	0	0	9	9
Total		52	21	16	9	
		Exactitud global 89,8 %		Índice de Kappa 0,84		

Para culminar, la confiabilidad del Mapa de coberturas 2021 logró una exactitud global de 84,7% y un índice de Kappa de 0,77 (Tabla 18).

Tabla 18

Matriz de confusión y métricas de confiabilidad 2021

Coberturas		Verdad Terreno				Total
		Bosques	V. secund.	T. desnudas	Ríos	
Clasificación	Bosques	46	3	0	0	49
	V. secund	4	12	4	0	20
	T. desnudas	1	2	16	1	20
	Ríos	0	0	0	9	9
Total		51	17	20	10	
		Exactitud global 84,7%		Índice de Kappa 0,77		

El detalle de los puntos verificados de los mapas de cobertura 2017, 2019 y 2021 se muestran en las Tablas 24, 25 y 26 respectivamente.

4.2. Cambio de bosque a no bosque en los períodos 2017 al 2019 y 2019 al 2021

El cambio de bosque a otro tipo de coberturas durante el 2017 al 2019 fue poco dinámico. Durante este periodo, la tasa anual de cambio dentro del PNTM fue de -0,26%; es decir, en dos años se han perdido 25,88 ha de bosques (Tabla 19).

Tabla 19

Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2017 al 2019 (ha)

		2019						
Coberturas		Bosques	V. S.	T. D.	Río	Pob.	Total	Pérdidas
2017	Bosques	4 615,42	19,77	6,11	0	0	4 641,30	25,88
	V. S.	0,03	95,21	4,17	0	0	99,41	4,20
	T. D.	2,29	24,19	5,13	0	0	31,61	26,48
	Río	0	0	0	4,44	0	4,44	0
	Pob.	0	0	0	0	0,25	0,25	0
Total		4 617,74	139,17	15,41	4,44	0,25	4 777,00	
Ganancias		2,32	43,96	10,28	0	0		

Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

Mientras que en la Zona de Amortiguamiento la tasa de cambio fue de -2,97%. Se han eliminado 188,78 ha de cobertura boscosa, de los cuales 123,75 pasaron a ser vegetación secundaria y 65,03 a tierras desnudas. El detalle de la conversión de las demás coberturas se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20

Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZA 2017 al 2019 (ha)

		2019						
	Coberturas	Bosques	V. S.	T. D.	Río	Pob.	Total	Pérdidas
2017	Bosques	2 973,95	123,75	65,03	0	0	3 162,73	188,78
	V. S.	2,97	500,19	71,41	6,39	0,91	581,87	81,68
	T. D.	0,81	85,16	111,17	0	0,04	197,18	86,01
	Río	0	0,32	0	171	0	171,32	0,32
	Pob.	0	0	0	0	12,62	12,62	0
	Total	2 977,73	709,42	247,61	177,4	13,57	4 125,72	
Ganancias		3,78	209,23	136,44	6,39	0,95		

Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

Por el contrario, durante el 2019 al 2021 el análisis demostró que fue un periodo de transición muy dinámico. En este lapso la tasa de cambio dentro del PNTM se ha incrementado a -1,24%, lo que significa que se ha perdido 152,74 ha de bosques, que en su gran mayoría han pasado a convertirse en vegetación secundaria (125,87 ha) y en tierras desnudas (21,53) además de pasar a formar parte de las coberturas de río y población, pero en menor proporción. Esta transición no necesariamente es consecuencia de las actividades antrópicas que ejercen presión sobre el área natural protegida, sino por efecto de la propia naturaleza (Figura 7).

Las demás coberturas también han experimentado cambios significativos, en la que cabe resaltar la cobertura de río que ha ganado áreas que antes pertenecían a los bosques y a las tierras desnudas. Aunque dentro del parque no todo es pérdida, también se ha registrado ganancias. Por ejemplo, a la cobertura boscosa se le añadió 39,25 ha procedentes de la vegetación secundaria (35,56 ha), tierras desnudas (3,33 ha) y río (0,32 ha) (Tabla 21).

Tabla 21*Matriz de transición de bosque a no bosque del PNTM 2019 al 2021 (ha)*

		2021							
	Coberturas	Bosques	V. S.	T. D.	Río	Pob.	Total	Pérdidas	
2019	Bosques	4 465,0	125,87	21,53	5,27	0,07	4 617,74	152,74	
	V. S.	35,56	95,81	7,60	0,02	0,17	139,16	43,35	
	T. D.	3,33	9,69	2,39	0	0	15,41	13,02	
	Río	0,32	0	0,24	3,88	0	4,44	0,56	
	Pob.	0	0,08	0	0	0,17	0,25	0,08	
	Total	4 504,21	231,45	31,76	9,17	0,41	4 777,00		
Ganancias		39,25	135,56	29,37	5,29	0,24			

Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

Similar escenario para la zona de amortiguamiento durante el periodo 2019 – 2021, con una tasa de cambio de -4,39%. De un total de 369,23 ha perdidas de bosques; 282,48 ha se han convertido en vegetación secundaria y 72,53 ha fueron talados para dar paso a cultivos y pastos, eliminando 216,49 ha más en comparación al periodo 2017 – 2019 (Tabla 22).

Tabla 22*Matriz de transición de bosque a no bosque de la ZAs 2019 al 2021 (ha)*

		2021							
	Coberturas	Bosques	V. S.	T. D.	Río	Pob.	Total	Pérdidas	
2019	Bosques	2608,5	282,48	72,53	12,96	1,26	2977,73	369,23	
	V. S.	84,27	506,42	101,16	9,49	8,08	709,42	203,00	
	T. D.	27,14	135,57	82,99	1,01	0,9	247,61	164,62	
	Río	1,19	25,22	0,82	149,68	0,48	177,39	27,71	
	Pob.	0,71	1,31	0,28	0,12	11,15	13,57	2,42	
	Total	2721,81	951	257,78	173,26	21,87	4125,72		
Ganancias		113,31	444,58	174,79	23,58	10,72			

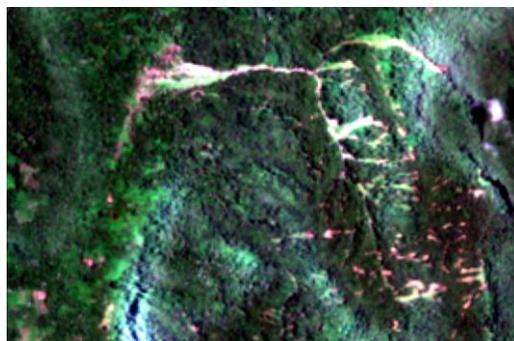
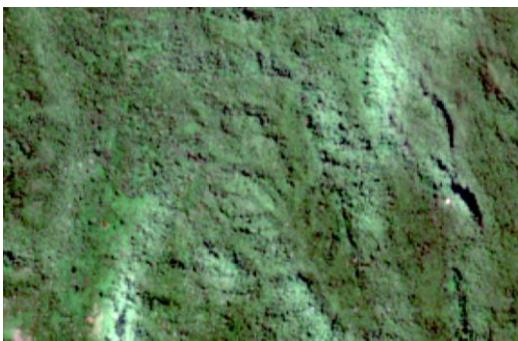
Donde: V.S. = Vegetación secundaria; T.D.= Tierras desnudas; Pob. = Población

Figura 7*Detección del cambio de cobertura*

Recuperación de la cobertura vegetal luego de una tala y rozo realizado por taladores furtivos en la parte norte central del Parque Nacional Tingo María. Arriba: Imágenes S-2 combinación de bandas 234 a escala 1:8 000. Abajo: Imágenes Google Earth Pro.

2019

2021



Pérdida de cobertura forestal ocurrida en la parte sur del PNTM por causas naturales durante el 2021. Imágenes S-2 combinación de bandas 234 a escala 1:12 500.

4.3. Grado de fragmentación de los bosques

De acuerdo con las métricas encontradas durante el análisis, los bosques dentro del PNTM presentan un mayor índice de continuidad con valores de 6,447 en comparación a su zona de amortiguamiento que presenta 4,321. Además, respecto a la distancia media al fragmento vecino más cercano presenta valores bajos con 30,08 a diferencia de su ZA que registró 82,026. Finalmente, el PNTM se encuentra menos fragmentado con un valor de 0,942 en comparación a su ZA. (Tabla 23).

Tabla 23

Métricas de fragmentación del bosque dentro del PNTM y su ZA al 2021

Métrica	PNTM	Zona de amortiguamiento
Índice de continuidad de Vogelmann	6,447	4,321
Distancia media al fragmento vecino más cercano	30,08	82,026
Grado de fragmentación	0,942	0,659

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a la presente evaluación multitemporal se ha determinado que la superficie boscosa dentro del PNTM se mantuvo relativamente estable. Hacia el año 2017 los bosques cubrían el 97,16% de la superficie total del PNTM, mientras que la vegetación secundaria y las tierras desnudas en conjunto sumaban 2,74% (Tabla 13), las cuales se ubican principalmente en la parte noroeste del área de estudio, próxima a la comunidad Río Oro (Figura 3). Este lugar que cuenta con escasa vegetación boscosa originaria; según la zonificación del PNTM propuesta en el Plan Maestro 2022-2026 (Sernanp, 2022) corresponde a parte de la zona de uso especial, que es un espacio donde se desarrolla actividad agrícola por la población que se encuentra asentada con mucha anterioridad al establecimiento del PNTM.

Para el 2019 el escenario fue muy similar; los bosques cubrían el 96,67% y la vegetación secundaria y las tierras desnudas el 3,23%. La superficie de los ríos y la zona poblada se mantuvo estable al igual que el año 2017 (Tabla 14).

Mientras que para finales del 2021 la cobertura forestal se redujo. La vegetación secundaria y las tierras desnudas alcanzaron el 5,51% del total del PNTM, disminuyendo los bosques al 94,29% (Tabla 15). Este descenso en la superficie forestal se debió que durante el mes de marzo del 2021 ocurrió un deslizamiento de tierras producto de las fuertes precipitaciones ocurridas en la zona, lo que ha conllevado a la merma de la cobertura boscosa en la parte sur del PNTM.

A pesar de ello, el PNTM cumple con su objetivo principal que es la conservación de la cobertura vegetal. Las áreas naturales protegidas han demostrados ser muy eficientes en el tiempo para lograr su propósito de conservar los bosques (Dwiyahreni et al., 2021; Islam et al., 2021).

Por el contrario, los bosques de la ZA han experimentado una disminución considerable en su extensión; en el 2017 cubrían 76,66% del área total de la ZA, y en el 2021 se acentuó

reduciéndose la cobertura boscosa al 70,81%. Esta dinámica es producto de la constante presión antrópica por parte de las poblaciones asentadas en los alrededores del PNTM quienes practican la agricultura itinerante convirtiendo los bosques en tierras agrícolas. A nivel nacional las áreas naturales protegidas son amenazadas constantemente por la agricultura y el pastoreo (Campos et al., 2018; Delgado, 2018). Los estudios han demostrado que, uno de los responsables de la deforestación en la Amazonía peruana es la agricultura de subsistencia (Marquardt et al., 2019). La pérdida antropogénica de bosques para el establecimiento de la agricultura es común en las áreas naturales protegidas ubicada en los trópicos globales, (Wade et al., 2021). Asimismo, durante el tiempo de aislamiento social producido por la pandemia del Covid-19, la actividad en el campo no se ha detenido; por el contrario, ha sido aprovechada por la población rural para ampliar la frontera agrícola y pecuaria, según el reporte elaborado por el Minam (2022), el 2020 fue el año donde la deforestación en el Perú alcanzó su pico más alto en las últimas dos décadas.

La exactitud temática de los mapas de coberturas producidos fue evaluada a partir del uso de matrices de confusión (Tablas 16, 17 y 18), obteniéndose las métricas Índice de Kappa y Exactitud global. Según el Índice de Kappa calculado, se encontró un grado de concordancia considerable para los tres años evaluados y de acuerdo con la exactitud global calculada, los tres valores han superado el 80%; lo que demuestra un desempeño satisfactorio en la clasificación de coberturas boscosas.

La literatura científica manifiesta que es muy común encontrar exactitud temática alta cuando se usa productos Sentinel-2 con el algoritmo Random Forest para identificar bosques. Los usuarios de los productos S-2 han encontrado valores similares en diferentes ecosistemas del mundo (Li et al., 2021; Veerabhadraswamy et al., 2021; Daryaei et al., 2020). Inclusive si es comparada con imágenes de otros sensores, los productos S-2 han obtenido mayor exactitud temática, como por ejemplo frente a su mayor competidor Landsat 8 (Clark, 2020).

Del mismo modo, cuando se trata de comparar algoritmos que consigan la mayor fiabilidad posible, los clasificadores basados en aprendizaje automático tales como Random Forest y Máquinas de Vector de Soporte superan a los demás clasificadores cuando se trata de discriminar bosques y otro tipo de coberturas (Phiri et al., 2020).

Una de las ventajas de trabajar con matrices de confusión es su capacidad de plasmar los conflictos entre las categorías encontradas (Chuvienco, 2008). Para nuestro caso las principales confusiones que se observan en las Tablas 16, 17 y 18 es el solapamiento entre las categorías bosque y vegetación secundaria, además de los valores confusos entre la categoría vegetación secundaria y tierras desnudas, pero en menor proporción. Para evitar confundir los bosques con la vegetación secundaria se utilizó la combinación de bandas 12,8A,3; que corresponden al Infrarrojo de Onda corta, Vegetación Red Edge y Verde respectivamente, las cuales nos brindaron resultados sobresalientes cuando se entrenó el algoritmo. El trabajar con bandas del infrarrojo cercano nos permite discriminar mejor las coberturas vegetales, las cuales presentan comportamientos espectrales diferentes según los factores fisiológicos y morfológicos de las especies vegetales (Chuvienco, 2008).

En cuanto al cambio de bosque a otros usos del suelo, el análisis de las matrices de cambio (Tablas 19 y 20) nos permitió identificar que el periodo 2017 – 2019 dentro del PNTM fue menos dinámico en comparación al periodo 2019 – 2021. En efecto, la tasa anual de cambio fue de -0,26% en el primer periodo mientras que en el segundo alcanzó -1,24%. Estos valores son altos en comparación a los mencionados por Bax y Francesconi (2018) quienes encontraron dentro de las áreas naturales protegidas tasas de deforestación locales que van de -0,02% al -0,04%. Estas comparaciones evidencian la transición abrupta a las que han sido sometidos los bosques del PNTM producido por fenómenos naturales como las fuertes precipitaciones ocurridas durante el 2021.

Caso contrario es lo ocurrido en la ZA; donde los bosques han sufrido intervención de

tipo antrópica. En el primer lapso; se obtuvo una tasa de cambio de -2,97% con pérdidas de 188,78 ha de bosque y ganancias de sólo 3,78 ha (Tabla 21). Valores similares de la reducción de la cobertura forestal se han encontrado en zonas fuera de las áreas naturales protegidas, siendo las regiones San Martín, Huánuco y Junín las zonas más afectadas a nivel nacional (Bax y Francesconi, 2018). Mientras que en el periodo 2019 -2021 la tasa de cambio se incrementó a -4,39%; lo que equivale a una pérdida de 369,23 ha de cobertura boscosa (Tabla 22); durante este último lapso se ha deforestado la mayor superficie forestal. Durante el aislamiento social por la pandemia del Covid-19 los hogares que practican la agricultura itinerante en la Amazonía han ampliado la frontera agrícola, estableciendo cultivos mediante tala, rozo y quema; para luego de un tiempo dejar los barbechos que serán nuevamente utilizados en los sembríos y de esta manera acaparar la mayor cantidad de tierras (Coomes et al., 2016).

Finalmente, para cuantificar la fragmentación de los bosques del PNTM y su ZA se analizó métricas del paisaje a nivel de clases (Tabla 23). Los valores encontrados sobre la fragmentación señalan que los bosques del PNTM al 2021 se encuentran en una categoría de fragmentación moderada, mientras que los bosques de su ZA se encuentran altamente fragmentados. De igual manera esta área muestra valores más bajos de continuidad (FCI), lo que refleja mayor fragmentación y discontinuidad en los parches de bosques en comparación al PNTM.

Respecto a la distancia media al fragmento vecino más cercano (MNN), el PNTM presenta valores más bajos, señalando que los fragmentos de bosques dentro del área natural protegida se encuentran más cercanos uno de otros. Las métricas analizadas nos sugieren que la cobertura boscosa en la ZA ha sido fuertemente intervenida. Las zonas de amortiguamiento en el Perú son mucho más vulnerables a la deforestación en comparación a las áreas naturales protegidas (Rojas et al., 2021), es así que el avance de la agricultura mediante patrones migratorios dentro la ZA, representa una potencial amenaza a la integridad del PNTM.

VI. CONCLUSIONES

A partir de la clasificación supervisada de las imágenes Sentinel-2 utilizando el algoritmo Random Forest se ha conseguido elaborar mapas de coberturas del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento que corresponde a los años 2017, 2019 y 2021 con una exactitud temática considerable. Los resultados encontrados en la cartografía forestal indican que la cobertura boscosa es la más representativa en ambas zonas de estudio, encontrándose 94,29% de cobertura boscosa para el área natural protegida y 65,97% para su zona de amortiguamiento en relación con el área total evaluada respectivamente.

Durante el periodo de evaluación, la tasa de cambio de bosque a no bosque dentro del PNTM ha sido poco dinámica. Pese a ello, se ha incrementado de -0,26 en el periodo 2017 al 2019 a un valor de -1,24 en el periodo 2019 al 2021, como consecuencia de fenómenos naturales ocurridos debido a las altas precipitaciones y las pendientes pronunciadas propias de la zona de estudio, sin embargo; la cobertura boscosa se ha mantenido relativamente estable.

Mientras que los bosques de la ZA han sufrido una transición muy dinámica, con tasas de cambio de -2,97 en el periodo 2017 al 2019 a un valor de -4,39 en el periodo 2019 al 2021. Esto como consecuencia de la deforestación generada por comuneros que talan bosques para ampliar su frontera agrícola. Las métricas del paisaje utilizadas sugieren que los bosques del PNTM se encuentran moderadamente fragmentados y los bosques de la ZA se encuentran fuertemente fragmentados.

A pesar de que el área natural protegida ha cumplido con el objetivo de mantener la cobertura vegetal del bosque de selva alta, las actividades agrícolas desarrolladas en la zona de amortiguamiento representan una amenaza constante para la integridad del Parque Nacional Tingo María.

VII. RECOMENDACIONES

1. Considerar los hallazgos de la presente investigación respecto a la dinámica de la cobertura boscosa a fin de que las autoridades del Parque Nacional Tingo María y del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) tomen las decisiones necesarias correctivas y preventivas que coadyuven a la conservación de la integridad del bosque del área natural protegida.
2. Continuar con el monitoreo sistemático de la cobertura boscosa del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento, utilizando como insumo cartográfico productos de nuevos sensores como imágenes Planet y procesarlas digitalmente con diferentes algoritmos de inteligencia artificial, a través del fortalecimiento de las alianzas estratégicas existentes entre la Jefatura del Parque Nacional Tingo María, las diferentes facultades de la Universidad Nacional Agraria de la Selva y el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana.
3. Analizar las métricas del paisaje del Parque Nacional Tingo María y su zona de amortiguamiento asociándolas a las variables de infraestructura de transporte, variables físico-naturales y variables socioeconómicas al momento de calcular el grado de fragmentación, a fin de que sea posible predecir escenarios futuros y conocer los motores directos de la deforestación en la zona de estudio.
4. Capacitar periódicamente al personal del Parque Nacional Tingo María en temas relacionados a las geotecnologías, como el acceso a las diversas plataformas de sistemas de información geográfica, así como el procesamiento digital de imágenes satélites que se encuentran en el ciberespacio y de esta manera puedan manejar mejores herramientas para el control y vigilancia del área natural protegida.

VIII. REFERENCIAS

- Aguirre, J., Guerrero, E., & Campana, Y. (2021). How effective are protected natural areas when roads are present? An analysis of the Peruvian case. *Environmental Economics and Policy Studies*, 23(4), 831-859.
- Alberca, C. V. & Pintado, G. L. (2019). *Cambios de Cobertura Vegetal en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe-San Ignacio-Cajamarca, Mediante Imágenes de Satélite, Periodo 1988–2018* (Tesis de grado, Universidad Nacional de Jaén). Archivo digital. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3072267>.
- Argotty, F., Zamora, J.C., Brenes, C., Schlesinger, P., Cifuentes Jara, M., Imbach, P. & Chacón, M. (2018). *Manual metodológico para la construcción de niveles de referencia para REDD+*. Argüello Leiva, M; & Cifuentes Jara, M. (eds.) Turrialba, Costa Rica, CATIE. 42 p. (Serie técnica Manual técnico no. 140).
- Bax, V., & Francesconi, W. (2018). Environmental predictors of forest change: An analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru. *Applied geography*, 91, 99-110.
- Bishop, Y., Fienberg, S., Holland, P., Light, R., & Mosteller, F. 1977. *Book Review: Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*. *Applied Psychological Measurement*, 1(2), 297-306. <https://doi.org/10.1177/014662167700100218>.
- Borrás, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G. & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 48, 55-66.
- Breiman, L. (2001). Random forest. *Machine learning*, 45, 5-32.
- Campos, A., Guerrero, E. & Gines, E. (2018). Evolución de la cobertura vegetal en el Parque Nacional Cerros de Amotape de Tumbes utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): 2000–2014. *Manglar*, 15, 47-56.

- Chahua, E. (2019). *Análisis de la deforestación en el periodo 2006-2018 del distrito Daniel Alomía Robles – Huánuco*. (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva) Archivo digital. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1686>.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (No. 528.8 CHU).
- Clark, M. L. (2020). Comparison of multi-seasonal Landsat 8, Sentinel-2 and hyperspectral images for mapping forest alliances in Northern California. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 26-40.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 [software]. *Geoscientific Model Development*, 8, 1991-2007.
- Coomes, O. T., Takasaki, Y., & Rhemtulla, J. M. (2016). Forests as landscapes of social inequality: tropical forest cover and land distribution among shifting cultivators. *Ecology and Society*, 21(3), 20.
- Cotrina, A., Bandopadhyay, S., Rojas, N., Banerjee, P., Torres, C. & Oliva, M. (2021). Peruvian Amazon disappearing: Transformation of protected areas during the last two decades (2001–2019) and potential future deforestation modelling using cloud computing and MaxEnt approach. *Journal for Nature Conservation*, 64, 126081.
- Daryaei, A., Sohrabi, H., Atzberger, C., & Immitzer, M. (2020). Fine-scale detection of vegetation in semi-arid mountainous areas with focus on riparian landscapes using Sentinel-2 and UAV data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105686.
- De Luque, M. A., Pérez, Y. P., Rodríguez, Y. A., & Rodríguez, C. J. (2019). Análisis del

proceso de fragmentación de bosques: metodologías orientadas en el uso de sistemas de información geográfica y métricas del paisaje. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 5, 32-41.

Decreto Supremo 018-2015-MINAGRI. (30 de setiembre del 2015). Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para la gestión forestal de la Ley Forestal y de Fauna Silvestre 29763. Diario Oficial El Peruano. Perú.

Delgado, E. C. (2018). Cambios de uso de suelo y cobertura vegetal en el área de conservación privada Hierba Buena-Allpayacku y su área circundante, Amazonas, 2017 (Tesis de grado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza). Archivo digital. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1464>.

Díaz, A. (2003). *Instrumentos para la planificación integral del uso de la tierra con sistemas de información geográfica: un caso de estudio en Argentina* (Tesis de doctorado, Universidad Humboldt de Berlín). Archivo digital. <https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/15743>.

Dwiyahreni, A., Fuad, H., Sunaryo, Soesilo, T., Margules, C., & Supriatna, J. (2021). Forest cover changes in Indonesia's terrestrial national parks between 2012 and 2017. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(3), 1235-1242.

European Space Agency (ESA) 2021. Copernicus. S-1, S-2, S-3: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

European Space Agency (ESA) 2022. Sentinel online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.

FAO (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. <http://www.fao.org/3/w0015e/w0015e00.htm>.

FAO y PNUMA (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>.

- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., Quintano, C., Marcos, E. & Calvo, L. (2017, del 3 al 7 de octubre). Utilización de las imágenes Sentinel-2 para cartografía de área quemada. En Ruiz, L.A., J.Estornell, J. y Erena, M. (Ed.). *XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Nuevas plataformas y sensores de teledetección aplicados a la gestión del agua, la agricultura y el medio ambiente*. pp. 499-502. Murcia, España: Universitat Politècnica de València.
- Giuliani, G., Mazzetti, P., Santoro, M., Nativi, S., Van Bemmelen, J., Colangeli, G., & Lehmann, A. (2020). Knowledge generation using satellite earth observations to support sustainable development goals (SDG): A use case on Land degradation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102068.
- Global Forest Watch (2020). *La pérdida de la cobertura mundial ascendió al 51% en el 2016*. GFW. <https://blog.globalforestwatch.org/es/data-and-research/la-perdida-de-cobertura-boscosa-mundial-ascendio-al-51-en-2016/>
- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Ideam, Igac & Cormagdalena (2008). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena.
- Instituto Geográfico Nacional España (IGNE). (2020). *El programa Copernicus para la monitorización del territorio y los objetivos del desarrollo sostenible*. Centro Nacional de Información Geográfica. <https://pcsitna.navarra.es/archivo/Documents.pdf>.
- Islam, M., Jimmy, A., Alam, M., & Khan, N. (2021). The use of multi-temporal Landsat normalized difference vegetation index (NDVI) data for assessing forest cover change

- of Lawarchara National Park. *Environment, Development and Sustainability*, 23(12), 17702-17722.
- Jauro, T. I., Tesfamichael, S. G., & Rampedi, I. T. (2020). Tracking conservation effectiveness in the Vhembe Biosphere Reserve in South Africa using Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-22.
- Jensen, J. (2015). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 4th ed. University of South Carolina. Pearson series in geographic information science. 623 p.
- Kim, D. H., Sexton, J. O., Noojipady, P., Huang, C., Anand, A., Channan, S., Feng, M.; & Townshend, J. R. (2014). Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000. *Remote Sensing of Environment*, 155, 178-193.
- Landis, J., & Koch, G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159- 174. <https://doi.org/10.2307/2529310>.
- Ley N° 26834. Ley de Áreas Naturales Protegidas. Ministerio del Ambiente. 30 de junio de 1997. Perú. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-26834.pdf>.
- Li, J., Wang, J., Fang, P., Xu, W. & Dai, Q. 2021. Forest Type Mapping at a Regional Scale Based Using Multitemporal Sentinel-2 Imagery. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021*, pp. 4228-4231, <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554083>.
- Marquardt, K., Pain, A., Bartholdson, Ö. & Romero, L. (2019). Forest Dynamics in the Peruvian Amazon: Understanding Processes of Change. *Small-scale Forestry* 18, 81–104. <https://doi.org/10.1007/s11842-018-9408-3>.
- McGarigal K., Tagil S., & Cushman S. (2009). Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landscape Ecology*, 24, 433–450,
- McGarigal, K., Cushman, S.A., & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis*

- Program for Categorical and Continuous Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- McMurray, A., Casarim, F., Bernal, B., Timothy, P., & Sidman, G. (2017). *Los servicios ecosistémicos de los bosques tropicales y un marco propuesto para evaluarlos. Análisis sobre los servicios ecosistémicos proporcionados por las plantaciones de árboles y por los sistemas agroforestales*. Winrock International. <https://winrock.org/wp-content/uploads/2018/02/Marco-servicios-ecosistemicos-28122917.pdf>
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2014). *Informe Final del Proyecto: Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad Andina. Componente Nacional Perú – Primera Etapa*. Centro de Datos para la Conservación. Dirección General de Ordenamiento Territorial - Ministerio del Ambiente. Perú.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2014). *Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación*. (1ra ed.). Dirección General de Ordenamiento Territorial.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2019). *Apuntes del bosque N° 1. Cobertura y deforestación en los bosques húmedos amazónicos 2018*. Programa Nacional de conservación de bosques para la mitigación del cambio climático.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2022). *Bosques y pérdida de bosques*. Geobosques. <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>.
- Pérez, C., & Muñoz, A. (2006). *Teledetección nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca.
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291.
- Puerta, R., & Fajardo, R. (2022). Cobertura boscosa al 2021 en la provincia Leoncio Prado,

Perú. *The Biologist (Lima)*, 20(1), 93-101.

Puerta, R., Esenarro, D., Cesar, J., Rodriguez, C., & Aylas, C. (2021). Open-access geographic sources and data for the study and management of natural resources. *Journal of Contemporary Issues in Business & Government*, 27(3), 848-857.

Ramachandra, T. V., Bhat, S. P., Kulkarni, G., & Aithal, B. H. (2019). Assessment of forest dynamics in Chikkamagalur District, Central Western Ghats using temporal remote sensing data and spatial metrics. *Indian Forester*, 145, 757-766.

Rodríguez Galiano, V. & Chica-Rivas, M. (2012, del 19 al 21 de setiembre). Clasificación de imágenes de satélite mediante software libre: nuevas tendencias en algoritmos de Inteligencia Artificial. In *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, Madrid, AGE-CSIC (pp. 19-21).

Rojas, E., Zutta, B. R., Velazco, Y. K., Montoya-Zumaeta, J. G., & Salvà-Catarineu, M. (2021). Deforestation risk in the Peruvian Amazon basin. *Environmental Conservation*, 48(4), 310-319.

Román, M. (2014). Valoración económica de los servicios ambientales del Parque Nacional Tingo María: Cueva de las Lechuzas–Cataratas Gloria Pata y Sol Naciente (Tesis de Maestría, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann) Archivo digital. <http://www.tesis.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/989>.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP). (2022a). Lista Oficial de las Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/2560580-listado-oficial-de-las-areas-naturales-protegidas>.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP). (2022b). *Plan Maestro 2022-2026 del Parque Nacional Tingo María*. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/normas-legales/2712445-027-2022-sernanp>.

- Shaharum, N.S.N., Shafri, H.Z.M., Gambo, J., & Abidin, F.A.Z. (2018). Mapping of Krau Wildlife Reserve (KWR) protected area using Landsat 8 and supervised classification algorithms. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *10*, 24-35.
- Vargas, J. B. (2019). Carbono en la biomasa área arbórea viva del tramo Tres de Mayo–río Oro de la zona Silvestre del Parque Nacional Tingo María (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva) Archivo digital. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1596>.
- Veerabhadraswamy, N., Devagiri, G., & Khaple, A. (2021). Fusion of complementary information of SAR and optical data for forest cover mapping using random forest algorithm. *Current Science*, *120*(1), 193-199.
- Wade, C. M., Austin, K. G., Cajka, J., Lapidus, D., Everett, K. H., Galperin, D., Maynard, R. & Sobel, A. (2020). What is threatening forests in protected areas? A global assessment of deforestation in protected areas, 2001–2018. *Forests*, *11*(5), 539.

IX. ANEXOS

Figura 8

Entrevista con comuneros y personal del PNTM sector La Quinceañera

**Figura 9**

Ingreso principal al PNTM sector Cueva de las Pavas



Figura 10

Río Tres de Mayo luego del deslizamiento de tierras ocurrido el 2021



Figura 11

Catarata Gloriapata en el sector Tres de Mayo – PNTM



Tabla 24*Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2017*

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
1	Bosques	Bosques	Verdadero	387089	8964039
2	Bosques	Bosques	Verdadero	388967	8968749
3	Bosques	Bosques	Verdadero	390184	8967823
4	Bosques	Bosques	Verdadero	390222	8960126
5	Bosques	Bosques	Verdadero	384187	8959405
6	Bosques	Bosques	Verdadero	390205	8962037
7	Bosques	Bosques	Verdadero	387808	8962825
8	Bosques	Bosques	Verdadero	385980	8961785
9	Bosques	Bosques	Verdadero	383147	8960830
10	Bosques	Bosques	Verdadero	392099	8960612
11	Bosques	Bosques	Verdadero	389819	8966546
12	Bosques	Bosques	Verdadero	391010	8963780
13	Bosques	Bosques	Verdadero	389102	8962125
14	Bosques	Bosques	Verdadero	388800	8963736
15	Bosques	V. secundaria	Falso	386049	8965107
16	Bosques	Bosques	Verdadero	386641	8962220
17	Bosques	V. secundaria	Falso	385125	8962273
18	Bosques	Bosques	Verdadero	385864	8960974
19	Bosques	Bosques	Verdadero	383419	8961259
20	Bosques	Bosques	Verdadero	383252	8960291
21	Bosques	Bosques	Verdadero	383189	8958997
22	Bosques	Bosques	Verdadero	384244	8958029
23	Bosques	Bosques	Verdadero	387411	8960807
24	Bosques	Bosques	Verdadero	390793	8960212
25	Bosques	Bosques	Verdadero	392261	8959227
26	Bosques	Bosques	Verdadero	390753	8958005
27	Bosques	Bosques	Verdadero	392118	8957322
28	Bosques	Bosques	Verdadero	389499	8960323
29	Bosques	Bosques	Verdadero	388459	8959918
30	Bosques	Bosques	Verdadero	389054	8958537
31	Bosques	Bosques	Verdadero	393031	8958696

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
32	Bosques	Bosques	Verdadero	392698	8960672
33	Bosques	Bosques	Verdadero	390007	8962847
34	Bosques	Bosques	Verdadero	392333	8962926
35	Bosques	Bosques	Verdadero	392206	8964188
36	Bosques	Bosques	Verdadero	391602	8965379
37	Bosques	Bosques	Verdadero	389515	8965419
38	Bosques	Bosques	Verdadero	391428	8966712
39	Bosques	Bosques	Verdadero	390531	8966776
40	Bosques	Bosques	Verdadero	387507	8969062
41	Bosques	Bosques	Verdadero	388205	8966911
42	Bosques	Bosques	Verdadero	389967	8968697
43	Bosques	Bosques	Verdadero	389491	8968332
44	Bosques	Bosques	Verdadero	388308	8968268
45	Bosques	Bosques	Verdadero	387657	8968586
46	Bosques	Bosques	Verdadero	387197	8967578
47	Bosques	Bosques	Verdadero	386229	8967427
48	Bosques	Bosques	Verdadero	386999	8966165
49	Bosques	Bosques	Verdadero	386364	8965490
50	V. secundaria	Río	Falso	389594	8969477
51	V. secundaria	Bosques	Falso	390393	8968479
52	V. secundaria	T. desnudas	Falso	385818	8967476
53	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	386225	8966747
54	V. secundaria	T. desnudas	Falso	385995	8965899
55	V. secundaria	T. desnudas	Falso	386530	8965903
56	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	385980	8965353
57	V. secundaria	T. desnudas	Falso	384937	8962892
58	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	384958	8962676
59	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	389918	8957845
60	V. secundaria	T. desnudas	Falso	389891	8958165
61	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	393111	8957598
62	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	393268	8958085
63	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	390694	8968619
64	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	391085	8967493
65	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	391769	8966547

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
66	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	390644	8965993
67	V. secundaria	Bosques	Falso	389132	8966916
68	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	385964	8968026
69	V. secundaria	V. secundaria	Verdadero	386386	8968553
70	T. desnudas	V. secundaria	Falso	386703	8969019
71	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386511	8968684
72	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386498	8968228
73	T. desnudas	V. secundaria	Falso	386554	8967966
74	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386011	8968293
75	T. desnudas	V. secundaria	Falso	386524	8967365
76	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	388548	8968692
77	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	389452	8969496
78	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	389991	8969057
79	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	388895	8967451
80	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	392207	8965349
81	T. desnudas	V. secundaria	Falso	393158	8960390
82	T. desnudas	V. secundaria	Falso	393385	8958238
83	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	390496	8958498
84	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	388750	8960251
85	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	389791	8959121
86	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386567	8962074
87	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386627	8961624
88	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384461	8962560
89	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	391102	8957569
90	Río	Río	Verdadero	386903	8969267
91	Río	Río	Verdadero	387515	8968841
92	Río	Río	Verdadero	388044	8969142
93	Río	Río	Verdadero	388788	8968917
94	Río	Río	Verdadero	389297	8969545
95	Río	Río	Verdadero	390123	8969502
96	Río	Río	Verdadero	390943	8968228
97	Río	Río	Verdadero	391772	8967018
98	Río	Río	Verdadero	392894	8963407

Tabla 25*Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2019*

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
1	Bosques	Bosques	Verdadero	390101.4	8958105
2	Bosques	Bosques	Verdadero	388748	8963848
3	Bosques	Bosques	Verdadero	391188.5	8965589
4	Bosques	Bosques	Verdadero	388116.7	8965962
5	Bosques	Bosques	Verdadero	390426.5	8966772
6	Bosques	Bosques	Verdadero	388156.4	8966859
7	Bosques	Bosques	Verdadero	388037.3	8968351
8	Bosques	Bosques	Verdadero	389108.9	8968693
9	Bosques	Bosques	Verdadero	385904.1	8965914
10	Bosques	V. Secundaria	Falso	385118.3	8962694
11	Bosques	Bosques	Verdadero	389039.1	8964917
12	Bosques	Bosques	Verdadero	390497.5	8959905
13	Bosques	Bosques	Verdadero	382685.5	8960877
14	Bosques	Bosques	Verdadero	384076.9	8957239
15	Bosques	Bosques	Verdadero	391285.5	8960911
16	Bosques	Bosques	Verdadero	388603.2	8959536
17	Bosques	Bosques	Verdadero	386356.8	8962252
18	Bosques	Bosques	Verdadero	385602.4	8961816
19	Bosques	Bosques	Verdadero	385384.5	8961045
20	Bosques	Bosques	Verdadero	390810	8967386
21	Bosques	Bosques	Verdadero	391748.8	8963647
22	Bosques	Bosques	Verdadero	389737.1	8960865
23	Bosques	Bosques	Verdadero	390340.6	8961451
24	Bosques	Bosques	Verdadero	392469.6	8960730
25	Bosques	Bosques	Verdadero	388312.2	8961954
26	Bosques	Bosques	Verdadero	384037.3	8960295
27	Bosques	Bosques	Verdadero	387205.7	8967738
28	Bosques	Bosques	Verdadero	389888	8968526
29	Bosques	Bosques	Verdadero	388681	8967470
30	Bosques	Bosques	Verdadero	387591.3	8966665
31	Bosques	Bosques	Verdadero	386116.1	8964921

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
32	Bosques	Bosques	Verdadero	387574.5	8965408
33	Bosques	Bosques	Verdadero	388815.1	8966648
34	Bosques	Bosques	Verdadero	390323.8	8966263
35	Bosques	Bosques	Verdadero	390776.5	8964905
36	Bosques	Bosques	Verdadero	388848.6	8965486
37	Bosques	Bosques	Verdadero	384573.8	8960809
38	Bosques	Bosques	Verdadero	390877.1	8963374
39	Bosques	Bosques	Verdadero	389301.2	8964179
40	Bosques	Bosques	Verdadero	387926.6	8964950
41	Bosques	Bosques	Verdadero	388379.2	8962804
42	Bosques	Bosques	Verdadero	383249.4	8960809
43	Bosques	Bosques	Verdadero	383534.4	8959736
44	Bosques	Bosques	Verdadero	383852.9	8958261
45	Bosques	Bosques	Verdadero	391949.9	8961765
46	Bosques	Bosques	Verdadero	385143.8	8960256
47	Bosques	Bosques	Verdadero	392134.4	8960088
48	Bosques	Bosques	Verdadero	392335.5	8959200
49	Bosques	Bosques	Verdadero	392067.3	8957842
50	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	386359	8968729
51	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	386092.3	8968576
52	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	386479.7	8967338
53	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	386172.8	8966987
54	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	386642.4	8966521
55	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	385762.7	8966551
56	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	385910.2	8967531
57	V. Secundaria	Bosques	Falso	389943.7	8969129
58	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	389305.4	8969218
59	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	388733.3	8968798
60	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	391992.9	8966450
61	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	392284	8966006
62	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	392452	8964271
63	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	391208.5	8964569
64	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	392657.1	8962809
65	V. Secundaria	Bosques	Falso	393184	8960346

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
66	V. Secundaria	T. desnudas	Falso	393412.1	8958682
67	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	392898.3	8957751
68	V. Secundaria	Bosques	Falso	391628.3	8957989
69	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	385817.9	8962075
70	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	383523.7	8961712
71	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384449.8	8961426
72	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384693.2	8962590
73	T. desnudas	V. Secundaria	Falso	385967.2	8962251
74	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	387126.4	8963300
75	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385989.4	8967174
76	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385956.3	8968083
77	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386449.1	8968338
78	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386524.1	8967439
79	T. desnudas	V. Secundaria	Falso	386562.5	8969004
80	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	387442.1	8969186
81	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	391590.9	8966987
82	T. desnudas	V. Secundaria	Falso	389725.1	8969544
83	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	391787.5	8966726
84	T. desnudas	Bosques	Falso	392261.1	8965136
85	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	392557	8962115
86	T. desnudas	V. Secundaria	Falso	393157.5	8959477
87	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	393725	8958108
88	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	393088.4	8958180
89	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	389651.2	8958418
90	Río	Río	Verdadero	393893.5	8957735
91	Río	Río	Verdadero	393576.6	8958469
92	Río	Río	Verdadero	393321.1	8960136
93	Río	Río	Verdadero	392623.1	8962659
94	Río	Río	Verdadero	391191.7	8967696
95	Río	Río	Verdadero	389835.1	8969672
96	Río	Río	Verdadero	387796.7	8968973
97	Río	Río	Verdadero	388673	8968971
98	Río	Río	Verdadero	386980.3	8969047

Tabla 26*Verificación de la exactitud temática del mapa de coberturas al 2021*

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
1	Bosques	Bosques	Verdadero	388952	8964464
2	Bosques	Bosques	Verdadero	387694	8961450
3	Bosques	Bosques	Verdadero	390426	8960065
4	Bosques	Bosques	Verdadero	390954	8966661
5	Bosques	Bosques	Verdadero	384005	8957072
6	Bosques	V. Secundaria	Falso	385413	8963850
7	Bosques	Bosques	Verdadero	389463	8960685
8	Bosques	Bosques	Verdadero	388455	8968508
9	Bosques	Bosques	Verdadero	386571	8964130
10	Bosques	Bosques	Verdadero	392868	8960339
11	Bosques	Bosques	Verdadero	385053	8960782
12	Bosques	Bosques	Verdadero	387802	8960479
13	Bosques	Bosques	Verdadero	391225	8958961
14	Bosques	Bosques	Verdadero	388682	8964343
15	Bosques	Bosques	Verdadero	385149	8961370
16	Bosques	V. Secundaria	Falso	387348	8961205
17	Bosques	Bosques	Verdadero	384536	8958810
18	Bosques	Bosques	Verdadero	387542	8966714
19	Bosques	Bosques	Verdadero	392121	8960413
20	Bosques	Bosques	Verdadero	392757	8960144
21	Bosques	Bosques	Verdadero	390681	8960145
22	Bosques	Bosques	Verdadero	387036	8968037
23	Bosques	Bosques	Verdadero	388996	8965337
24	Bosques	Bosques	Verdadero	385180	8960980
25	Bosques	Bosques	Verdadero	391528	8958668
26	Bosques	Bosques	Verdadero	389501	8959556
27	Bosques	Bosques	Verdadero	388009	8962342
28	Bosques	Bosques	Verdadero	391769	8964464
29	Bosques	Bosques	Verdadero	383261	8958454
30	Bosques	Bosques	Verdadero	392119	8958250
31	Bosques	V. Secundaria	Falso	386041	8962659

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
32	Bosques	Bosques	Verdadero	392372	8963373
33	Bosques	Bosques	Verdadero	390170	8967546
34	Bosques	Bosques	Verdadero	387072	8966256
35	Bosques	Bosques	Verdadero	386552	8966772
36	Bosques	Bosques	Verdadero	386406	8966076
37	Bosques	Bosques	Verdadero	392657	8961972
38	Bosques	Bosques	Verdadero	392223	8959581
39	Bosques	Bosques	Verdadero	386285	8962240
40	Bosques	Bosques	Verdadero	391179	8965543
41	Bosques	Bosques	Verdadero	389494	8959132
42	Bosques	Bosques	Verdadero	392395	8960508
43	Bosques	Bosques	Verdadero	389646	8966482
44	Bosques	Bosques	Verdadero	382779	8959481
45	Bosques	Bosques	Verdadero	389302	8961170
46	Bosques	Bosques	Verdadero	390858	8960762
47	Bosques	Bosques	Verdadero	383102	8960368
48	Bosques	Bosques	Verdadero	390235	8968400
49	Bosques	Bosques	Verdadero	392208	8965786
50	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	390682	8958648
51	V. Secundaria	T. desnudas	Falso	387551	8962179
52	V. Secundaria	Bosques	Falso	390877	8957672
53	V. Secundaria	Bosques	Falso	389215	8960867
54	V. Secundaria	T. desnudas	Falso	391559	8959926
55	V. Secundaria	Bosques	Falso	391165	8957390
56	V. Secundaria	T. desnudas	Falso	389654	8958177
57	V. Secundaria	T. desnudas	Falso	386314	8963774
58	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	385249	8961829
59	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	384291	8961524
60	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	389861	8969829
61	V. Secundaria	Bosques	Falso	387004	8966784
62	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	386908	8969027
63	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	387283	8961855
64	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	393031	8957529
65	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	389377	8969643

ID	Cobertura clasificada	Cobertura verificada	Validación	Este	Norte
66	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	389111	8960586
67	V. Secundaria	Bosques	Falso	391409	8957366
68	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	387226	8961792
69	V. Secundaria	V. Secundaria	Verdadero	391151	8967983
70	T. desnudas	Bosques	Falso	388430	8964064
71	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384086	8957830
72	T. desnudas	V. Secundaria	Falso	388934	8969267
73	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385876	8964806
74	T. desnudas	Río	Falso	392633	8962348
75	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384804	8963216
76	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384603	8962651
77	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385988	8962955
78	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384647	8959495
79	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384452	8962700
80	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385819	8964751
81	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385358	8963844
82	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385755	8964269
83	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	385835	8963212
84	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	384000	8957914
85	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386344	8963753
86	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	392517	8962175
87	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386655	8961156
88	T. desnudas	T. desnudas	Verdadero	386363	8961419
89	T. desnudas	V. Secundaria	Verdadero	385940	8962533
90	Río	Río	Verdadero	389299	8969801
91	Río	Río	Verdadero	393359	8960383
92	Río	Río	Verdadero	389103	8969397
93	Río	Río	Verdadero	391421	8967384
94	Río	Río	Verdadero	389735	8969731
95	Río	Río	Verdadero	392944	8963413
96	Río	Río	Verdadero	392864	8961852
97	Río	Río	Verdadero	392911	8963542
98	Río	Río	Verdadero	386962	8969014