

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE  
DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y  
MEDIO AMBIENTE**



**TESIS**

**“Análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento  
de la Reserva Nacional de Tambopata-Madre de Dios, periodo 2013-2022”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y  
MEDIO AMBIENTE**

**AUTOR:**

Bach: VALERIANO QUISPE, Vladimir  
Deonicio

**ASESOR:**

Dr. SORIA DIAZ, Henry Francisco

**Puerto Maldonado, abril de 2024**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE  
DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y  
MEDIO AMBIENTE**



**TESIS**

**“Análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento  
de la Reserva Nacional de Tambopata-Madre de Dios, Periodo 2013-2022”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y  
MEDIO AMBIENTE**

**AUTOR:**

Bach: VALERIANO QUISPE, Vladimir  
Deonicio

**ASESOR:**

Dr. SORIA DIAZ, Henry Francisco

**Puerto Maldonado, abril de 2024**



## Dedicatoria

**A Dios**, por cuidar siempre de mí y de toda mi familia, por ser el guía a mi satisfactoria culminación de mi carrera profesional, y seguir avanzando en esta vida.

**A mis padres**, Isidro y Juana por el inmenso sacrificio que hicieron por brindarme todo lo necesario para ser un profesional, que a pesar de las dificultades vieron la manera de mi bienestar y por el amor incondicional que me dieron en todo momento.

**A mis hermanas**, Delfina y Vilma por su apoyo emocional, por sus constantes afectos de cariño y por sus buenos consejos que me dieron para seguir adelante siendo una mejor persona.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, especialmente a la escuela profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente y su cuerpo docente, de quienes estoy infinitamente agradecido por las enseñanzas y conocimientos adquiridos a lo largo de 5 años en la carrera.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC), como muestra de gratitud por el apoyo económico durante mi formación académica.

Al Dr. Henry Francisco Soria Díaz, por el asesoramiento desinteresado desde la elaboración del proyecto hasta la redacción final del presente informe de tesis.

A los docentes Dr. Gabriel Alarcón Aguirre, M.Sc Telésforo Vásquez Zavaleta y M.Sc Federico Kuaquira Huallpa por sus aportes y críticas constructivas en la revisión del presente trabajo.

# TURNITIN\_VLADIMIR VALERIANO QUISPE

## INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.unamad.edu.pe">repositorio.unamad.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="https://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://repositorio.unfv.edu.pe">repositorio.unfv.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://dspace.ups.edu.ec">dspace.ups.edu.ec</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://dspace.ucacue.edu.ec">dspace.ucacue.edu.ec</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://repositorio.upt.edu.pe">repositorio.upt.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
9	<a href="https://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a> Fuente de Internet	1%

## Resumen

Realizar un análisis multitemporal de la deforestación en áreas protegidas mediante imágenes de satélite es primordial para identificar las actividades antrópicas y cuantificar la tasa de cambios de uso que se generan en la cobertura forestal según la zona estudiada en el período analizado. En ese contexto, el objetivo del presente estudio fue realizar un análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en el período de 2013-2022. Para cuantificar la tasa de deforestación de las actividades antrópicas identificadas, se realizó una clasificación supervisada utilizando el método del Mapeo del Ángulo Espectral que está incluido en el complemento “*Semi-Automatic Classification Plugin – SCP*” del software QGIS. De acuerdo a los resultados obtenidos, desde el 2013 al 2022 hubo una pérdida de cobertura forestal de 14 456,92 ha, donde la “minería” y la “agropecuaria” fueron las dos actividades antrópicas que más deforestaron en el área de estudio. Estos resultados pueden ayudar en la toma de decisiones de los actores involucrados de la administración de la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata para controlar, monitorear y mitigar los efectos de la deforestación en aquellas zonas de alta presión antrópica.

**Palabras clave:** actividades antrópicas; deforestación; Reserva Nacional de Tambopata, Semi-Automatic Classification Plugin; zona de amortiguamiento.

## Abstract

A multitemporal analysis of deforestation in protected areas using satellite images is essential to identify anthropic activities and quantify the rate of changes in use generated in the forest cover according to the area studied in the period analyzed. In this context, the objective of the present study was to make a multitemporal analysis of deforestation in the buffer zone of the Tambopata National Reserve in the period 2013-2022. To quantify the deforestation rate of the identified anthropic activities, a supervised classification was performed using the Spectral Angle Mapping method that is included in the "*Semi-Automatic Classification Plugin - SCP*" add-on of the QGIS software. According to the results obtained, from 2013 to 2022 there was a loss of forest cover of 14 456.92 ha, where "mining" and "farming" were the two anthropic activities that deforested the most in the study area. These results can help stakeholders involved in the administration of the Tambopata National Reserve's buffer zone make decisions to control, monitor, and mitigate the effects of deforestation in areas with high anthropogenic pressure.

**Keywords:** anthropic activities; deforestation; Tambopata National Reserve, Semi-Automatic Classification Plugin; buffer zone.

## Índice de contenido

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos .....	ii
Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Introducción .....	xi
<b>CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Formulación del problema .....	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general .....	2
1.3.2 Objetivos específicos .....	2
1.4 Variables de la investigación .....	3
1.5 Operacionalización de variables.....	3
1.6 Hipótesis.....	4
1.7 Justificación.....	5
1.8 Consideraciones éticas .....	6
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1 Antecedentes del estudio .....	7
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	7
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3 Antecedentes locales.....	8

2.2 Base teórica .....	9
2.2.1 Deforestación.....	9
2.2.2 Agricultura.....	10
2.2.3 Ganadería.....	10
2.2.4 Minería aurífera .....	11
2.2.5 Proyectos de infraestructura .....	11
2.2.6 Análisis multitemporal .....	11
2.2.7 Teledetección .....	12
2.2.8 Sensores remotos.....	12
2.2.9 Sistema de información geográfica (SIG) .....	13
2.2.10 Imágenes Landsat .....	13
2.2.11 Imágenes Sentinel 2 .....	15
2.3 Definición de términos .....	16
CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	18
3.1 Tipo de estudio.....	18
3.2 Diseño del estudio.....	18
3.3 Población y muestra .....	20
3.4 Métodos y técnicas.....	21
3.4.1 Cuantificación de la superficie deforestada por las actividades antrópicas.....	23
3.4.2 Determinación de la tasa media y anual de la deforestación del período de 2013-2022.....	31
3.4.3 Elaboración de la cartografía de cambios en la cobertura forestal del período de 2013-2022 .....	34
3.5 Tratamiento de los datos .....	34

CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	35
4.1 Cuantificación de las superficies deforestadas por las actividades antrópicas.....	35
4.1.1 Validación de los resultados de la clasificación supervisada .....	35
4.1.2 Superficie deforestada por las actividades antrópicas.....	37
4.2 Determinación de la tasa media y anual de la deforestación generado por las actividades antrópicas en el periodo 2013-2022.....	46
4.2.1 Tasa promedio anual (ha).....	46
4.2.2 Tasa de cambio en la cobertura del suelo .....	46
4.2.3 Tasas de deforestación (ha) según la FAO (1996) y Puyravaud (2003).....	47
4.2.4 Porcentaje de incremento de la deforestación según Riaño y Puerta (2021).....	49
4.3 Elaboración de la cartografía temática de cambios de uso en la cobertura forestal del área del estudio .....	49
4.3.1 Matriz de transición de cambios de uso de suelo .....	49
4.3.2 Cartografía de cambios en la cobertura forestal .....	51
CONCLUSIONES .....	53
SUGERENCIAS.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
ANEXOS.....	62

## Índice de tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables (variable independiente) .....	3
Tabla 2. Operacionalización de variables (variable dependiente).....	4
Tabla 3. Lista de bandas de la imagen de satélite Landsat 8 .....	15
Tabla 4. Lista de bandas de la imagen de satélite Sentinel-2A .....	16
Tabla 5. Leyenda de cobertura de la tierra adaptada al área de estudio. ....	22
Tabla 6. Escenas de imágenes de satélite (WRS-1 - <i>Worldwide Reference System</i> / Landsat) que conforman el área de estudio.....	22
Tabla 7. Escenas de imágenes de satélite (WRS-1 - <i>Worldwide Reference System</i> / Sentinel) que conforman el área de estudio.....	23
Tabla 8. Información de imágenes satelitales del 2013 al 2022.....	24
Tabla 9. Combinación de bandas .....	25
Tabla 10. Niveles de precisión según índice kappa. ....	30
Tabla 11. Esquema de matriz de error.....	30
Tabla 12. Valores de validación según el índice de Kappa.....	35
Tabla 13. Cuantificación de las clases de la clasificación supervisada.....	37
Tabla 14. Tasa promedio anual de la deforestación en la zona de estudio. ....	46
Tabla 15. Tasas de cambio en la cobertura del suelo (%) .....	47
Tabla 16. Tasa de deforestación de bosque por períodos.....	48
Tabla 17. Incremento de la deforestación (%) .....	49

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio .....	19
Figura 2. Distribución de los puntos de ubicación de la muestra para validar el cambio de cobertura boscosa en la zona de amortiguamiento-RNT .....	21
Figura 3. Unión de escenas (mosaico) del Landsat 8 .....	26
Figura 4. Recorte de imagen de satélite Landsat 8 según el área de interés ...	27
Figura 5. Valores de índice de Kappa.....	36
Figura 6. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad minera.....	39
Figura 7. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad agropecuaria .....	40
Figura 8. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad de proyecto de infraestructura .....	41
Figura 9. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad de tala .....	42
Figura 10. Perdida de la cobertura forestal a consecuencia de las actividades antrópicas desde el 2013 al 2022 .....	43
Figura 11. Cuerpos de agua en la zona de estudio.....	44
Figura 12. Mapa de matriz de transición de cambio en la cobertura del suelo del periodo establecido.....	50
Figura 13. Cambio de cobertura forestal por la actividad minera en 2013 (a) y 2022 (b).....	51
Figura 14. Cambio de cobertura del suelo por la actividad agropecuaria en 2013 (c) y 2022 (d).....	51
Figura 15. Cambio de cobertura por la actividad de proyectos de infraestructura en 2013 (e) y 2022 (f) .....	52
Figura 16. Cambio de cobertura del suelo por la actividad de tala en 2013 (g) y 2022 (h).....	52

## Índice de anexos

Anexo 1. Matriz de operacionalización variables .....	62
Anexo 2. Matriz de consistencia .....	63
Anexo 3. Cartografía de usos de suelo según el período analizado (2013-2022) de la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata .....	64
Anexo 4. Matriz de confusión de los años 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022. ....	65
Anexo 5. Esquema de matriz de transición.....	68
Anexo 6. Panel fotográfico .....	68
Anexo 7. Diagrama de flujo de la metodología aplicada .....	71

## Introducción

El hombre a lo largo del tiempo ha realizado actividades como la agricultura para la producción de provisiones, la tala de árboles para extracción de madera y construir casas, establecimiento de pastos para ganadería, de modo que en el siglo pasado hubo gran presión sobre los bosques para el uso de los recursos forestales de manera descomunal. Con esto el ser humano pretende satisfacer sus necesidades y así continuar con su desarrollo (FAO 2010).

La deforestación es considerada una de las mayores actividades de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que se lleva una gran cantidad de biomasa de los árboles, poniendo en peligro la biodiversidad que la acompaña, no solo por la pérdida de especies arbóreas sino también por la pérdida de refugio para los animales y los servicios ecosistémicos. Dependiendo de la intensidad y periodicidad de las perturbaciones, la organización y composición florística del bosque puede cambiar de vez en cuando (MINAM 2009).

Los bosques del Perú forman el ecosistema más grande en cuanto a superficie, con 73 280 424 hectáreas, que representan el 57,3% del territorio nacional y juega un papel importante en el ciclo del agua indispensable para los seres vivos (MINAM 2016). A pesar de la importancia que tienen estos bosques, la deforestación bordea los 9,5 millones de hectáreas o casi tres veces el área de todo el departamento de Lima. Esto significa que más del 15% del total de bosques del Perú han sido destruidos, afectando significativamente la economía del país. Esto es razonable si se tiene en cuenta que cada año se pierden unas 150 mil hectáreas de bosque (Luque-Ramos 2021). Madre de Dios tiene un área de 8 475 908 hectáreas ocupadas por bosques tropicales (6,6% del territorio nacional), considerada una de las regiones más diversas del planeta por su alta flora y fauna endémica (GOREMAD 2020). No obstante, la explotación excesiva de los recursos naturales por medio de las prácticas ilegales y el mal manejo son

las principales causas de esta pérdida de diversidad, por el uso directo de las especies y alteración de los hábitats (GOREMAD 2015).

Ante esta problemática nació la importancia de realizar un análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en el período de 2013-2022, en vista que aún no se había realizado una identificación a detalle de las actividades antrópicas que promueven la deforestación en toda esa zona (siendo entre ellas la minería), a pesar de existir estudios realizados de períodos anteriores dentro de ella. Este estudio entre sus objetivos tuvo como finalidad realizar un análisis multitemporal, cuantificar la superficie deforestada, determinar la tasa media de deforestación y elaborar la cartografía temática de cambios en la cobertura forestal. Se ha trabajado con las variables: deforestación por actividad antrópica y tasa de deforestación anual en el período mencionado anteriormente. Para cumplir con los objetivos establecidos se usó imágenes satelitales Landsat 8, 7 y Sentinel-2A, los cuales fueron procesados con el software QGIS 3.22 para detectar los cambios ocurridos en la superficie terrestre a causa de la deforestación y pérdida de cobertura forestal durante el período establecido.

El presente estudio empleó una clasificación supervisada, utilizando el método del Mapeo del Ángulo Espectral (*Spectral Angle Mapper* – SAM en inglés), que está incluido en el complemento “*Semi-Automatic Classification Plugin* – SCP”. Este clasificador calcula la similitud de dos espectros en función de su distancia angular, suponiendo que forman dos vectores en un espacio n-dimensional. En ese caso, el clasificador identifica aquellas áreas o ejemplos homogéneos según la respuesta espectral de la cobertura de la tierra analizada (Congedo 2021). Además, aquellos lugares identificados se les denomina "áreas de entrenamiento", debido que se utilizan sus características espectrales para que el algoritmo de clasificación las compare estadísticamente con las de cualquier otra parte de la imagen (Boyd 1996; Chuvieco-Salinero 2008; Mendoza-Robles 2012; Wu et al. 2020; Congedo 2021).

## **CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Descripción del problema**

A nivel mundial, desde 1990 se estima que, a raíz de la acción antrópica, se perdió 420 millones de hectáreas de bosque, esto se evidencia que desde el 2015 al 2020 la tasa de deforestación anual se tasó en 10 millones de ha, mientras que entre el 2010 y 2015 fue de 12 millones ha (FAO 2020).

El Perú se diferencia por presentar una diversidad de ecosistemas forestales que refugian especies de flora y fauna de gran interés turístico y científico. No obstante, en la Amazonía peruana es evidente la deforestación en magnitudes extravagantes en los departamentos de Madre de Dios y Ucayali, durante las dos últimas décadas (SERFOR 2015).

En el contexto regional, Madre de Dios está inmerso en esta problemática, debido a las actividades de origen humana como los proyectos de infraestructura, la agropecuaria (ganadería y agricultura), la tala y, sobre todo, la minería, que alteran negativamente el estado natural de esos ecosistemas naturales.

A escala local, específicamente en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata, se identificó que la minería informal es la mayor actividad que está generando presión en la dinámica de la cobertura forestal en los últimos años, dando origen a la emisión de gases como el CO<sub>2</sub> que contribuyen al calentamiento global y alteran las condiciones climáticas en esos sectores, además de ocasionar la pérdida de los servicios ecosistémicos que son indispensables para los seres vivos. Ante esta situación, fue necesario realizar estudios para cuantificar la deforestación y tomar medidas de acción en la zona de amortiguamiento de dicha reserva, identificando las principales actividades antrópicas que están inmersos dentro de ello.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿Cuánto será la tasa de deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata, a consecuencia de las actividades antrópicas, mediante el uso de imágenes satelitales en el período de 2013-2022?

### **1.2.2 Problemas específicos**

**P.E.1:** ¿Cuánto será la tasa de superficie deforestada por las actividades antrópicas como la minería, agropecuaria, tala y proyectos de infraestructura?

**P.E.2:** ¿Cuánto será la tasa media y anual de la deforestación generado por las actividades antrópicas en el periodo de 2013-2022?

**P.E.3:** ¿Cómo será la cartografía temática de cambios en la cobertura forestal del área de estudio en el periodo de 2013-2022?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Realizar un análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en el período de 2013-2022.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

**O.E.1:** Cuantificar la superficie deforestada por las actividades antrópicas como la minería, agropecuaria, tala y proyectos de infraestructura.

**O.E.2:** Determinar la tasa media y anual de la deforestación generado por las actividades antrópicas en el periodo de 2013-2022.

**O.E.3:** Elaborar la cartografía temática de cambios en la cobertura forestal del área de estudio en el periodo de 2013-2022.

## 1.4 Variables de la investigación

### ➤ Variable dependiente

Tasa de deforestación anual en el periodo 2013-2022.

### ➤ Variable independiente

Deforestación por actividad antrópica.

## 1.5 Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables (variable independiente)

	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
VARIABLE INDEPENDIENTE	La deforestación por actividad antrópica se define como aquellas áreas de cobertura forestal que fueron afectados o alterados por la acción del hombre (Fearnside 2006; 2017; Ramos, Graça & Fearnside 2018).	La deforestación por actividad antrópica cuantificará la superficie deforestada como la minería, agropecuaria, tala y proyectos de infraestructura (Fearnside 2006; Congedo 2021).	Tasa de deforestación en hectáreas por actividad antrópica (IDEAM. 2002; Ruiz, Cárdenas & Baquero 2011; Forero-Riaño & Polanco-Puerta 2021).	1. Tasa anual. 2. Validación.	Tasa de deforestación: - ha año <sup>-1</sup> - Incremento en %.

Tabla 2. Operacionalización de variables (variable dependiente)

	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
VARIABLE DEPENDIENTE	La tasa de deforestación anual indica la cantidad total de área de cobertura forestal deforestada o afectada en el período analizado (Fearnside 2006; 2017; Ramos, Graça & Fearnside 2018)..	La tasa de deforestación anual cuantificará la superficie total de cobertura forestal deforestada o afectada en el período analizado (Fearnside 2006; Congedo 2021).	Tasa de deforestación en hectáreas (IDEAM. 2002; Ruiz, Cárdenas & Baquero 2011; Forero-Riaño & Polanco-Puerta 2021).	Tasa de deforestación en hectáreas por actividad antrópica.	Tasa media y anual de la deforestación por período: - ha año <sup>-1</sup> - % de cambio por año

## 1.6 Hipótesis

**Hipótesis nula (H0):** El análisis multitemporal de la deforestación no presenta precisión en las tasas relacionado a la identificación de las actividades antrópicas en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en el período de 2013-2022.

**Hipótesis alterna (H1):** El análisis multitemporal de la deforestación presenta precisión en las tasas relacionado a la identificación de las actividades antrópicas en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en el período de 2013-2022.

## 1.7 Justificación

El Perú es una potencia mundial en biodiversidad, con mayor extensión de bosques amazónicos, siendo el segundo país a nivel de Latinoamérica, el cuarto en bosques tropicales a nivel mundial y ocupa el sexto lugar en bosques primarios, los cuales ofrecen servicios ecosistémicos tales como: captura de carbono, regulación del clima y protección de la diversidad de la flora y fauna (MINAM 2016). Sin embargo, a lo largo de los años gran parte de la Amazonía peruana, dentro de ellas la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata, ha sufrido grandes consecuencias debido a la gran magnitud de deforestación, para lo cual fue necesario realizar un análisis multitemporal de las zonas afectadas mediante softwares de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el fin de identificar y mitigar este impacto ambiental. Esta zona necesita de un tratamiento especial para asegurar la subsistencia de los recursos forestales.

En la actualidad no existen estudios actualizados del estado en el que se encuentra esta zona de amortiguamiento con respecto a la pérdida de su cobertura forestal a consecuencia de la presión antrópica que se viene efectuando en estas últimas décadas. Este estudio de análisis multitemporal identificó los tipos de actividad antrópica que promueven presión en la cobertura forestal y calculó la tasa total deforestada del período 2013-2022. En ese contexto, el uso de técnicas de SIG y uso de tecnologías como los sensores remotos fue primordial para la valoración y monitoreo de los recursos naturales, es decir, mediante la aplicación de estas técnicas y tecnologías se obtuvo información más precisa y a menor costo.

El presente estudio presenta gran relevancia e interés para el personal técnico-administrativo de la Reserva Nacional de Tambopata porque se ha generado información detallada y actualizada en relación a la tasa de deforestación de la zona de amortiguamiento del período 2013-2022.

Por lo tanto, el empleo de softwares libres y gratuitos de SIG brindó información precisa sobre cuánto está afectando la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata, lo cual será de gran utilidad para la población y las autoridades del sector ambiental en la toma de decisiones, además de servir como base a la comunidad académica y científica para la realización de futuros estudios y líneas de investigación.

### **1.8 Consideraciones éticas**

La presente investigación cumplió con las pautas indicadas en el reglamento de grados y títulos de la UNAMAD vigente (Resolución de Consejo Universitario N° 288-2022-UNAMAD-CU), donde se aplicó técnicas de análisis y procesamiento de Sistemas de Información Geográfica y teledetección, utilizando software libre y gratuito como el QGIS 3.22.

Finalmente, se redactó el presente estudio conforme la estructura exigida del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNAMAD (Resolución de Consejo Universitario N° 288-2022-UNAMAD-CU) y las pautas de conducta responsable en investigación según las normas del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC).

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes del estudio**

#### **2.1.1 Antecedentes internacionales**

Camacho, Jara y Gonzales (2022) determinaron la forma cronológica de los cambios de la cobertura forestal a consecuencia de la deforestación en la provincia de Morona Santiago en Ecuador entre los años de 1990 a 2018. Además, el estudio demostró que 0,73% representa las áreas deforestadas del total de bosques y un 0,27% del área protegida, demostrando así el incremento acelerado de la agricultura.

Sandoval, González y Jiménez (2021) evaluaron el cambio en el uso de la vegetación y suelo en la microcuenca de la Mixteca Alta Oaxaqueña (México) desde el año 1995 al 2016, donde se usaron imágenes de alta resolución y el análisis se desarrolló con una clasificación basada en píxeles. Entre el periodo de 1995 al 2016 se evidenció un aumento del 6,6% en la cobertura forestal mientras que a consecuencia de las restauraciones estimuladas las áreas sin vegetación disminuyeron 4,1%.

Zimmermann et al. (2021) analizaron la dinámica de los incendios forestales en el Parque Nacional San Rafael de Paraguay en el periodo 2007-2017 mediante el análisis multitemporal, utilizaron el sensor MODIS y técnicas de SIG. Los resultados indicaron que indisputablemente del régimen pluvial durante el análisis, se registró ocurrencias de incendios. En cuanto a la fuente de calor registrada, los meses con mayor fuente de calor fueron desde junio a noviembre y con mayor pico: julio y agosto.

### 2.1.2 Antecedentes nacionales

OSINFOR (2014) cuantificó la pérdida de la cobertura forestal en la zona fronteriza de los países: Brasil, Colombia y Bolivia. Dicho estudio mostró que en las áreas no categorizadas la deforestación tuvo un mayor índice a comparación con las áreas concesionadas (categorizadas), también se demostró que las concesiones forestales presentan un grado menor de pérdida de cobertura forestal a comparación de las concesiones ya vencidas.

Mendoza et al. (2017) determinaron los cambios en la cobertura de bosques a consecuencia de la deforestación en el período 1987-2016 en el distrito de Leymebamba, provincia de Chachapoyas, departamento de Amazonas. Se emplearon imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM y de Landsat 8 OLI-TIRS, con nubosidad del 30% de los años 1989, 1998, 2007 y 2016. Se evidenció una alta deforestación de bosques en el periodo 1989-1998, con una tasa de 262,7 ha año<sup>-1</sup>, mientras que entre los periodos 1998-2007 y 2007-2016, la tasa de deforestación disminuyó significativamente a 34,8 ha año<sup>-1</sup> y 58,2 ha año<sup>-1</sup>, correspondientemente.

Campaña y Gines (2021) realizaron un estudio en la Reserva Nacional de Tumbes desde 1986 a 2019, con el fin de analizar la magnitud de la deforestación y la sequía en dicha reserva, utilizando imágenes Landsat. Para evaluar la sequía emplearon el NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada) y para la cobertura forestal el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Concluyeron que el NDWI tuvo valores entre 0,2 – 0,4 y > 0,4, clasificaron la zona con poca aridez y humedad. Además, se determinó que la vegetación alta (VA), se produjo en el año 1986 obteniendo 19 142,28 ha, y la más baja en los años 2005 y 2010, con una superficie de 15 401,5 y 15 094,53 ha, respectivamente.

### 2.1.3 Antecedentes locales

Alarcón et al. (2021) en el sureste de la Amazonia peruana realizaron un estudio para analizar la dinámica de pérdida de bosques y los cambios de uso de suelo entre 1999-2018. Para la cuantificación de la disminución de bosque

utilizaron imágenes Landsat 5 y 8, los cuales fueron procesadas utilizando una clasificación supervisada. Los resultados revelaron una disminución de bosque durante 1999-2018 de 1698,63 km<sup>2</sup>. Para los cambios de la cobertura boscosa a otros usos de la tierra se encontró la conversión de 841,41 km<sup>2</sup> durante 2014-2018, siendo la agricultura que mayor deforestación generó, mientras que la minería tuvo mayor incidencia en los sectores focalizados.

Gonzales (2018) analizó la deforestación y la disminución de la cobertura forestal en la provincia del Manu de Madre de Dios, entre los años 2000-2016. Este estudio dispuso de software ENVI para el procesamiento de imágenes satelitales de los sensores Landsat 5 y 8 para los años 2000, 2008 y 2016. De acuerdo a los resultados se evidenció que en el año 2000 la deforestación representó el 0,8% del total de la superficie de estudio. El 2008 tuvo un incremento de 1,11%, y en el 2016 existió otro incremento de 1,98% de áreas deforestadas.

Mendoza (2012) desarrolló un estudio en el Parque Nacional Bahuaja Sonene y en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional Tambopata, con el objetivo de cuantificar e identificar la cantidad y causa de áreas deforestadas. En sus resultados encontró lo siguiente: Pastizales Remontados (9 113,22 ha), Minería (7 178,50 ha), Pastizales (4 631,49 ha) y Tumba (1 443,15 ha). Dichos resultados mostraron que la actividad antrópica que genera mayor impacto y pérdida de cobertura forestal fue la minería.

## **2.2 Base teórica**

### **2.2.1 Deforestación**

La deforestación es la conversión a largo plazo o permanente de los bosques utilizando la tierra para otros fines, como la agricultura, los pastos, los depósitos de agua, la infraestructura y las áreas urbanas. Cabe señalar que el término deforestación no es aplicable a zonas en las cuales se removieron los árboles por la tala o cosecha, porque el bosque se regenera naturalmente o con medidas silvícolas (FAO 2018).

Por otro lado, Smith-Schwartz (2015) indica que la deforestación consiste en la disminución significativa de la cubierta forestal y la transformación de los bosques a consecuencia de diferente utilización territorial tales como plantíos de árboles, agricultura, pastizales, vías de acceso y áreas urbanas, excepto las superficies taladas ya que se regeneran naturalmente.

### **2.2.2 Agricultura**

Es una actividad que después de 3 o 4 cosechas continuas la tierra se vuelve poco productiva, a consecuencia de esta deficiencia de nutrientes en el suelo, el productor se ve en la necesidad de buscar tierras fértiles avanzando así al interior de los bosques primarios los cuales son talados irremediablemente (OSINFOR 2014).

Se la considera una de las principales actividades que genera recursos económicos para muchas familias. Como tal ejerce una gran presión sobre el medio ambiente comprometiendo así los recursos naturales del bosque, ya que dicha actividad requiere el indispensable deterioro y transformación de los hábitats naturales del bosque. Para satisfacer la demanda de la población a lo largo de la historia fue necesario el incremento de la producción, siendo posible a través de la expansión de la superficie cultivada y del aumento de la intensidad de uso de insumos químicos (fertilizantes, insecticidas y herbicidas). Este último tiene efectos negativos ya que genera la degradación del suelo, pérdida de hábitat y contaminación por la elevada utilización de estos insumos (Andrade 2016).

### **2.2.3 Ganadería**

La deforestación emite miles de millones de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases que ocasionan en la atmósfera el efecto invernadero. La producción pecuaria empeora estos efectos con la búsqueda de más tierras para pastorear el ganado, por lo que ha sido motivo de la destrucción de bosques tropicales en Latinoamérica (FAO 2010).

La ganadería en la selva peruana, no es una práctica extensiva e intensiva, como lo es en otros países tales como Brasil y Estados Unidos; sin embargo, los ganaderos emplean grandes extensiones de terreno para pastoreo, por lo que tienden a incrementar la deforestación (OSINFOR 2014).

#### **2.2.4 Minería aurífera**

La minería es una gran fuente de ingresos económicos en nuestro país, convirtiéndose desde algunos años en el producto de exportación más importante del Perú siendo sexto productor a nivel mundial. No obstante, esta práctica desarrollada en ciertos departamentos del país, trajo consigo una serie de problemas ambientales, ocasionando la deforestación de miles de hectáreas, contaminación de cauces de ríos y alteración de los ecosistemas forestales (Chung 2016).

En Madre de Dios, la minería artesanal y la pequeña minería en el Perú es una práctica que ha tomado gran importancia, dado el alto precio de este metal (oro) que con el pasar de los años su valor se va incrementando, lo que explica que muchas personas orienten su actividad a la explotación de yacimientos auríferos aluviales (OSINFOR 2014).

#### **2.2.5 Proyectos de infraestructura**

El desarrollo urbano y la infraestructura vial (carreteras), son una amenaza común que contribuyen a la deforestación. Es imposible que el ser humano logre su progreso sin tener que modificar los ecosistemas, a lo largo de los años se ha visto como ha causado estragos en los bosques para la ejecución de nuevos proyectos que favorecen el progreso del ser humano. De igual manera las vías de acceso asociadas con la extracción de madera y expansión de la minería, seguida por la agricultura comercial son una amenaza frecuente que generan la pérdida de cobertura y deterioro de los bosques (Pacheco et al. 2021).

#### **2.2.6 Análisis multitemporal**

De acuerdo con Gonzales (2018), es un método que permite analizar las transformaciones ocurridas en una determinada zona de estudio en diferentes

periodos de tiempo, obteniendo resultados diferenciados y relacionados con las transformaciones de las áreas de estudio. Mediante este procesamiento se convierte las series de datos que provienen de un período de tiempo en un único conjunto de datos.

### **2.2.7 Teledetección**

La teledetección se define como la técnica por la cual a partir de sensores que están situados en plataformas espaciales (satélites, drones y aviones) se obtienen datos de la superficie terrestre, utilizando como principal medio la radiación electromagnética. Entre el terreno y los sensores existe una interacción electromagnética, esto genera una secuencia de datos que una vez tratados de manera adecuada proporcionan información interpretable de la superficie terrestre (IDEP 2018).

Esta técnica permite adquirir una serie de informaciones a distancia de un objeto. Para ello se necesita que haya algún tipo de interconexión entre el objeto observado y el sensor situado en una plataforma (Cede et al. 2011).

### **2.2.8 Sensores remotos**

Los sensores son dispositivos que en distintos tipos de materiales detectan la radiación electromagnética del medio natural o artificial emitida por la tierra, en una determinada longitud de onda que brinda una señal de salida que es función de la magnitud que se desea medir con el propósito de enviar una señal y permitir que se detecte un cambio o continúe un proceso (Pérez 2007). Al momento de elegir un sensor se deben tener en cuenta varios factores, como por ejemplo: forma de la carcasa, distancia operativa, datos eléctricos y conexiones (Vanegas 2014).

Según la energía los sensores son clasificados normalmente en grupos: remotos pasivos y remotos activos. El primer grupo detectan y miden radiaciones electromagnéticas reflejadas o emitidas por la superficie terrestre (albedo) desde una fuente externa. Estos sensores no tienen radiación propia por lo que dependen de una fuente de luz externa como el sol. Por otro lado, los del segundo

grupo se caracterizan por tener su propia fuente de energía radiante que no dependen de fuentes externas para irradiar la tierra. El sensor emite un flujo de radiación en un cierto rango espectral que interactúa con el suelo y el sensor capta la parte que refleja (Pérez 2007).

### **2.2.9 Sistema de información geográfica (SIG)**

Son un conjunto de sistemas de software ,hardware, y procedimientos diseñados con la finalidad de facilitar la gestión, procesamiento, análisis, obtención, representación y salida de datos espacialmente georreferenciados (Sitjar 2009).

Se puede afirmar que el SIG es una tecnología muy útil que permite gestionar y analizar informaciones espaciales originadas a raíz de la necesidad de obtener en breve tiempo de informaciones para solucionar problemas socio-espaciales y así responder las diferentes interrogantes que se tiene casi de manera inmediata (Von Humboldt 2006).

### **2.2.10 Imágenes Landsat**

Las imágenes satelitales son una representación visual que se consigue al captar la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre mediante sensores que se encuentran montados en los satélites, la resolución de estas imágenes depende mucho de la calidad de sensor que se utilice. Existen diferentes tipos de imágenes satelitales las cuales poseen varias características, entre las más conocidas están las imágenes Landsat 7 (Sánchez 2012).

En ese contexto, el programa Landsat ha llevado a otro nivel la forma en que vemos y exploramos nuestro planeta. Este programa, que comenzó su viaje por el espacio en 1972 sigue registrando los cambios que viene ocurriendo en la superficie del planeta tierra, y es el único sistema satelital diseñado y utilizado para múltiples observaciones de la cobertura terrestre con una resolución aceptable (IGAC 2013).

### **Imagen de satélite Landsat 7**

Es el séptimo de un conjunto de satélites lanzados el 15 de abril de 1999 por Estados Unidos cuyo objetivo principal de la misión es brindar datos térmicos, infrarrojos y visibles, de alta calidad y oportunos de todas las regiones terrestres y para la actualización continua de los repositorios Landsat existentes. Los datos recién adquiridos deben ser lo suficientemente consistentes con los datos actualmente almacenados sobre la geometría, calibración, cobertura y espectros adquiridos para permitir la comparación de la detección y caracterización de las variaciones globales y regionales (Ihlen & Zanter 2019).

El Proyecto Landsat también continúa haciendo que todos los datos de sus imágenes satelitales estén disponibles sin costo alguno para el uso civil, de seguridad nacional y del sector privado de Estados Unidos, así como el uso académico, extranjero y usos comerciales (Ihlen & Zanter 2019).

### **Imagen de satélite Landsat 8**

El Landsat 8 LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) es el octavo satélite que continúa con el legado de archivos de los satélites anteriores, por ello pasa a convertirse en el satélite del futuro de observación de resolución media de la Tierra, ya que amplía, mejora y potencia la grabación de imágenes multiespectrales al tiempo que va conservando la misma calidad que sus antecesores (Gonzales 2018).

Este satélite consta de dos segmentos principales: el primero es el observatorio; que incluye una plataforma capaz de cargar dos sensores de observación de la tierra: *Operational Land Imager (OLI)* y *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*, los cuales recolectan datos para brindar imágenes correspondientes de la superficie de la Tierra, incluidas regiones costeras, zona ártica, islas y áreas continentales. El sistema terrestre es el segundo segmento que brinda las capacidades necesarias para planificar y programar operaciones y todo lo necesario para la gestión y entrega de datos (IGAC 2013).

Tabla 3. Lista de bandas de la imagen de satélite Landsat 8

<b>Landsat 8</b>	<b>Bandas</b>	<b>longitud de onda (micrómetros)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
	Banda 1 - Aerosol costero	0,43 – 0,45	30
	Banda 2 – Azul	0,45 – 0,51	30
	Banda 3 - Verde	0,53 – 0,59	30
	Banda 4 - Rojo	0,64 – 0,67	30
	Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0,85 – 0,88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1,57 – 1,65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2,1 – 2,29	30
	Banda 8 - Pancromático	0,50 – 0,68	15
	Banda 9 - Cirrus	1,36 – 1,38	30
	Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100
	Banda 11 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	11,50 – 12,51	100

Fuente: Adaptado de IGAC (2013).

### 2.2.11 Imágenes Sentinel 2

La misión Sentinel 2 es producto de una excelente colaboración de la Agencia Espacial Europea - ESA, la Comisión Europea y otros colaboradores de la industria aeroespacial. Esta misión consta de 2 satélites semejantes ubicados en la misma órbita polar y está diseñada para abastecer una alta frecuencia de revisita de 5 días en el Ecuador. Estos satélites son el Sentinel-2A que fue lanzado el 23 de junio de 2015 y el Sentinel-2B que fue lanzado 7 de marzo del 2017 (Framework et al. 2018).

Tabla 4. Lista de bandas de la imagen de satélite Sentinel-2A

<b>Bandas</b>	<b>Longitud de onda central (µm)</b>	<b>Resolución espacial (m)</b>
Banda 1 – coastal aerosol	0,443	60
Banda 2 – azul	0,49	10
Banda 3 – verde	0,56	10
Banda 4 – rojo	0,665	10
Banda 5 – Vegetation Red Edge	0,705	20
Banda 6 – Vegetation Red Edge	0,74	20
Banda 7 – Vegetation Red Edge	0,783	20
Banda 8 – NIR	0,842	10
Banda 8A – Vegetation Red Edge	0,865	20
Banda 9 – Vapor de agua	0,945	60
Banda 10 – SWIR – cirros	1,375	60
Banda 11 – SWIR	1,61	20
Banda 12 – SWIR	2,19	20

Fuente: Adaptado de Framework et al. (2018)

### 2.3 Definición de términos

**Análisis multitemporal:** Consiste en analizar una o muchas variables en una zona de estudio dentro de un período largo mediante imágenes de satélite, en tiempos diferentes (Gonzales 2018).

**Deforestación:** Transformación de bosques a otro tipo de uso territorial o la disminución reveladora a largo plazo de la cobertura forestal. Esto consiste en el cambio de los bosques naturales a plantíos de árboles, agricultura, pastizales, vías de exceso y zonas urbanas (Smith-Schwartz 2015).

**Captura de carbono:** Captura y almacenamiento de carbono del espacio en sumideros de carbono como océanos, bosques o tierra a través de procesos físicos o biológicos (GreenFacts 2022).

**Antrópico:** Es todo aquello producido o modificado por la actividad humana (RAE 2021).

**Cambio climático:** Son los cambios en partes del sistema climático, como las temperaturas de la tierra y los océanos y la distribución de las precipitaciones en medida que se observan cambios a lo largo de décadas (Serrano 2019).

**SIG:** Es una agrupación de técnicas, herramientas y datos que están hechos para trabajar de manera sistematizada y lógica para recopilar, almacenar, analizar, convertir y presentar toda la información geográfica y de sus caracteres para lograr múltiples objetivos (Von Humboldt 2006).

**Cobertura forestal:** Área cubierta por vegetación arbórea con formaciones naturales y formada por especies oriundas. Descarta las plantaciones de árboles utilizados en sistemas de producción agrícola (Gonzales 2018).

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación cuyo propósito es alcanzar seguridad alimentaria y conseguir que todos puedan acceder a una cantidad suficiente de alimentos para llevar una vida saludable (FAO 2020).

**Ecosistemas forestales:** Unidad de bosque natural donde habita la vida silvestre, este segmento de bosque está formado por los seres bióticos y abióticos que interactúan entre ellos (Gonzales 2018).

**LDCM:** La Misión de Continuidad de Datos de Landsat, una serie de satélite de observación Landsat diseñados para expandir, optimizar y avanzar en el registro de imágenes multiespectrales del área observada (IGAC 2013).

**Minería aurífera:** Actividad económica que consiste en la extracción de oro por mineros individuales o pequeñas empresas utilizando métodos rudimentarios (PNUMA 2015).

**OSINFOR:** Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre.

**OLI:** Tipo de sensor que utiliza avanzadas tecnologías de imágenes espaciales y brinda imágenes con una resolución espacial máxima de 15 m (IGAC 2013).

**TIRS:** Sensor térmico infrarrojo llamado *Thermal Infrared Sensor* (IGAC 2013).

## **CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1 Tipo de estudio**

El estudio aplicó el procesamiento de imágenes de satélite a través de algoritmos de sensores remotos, específicamente del “*Semi-Automatic Classification Plugin – SCP*” (Congedo 2021). Para ello, se desarrolló una investigación de tipo descriptivo y explicativo, porque consistió en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento (Claret-Veriz 2007). Es decir, se analizó y cuantificó la pérdida de cobertura forestal del período analizado en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata (IDEAM 2002; Ruiz, Cárdenas & Baquero 2011; Yanai et al. 2012; Fearnside 2017; Forero-Riaño & Polanco-Puerta 2021).

### **3.2 Diseño del estudio**

El estudio corresponde a un diseño longitudinal (tendencial), porque se realizó un análisis multitemporal (2013-2022) de la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en Madre de Dios, con la finalidad de identificar las actividades antrópicas que promueven la pérdida de cobertura forestal en el área de estudio (IDEAM 2002; Ruiz, Cárdenas & Baquero 2011; Yanai et al. 2012; Fearnside 2017; Forero-Riaño & Polanco-Puerta 2021).

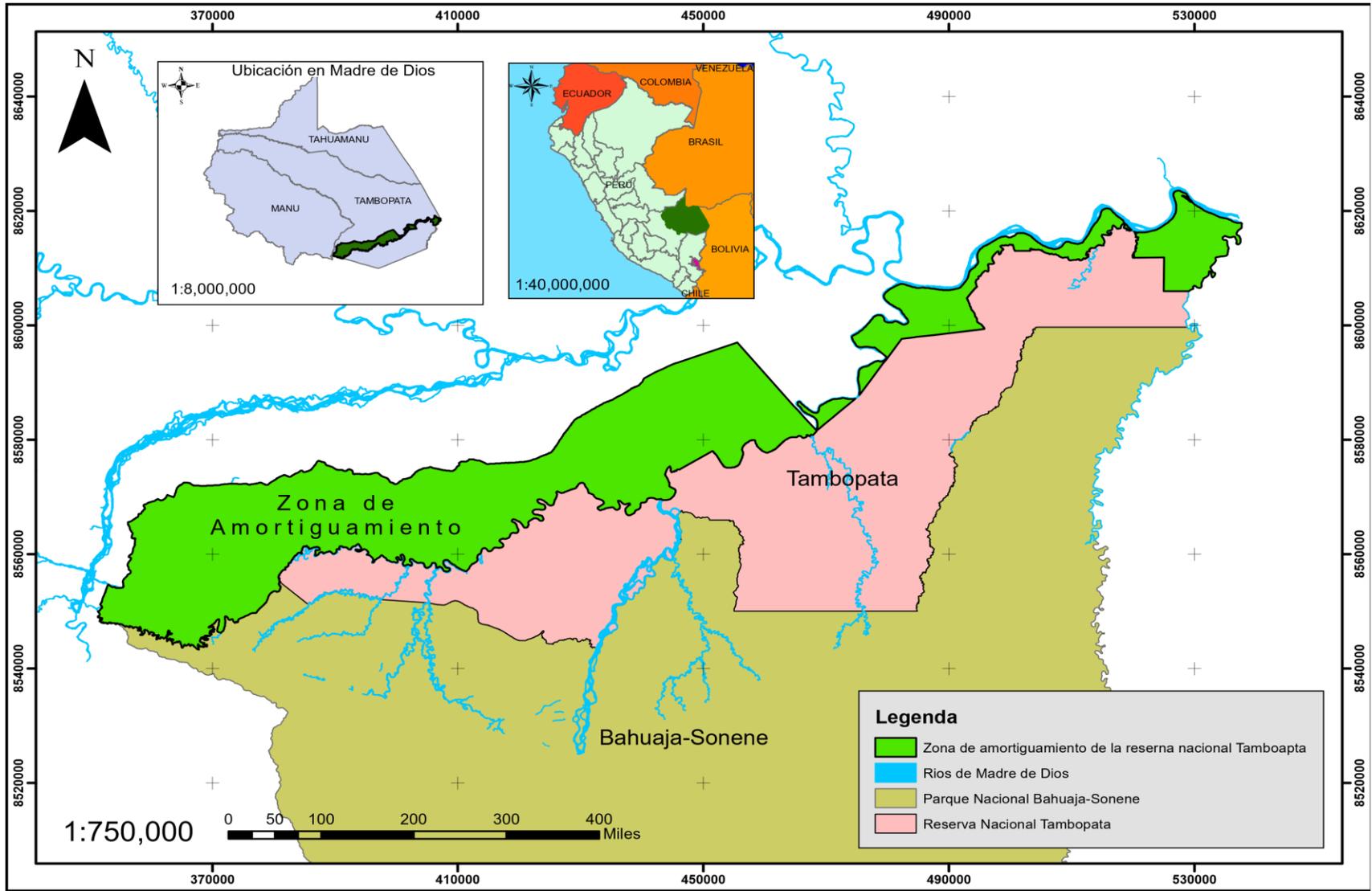


Figura 1. Ubicación del área de estudio

### 3.3 Población y muestra

El área de estudio se localiza en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata - RNT, provincia de Tambopata, abarcando una superficie de 2 316,93244 km<sup>2</sup> (231 693,244 ha) y representando la población del presente estudio.

Para realizar un análisis multitemporal de la deforestación en el periodo 2013 y 2022, se calculó el tamaño de muestra y se distribuyó para las áreas o clases de entrenamiento según el tamaño de la unidad de pixel de la imagen de satélite Landsat 8 (30 m x 30m = 0,09 ha = 0,0009 km<sup>2</sup>) del área de estudio. El tamaño de muestra se calculó mediante la siguiente fórmula (Aguilar-Barojas 2005; Chuvieco-Salineró 2008):

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{E^2(N - 1) + Z^2 * p * q} \quad (1)$$

Dónde:

n: Tamaño de muestra.

Z: Nivel de confianza o nivel determinado de probabilidad (95% = 1,96).

p: indica el porcentaje de aciertos estimado (50% = 0,5).

q: Indica el porcentaje de errores (q = 1 – p; 1-0,5 = 0,5).

N: Tamaño de la población (231 693,244 ha).

E: Precisión o error permitido: (5% = 0,05).

$$n = \frac{231\ 693,244 * 1,96^2 * 0,5 * 0,5}{0,05^2(231\ 693,244 - 1) + 1,96^2 * 0,5 * 0,5}$$

$$n = \frac{222\ 518,191}{580,191}$$

$$n = 383,525 \approx 384$$

En ese contexto, los 384 puntos de ubicación según el tamaño de pixel (0,09 ha) fueron distribuidas en el área de estudio mediante el método de muestreo probabilista simple estratificado, porque las muestras se seleccionaron en regiones o estratos de acuerdo a una variable auxiliar como las áreas o clases de entrenamiento de la clasificación supervisada (Chuvienco-Salineró 2008).

Las muestras fueron distribuidas mediante el método aleatorio simple estratificado en las siguientes categorías establecidas: (1) 93 para minería, (2) 105 para agropecuaria, (3) 16 para proyectos de infraestructura, (4) 11 para tala, (5) 35 para cuerpos de agua y (6) 124 para bosque.

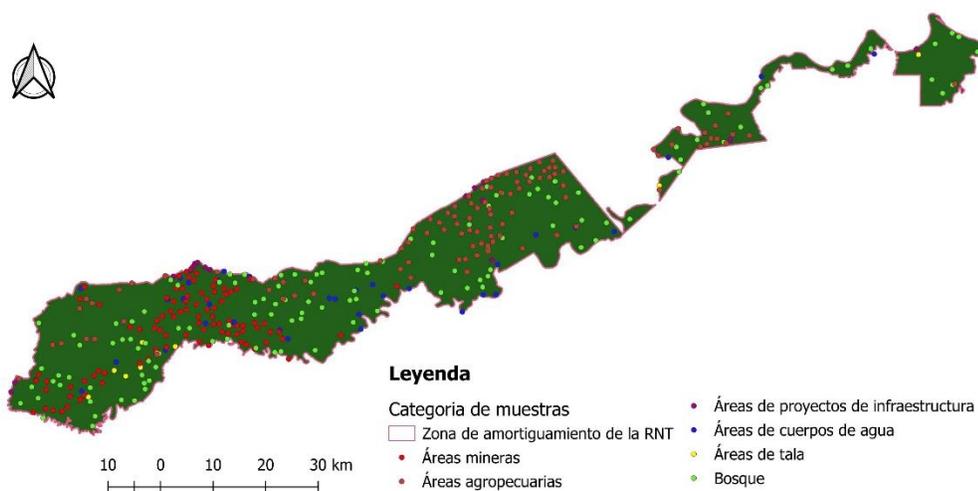


Figura 2. Distribución de los puntos de ubicación de la muestra para validar el cambio de cobertura boscosa en la zona de amortiguamiento-RNT

### 3.4 Métodos y técnicas

El período de análisis multitemporal de las escenas 8, 7 y Sentinel-2A fue anual, es decir, de 2013 a 2022, dando de preferencia a los meses donde las escenas del área de estudio presentan menor cobertura nubosa. Además, las escenas de dichas imágenes (Tabla 6 y 7) corresponden de referencia al área que abarca la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata (RNT), localizado en la provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios.

La leyenda utilizada del presente estudio se realizó en base a la metodología desarrollada por MapBiomás Perú (2023), el cual ha sido adaptado de acuerdo a los criterios técnicos de las clases identificadas en el área de estudio (Tabla 5).

Tabla 5. Leyenda de cobertura de la tierra adaptada al área de estudio.

<b>N°</b>	<b>Clases</b>	<b>Tipo</b>
1	Minería	Minería aurífera aluvial
		Otras áreas impactadas por la minería aurífera aluvial
2	Agropecuaria	Pasto
		Agricultura
		Ganadería
		Plantación forestal
3	Proyectos de infraestructura (antrópica)	Área sin vegetación (urbana, expansión urbana y/o rural)
		Carretera (pavimentada y asfaltada)
		Trocha carrozable
		Camino vecinal
4	Tala	Área deforestada en comunidades indígenas y/o campesinas
5	Cuerpos de agua	Río
		Cocha
		Embalse natural y/o artificial
6	Bosque	Bosque

Fuente: MapBiomás Perú (2023), adaptado al presente estudio.

Tabla 6. Escenas de imágenes de satélite (WRS-1 - *Worldwide Reference System* / Landsat) que conforman el área de estudio

Sensor	Patch/Row
Landsat 8 OLI + TIRS	002/069
	003/069
Landsat 7 ETM+	002/069
	003/069

Fuente: Land Viewer-EOS (*Earth Observing System*).

Tabla 7. Escenas de imágenes de satélite (WRS-1 - Worldwide Reference System / Sentinel) que conforman el área de estudio

Sensor	Zona
Sentinel-2A L2A	19 LCF (*)
	19 LDF

Fuente: Land Viewer-EOS (*Earth Observing System*).

(\*) LCF: Least Cloud First; LDF: Least Delay First.

### 3.4.1 Cuantificación de la superficie deforestada por las actividades antrópicas

#### a) Adquisición de imágenes de satélites

Las imágenes de los satélites Landsat 8, 7 y Sentinel-2A se descargaron de los servidores de LandViewer de EOS Inc (*Earth Observing System*) y *EarthExplorer* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con el fin de determinar la tasa de deforestación y los cambios en la cobertura forestal en el período 2013-2022. En el caso de las imágenes Landsat se usaron de la Colección 1 y Nivel 1, imágenes que no están ortorectificadas o corregidas al Tope de la Atmósfera (TOA). Se emplearon 2 escenas de imágenes satelitales que se obtuvieron gratuitamente desde los servidores públicos indicados con una nubosidad menor del 20% (Tabla 8). En vista que algunas escenas de imágenes Landsat 8 presentaron una nubosidad mayor del 20%, se optó por usar imágenes Landsat 7 y Sentinel-2A L2A para cubrir dichas zonas (Tabla 8).

Tabla 8. Información de imágenes satelitales del 2013 al 2022

Sensor	Escena	Fecha de adquisición	ID
Landsat 7 ETM+	002/069	2/07/2017	LE07_L1TP_002069_20170702_20200831_02_T1
	003/069	9/11/2015	LE07_L1TP_003069_20151109_20200903_02_T1
		31/08/2013	LE07_L1TP_003069_20130831_20200907_02_T1
Landsat 8 OLI + TIRS	002/069	16/08/2013	LC08_L1TP_002069_20130816_20170503_01_T1
		19/08/2014	LC08_L1TP_002069_20140819_20170420_01_T1
		18/07/2020	LC08_L1TP_002069_20200718_20200722_01_T1
		7/09/2015	LC08_L1TP_002069_20150907_20170404_01_T1
		17/08/2019	LC08_L1TP_002069_20190817_20190902_01_T1
		24/08/2016	LC08_L1TP_002069_20160824_20170322_01_T1
		22/08/2021	LC08_L1TP_002069_20210822_20210827_02_T1
		26/07/2017	LC08_L1TP_002069_20170726_20170810_01_T1
		25/08/2022	LC08_L1TP_002069_20220825_20220924_02_T1
	30/08/2018	LC08_L1TP_002069_20180830_20180911_01_T1	
	003/069	6/09/2018	LC08_L1TP_003069_20180906_20180912_01_T1
		29/08/2015	LC08_L1TP_003069_20150829_20200908_02_T1
		8/08/2019	LC08_L1TP_003069_20190808_20190820_01_T1
		10/08/2014	LC08_L1TP_003069_20140810_20170420_01_T1
		20/04/2020	LC08_L1TP_003069_20200420_20200508_01_T1
		16/09/2016	LC08_L1TP_003069_20160916_20170321_01_T1
		19/09/2017	LC08_L1TP_003069_20170919_20170930_01_T1
1/09/2022		LC08_L1TP_003069_20220901_20220910_02_T1	
Sentinel-2A L2A	19L	1/09/2021	S2A_tile_20210901_19LCF_0
	19L	18/09/2021	S2A_tile_20210918_19LDF_0

Fuente: Land Viewer-EOS (*Earth Observing System*)

### b) Corrección atmosférica (TOA)

Las imágenes satelitales Landsat 7 y 8, además del Sentinel-2A (ya vienen por defecto ortorectificadas, es decir, las imágenes están en su respectiva posición geográfica y/o proyectadas). Sin embargo, todas las escenas de las imágenes fueron preprocesadas para corregir automáticamente la reflectancia al Tope de la Atmósfera (TOA) mediante el “*Semi-Automatic Classification Plugin – SCP*” del software QGIS 3.22, porque la mayoría de ellas muestran alteraciones de la radiancia debido a la

presencia de la atmósfera, muchas veces asociado a una disminución del contraste y reflexión aparente de algunas superficies (Pinilla et al. 2001; Chuvieco-Salineró 2008).

### c) Composición o juego de bandas

Las imágenes de los satélites Landsat 7, 8 y Sentinel-2A descargadas de la web de los servidores públicos, vienen en formato TIFF por bandas y/o comprimidas en formato ZIP o RAR. Una vez descomprimidas las imágenes satelitales y con el software QGIS 3.22, se realizó la composición o apilamiento de bandas (Red, Green, Blue) de acuerdo al criterio técnico para diferenciar mejor los objetos espaciales, es decir, combinar las bandas adecuadas para poder discernir las zonas deforestadas (agropecuaria, minería, urbana, etc.) en el área de estudio. Por ende, se usó la combinación de análisis de la vegetación para poder visualizar mejor las áreas deforestadas por las actividades antrópicas (Tabla 9).

Tabla 9. Combinación de bandas

	Sensor	Bandas
Análisis de la vegetación	Landsat 8 OLI + TIRS	B4, B5, B6
	Landsat 7 ETM+	B3, B4, B5
	Sentinel-2A L2A	B11, B8A, B04

Fuente: Land Viewer-EOS (*Earth Observing System*).

### d) Mosaico

Terminado de realizar el juego o combinación de bandas de las escenas, se realizó la unión de ambas imágenes para generar el mosaico correspondiente mediante el software QGIS 3.22 (Figura 3). Un mosaico se define como una serie de dos o más imágenes de satélite unidas una al lado de la otra, es decir, dicho conjunto es necesario cuando el área de estudio excede el área cubierta por una imagen (Chuvieco-Salineró 2008; Mendoza-Robles 2012).

Previamente a la generación del mosaico entre una imagen de satélite Landsat 8 y Sentinel-2A, se realizó un remuestreo o cambio de tamaño de pixel. En este caso se realizó el cambio de las imágenes Sentinel-2A con resolución de 10 m x 10 m a una resolución de 30 m x 30 m, para uniformizar el tamaño de resolución espacial de 30 m x 30 m con la imagen Landsat 8 y tener compatibilidad entre ellos.

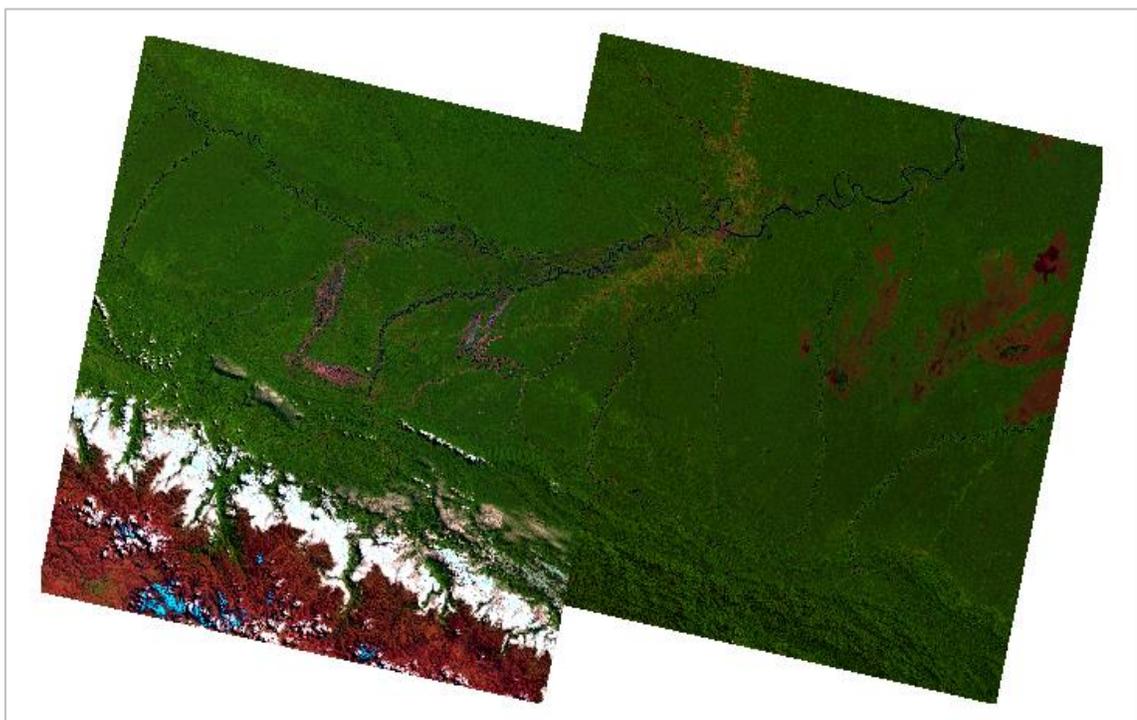


Figura 3. Unión de escenas (mosaico) del Landsat 8

#### e) Recorte de la imagen (AOI)

El Área de Interés (“*Area of Interest*” – AOI en inglés) se genera a partir del mosaico para establecer la delimitación del área de estudio, es decir, la capa máscara en formato shapefile (shp) recorta el mosaico en formato ráster de acuerdo a la delimitación de la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional Tambopata. Además, fueron reproyectadas en el sistema de coordenadas cartesiana de Universal Transverse de Mercator (UTM) – Zona 19 Sur (Figura 4).



Figura 4. Recorte de imagen de satélite Landsat 8 según el área de interés

#### f) Clases de entrenamiento según las firmas espectrales

Una firma espectral es la reflectancia de un objeto o tipo de superficie en todo el espectro electromagnético, con cada objeto caracterizado por una firma espectral específica que lo distingue de los demás (Chuvieco-Salineró 2008; Mendoza-Robles 2012). Las clases de entrenamiento que se identificaron son la minería, agropecuaria, tala y los proyectos de infraestructura, de acuerdo al algoritmo del SCP para la clasificación supervisada (Congedo 2021).

Cabe resaltar, que las actividades antrópicas (ganadería y agricultura) fueron combinadas en una sola clase llamado “agropecuaria”, porque en el análisis de las imágenes de satélites no hubo mucha diferencia entre ellos. Adicionalmente se aplicó una técnica de teledetección a la clase de “proyectos de infraestructura” para reducir el margen de error en la clasificación supervisada, debido a que se confunde en gran magnitud con la clase de la “minería”. Ante ello, se realizó manualmente un recorte en el mosaico relacionado a la clase de “proyectos de infraestructura” que a la vista del ser humano es ligeramente diferente a la clase de la minería. En ese caso, después de realizar el recorte y haber convertido en formato vector, se utilizó

la herramienta de “*update*” para superponer en el mosaico de la clasificación supervisada. Además, el criterio técnico de la clase “Tala” dentro del área de estudio se realizó de acuerdo a las áreas deforestadas presente en territorio de las comunidades nativas que poseen un tamaño mínimo de pixel mayor o igual a 30 m (900 m<sup>2</sup>) de resolución espacial.

#### **g) Clasificación supervisada de acuerdo a las firmas espectrales**

En la clasificación supervisada, se identifica ubicaciones específicas basadas en imágenes satelitales (ya sea con ayuda de datos de campo, interpretación técnica o por conocimiento propio) que representan ejemplos homogéneos de los tipos de cobertura de la tierra o del suelo a determinar. Estas ubicaciones detectadas se denominan "áreas o regiones de entrenamiento" debido que sus características espectrales se utilizan en un algoritmo de clasificación para compararlas estadísticamente con ubicaciones en otras partes de las imágenes (Chuvienco-Salineró 2008; Mendoza-Robles 2012).

El presente estudio utiliza el método de clasificación del Mapeo del Ángulo Espectral (*Spectral Angle Mapper – SAM* en inglés), que está incluido en el complemento “*Semi-Automatic Classification Plugin – SCP*”. Este clasificador calcula la similitud de dos espectros en función de su distancia angular, suponiendo que forman dos vectores en un espacio n-dimensional (donde n el número de bandas disponibles). En otras palabras, este método calcula la dirección relativa de los espectros, que tiene la ventaja de ser completamente independiente de las condiciones de iluminación, ya que se refieren a la longitud del vector, pero no a su ubicación, por lo que los ángulos no cambian, incluso si el albedo cambia (Chuvienco-Salineró 2008; Mendoza-Robles 2012). En ese contexto, se utilizó los valores por defecto del Umbral Único (*Single threshold* en inglés) y el Umbral de la Firma Espectral (*Signature threshold* en inglés) que nos proporciona el complemento SCP en QGIS:

$$(x, y) = \text{Cos}^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{(\sum_{i=1}^n x_i^2)^{\frac{1}{2}} * (\sum_{i=1}^n y_i^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (2)$$

Donde:

$x$  = vector de firma espectral de un píxel de la imagen;

$y$  = vector de firma espectral de un área de entrenamiento;

$n$  = número de bandas de la imagen.

#### **h) Validación de los resultados de clasificación**

Después de generar los resultados de la clasificación supervisada, se utilizó la herramienta de Precisión (*Accuracy assesment* en inglés) del complemento SCP en el QGIS 3.22. Estos resultados de la clasificación supervisada se compararon con un ráster o vector de referencia (que se convierte automáticamente en ráster), con la finalidad de calcular la precisión global, la precisión del usuario, la precisión del productor y el índice de Kappa. Es decir, estas estadísticas se calculan según la matriz de error (Anexo 3) basada en el área, ya que cada elemento representa la proporción de área estimada de cada clase. En ese contexto, esta herramienta permite estimar la precisión insesgada del usuario y la precisión del productor, el área insesgada de las clases según los datos de referencia y el error estándar de las estimaciones de área (Chuvieco-Salineró 2008; Mendoza-Robles 2012).

En la Tabla 10 y 11 se presenta una descripción general de la matriz de error, donde  $k$  es el número de categorías identificadas en la clasificación de la cobertura terrestre, y  $n$  es el número total de unidades de muestreo recolectadas. De acuerdo a la Ecuación 3, los elementos de la diagonal mayor ( $a_{ii}$ ) son el número de muestras correctamente identificadas, mientras que los otros elementos son el error de clasificación (Congedo 2021).

Tabla 10. Niveles de precisión según índice kappa.

Índice de Kappa	Calidad
$K \leq 0,2$	Malo
$0,2 < K \leq 0,4$	Razonable
$0,4 < K \leq 0,6$	Bueno
$0,6 < K \leq 0,8$	Muy bueno
$K > 0,8$	Excelente

Fuente: Fonseca (2000).

Tabla 11. Esquema de matriz de error.

	Referencia verdadera 1	Referencia verdadera 2	...	Referencia verdadera k	Total
Clase 1	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1k}$	$a_{1+}$
Clase 2	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2k}$	$a_{2+}$
...	...	...	...	...	...
Clase k	$a_{k1}$	$a_{k2}$	...	$a_{kk}$	$a_{k+}$
Total	$a_{+1}$	$a_{+2}$	...	$a_{+k}$	$n$

La precisión global (también expresada en porcentaje) se define de acuerdo a la siguiente ecuación (Congedo 2021):

$$O = \sum_{i=1}^k a_{ii}/n \quad (3)$$

Para validar los resultados de la clasificación se realizó una comparación de precisión del ráster de clasificación supervisada con un ráster de referencia, este último fue descargado de la plataforma de MapBiomas Perú y seguidamente recortado con el área de estudio, sin embargo, este ráster tiene varias categorías distintas a las categorías del ráster de clasificación, para corregir ello se efectuó una reclasificación por tabla en QGIS 3.22 para que las categorías de los dos ráster a comparar sean similares y de esta manera se generó la comparación con el cual se calculó la precisión global, precisión del usuario y el índice de kappa con la herramienta de Precisión (*Accuracy assesment* en inglés).

### **i) Posclasificación (cambio de cobertura del suelo)**

Se utilizó la herramienta “cambio de la cobertura del suelo” del complemento SCP que permitió comparar dos clasificaciones, es decir, una inicial (ráster de clasificación supervisada del año 2013) y final (ráster de clasificación supervisada del año 2022) para evaluar los cambios en la cobertura del período establecido. La salida fue un ráster de cambio de la cobertura del suelo (un archivo .tif que mostró los cambios en el mapa), donde cada píxel representó una categoría de comparación (es decir, combinaciones) entre las dos clasificaciones para ver las estadísticas de cambio de la cobertura del suelo, y un archivo de texto que contiene las estadísticas de cambio del mismo en un archivo csv separado por tabulación (Congedo 2021).

### **j) Conversión de los resultados (vectorización).**

Terminado de validar los resultados de la clasificación supervisada, se realizó el proceso de vectorización de dichos resultados en el QGIS 3.22, es decir, los archivos en formato ráster fueron transformados en archivos vectoriales para su posterior cuantificación de áreas deforestadas (ha) por las actividades antrópicas.

### **k) Cuantificación de las áreas deforestadas según cada actividad antrópica.**

Finalmente, una vez que los archivos clasificados fueron vectorizados conformemente, se cuantificó la tasa de deforestación (ha) de cada actividad antrópica del período analizado (2013-2022). Todo este proceso se realizó en el QGIS 3.22 y en el software de Microsoft Excel.

## **3.4.2 Determinación de la tasa media y anual de la deforestación del período de 2013-2022.**

Para el cálculo de la tasa de deforestación del área de estudio, se realizó el siguiente procedimiento:

- **Tasa promedio anual (ha)**

Se calculó la tasa promedio anual de la deforestación utilizando la Ecuación 4 (IDEAM 2002; Ruiz, Cárdenas & Baquero 2011; Forero-Riaño & Polanco-Puerta 2021):

$$TMAD = \frac{AB_{t1} - AB_{t2}}{n} \quad (4)$$

Donde:

TMAD = tasa promedio anual de la deforestación.

AB<sub>t1</sub> = área de bosque inicial.

AB<sub>t2</sub> = área bosque final.

n = diferencia de años entre el bosque inicial y el bosque final.

- **Tasa de cambio en la cobertura forestal**

Se utilizó la ecuación 5 para estimar la magnitud del cambio de cobertura del suelo expresada en porcentaje (Velázquez et al. 2002; Samaniego 2021):

$$Td = \left( \frac{AB_{t2} - AB_{t1}}{AB_{t1} * n} \right) * 100 \quad (5)$$

Donde:

Td = tasa de cambio

AB<sub>t1</sub> = área de bosque inicial (ha).

AB<sub>t2</sub> = área bosque final (ha).

n = número de años entre t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub>.

- **Tasa de deforestación (ha) según la FAO (1996).**

Se aplicó la Ecuación 6 utilizada por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación):

$$Td\ FAO\ (r) = \left( \left( \frac{AB_{t_2}}{AB_{t_1}} \right)^{\frac{1}{(t_2-t_1)}} - 1 \right) * 100 \quad (6)$$

Donde:

Td FAO (r) = tasa de deforestación.

AB<sub>t1</sub> = área de bosque inicial (ha).

AB<sub>t2</sub> = área de bosque final (ha).

t<sub>1</sub> = año de inicio del bosque inicial.

t<sub>2</sub> = año de inicio del bosque final.

- **Tasa de deforestación (ha) según Puyravaud (2003).**

Se aplicó la Ecuación 7 para calcular la tasa de cambio de la deforestación en porcentaje:

$$Td\ P\ (q) = \left( \frac{1}{(t_2 - t_1)} * \ln \frac{AB_{t_2}}{AB_{t_1}} \right) * 100 \quad (7)$$

Donde:

Td P (q) = tasa de cambio de la deforestación (%).

AB<sub>t1</sub> = área de bosque inicial (ha).

AB<sub>t2</sub> = área de bosque final (ha).

t<sub>1</sub> = año de inicio del bosque inicial.

t<sub>2</sub> = año de inicio del bosque final.

- **Porcentaje de incremento de la deforestación según Riaño y Puerta (2021).**

Finalmente, se empleó la fórmula de Riaño & Puerta (2021) para obtener los resultados del porcentaje de incremento en la deforestación del período analizado. Se aplicó la ecuación 8 utilizada por los mencionados autores:

$$\%ID = \left( \frac{TMAD_{t2} - TMAD_{t1}}{TMAD_{t1}} \right) * 100 \quad (8)$$

Donde:

%I.D. = porcentaje de incremento de la deforestación.

TMAD <sub>t1</sub> = tasa promedio anual de deforestación en el año inicial.

TMAD <sub>t2</sub> = tasa promedio anual de deforestación en el año final.

### 3.4.3 Elaboración de la cartografía de cambios en la cobertura forestal del período de 2013-2022

Finalmente, se elaboró las cartografías de cambios en la cobertura forestal del año inicial y final, así como las cartografías de cada actividad antrópica identificada. Todo este proceso se realizó mediante el QGIS 3.22, un software libre y gratuito.

## 3.5 Tratamiento de los datos

Para el primer objetivo, se utilizó el “Semi-Automatic Classification Plugin - SCP”, un complemento que se descarga e incorpora directamente en el software QGIS, con la finalidad de crear las áreas o clases de entrenamiento en la clasificación supervisada, además de asignar a las actividades antrópicas como categorías en minería, agropecuaria, proyectos de infraestructura y tala.

Para el segundo objetivo, se realizó el cálculo y gráfico de la tasa de deforestación media y anual según las ecuaciones indicadas en el ítem de métodos y técnicas, utilizando el software de Microsoft Excel.

Finalmente, para el tercer objetivo, se elaboró las cartografías temáticas de cambios en la cobertura forestal del período analizado (2013-2022) mediante el software de QGIS 3.22.

## CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 4.1 Cuantificación de las superficies deforestadas por las actividades antrópicas

#### 4.1.1 Validación de los resultados de la clasificación supervisada

Los resultados de la clasificación supervisada fueron validados mediante un método mixto: matriz de confusión, índice de Kappa y verificación en campo (Anexo 3 y 5). Para calcular la precisión de la clasificación supervisada se usó la herramienta de precisión el cual usó un ráster inicial (ráster de referencia de MapBiomass) y final (ráster de clasificación supervisada). Al realizar este paso se calculó la precisión global e índice de kappa los cuales se muestran en la tabla 12. Los resultados mostraron que el índice de Kappa se encuentra entre los valores de 0,60 y 0,80, mostrando una precisión total, mayor o igual a 88,80% (Tabla 12).

Tabla 12. Valores de validación según el índice de Kappa.

<b>Año</b>	<b>Precisión total (%)</b>	<b>Kappa</b>
2013	92,28	0,65
2014	92,71	0,68
2015	93,08	0,70
2016	91,48	0,66
2017	90,40	0,67
2018	91,31	0,70
2019	90,14	0,67
2020	90,18	0,68
2021	89,02	0,66
2022	88,80	0,66

De acuerdo con la Tabla 12 y Figura 5, el Índice de Kappa mostró valores  $60 < K < 80$ , demostrándose que la clasificación supervisada del presente estudio es considerada como “Muy bueno” (Tabla 10), con el fin de cuantificar las áreas deforestadas de las diferentes clases establecidas como minería, agropecuaria, proyectos de infraestructura y tala (Fonseca 2000; Samaniego 2021).

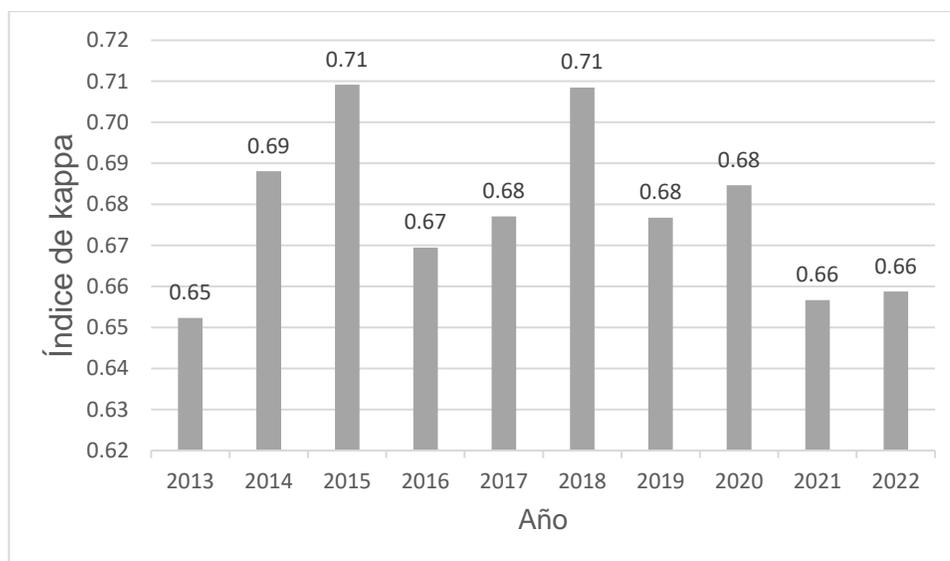


Figura 5. Valores de índice de Kappa

Cárdenas & Guzmán (2022) al realizar la cuantificación espacial de la vegetación y suelo desnudo en el corredor minero de Madre de Dios al año 2018 obtuvieron un índice de Kappa de 0,74 y 0,73, por lo que afirmaron que la clasificación de las categorías de vegetación y suelo desnudo presentaron una correcta clasificación. De igual modo los valores de índice de Kappa de la clasificación supervisada en la zona de amortiguamiento de la RNT mostraron valores similares lo que indica que esta clasificación de las categorías de minería, agropecuaria, proyectos de infraestructura y tala tienen una correcta clasificación (Fonseca 2000).

De los 384 puntos de ubicación que se crearon aleatoriamente para la verificación en campo de la clasificación supervisada, no fue posible verificar todos los puntos debido a que gran parte de estos se encuentran en zonas con

difícil acceso. No obstante, se logró verificar 110 puntos accesibles, los cuales se encuentran en su mayoría en lugares cercanos a la carretera interoceánica, así como de los caminos vecinales. En ese sentido, todos los puntos de la muestra se validaron con la matriz de confusión (Anexo 3) e índice de kappa (Tabla 12).

#### 4.1.2 Superficie deforestada por las actividades antrópicas

Las clases que se consideraron para la clasificación fueron: minería, agropecuaria, proyecto de infraestructura, tala, cuerpos de agua y bosque. La clasificación se realizó para cada año desde el 2013 al 2022 en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata. Para la cuantificación de las áreas deforestadas primero fue necesario convertir los mapas tipo ráster a tipo vectorial en QGIS 3.22. En la Tabla 13 se observa los resultados cuantificados de la clasificación supervisada cuyos valores son acumulativos de acuerdo al registro de años anteriores.

Tabla 13. Cuantificación de las clases de la clasificación supervisada.

Año	Clases					
	Minería (ha)	Agropecuaria (ha)	Proyectos de infraestructura (ha)	Tala (ha)	Cuerpo de agua (ha)	Bosque (ha)
2013	5642,15	12 676,39	176,77	98,23	4212,95	208 912,68
2014	6634,96	12 734,06	202,80	109,31	4402,24	207 627,76
2015	7243,93	12 860,92	259,97	113,63	4510,51	206 718,02
2016	9251,55	13 364,68	275,78	129,66	4795,69	203 878,30
2017	11250,51	13 958,90	291,14	134,15	5424,04	200 656,90
2018	12677,48	14 223,90	324,01	151,50	6056,86	198 274,91
2019	13144,71	14 282,62	368,23	163,17	6351,19	197 426,20
2020	13233,71	15 845,13	386,42	171,11	6376,67	195 691,50
2021	13764,92	16 073,97	393,48	177,59	6376,98	194 920,03
2022	14112,00	16 165,01	418,75	191,97	6378,57	194 455,75

Los resultados reportan que la cobertura forestal en el área de estudio pasó de tener 208 912,68 ha en el año 2013 a 194 455,75 en el año 2022 mostrando así una disminución en la cobertura forestal de 14 456,92 ha de bosque entre el 2013-2022, de los cuales 8 469,84 ha (58,59%) corresponden la minería, 3 488,61 ha (24,13%) a la actividad agropecuaria, 241,98 ha (1,67%) a proyectos de infraestructura, 93,73 ha (0,65%) a la tala y 2 165,62 ha (14,98%) a cuerpos de agua.

#### **a) Superficie deforestada por la clase “minería”**

En la Figura 6 se observa que la clase “minería” como actividad antrópica principal en la zona de amortiguamiento de la RNT exhibe una “fuerte tendencia” de aumento de la deforestación, es decir, la pérdida de cobertura forestal fue de 2,5 veces desde el 2013 (5 642,15 ha) en relación al 2022 (14 112 ha).

Cerón et al. (2021) indica que en las últimas décadas en la región de Madre de Dios el principal promotor de la deforestación es la minería que genera graves problemas ecológicos. Corroborando esta afirmación con su estudio de clasificación supervisada realizado en la región de Madre de Dios entre el 2000 y 2017 mostraron un aumento de 47 657,43 ha con la actividad minera, siendo las zonas de amortiguamiento de áreas naturales protegidas uno de los sectores más afectados. De igual manera el presente estudio mostró un incremento acelerado de deforestación generado por la minería entre los periodos analizados.

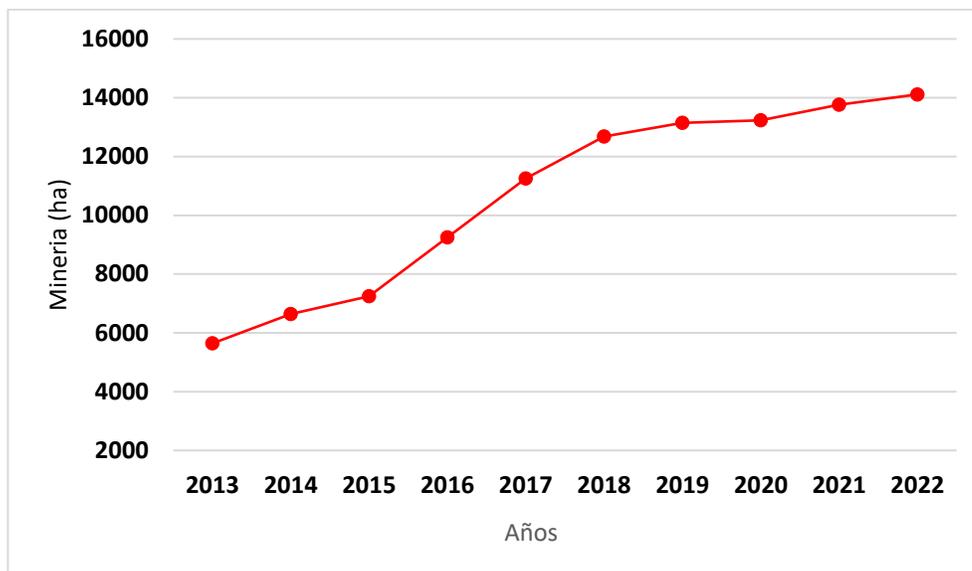


Figura 6. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad minera

La actividad minera en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata se concentra casi en su totalidad en la zona denominada “La Pampa”. De acuerdo a la Figura 6, desde el 2013 al 2019 esta actividad se desarrolló de manera creciente y muy acelerada. Sin embargo, entre el 2019 y 2020 se observa que disminuyó de manera considerable donde se perdió 89 ha de bosque a consecuencia de la minería, lo cual es muy insignificante a comparación de los años anteriores que depredaron grandes extensiones de cobertura forestal, esto debido a que el 2019 se dio inicio a la “operación mercurio” para erradicar la minería ilegal en conjunto con la presencia de policías, militares y fiscales. Esta operación logró la intervención de los mineros ilegales, individuos asociados a la minería y destrucción de equipos. En ese sentido, estos tipos de operaciones han arrojado resultados positivos que motivan replicar en otras zonas del país para combatir la minería ilegal (Gonzales 2020).

#### **b) Superficie deforestada por la clase “agropecuaria”**

De acuerdo con la Figura 7, la clase “agropecuaria” como actividad antrópica en la zona de amortiguamiento de la RNT presenta una “leve tendencia” de aumento de la deforestación desde el 2013 (12 676,39 ha) al 2022 (16 165,01

ha) contribuyendo con el 24.13% en la pérdida de la cobertura forestal en este periodo analizado y siendo la segunda actividad que mayor deforestación generó.

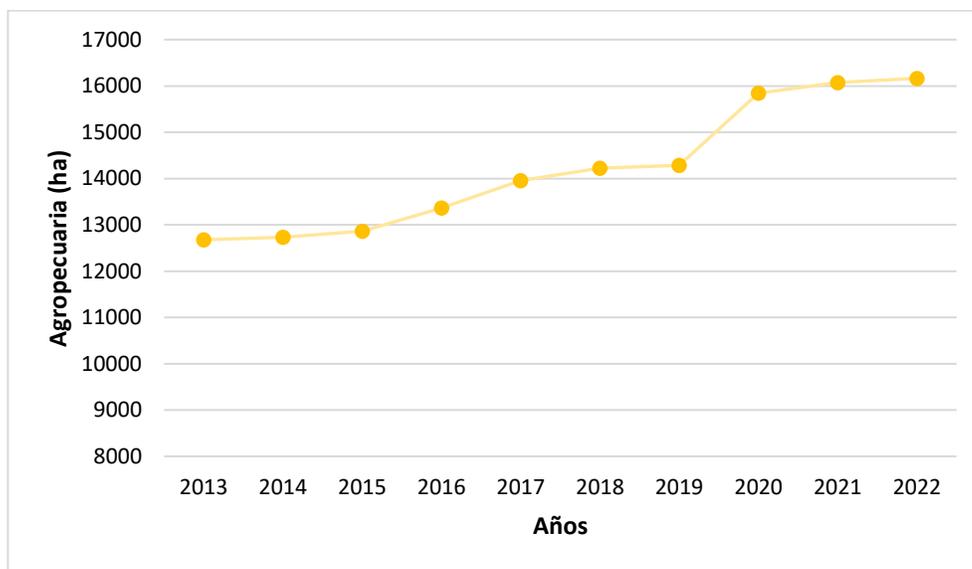


Figura 7. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad agropecuaria

La actividad agropecuaria comparada con la minería en esta zona presenta una leve tendencia entre el 2013 y 2022. Sin embargo, no se puede decir lo mismo si tenemos en consideración otros estudios en otras zonas que señalan que la actividad agropecuaria es el principal motor de la deforestación, en especial la agricultura (Huacac 2021; Nalvarte y Mamani 2021). En la región de Madre de Dios según Alarcón et al. (2021) la mayor pérdida de bosque se da por la agricultura que se desarrolla con mayor intensidad en los márgenes del corredor interoceánico sur, alcanzando para el 2018 una extensión de 129 685 ha. Del mismo modo SERFOR (2015) señala que a nivel nacional la principal causa de la deforestación es la actividad agropecuaria el cual se estima que contribuye con un 81-93% en la pérdida de bosques.

### c) Superficie deforestada por la clase “proyecto de infraestructura”

El Perú es un país en vías de desarrollo con un incremento poblacional. En ese sentido, el departamento de Madre de Dios según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en los años 2007 y 2017 mostraron

un crecimiento poblacional con una tasa anual de 2,56%, es decir, con este incremento nacen las necesidades de una expansión urbana y ejecución de nuevos proyectos para cubrir las necesidades básicas, por eso algunas zonas boscosas naturales son depredadas con el fin de construir nuevas casas, colegios, carreteras, etc, para cubrir las necesidades de la población (Lijo & Tapia 2021; Pacheco et al. 2021). La superficie de la zona de amortiguamiento de la RNT no es ajena a esta realidad puesto que los resultados del estudio mostraron que entre los años 2013 y 2022 la actividad de proyectos de infraestructura tuvo una tendencia ascendente causando la pérdida de 241,98 ha de cobertura boscosa lo cual es visible desde el espacio pudiéndose cuantificar mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales en QGIS 3.22 (Figura 8).

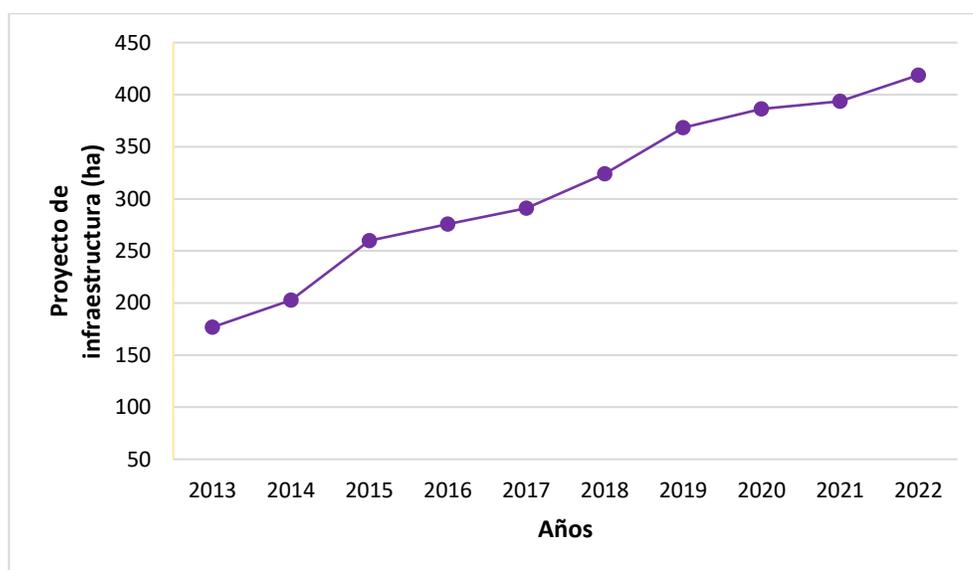


Figura 8. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad de proyecto de infraestructura

Los resultados muestran que la actividad de proyectos de infraestructura contribuyó con un incremento de la deforestación de 136,89% que se generó entre 2013 y 2022. Sin embargo, fue uno de los que mayor cambio sufrió solo por detrás de la minería (16,68%) teniendo un cambio de 15,21% (Tabla 15) lo que indica que la pérdida de bosque por esta actividad cada año tiene mayor intensidad.

#### d) Superficie deforestada por la clase “tala”

En los últimos 10 años, Reaño (2021) manifiesta que el 60 % de la madera registrada en el Perú fue extraída de zonas prohibidas mediante la tala selectiva de especies forestales de gran valor. En la zona de estudio se encuentran ubicados las comunidades nativas de Kotsimba, Palma real, Infierno y Sonene, donde se observa según el estudio realizado indicios de realizarse la tala de especies forestales de gran valor económico, que al igual que las demás clases tuvo una tendencia creciente (Figura 9). Si bien esta actividad no tiene un impacto negativo tan grande en la deforestación como las demás puesto que tiende a recuperarse con el pasar de los años, no se puede dejar de lado debido que influye en la alteración del ecosistema, destrucción de hábitat y extinción de ciertas especies forestales (Smith-Schwartz 2015).

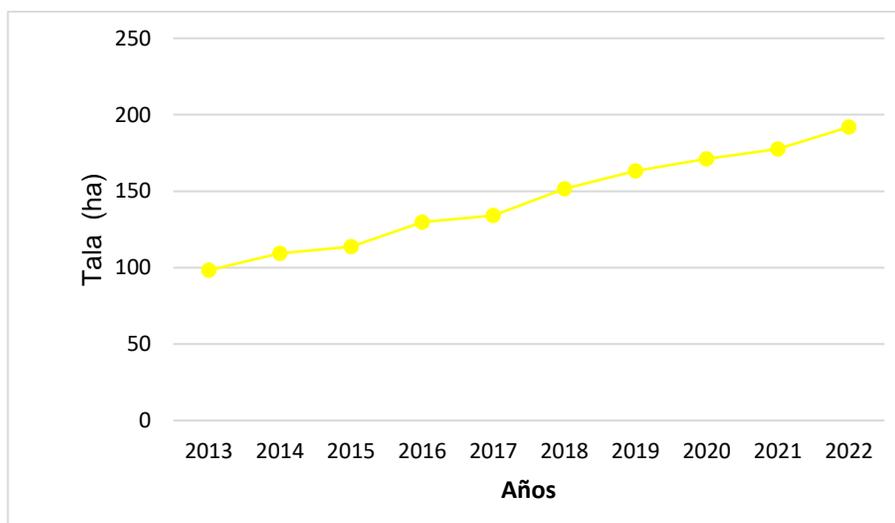


Figura 9. Pérdida de la cobertura forestal por la actividad de tala

#### e) Pérdida de bosque por actividades antrópicas

La región de Madre de Dios del 2002 al 2021 perdió 233 000 ha de bosque primario encontrándose en un nivel de vulnerabilidad ambiental ya que la deforestación es muy alta en algunos puntos estratégicos de esta región. La mayor parte de la pérdida de bosques se encuentra en la zona de

amortiguamiento de las áreas naturales protegidas (GLOBAL FOREST WATCH 2021; SERFOR 2017).

La estimación de las áreas deforestadas en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata a consecuencia de las actividades antrópicas se muestra en la Figura 10, el cual tiene una tendencia decreciente mostrando una pérdida de bosques primarios. Entre el 2013 y 2022 se ha perdido un total de 14 456,93 ha de cobertura forestal lo que representa el 16,08% del total de bosque deforestado en esta zona hasta el 2022.

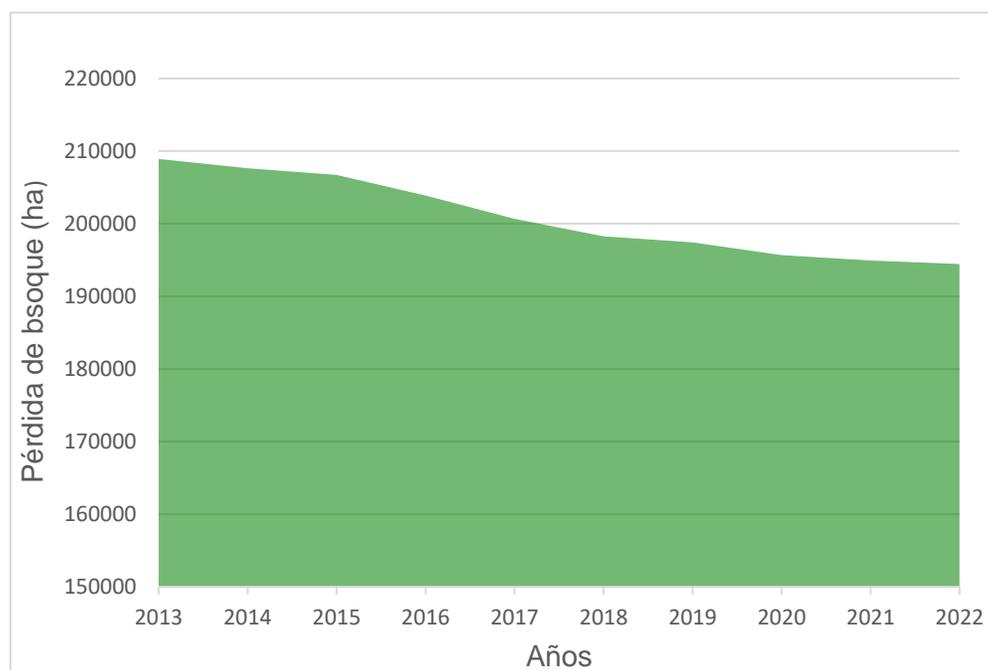


Figura 10. Pérdida de la cobertura forestal a consecuencia de las actividades antrópicas desde el 2013 al 2022

La pérdida de los bosques es un problema que ha surgido gradualmente, pero que se ha agravado en los últimos años, provocando una reducción significativa de la cobertura forestal en todo el mundo. En la Amazonia peruana este problema se ha hecho evidente siendo una de las regiones más perjudicadas por la minería, la agricultura migratoria, la tala, roza y quema (La Barreda, 2021). Como era de esperar todos estos problemas ya conocidos se hacen presentes

en el presente estudio unos con mayor intensidad que otros provocando la disminución del 6,24% (14 456,93 ha) de la cobertura boscosa de la zona de amortiguamiento de la RNT.

#### **f) Incremento de cuerpos de agua en la zona de estudio**

En el proceso de la producción minera el agua es uno de los elementos más importantes ya que permite el proceso de lixiviación, flotación, entre otros procesos que permiten la extracción del oro (De Piérola 2017). La actividad minera que se desarrolla en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata es fluvial porque consiste en la remoción del suelo y subsuelo (SPDA 2021), en consecuencia, se forman pozos inundados de grandes extensiones por cuerpos de agua turbios que con el pasar del tiempo se van aclarando, esto indica que la actividad minera y los cuerpos de agua tienen una proporcionalidad directa. En los resultados de la clasificación supervisada se puede apreciar esta proporcionalidad en vista que los cuerpos de agua tuvieron una tendencia creciente entre el año 2013 y 2022 al igual que la minería (Figura 11 y 6).

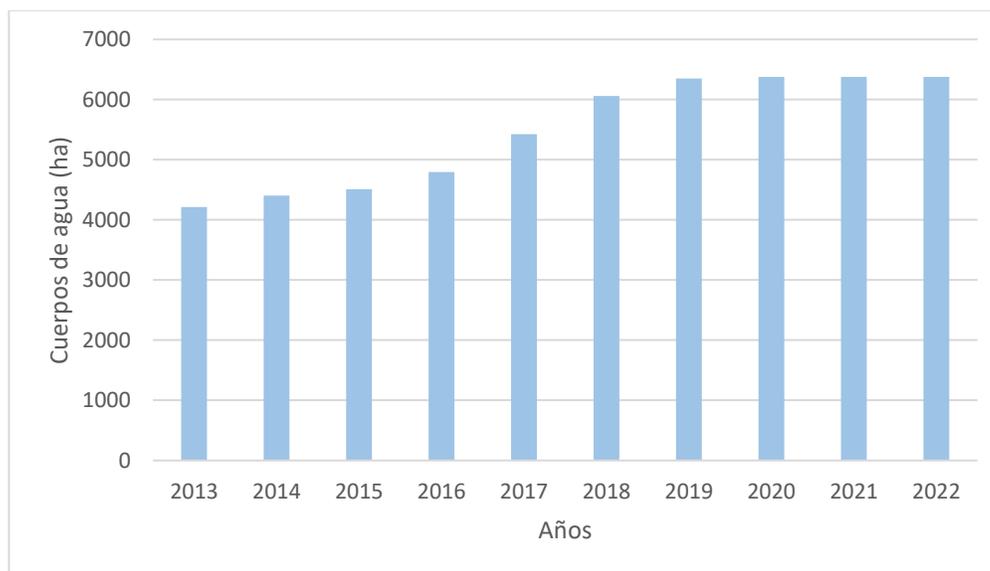


Figura 11. Cuerpos de agua en la zona de estudio

Los cuerpos de agua en la zona de estudio pasaron de tener 4 212,95 ha en 2013 a tener 6 378,57 ha en 2022, mostrando un incremento considerable de 2 165,62 ha lo que representa el 14,98% de la superficie deforestada entre en 2013-2022. Quispe (2023) al realizar un análisis espacial de cuerpos de agua causados por la deforestación en la zona de la Pampa, para el año 2022 reportó 5080,9 ha de cuerpos de agua, lo que representa el 37,9% de la superficie deforestada para el 2022, indicando que los cuerpos de agua son representativos en estas zonas donde la minería se desarrolla a gran intensidad.

#### **f) Dinámica temporal de la deforestación según las actividades antrópicas (2013-2022)**

El análisis de la deforestación en la zona de estudio entre los años 2013 y 2022 muestran que todas las actividades antrópicas (minería, agropecuaria, proyectos de infraestructura y tala) tienen un aumento progresivo (Tabla 13) mostrando una dinámica de conversión de bosque acelerada. Por otra parte, también se puede apreciar que en el periodo analizado la actividad agropecuaria y minera son las que mayor impacto generan en cuanto a la conversión de bosques primarios, dentro de estas dos actividades la minería es el que más desbosque genera. Sin embargo, la deforestación que se genera por la tala y proyectos de infraestructura por más mínimos que sean a comparación de las otras actividades (minería y agropecuaria), no se pueden minimizar su impacto puesto que contribuyen en el deterioro de los ecosistemas ocasionando la pérdida de la biodiversidad (Luque-Ramos 2021; Alva-Avila et al. 2023).

Según Mendoza (2012) en su estudio realizado en zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional Tambopata y el Parque Nacional Bahuaja Sonene en Madre de Dios, indica que al año 2011 la actividad minera es uno de los principales causantes de la deforestación seguida de los pastizales y tumbas. De igual manera el presente estudio se evidencia que entre el 2013 y 2022 la actividad antrópica que deforestó con mayor intensidad fue la minería mostrando así que esa práctica sigue prevaleciendo en esta zona.

## 4.2 Determinación de la tasa media y anual de la deforestación generado por las actividades antrópicas en el periodo 2013-2022.

### 4.2.1 Tasa promedio anual (ha)

Para el cálculo de la tasa media de la deforestación en los periodos analizados se usó la ecuación (4), el cual cuantifica en hectáreas la superficie de bosque que se perdieron en promedio a consecuencia de las actividades antrópicas.

En la tabla 14 se muestran la tasa promedio anual de la deforestación en hectáreas de las diferentes categorías establecidas. En dicha tabla se puede apreciar que la pérdida de bosque, con una tasa promedio anual de 1606,32 ha año<sup>-1</sup> generado por las actividades antrópicas entre 2013-2022; también se puede observar que la actividad que mayor deforestación generó entre el periodo analizado fue la minería con una tasa promedio anual de 941,094 ha año<sup>-1</sup>, seguido de la actividad agropecuaria con 387 ha año<sup>-1</sup>.

Tabla 14. Tasa promedio anual de la deforestación en la zona de estudio.

Clases	Tasa promedio anual
Minería	941,09
Agropecuaria	387,62
Proyectos de infraestructura	26,89
Tala	10,41
Cuerpos de agua	240,62
Bosque	1606,32

### 4.2.2 Tasa de cambio en la cobertura del suelo

En la Tabla 15 se indica los valores de la tasa de cambio y uso de suelo expresadas en porcentajes en diferentes periodos de año y para diferentes categorías, los cuales hacen referencia al área disminuida o ganada por año en porcentajes, así como la magnitud de los cambios que ha existido en las diferentes categorías a consecuencia de las actividades antrópicas (Samaniego 2021).

Tabla 15. Tasas de cambio en la cobertura del suelo (%)

Clases	2013-2017	2017-2022	2013-2022
Minería	24,85	5,08	16,68
Agropecuaria	2,52	3,16	3,05
Proyectos-infraestructura	16,17	8,76	15,21
Tala	9,14	8,62	10,60
Cuerpos de agua	7,18	3,52	5,71

Nota: La tasa de cambio no hace referencia a las categorías con mayor área, sino a las categorías que tuvieron mayor variación (perdidas o ganancias).

Los resultados de la tasa de cambio en la cobertura forestal señalan que la minería, entre el 2013 y 2017 mostró la mayor variación (24,85%) con respecto a las demás categorías, seguido de los proyectos de infraestructura (16,17%) en el mismo período, mientras que la actividad que menos cambios mostró fue la actividad agropecuaria (2,52%) también en el mismo periodo analizado (Tabla 15). Algo inusual que se puede observar en los resultados es que la actividad de la minería pasó de tener una variación de 24,85% entre 2013-2017 a tener una variación de solamente (5,08%) entre el 2017-2022. Esto en gran medida se debe a las medidas que ejerció en el estado peruano para combatir la minería en este período logrando así una disminución significativa en su variación (Samaniego 2021; Gonzales 2020).

#### **4.2.3 Tasas de deforestación (ha) según la FAO (1996) y Puyravaud (2003)**

La tasa de deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata a consecuencia de las actividades antrópicas según la ecuación (6) y (7) muestran valores significativamente semejantes a su vez negativos, lo que indica que en los periodos analizados hubo disminución de cobertura forestal (Tabla 16).

Tabla 16. Tasa de deforestación de bosque por períodos

Años de comparación	Pérdida de Bosque por período (ha)	Período analizado (año)	Tasa de deforestación (%)	
			Td FAO (r)	Td P (q)
2013-2014	1284,92	1	-0,62	-0,62
2014-2015	909,74	1	-0,44	-0,44
2015-2016	2839,72	1	-1,37	-1,38
2016-2017	3221,40	1	-1,58	-1,59
2017-2018	2382,00	1	-1,19	-1,19
2018-2019	848,71	1	-0,43	-0,43
2019-2020	1734,70	1	-0,88	-0,88
2020-2021	771,47	1	-0,39	-0,40
2021-2022	464,28	1	-0,24	-0,24
2013-2022	14456,93	9	-0,79	-0,80

La pérdida de cobertura forestal por las actividades antrópicas entre 2013-2022 se estima en 14 456,93 ha lo que representa el 6,24% del área de estudio y una tasa anual de 0,79% (1606,32 ha año<sup>-1</sup>) (Tabla 14 y 16). De acuerdo a los resultados que se muestran en relación a la tasa de deforestación (Tabla 16), indica que la tasa de deforestación entre los años señalados oscila entre un mínimo de 0,24% (464,28 ha año<sup>-1</sup>) y un máximo 1,58% (3221,40 ha año<sup>-1</sup>), con una media de 0,79%. Estos resultados a comparación de estudios realizados en otras zonas son muy altos, como lo mostrado por Nalvarte & Mamani (2021) en su estudio en concesiones de castaña en la de microcuenca Manuripe en Madre de Dios. Este estudio indica que la pérdida de bosque durante el 2004-2020 fue de 9 435,12 ha, con una tasa anual de 0,046% y una pérdida promedio de 160,11 ha año<sup>-1</sup>. En ese contexto, se observa diferencias notorias entre ambos estudios, lo cual se debe que en el presente estudio la minería fue la que ejerció una gran presión en cuanto a la deforestación mientras que en el estudio comparado no se muestran indicios de esta actividad.

#### 4.2.4 Porcentaje de incremento de la deforestación según Riaño y Puerta (2021)

En la Tabla 17 se observa el incremento porcentual de la deforestación que hubo entre 2013-2022 con respecto a la deforestación existente al 2013 en las diferentes categorías establecidas. Los resultados muestran que la minería y los proyectos de infraestructura fueron los que más incrementaron con 150,12% y 136,89%, respectivamente, en relación al cambio de cobertura del suelo existente al 2013.

Tabla 17. Incremento de la deforestación (%)

Clases	%ID
Minería	150,12
Agropecuaria	27,52
Proyectos-infraestructura	136,89
Tala	95,43
Cuerpos de agua	51,40

### 4.3 Elaboración de la cartografía temática de cambios de uso en la cobertura forestal del área del estudio

#### 4.3.1 Matriz de transición de cambios de uso de suelo

La matriz de transición de cambios de uso de suelo se originó del cruce entre el ráster de clasificación del 2013 y el ráster de clasificación del 2022 (Figura 12, Anexo 4). En ese sentido, a este ráster se le realizó una reclasificación por tabla donde se le asignó nuevas categorías según sea conveniente: Minería sin cambio (1), minería a otro uso (2), agropecuaria sin cambio (3), agropecuaria a otro uso (4), proyectos de infraestructura sin cambio (5), proyectos de infraestructura a otro uso (6), tala sin cambio (7), tala a otro uso (8), cuerpo de agua sin cambio (9), cuerpo de agua a otro uso (10), bosque sin cambio (11), deforestación (12), regeneración (13).

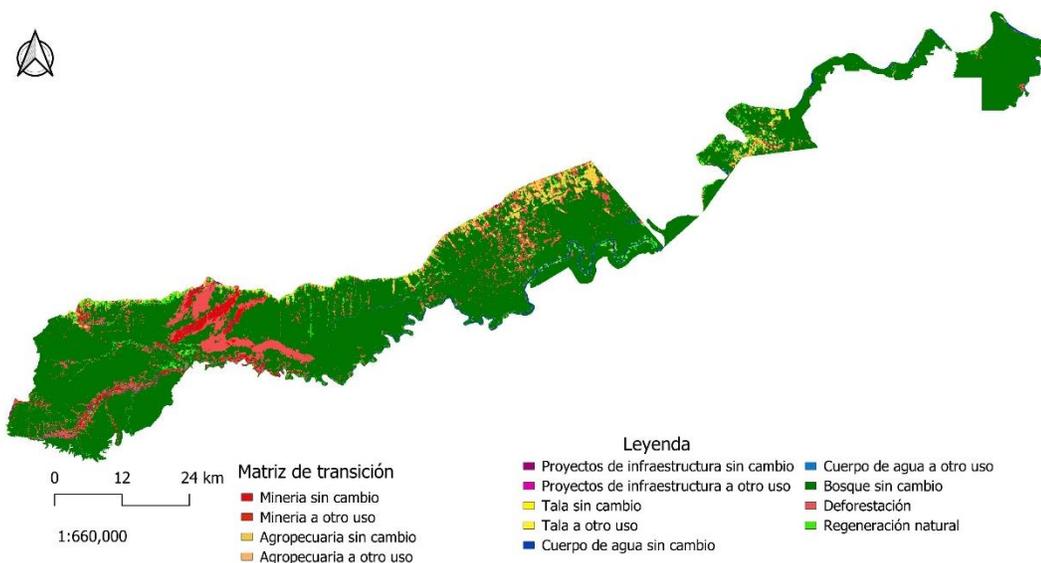


Figura 12. Mapa de matriz de transición de cambio en la cobertura del suelo del periodo establecido.

La apertura de vías es uno de los catalizadores más importantes que promueven la deforestación de manera directa o indirecta, ya que facilitan el acceso a zonas que antes eran aisladas (SERFOR 2015). Si bien las carreteras tienen efectos positivos en el transporte también traen consigo efectos negativos no solo en la fase de construcción sino también por las facilidades que proporciona para el acceso a los bosques (Peirano et al. 2023). Una clara evidencia de ello es que la intensidad de la deforestación por la actividad agropecuaria es significativamente alta en la proximidad de la carretera interoceánica, así como de los caminos vecinales al igual que la minería se desarrolló en la margen izquierda de la carretera Puerto Maldonado-Cusco (Figura 12).

A pesar de que la deforestación en la zona analizada es intensa y progresiva esto no implica que la naturaleza quiera retomar su dominio y es por ello que muestra señales de regeneración en algunos puntos donde el cambio de uso de suelo no fue drástico.

### 4.3.2 Cartografía de cambios en la cobertura forestal

En las siguientes figuras (13, 14, 15 y 16) se observan los cambios en la cobertura forestal de 2013 a 2022 de las diferentes categorías establecidas (minería, agropecuaria, proyectos de infraestructura, y tala). Las actividades que muestran cambios significativos son la actividad minera y agropecuaria (Figura 13 y 14).

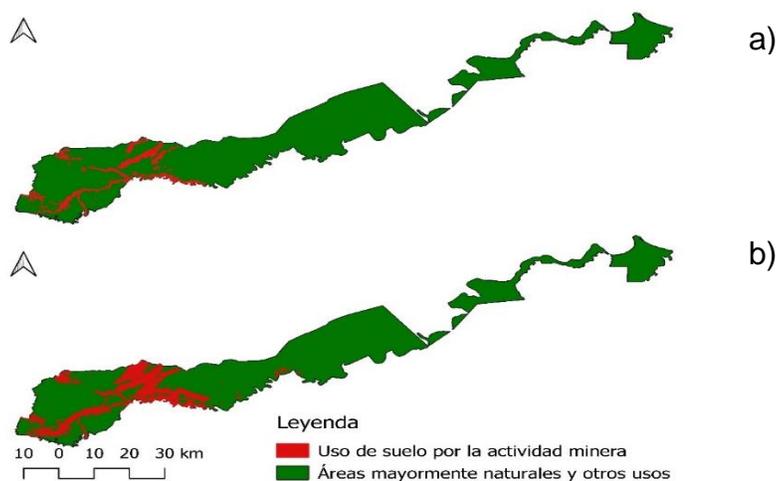


Figura 13. Cambio de cobertura forestal por la actividad minera en 2013 (a) y 2022 (b)

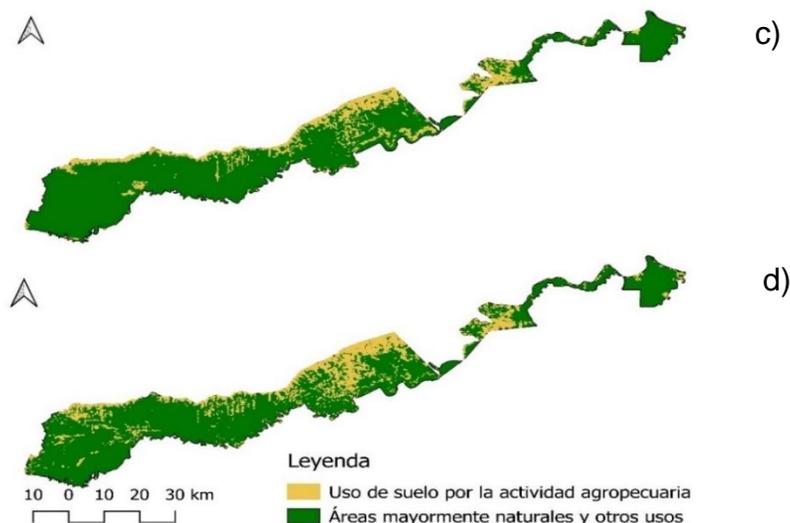


Figura 14. Cambio de cobertura del suelo por la actividad agropecuaria en 2013 (c) y 2022 (d)

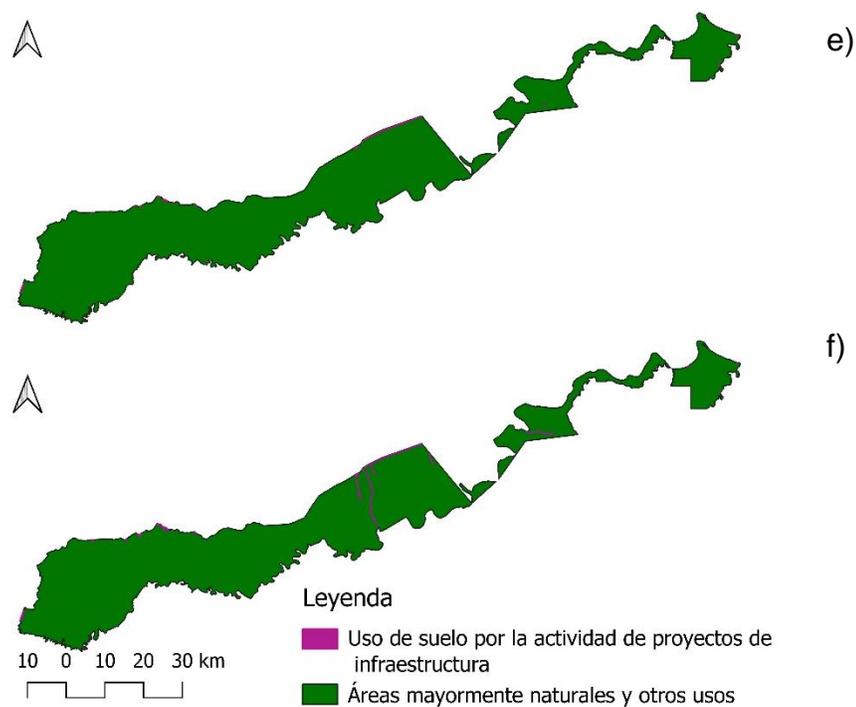


Figura 15. Cambio de cobertura por la actividad de proyectos de infraestructura en 2013 (e) y 2022 (f)

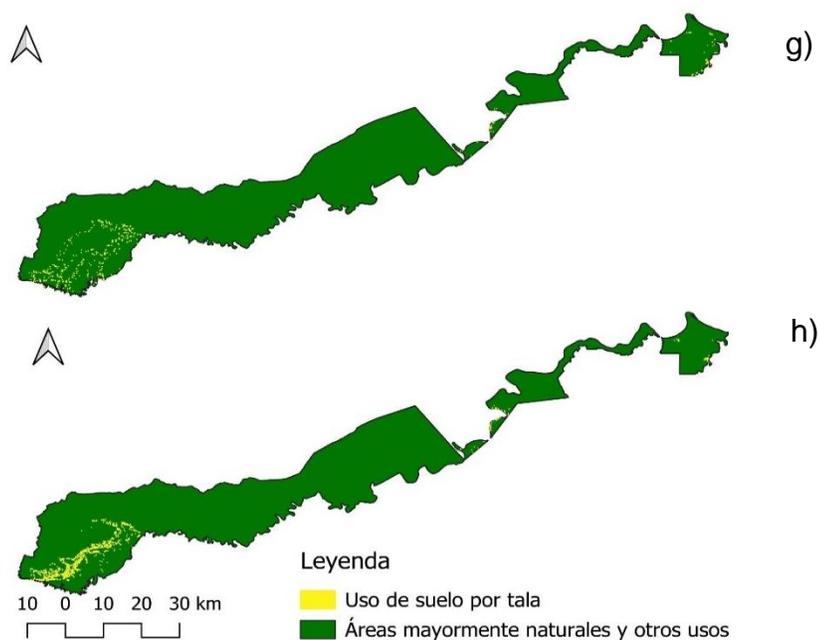


Figura 16. Cambio de cobertura del suelo por la actividad de tala en 2013 (g) y 2022 (h)

## CONCLUSIONES

Las actividades antrópicas como la minería y la agropecuaria han sido los principales propulsores de la deforestación en el área de estudio, donde la minería generó una tasa de 941,09 ha año<sup>-1</sup> (16,68%), y la agropecuaria originó 387,62 ha año<sup>-1</sup> (3,05%).

La mayor tasa de deforestación se dio entre los periodos 2015-2016, 2016-2017 y 2017-2018, con 1,38% (2839,72 ha año<sup>-1</sup>), 1,59% (3221,40 ha año<sup>-1</sup>), y 1,19% (2382 ha año<sup>-1</sup>), correspondientemente.

De acuerdo con la matriz de transición de cambios en la cobertura forestal se observó que la deforestación se da con mayor intensidad en la proximidad de los ejes viales del área de estudio, sumándose que las actividades antrópicas que más cambios generaron fueron la minería y la agropecuaria.

Se rechaza la hipótesis nula porque las tasas de la deforestación presentaron buena precisión relacionado a la identificación de las actividades antrópicas en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata según el período analizado.

## **SUGERENCIAS**

Los resultados obtenidos mediante el uso de herramientas y técnicas de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección contribuyen en términos generales como referencia académica y científica para la realización de otros estudios más detallados en la zona de amortiguamiento, además de servir como base para la elaboración y actualización de los Planes Maestros y Usos Turísticos por los actores involucrados de la Reserva Nacional de Tambopata.

Además de los resultados del presente estudio, se recomienda que exista recursos financieros, apoyo técnico de otras instituciones y capacitación permanente de los actores involucrados para un mejor control y fiscalización en aquellas zonas donde existe mayor presión antrópica de los bosques dentro de la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR-BAROJAS, S., 2005. *Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. Salud en Tabasco [en línea], vol. 11, no. 1-2, pp. 333-338. ISSN 1405-2091. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206> Cómo citar.*

ALARCÓN AGUIRRE, G., CANAHUIRE ROBLES, R. R., GUEVARA DUAREZ, F. M., RODRÍGUEZ ACHATA, L., GALLEGOS CHACÓN, L. E., & Garate-Quispe, J. (2021). Dynamics of forest loss in the southeast of the Peruvian Amazon: A case study in Madre de Dios. *Ecosistemas, 30(2)*. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2175>.

ALVA-AVILA, R. O., FALCON BRIONES, I. D., HINSBI-AGUIRRE, N. A. L., RAMÍREZ-VEGA, C. A., SARAIVA-INOCENCIO, J. F., VALVERDE-ASHCALLA, S. L., & MALCA-CASAVILCA, N. R. C. (2023). Deforestación en Madre de Dios: Un infierno para la biodiversidad. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 26(51)*, e24189. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24189>.

ANDRADE, F., 2016. *Los desafíos de la agricultura*. IPNI. S.l.: s.n. ISBN 9789874627704.

BOYD, D.S., 1996. A review of "Modelling Deforestation Processes: A review". Trees Series B Report nº I. By E. F. Lambin. (Luxembourg: European Commission, 1994) [ Pp. 113"rsqb;. Free, on request. *International Journal of Remote Sensing [en línea], vol. 17, no. 5, pp. 1061-1062. [Consulta: 4 abril 2017]. ISSN 0143-1161, 1366-5901. DOI 10.1080/01431169608949066. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169608949066>.*

CAMACHO, CHRISTIAN., JARA, NAYELY., & GONZALES, JOSSELYN. (2022). Análisis multitemporal de la deforestación y cambios de la cobertura del suelo en Morona Santiago. *Ciencias Técnicas y Aplicadas Artículo de Investigación, 7(1)*, 797–807. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i1.3511>

CAMPAÑA, J., & GINES, E. (2021). Multi-temporal analysis by GIS of drought and deforestation in the Tumbes-Peru National Reserve, 1986 -2019. *Manglar, 18(3)*, 267–274. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.035>

CARDENAS, M., & GUZMÁN, A. O. (2022). *Cuantificación espacial de la vegetación y suelo desnudo en el corredor minero de madre de dios al año 2018*.

<https://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14070/855/004-2-3-136.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CEDE, R., CABRERA, E., VARGAS, D. M., GALINDO, G., GARCÍA, M. C., ORDOÑEZ, M. F., & ALONSO, F. (2011). Fundamentos de la teledetección. *Introducción a La Percepción Remota y Sus Aplicaciones Geológicas*, 4, 181–218. <http://www.um.es/geograf/sigmur/%0Ahttp://www.ideam>.

CERÓN C., L., MIRANDA S., N., & RUBIN-DE-CELIS L., E. (2021). Deforestación por actividad minera en el departamento de Madre de Dios-Perú para los años 2000 y 2017. *Anales Científicos*, 82(1), 122. <https://doi.org/10.21704/ac.v82i1.1748>

CHUNG, B., 2016. La minería aurífera en el Perú y la contaminación del ambiente. *Rev Acad Peru Salud*, vol. 18, no. 2, pp. 35-40.

CHUVIECO-SALINERO, E., 2008. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3era. *Barcelona - España: Ariel Ciencias*. ISBN 978-84-344-8073-3.

CLARET-VERIZ, A., 2007. Cómo hacer y defender una tesis. 7. Venezuela: Editorial Texto. ISBN 980-12-0890-2.

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*, vol. 6, no. 64, pp. 1-6. ISSN 2475-9066. DOI <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.

DE PIEROLA, J. (2017). *Asociación peruana de ingeniería hidráulica y ambiental (apiha)*. [https://mediafra.admiralcloud.com/customer\\_609/fd551d21-9742-49b3-b2f7-1603171f60fa?response-content-disposition=inline](https://mediafra.admiralcloud.com/customer_609/fd551d21-9742-49b3-b2f7-1603171f60fa?response-content-disposition=inline)

FAO. (2010). Ganadería y deforestación. *Revista Políticas Pecuarias*, 3, 1–8. <https://www.fao.org/3/a0262s/a0262s.pdf>

FAO. (2018). *Reducción de la deforestación*. Conjunto de Herramientas Para La Gestión Forestal Sostenible (GFS). <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/reducing-deforestation/basic-knowledge/es/>

FAO. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura* FAO, 16. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>

FEARNSIDE, P.M., 2006. *Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle*. *Acta Amazonica* [en línea], vol. 36, no. 3, pp. 395-400. [Consulta: 11

diciembre 2016]. ISSN 0044-5967. DOI 10.1590/S0044-59672006000300018. Disponible en: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0044-59672006000300018&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0044-59672006000300018&lng=en&nrm=iso&tlng=pt).

FEARNSIDE, P.M., 2017. *Deforestation in Brazilian Amazonia [en línea]*. 28 febrero 2017. S.l.: s.n. [Consulta: 21 septiembre 2018]. Disponible en: <http://www.oxfordbibliographies.com/display/id/obo-9780199363445-0064>.

FORERO-RIAÑO, J.A. y POLANCO-PUERTA, M.F., 2021. *Análisis de la deforestación en La Macarena, antes y después de los acuerdos de paz. Colombia Forestal*, vol. 24, no. 2, pp. 9-23. ISSN 0120-0739. DOI <https://doi.org/10.14483/2256201X.16479>.

Framework, E., Agreement, P., & Agreement, S. G. (2018). *El componente espacio Copernicus*.

GLOBAL FOREST WATCH. (2021). *Madre de Dios, Perú Deforestation Rates & Statistics*|GFW.<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/PER/18/?category=summary&firesAlerts=eyJ>

Gonzales, G. (2018). *Análisis Multitemporal De La Deforestación Y Pérdida De Cobertura Boscosa En La Provincia De Manu, 2000-2016*. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2277>

Gonzalez, A. (2020). *Operación Mercurio y minería ilegal en La Pampa | Centro de Estudios Estratégicos del Ejército del Perú*. CEEEP. <https://ceeeep.mil.pe/2020/11/30/operacion-mercurio-y-mineria-ilegal-en-la-pampa/>

GOREMAD. (2015). *Estrategia Regional de Diversidad Biológica de Madre de Dios al 2021 y Plan de Acción 2014-2021*. 4. <https://www.cbd.int/doc/nbsap/sbsap/pe-sbsap-madre-de-dios-revised-es.pdf>

GOREMAD. (2020). Propuestas de zonificación ecológica y económica del departamento de Madre de Dios. *News.Ge*.

GREENFACTS, 2022. *Glosario: Captura de carbono*. [en línea]. [Consulta: 8 julio 2022]. Disponible en: <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/captura-carbono.htm>.

HUACAC, J. L. (2021). *Evaluación de la deforestación por minería de oro mediante imágenes de satélites sar en la microcuenca del río pariamanu – madre de dios, periodos 2010-2020*. <https://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14070/845/004-2-3-131.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

IDEAM., 2002. *Dirección de Evaluación Ambiental. Tasa media anual de deforestación*. En Primera generación de indicadores de la línea base de la información ambiental de Colombia (Tomo 2). . Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

DEP, 2018. *Infraestructura de Datos Espaciales del Perú. 3D Analyst y ArcGlobe*. Teledetección. Instituto Geográfico Nacional, pp. 2.

IGAC. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Centro de Investigación y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC -CIAF*, 46.

IHLEN, V., & ZANTER, K. (2019). Landsat 7 (L7) Data Users Handbook. *USGS Landsat User Services*, 7(November), 151.

INEI. (2017). *Viceministerio de gobernanza territorial información territorial del departamento madre de dios*.

LA BARREDA, S. D. (2021). *Deforestación en la región amazónica del Perú: situación y perspectivas*.

LIJO, E., & TAPIA, M. (2021). *URBANIZACIÓN Y CRISIS AMBIENTAL REVISTA DE ESTUDIOS URBANOS Y TERRITORIALES*.

LUQUE-RAMOS, L. (2021). Análisis de la deforestación de la Amazonia peruana: Madre de Dios. *Revista Innova Educación*, 3(3), 198–112. <https://doi.org/10.35622/j.rie.2021.03.013>

MAPBIOMAS PERÚ. 2023. Colección [4.0] de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo del Perú, adquirido el 30 de diciembre de 2023 a través del link: <https://peru.mapbiomas.org/codigos-de-la-leyenda/>.

MENDOZA, J. (2012). *Determinación De Áreas Deforestadas Por Actividades Humanas En La Zona De Amortiguamiento De La Reserva Nacional Tambopata Y El Parque Nacional Bahuaja Sonene-Madre De Dios. Tesis de Pregrado*.

MENDOZA, MIGUEL., SALAS, ROLANDO., & BARBOZA, ELGAR. (2017). Análisis multitemporal de la deforestación usando la clasificación basada en objetos, distrito de Leymebamba (Perú). *INDES Revista de Investigación Para El Desarrollo Sustentable*, 3(2), 67. <https://doi.org/10.25127/indes.201502.008>

MINAM, 2009. *Ministerio del Ambiente. Mapa de Deforestación de la Amazonía Peruana 2000*. Director, pp. 22.

MINAM, 2016. La conservación de bosques en el Perú (2011-2016). *Ministerio del Ambiente, vol. 18, no. 6, pp. 180. ISSN 13652214*.

MUNICIPIO SENA, BOLIVIA. - LAND VIEWER | EOS. (n.d.). *EOS Data Analytics*. Retrieved June 23, 2023, from <https://eos.com/landviewer/?lat=-11.68451&lng=-67.17041&z=6>.

NALVARTE, G., & MAMANI, M. (2021). *Análisis espacio temporal del uso de suelo en concesiones de castaña mediante la aplicación de imágenes del satélite landsat en la microcuenca manuripe-madre de dios, períodos 2004-2020*. <https://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14070/780/004-2-3-120.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

OSINFOR. (2014). *Análisis de pérdida de cobertura forestal en la zona geográfica de integración fronteriza con los países de Colombia, Brasil y Bolivia, año 2014* Gobierno.

PACHECO, P., MO, K., DUDLEY, N., SHAPIRO, A., AGUILAR, N., LING, P., ANDERSON, C., & MARX, A. (2021). Frentes de deforestación causas y respuestas en un mundocambiante - resumen. *Wwf*, 12.

PEIRANO, G., ENRIQUE DE LA FLOR SÁENZ DIRECTOR EJECUTIVO DEL CEPLAN JORDY VÍLCHEZ ASTUCURI, L., SOBRINO VIDAL, E., DEL ÁGUILA PATRONI, F., & FRANCISCO TORRES EDITADO POR, M. (2023). *Análisis de la deforestación y pérdida de vegetación a nivel nacional y el impacto a nivel regionales*. [www.ceplan.gob.pe](http://www.ceplan.gob.pe)

PÉREZ, D. (2007). *Introducción a los sensores remotos -aplicación en geología*. 09.

PINILLA, C., ARIZA, F.J., SÁNCHEZ, M. y TOVAR, T., 2001. Mejora de la Fiabilidad en la Identificación del Olivar Utilizando un Modelo Geométrico de Reflectancia. [en línea]. *España: Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica. Universidad de Jaén*. Disponible en: <http://www.aet.org.es/revistas/revistal6/AETJ6-02.pdf>.

PNUMA. (2015). *Elaboración de un plan de acción nacional para reducir y, cuando sea posible, eliminar el uso del mercurio en la extracción de oro artesanal y en pequeña escala*. 106. [https://www.nrdc.org/sites/default/files/int\\_16032101d.pdf](https://www.nrdc.org/sites/default/files/int_16032101d.pdf)

PUYRAVAUD, J., 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, vol. 177, pp. 593-596.

QUISPE, E. L. (2023). *análisis espacial de cuerpos de agua generados por la deforestación en la zona la pampa para el año 2022, madre de dios*. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/2502>

RAE, 2021. Real academia española. *Diccionario de la lengua española -RAE*. [en línea]. [Consulta: 8 julio 2022]. Disponible en: <https://dle.rae.es/antrópico>.

RAMOS, C.J.P., GRAÇA, P.M.L. de A. y FEARNSIDE, P.M., 2018. *Deforestation Dynamics on an Amazonian Peri-Urban Frontier: Simulating the Influence of the Rio Negro Bridge in Manaus, Brazil*. *Environmental Management* [en línea], [Consulta: 3 octubre 2018]. ISSN 1432-1009. DOI 10.1007/s00267-018-1097-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1097-3>.

REAÑO, G. (2021). *La ruta de la deforestación en Madre de Dios: "Los madereros han rodeado mi concesión"*. Mongabay. <https://es.mongabay.com/2021/09/deforestacion-madre-de-dios-territorios-indigenas-shihuahuacos-tala-ilegal-peru/>

RUIZ, J., CÁRDENAS, W. y BAQUERO, C., 2011. Deforestación y dinámica del bosque secundario en la Amazonia Colombiana 1986-2000. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 35, no. 137, pp. 531-545.

SAMANIEGO, J. L. (2021). *Análisis multitemporal de cobertura y dinámica geomorfológica de la microcuenca Shucos, del cantón Loja*.

SÁNCHEZ, P. (2012). *La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales*. 60.

SANDOVAL, R., GONZÁLEZ, R., & JIMÉNEZ, J. (2021). Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 12, no. 66, pp. 1-10. DOI 10.29298/rmcf.v12i66.816.

SERFOR. (2015). *Interpretación de la dinámica de la deforestación en el Perú y lecciones aprendidas para reducirla*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1268953/Interpretacion-de-la-dinamica-de-la-deforestacion-en-Peru-y-lecciones-aprendidas-para-reducirla-1.pdf>

SERRANO, A. (2019). ¿Qué es el Cambio Climático? *Fronteras de La Ciencia*, 5, 18–25. <https://doi.org/10.18562/fdlc0075>

SITJAR, J., 2009. Los Sistemas de Información Geográfica al servicio de la sociedad. *Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano*, no. 8, pp. 13. ISSN 1885-8104.

SMITH, J., & SCHWARTZ, J. (2015). La deforestación en el Perú. *WWF Otoño 2015*, 6. [https://www.academia.edu/download/41277041/la\\_deforestacion\\_en\\_el\\_peru.pdf](https://www.academia.edu/download/41277041/la_deforestacion_en_el_peru.pdf)

SPDA. (2021). Sociedad Peruana de Derecho Ambiental. *Madre de Dios: mineros ilegales operaban en concesión forestal de aguaje* |SPDA Actualidad Ambiental. <https://www.actualidadambiental.pe/mineros-ilegales-operaban-en-concesion-forestal-de-aguaje>.

VANEGAS, J., 2014. 3. *Sensores y Transductores*. 3.1. *Sensores y Transductores*. Un. Universidad de Tarapacá, pp. 34.

VELÁZQUEZ, A., MAS, J. F., DÍAZ-GALLEGOS, J. R., MAYORGA-SAUCEDO, R., ALCÁNTARA, P. C., CASTRO, R., FERNÁNDEZ, T., BOCCO, G., EZCURRA, E., & PALACIO, Y. J. L. (2002). *Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México*.

VON HUMBOLDT, A. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. *Geoenseñanza*, 11(1), 107–116. <https://www.redalyc.org/pdf/360/36012424,010.pdf>

YANAI, A.M., FEARNSIDE, P.M., GRAÇA, P.M.L. de A. y NOGUEIRA, E.M., 2012. Avoided deforestation in Brazilian Amazonia: *Simulating the effect of the Juma Sustainable Development Reserve*. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 282, pp. 78-91. ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2012.06.029. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112712003581>.

ZIMMERMANN, L. N. L., CLOSS, A. R. E., RODRÍGUEZ, S. M. A., ZIMMERMANN, L. N. L., CLOSS, A. R. E., & RODRÍGUEZ, S. M. A. (2021). Dinámica de incendios forestales en la reserva para parque nacional san rafael, paraguay, periodo 2007-2017. *revista de la sociedad científica del paraguay*, 26(1), 17–34. [HTTPS://DOI.ORG/10.32480/RSCP.2021.26.1.17](https://doi.org/10.32480/RSCP.2021.26.1.17)

## ANEXOS

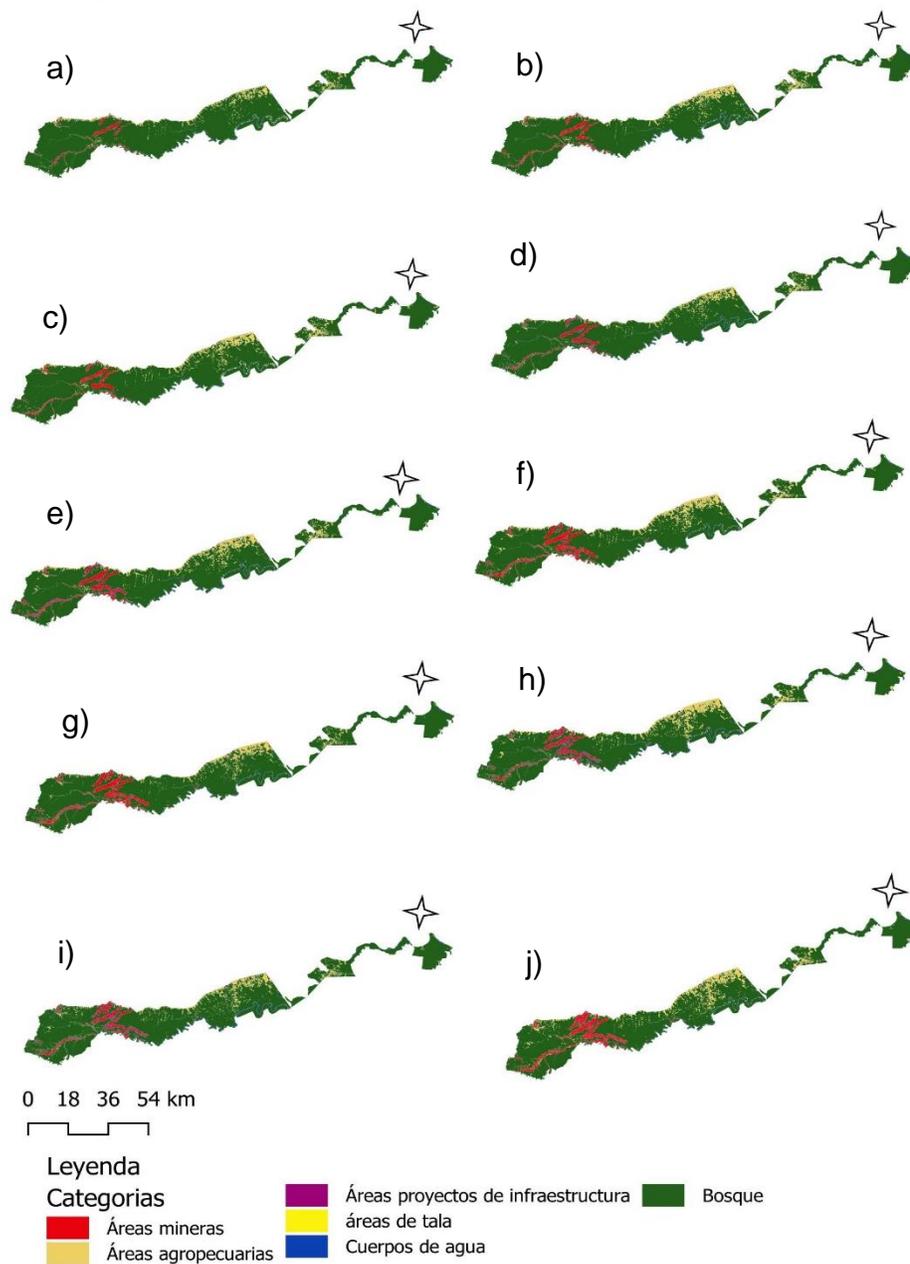
### Anexo 1. Matriz de operacionalización variables

	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
VARIABLE INDEPENDIENTE	La deforestación por actividad antrópica se define como aquellas áreas de cobertura forestal que fueron afectados o alterados por la acción del hombre (Fearnside 2006; 2017; Ramos, Graça & Fearnside 2018).	La deforestación por actividad antrópica cuantificará la superficie deforestada como la minería, agropecuaria, tala y proyectos de infraestructura (Fearnside 2006; Congedo 2021).	Tasa de deforestación en hectáreas por actividad antrópica (IDEAM. 2002; Ruiz, Cárdenas & Baquero 2011; Forero-Riaño & Polanco-Puerta 2021).	1. Tasa anual. 2. Validación.	Tasa de deforestación:  - ha año <sup>-1</sup>  - Incremento en %.
VARIABLE DEPENDIENTE	La tasa de deforestación anual indica la cantidad total de área de cobertura forestal deforestada o afectada en el período analizado (Fearnside 2006; 2017; Ramos, Graça & Fearnside 2018)..	La tasa de deforestación anual cuantificará la superficie total de cobertura forestal deforestada o afectada en el período analizado (Fearnside 2006; Congedo 2021)	Tasa de deforestación en hectáreas (IDEAM. 2002; Ruiz, Cárdenas & Baquero 2011; Forero-Riaño & Polanco-Puerta 2021)	Tasa de deforestación en hectáreas por actividad antrópica	Tasa media y anual de la deforestación por período:  - ha año <sup>-1</sup>  - % de cambio por año

## Anexo 2. Matriz de consistencia

<b>Título del proyecto:</b> Análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata -Madre de Dios, período 2013-2022.				
<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLES/INDICADORES</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<p><b>General:</b> ¿Cuánto será la tasa de deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata, a consecuencia de las actividades humanas, mediante el uso de imágenes satelitales en el período de 2013-2022?</p> <p><b>Específicos:</b> P.E.1: ¿Cuánto será la tasa de superficie deforestada por las actividades antrópicas como la minería, agropecuaria, tala y proyectos de infraestructura? P.E.2: ¿Cuánto será la tasa media y anual de la deforestación generado por las actividades antrópicas en el periodo de 2013-2022? P.E.3: ¿Cómo será la cartografía temática de cambios en la cobertura forestal del área de estudio en el periodo de 2013-2022?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Realizar un análisis multitemporal de la deforestación en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en el período de 2013-2022</p> <p><b>Objetivos Específicos</b> O.E.1 Cuantificar la superficie deforestada por las actividades antrópicas como la minería, agropecuaria, tala y proyectos de infraestructura. O.E.2 Determinar la tasa media y anual de la deforestación generado por las actividades antrópicas en el periodo de 2013-2022. O.E.2 Elaborar la cartografía temática de cambios en la cobertura forestal del área de estudio en el periodo de 2013-2022.</p>	<p>El análisis multitemporal de la deforestación presenta resultados confiables y precisos relacionado a la identificación y cuantificación de las actividades antrópicas en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata en el período de 2013-2022.</p> <p><b>Justificación:</b> A lo largo de los años gran parte de la amazonia dentro de ellas la Reserva Nacional de Tambopata, ha sufrido funestas consecuencias debido a la gran magnitud de deforestación (MINAM 2016).</p> <p><b>importancia:</b> La presente investigación presenta gran relevancia e interés para el personal técnico-administrativo de la Reserva Nacional de Tambopata porque generará información detallada y actualizada en relación a la tasa de deforestación de la zona de amortiguamiento del período 2013-2022.</p>	<p><b>Variable independiente</b> Deforestación por actividad antrópica.</p> <p><b>Dimensión:</b> Tasa de deforestación en hectáreas por actividad antrópica.</p> <p><b>Indicadores:</b> 1.Tasa anual. 2.Validación.</p> <p><b>Variable dependiente</b> Tasa de deforestación anual en el periodo 2013-2022.</p> <p><b>Dimensión:</b> Tasa de la deforestación por hectáreas.</p> <p><b>Indicador:</b> Tasa de deforestación en hectáreas por actividad antrópica.</p> <p>Cartografía temática de los cambios en la cobertura forestal.</p>	<p><b>Enfoque:</b> Cuantitativo <b>Diseño:</b> Longitudinal (tendencial) <b>Nivel:</b> Estudio descriptivo y explicativo <b>Tipo:</b> No experimental. <b>Métodos:</b> - Adquisición de imágenes de satélite Landsat 8. - Composición o juego de bandas. - Mosaico. - Recorte de la imagen (AOI). - Clases de entrenamiento. según las firmas espectrales. - Clasificación supervisada de acuerdo a las firmas espectrales. - Validación de los resultados de clasificación.</p> <p><b>De recolección de datos:</b> Imágenes satelitales de Earth Observing System y EarthExplorer</p> <p><b>De procesamiento de datos:</b> Con el uso "Semi-Automatic Classification Plugin - SCP" se creó las áreas o clases de entrenamiento en la clasificación supervisada, además de sus respectivos cálculos y cartografías temáticas.</p> <p><b>De análisis:</b> Se empleo softwares libres y gratuitos de Sistemas de Información Geográfica como el QGIS 3.22.</p> <p><b>Población:</b> Zona de amortiguamiento Reserva Nacional de Tambopata <b>Muestra:</b> Los bosques y todo lo que se afectó por la deforestación. <b>Procedimiento:</b> Tratamiento básico y clasificación de las imágenes satelitales Análisis de los resultados obtenidos.</p>

**Anexo 3. Cartografía de usos de suelo según el período analizado (2013-2022) de la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata**



Uso de suelo en la zona de amortiguamiento en la reserva nacional de Tambopata, de los años 2013 (a), 2014 (b), 2015 (c), 2016 (d), 2017 (e) 2018 (f), 2019 (g), 2020 (h), 2021 (i), 2022 (j).

**Anexo 4. Matriz de confusión de los años 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022.**

<b>Matriz de confusión año 2013</b>							
<b>clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	51622	3942	43	0	2593	9902	68102
<b>2</b>	1701	120989	200	0	126	33536	156552
<b>3</b>	85	1500	768	0	0	18	2371
<b>4</b>	63	248	0	0	7	1563	1881
<b>5</b>	9344	1866	4	0	32880	12584	56678
<b>6</b>	10892	109834	38	0	3413	2242706	2366883
<b>Total</b>	73707	238379	1053	0	39019	2300309	2652467

<b>Matriz de confusión año 2014</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	66634	5427	40	0	3697	8644	84442
<b>2</b>	2064	133671	258	0	444	25795	162232
<b>3</b>	48	973	715	0	0	8	1744
<b>4</b>	42	85	0	0	5	874	1006
<b>5</b>	6130	1012	7	0	30757	5957	43863
<b>6</b>	15144	106182	90	0	9589	2228173	2359178
<b>Total</b>	90062	247350	1110	0	44492	2269451	2652465

<b>Matriz de confusión año 2015</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	74572	3196	33	0	1851	3127	82779
<b>2</b>	1177	132278	135	0	295	13243	147128
<b>3</b>	66	1752	904	0	0	134	2856
<b>4</b>	159	103	0	0	28	998	1288
<b>5</b>	7537	1128	5	0	36933	5030	50633
<b>6</b>	21733	113651	73	0	7485	2222890	2365832
<b>Total</b>	105244	252108	1150	0	46592	2245422	2650516

<b>Matriz de confusión año 2016</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	81445	7183	31	0	3710	5896	98265
<b>2</b>	1317	125918	214	0	105	16690	144244
<b>3</b>	64	2570	959	0	0	262	3855
<b>4</b>	455	679	0	0	49	1472	2655
<b>5</b>	12731	2491	5	0	38575	9325	63127
<b>6</b>	19986	132543	85	0	7214	2180492	2340320
<b>Total</b>	115998	271384	1294	0	49653	2214137	2652466

<b>Matriz de confusión año 2017</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	107262	11910	74	0	6367	7535	133148
<b>2</b>	1997	142749	270	0	201	29354	174571
<b>3</b>	91	2621	1074	0	3	266	4055
<b>4</b>	454	959	0	0	29	1195	2637
<b>5</b>	15444	3020	6	0	43004	9706	71180
<b>6</b>	14746	138145	76	0	9344	2104569	2266880
<b>Total</b>	139994	299404	1500	0	58948	2152625	2652471

<b>Matriz de confusión año 2018</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	128362	10081	96	0	5431	10520	154490
<b>2</b>	1268	143633	29	0	260	31722	176912
<b>3</b>	144	1689	1164	0	0	200	3197
<b>4</b>	112	274	0	0	18	856	1260
<b>5</b>	11194	1934	9	0	40364	7023	60524
<b>6</b>	18829	116201	365	0	11494	2109200	2256089
<b>Total</b>	159909	273812	1663	0	57567	2159521	2652472

<b>Matriz de confusión año 2019</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	117586	14400	76	0	21157	7779	160998
<b>2</b>	1463	138355	77	0	286	16081	156262
<b>3</b>	188	2945	1221	0	1	303	4658
<b>4</b>	156	380	0	0	26	918	1480
<b>5</b>	14592	3947	14	0	37165	8530	64248
<b>6</b>	22343	130525	348	0	14143	2095817	2263176
<b>Total</b>	156328	290552	1736	0	72778	2129428	2650822

<b>Matriz de confusión año 2020</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	106031	9726	89	0	15604	6413	137863
<b>2</b>	1539	151359	165	0	518	41270	194851
<b>3</b>	230	2095	1331	0	4	410	4070
<b>4</b>	811	831	0	0	233	1657	3532
<b>5</b>	16421	3455	2	0	51755	11121	82754
<b>6</b>	31577	102993	204	0	11773	2081154	2227701
<b>Total</b>	156609	270459	1791	0	79887	2142025	2650771

<b>Matriz de confusión año 2021</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	106266	14811	147	0	18387	6501	146112
<b>2</b>	1361	146398	94	0	542	28809	177204
<b>3</b>	272	2987	1422	0	1	597	5279
<b>4</b>	447	834	0	0	153	1660	3094
<b>5</b>	16964	3913	14	0	50431	10737	82059
<b>6</b>	25416	145458	150	0	9813	2054690	2235527
<b>Total</b>	150726	314401	1827	0	79327	2102994	2649275

<b>Matriz de confusión año 2022</b>							
<b>Clasificado</b>	1	2	3	4	5	6	Total
<b>1</b>	119088	17227	183	0	21492	14340	172330
<b>2</b>	2724	153506	83	0	882	46951	204146
<b>3</b>	318	2130	1452	0	0	523	4423
<b>4</b>	596	1318	0	0	37	511	2462
<b>5</b>	11791	1736	6	0	44962	6480	64975
<b>6</b>	16211	138486	103	0	11960	2034193	2200953
<b>Total</b>	150728	314403	1827	0	79333	2102998	2649289

### Anexo 5. Esquema de matriz de transición

Matriz de cambio de cobertura del suelo (ha), año 2013-2022						
Clase de referencia	Minería	Agropecuaria	Proyectos de infraestructura	Tala	Cuerpos de agua	Bosque
<b>Minería</b>	4434,03	109,08	3,6	24,3	670,59	703,17
<b>Agropecuaria</b>	314,01	8146,62	132,39	2,43	60,3	5234,4
<b>Proyectos de infraestructura</b>	0,27	50,31	177,57	0,18	0	5,22
<b>Tala</b>	22,23	7,38	0	3,33	1,8	128,88
<b>Cuerpos de agua</b>	928,8	104,76	0,72	10,71	2803,95	1244,16
<b>Bosque</b>	9378,09	9557,91	106,74	175,68	2319,84	185395,2

### Anexo 6. Panel fotográfico



Foto 1. Verificación de puntos de muestreo, minería



Foto 2. Verificación de puntos de muestreo, agropecuaria



Foto 3. Verificación de puntos de muestreo, proyectos de infraestructura



Foto 4. Verificación de puntos de muestreo, bosque

## Anexo 7. Diagrama de flujo de la metodología aplicada

