

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS**

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



TESIS

“Análisis espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios”

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

AUTORES:

Bach. CHICATA CARPIO, Gloria
Stephany
Bach. PEREZ DIVIVAY, Anders
Fabio

ASESOR:

Dr. ALARCÓN AGUIRRE, Gabriel

Puerto Maldonado, junio de 2026

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS**

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



TESIS

“Análisis espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios”

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

AUTORES:

Bach. CHICATA CARPIO, Gloria
Stephany
Bach. PEREZ DIVIVAY, Anders
Fabio

ASESOR:

Dr. ALARCÓN AGUIRRE, Gabriel

Puerto Maldonado, junio de 2026

RST-RI_Análisis espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.unamad.edu.pe

Fuente de Internet

13%

Excluir citas

Excluir bibliografía

Activo

Activo

Excluir coincidencias

< 1%

DEDICATORIA

Dedicó esta tesis a mis padres Jaquelina y Walter quienes son mi motivo principal de cumplir todas mis metas, dándome la fortaleza para seguir adelante, asimismo dedicó también este logro a mis hermanos Angel y Cinthia, por ser mis fieles compañeros, a mi sobrina Nicole que con su alegría me motiva a ser mejor cada día, y a mi ser amado que siempre estuvo conmigo apoyándome en este largo proyecto.

Gloria Stephany

Dedico esta tesis a mis padres, Clementina Divivay y Gustavo Pérez, por su entrega incondicional, por dedicar su tiempo y esfuerzo a mi formación profesional y, sobre todo, por brindarme sus valiosos consejos y principios que han contribuido a forjar en mí una persona íntegra dentro de la sociedad. A mis hermanos Alfredo, Robin y Leonardo, cuyo apoyo emocional, acompañamiento y enseñanzas de vida han sido fundamentales en mi crecimiento personal y académico. A mis amigos por su motivación constante, por creer firmemente en mis capacidades profesionales y por ofrecerme su aliento en cada etapa de este camino académico, sin dudar jamás de mi potencial. A Dios, por su guía, fortaleza y protección, ya que gracias a su voluntad este proyecto ha sido posible. Le agradezco por la salud, la perseverancia y por acompañarme en cada paso que doy. Finalmente, extendiendo esta dedicatoria a todas las personas que, de una u otra manera, han formado parte de mi trayectoria académica y personal. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada enseñanza recibida han contribuido significativamente a la culminación de este proyecto. A todos ustedes, mi sincero agradecimiento.

Anders Fabio

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme una vida plena y llena de salud, quien me ha guiado por el buen camino, a mis padres con quienes estoy externamente agradecida por darme una vida plena y llena de buenos aprendizajes, agradezco a mis familiares cercanos que no dudaron en darme apoyo, agradezco también a mi asesor de tesis por acompañarnos a cumplir este logro tan anhelado.

Gloria Stephany

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, y de manera especial a la Carrera Profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, por brindarme una formación integral y un espacio académico orientado a la conservación y gestión sostenible de los recursos naturales. Extiendo mi sincero reconocimiento a todos los docentes, cuyo compromiso, dedicación y calidad humana han sido fundamentales para fortalecer mis conocimientos, habilidades técnicas y valores profesionales. Su guía constante y su vocación por la enseñanza han contribuido significativamente a mi crecimiento personal y académico.

Anders Fabio

RESUMEN

La presente investigación analizó el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo de detección continua mediante el índice de fracción de degradación normalizada y el uso del análisis de mezcla espectral lineal de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025. La validación de los mapas de cobertura mostró una precisión general superior al 81% y un índice kappa altamente robusta ($\geq 0,723$) que confirmó la alta fiabilidad metodológica. El estudio determina que la principal manifestación de la pérdida es la degradación forestal, que constituyó el 77,5%, incrementándose en 123 452,83 ha. El análisis de la matriz de transición y las tasas anuales reveló una diferenciación de causalidad; las propiedades privadas para la agricultura fueron el principal motor de cambio, registrando la tasa más alta (-2,78%) y liderando la conversión a bosque a deforestación y de degradación forestal a deforestación. En contraste, las concesiones forestales maderables fueron el principal motor de la degradación forestal (51,7%). Temporalmente, se observó una desaceleración en la tasa de pérdida general (de -0,97% a -0,16%) y una evidencia de resiliencia en las concesiones forestales maderables y comunidades nativas, impulsada por una conversión de degradación forestal a bosque. Sin embargo, las concesiones de ecoturismo presentaron una anomalía (-4,24%) que podría ser fallas en la gestión, estos hallazgos recomiendan enfocar la fiscalización en la calidad del dosel y la validación de procesos causales en los títulos habilitantes.

Palabras clave: CODED, concesiones forestales maderables, propiedades privadas para la agricultura, análisis de mezcla espectral, Google Earth Engine.

ABSTRACT

This research analyzes the spatiotemporal patterns of deforestation and forest degradation based on the continuous detection algorithm using the normalized degradation fraction index and the use of linear spectral mixture analysis of Landsat images by type of productive activities in enabling titles in the forests of the province of Tahuamanu, Madre de Dios, for the period 2005–2025. Validation of the maps of coverage showed an overall accuracy of over 81% and a highly robust kappa index (≥ 0.723), confirming the high methodological reliability. The study determines that the main manifestation of loss is forest degradation, which accounted for 77.5%, increasing by 123,452.83 ha. Analysis of the transition matrix and annual rates revealed a differentiation of causality; private properties for agriculture were the main driver of change, recording the highest rate (-2.78%) and leading the conversion from forest to deforestation and from forest degradation to deforestation. In contrast, timber concessions were the main driver of forest degradation (51.7%). Temporally, there was a slowdown in the overall loss rate (from -0.97% to -0.16%) and evidence of resilience in timber concession and native communities, driven by a conversion from forest degradation to forest. However, ecotourism concessions presented an anomaly (-4.24%) that could be due to management failures. These findings recommend focusing enforcement on canopy quality and the validation of causal processes in enabling titles.

Keywords: CODED, timber concessions, private agricultural properties, spectral mixture analysis, Google Earth Engine.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general.....	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Variables de la investigación.....	5
1.4.1 Identificación de variables	5
1.5 Operacionalización de variables	5
1.6 Hipótesis	7
1.7 Justificación e importancia	8
1.8 Consideraciones éticas.....	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Antecedentes de la investigación	12
2.2 Base teórica.....	18
2.2.1 Bosque.....	18

2.2.2 Perturbaciones forestales	18
2.2.3 Degradación forestal	19
2.2.4 Deforestación	20
2.2.5 Principios básicos de teledetección	20
2.2.6 Detección de degradación continua	22
2.6.7 Análisis de mezcla espectral (SMA).....	22
2.2.8 Índice de Fracción de Diferencia Normalizada (NDFI).....	23
2.2.9 Landsat	24
2.3 Definición de términos	25
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	27
3.1 Tipo de estudio	27
3.2 Diseño del estudio	27
3.3 Delimitación espacial y temporal.....	27
3.4 Población y muestra	29
3.5 Método y técnicas	31
3.6 Tratamiento de datos	34
3.6.1 Procesamiento de datos	34
3.6.2 Precisión de datos	41
3.6.4 Análisis estadístico	43
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1 Análisis de mezcla espectral (SMA) e índice de fracción de diferencia normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu.....	44
4.2 Magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante NDFI en los bosques de la provincia de Tahuamanu	49

4.3 Magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu	52
4.4 Precisión de los mapas de deforestación y degradación	57
4.5 Tasa de pérdida de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu	60
4.6 Cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu	65
CONCLUSIONES	82
SUGERENCIAS.....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS.....	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	5
Tabla 2. Características de datos de observación de la tierra	35
Tabla 3. Firmas espectrales puras (endmembers) para bandas Landsat 5 TM	37
Tabla 4. Firmas espectrales puras (endmembers) para bandas Landsat 8 OLI y 9 OLI-2.....	37
Tabla 5. Valores NDFI considerados	39
Tabla 6. Medición de índice de kappa	41
Tabla 7. Magnitud de la degradación forestal y deforestación	51
Tabla 8. Magnitud de la degradación forestal y deforestación	55
Tabla 9. Fiabilidad de kappa de NDFI de Landsat 2005 con puntos aleatorizados	58
Tabla 10. Fiabilidad de kappa de NDFI de Landsat 2015 con puntos de imágenes de alta resolución	59
Tabla 11. Fiabilidad de kappa de NDFI de Landsat 2025 con datos de campo	60
Tabla 12. Tasa de degradación forestal y deforestación total en los bosques de Tahuamanu.....	61
Tabla 13. Tasa de degradación forestal y deforestación por tipo de actividades productivas	63
Tabla 14. Cambios de cobertura por degradación forestal y deforestación del periodo 2005-2015.....	67
Tabla 15. Cambios de cobertura por degradación forestal y deforestación del periodo 2015-2025.....	67

Tabla 16. Cambios de cobertura por degradación forestal y deforestación del periodo 2005-2025.....	72
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Ubicación de títulos habilitantes en los bosques de Tahuamanu.	29
<i>Figura 2.</i> Muestras distribuidas en los bosques de Tahuamanu.....	31
<i>Figura 3.</i> Imágenes Landsat; mosaico de (a) Landsat 5 TM de 2005, (b) Landsat 8 OLI de 2015 y (c) Landsat 9 OLI 2 de 2025.	35
<i>Figura 4.</i> Firmas espectrales puras (Endmembers) candidatas para determinar GV (a), NPV (b), Soil (c), Sombra (d) y pixel mixto (e) para 2025.	38
<i>Figura 5.</i> Medición de fiabilidad (validación) de bosque, degradación forestal y deforestación con imágenes de alta resolución espacial PlanetScope de 3 m x 3 m para 2015.....	42
<i>Figura 6.</i> Fracciones de firmas espectrales puras (endmembers) de GV (a), NPV (b), suelo (c) y sombra (d) de 2005 de bosques de Tahuamanu..	44
<i>Figura 7.</i> Fracciones de firmas espectrales puras (endmembers) de GV (a), NPV (b), suelo (c) y sombra (d) de 2015 de bosques de Tahuamanu..	45
<i>Figura 8.</i> Fracciones de firmas espectrales puras (endmembers) de GV (a), NPV (b), suelo (c) y sombra (d) de 2025 de bosques de Tahuamanu..	45
<i>Figura 9.</i> Escala de grises de NDFI para 2005 (a), 2015 (b) y 2025 (c) en los bosques de Tahuamanu.	48
<i>Figura 10.</i> NDFI de los periodos 2005 (a), 2015 (b) y 2025 en los bosques de Tahuamanu.....	50
<i>Figura 11.</i> NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2005.....	54
<i>Figura 12.</i> NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2015.....	54
<i>Figura 13.</i> NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2025.....	55

<i>Figura 14.</i> Cambios de NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2005-2015.	66
<i>Figura 15.</i> Cambios de NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2015-2025.	68
<i>Figura 16.</i> Cambios de NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2005-2025.	71
<i>Figura 17.</i> Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en propiedades privadas para la agricultura.	75
<i>Figura 18.</i> Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones forestales maderables.	76
<i>Figura 19.</i> Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones de productos forestales diferentes a la madera.	77
<i>Figura 20.</i> Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones de conservación.	78
<i>Figura 21.</i> Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones de ecoturismo.	79
<i>Figura 22.</i> Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en comunidades nativas.	80

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia.	86
Anexo 2. Puntos de muestreo distribuidos al azar por categoría y títulos habilitantes en los bosques de Tahuamanu.	88
Anexo 3. Panel fotográfico.	97

INTRODUCCIÓN

La pérdida de bosques debido a la deforestación y la degradación forestal es una preocupación importante en la lucha contra el cambio climático porque reduce la capacidad de los bosques para actuar como sumideros de carbono, convirtiéndose en una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (Londres et al. 2023; Zuquim et al. 2023). Si bien se han logrado mejoras significativas en la estimación de las emisiones derivadas de la deforestación a nivel mundial, el seguimiento y la supervisión de la degradación forestal sigue siendo un desafío para muchos países con bosques Amazónicos (Rödig et al. 2018). La Conferencia de las Partes (COP 13) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) reconoció el impacto de la degradación forestal en 2007, incluyéndola como un mecanismo propuesto para reducir las emisiones dentro del programa de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+) (Montoya-Zumaeta y Naime 2022; Viscarra y Zutta 2022). A medida que muchos países avanzan hacia el acceso y la implementación de pagos basados en resultados bajo el mecanismo REDD+, las emisiones relacionadas con los bosques, tanto de la deforestación como de la degradación forestal, deben evaluarse con un grado razonable de incertidumbre. Para estimar estas emisiones relacionadas con los bosques, los países utilizan datos de actividad, que describen el grado de actividad humana que causa emisiones, incluida la deforestación y la degradación forestal, y que a menudo se miden utilizando estimaciones del área de cambio de la cobertura terrestre (Alarcón et al. 2016; Alarcon-Aguirre et al. 2021; Alarcon-Aguirre et al. 2022; Alarcon-Aguirre et al. 2023). En el área de estudio, noreste de la Amazonia de Madre de Dios (provincia de Tahuamanu), interactúan una serie de actividades productivas por tenencia de tierra, como; títulos habilitantes (concesiones forestales maderables, de productos diferentes a la madera, conservación, ecoturismo, y shiringa), áreas agrícolas y comunidades nativas. Por lo que, la magnitud de la defenestración y degradación forestal deben evaluarse con un grado razonable de incertidumbre (Sabogal et al. 2024).

La degradación forestal no tiene una definición universalmente aceptada, lo cual es una de las razones por las que ha sido más difícil cuantificarla con un procedimiento estandarizado. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 2012; FAO 2016; FAO 2020) define la degradación como la “reducción de la capacidad de un bosque para proporcionar bienes y servicios”, mientras que la Iniciativa Mundial de Observación Forestal (GFOI) (Romero-Badilla et al. 2020) la ha descrito como una perturbación causada por la intervención humana en un paisaje boscoso que produce emisiones de carbono, pero no un cambio en la cobertura terrestre. Las observaciones por teledetección basadas en satélites suelen ser la herramienta utilizada para cuantificar la pérdida forestal de cualquier tipo, pero los tipos de degradación que se pueden observar desde el espacio pueden no ser congruentes con las definiciones de políticas (Romero-Badilla et al. 2020; Reygadas et al. 2021; Wimberly et al. 2022; Miguel et al. 2024; Peters et al. 2024; Sartorato et al. 2025). A pesar de estos desafíos, las políticas centradas en la conservación requieren la acción de los países, muchos de los cuales están elaborando y adoptando sus propias definiciones nacionales. Para que una evaluación forestal sea útil, la definición de degradación debe estar explícitamente establecida y vinculada con las herramientas utilizadas para medirla (Reygadas et al. 2021; Wimberly et al. 2022; Peters et al. 2024).

Aunque medir la degradación con teledetección es un desafío, se ha vuelto cada vez más sostenible (Miguel et al. 2024). Detectar cambios con teledetección puede ser tan simple como comparar imágenes antes y después de un evento, pero este método burdo a menudo es insuficiente para los procesos de degradación observados en los bosques Amazónicos. La degradación forestal, que incluye la recolección de leña, la cosecha de madera a pequeña escala, la pérdida de biomasa por insectos y los incendios del subdosel, puede detectarse de manera confiable solo cuando la densidad temporal de las imágenes es lo suficientemente frecuente como para observar cambios tanto de larga duración como efímeros en la estructura del bosque (Vargas et al. 2019; Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024; Peters et al.

2024; Sartorato et al. 2025). Los bosques a menudo vuelven a crecer después de un evento de degradación, y las emisiones del bosque reducido temporalmente se perderían si no se realizaran observaciones repetidas durante el período de tiempo del evento (Reygadas et al. 2021). Además, los eventos de degradación forestal a menudo tienen una escala espacial fina (Wimberly et al. 2022). Las perturbaciones pueden ser menores que la resolución de las observaciones de la Tierra comúnmente utilizadas, detectables solo a través del análisis de subpíxeles (Peters et al. 2024). Las imágenes satelitales de libre acceso pueden superar algunos de estos desafíos, por ejemplo, los datos Landsat 5, 7, 8 y 9 tienen observaciones repetidas cada 16 días, 8 días cuando se usan en combinación, a una resolución de 30 m, lo que hace que la detección de la degradación sea más factible para los países que luchan con el costo prohibitivo de las observaciones de teledetección comercial (Wulder et al. 2022). Los datos Landsat están integrados en Google Earth Engine (GEE), una plataforma gratuita de computación en la nube que vincula grandes conjuntos de datos de imágenes con algoritmos y gran capacidad computacional (Wahap y Shafri 2020). A medida que estos avances hacen que la medición de la degradación sea más accesible en teoría, se vuelve importante probar y documentar la utilidad en la práctica (Nasiri et al. 2022).

Unos de los métodos más eficientes en la estimación de bosques degradados y deforestados están basados en el algoritmo de Detección Continua de Degradación (CODED) para detectar cambios en los bosques (Aryal et al. 2021b). Este algoritmo evalúa una serie temporal del Índice de Fracción de Degradación Normalizada (NDFI) para monitorear las perturbaciones del dosel forestal (Chen et al. 2021; Eckert et al. 2024). Un beneficio clave de CODED es su uso del análisis de mezcla espectral lineal (SMA) para representar los grados de degradación utilizando la métrica NDFI, al capturar eventos de degradación de subpíxeles y de bajo grado (Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a). Otro beneficio es su aplicación a través de una interfaz gráfica de usuario en GEE, que capitaliza la computación en la nube y los conjuntos de datos integrados de observación de la Tierra gratuitos, incluido

Landsat (Wahap y Shafri 2020). CODED también diferencia entre perturbaciones forestales causadas por deforestación y degradación, lo que resulta ideal para las estimaciones en cuanto a la incertidumbre en ambos casos (Reygadas et al. 2021).

Las numerosas ventajas de CODED lo convierten en una herramienta prometedora para la estimación de datos de actividad. CODED requiere la especificación de valores para más de una docena de parámetros, que deben seleccionarse en función de la dinámica forestal y las condiciones espectrales de la región de estudio (Aryal et al. 2021b; Miguel et al. 2024). Además, CODED se desarrolló y aplicó originalmente en la selva amazónica, por lo que le hace eficiente su aplicación en la Amazonia peruana (Aryal et al. 2021b; Miguel et al. 2024). En este estudio, se analizó el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo CODED mediante el NDFI y el uso del SMA de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

Los bosques Amazónicos proporcionan uno de los mayores sumideros de carbono del mundo, proporcionando el hábitat para las especies terrestres de plantas y animales y suministran servicios ecosistémicos vitales para la cuenca Amazónica (Pan et al. 2011; García-Quintana et al. 2020; Zuquim et al. 2023). La teledetección por satélite es una fuente de datos esencial para vigilar los cambios en los bosques Amazónicos (Vargas et al. 2019; Romero-Badilla et al. 2020; Peters et al. 2024; Sartorato et al. 2025). A nivel mundial, la conversión de tierras para la agricultura es uno de los principales impulsores de la deforestación, y las capacidades de la teledetección por satélite para vigilar el cambio de uso de la tierra y la pérdida de bosques están bien establecidas (Alarcon-Aguirre et al. 2021; Alarcon-Aguirre et al. 2023). Muchos de los bosques de la Amazonia que quedan se ven afectados por perturbaciones antropogénicas y naturales que no causan la eliminación completa del dosel (Wimberly et al. 2022). Estas perturbaciones dan lugar a la degradación, que se define en términos generales como un cambio en la estructura y composición de los bosques que disminuye la prestación de servicios ecosistémicos o reduce la resiliencia de los ecosistemas a futuras perturbaciones (Miguel et al. 2024). En comparación con la deforestación, los efectos más lentos y sutiles de la degradación son difíciles de detectar desde el espacio utilizando sensores con resolución espacial moderada a baja (Miguel et al. 2024; Peters et al. 2024). Por lo tanto, es necesario mejorar los enfoques de vigilancia basados en satélites para que sean sensibles a una gama más amplia de perturbaciones, incluida la degradación de los bosques (Romero-Badilla et al. 2020; Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024; Peters et al. 2024). Estas técnicas también deben traducirse en herramientas

prácticas que puedan ser utilizadas de manera sostenible por las partes interesadas en las regiones Amazónicas (Alarcon-Aguirre et al. 2023).

Los bosques Amazónicos de la provincia de Tahuamanu (Madre de Dios) forma parte de la cuenca Amazónica, que es un punto caliente de biodiversidad de importancia mundial, pero también se encuentra entre los de mayor producción forestal del Perú y uno de los más afectados por actividades antropogénicas, como la tala de madera legal e ilegal, agricultura, la invasión agrícola y los incendios forestales (Sabogal et al. 2024). Estas actividades se desarrollan en marco de la implementación de las concesiones forestales en el Perú, en la actualidad denominado títulos habitantes (Concesiones forestales maderables, de productos diferentes a la madera, conservación y ecoturismo), iniciado en Madre de Dios en el año 2002 (Sabogal et al. 2024). Ello, se complementa con actividades tradicionales de la agricultura desarrollado por titulares de predios agrícolas, comunidades nativas y locales. Por esta situación, en muchos casos las perturbaciones a menudo resultan en la muerte o la remoción de individuos o pequeños parches de árboles, la dinámica de los bosques debe evaluarse a lo largo de un continuo que va desde cambios menores en el dosel hasta la deforestación completa (Alarcon-Aguirre et al. 2021; Alarcon-Aguirre et al. 2023; Sabogal et al. 2024).

En este contexto, el uso de GEE para la aplicación del método CODED para detectar cambios en los bosques, evaluó una serie temporal del NDFI para monitorear las perturbaciones del dosel forestal, técnica que se hace eficiente por el SMA, donde se utilizó fracciones espectrales de vegetación verde (GV), vegetación no fotosintética (NPV), nube y sombra para representar los grados de degradación utilizando la métrica NDFI con imágenes Landsat (Aryal et al. 2021b; Miguel et al. 2024). CODED también diferencia entre perturbaciones forestales causadas por deforestación y degradación, lo que resulta ideal para las estimaciones en cuanto a la incertidumbre en ambos casos (Aryal et al. 2021b).

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo y cuánto es el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo de detección continua (CODED) mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y el uso del análisis de mezcla espectral lineal (SMA) de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025?

1.2.2 Problemas específicos

P.E.1 ¿Cómo es el análisis de mezcla espectral (SMA) de imágenes Landsat en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025?

P.E.2 ¿Cuál es la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025?

P.E.3 ¿Cuál es la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005, 2015 y 2025?

P.E.4 ¿Cuánto es la precisión de los mapas de deforestación y degradación forestal del índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025?

P.E.5 ¿Cuánto es la tasa de pérdida de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025?

P.E.6 ¿Cuál es la magnitud de los cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Analizar el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo de detección continua (CODED) mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y el uso del análisis de mezcla espectral lineal (SMA) de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025.

1.3.2 Objetivos específicos

- O.E.1 Determinar el análisis de mezcla espectral (SMA) de imágenes Landsat en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025.
- O.E.2 Estimar la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025.
- O.E.3 Estimar la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005, 2015 y 2025.
- O.E.4 Evaluar la precisión de los mapas de deforestación y degradación forestal del índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025.

O.E.5 Determinar la tasa de pérdida de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025.

O.E.6 Cuantificar los cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025.

1.4 Variables de la investigación

1.4.1 Identificación de variables

Variable dependiente: magnitud de la deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025.

Variable independiente: reflectancia espectral de la deforestación y degradación forestal con el SMA de imágenes Landsat para NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu.

1.5 Operacionalización de variables

Las variables y su operacionalización de detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Operacionalización de variables*

Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Ítems
Variable independiente				

La aplicación de SMA en imágenes Landsat, permite establecer las fracciones espectrales de GV, NPV, nube y sombra para representar los grados de degradación utilizando la métrica NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005, 2015 y 2025.	Determinar el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y mediante el uso del análisis de mezcla espectral (SMA).	SMA y NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios.	SMA.	P.E.1
	Estimar la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI).		Cuantificación de NDFI (ha).	P.E.2
	Estimar la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes.		Cuantificación de NDFI (ha).	P.E.3
	Evaluar la precisión de los mapas de deforestación y degradación forestal del índice de fracción de degradación normalizada (NDFI).		Matriz de confusión e índice de kappa (k).	P.E.4
	Determinar la tasa de pérdida de cobertura por deforestación y		Tasa promedio anual de pérdida de bosque por deforestación y	P.E.5

	degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu.		degradación forestal (% y ha).	
La aplicación de álgebra espacial mediante la calculadora ráster, permite cuantificar los cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025.	Cuantificar los cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes.	Cambios de cobertura en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios.	Cambios de cobertura de 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025.	P.E.6
Variable dependiente				
El algoritmo CODED mediante el NDFI y el uso del SMA de imágenes Landsat, permite analizar la magnitud de la deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025.	Analizar el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo CODED mediante el NDFI y el uso del SMA de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes.	Deforestación y degradación forestal en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios.	NDFI y cambios en el NDFI (ha).	P.E.1 P.E.2 P.E.3 P.E.4 P.E.5 P.E.6

1.6 Hipótesis

Hipótesis Nula (H_0): el algoritmo de detección continua mediante el índice de fracción de degradación normalizada y el uso del análisis de mezcla espectral lineal de imágenes Landsat, no estima con mayor proporcionalidad a la degradación forestal respecto a la deforestación como agentes de perturbación por actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025.

Hipótesis Alterna (H₁): el algoritmo de detección continua mediante el índice de fracción de degradación normalizada y el uso del análisis de mezcla espectral lineal de imágenes Landsat, estima con mayor proporcionalidad a la degradación forestal respecto a la deforestación como agentes de perturbación por actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025.

1.7 Justificación e importancia

La perturbación forestal es cualquier evento discreto que influye en la estructura, la composición de las especies y los recursos disponibles, y se considera un impulsor principal de la heterogeneidad forestal. Las perturbaciones pueden ocurrir de manera abrupta y rápida en cuestión de horas a unos pocos meses, lo que lleva a eventos de reemplazo de bosques, o de manera sutil y gradual con el tiempo, lo que lleva a eventos de no reemplazo. El origen de las perturbaciones puede ser abiótico (tormentas de viento, incendios forestales, tornados, sequías), biótico (plagas, especies invasoras), antropogénico (tala de madera) o resultar de una combinación de estos (las especies no nativas pueden ser más propensas a los incendios forestales). Las características espaciales y temporales de los eventos de perturbación discretos que ocurren durante largos períodos definen los regímenes de perturbación que se caracterizan por múltiples componentes, como el tamaño de la perturbación (es decir, el área perturbada), la gravedad (es decir, la magnitud del evento de perturbación en el ecosistema) y la frecuencia (es decir, el número medio o mediano de eventos que ocurren por unidad de tiempo).

Dado que la dinámica forestal está profundamente conectada con el clima, las preocupaciones sobre el impacto del cambio global en la perturbación están aumentando. La evidencia sugiere cambios temporales en los regímenes de perturbación forestal en la Amazonia, que podrían estar alterando críticamente los ecosistemas forestales, la biodiversidad, las funciones y los servicios ecosistémicos. La información detallada sobre las perturbaciones forestales es esencial para comprender la dinámica de los ecosistemas, comprender las

líneas de base y predecir nuevas trayectorias, así como para desarrollar estrategias de adaptación efectivas en respuesta al cambio global. La relevancia de dicha información explica por qué los informes internacionales sobre el cambio y la degradación forestal están aumentando sus requisitos sobre los datos proporcionados. Sin embargo, los datos precisos sobre las perturbaciones forestales a grandes escalas espaciales y temporales aún son escasos y difíciles de obtener.

Los estudios de campo y los inventarios suelen emplear un conjunto consistente de criterios e indicadores para evaluar la condición de los bosques (por ejemplo, área forestal, volumen de madera, biomasa, crecimiento, salud forestal) a nivel nacional y regional, y esta información es crucial para los procesos de evaluación, gestión y toma de decisiones forestales. Sin embargo, el uso exclusivo de datos in situ para monitorear la salud forestal a menudo está sujeto a limitaciones, incluida la inconsistencia entre los conjuntos de datos, el costo y el tiempo, y la información espacial y temporal no continua. La teledetección es una herramienta cada vez más utilizada para monitorear los bosques, ya que supera algunas de estas limitaciones al proporcionar información valiosa a grandes escalas espaciales y temporales.

En el pasado, las técnicas de teledetección para la detección de cambios forestales empleaban enfoques bitemporales basados en imágenes adquiridas antes y después de eventos de perturbación. Sin embargo, desde la apertura del archivo Landsat, surgieron nuevas técnicas basadas en análisis a largo plazo. Desde entonces, la composición de imágenes basada en píxeles se ha convertido en una técnica de uso común, ya que ayuda a reducir una gran cantidad de datos y produce representaciones sin nubes de un área a diferentes escalas temporales (normalmente anuales), lo que permite un monitoreo forestal continuo durante largos períodos. Varias bases de datos abiertas utilizan compuestos anuales para analizar eventos de perturbación que reemplazan áreas de bosque a escalas regional y global.

La integración de datos de teledetección en plataformas de computación en la nube recientemente desarrolladas, como GEE, ha permitido la integración de análisis de series temporales densas en grandes escalas espaciales y

temporales. Los métodos de monitoreo de perturbaciones forestales que incorporan tales avances, por ejemplo, CODED, aprovechan todas las observaciones disponibles dentro de un período determinado para extraer tendencias interanuales, lo que facilita la detección de perturbaciones de reemplazo tanto de masas como de masas en comparación con los enfoques bitemporales y basados en compuestos. El SMA es un método novedoso que combina GV, NPV, nube y sombra, ampliamente utilizado para realizar análisis densos de series temporales con Landsat en GEE. CODED-NDFI-SMA transforma las bandas espectrales originales de Landsat en datos espectralmente puros mediante la cuantificación de la fracción de las diferentes clases de cobertura que contribuyen al espectro de cada píxel y, posteriormente, analiza la trayectoria del dosel forestal mediante modelos armónicos. El CODED-NDFI-SMA ha sido particularmente eficaz en la detección de perturbaciones de reemplazo tanto de masas forestales como de masas no forestales en bosques tropicales y templados. Esto es particularmente importante en la Amazonia peruana, donde los bosques son altamente vulnerables a factores de cambio global como temperaturas anómalas, sequías y especies invasoras.

1.8 Consideraciones éticas

Los tesisistas siguieron de manera rigurosa y detallada todas las disposiciones establecidas en el Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD). Asimismo, se analizó detalladamente el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el avanzado algoritmo de detección continua (CODED), el cual se apoya en el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y análisis de mezcla espectral lineal (SMA) con la finalidad de establecerlo por las distintas actividades productivas desarrollados en los en los títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, ubicada en la región de Madre de Dios. Este estudio abarco un periodo desde el año 2005 hasta el 2025, bajo un estricto rigor científico. Para garantizar la calidad y la precisión de los resultados, se contó con el valioso respaldo técnico y científico del Centro de

Teledetección para el Estudio y Manejo de Recursos Naturales (CETEGERN)
de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

MINAM (2024) a través del portal web del Programa Bosques "GEOBOSQUES", se presenta una información sobre Bosque y Pérdida de Bosque derivada del monitoreo anual para el periodo comprendido entre 2001 y 2023. Además, se presenta una estimación de la deforestación para la provincia de Tahuamanu en 2005, con una superficie de 1 818 ha, en 2015 con 4 385 ha y en 2023 con 3 683 ha. Con un registro histórico acumulado de 81 385 ha.

Miguel et al. (2024) monitorearon las perturbaciones forestales en la España continental entre 1985 y 2023. Adaptaron el método CCDC-SMA para mejorar la detección de perturbaciones, creando nuevas bibliotecas espectrales representativas de la región de estudio, y cuantificamos el año, el mes, la gravedad, el intervalo de retorno y el tipo de perturbación (sustitución de masas, sustitución de masas) con una resolución de 30 m. Además, caracterizaron los regímenes de perturbación forestal y las tendencias (tamaño y severidad de parche, y frecuencia de eventos) de eventos mayores de 0,5 ha a escala nacional por bioma (mediterráneo y templado) y tipo de bosque (latifolio, acicular y mixto). Cuantificaron más de 2,9 millones de parches de bosque perturbado, cubriendo 4,6 Mha en la región y período estudiados. Las perturbaciones forestales fueron en promedio mayores, pero menos severas en el bioma mediterráneo que en el templado, y significativamente mayores y más severas en los bosques aciculares que en los mixtos y latifolios. Desde finales de la década de 1980, las perturbaciones forestales han disminuido en tamaño y severidad mientras que han aumentado en frecuencia en todos los biomas y tipos de bosque.

Peters et al. (2024) analizaron la deforestación y la degradación forestal, sus causas y el éxito de los programas de reforestación implementados en las últimas décadas en los bosques de Madagascar (Boeny y DIANA). Para lograr los objetivos del proyecto, utilizaron un enfoque de análisis espacial basado en productos de teledetección disponibles abiertamente. En el caso de los bosques naturales, identificaron cuándo y dónde se produjo la posible degradación forestal y deforestación y demostrando la dinámica de la fragmentación forestal. Distinguieron entre áreas forestales protegidas y no protegidas. Los resultados muestran que la deforestación y la degradación forestal aumentaron significativamente entre 2000 y 2023, y que la degradación fue más grave en el pasado de lo que se pensaba anteriormente. Las principales causas incluyen la conversión de bosques en tierras agrícolas, los incendios forestales, la producción ilegal de carbón y la tala ilegal de árboles valiosos.

Alarcon-Aguirre et al. (2021) realizaron el análisis de los cambios en el uso del suelo producto de la deforestación en el periodo comprendido entre 1999 y 2018. Se implementaron técnicas de teledetección, con imágenes Landsat 5 TM y 8 OLI con el objetivo de cuantificar la pérdida de bosques. Utilizaron una clasificación supervisada denominada Neural Net. En los procesos de validación, se utilizaron puntos de comprobación en terreno e imágenes de teledetección de resolución media y alta provenientes de diversos sensores (SPOT-5, PlanetScope, WorldView y Drone). Se registró una reducción forestal de 1698.63 km², con una tasa anual de -0,21% y una pérdida promedio de 59,28 km²/año. Entre 2014 y 2018, se procedió a la transformación de 841,41 km² de bosques para otros usos. La deforestación se incrementa predominantemente por la agricultura (72,90%), mientras que la extracción de oro tiene un impacto más pronunciado en sectores específicos.

Aryal et al. (2021a) evaluaron series temporales con el objetivo de identificar alteraciones en el dosel forestal en Nepal. El algoritmo CODED supervisó las alteraciones en el dosel forestal mediante el uso del NDFI. Durante el periodo comprendido entre 2010 y 2020, la superficie deforestada ascendió a 2 753

ha, mientras que la superficie afectada por perturbaciones ascendió a más de 105 650 ha. La iteración utilizando el algoritmo CODED en GEE ha proporcionado un volumen significativo de información para la detección de la degradación forestal y la deforestación en Nepal. Los parámetros del modelo especificados presentaban variaciones significativas en el rendimiento, cuantificado tanto por el productor como por el usuario.

Chen et al. (2021) llevaron a cabo un análisis de la degradación de los bosques templados mediante el uso de series temporales Landsat en GEE en Georgia. Este método fue implementado para supervisar la degradación forestal y la deforestación desde 1987 hasta 2019. Se identificaron condiciones de referencia en las ubicaciones seleccionadas de la muestra. Se empleó un muestreo estratificado aleatorio para estimar el área y evaluar su precisión. La precisión del mapa alcanzó un 91%. La precisión del productor en la clasificación de la degradación forestal fue del 83%, mientras que el usuario logró un 69%. La estimación del área de degradación forestal superó notablemente a la estimación del área de deforestación: $3\,541 \pm 556 \text{ km}^2$ (equivalente al 11% del área forestal en 1987) en comparación con $158 \pm 98 \text{ km}^2$.

Reygadas et al. (2021) utilizaron GEE para comparar el rendimiento de tres algoritmos: Detección Continua de Degradación (CODED), Detección de Tendencias de Perturbación y Recuperación basada en Landsat (LandTrendr) y Detección de Perturbaciones de Series Temporales Multivariadas (MTDD) para detectar y caracterizar las perturbaciones forestales en el suroeste de la Amazonía (Ucayali, Perú y Acre, Brasil) durante el período 2000-2020. En general, los resultados de todos los algoritmos coincidieron con los datos de referencia: las precisiones generales fueron del 94% ($\pm 0,6\%$ LandTrendr), 95% ($\pm 0,6\%$ MTDD) y 96% ($\pm 0,6\%$ CODED). Aunque los productos cartográficos presentan patrones espaciales similares, a menudo difieren en la magnitud específica de la perturbación. CODED funciona bien para capturar perturbaciones asociadas con carreteras, MTDD destaca al capturar parches completos de perturbación, y LandTrendr destaca tanto en términos de facilidad de uso como en la gama de opciones de salida.

Bullock et al. (2020a) llevaron a cabo una evaluación continua de la perturbación de los bosques en zonas protegidas de Guatemala durante el periodo comprendido entre 2000 y 2017. Se empleó la metodología CODED para la identificación de perturbaciones forestales de diversa magnitud y tamaño. A lo largo del periodo de investigación, se calculó que se deforestaron 854 137 ha de bosque y 1 012 947 ha fueron perturbadas, pero no convertidas. La alteración del bosque en zonas protegidas osciló entre menos del 1% y más del 95% del área de un parque. La degradación y la alteración natural impactan una zona de mayor envergadura, aunque la estimación de la magnitud de la deforestación se alinea con investigaciones previas. Según estos hallazgos, la magnitud total de perturbación forestal puede ser subestimada considerablemente si no se toman en cuenta la degradación y la perturbación natural. Las zonas protegidas de Guatemala experimentan una mayor perturbación en comparación con las percepciones previas.

Bullock et al. (2020c) realizaron el seguimiento de la degradación de los bosques tropicales mediante el uso de desmezcla espectral y el análisis de series temporales Landsat en el estado brasileño de Rondônia. El cálculo del NDFI de 1990 a 2013 se basó en fracciones espectrales de los miembros finales, empleando el software GEE. La degradación y la deforestación fueron cartografiadas con una precisión del 88,0% y 93,3% por parte del usuario, y un 68,1% y 85,3% por parte del productor. A lo largo de una duración de 24 años, se calcularon áreas de degradación y deforestación con márgenes de error del 13,9% y 5,3%, respectivamente. En la región de Rondônia, la reducción de la deforestación tras 2004 se correlaciona con un incremento en la degradación forestal.

Bullock et al. (2020d) calcularon la degradación forestal extendida en la Amazonia a través de la utilización de satélites. Realizaron un análisis de series temporales de datos Landsat desde 1995 hasta 2017 con el objetivo de cartografiar la deforestación, la degradación y las perturbaciones naturales en la región amazónica. Se empleó un mapa con el objetivo de estratificar la zona de estudio y asignar etiquetas de referencia a las unidades de muestra en función de su cobertura terrestre e historial de perturbaciones. Para ello,

implementaron un estimador estadístico neutral en la muestra de observaciones de referencia con el objetivo de obtener estimaciones del área y la incertidumbre en intervalos temporales bien definidos. La degradación y las alteraciones naturales han impactado significativamente a una extensa superficie forestal en la ecorregión amazónica, un fenómeno comparable a la deforestación entre 1995 y 2017. Hasta el año 2017, calcularon que una perturbación ha afectado un 17% ($1\,036\,800 \pm 24\,800 \text{ km}^2$, intervalo de confianza del 95%). Identificaron una fuente no registrada de emisiones de carbono y un perjuicio generalizado a los ecosistemas forestales en la Amazonía, donde la superficie de bosque perturbado supera entre un 44% y un 60% la estimación anterior.

Yesuf et al. (2019) analizaron la variación regional en las tasas de degradación forestal y deforestación en un punto crítico de biodiversidad tropical. Identificaron una heterogeneidad regional notable en lo que respecta a la deforestación y la degradación forestal. Las tasas anuales de deforestación experimentaron una reducción del -0,24% en los bosques húmedos de hoja perenne de las tierras bajas, así como en todas las demás áreas vegetales. A lo largo del período en cuestión, las tasas de degradación forestal se incrementaron en los bosques húmedos siempreverdes de tierras bajas y los litorales, mientras que disminuyeron en los bosques húmedos siempreverdes de altitud media.

Zhu y Woodcock (2014) utilizaron datos Landsat disponibles con el objetivo de identificar y categorizar de manera continua las variaciones en la cobertura terrestre. Emplearon el algoritmo cambios continuos (CCDC) que estima la reflectancia superficial y la temperatura de brillo mediante un modelo de series temporales que incorpora componentes de estacionalidad, tendencia y ruptura. La categorización de la cobertura terrestre se llevó a cabo tras la identificación del cambio Random Forest (RF) que emplea los coeficientes correspondientes a los modelos de series temporales y el error medio (RMSE) de la estimación del modelo como entrada. El algoritmo CCDC fue implementado en una escena Landsat en Nueva Inglaterra. Se emplearon un total de 519 imágenes Landsat obtenidas en el periodo comprendido entre

1982 y 2011. Los hallazgos de la investigación CCDC demostraron ser precisos para identificar alteraciones en la superficie terrestre, con una precisión del productor del 98% y precisiones del usuario del 86% en el ámbito espacial, y una precisión temporal del 80%. El algoritmo CCDC resultó en la generación de un mapa de cobertura terrestre compuesto por 16 categorías, con una precisión general del 90%.

Allnutt et al. (2013) cartografiaron la deforestación y la perturbación de los bosques en el Parque Nacional de Masoala, ubicado en la región meridional de Madagascar durante el periodo comprendido entre 2005 y 2011. Investigaron que la tasa anual de cambio forestal en el parque durante el periodo 2010-2011 ascendió a un 1,27%, un valor que supera la tasa de deforestación más reciente a nivel nacional de Madagascar y es notablemente superior a la tasa registrada en el periodo 2005-2008 (0,99 por ciento). A pesar de que la deforestación y la perturbación fueron menos pronunciadas inmediatamente después de 2009 en comparación con los otros años analizados, el incremento respalda resultados recientes que indican una mayor actividad.

Souza et al. (2005a) cartografiaron la tala selectiva y los incendios forestales mediante la combinación de información espectral y espacial en la región de Sinop, ubicada en la región meridional de la Amazonia brasileña. Utilizaron el NDFI para procesar datos provenientes de fracciones de componentes derivadas de modelos de SMA. Un algoritmo de clasificación contextual (CCA) simplifica la interpretación de los datos del NDFI con el fin de mapear con exactitud los daños al dosel ocasionados por actividades de tala y fuego. Los cambios en el dosel ocasionados por la tala y los incendios forestales se distinguieron de aquellos ocasionados por otras perturbaciones naturales. Se realizó una evaluación del rendimiento del NDFI mediante la utilización de inventarios de transacciones forestales a lo largo de un gradiente de bosques en proceso de degradación. Evidenciaron que el NDFI posee el potencial para una subclasificación más profunda de los niveles de degradación en contextos forestales, demostrando una mayor sensibilidad al deterioro del dosel en comparación con cualquier fragmento individual. El clasificador CCA,

evaluado mediante la utilización de imágenes de fotografía aérea, demostró una precisión del 94% en los mapas de deterioro del dosel forestal.

2.2 Base teórica

2.2.1 Bosque

Cuando hablamos de «la definición de bosque», quizá lo que más llama la atención es el hecho de que, aunque existen muchas definiciones de la palabra «bosque» en distintas partes del mundo, hay una definición considerada más oficial e internacional, a la que se adhieren muchos gobiernos nacionales, instituciones y otros organismos y organizaciones. Se trata de la definición de bosque elaborada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO 2012). Los bosques son terrenos cubiertos por árboles con una altura mínima de 3 m y una anchura mínima de la masa arbórea de 50 m. Además, las copas de los árboles tienen que cubrir al menos el 20% de la superficie (Whitmore y Burnham 1975; FAO 2012).

2.2.2 Perturbaciones forestales

La perturbación forestal es cualquier evento discreto que influye en la estructura, la composición de las especies y los recursos disponibles, y se considera un impulsor principal de la heterogeneidad forestal. Las perturbaciones pueden ocurrir de manera abrupta y rápida en cuestión de horas a unos pocos meses, lo que lleva a eventos de reemplazo de rodales, o de manera sutil y gradual con el tiempo, lo que lleva a eventos de no reemplazo de rodales. El origen de las perturbaciones puede ser abiótico (tormentas de viento, incendios forestales, tornados, sequías), biótico (plagas, especies invasoras), antropogénico (cosecha de madera) o resultar de una combinación de estos (las especies no nativas pueden ser más propensas a los incendios forestales). Las características espaciales y temporales de los eventos de perturbación discretos que ocurren durante largos períodos definen los regímenes de perturbación que se caracterizan por múltiples

componentes, como el tamaño de la perturbación (es decir, el área perturbada), la gravedad (es decir, la magnitud del evento de perturbación en el ecosistema) y la frecuencia (es decir, el número medio o mediano de eventos que ocurren por unidad de tiempo) (FAO 2020; Miguel et al. 2024).

2.2.3 Degradación forestal

La degradación forestal no tiene una definición universalmente aceptada, lo cual es una de las razones por las que ha sido más difícil cuantificarla con un procedimiento estandarizado. La FAO define la degradación como la “reducción de la capacidad de un bosque para proporcionar bienes y servicios”, mientras que la Iniciativa Mundial de Observación Forestal (GFOI) la ha descrito como una perturbación causada por la intervención humana en un paisaje boscoso que produce emisiones de carbono, pero no un cambio en la cobertura terrestre. Las observaciones por teledetección basadas en satélites suelen ser la herramienta utilizada para cuantificar la pérdida forestal de cualquier tipo, pero los tipos de degradación que se pueden observar desde el espacio pueden no ser congruentes con las definiciones de políticas. A pesar de estos desafíos, las políticas centradas en el carbono requieren la acción de los países, muchos de los cuales están elaborando y adoptando sus propias definiciones nacionales. Para que una evaluación forestal sea útil, la definición de degradación debe estar explícitamente establecida y vinculada con las herramientas utilizadas para medirla (Asner et al. 2009; FAO 2020).

La disminución de la cobertura de copas arbóreas superior al 10% (por ejemplo, del 100% al 12%) se considera degradación forestal. La tala se clasifica con mayor frecuencia como degradación forestal y, por lo tanto, no se incluye en las estadísticas de deforestación. Por consiguiente, las tasas de degradación forestal son considerablemente más altas que las tasas de deforestación. En consecuencia, muchos países con bosques tropicales tienen una cobertura forestal considerable, pero millones de hectáreas están altamente degradadas por la tala y ya no conservan su estructura original ni sus niveles de biodiversidad (Asner et al. 2009; FAO 2020).

2.2.4 Deforestación

La deforestación se define como la conversión del bosque a otros usos, ya sea inducida por el hombre o no, lo que incluye situaciones causadas por desastres naturales. La deforestación puede definirse también como la tala intencional de bosques o árboles a gran escala, lo que resulta en una pérdida permanente de la cobertura forestal. Esta actividad humana altera significativamente el terreno, transformando lo que antes era una zona boscosa en un paisaje completamente diferente, a menudo destinado a uso agrícola o urbano (FAO 2020).

La selva amazónica es también una de las principales zonas de deforestación del mundo. La Amazonia es uno de los bosques más extensos del mundo y alberga importantes reservas de biodiversidad. Además, se considera uno de los pulmones del planeta por su capacidad para almacenar carbono y producir oxígeno. La deforestación en la región se ha acelerado en los últimos 50 años. El aumento de la demanda mundial de productos agrícolas, así como el desarrollo de la ganadería intensiva, son las principales causas de la deforestación en la Amazonía. Según un estudio publicado por Greenpeace en 2009, la ganadería es responsable del 80% de la deforestación en la región amazónica, lo que representa el 14% de la deforestación anual mundial (FAO 2020).

2.2.5 Principios básicos de teledetección

La teledetección es una tecnología que se utiliza para recopilar información y examinar un objeto, lugar o fenómeno sin contacto físico con él. Se utiliza en diversos campos como la geografía, la geología, la ecología, la glaciología, la hidrología y la oceanografía. Cámaras especiales capturan imágenes de teledetección, lo que ayuda a los investigadores a percibir la Tierra y otros planetas. La teledetección, combinada con la tecnología SIG, facilita importantes operaciones con bases de datos, como consultas a mapas y análisis estadísticos.

Esta tecnología comenzó con la invención de la cámara. Las fotografías iniciales eran simples, pero la intención de tomar imágenes de la Tierra para

su cartografía gráfica surgió en 1840, y gracias a este concepto, los científicos comenzaron a instalar cámaras en globos para obtener una amplia gama de imágenes. Durante la Primera Guerra Mundial, se instalaron cámaras en aviones para obtener imágenes aéreas de deslizamientos de tierra. La teledetección por satélite no se desarrolló hasta la era espacial. Se utilizó para obtener imágenes de la superficie terrestre, así como para detectar otras naves espaciales y otros planetas.

Existen tres plataformas principales de teledetección, que se mencionan a continuación:

- ✓ Plataformas a nivel del suelo: como grúas y torres
- ✓ Plataformas aéreas: como helicópteros, aeronaves de gran altitud y aeronaves de baja altitud.
- ✓ Plataformas espaciales: como transbordadores espaciales, satélites geoestacionarios y satélites en órbita polar.

La teledetección recopila información sobre la superficie de la Tierra mediante el análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos.

Los principios básicos implican:

- ✓ Radiación electromagnética: Diferentes objetos interactúan con distintas longitudes de onda de radiación electromagnética (luz) de forma única. Al medir la radiación reflejada o emitida, podemos identificar y categorizar objetos.
- ✓ Fuente de energía: La teledetección utiliza la radiación del sol o emitida por el propio objeto.
- ✓ Interacción con el objetivo: La radiación interactúa con el objeto, ya sea absorbida, reflejada o transmitida. El grado de interacción depende de las propiedades del objeto y de las características de la radiación.
- ✓ Detección por sensores: Los sensores montados en satélites o aviones registran la radiación reflejada o emitida.

- ✓ Procesamiento y análisis de datos: Los datos capturados se procesan y analizan para extraer información sobre el objeto o área objetivo (Aggarwal 2004; Anji-Reddy 2010; Chuvieco 2016).

2.2.6 Detección de degradación continua

CODED es una aplicación de monitoreo forestal desarrollada para mapear y estimar estadísticamente las áreas de bosque afectadas por la degradación. CODED es de código abierto y puede ejecutarse en GEE. CODED puede utilizarse para monitorear y estimar la degradación forestal y la deforestación (Bullock et al. 2020c)

CODED fue diseñado para utilizar datos Landsat de 30 m. Antes de ejecutar el algoritmo, es necesario crear una pila de datos multidimensional. Esta pila contiene todos los datos Landsat disponibles o, en la implementación de GEE, datos mensuales compuestos (Bullock et al. 2020c).

Los datos se convierten mediante desmezcla espectral lineal para representar fracciones de los miembros finales espectrales desarrollados en Souza et al. (2005a), además de un miembro final de nube desarrollado por ellos mismos. Los cinco miembros finales son: Vegetación verde, Vegetación no fotosintética, Sombra, Suelo y Nube.

Los miembros finales se transforman, según la metodología de Souza et al. (2005a), en el NDFI. El NDFI generalmente se diseña para destacar áreas de bosques degradados o talados. Originalmente, se diseñó para el monitoreo forestal en la Amazonía.

2.6.7 Análisis de mezcla espectral (SMA)

Durante el preprocesamiento, los datos de entrada se transforman en imágenes fraccionarias de endmembers mediante el análisis de mezcla espectral (SMA). Se ha demostrado que la desmezcla espectral en una variedad de entornos es sensible a los cambios de tierra de subpíxeles, lo que la hace ideal para la detección de eventos de degradación a pequeña escala. La aplicación de SMA para mapear la degradación se demostró en la

Amazonía brasileña en el trabajo del Dr. Carlos Souza Jr. (Souza et al. 2005a) que introdujo el modelo de mezcla utilizado por defecto en CODED.

El modelo SMA utilizado en CODED transforma la reflectancia en la proporción de escala de píxeles de vegetación verde (GV por sus siglas en ingles), suelo, vegetación no fotosintética (VPN por sus siglas en ingles), sombra y nube. Estas capas se pueden utilizar para calcular el índice de fracción de diferencia normalizada (NDFI por sus siglas en ingles), que es una transformación de imagen fraccional introducida por primera vez en Souza et al. (2005a) y demostró ser sensible al daño subpíxel por tala o incendios (Salih 2023).

2.2.8 Índice de Fracción de Diferencia Normalizada (NDFI)

NDFI es un índice espectral que detecta los daños y la degradación del dosel forestal. Se utiliza para cartografiar la deforestación y vigilar la salud de los bosques. Los valores del NDFI varían de -1 a 1. En bosques intactos, el NDFI muestra valores altos (es decir, aproximadamente 1) debido a la combinación de un GV-sombra elevado (es decir, un GV elevado y sombra del dosel) y valores bajos de NPV y suelo. El NPV las fracciones de suelo aumentan a medida que los bosques se degradan, lo que reduce los valores del NDFI en relación con los bosques intactos. Las áreas deforestadas presentan un GV-sombra muy bajo y un VPN y suelo elevados, lo que permite distinguirlas de los bosques degradados según la magnitud del NDFI (Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a; Souza et al. 2005b).

Para detectar bosques degradados o dañados, primero se debe caracterizar su estado original. Generalmente, un valor de NDFI cercano o igual a 1 indica un paisaje boscoso. Sin embargo, la magnitud del NDFI dependerá de la densidad del bosque. Se utiliza un período de entrenamiento para definir el estado general del bosque. Para tener en cuenta la nubosidad, el ruido del sensor y otros factores que causan variabilidad entre imágenes, se ajusta un modelo de regresión para cada píxel de todas las observaciones del período de entrenamiento. El modelo de regresión consta de los siguientes componentes:

- ✓ Un término constante, que representa la magnitud general.
- ✓ Un término seno y coseno, que representa la variabilidad estacional o intraanual.
- ✓ Un término de ruido, resumido en el algoritmo como el error cuadrático medio

Estos componentes de regresión se utilizan para diferenciar un bosque de otras coberturas terrestres (Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a; Souza et al. 2005b).

Un paso importante en este proceso no es solo la clasificación forestal, sino también su caracterización. Al calcular la magnitud de la regresión del NDFI de entrenamiento, se puede calcular el cambio en el NDFI en relación con la condición original. De esta manera, la degradación se define como su relación con el estado original, no solo el NDFI actual. Un buen ejemplo de esta distinción se encuentra en el cerrado forestal, que existe naturalmente en un estado de cobertura de dosel discontinua. El cerrado naturalmente tendrá un NDFI menor que un bosque de dosel cerrado, pero eso no significa que esté degradado. Esta diferencia alude a la dificultad de clasificar un bosque degradado basándose únicamente en una imagen (Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a; Souza et al. 2005b).

2.2.9 Landsat

El programa Landsat utiliza cuatro generaciones de sensores. La misión del Escáner Multiespectral (MSS) funcionó entre 1972 y 1993 y contaba con cuatro canales espectrales: verde, rojo y dos infrarrojos cercanos. La resolución espacial era de 57 o 60 metros (Wulder et al. 2022).

La misión Landsat Thematic Mapper (TM) comenzó a mediados de los 80 y Landsat 5 finalmente finalizó en noviembre de 2012. Este sensor cuenta con siete canales espectrales con una resolución espacial de 30 metros (Adam et al. 2023).

La misión Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) del Landsat 7 comenzó en 1999 y sigue operativa. Cuenta con los mismos canales espectrales que el

sensor TM, además de un segundo canal térmico y un canal pancromático de 15 metros. El 31 de mayo de 2003, el corrector de línea de escaneo del ETM falló y, desde entonces, las imágenes del ETM carecen de grandes porciones de cada escena. En los sitios del USGS, estas imágenes se designan como SLC-Off y, por lo general, no se recomienda su uso (Adam et al. 2023).

La misión Landsat 8 comenzó en la primavera de 2013. Esta cuenta con 11 bandas de datos, muchas de ellas similares a las de la misión ETM. El archivo principal del sensor Optical Land Imager (OLI) contiene 7 bandas de datos con una resolución de 30 m: Azul Costero, Azul, Verde, Rojo, NIR, SWIR1 y SWIR2. También incluye un archivo Cirrus de 30 m y un archivo Pancromático de 15 m. El sensor de Infrarrojo Térmico (TIR) cuenta con 2 bandas de datos con una resolución de 100 m. Se recomienda a los usuarios utilizar únicamente la primera banda TIR (banda 10) en sus investigaciones (Adam et al. 2023).

Landsat 9 Optical Land Imager (OLI 2) es el satélite más reciente de la serie Landsat y continúa el registro irremplazable de Landsat sobre la superficie terrestre. Se lanzó desde la Base de la Fuerza Espacial Vandenberg el 27 de septiembre de 2021. Landsat 9 replica en gran medida a su predecesor, Landsat 8 (Adam et al. 2023).

2.3 Definición de términos

Perturbación forestal: Cualquier evento discreto que influye en la estructura, la composición de las especies y los recursos disponibles, y se considera un impulsor principal de la heterogeneidad forestal (FAO 2012; FAO 2020).

Deforestación: La deforestación puede definirse también como la tala intencional de bosques o árboles a gran escala, lo que resulta en una pérdida permanente de la cobertura forestal (FAO 2012; FAO 2020).

Degradación forestal: Perturbación causada por la intervención humana en un paisaje boscoso que produce emisiones de carbono, pero no un cambio en la cobertura terrestre (Asner et al. 2009).

GEE: es un producto de Google Cloud para el análisis geoespacial a gran escala. Combina un catálogo multipetabyte de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con computación a escala planetaria para acelerar la investigación y las aplicaciones ambientales (Wahap y Shafri 2020).

CODED: Es una aplicación de monitoreo forestal desarrollada para mapear y estimar estadísticamente las áreas de bosque afectadas por la degradación (Bullock et al. 2020c).

NDFI: Es un índice espectral que detecta los daños y la degradación del dosel forestal. Se utiliza para cartografiar la deforestación y vigilar la salud de los bosques (Souza y Roberts 2005)

SMA: Es un algoritmo que transforma la reflectancia en la proporción de escala de píxeles de vegetación verde (GV por sus siglas en ingles), suelo, vegetación no fotosintética (VPN por sus siglas en ingles), sombra y nube Área sin cobertura en la superficie del terreno (Souza y Roberts 2005).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de estudio

El estudio es descriptiva y correlacional, porque se analizó el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo de detección continua (CODED) mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y el uso del análisis de mezcla espectral lineal (SMA) de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025 (León y González 2020; Hazari 2023; Ebidor y Ikhide 2024; Verma et al. 2024).

3.2 Diseño del estudio

El estudio corresponde a un diseño no experimental Transaccional (transversal) y longitudinal, porque se analizó el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo de detección continua (CODED) mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y el uso del análisis de mezcla espectral lineal (SMA) de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025 (León y González 2020; Hazari 2023; Ebidor y Ikhide 2024; Verma et al. 2024).

3.3 Delimitación espacial y temporal

El área de estudio está ubicada en la provincia de Tahuamanu dentro de la Región Peruana de Madre de Dios. La provincia de Tahuamanu tiene una población estimada de 11 047 habitantes (INEI 2017) y abarca los distritos de Iñapari, Iberia y Tahuamanu. Geográficamente abarca desde los 10°54'25" a

11°58'40" de latitud sur hasta los 68°53'42" a 70°30'45" de longitud oeste, y se extiende en un rango altitudinal que va desde los 300 hasta los 550 metros sobre el nivel del mar (GOREMAD y IIAP 2009; SENAMHI 2015; Alarcón et al. 2016; Alarcon-Aguirre et al. 2021). En ella, espacialmente interactúan títulos habilitantes (concesiones forestales de madera, de productos diferentes de la madera, conservación, ecoturismo), plantaciones, zonas agrícolas y territorios de comunidades nativas (Dourojeanni 2019). De acuerdo con la clasificación de las zonas de vida, se cataloga específicamente como Tropical Cálido y Húmedo (Holdridge 1967). La vegetación de la región consiste principalmente en bosques aluviales y de tierra firme con bosques de bambú de ladera baja (*Guadua* sp.). Los bosques aluviales cubren terrazas bajas ubicadas a lo largo de los bordes de los ríos principales y sus áreas cambian debido a la migración de los ríos. El bosque de tierra firme se encuentra por encima del terreno aluvial lejos de los cursos de los ríos y lagos y se caracteriza por una diversidad de tipos de bosque de topografía relativamente plana.

De acuerdo con las Estaciones de Puerto Maldonado, Iñapari, Iberia, Pakitza y Assis-Brasil, la temperatura media anual varía entre los 22°C y 26°C, presentando una variabilidad mínima a lo largo de todo el año. La disminución de la temperatura provocada por la aparición de aire frío en la masa polar antártica, también conocida como friaje, ocurre entre mayo y septiembre, llegando en promedio a 10°C (GOREMAD y IIAP 2009; SENAMHI 2015; Alarcón et al. 2016; Alarcon-Aguirre et al. 2021).

La precipitación representa un promedio total anual de 1 800 mm. La precipitación es más baja durante los meses de mayo a septiembre, representando aproximadamente el 20 al 25% del total anual. Los meses de octubre a abril representan el 75 al 80% del total. La orientación de la intensidad pluvial se manifiesta de Sureste a Noroeste. Con condiciones climáticas caracterizadas por una alta humedad persistente, comúnmente muy inestables. En estas condiciones, la temperatura disminuye con la altura, la humedad relativa oscila entre el 63% y el 90%, y la evapotranspiración

oscila entre 598,4 mm y 652,6 mm (GOREMAD y IIAP 2009; SENAMHI 2015; Alarcón et al. 2016; Alarcon-Aguirre et al. 2021).

En términos hidrográficos, se compone de los ríos Manuripe, Pariamanu, Muymanu, Tahuamanu, Yaverija, Acre, y Noaya, junto con otros afluentes de menor magnitud (GOREMAD y IIAP 2009; Perz et al. 2016).

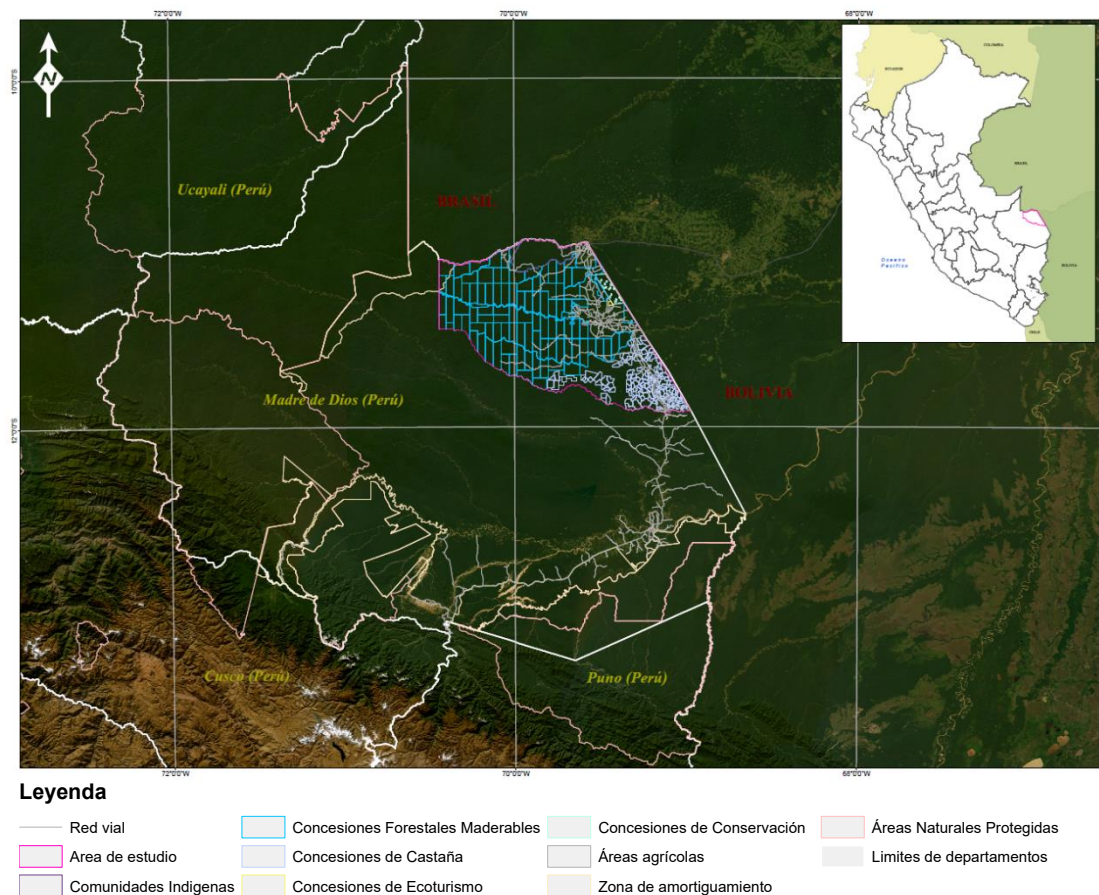


Figura 1. Ubicación de títulos habilitantes en los bosques de Tahuamanu.

El estudio evaluó los años 2005, 2015 y 2025.

3.4 Población y muestra

El área de estudio abarca una superficie de 10 374,10 km² (1 037 409,77 ha). La Provincia de Tahuamanu presenta ocho categorías de tenencia de la tierra claramente diferenciadas: (1) propiedades privadas para la agricultura; (2) concesiones forestales maderables; (3) concesiones de productos diferentes

a la madera (principalmente de castaña, *Bertholletia excelsa*); (4) concesiones de conservación; (5) concesiones de ecoturismo; (6) Comunidades Nativas; (7) áreas naturales protegidas (Parque Nacional Alto Purús) y (8) la Reserva Territorial para Pueblos Indígenas en Aislamiento Voluntario (Reserva Territorial de Madre de Dios), estas dos últimas, no serán consideradas en el estudio (Figura 1).

Para el análisis del cambio espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal, el muestreo aleatorio estratificado, aplicado para validar el algoritmo CODED, se basó en el NDFI derivado de la SMA de imágenes de Landsat, categorizadas por títulos habilitantes. El tamaño de la muestra fue determinado y posteriormente ajustado por la distribución de probabilidad binomial (p = probabilidad de éxito y n = tamaño de la muestra). La combinación para determinar el enfoque aleatorio estratificado con un criterio de conveniencia logística se aplicó para garantizar una línea base en la accesibilidad y seguridad en campo de los tesisistas ajustando los puntos de muestreo en áreas de alto riesgo, manteniendo al mismo tiempo la representatividad estadística (Anaya y Chuvieco 2010; Chuvieco y Hantson 2010; Ochoa y Páez 2019). Los cálculos de la muestra se realizaron de acuerdo con la ecuación 1:

$$n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N-1)E^2 + Z^2 pq} \quad (\text{Ecuación 1})$$

dónde:

Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1,96 (95%).

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

q: Indica el porcentaje de errores ($q = 1 - p$), 0,50 (50%).

N: Tamaño de la población.

E: El error permitido, 0,05 (5%).

$$= \frac{(1,96)^2 * 0,5(0,5 * 1\,037\,409,77)}{(1\,037\,409,77 - 1) * 0,05^2 + 1,96^2 * (0,5 * 0,5)}$$

$n = 384,02 = 384$ puntos de muestreo

Se empleó una técnica de muestreo aleatorio estratificado probabilístico para facilitar la validación de la clasificación y la evaluación de la precisión cartográfica y su adecuada validación. Este diseño fue adoptado para garantizar una distribución equitativa de las unidades de muestreo en toda el área de estudio y entre las clases de cobertura forestal. Se consideró un tamaño de muestra de 384 puntos de referencia y se distribuyó uniformemente en las clases de bosque, degradación forestal y deforestación (128 muestras por clase) siguiendo la metodología de Olivares y López-Beltrán (2019).

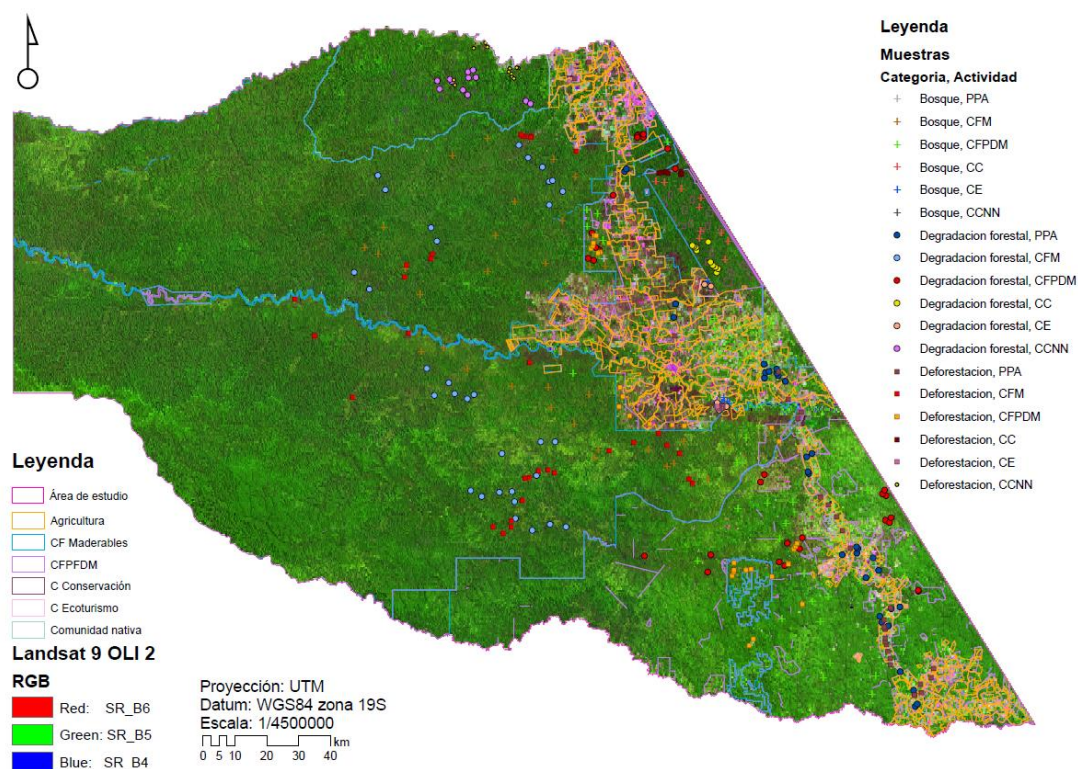


Figura 2. Muestras distribuidas en los bosques de Tahuamanu.

La distribución de muestras por categoría comprendió 32 para propiedades privadas para la agricultura, 32 para concesiones forestales maderables, 32 para concesiones de productos diferentes a la madera, 10 para concesiones de conservación; 10 para concesiones de ecoturismo y 12 para Comunidades Nativas.

La recolección de esta muestra de validación se realizó a través de criterios mixtos, que incorporaron tanto muestreo aleatorio como de conveniencia. Se empleó un enfoque probabilístico que aumentó la probabilidad de seleccionar unidades de muestreo próximas (Ochoa y Páez 2019) complementado con un criterio de conveniencia logística. Este último priorizó la accesibilidad de los puntos de control en el campo, o la disponibilidad de imágenes de satélite de muy alta resolución para la verificación en el terreno, junto con los datos recogidos en el campo. Este enfoque agilizó el esfuerzo de recolección de datos, asegurando que las tres categorías estuvieran cubiertas.

3.5 Método y técnicas

Para detectar tanto los eventos de deforestación como los eventos más sutiles de degradación forestal por los impulsores de la perturbación forestal en los títulos habilitantes de interés en el área de estudio, utilizaremos el algoritmo CODED (Aryal et al. 2021b; Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024). CODED es una herramienta gratuita y de código abierto que se ejecuta en GEE, el cual utiliza imágenes ópticas de observación de la Tierra de libre acceso proporcionadas por los satélites Landsat (Aryal et al. 2021b; Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024).

Se utilizaron imágenes de reflectancia de superficie de la Colección 2 Nivel 2 de Landsat (5 TM, 8 OLI y 9 OLI 2) disponibles durante el período de estudio sin nubosidad o menor o igual de 10%, se enmascararon las nubes y se utilizó en el análisis del algoritmo (Aryal et al. 2021b). Para la aplicación, se empleó el SMA para calcular y evaluar los cambios de series temporales en NDFI (Ecuaciones 2) (Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a; Bullock et al. 2020c; Eckert et al. 2024). El algoritmo utilizó desmezcla espectral lineal para representar fracciones de subpíxeles de miembros finales espectrales clave, incluida la GV, la NPV, el suelo, la sombra y las nubes (Souza et al. 2005a; Peters et al. 2024). Seguidamente, se calculó el NDFI, que está diseñado para analizar las fracciones de los miembros finales dentro de cada píxel de una manera que enfatiza las disparidades entre las copas de los bosques

perturbadas y no perturbadas (Souza et al. 2013). Cuando hay mayores proporciones de suelo y NPV, el valor de NDFI es bajo y es un indicativo de condiciones forestales degradadas o de una cobertura de dosel naturalmente escasa (Souza et al. 2013). Como resultado, es capaz de detectar incluso perturbaciones a pequeña escala en el dosel del bosque, lo cual es típico de la degradación forestal (Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024; Peters et al. 2024).

Mediante el algoritmo CODED en GEE, se utilizó el análisis de series temporales de NDFI para detectar la degradación efímera de los bosques y reducir los falsos positivos debidos a los patrones estacionales de vegetación (Aryal et al. 2021b). Se estableció un patrón NDFI de referencia, que tiene en cuenta la variación estacional mediante regresión armónica (Aryal et al. 2021b; Reygadas et al. 2021; Peters et al. 2024). El algoritmo requiere datos de entrenamiento, que comprenden diferentes tipos de cobertura del suelo en la región de estudio, para distinguir entre las perturbaciones forestales que causan un cambio en el uso de la tierra (deforestación) y las que no lo hacen (degradación forestal) (Aryal et al. 2021b; Reygadas et al. 2021; Peters et al. 2024). En este estudio, se consideró los valores de reflectancia (endmembers, Tabla 3) propuesto por Souza et al. (2005a), que identificaron los eventos de perturbación forestal en el rango esperado de NDFI (Tabla 4).

Para establecer la precisión de los mapas de NDFI sobre la deforestación y degradación se utilizó un método mixto: datos de campo para 2025, imágenes de alta resolución (PeruSat-1 y PlanetScope) para 2015 y puntos aleatorizados por estratos en el mapa para 2005. La distribución comprendió un muestreo estratificado aleatorio (Zhang et al. 2020). Para todos los casos, se utilizó la matriz de confusión y el índice de kappa (k) (Cohen 1960; Elijah y Jensen 1996; Chuvieco 2002; Cohen et al. 2003; Chuvieco y Hantson 2010; Alarcón et al. 2016).

Establecido el NDFI con los valores de bosque intacto, degradación forestal y deforestación para 2005, 2015 y 2025, se procedió a establecer las tasas anuales de pérdida de bosques y los cambios producidos entre periodos (2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025), para ello se utilizó el geoprocetamiento

espacial de diferencia con los softwares ArcGIS Pro 3,4® y ArcGIS 10.8® (Puyravaud 2003; INRENA et al. 2006; CA 2007; Alarcón et al. 2016; Asner y Tupayachi 2017; Alarcon-Aguirre et al. 2021; Alarcon-Aguirre et al. 2023).

Finalmente, para medir los cambios de los datos continuos de cobertura de dosel de la serie temporal anual completa, con CODED se mostrarán los cambios en las transiciones entre estas clases (bosque, degradación forestal y deforestación). Donde los puntos asignados por tipos de actividades en títulos habilitantes identificarán el momento y dinámica de las perturbaciones (Vargas et al. 2019; Aryal et al. 2021b; Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024; Peters et al. 2024).

3.6 Tratamiento de datos

3.6.1 Procesamiento de datos

El estudio comprendió las siguientes fases:

- 1. Selección de imágenes de satélite:** se procedió a la selección de imágenes Landsat Thematic Mapper (5 TM) y Operational Land Imager (8 OLI y 9 OLI 2) de la Colección 2 y del Nivel 2 a través de la plataforma GEE para construir una serie temporal de la época seca (mayo – septiembre) correspondiente a los años 2005, 2015 y 2025 (Tabla 2). Para abarcar la totalidad del espacio de estudio, se emplearon dos representaciones gráficas que contienen números de ruta y fila; 002-068 y 003-068 (Tabla 2). El mosaico de imágenes Landsat de los años de estudio serán sometido a procesamiento en GEE; calibración, preprocesamiento, atmosférica, enmascaramiento de nubes y SMA (Asner et al. 2004; Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a; Asner et al. 2009; Souza et al. 2013; Schultz et al. 2016; Bullock et al. 2020c). La elección de imágenes tomará en cuenta la ausencia de nubosidad o inferior al 10%.

Tabla 2. Características de datos de observación de la tierra

Sensor	Ruta y fila	Fecha de Imagen
Landsat 5 TM	002-068 y 003-068	05-09/2005
Landsat 8 OLI	002-068 y 003-068	05-09/2015
Landsat 9 OLI 2	002-068 y 003-068	05-09/2025

Para ajustar y culminar la corrección atmosférica de los datos Landsat, se aplicó los factores de escala a las bandas propuestas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Adam et al. 2023); 1. Se multiplico 0,0000275 a las bandas ópticas, 2. 0,00341802 a las bandas térmicas, y 3. La suma de -0,2 para todas las bandas.

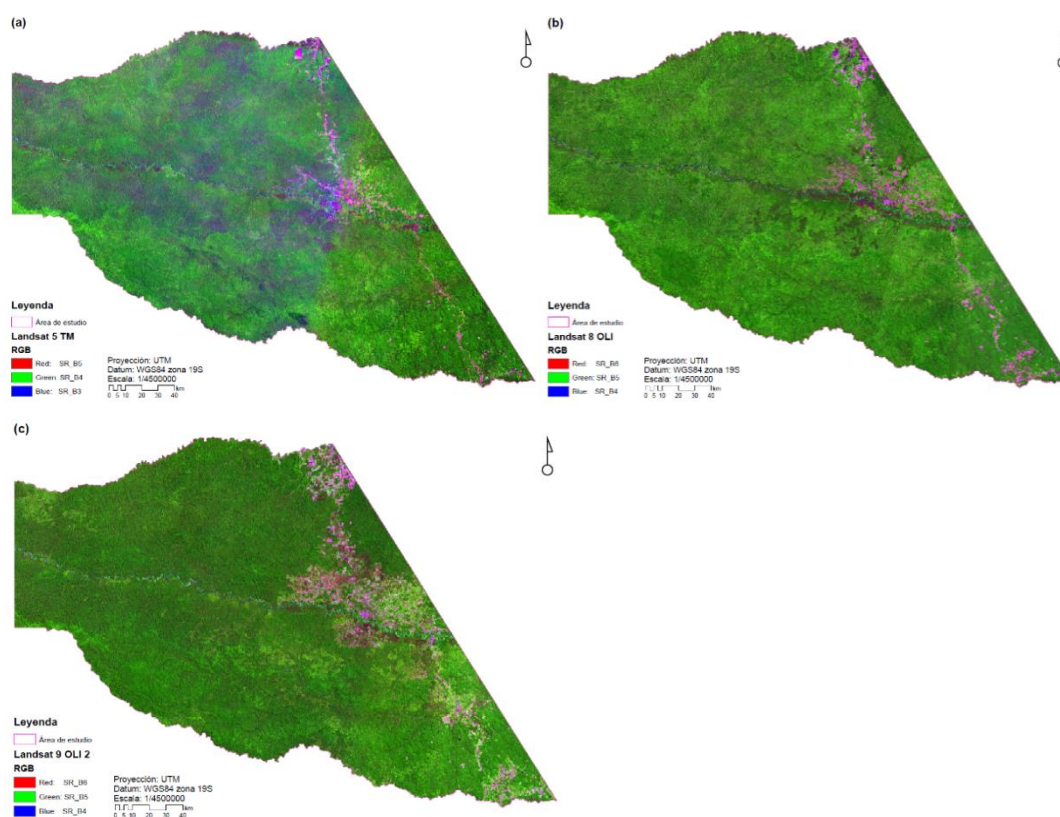


Figura 3. Imágenes Landsat; mosaico de (a) Landsat 5 TM de 2005, (b) Landsat 8 OLI de 2015 y (c) Landsat 9 OLI 2 de 2025.

- 2. CODED para SMA y NDFI:** la metodología CODED tiene tres componentes primarios: 1) Preprocesamiento de imágenes ópticas para crear máscara de nubes y transformar la reflectancia en imágenes de fracciones de miembros terminales (endmembers), 2) Detección de cambio usando la detección de rotura basada en NDFI, y 3) Detección continua de cambios a deforestación o degradación forestal (Aryal et al. 2021b; Reygadas et al. 2021).

Inicialmente se aplicó el SMA para la clasificación de subpíxeles que se usaron para desmezclar las mediciones del dosel de la planta del suelo en el suelo, GV y la NPV, debido a que el SMA depende de la respuesta espectral de los componentes de la cobertura del suelo (Souza et al. 2005a; Bullock et al. 2020d; Eckert et al. 2024). El clasificador de subpíxeles es un método de imagen avanzado que se usó para detectar material más pequeño que un píxel de imagen, usando imágenes multiespectrales Landsat (Souza et al. 2005a; Allnutt et al. 2013; Zhu y Woodcock 2014; Bullock et al. 2020d; Eckert et al. 2024). Asimismo, aborda el "problema de píxeles mixtos" al identificar con éxito un material específico cuando se combinan en un píxel materiales distintos al que se busca. Discrimina entre materiales espectralmente similares, como especies de plantas individuales, tipos de agua específicos o materiales distintivos creados por el hombre. Permite desarrollar firmas espectrales transferibles entre escenas (Aryal et al. 2021b; Miguel et al. 2024).

En los bosques degradados, los elementos espectrales más habituales son los píxeles combinados de la GV, NPV, el suelo, la nube y la sombra. Estos píxeles combinados pueden fragmentarse en secciones de endmembers, en las que la reflectancia del píxel combinado surge de la combinación de las reflectancias de los elementos endmembers que se encuentran en el píxel (Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a; Bullock et al. 2020a; Bullock et al. 2020c; Chen et al. 2021). En el estudio, se consideró los valores de reflectancia (Tabla 3) propuesto por Souza et al. (2005a).

Tabla 3. *Firmas espectrales puras (endmembers) para bandas Landsat 5 TM*

Fracción	Valores de firmas espectrales puras					
	Azul	Verde	Roja	NIR	SWIR1	SWIR2
Sombra y nube	0,4031	0,8714	0,79	0,8989	0,7002	0,6607
Suelo	0,1799	0,2479	0,3158	0,5437	0,7707	0,6646
Vegetación no fotosintética (NPV)	0,1514	0,1597	0,1421	0,3053	0,7707	0,1975
Vegetación verde (GV)	0,0119	0,0475	0,0169	0,625	0,2399	0,0675

Fuente: Tomado de Souza et al. (2005a).

Tabla 4. *Firmas espectrales puras (endmembers) para bandas Landsat 8 OLI y 9 OLI-2*

Fracción	Valores de firmas espectrales puras					
	Azul	Verde	Roja	NIR	SWIR1	SWIR2
Sombra y nube	0,9000	0,9600	0,9800	0,9700	0,9400	0,8800
Suelo	0,1800	0,2400	0,2900	0,3600	0,4800	0,5600
Vegetación no fotosintética (NPV)	0,1400	0,1700	0,2200	0,3300	0,5500	0,3000
Vegetación verde (GV)	0,0450	0,0900	0,0400	0,6100	0,3000	0,1000

Fuente: Tomado y adaptado de Shimabukuro et al. (2014); Shimabukuro et al. (2019); Souza et al. (2020) Shimabukuro et al. (2023)

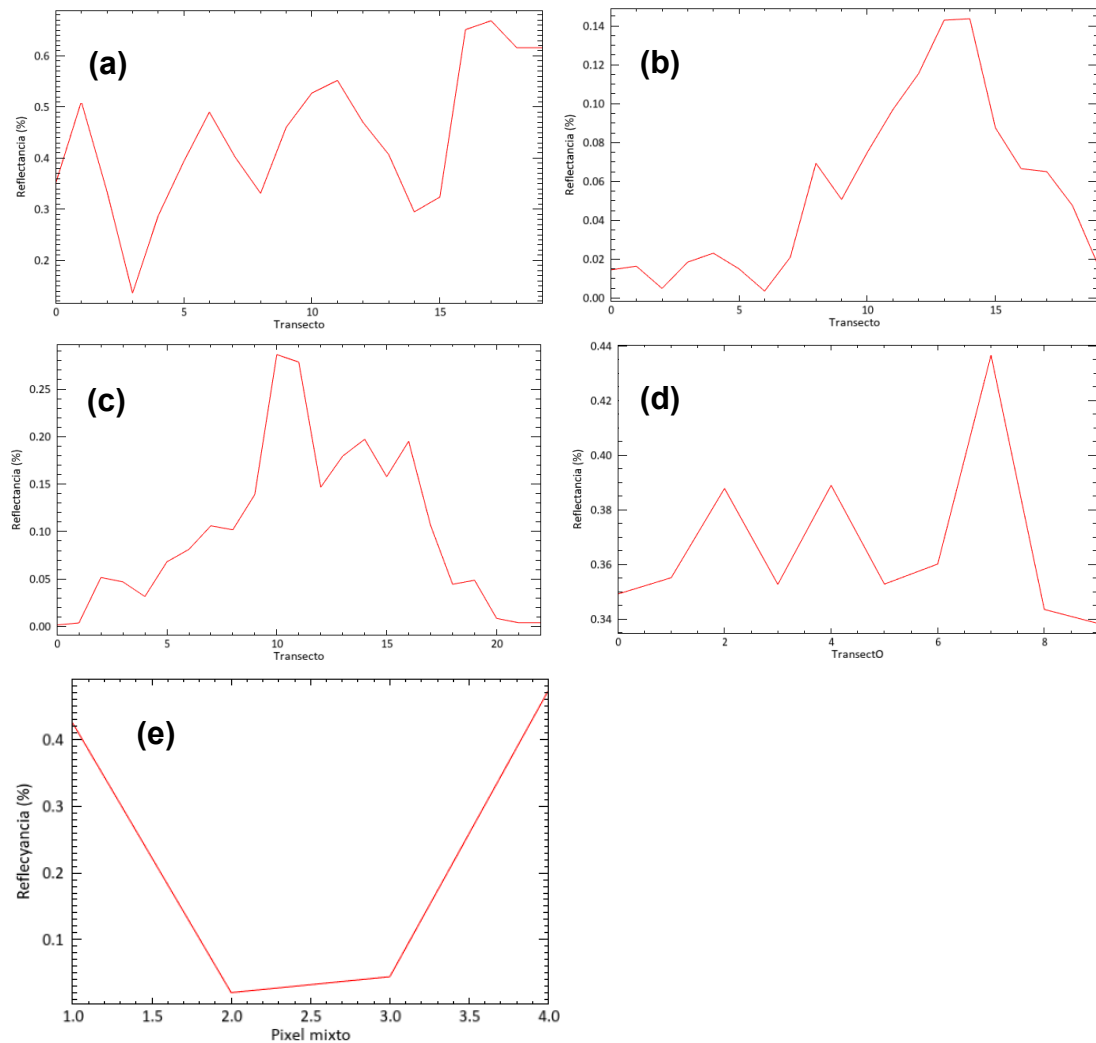


Figura 4. Firmas espectrales puras (Endmembers) candidatas para determinar GV (a), NPV (b), Soil (c), Sombra (d) y pixel mixto (e) para 2025.

Los datos Landsat transformados con SMA en miembros finales se utilizaron para el NDFI, que es un índice de vegetación que mide la cubierta de copas y se utiliza para controlar la deforestación y la degradación forestal (Souza et al. 2005a). Esta técnica es sensible al estado de la cubierta de copas, con ello, se diferencia los pixeles de bosque intacto, degradados y deforestados.

NDFI se expresa mediante (Ecuación 2):

$$NDFI = \frac{GV_{Shade} - (NPV + Soil)}{GV_{Shade} + (NPV + Soil)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde

$$GV_{Shade} = \frac{GV}{1-Shade} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Los valores de NDFI varían en el rango de -1 a 1. Los bosques preservados presentan un valor de NDFI aproximado de 1. Una reducción en la cobertura arbórea resultará en una reducción del NDFI, mientras que una tala total del bosque conducirá a un valor cercano a -1. Los bosques de dosel abierto reportan valores de NDFI similares a los bosques densos que han sido raleados (Souza y Roberts 2005). Los valores NDFI empleados en la investigación incluirán:

Tabla 5. *Valores NDFI considerados*

Categoría	Valores NDFI
Bosque intacto	> 0,68
Degradación forestal	> 0,55 y ≤ 0,68
Deforestación	≤ 0,55

Fuente: tomado y adaptado de Souza et al. (2005a).

- 3. Degradación forestal y deforestación de NDFI por títulos habilitantes:** la cuantificación de bosque intacto, degradación forestal y deforestación obtenida mediante NDFI (Tabla 4) (Souza y Roberts 2005; Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024), se clasificaron por actividades en títulos habilitantes. Para ello, se consideró seis categorías de tenencia de la tierra claramente diferenciadas: (1) propiedades privadas para la agricultura; (2) concesiones forestales maderables; (3) concesiones de productos diferentes a la madera (principalmente de castaña, *Bertholletia excelsa*); (4) concesiones de conservación; (5) concesiones de ecoturismo; y (6) Comunidades Nativas (Figura 1) (Chávez et al. 2013; Alarcon-Aguirre et al. 2023).

- 4. Cambios de cobertura mediante NDFI:** para llevar a cabo la cuantificación y el análisis de las modificaciones en la región de interés, se realizó el cálculo de la variación espacial entre las áreas y los momentos iniciales ($A1$ y $t1$) y los momentos finales ($A2$ y $t2$) asociados a un intervalo de tiempo específico (R) (Ecuación 4) (Puyravaud 2003; INRENA et al. 2006; CA 2007; Alarcón et al. 2016; Asner y Tupayachi 2017).

$$R = (A1 - A2) / (t2 - t1) \quad (\text{Ecuación 4})$$

La Ecuación 5 proporciona la tasa de cambio anual (q) basada en la tasa anual en porcentaje. Esta fórmula es fundamental para calcular el crecimiento o decrecimiento de una variable a lo largo del tiempo (Puyravaud 2003; Alarcón et al. 2016).

$$q = \left(\frac{A1}{A2}\right)^{\left(\frac{1}{t2-t1}\right)-1} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Los cambios en la cobertura por deforestación y degradación forestal en el periodo 2005-2025 se estableció mediante un algebra de diferencia espacial (Ecuación 6) (Puyravaud 2003; INRENA et al. 2006; CA 2007; Alarcón et al. 2016; Asner y Tupayachi 2017).

$$\text{Época } 2005 * 10 + \text{Época } 2015, 2025 \quad (\text{Ecuación 6})$$

- 5. Datos continuos con CODED:** para medir los cambios de los datos continuos de cobertura de dosel de la serie temporal anual completa con CODED (bosque, degradación forestal y deforestación), se asignarán puntos por tipos de actividades en títulos habilitantes donde se identificaron el inicio y la dinámica de las perturbaciones en el periodo 2005-2025 (Vargas et al. 2019; Aryal et al. 2021b; Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024; Peters et al. 2024).

Los datos serán procesados en el Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84) zona 19 S.

3.6.2 Precisión de datos

La cartografía de bosques intacto, degradación forestal y deforestación de los años 2005, 2015 y 2025 fueron validados mediante la precisión general de una matriz de confusión y la reproductibilidad (índice) de kappa (Ecuaciones 7 y 8). En base al número de muestras, de recopilo información de campo para 2025, de imágenes de alta resolución para 2015 (PlanetScope) y puntos aleatorizados en el mapa para 2005 (Cohen 1960; Cohen et al. 2003; Cerda y Villarroel 2008; Kuhn y Johnson 2013; Alarcón et al. 2016).

$$Precision\ general = VP + VN / VP + FP + VN + FN \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde: VP es verdadero positivo, VN verdadero negativo, FP falso positivo, y FN falso negativo.

$$Kappa(k) = f_o - f_c / N - f_c \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde: f_o : proporción de unidades concordantes, y f_c : proporción de unidades para las que se espera una concordancia al azar (Tabla 5).

Tabla 6. *Medición de índice de kappa*

Valores de Kappa	Grado de Concordancia
“0,81 – 1,00”	“Casi perfecta (<i>Almost perfect</i>)”
“0,61 – 0,80”	“Considerable (<i>Substantial</i>)”
“0,41 – 0,60”	“Moderada (<i>Moderate</i>)”
“0,21 – 0,40”	“Aceptable (<i>Fair</i>)”
“0,01 – 0,20”	“Leve (<i>Slight</i>)”
“0,00”	“Pobre (<i>Poor</i>)”

Fuente: Cerda y Villarroel (2008); Cohen (1960); (Cohen et al. 2003); Landis y Koch (1977).

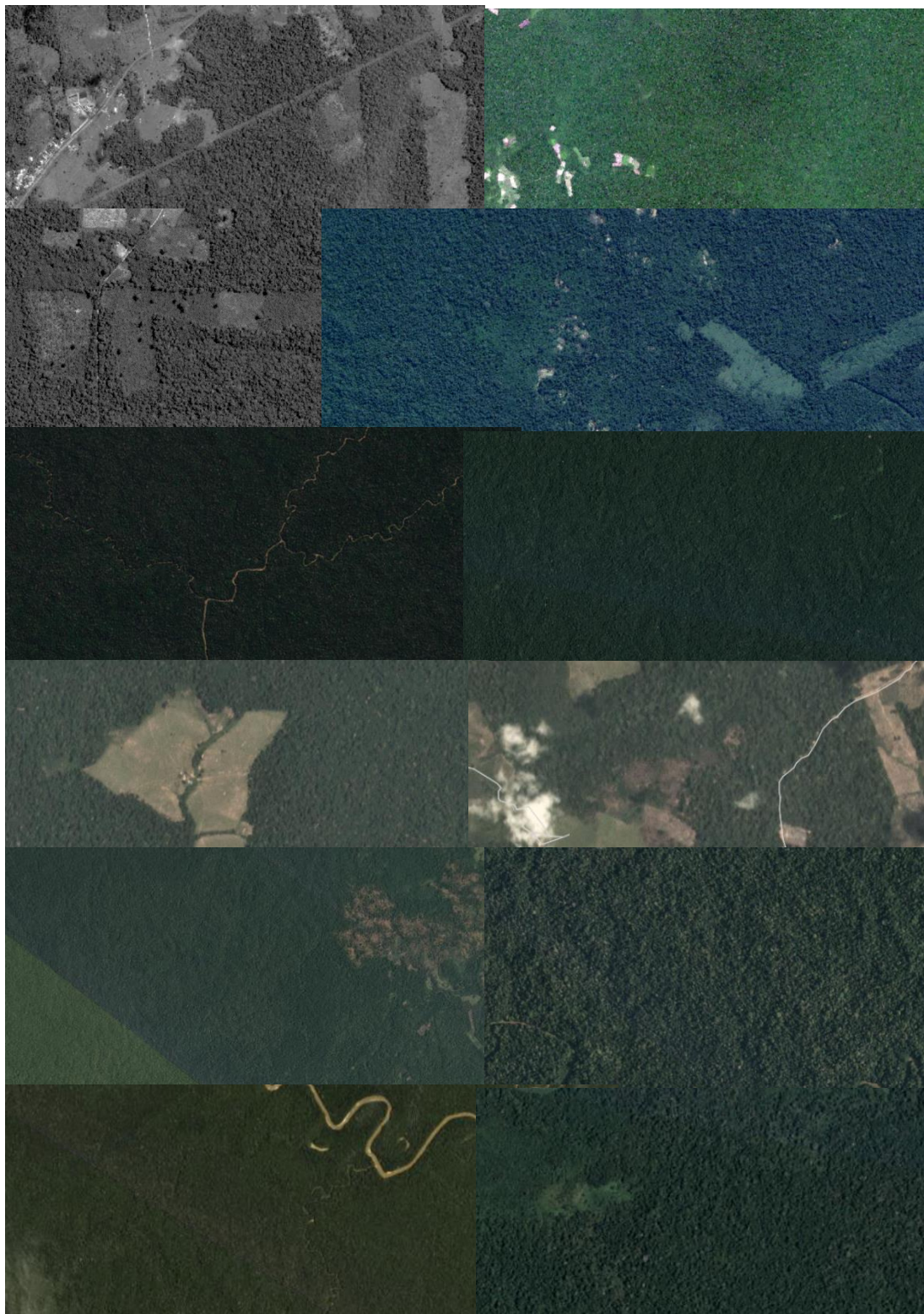


Figura 5. Medición de fiabilidad (validación) de bosque, degradación forestal y deforestación con imágenes de alta resolución espacial PlanetScope de 3 m x 3 m para 2015.

Fuente: Planet-Team (2025).

3.6.4 Análisis estadístico

En función a los objetivos planteados, se realizó el siguiente procedimiento estadístico:

Para el primer objetivo, sobre determinar el análisis de mezcla espectral (SMA) de imágenes Landsat en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025, se analizó mediante la plataforma en la nube de GEE.

El segundo y tercer objetivo, sobre estimar la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005, 2015 y 2025, se analizó mediante el algoritmo CODED en GEE, así como los softwares ArcGIS 10,8®, ArcGIS Pro 3,4® y SigmaPlot 15®

El cuarto objetivo, sobre evaluar la precisión de los mapas de deforestación y degradación forestal del índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025, se realizó la matriz de confusión y reproductibilidad de kappa con el software SigmaPlot 15®.

El quinto objetivo, sobre determinar la tasa de pérdida de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025, se procesó mediante el software SigmaPlot 15®.

Finalmente, el sexto objetivo, sobre Cuantificar los cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025, se procesó mediante los softwares ArcGIS 10,8®, ArcGIS Pro 3,4®, SigmaPlot 15® y el algoritmo CODED para la medición continua.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de mezcla espectral (SMA) e índice de fracción de diferencia normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu

El enfoque propuesto se basa en investigaciones anteriores en el campo, como se muestra en la Figura 4 y Tabla 3, al abordar el SMA con el objetivo de detectar y caracterizar la degradación forestal a través del tiempo, como se muestra en las Figuras 6, 7, 8 y 9.

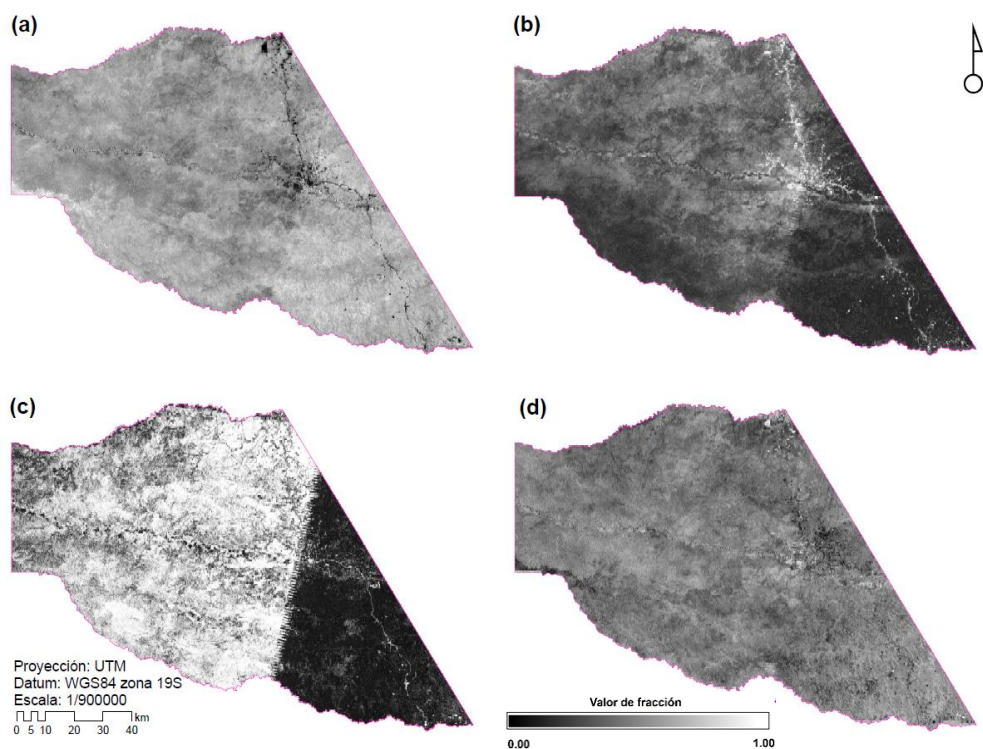


Figura 6. Fracciones de firmas espectrales puras (endmembers) de GV (a), NPV (b), suelo (c) y sombra (d) de 2005 de bosques de Tahuamanu.

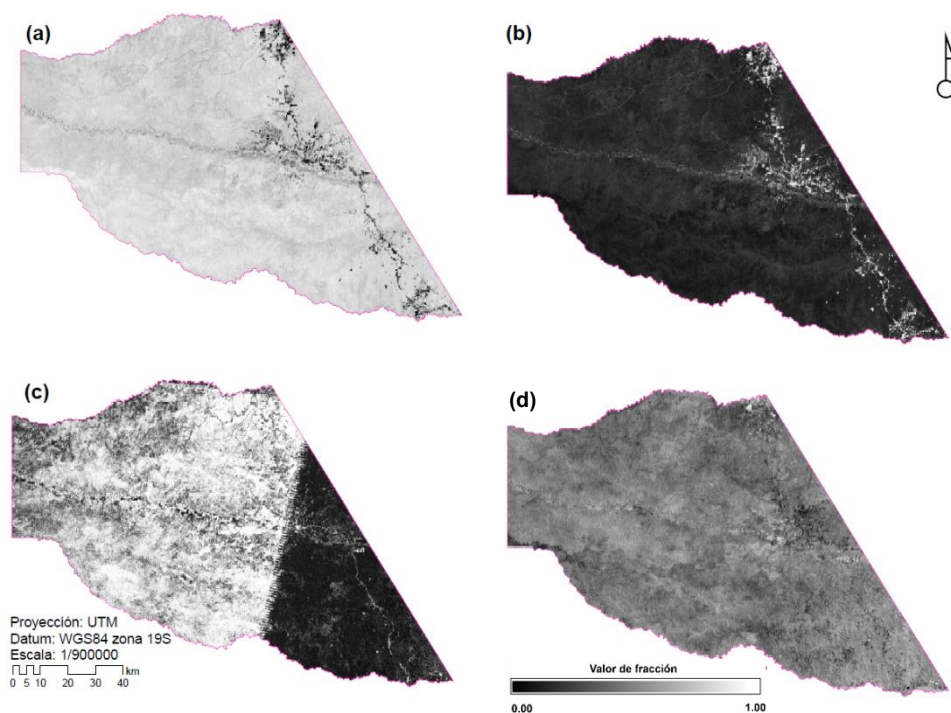


Figura 7. Fracciones de firmas espectrales puras (endmembers) de GV (a), NPV (b), suelo (c) y sombra (d) de 2015 de bosques de Tahuamanu.

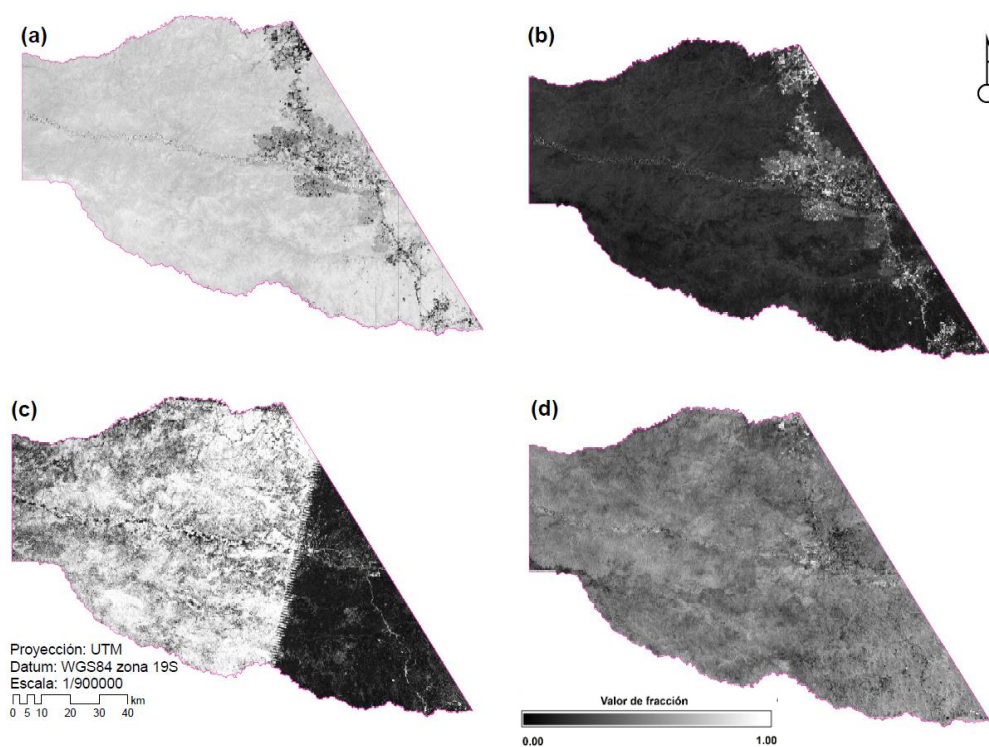


Figura 8. Fracciones de firmas espectrales puras (endmembers) de GV (a), NPV (b), suelo (c) y sombra (d) de 2025 de bosques de Tahuamanu.

El SMA permitió determinar las fracciones de los componentes GV, NPV, Suelo y Sombra en los bosques de Tahuamanu para los años 2015 y 2025.

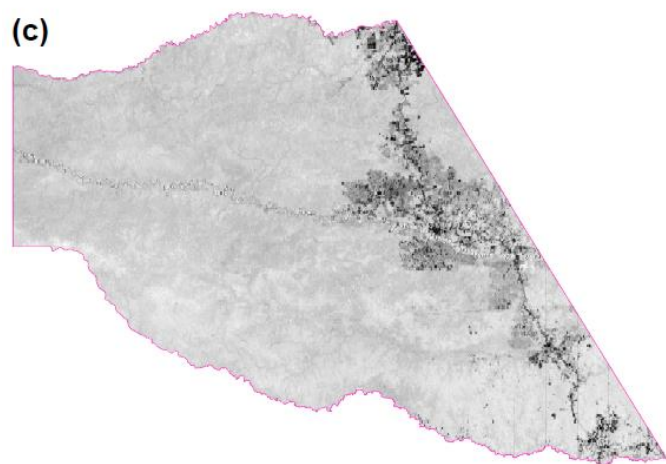
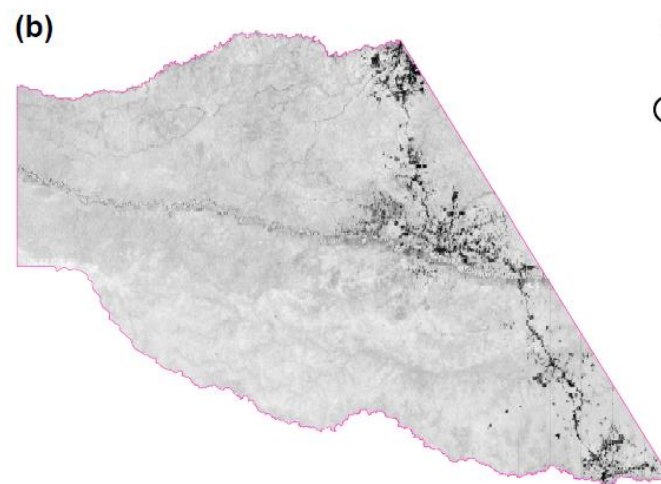
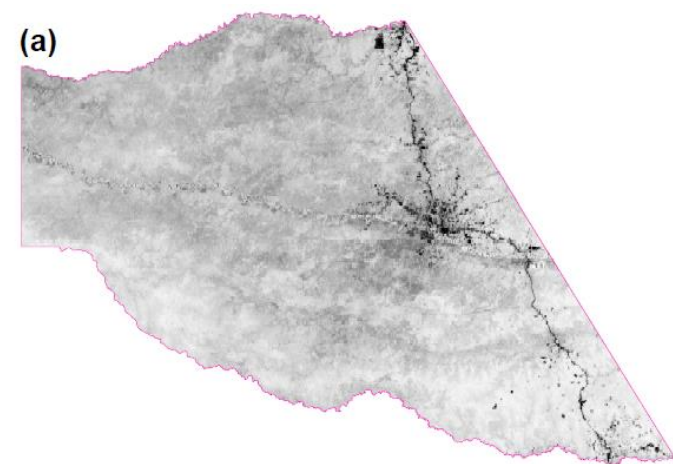
Fracción de vegetación verde (GV): Las figuras 6-8 para 2005, 2015 y 2025 muestran que la fracción de GV, que representa el dosel forestal no perturbado, continúa teniendo la cobertura dominante en la mayor parte de la provincia, particularmente en las áreas de concesiones forestales maderables, productos forestales no maderables, conservación, ecoturismo y comunidades nativas. Sin embargo, hay una mayor perturbación forestal en propiedades privadas para la agricultura y en las áreas urbanas, que coinciden con los límites de los títulos habilitantes.

Fracción de suelo expuesto: La parte de suelo expuesto (Figuras 6-8) presenta un patrón que se concentra en ciertas áreas, especialmente cerca de la carretera interoceánica de la provincia, y este patrón ha ido aumentando con los años. Tal aumento es un indicador de deforestación, siendo sus principales impulsores la agricultura y los asentamientos.

La Fracción de vegetación no fotosintética (NPV) y sombra: La NPV (Figuras 6-8) relacionada con la biomasa no viva o los restos de la tala y la sombra muestra una distribución más dispersa, aunque hay más cantidad en las áreas más afectadas en las diferentes categorías de estudio. La enucleación cambia de forma más aguda en la medida en que las acciones se intensifican, dado que son señales de perturbación.

El monitoreo de las perturbaciones en los bosques de Tahuamanu durante período que abarca desde el año 2005 hasta 2025 con el uso del NDFI (Figura 10), han demostrado de manera concluyente mediante estudios previos, que el NDFI, es más sensible a la perturbación del medio ambiente que afecta el ecosistema de los bosques tropicales que la mayoría de otros índices espectrales comúnmente utilizados en la investigación científica (Schultz et al. 2016; Shimabukuro et al. 2019; Shimabukuro et al. 2023). Dicho esto, durante nuestro análisis, se evidencio que el contenido de NDFI del agua a veces tiene valores que también se pueden encontrar en los bosques, es así, que se decidió que el efecto de la cobertura de nubes, la sombra de las nubes y los cuerpos de agua debía ser ignorado. No obstante, algunos problemas y

desafíos que surgieron durante el proceso de estudio, se sostienen, que el uso de NDFI, que incluye coeficientes de regresión para GV, NPV, Suelo y Sombra, como entradas para clasificar la cobertura del suelo, es un progreso considerable sobre los enfoques tradicionales para la clasificación y detección de la degradación forestal y la deforestación (Reygadas et al. 2021; Miguel et al. 2024; Peters et al. 2024).



Leyenda

Área de estudio

NDFI

Valor

Alto: 0.999187

Bajo: -1

Proyección: UTM
Datum: WGS84 zona 19S
Escala: 1/900000

0 5 10 20 30 40 km

Figura 9. Escala de grises de NDFI para 2005 (a), 2015 (b) y 2025 (c) en los bosques de Tahuamanu.

Los bosques intactos los cuales se encuentran en buenas condiciones de conservación muestran una abundancia de biodiversidad, y por lo tanto, están cerca de valores de 1 (Souza y Roberts 2005; Souza et al. 2005a; Allnutt et al. 2013; Souza et al. 2013; Bullock et al. 2020b; Bullock et al. 2020c). Cualquier perturbación que genera pérdida parcial o fragmentación causará una disminución en el valor de NDFI, mientras que la tala completa, y particularmente, no selectiva, de bosques resultará en deforestación, los valores del NDFI disminuyen proporcionalmente a la deforestación y pueden llegar a valores debajo de cero, incluso cercanos a -1 (Shimabukuro et al. 2019; Shimabukuro et al. 2023).

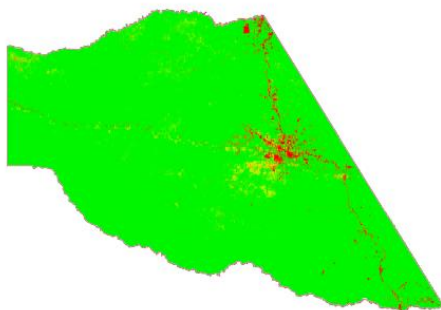
4.2 Magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante NDFI en los bosques de la provincia de Tahuamanu

La Tabla 7 revela una tendencia clara y progresiva de pérdida de cobertura forestal a lo largo del periodo de estudio, siendo la degradación forestal la perturbación de mayor magnitud en los tres años.

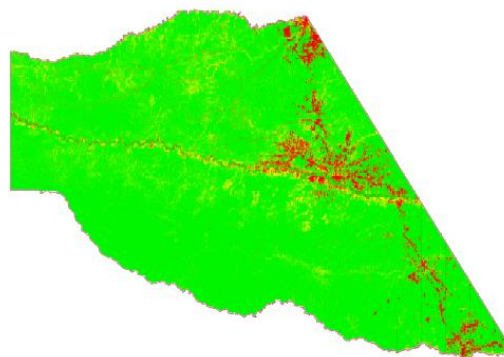
La pérdida total de bosque entre 2005 y 2025 se redujo en 106 843,15 ha (de 994,829.80 ha a 887,986.65 ha). En cada año analizado, la superficie afectada por la degradación forestal superó a la superficie de deforestación. En 2025, el área degradada (98 835,60) fue casi el doble que el área de deforestación (50 587,52), confirmando la necesidad de monitorear estas perturbaciones.

La Degradación aumentó más del 375% entre 2005 (24 807,19 ha) y 2015 (92 984,48 ha), indicando un fuerte proceso de intensificación de las actividades de uso de la tierra en esa década. El incremento de 2015 a 2025 fue más lento, pero la magnitud acumulada de la degradación en 2025 (98 835,60 ha) sigue siendo la mayor categoría de perturbación.

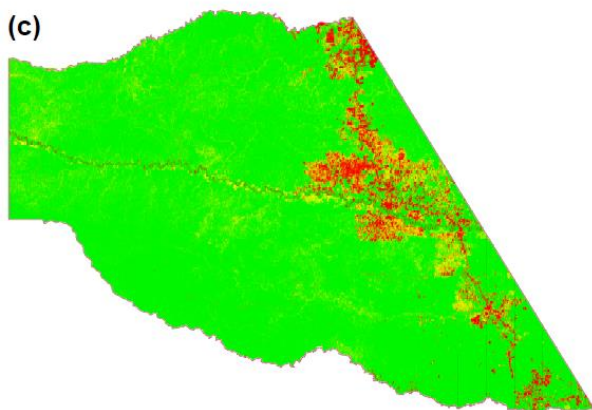
(a)



(b)



(c)

**Leyenda**

 Área de estudio

NDFI**Valor**

 1 (Deforestación)

 2 (Degradación forestal)

 3 (Bosque intacto)

Proyección: UTM

Datum: WGS84 zona 19S

Escala: 1/900000

 km
0 5 10 20 30 40

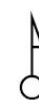


Figura 10. NDFI de los periodos 2005 (a), 2015 (b) y 2025 en los bosques de Tahuamanu.

Tabla 7. *Magnitud de la degradación forestal y deforestación*

Año	Categorías (ha)		
	1 (Deforestación)	2 (Degradación forestal)	3 (Bosque)
2005	17 772,78	24 807,19	994 829,80
2015	41 675,41	92 984,48	902 749,87
2025	50 587,52	98 835,60	887 986,65

La cuantificación de la pérdida indicó que, a partir de 2025, el área clasificada como degradación forestal (98 835,60 ha) fue mayor que la de deforestación (50 587,52 ha). Este patrón muestra un aumento en la degradación forestal entre 2005 y 2015 y es un reflejo de una dinámica de perturbación sutil pero generalizada en la provincia.

Este patrón se alinea con los hallazgos de (Bullock et al. 2020d), quienes concluyeron que la degradación forestal y las alteraciones naturales han impactado un área de bosque equivalente a la deforestación que ocurre en la Amazonía y que la magnitud total de la perturbación se subestima al considerar solo la pérdida total del dosel. El aumento en el área del bosque que fue degradada de 2005 a 2015 coincide con lo observado por (Bullock et al. 2020c) en Rondônia, Brasil, donde se observó que la reducción de las tasas de deforestación después de 2004 se correlaciona con un aumento en la degradación forestal. Esto indica que las presiones sobre el bosque de Tahuamanu se han desviado hacia formas de uso menos intensivas, como la tala selectiva o la agricultura migratoria, que no conducen a una pérdida completa del dosel, pero sí causan degradación. La magnitud de esta diferencia destaca la necesidad de utilizar índices como el NDFI, que pueden captar tales perturbaciones graduales debido a su sensibilidad hacia la estructura del dosel. Esto es más efectivo que los enfoques que solo reconocen perturbaciones totales (deforestación), como lo demostraron (Aryal et al. 2021a) en Nepal, donde la perturbación superó claramente la deforestación.

La pérdida de 106 843,15 ha de bosque no perturbado de 2005 a 2025 (Tabla 7) corrobora las evaluaciones de MINAM (2024) que proyectaron que Tahuamanu sería uno de los lugares más deforestados (deforestación acumulativa de 81 385 ha para el año 2023), que se corroboran en los mapas espaciales de NDFI (Figura 10) donde las zonas de mayor cambio presentan mayor accesibilidad, en esta misma línea, Alarcon-Aguirre et al. (2021) y Reygadas et al. (2021) han vinculado tales patrones a carreteras y actividades productivas, siendo la agricultura el principal motor de deforestación a lo largo de las infraestructuras que es típico de las concesiones forestales, propiedades agrícolas y comunidades nativas. La capacidad relativa de NDFI para clasificar la degradación de manera más específica, como lo había hecho Souza et al. (2005a), es lo que contextualiza las diferentes presiones en la región de la Amazonía.

4.3 Magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu

Los resultados (Tabla 8 y Figuras 11-13) muestran la superficie de deforestación, degradación forestal y bosque intacto para los años 2005, 2015 y 2025. El análisis de la distribución de las pérdidas por actividad muestra que las concesiones forestales maderables (CFM) y las propiedades privadas para la agricultura (PPA) son los dos motores principales de la pérdida de cobertura forestal, pero dinámicas diferentes.

Las CFM, que abarcan la mayor área, presentan la mayor área acumulada de perturbación (55 631,93 ha en 2025). El principal impacto es la degradación forestal, que en 2025 alcanzó 49 645,72 ha, esto representa el 89,2% de la pérdida total dentro de esta categoría, lo cual es coherente con la magnitud de la extractiva (tala selectiva y apertura de caminos internos) que deteriora el dosel sin eliminarlo completamente. El área degradada del bosque se quintuplicó de 2005 (12 260,93 ha) a 2015 (55 215,55 ha), mostrando una intensificación en las prácticas madereras durante ese periodo.

Las PPA, aunque tienen un área menor que las CFM, son el principal motor de deforestación directa. En 2025, el área deforestada fue de 27 842,13 ha, superando a la deforestación en las CFM. La deforestación es la categoría dominante de pérdida dentro de las PPA, lo que refleja la práctica del desbosque total para establecer pastos y cultivos permanentes. La deforestación dentro de las PPA se ha más que duplicado entre 2005 y 2025 (de 11 698,94 ha a 27 842,13 ha), mostrando una presión constante y creciente sobre la frontera agrícola.

Las concesiones forestales de productos diferentes a la Madera (CFPDM) son el tercer motor de perturbación. Al igual que las CFM, el impacto dominante es la degradación forestal (15 887,40 ha en 2025). Esto sugiere que la extracción de castaña y las actividades asociadas (como la tala o agricultura de subsistencia) generan un deterioro del bosque subyacente. Por otro lado, la degradación en CFPDM creció entre 2005 y 2025 de 1 219,61 ha a 15 887,40 ha).

Las categorías con enfoque social o de conservación (comunidades nativas - CCNN, concesiones de conservación - CC y ecoturismo - CE) presentan áreas de pérdida de menor magnitud, pero con una dinámica interna que merece atención. En CCNN, el impacto dominante es la degradación forestal (2 486,40 ha en 2025), lo que indica la presión por el uso de recursos forestales y el avance de la agricultura familiar. En CE y CC, si bien las pérdidas son mínimas, la degradación forestal predomina sobre la deforestación, el área de deforestación en las CE aumentó notablemente entre 2015 y 2025 (de 37,62 ha a 201,36 ha), lo que podría indicar una conversión del uso del suelo en algunas zonas de alto valor turístico.

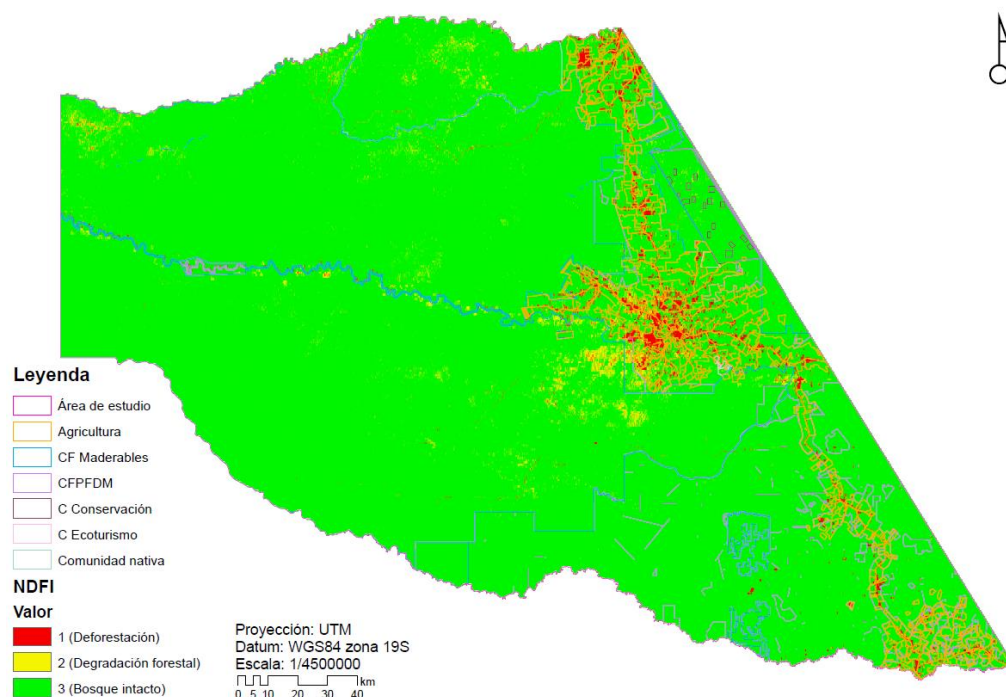


Figura 11. NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2005.

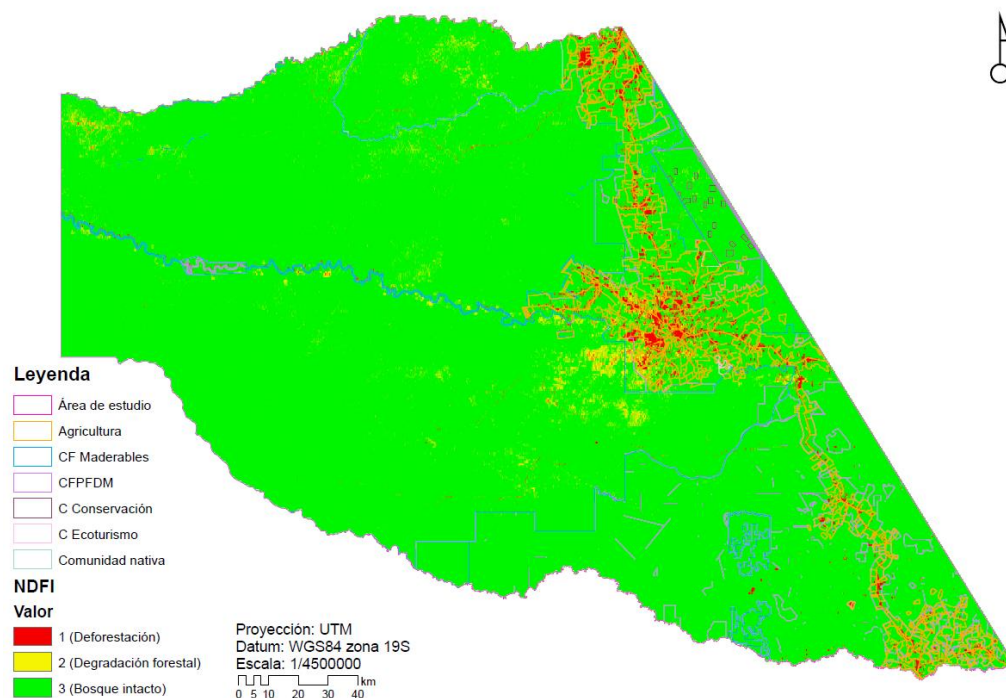


Figura 12. NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2015.

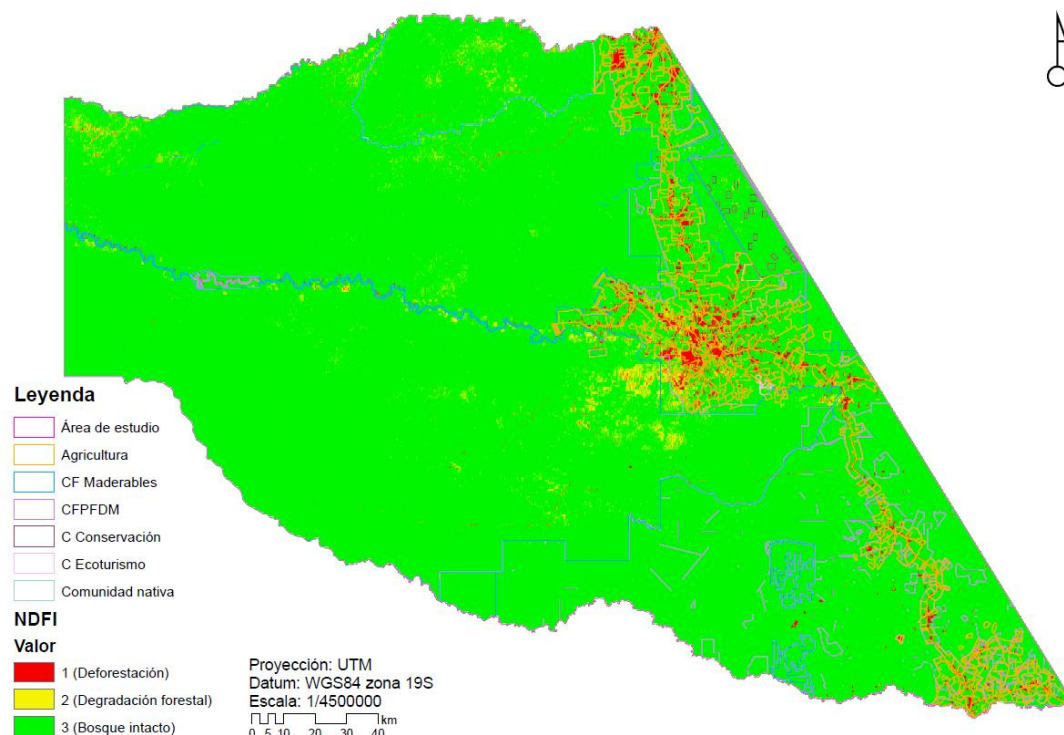


Figura 13. NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2025.

Tabla 8. Magnitud de la degradación forestal y deforestación

Año/Actividades	Categorías (ha)		
	1 (Deforestación)	2 (Degradación forestal)	3 (Bosque)
Propiedades privadas para la agricultura (PPA)			
2005	11 698,94	7 116,50	73 332,01
2015	23 795,61	14 029,13	54 322,70
2025	27 842,13	22 548,84	41 756,47
Concesiones forestales maderables (CFM)			
2005	1 233,92	12 260,93	622 695,48
2015	5 584,00	55 215,55	575 390,77
2025	5 986,21	49 645,72	580 558,40
Concesiones de productos diferentes a la madera (CFPDM)			
2005	836,06	1 219,61	207 489,98
2015	4 355,64	9 215,69	195 974,33
2025	7 066,39	15 887,40	186 591,86
Concesiones de conservación (CC)			
2005	4,16	159,98	12 607,98
2015	11,49	1 092,51	11 668,12
2025	8,12	556,48	12 207,51
Concesiones de ecoturismo (CE)			
2005	12,20	19,49	895,11

2015	37,62	212,90	676,28
2025	201,36	349,46	375,97
Comunidades Nativas (CCNN)			
2005	122,44	1 844,25	51 407,82
2015	548,73	7 721,48	45 104,31
2025	381,32	2 486,40	50 506,79

El estudio muestra las dinámicas de perturbación dominantes y espacialmente diferenciadas mediante el análisis (Figuras 11-13), lo que exige diferentes estrategias de gestión; los PPA se han convertido en el principal motor de la deforestación (27 842,13 ha en 2025). Este hallazgo se asemeja con lo reportado por Alarcon-Aguirre et al. (2021), quienes encontraron que la agricultura es el principal impulsor de la deforestación en la zona (72,90%). La deforestación se produce por la remoción total del bosque para establecer pastizales o cultivos, un proceso irreversible de cambio de uso. Por el contrario, la CFM ha emergido como el motor dominante de la degradación forestal (49 645,72 ha en 2025). La degradación representó casi el 90% de la pérdida total en esta categoría, lo cual es consistente con la naturaleza de la actividad extractiva (cosecha selectiva, apertura de caminos de acceso interno) que deteriora el dosel sin eliminarlo completamente. En este sentido, mientras los PPA están impulsando el cambio de uso de la tierra (deforestación), las CFM y CFPDM están impulsando el deterioro de la calidad del ecosistema (degradación forestal). La diferenciación de estos procesos solo es posible a través del uso de herramientas sensibles al dosel, como el NDFI, un beneficio reconocido por Souza et al. (2005a) sobre la monitorización en la Amazonía.

La extensión de la degradación forestal dentro de la CFM y CFPDM demuestra la necesidad de implementar políticas de gestión forestal sostenible con mayor rigor y el reconocimiento de la degradación forestal dentro de la CFM con 49 645,72 ha para 2025. Este patrón de perturbación es similar a los hallazgos de Reygadas et al. (2021) y Miguel et al. (2024), donde las principales observaciones indican que los impactos de la tala y las actividades madereras dentro de las zonas forestales controladas solo son detectables a través de la

aplicación de métodos de teledetección temporal como CODED, que reconoce cambios sutiles frente a cambios completos.

La dinámica de la degradación forestal en las concesiones (15 887,40 ha para 2025) implica que las actividades de extracción, incluso si involucran productos no maderables, no están exentas de perjuicios. Este fenómeno está asociado con la presión de la infraestructura o la tala. La capacidad de diferenciar esta dinámica por títulos habilitantes es una contribución importante, ya reconocida por Alarcon-Aguirre et al. (2023), como parte del esfuerzo por comprender la compleja gestión de recursos en Madre de Dios. Aún si la pérdida forestal es menor, el patrón mostrado por los CCNN, CC y CE merece su atención, ya que la degradación forestal que domina sobre la deforestación en los CCNN puede señalar una mayor actividad forestal y de subsistencia; este patrón está en concordancia con el punto de vista de Dourojeanni (2019) sobre las dinámicas territoriales en la Amazonía, donde las comunidades enfrentan complicaciones de presión externa e interna y restricciones en el uso de recursos. La existencia de pérdida medible en CC y CE indica un grado de susceptibilidad que debe abordarse a través de la vigilancia continua de series temporales, como lo proporciona el algoritmo CODED (Aryal et al. 2021b).

4.4 Precisión de los mapas de deforestación y degradación

La matriz de confusión reporta una alta fiabilidad a lo largo del periodo, con fuentes de referencia que variaron según el año (puntos aleatorizados, imágenes de alta resolución y datos de campo). La evaluación de la precisión del mapa clasificado por NDFI para los años 2005, 2015 y 2025 se llevó a cabo utilizando una muestra de 384 puntos de referencia.

Para 2005 (Tabla 9) muestra una precisión general de 0,815 (81,5%), con una concordancia (índice de kappa) de 0,723, este valor se clasifica como "Considerable (substantial)" según Landis y Koch (1977), confirmando la capacidad del NDFI para distinguir las categorías de deforestación, degradación forestal y bosque. El valor Kappa marginal (K_m) es 0,965, lo que

demuestra que mayoría de las discrepancias obedecen a diferencias marginales. El intervalo de confianza del 95% se sitúa entre 0,665 y 0,781, confirmando con un alto nivel de fiabilidad que los valores poblacionales se encuentra dentro de límites de concordancia Considerable (Cohen 1960; Cohen et al. 2003). El valor de z fue de 20,039, lo que demuestra una alta significancia con una probabilidad (P) $< 0,001$, lo que implica que el resultado de Kappa es estadísticamente robusto y no se debe a variaciones aleatorias (Yaghobi et al. 2019; Koley y Chockalingam 2022).

Tabla 9. *Fiabilidad de kappa de NDFI de Landsat 2005 con puntos aleatorizados*

Categoría		Puntos aleatorios			
		1 (Deforestación)	2 (Degradación forestal)	3 (Bosque)	$f_{\text{NDFI Landsat}}$
NDFI Landsat (2005)	1 (Deforestación)	100 (35)	24	5	129
	2 (Degradación forestal)	4	99 (45)	24	127
	3 (Bosque)	1	13	114 (48)	128
	f_{PCxI}	105	136	143	384
$f_o =$	313			$f_c =$	128
$k =$	0,723			$k_M =$	0,965
$\sigma_k =$	0,0297			$\sigma_{k_o} =$	0,0361
$z =$	20,039			Matriz de confusión =	0,815

Para 2015 (Tabla 10), utilizando imágenes de alta resolución como referencia (PlanetScope), la precisión general se mantuvo alta, alcanzando 0,820 (82,0). Kappa fue de 0,731, lo que confirma la concordancia Considerable del método y su consistencia al comparar la clasificación con datos de mayor detalle. El valor Kappa marginal (K_M) es 0,984, lo que demuestra que mayoría de las discrepancias obedecen a diferencias marginales. El intervalo de confianza del 95% se sitúa entre 0,673 y 0,788, confirmando con un alto nivel de fiabilidad que los valores poblacionales se encuentra dentro de límites de concordancia Considerable (Cohen 1960; Cohen et al. 2003). El valor de z fue de 20,26, lo que demuestra una alta significancia con una probabilidad (P) $<$

0,001, lo que implica que el resultado de Kappa es estadísticamente robusto y no se debe a variaciones aleatorias (Yaghobi et al. 2019; Koley y Chockalingam 2022).

Tabla 10. *Fiabilidad de kappa de NDFI de Landsat 2015 con puntos de imágenes de alta resolución*

Categoría		Puntos de imágenes			
		1 (Deforestación)	2 (Degradación forestal)	3 (Bosque)	$f_{\text{NDFI Landsat}}$
NDFI Landsat (2015)	1 (Deforestación)	98 (35)	22	9	129
	2 (Degradación forestal)	6	100 (44)	22	128
	3 (Bosque)	1	9	117 (49)	127
	f_{PCxI}	105	131	148	384
$f_o =$	315			$f_c =$	128
$k =$	0,731			$k_M =$	0,984
$\sigma_k =$	0,0294			$\sigma_{k_o} =$	0,0361
$z =$	20,260			Matriz de confusión =	0,820

La validación para el año 2025 (Tabla 11), utilizando la fuente de referencia más robusta (datos de campo), arrojó los mejores resultados de la serie, una precisión general de 0,833 (83,3%) y una índice kappa de 0,750. Este resultado confirma que, incluso al validar con la realidad in situ, el mapa clasificado mantiene una concordancia Considerable y una alta fiabilidad (Cohen 1960; Cohen et al. 2003). El valor Kappa marginal (K_m) es 1,012, lo que demuestra que mayoría de las discrepancias obedecen a diferencias marginales. El intervalo de confianza del 95% se sitúa entre 0,693 y 0,806, confirmando con un alto nivel de fiabilidad que los valores poblacionales se encuentra dentro de límites de concordancia Considerable (Cohen 1960; Cohen et al. 2003). El valor de z fue de 20,745, lo que demuestra una alta significancia con una probabilidad (P) < 0,001, lo que implica que el resultado de Kappa es estadísticamente robusto y no se debe a variaciones aleatorias (Yaghobi et al. 2019; Koley y Chockalingam 2022).

Tabla 11. *Fiabilidad de kappa de NDFI de Landsat 2025 con datos de campo*

Categoría		Datos de campo			
		1 (Deforestación)	2 (Degradación forestal)	3 (Bosque)	f_{NDFI} Landsat
NDFI Landsat (2025)	1 (Deforestación)	101 (34)	17	8	126
	2 (Degradación forestal)	3	98 (41)	27	128
	3 (Bosque)	1	8	121 (53)	130
	f_{PCxI}	105	123	156	384
$f_o =$	320				$f_c =$ 128
$k =$	0,750				$k_M =$ 1,012
$\sigma_k =$	0,0286				$\sigma_{k_o} =$ 0,0361
$z =$	20,745				Matriz de confusión= 0,833

4.5 Tasa de pérdida de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu

Los resultados (Tabla 12) muestran que la primera década (2005-2015) registró una tasa de pérdida de bosque mayor y más acelerada que la segunda década (2015-2025).

Para 2005-2015, la pérdida de cobertura se produjo a una tasa anual promedio del -0,97%, cercana al 1,0% anual, lo que indica un proceso de cambio muy rápido. De esta pérdida, la degradación forestal fue el proceso dominante, con una tasa de -0,57% y un promedio de 5 364,60 ha perturbadas anualmente. La degradación forestal representó casi el 60% de la pérdida total en este periodo.

Para 2015-2025, la velocidad de la pérdida se redujo drásticamente a un promedio anual de -0,16%. El promedio de perturbación total (deforestación + Degradación) cayó de 9 208,00 ha anuales en el primer periodo, a 1 476,32 ha anuales en la segunda, lo que sugiere una desaceleración de las actividades que impulsan la deforestación y la degradación. Por otro lado, las tasas de pérdida de la degradación forestal se redujeron en más de cinco veces (de -0,57% a -0,11%), y las de deforestación en casi ocho veces (de -0,40% a -0,05%).

En el periodo completo de 20 años (2005-2025), la tasa general de pérdida fue de -0,57% anual, donde el promedio de perturbación total fue de 5 342,16 ha por año, siendo la degradación forestal (3 533,56 ha) el componente más significativo de la pérdida promedio.

Tabla 12. *Tasa de degradación forestal y deforestación total en los bosques de Tahuamanu*

Periodos	Tasa anual de cambio (%)			Perturbación total anual promedio (ha) (r)	
	Tasa general	Degradación forestal	Deforestación	Degradación forestal	Deforestación
2005-2015	-0,97	-0,57	-0,40	5364,60	3843,40
2015-2025	-0,16	-0,11	-0,05	1019,42	456,90
2005-2025	-0,57	-0,38	-0,19	3533,56	1808,60

Los resultados más resaltantes fue la desaceleración de la tasa general de pérdida forestal, que pasó de un promedio de -0,97% anual en 2005-2015, a -0,16% en 2015-2025 (Tabla 12), esta tendencia podría indicar la efectividad de las políticas de control forestal en Madre de Dios, o bien, una transición en la presión del uso del suelo. La aceleración en la primera década corresponde con el patrón de alta presión y el auge económico en la región, mientras que la reducción de las tasas en la segunda década podría estar ligada a una mejora en el monitoreo y cumplimiento dentro de las concesiones. La literatura sobre la Amazonía (Bullock et al. 2020c) sugiere que cuando las tasas de deforestación total disminuyen, la presión puede desplazarse hacia formas más sutiles de degradación o simplemente cambiar de ubicación geográfica (fuga).

El análisis de la tasa anual de cambio porcentual (q) y la perturbación Total anual promedio (r) por títulos habilitantes (Tabla 13) muestra los patrones de

uso y control del suelo altamente diferenciados en los bosques de Tahuamanu.

En este análisis, PPA presenta mayor tasa de pérdida general (-2,78% anual promedio en 2005-2025), excluyendo el crecimiento anómalo de CE. La deforestación es el principal impulsor de esta tasa (-1,54%), lo cual confirma que el proceso de conversión de tierras en PPA es el más rápido y destructivo en términos de pérdida total del dosel. Las CE muestran la tasa de pérdida más alta (-4,24% en el periodo total), impulsada principalmente por la degradación (-2,69%). La tasa se acelera de forma dramática en el segundo periodo (de -1,39% a -5,70%), lo que sugiere una fuerte presión o un cambio de uso intensivo y reciente que compromete la finalidad de estas concesiones.

El contraste entre los periodos 2005-2015 y 2015-2025 muestra el impacto de los cambios de gestión y las presiones económicas; 2005-2015, las CFM registró una tasa de pérdida significativa (-0,79%), dominada por la degradación forestal (-0,72%), reflejando el pico de la actividad maderera y la apertura de infraestructura de acceso. 2015-2025, se produce una recuperación neta, con una tasa general de 0,09% (es decir, una ganancia neta de bosque). El promedio de perturbación anual (r) es negativo (degradación: -469,30 ha y deforestación: -47,46 ha), lo que sugiere que la tasa de recuperación, regeneración o reclasificación fue mayor que la nueva perturbación en este periodo.

Para CCNN; de 2005-2015, se produjo una pérdida significativa (-1,30%), impulsada por la degradación forestal (-1,22%), lo que indica una intensificación del uso de recursos. Para 2015-2025, al igual que las CFM, las CCNN muestran una recuperación con una tasa general de 1,14%, con un promedio de perturbación anual (r) negativo, esto podría deberse a la regeneración natural o a la estabilización de los límites agrícolas.

Respecto a CC; la tasa general para el periodo total (2005-2025) es positiva (0,45%), impulsada por la degradación (0,44%), lo cual es anómalo ya que una tasa positiva indica una ganancia neta. Esto sugiere que las áreas de degradación forestal y deforestación se reclasificaron o regeneraron a la

categoría de Bosque Intacto, haciendo que la categoría de bosque creciera a lo largo de las dos décadas.

En términos de impacto físico, las CFM y las PPA son los mayores contribuyentes a la pérdida anual en el periodo total (2005-2025), a pesar de la desaceleración de las CFM en la segunda década. Degradación forestal anual total (2005-2025) con 706,47 ha (PPA) mas 1 880,15 ha (CFM) que suman 2 586,62 ha, mientras, que la deforestación anual total (2005-2025) con 872,31 ha (PPA) mas 226,71 ha (CFM) que suman 1 099,02 ha.

Tabla 13. *Tasa de degradación forestal y deforestación por tipo de actividades productivas*

Periodos	Tasa anual de cambio (%)			Perturbación total anual promedio (ha) (r)	
	Tasa general	Proporción de degradación forestal	Proporción de deforestación	Degradación forestal	Deforestación
Propiedades privadas para la agricultura (PPA)					
2005-2015	-2,96	-1,12	-1,84	718,98	1181,95
2015-2025	-2,60	-0,96	-1,64	466,08	790,54
2005-2025	-2,78	-1,24	-1,54	706,47	872,31
Concesiones forestales maderables (CFM)					
2005-2015	-0,79	-0,72	-0,07	4297,93	432,54
2015-2025	0,09	0,08	0,01	-469,30	-47,46
2005-2025	-0,35	-0,31	-0,04	1880,15	226,71
Concesiones de productos diferentes a la madera (CFPDM)					
2005-2015	-0,57	-0,34	-0,23	683,21	468,35
2015-2025	-0,49	-0,33	-0,16	637,12	301,12
2005-2025	-0,53	-0,37	-0,16	723,23	321,68
Concesiones de conservación (CC)					
2005-2015	-0,77	-0,75	-0,02	91,61	2,38
2015-2025	-0,49	-0,48	-0,01	928,48	9,76
2005-2025	0,45	0,44	0,01	-53,16	-0,78
Concesiones de ecoturismo (CE)					
2005-2015	-1,39	-0,86	-0,53	6,73	4,21

2015-2025	-5,70	-4,84	-0,86	25,52	4,51
2005-2025	-4,24	-2,69	-1,55	16,47	9,49
Comunidades Nativas (CCNN)					
2005-2015	-1,30	-1,22	-0,08	591,11	39,24
2015-2025	1,14	1,06	0,08	-504,40	-35,85
2005-2025	-0,09	-0,08	-0,01	39,06	5,99

La evaluación a través de títulos habilitantes confirma que la tasa de deforestación depende del tipo de uso de suelo, confirmando los resultados de magnitud de la perturbación. Las PPA mantuvieron la mayor tasa de pérdida entre todos los títulos habilitantes (-2,78% anual promedio), impulsada por la deforestación (-1,54%). Este resultado confirma lo reportado por Alarcon-Aguirre et al. (2021), donde la agricultura es el principal motor de cambio más rápido, con un patrón de deforestación completa y continua, sin desaceleración como se evidencia en otros sectores. Las CFM y las CCNN mostraron un comportamiento positivo o estable en el segundo período (CFM: 0,09%; CCNN: 1,14%). Esto no necesariamente significa el fin de la perturbación, sino que la tasa de regeneración natural del bosque o la reclasificación del uso de la tierra superó la tasa de perturbación. La tasa positiva en las CCNN es un hallazgo importante para las políticas de conservación comunitaria.

Las tasas muestran también dificultades en la gestión de categorías sensibles; la aceleración de la pérdida en las CE, que han pasado de -1,39% a -5,70% en la última década, es una anomalía a considerar. Esto puede indicar una mala apropiación del título habilitante o una fuerte presión externa (invasión, tala ilegal) sobre áreas que deberían estar bajo estricto régimen de conservación. Esta alta tasa de pérdida localizada amerita una indagación propia de la gestión y gobernanza.

En cuanto a las CC (0,45%), se tiene la evidencia más sólida de regeneración neta o de reclasificación de áreas degradadas a bosques nativos. Los datos refuerzan el rol de estos títulos en la conservación de la cobertura forestal,

información esencial para el diseño de estrategias de conservación a escala regional.

4.6 Cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu

En Tahuamanu, la pérdida de bosque durante 2005-2015 fue de 104 621,92 ha, siendo el flujo de bosque a degradación el cambio de mayor magnitud, con 82 190,52 ha (78,6%). Esto confirma que el principal impacto en el bosque es la perturbación selectiva o gradual. Por otro lado, de bosque a deforestación, la conversión de bosque fue de 22 431,40 ha (21,4%).

El análisis por actividad revela patrones de cambio específicos, que confirman el rol de cada título como motor de degradación o deforestación; 1) las CFM fueron el principal foco de la degradación, contribuyendo con 50 070,53 ha, esta cifra representa el 60,9% de toda la degradación forestal total en la provincia, lo cual se explica por la naturaleza de la actividad maderera que requiere caminos internos y extracción selectiva, deteriorando el dosel sin eliminarlo completamente. 2) las CFPDM contribuyeron a la conversión del bosque, siendo la degradación forestal (8 735,24 ha) el principal motor de cambio, reflejando el patrón de perturbación al dosel por actividades de aprovechamiento. La conversión de bosque a deforestación (3 454,05 ha) es a considerar, aunque su actividad principal es la extracción no maderable (castaña), este flujo indica una presión significativa por la conversión directa de tierras, posiblemente asociada a la apertura de infraestructura, extracción de madera y la invasión de terceros para fines agropecuarios. También se puede ver la recuperación de degradación forestal a bosque (581,05 ha) es baja en comparación con la magnitud de la degradación, sugiriendo que la regeneración del dosel en estas concesiones es lenta o insuficiente para compensar la perturbación ocasionada. 3) las PPA fueron el mayor motor de la deforestación, contribuyendo con 11 306,32 ha. Las PPA también registraron el flujo de degradación forestal a deforestación más alto de todas

las actividades (2 952,79 ha), lo que indica que la degradación en estas áreas suele ser una etapa transitoria antes de la conversión final para el uso agrícola. 4) en CCNN la pérdida se inclinó hacia la degradación forestal (6 720,29 ha), que es mayor que la deforestación (361,47 ha). Esto sugiere que el manejo en CCNN se centra en el uso sostenible de recursos, aunque con impacto en el dosel. 5) en CC, a pesar de su enfoque, el cambio de bosque a degradación forestal fue de 1 036,68 ha, lo que indica que las presiones externas o internas afectan la integridad del bosque incluso en áreas protegidas.

Los datos también muestran procesos de recuperación de cobertura, aunque en menor medida, el proceso de degradación forestal a bosque (regeneración o reclasificación) fue de 11 070,58 ha en total, siendo las CFM las que más contribuyeron a esta recuperación (6 577,88 ha). Esto puede deberse a las regulaciones de manejo post aprovechamiento.

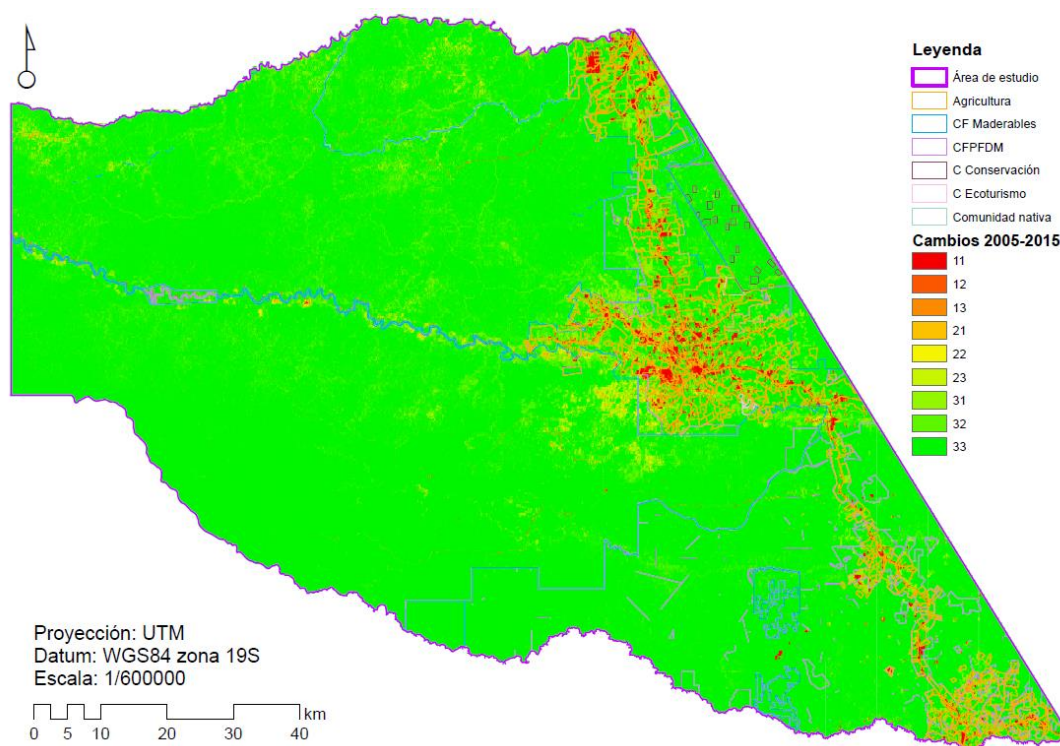


Figura 14. Cambios de NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2005-2015.

Tabla 14. *Cambios de cobertura por degradación forestal y deforestación del periodo 2005-2015*

Tipo de actividad	Categorías (ha)								
	Permanencia bosque	Permanencia degradación forestal	Permanencia deforestación	Bosque a degradación forestal	Bosque a deforestación	Degradación forestal a bosque	Degradación forestal a deforestación	Deforestación a bosque	Deforestación a degradación forestal
Área total	889 484,41	8 954,99	13 674,48	82 190,52	22 431,40	11 070,58	5 484,54	2 054,63	2 064,22
PPA	50 973,30	2 002,90	9 447,26	10 897,21	11 306,32	2 330,67	2 952,79	979,14	1 257,84
CFM	568 278,53	4 851,80	464,89	50 070,53	3 982,85	6 577,88	1 163,55	460,97	339,32
CFPDM	195 265,03	403,71	631,83	8 735,24	3 454,05	581,05	265,54	115,25	93,96
CC	11 556,69	58,63	1,09	1 036,68	8,69	104,91	1,93	2,10	1,38
CE	662,00	10,30	1,54	200,99	31,96	4,61	4,57	9,62	1,20
CCNN	44 236,09	958,91	47,47	6 720,29	361,47	826,30	144,71	36,94	42,33

Tabla 15. *Cambios de cobertura por degradación forestal y deforestación del periodo 2015-2025*

Tipo de actividad	Categorías (ha)								
	Permanencia bosque	Permanencia degradación forestal	Permanencia deforestación	Bosque a degradación forestal	Bosque a deforestación	Degradación forestal a bosque	Degradación forestal a deforestación	Deforestación a bosque	Deforestación a degradación forestal
Área total	824 673,35	33 327,03	25 013,42	58 125,27	18 489,79	54 156,45	7 037,18	6 819,18	9 768,12
PPA	32 762,30	4 986,95	15 758,82	12 809,13	8 559,94	5 871,75	3 468,51	3 037,21	4 892,84
CFM	544 177,44	21 702,87	1 882,57	27 436,32	2 777,07	33 122,27	1 344,73	1 523,84	2 223,21
CFPDM	179 731,10	2 732,03	2 285,72	12 317,37	3 718,75	5 629,11	1 064,08	1 065,18	1 002,30
CC	11 357,68	294,44	1,02	295,06	4,25	804,48	3,09	3,55	8,55
CE	333,96	120,90	29,12	220,28	118,96	39,35	55,26	2,63	6,32
CCNN	44 095,51	1 609,47	192,71	910,37	110,57	6012,62	80,90	144,88	217,47

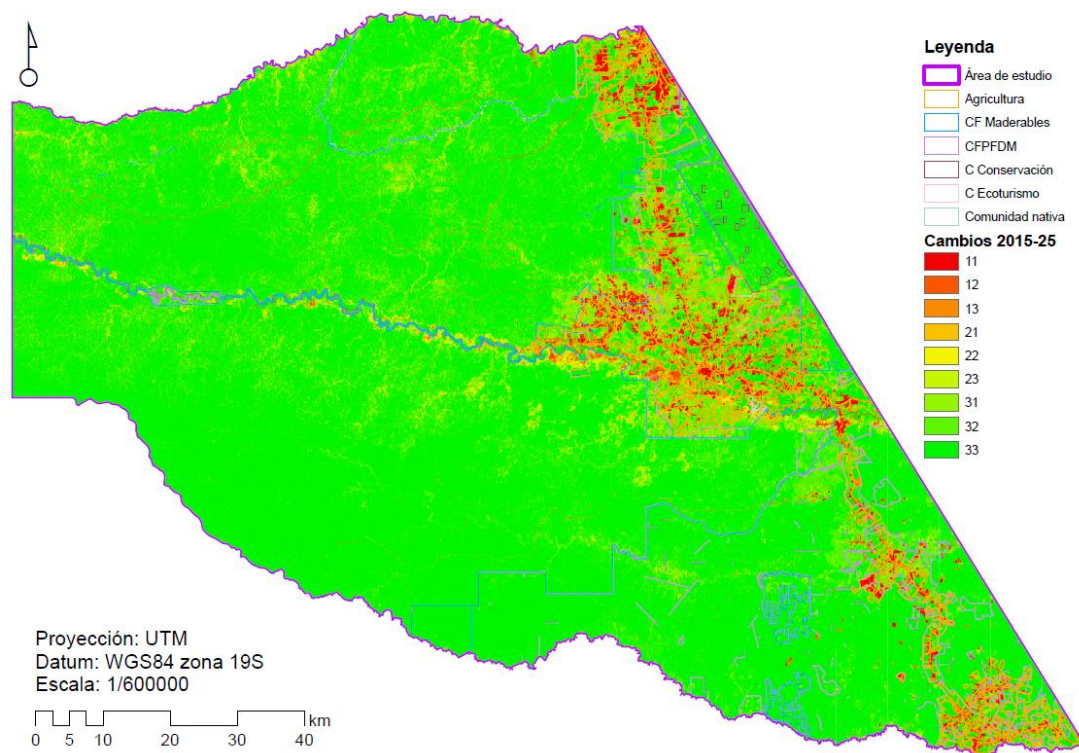


Figura 15. Cambios de NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2015-2025.

En el periodo 2015-2025, se caracteriza por una reducción en la magnitud de la pérdida y un aumento en la recuperación y estabilidad del bosque. La pérdida de bosque fue de 76 615,06 ha. Los cambios de bosque a degradación forestal se muestran como la dominante, con 58 125,27 ha (75,9%). Mientras que, de bosque a deforestación, la conversión fue de 18 489,79 ha. Por otro lado, la pérdida de bosque se redujo en más de 28 000 ha en comparación con la década anterior, confirmando la desaceleración de las tasas.

El análisis por actividad revela patrones de cambio específicos, que confirman el rol de cada título como motor de degradación o deforestación; 1) las CFM se mantienen como el principal motor de la degradación forestal (27 436,32 ha), representando el 47,2%, mientras que el cambio de degradación forestal a bosque es de 33 122,27 ha. Este valor es mayor que la conversión a degradación forestal, lo que resulta en una ganancia neta de cobertura forestal en esta categoría. 2) las CFPDM presentan la conversión de bosque a degradación forestal (12 317,37 ha) como el principal motor de pérdida de

cobertura. Los cambios de bosque a deforestación (3 718,75 ha) también fue considerable, lo que indica que, a pesar de su finalidad no maderable, sigue habiendo una conversión irreversible de tierras. Asimismo, las CFPDM registraron un cambio considerable de degradación forestal a bosque (5 629,11 ha). 3) las PPA se presenta como el motor constante de deforestación, aunque la magnitud se reduce, las PPA siguen siendo el mayor motor cambio de deforestación con 8 559,94 ha. Las PPA también tienen la mayor conversión de degradación forestal a deforestación con 3 468,51 ha, confirmando que en estas áreas la degradación forestal es una etapa previa a la eliminación total del dosel para la agricultura. 4) Las CCNN mostraron una pérdida por degradación forestal de 910,37 ha, pero la conversión degradación forestal a bosque fue mayor (6 012,62 ha). Esto es la evidencia de una recuperación de la cobertura muy efectiva en estas áreas, lo que explica la tasa anual positiva de 1.14%. 5) las CE presentan la conversión bosque a degradación forestal (220,28 ha) y de degradación forestal a deforestación (55,26 ha) son altos en proporción al tamaño de estas concesiones, validando la tasa de pérdida del -5,70.

Los cambios de degradación forestal a bosque para 2015-2025 fue de 54 156,45 ha, este valor es mayor a lo reportado para 2005-2015 (1 070,58 ha). Este aumento de casi cinco veces en la reclasificación a bosque demuestra un proceso generalizado de regeneración o estabilización en la provincia.

Para el periodo 2005-2025, la pérdida bosque fue de 122 647,34 ha. Los cambios de bosque a degradación forestal fue la dominante con 88 196,05 ha (71,9%) perdidas, esto subraya que la perturbación sutil, pero acumulada, es el principal motor de cambio en la provincia. Mientras que de bosque a deforestación sumo 34 451,29 ha (28,1%).

El análisis por actividad revela patrones de cambio específicos, que confirman el rol de cada título como motor de degradación o deforestación; 1) las PPA son el mayor motor de conversión (16 702,80 ha) de bosque a deforestación y de degradación forestal a deforestación con 3 067,29 ha. Esto demuestra que las PPA son el principal motor de cambio de uso irreversible, donde la

degradación forestal es una etapa temporal antes de la eliminación total del dosel. 2) las CFM contribuyeron con la mayor área en la conversión de bosque a degradación forestal (45 619,88 ha), lo que representa el 51,7% de toda la degradación forestal en el periodo, siendo el impacto dominante y característico de la explotación maderera. 3) las CFPDM, destinadas al aprovechamiento de recursos no maderables (como la castaña), muestran un patrón de cambio que combina el impacto de la degradación con una contribución a la deforestación. La conversión de bosque a degradación forestal cuantifica 15 321,42 ha, este impacto se asocia con actividades de aprovechamiento intensivo que causan daños puntuales en el dosel o con presiones externas debido a su accesibilidad. Asimismo, la conversión de bosque a deforestación de 6 289,66 ha indica que una parte de estas concesiones está siendo convertida irreversiblemente, posiblemente por actividades agrícolas de subsistencia o por la invasión de terceros. 4) en las CCNN, la conversión de bosque a degradación forestal (2 164,35 ha) es menor que la conversión de degradación forestal a bosque (1 477,76 ha), pero su impacto de deforestación (278,37 ha) es el más bajo entre los títulos con actividad productiva, lo que confirma su rol de protección del área. 5) las CC muestran la mayor estabilidad de la provincia, con una permanencia de Bosque de 11 556,70 ha, donde la pérdida de bosque es mínima y altamente dominada por la degradación forestal (1 036,68 ha), con una deforestación casi nula (8,69 ha). Este patrón confirma que las CC son la barrera más efectiva contra la deforestación. 6) las CE presenta una pérdida de bosque por deforestación y degradación forestal de 532,26 ha, valor alta proporción al área total de las concesiones.

En general se muestra motores de Irreversibilidad (deforestación), donde las PPA lideran la conversión degradación forestal a deforestación. Mientras que los motores de degradación forestal, las CFM y CFPDM son los principales impulsores de conversión de bosque a degradación. Por otro lado, los motores de resiliencia (Recuperación), la conversión de degradación forestal a bosque fue liderado por las CFM (8 273,24 ha) y las CCNN, lo que evidencia el impacto positivo de la regeneración.

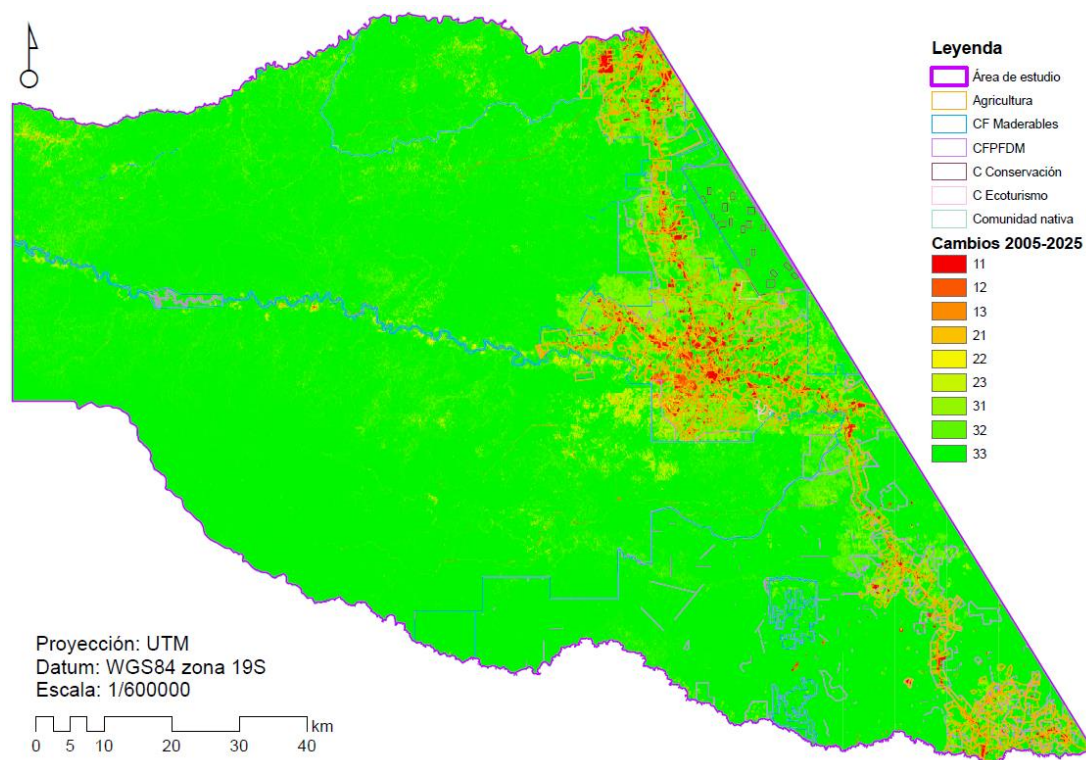


Figura 16. Cambios de NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes de los bosques de Tahuamanu, 2005-2025.

Tabla 16. *Cambios de cobertura por degradación forestal y deforestación del periodo 2005-2025*

Tipo de actividad	Categorías (ha)								
	Permanencia bosque	Permanencia degradación forestal	Permanencia deforestación	Bosque a degradación forestal	Bosque a deforestación	Degradación forestal a bosque	Degradación forestal a deforestación	Deforestación a bosque	Deforestación a degradación forestal
Área total	871 552,21	7 604,85	11 301,58	88 196,05	34 451,29	13 111,61	4 726,47	3 059,13	3 406,57
PPA	38 414,95	2 289,28	7 994,59	18 060,21	16 702,80	1 942,61	3 067,29	1 382,40	2 293,31
CFM	571 444,02	3 891,02	288,65	45 619,88	5 299,42	8 273,24	400,88	664,05	309,18
CFPDM	185 847,41	400,22	436,24	15 321,42	6 289,66	511,15	337,66	221,50	180,39
CC	11 556,70	58,63	1,09	1 036,68	8,69	104,91	1,93	2,10	1,38
CE	362,04	4,41	0,89	343,26	189,00	4,62	11,16	9,34	2,09
CCNN	48 924,31	337,21	38,01	2 164,35	278,37	1 477,76	66,89	60,40	27,21

Los resultados evidencian que el principal motor de la pérdida de cobertura forestal en los bosques de Tahuamanu no es la tala rasa (deforestación), sino la degradación forestal, donde la conversión de bosque a degradación forestal (88 196,05 ha) superó ampliamente la deforestación (34 451,29 ha) en el periodo 2005-2025, esta proporción (71,9% frente a 28,1%) refleja la ineficacia de los sistemas de monitoreo enfocados exclusivamente en la deforestación, lo que requiere la necesidad de la aplicación de metodologías de detección más sutiles (como NDFI/CODED) destacada por (Miguel et al. 2024).

La matriz de transición demostró que cada actividad económica impulsa un patrón de cambio distinto, validando la hipótesis de la diferenciación espacial de los motores de pérdida; 1) las PPA se consolidan como el principal motor de conversión irreversible, registrando la mayor tasa de pérdida constante (-2,78% anual) y presentaron la mayor contribución a la conversión de deforestación (bosque a deforestación con 16 702,80 ha). La agricultura no solo tala el bosque, sino que contribuye a la conversión de degradación forestal a deforestación (3 067,29 ha), lo que demuestra que la degradación forestal es, en este contexto, una etapa transitoria y acelerada hacia la eliminación total del dosel, lo que concuerda con la literatura que identifica la expansión agropecuaria como el motor de mayor cambio en la Amazonía (Alarcon-Aguirre et al. 2021; Alarcon-Aguirre et al. 2023). 2) las concesiones extractivas mostraron tasas de degradación considerables, pero con dinámicas de recuperación contrastantes. Las CFM lideraron la conversión de bosque a degradación forestal (45 619,88 ha), lo que es el impacto esperado de la apertura de carreteras, patios de acopio y la extracción selectiva. Sin embargo, en la segunda década, las CFM registraron una recuperación (tasa de 0,09%) y un alto grado de conversión de degradación forestal a bosque, sugiriendo que las regulaciones de manejo y regeneración están siendo efectivas y permiten la reclasificación del dosel (Alarcon-Aguirre et al. 2021; Alarcon-Aguirre et al. 2023). Mientras que las CFPDM, a pesar de su vocación no maderable, tuvieron una pérdida total considerable (tasa de -0,53%) impulsada por degradación forestal (15 321,42 ha). Esto indica que las actividades como la cosecha de castaña y los asentamientos asociados, o las

presiones externas, comprometen la integridad del dosel (Alarcon-Aguirre et al. 2021; Alarcon-Aguirre et al. 2023). 3) el análisis de las categorías de conservación y uso comunitario es fundamental para evaluar la eficacia de la gestión territorial. Las CC demostraron ser la barrera más efectiva contra el cambio irreversible, su tasa positiva (0,45%) y su deforestación casi nula (8,69 ha de bosque a Deforestación) confirman que son un modelo de éxito en la protección de la integridad del dosel. Las CCNN mostraron la mayor evidencia de resiliencia forestal en la segunda década (tasa de 1,14%), con una conversión de degradación forestal a bosque superando a la deforestación. Este patrón respalda el rol protector y la gestión sostenible del territorio indígena (Dourojeanni 2019). Las CE son la principal anomalía. Con la tasa más alta (-4,24%) y una conversión de bosque a deforestación, estas áreas podrían reflejar un fracaso en la gobernanza, donde las presiones o el uso indebido han comprometido la finalidad de conservación o podrían representar la implementación inicial que requiere la construcción de infraestructura y para ello se elimina el dosel, en todos los casos se requiriendo una fiscalización urgente.

Finalmente, la drástica desaceleración en la tasa de pérdida general de -0,97% (2005-2015) a -0,16% (2015-2025) podría interpretarse como un éxito en la gestión forestal en Tahuamanu. El aumento en la conversión de degradación forestal a bosque en 2015-2025 (11 070,58 ha a 54 156,45 ha) es una fuerte evidencia de recuperación natural y de la estabilización del manejo en las CFM y CCNN. Otros autores que investigan la deforestación (Bullock et al. 2020c) sostienen que hay una efectividad en una sola jurisdicción (Tahuamanu) que podría trasladar las presiones de extracción a áreas adyacentes o menos reguladas (fugas), por lo tanto, se debe considerar un contexto más regional para monitorear cualquier desaceleración.

La Figura 17 ilustra la dinámica temporal del NDFI a lo largo de la trayectoria espectral de una muestra de píxel dentro de las PPA. Esta trayectoria es un ejemplo de la firma espectral que el algoritmo CODED clasifica como deforestación. La trayectoria indica que el NDFI cae drásticamente desde un valor alto (dosel intacto cerrado, cerca de 1,0) durante un período prolongado, para posteriormente obtener valores bajos o negativos de NDFI (suelo desnudo o estructura no forestal). La característica definitiva es que la caída del valor es seguida por un período sin registro de valores de cierre del dosel durante los años posteriores (2005-2025). Esta falta de recuperación es una característica para distinguir la deforestación permanente de la degradación forestal dentro del análisis temporal. Este patrón espectral dentro de las PPA confirma que la agricultura es la principal responsable de toda la deforestación.

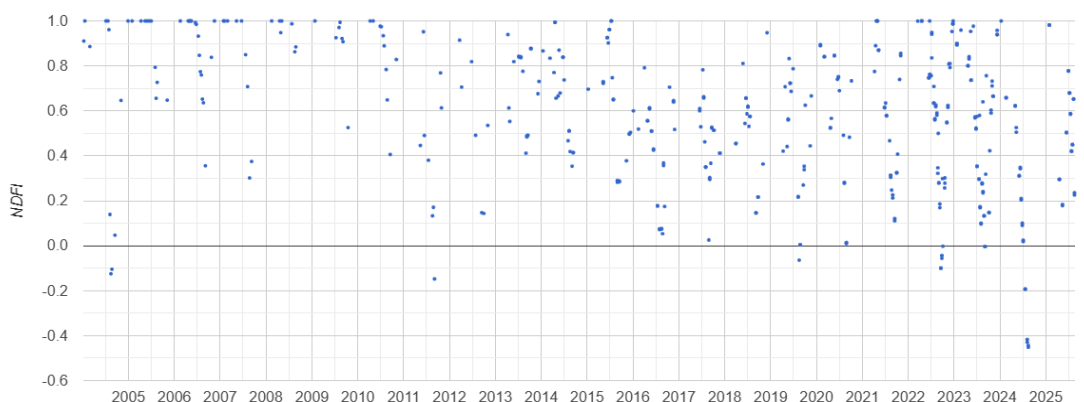


Figura 17. Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en propiedades privadas para la agricultura.

La temporalidad del NDFI en las CFM (Figura 18) indica la firma espectral que CODED califica como degradación forestal, lo cual determina el nivel de estas concesiones como el principal motor de perturbación reversible en los bosques de Tahuamanu. En contraste con la deforestación irreversible de las PPA (donde NDFI cae y se sostiene en un nivel bajo), la trayectoria del CFM tiene un píxel que muestra un comportamiento de variación y recuperación. En los datos se observan múltiples puntos de NDFI en los que se registran caídas de los valores máximos (cercanos a 1,0) a valores intermedios (0,95,

0,90, o incluso 0,75-0,80), y estas caídas son el remanente producto del dosel por la extracción selectiva de madera (degradación forestal). Posterior a esas caídas, el NDFI retorna a valores altos (cercanos a 1,0) en los años que siguen. Esta recuperación espectral que se traduce a bosques bajo manejo forestal confirma la conversión de la degradación forestal en bosque. Por último, el rango muy alto en el que se sitúa la mayoría de los puntos (0,95-1,0), verifica que el patrón que predomina, a pesar de la extracción, es la estabilidad del dosel en las CFM.

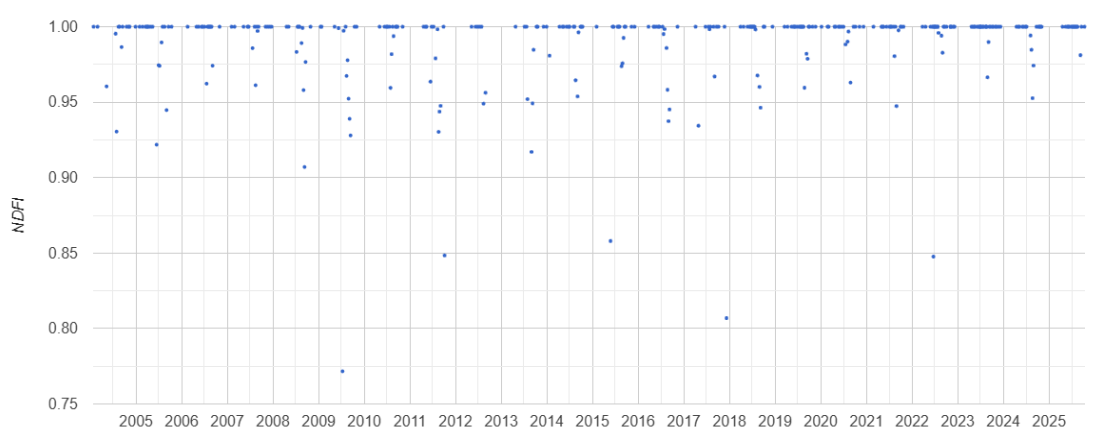


Figura 18. Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones forestales maderables.

La dinámica temporal del NDFI en los CFPDM (Figura 19) muestra una firma espectral que revela el impacto de la degradación de los bosques y el impacto de la susceptibilidad de estos bosques a la deforestación, confirmando su contribución a la conversión a la pérdida. La trayectoria del píxel en el CFPDM muestra un patrón de disturbio que es más sutil pero también más continuo que el del CFM. La mayoría de los puntos se agrupan en valores extremadamente altos (0,98 a 1,00), lo que es indicativo de una alta cobertura de dosel. Sin embargo, la presencia de caídas periódicas a valores en el rango intermedio (0,96 a 0,94) es exactamente lo que se esperaría para mostrar a la degradación de los bosques como resultado de las actividades realizadas, como en el caso de la recolección de castañas, la tala selectiva o la apertura de infraestructura interna. Al menos una caída notable a un valor bajo (0,84

en los años 2014-2015) y aunque esta caída es profunda, es seguida por una recuperación al valor máximo, lo cual es un distintivo del disturbio, pero también sería indicativo de que el disturbio fue más severo o más prolongado que el de la degradación de los bosques dentro de los CFM, que corresponde a la conversión de un tramo de bosque a un estado de bosque degradado y luego es deforestado.

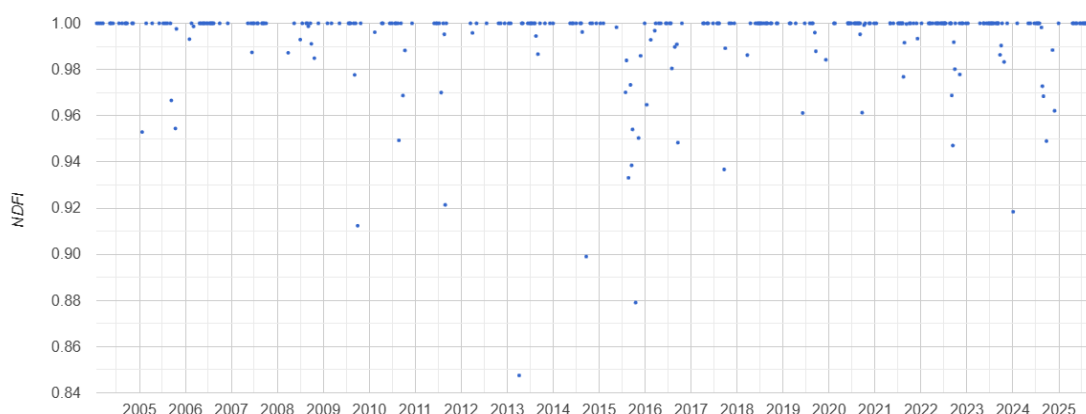


Figura 19. Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones de productos forestales diferentes a la madera.

En CC, la dinámica temporal del NDFI (Figura 20) muestra la firma espectral más estable de todos los títulos habilitantes analizados, confirmando su efectividad en la conservación del dosel forestal. La trayectoria del píxel NDFI en el CC muestra un patrón de mínima perturbación a lo largo de los 20 años del estudio. La mayor cantidad de puntos NDFI se agrupan en el valor máximo de 1,00 o en valores muy cercanos (0,975 – 1,00). Esto sugiere que el dosel en estas zonas ha mantenido de manera constante su integridad y estructura. Los años de caída del NDFI son infrecuentes y de poca profundidad (0,95 o más) y solo se nota una perturbación más significativa (alrededor de 0,80) al principio del período; luego fue seguida por una recuperación total, estas mínimas caídas se clasifican como degradación forestal. La ausencia de caídas que se estabilicen y persistan en valores bajos o negativos (que es el patrón observado en la PPA) es la prueba espectral de que los CC son la barrera más efectiva contra la deforestación irreversible.

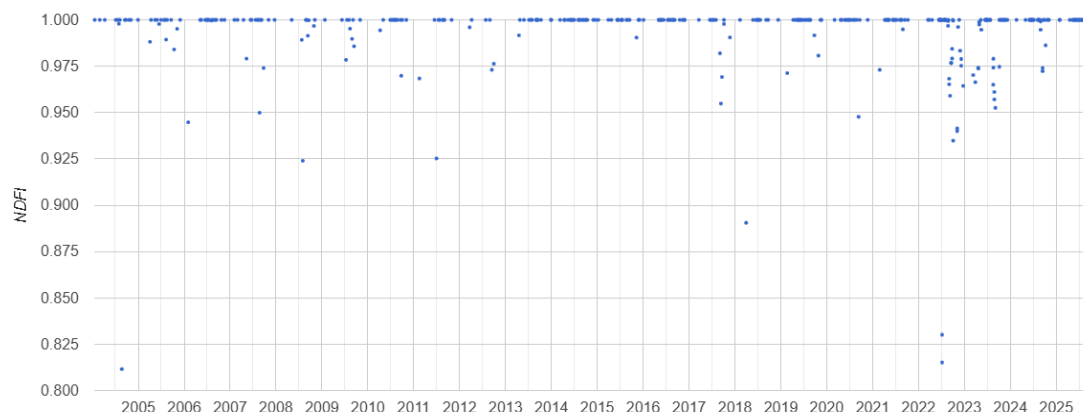


Figura 20. Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones de conservación.

La distribución espectral de las anomalías de la firma NDFI de un título habilitante de conservación (CE) presenta una anomalía (Figura 21). A pesar de que los objetivos de la CE son la conservación y el uso sostenible, la trayectoria del píxel revela una vulnerabilidad a la deforestación y la degradación forestal. A pesar de que la mayoría de los objetivos de la CE son la conservación y el uso sostenible, la trayectoria del píxel revela una vulnerabilidad a la deforestación y la degradación forestal. La mayoría de los puntos se agrupan en valores altos (cerca de 1,0), hay caídas notables del NDFI a valores intermedios (0,85 a 0,90) y un valor muy bajo (cerca de 0,75 en 2020 y 0,80 en 2025) que son indicadores de degradación forestal considerable y recurrente. La frecuencia y profundidad de esas caídas es inconsistente, lo que sugiere que las CE están bajo una presión externa o un uso inadecuado del suelo que implica infraestructura y que está comprometiendo la integridad del dosel.

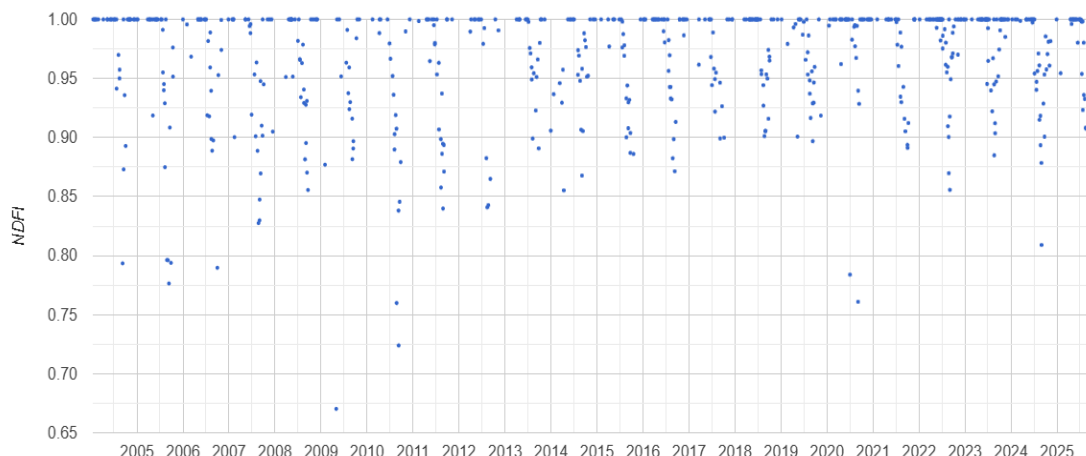


Figura 21. Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en concesiones de ecoturismo.

En los CC, la firma espectral del NDFI y sus dinámicas temporales muestran una fuerte resiliencia a pesar de las actividades de extracción y subsistencia a lo largo de las trayectorias del NDFI (Figura 22). La mayoría de los puntos del NDFI se agrupan en rangos altos (0,95 – 1,00), típicos de un dosel cerrado, pero también se observaron caídas en rangos medios (0,85, 0,75 e incluso 0,60). Estas caídas, como el CFM, se caracterizaron por una recuperación espectral a valores altos en los años siguientes, un patrón que refleja la conversión de la degradación forestal a una recuperación del bosque, validando que las áreas de CCNN, a pesar de las perturbaciones por aprovechamiento de los recursos forestales, usos tradicionales o de subsistencia, tienen una alta resiliencia y potencial regenerativo.

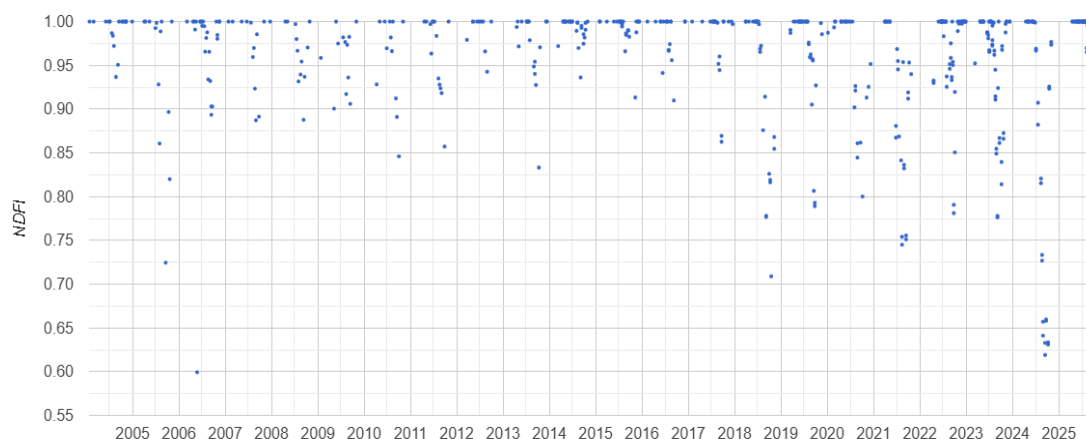


Figura 22. Dinámica temporal de la degradación forestal y deforestación en comunidades nativas.

La aplicación del algoritmo CODED permitió obtener la evidencia espectral del impacto que tiene la conversión de la cobertura de bosque en Tahuamanu. El análisis de variación espectral de las PPA presentó caídas sin recuperaciones subsecuentes del NDFI, indicando de esta forma la deforestación irreversible, lo que lo valida como el principal motor de cambio (Alarcon-Aguirre et al. 2021). Por otro lado, en los títulos extractivos (CFM, CFPDM) y en las CCNN se presentó otro patrón, en este último caso las caídas del NDFI (degradación del bosque) fueron seguidas de recuperaciones a valores de NDFI (dosel), corroborando la resiliencia del bosque en el caso de estas categorías (Dourojeanni 2019).

Los datos del análisis espectral también apuntaron hacia el enfoque metodológico adoptado y las deficiencias en la gestión. La predominancia de la pérdida de bosque como forma de degradación forestal sugiere las conclusiones planteadas por Miguel et al. (2024) de que los sistemas de monitoreo que restringen su enfoque a la deforestación son insuficientes, por lo que se justifican el uso de técnicas como el SMA y NDFI. Las CC, que se relacionaron con la mayor estabilidad con menores caídas en NDFI, contrastaron con las CE, que mostraron caídas más significativas e inconsistentes en NDFI, contrario al título de conservación que llevan. Este patrón anómalo proporciona argumentos para determinar la vulnerabilidad de las CE, y la supervisión que se requiere sobre ellas. La reciente

desaceleración en el ritmo de la pérdida general podría ser un signo de gestión efectiva a nivel local, o, por el contrario, como lo describen Bullock et al. (2020c), un caso de fuga donde la presión extractiva se desplaza a áreas adyacentes.

CONCLUSIONES

En el análisis de la pérdida de cobertura forestal, se confirmó que el análisis de teledetección utilizando la técnica de análisis de mezcla espectral (SMA) y el índice de fracción diferencial normalizado (NDFI) fue la técnica más sensible y precisa para el análisis de pérdida de cobertura forestal.

El análisis de cobertura forestal entre los años 2005 y 2025 concluyó que la pérdida de bosque estuvo dominada por la degradación de la cobertura forestal, que aumentó en 123 452,83 ha (más de tres veces el aumento en la deforestación). Por lo tanto, se confirma que la dominancia de los cambios que se experimentan en los bosques de Tahuamanu es la pérdida de calidad del dosel forestal y no la conversión total, con una reducción de 145 179,31 ha.

La cuantificación de los cambios de cobertura por actividad en títulos habilitantes muestra que hay una diferencia en los motores de pérdidas, donde las propiedades privadas para la agricultura (PPA) fueron el motor del aumento de la deforestación (16 702,80 ha) y en el caso de las concesiones forestales maderables (CFM) y las concesiones forestales de productos diferentes a la madera (CFPDM) que por el contrario, fueron los principales motores del aumento de la degradación forestal, donde las CFM contribuyeron con el 51,7% de la conversión de bosque a degradación forestal (45 619,88 ha). En el caso de las concesiones de conservación (CC) y comunidades nativas (CCNN) fueron las categorías más efectivas, donde las CC presentaron una deforestación casi nula (8,69 ha).

La validación de la clasificación de cobertura forestal (bosque, degradación forestal y deforestación) fue de alta confiabilidad y consistencia en toda la serie temporal (2005-2025). En la serie temporal, el NDFI\CODED logró su objetivo y la clasificación obtuvo un valor mayor de 81% de precisión en todos los años (81,5% en 2005, 82,0% en 2015, y 83,3% en 2025). En el rango de concordancia considerable ($k \geq 0,723$), el índice Kappa confirmó la fiabilidad

y robustez de los mapas que se usaron para la cuantificación de cambios en Tahuamanu.

En cuanto a las tasas anuales de cambio, la desaceleración de la pérdida de cobertura forestal es apenas notable, con la tasa general bajando de -0,97% por año (2005-2015) a -0,16% por año (2015-2025), indicando una estabilización de los bosques. Sin embargo, a nivel de actividades hay ciertos contrastes; las propiedades privadas agrícolas (PPA) registraron la tasa de pérdida más alta y constante (-2,78% promedio), mientras que las concesiones forestales maderables (CFM) y las comunidades nativas (CCNN) han mostrado una tendencia hacia la recuperación en el período 2015-2025, contrastando con una tasa de -4,24% de las concesiones de ecoturismo (CE).

Los cambios para el período de 2005-2025 muestran que el cambio principal en la mayor conversión es la degradación forestal, que representó el 71,9% de la pérdida de bosque (88 196,05 ha), siendo las concesiones forestales maderables (CFM) el principal motor de esta perturbación a través de la degradación forestal (51,7%). Las propiedades privadas agrícolas (PPA) son los motores de cambio irreversible del bosque a deforestación, mientras que las concesiones de conservación (CC) demostraron ser las más efectivas con una deforestación casi nula (8,69 ha), confirmando la diferenciación de la gestión territorial en los procesos de pérdida y resiliencia del bosque.

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, donde el algoritmo de detección continua mediante el índice de fracción de degradación normalizada y el uso del análisis de mezcla espectral lineal de imágenes Landsat, estima con mayor proporcionalidad a la degradación forestal respecto a la deforestación como agentes de perturbación por actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025.

SUGERENCIAS

Dada la alta fiabilidad de los mapas, sugerimos que el enfoque de futuras investigaciones se enfoque en una integración de metodologías en la validación del proceso. En particular, se deben hacer transectos de campo dirigidos (focalizados) en los lugares de alta concentración de flujo de degradación forestal a bosque, no solo en la posición del píxel, sino, en la verificación de causalidad y ver el estado real de la regeneración. También, sugerimos la expansión de la metodología NDFI/CODED a toda la región de Madre de Dios junto con la incorporación de variables socioeconómicas y de gobernanza para formular un modelo que anticipe los factores de riesgo (drivers) y anomalías en las categorías de perturbación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, LEHMANN, N., ISAAC, WANG, Y., CHANG, Y.-C., NASSIM, SEHGAL, S., ROBINSON, C. Y BANERJEE, A. SSL4EO-L: Datasets and Foundation Models for Landsat Imagery. arXiv pre-print server, 2023-06-15 2023. doi:Nonearxiv:2306.09424

AGGARWAL, S. Principles of remote sensing. Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology, 2004, 23(2), 23-28. doi:<http://www.bishensinghbooks.com/>

ALARCON-AGUIRRE, G., CANAHUIRE, R. R., GUEVARRA, F. M. G., RODRIGUEZ, L., GALLEGOS, L. E. Y GARATE-QUISPE, J. Dinámica de la pérdida de bosques en el sureste de la Amazonia peruana: un estudio de caso en Madre de Dios. Ecosistemas, 2021, 30(2), 2175-2175. doi:<https://doi.org/10.7818/ECOS.2175>

ALARCON-AGUIRRE, G., MAMANI MAMANI, M., CANAHUIRE-ROBLES, R. R., VASQUEZ ZAVALETA, T., PEÑA VALDEIGLESIAS, J., DIAZ REVOREDO, J., RODRÍGUEZ ACHATA, L., RAMOS ENCISO, D. Y GARATE-QUISPE, J. Forest Loss Related to Brazil Nut Production in Non-Timber Forest Product Concessions in a Micro-Watershed in the Peruvian Amazon. Remote Sensing, 2023, 15(23). doi:10.3390/rs15235438

ALARCON-AGUIRRE, G., MIRANDA FIDHEL, R. F., RAMOS ENCISO, D., CANAHUIRE-ROBLES, R., RODRIGUEZ-ACHATA, L. Y GARATE-QUISPE, J. Burn Severity Assessment Using Sentinel-1 SAR in the Southeast Peruvian Amazon, a Case Study of Madre de Dios. Fire, 2022, 5(4). doi:<https://doi.org/10.3390/fire5040094>

ALARCÓN, G., DÍAZ, J., VELA, M., GARCÍA, M. Y GUTIÉRREZ, J. Deforestación en el sureste de la amazonia del Perú entre los años 1999-2013; caso Regional de Madre de Dios (Puerto Maldonado–Inambari). Journal

of High Andean Research, 2016, 18(3), 319-330.
doi:<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2016.221>

ALLNUTT, T. F., ASNER, G. P., GOLDEN, C. D. Y POWELL, G. V. N. Mapping Recent Deforestation and Forest Disturbance in Northeastern Madagascar. Tropical Conservation Science, 2013/03/01 2013, 6(1), 1-15.
doi:10.1177/194008291300600101

ANAYA, J. A. Y CHUVIECO, E. Validación para Colombia de la estimación de área quemada del producto L3JRC en el periodo 2001-2007/Validation of the L3JRC burned area product estimation in Colombia from 2001 to 2007. Actualidades Biológicas, 2010, 32(92), 29.

ANJI-REDDY, M. Geographical Information System. *3rd Edition, BS Publication, Hyderabad* [Type of Work]. 2010. Disponible en Internet:<<https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA242180195&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=16920074&p=IFME&sw=w&userGroupName=anon%7E7ab09282&aty=open-web-entry>>

ARYAL, R. R., WESPESTAD, C., KENNEDY, R., DILGER, J., DYSON, K., BULLOCK, E., KHANAL, N., KONO, M., POORTINGA, A., SAAH, D. Y TENNESON, K. Lessons learned while implementing a time-series approach to forest canopy disturbance detection in Nepal. Remote Sensing, 2021a, 13(14). doi:10.3390/rs13142666

ARYAL, R. R., WESPESTAD, C., KENNEDY, R., DILGER, J., DYSON, K., BULLOCK, E., KHANAL, N., KONO, M., POORTINGA, A., SAAH, D. Y TENNESON, K. Lessons Learned While Implementing a Time-Series Approach to Forest Canopy Disturbance Detection in Nepal. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2021b, vol. 13, no. 14. ISSN 2072-4292.
doi:10.3390/rs13142666.

ASNER, G. P., DAVID, E. K., ARAVINDH, B. Y GUAYANA, P.-A. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8/1 2009, 3(1), 033543. doi:10.1117/1.3223675

ASNER, G. P., KELLER, M., PEREIRA, J. R., ZWEEDE, J. C. Y SILVA, J. N. M. Canopy damage and recovery after selective logging in Amazonia: Field and satellite studies. *Ecological Applications*, 2004/08/01 2004, 14(sp4), 280-298. doi:<https://doi.org/10.1890/01-6019>

ASNER, G. P. Y TUPAYACHI, R. Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(9), 94-104. doi:10.1088/1748-9326/aa7dab

BULLOCK, E. L., NOLTE, C., SEGOVIA, A. R. Y WOODCOCK, C. E. Ongoing forest disturbance in Guatemala's protected areas. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2020a, 6(2), 141-152. doi:10.1002/rse2.130

BULLOCK, E. L., WOODCOCK, C. E. Y HOLDEN, C. E. Improved change monitoring using an ensemble of time series algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2020b, 238. doi:10.1016/j.rse.2019.04.018

BULLOCK, E. L., WOODCOCK, C. E. Y OLOFSSON, P. Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2020/03/01/ 2020c, 238, 110968. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.011>

BULLOCK, E. L., WOODCOCK, C. E., SOUZA, C. Y OLOFSSON, P. Satellite-based estimates reveal widespread forest degradation in the Amazon. *Global Change Biology*, 2020d, 26(5), 2956-2969. doi:10.1111/gcb.15029

CA ¿ Y POR DÓNDE COMENZAMOS? Prioridades de la Comunidad Andina ante el Cambio Climático. Lima, Peru: Secretaría General de la Comunidad Andina, 2007.

CERDA, J. Y VILLARROEL, L. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. Revista chilena de pediatría, 2008, 79(1), 54-58. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008>

CHÁVEZ, A., HUAMANI, L., FERNANDEZ, R., BEJAR, N., VALERA, F., PERZ, S., BROWN, I., DOMÍNGUEZ, S., PINEDO, R. Y ALARCÓN, G. Regional Deforestation Trends within Local Realities: Land-Cover Change in Southeastern Peru 1996–2011. Land, 2013, 2(2), 131. doi:<https://doi.org/10.3390/land2020131>

CHEN, S., WOODCOCK, C. E., BULLOCK, E. L., ARÉVALO, P., TORCHINAVA, P., PENG, S. Y OLOFSSON, P. Monitoring temperate forest degradation on Google Earth Engine using Landsat time series analysis. Remote Sensing of Environment, 2021/11/01/ 2021, 265, 112648. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112648>

CHUVIECO, E. Teledetección espacial: la observación de la Tierra desde el espacio 2002.

CHUVIECO, E. *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. Edition ed.: CRC press, 2016. ISBN 1498728073.

CHUVIECO, E. Y HANTSON, S. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Version1. Plan Nacional de Teledetección. Instituto Geográfico Nacional. En línea; http://www.ign.es/PNT/pdf/especificacionestecnicas-pnt-mediad-landsat_v2-2010.pdf, 2010.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. Educational and Psychological Measurement, 1960/04/01 1960, 20(1), 37-46. doi:<https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

COHEN, J., MANION, L. Y MORRISON, J. Designing a qualitative study. In.: Newsbury Park: CA Sage, 2003.

DOUROJEANNI, M. Esbozo de una nueva política forestal peruana. Revista Forestal del Perú, 2019, 34(1), 4-20.

EBIDOR, L.-L. Y IKHIDE, I. G. Literature review in scientific research: an overview. East African Journal of Education Studies, 2024, 7(2), 211-218. doi:<https://doi.org/10.37284/eajes.7.2.1909>

ECKERT, S., SCHMID, L., MESSERLI, P. Y ZAEHRINGER, J. G. Spatiotemporal assessment of deforestation and forest degradation indicates spillover effects from mining activities and related biodiversity offsets in Madagascar. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2024/11/01/ 2024, 36, 101269. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101269>

ELIJAH, R. Y JENSEN, J. R. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data 1996. doi:https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1996journal/aug/1996_aug_939-948.pdf

FAO FRA 2015: Terms and Definitions 2012. doi:<https://www.fao.org/home/es>

FAO Los bosques y el cambio climático en el Perú. Bosques y cambio climático. Documento de trabajo 14, 2016.

FAO Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados 2020, 16. doi:<https://doi.org/10.4060/ca8753es>

GARCÍA-QUINTANA, Y., ARTEAGA-CRESPO, Y., TORRES-NAVARRETE, B., ROBLES-MORILLO, M., BRAVO-MEDINA, C. Y SARMIENTO-ROSETO, A. Ecological quality of a forest in a state of succession based on structural parameters: A case study in an evergreen Amazonian-Andean forest,

Ecuador. Heliyon, 2020/07/01/ 2020, 6(7), e04592.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04592>

GOREMAD Y IIAP. Macro Zonificación Ecológica Económica de Madre de Dios. In G.D.R.N.Y.M. AMBIENTE. Madre de Dios - Perú, 2009, p. 208.

HAZARI, A. Introduction to Research Methodology. In A. HAZARI ed. *Research Methodology for Allied Health Professionals: A comprehensive guide to Thesis & Dissertation*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, p. 1-6.

HOLDRIDGE, L. R. Life zone ecology. Life zone ecology., 1967, (rev. ed.)).

INEI, I. N. D. E. E. I.-. Magnitud y Crecimiento Poblacional. 2017.

INRENA, SZF Y CDC-UNALM Hacia un Sistema de Monitoreo Ambiental Remoto Estandarizado para el SINANPE. Piloto V: Parque Nacional Manu, Parque Nacional Alto Purús, Reserva Comunal Purús y Santuario Nacional Megantoni (2000-2005). Lima-Perú 2006, 66.

KOLEY, S. Y CHOCKALINGAM, J. Sentinel 1 and Sentinel 2 for cropland mapping with special emphasis on the usability of textural and vegetation indices. *Advances in Space Research*, 2022/02/15/ 2022, 69(4), 1768-1785.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.10.020>

KUHN, M. Y JOHNSON, K. *Applied predictive modeling*. Edition ed.: Springer, 2013.

LANDIS, J. R. Y KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 1977, 159-174.
doi:<https://doi.org/10.2307/2529310>

LEÓN, R. A. H. Y GONZÁLEZ, S. C. *El proceso de investigación científica*. Edition ed.: Editorial Universitaria (Cuba), 2020. ISBN 9591613075.

LONDRES, M., SCHMINK, M., BÖRNER, J., DUCHELLE, A. E. Y FREY, G. P. Multidimensional forests: Complexity of forest-based values and livelihoods across Amazonian socio-cultural and geopolitical contexts. *World Development*, 2023/05/01/ 2023, 165, 106200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2023.106200>

MIGUEL, S., RUIZ-BENITO, P., REBOLLO, P., VIANA-SOTO, A., MIHAI, M. C., GARCÍA-MARTÍN, A. Y TANASE, M. Forest disturbance regimes and trends in continental Spain (1985–2023) using dense landsat time series. *Environmental Research*, 2024/12/01/ 2024, 262, 119802. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119802>

MINAM. Bosque y pérdida de bosque del Perú. Perú 2024.

MONTOYA-ZUMAETA, J. G. Y NAIME, J. *Lecciones de iniciativas tempranas de REDD+ para informar esfuerzos de mitigación de carbono efectivos y equitativos en Perú*. Edtion ed.: CIFOR, 2022.

NASIRI, V., DELJOUEI, A., MORADI, F., SADEGHI, S. M. Y BORZ, S. A. Land Use and Land Cover Mapping Using Sentinel-2, Landsat-8 Satellite Images, and Google Earth Engine: A Comparison of Two Composition Methods. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2022, vol. 14, no. 9. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs14091977.

OCHOA, C. Y PÁEZ, O. Inferencia estadística: probabilidad, variables aleatorias y distribuciones de probabilidad. *Evid Pediatr*, 2019, 15, 27.

OLIVARES, B. O. Y LÓPEZ-BELTRÁN, M. A. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Cuadernos de Investigación UNED*, 2019, 11, 112-121. doi:<http://dx.doi.org/10.22458/urj.v11i2.2299>

PAN, Y., BIRDSEY, R. A., FANG, J., HOUGHTON, R., KAUPPI, P. E., KURZ, W. A., PHILLIPS, O. L., SHVIDENKO, A., LEWIS, S. L., CANADELL, J. G.,

CIAIS, P., JACKSON, R. B., PACALA, S. W., MCGUIRE, A. D., PIAO, S., RAUTIAINEN, A., SITCH, S. Y HAYES, D. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 2011/08/19 2011, 333(6045), 988-993. doi:10.1126/science.1201609

PERZ, S., CASTRO, W., ROJAS, R., CASTILLO, J., CHÁVEZ, A., GARCÍA, M., GUADALUPE, Ó., GUTIÉRREZ, T., HURTADO, A., MAMANI, Z., MAYNA, J., MELLO, R., PASSOS, V., REYES, J., SAAVEDRA, M., DE WIT, F., ACUÑA, N., ALARCÓN, G. Y ROJAS, D. La Amazonia como un sistema socio-ecológico: Las dinámicas de cambios complejos humanos y ambientales en una frontera trinacional. In J. POSTIGO Y K. YOUNG eds. *Naturaleza y sociedad: Perspectivas socio-ecológicas sobre cambios globales en América Latina*. Lima-Perú: desco, IEP e INTE-PUCP, 2016, p. 444.

PETERS, F., KEMPE, A., KÜBLER, D., GÜNTER, S. Y NEUMEIER, S. Evaluating forest degradation, deforestation, and reforestation in Boeny and DIANA: Current efforts and future opportunities. 2024.

PLANET-TEAM. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. *Habitat International* [Type of Work]. 2025. Disponible en Internet:<<https://api.planet.com>>

PUYRAVAUD, J.-P. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1), 593-596. doi:10.1016/S0378-1127(02)00335-3

REYGADAS, Y., SPERA, S., GALATI, V., SALISBURY, D. S., SILVA, S. Y NOVOA, S. Mapping forest disturbances across the Southwestern Amazon: tradeoffs between open-source, Landsat-based algorithms. *Environmental Research Communications*, 2021/09/16 2021, 3(9), 091001. doi:10.1088/2515-7620/ac2210

RÖDIG, E., CUNTZ, M., RAMMIG, A., FISCHER, R., TAUBERT, F. Y HUTH, A. The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon

rainforest. *Environmental Research Letters*, 2018/04/30 2018, 13(5), 054013.
doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabc61>

ROMERO-BADILLA, D., ORTIZ-MALAVASI, E., OBANDO-VARGAS, G., ARCE-BENAVIDES, H., HERRERA-UGALDE, M. E. Y QUIRÓS-RAMÍREZ, G. Evaluación de Collect Earth como herramienta para estimar datos de actividad para el programa REDD+ de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 2020, 17(40), 21-32.
doi:<http://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v17i40.4904>

SABOGAL, C., KROLL, N., DE DEA, V. Y PACHECO, E. Casos de manejo sostenible de concesiones forestales maderables en la Región Madre de Dios, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 2024, 39(2), 335-376.
doi:<https://doi.org/10.21704/rfp.v39i2.1141>

SALIH, A. Spectral Mixture Analysis (SMA) Model for Extracting Urban Fractions from Landsat and Sentinel-2A Images in the Al-Ahsa Oasis, Eastern Region of Saudi Arabia. *Land* [Type of Work]. 2023, vol. 12, no. 10. ISSN 2073-445X. doi:10.3390/land12101842.

SARTORATO, C., PERSSON, M., CARDOSO, D. R., DAMASCENO, C., WARD, R. S. Y SOUZA, C. M. Mapping Brazilian Timber Origins and the Limits to Traceability. Camila and Ward, Robert S. and Souza, Carlos M. and Administrator, Sneak Peek, Mapping Brazilian Timber Origins and the Limits to Traceability, 2025. doi:<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5116957>

SCHULTZ, M., CLEVERS, J. G. P. W., CARTER, S., VERBESSELT, J., AVITABILE, V., QUANG, H. V. Y HEROLD, M. Performance of vegetation indices from Landsat time series in deforestation monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016/10/01/ 2016, 52, 318-327. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.020>

SENAMHI En la selva preparémonos para la llegada de los friajes 2015.
doi:<https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>

SHIMABUKURO, Y. E., ARAI, E., DA SILVA, G. M., HOFFMANN, T. B., DUARTE, V., MARTINI, P. R., DUTRA, A. C., MATAVELI, G., CASSOL, H. L. G. Y ADAMI, M. Mapping Land Use and Land Cover Classes in São Paulo State, Southeast of Brazil, Using Landsat-8 OLI Multispectral Data and the Derived Spectral Indices and Fraction Images. *Forests* [Type of Work]. 2023, vol. 14, no. 8. ISSN 1999-4907. doi:10.3390/f14081669.

SHIMABUKURO, Y. E., ARAI, E., DUARTE, V., JORGE, A., SANTOS, E. G. D., GASPARINI, K. A. C. Y DUTRA, A. C. Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon. *International journal of remote sensing*, 2019/07/18 2019, 40(14), 5475-5496. doi:10.1080/01431161.2019.1579943

SHIMABUKURO, Y. E., BEUCHLE, R., GRECCHI, R. C. Y ACHARD, F. Assessment of forest degradation in Brazilian Amazon due to selective logging and fires using time series of fraction images derived from Landsat ETM+ images. *Remote Sensing Letters*, 2014/09/02 2014, 5(9), 773-782. doi:10.1080/2150704X.2014.967880

SOUZA, C. M. Y ROBERTS, D. Mapping forest degradation in the Amazon region with Ikonos images. *International journal of remote sensing*, 2005/02/01 2005, 26(3), 425-429. doi:10.1080/0143116031000101620

SOUZA, C. M., ROBERTS, D. A. Y COCHRANE, M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*, 2005/10/15/ 2005a, 98(2), 329-343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.013>

SOUZA, C. M., ROBERTS, D. A. Y MONTEIRO, A. Multitemporal analysis of degraded forests in the southern Brazilian Amazon. *Earth Interact*, 2005// 2005b, 9. doi:10.1175/EI132.1

SOUZA, C. M., Z. SHIMBO, J., ROSA, M. R., PARENTE, L. L., A. ALENCAR, A., RUDORFF, B. F. T., HASENACK, H., MATSUMOTO, M., G. FERREIRA,

L., SOUZA-FILHO, P. W. M., DE OLIVEIRA, S. W., ROCHA, W. F., FONSECA, A. V., MARQUES, C. B., DINIZ, C. G., COSTA, D., MONTEIRO, D., ROSA, E. R., VÉLEZ-MARTIN, E., WEBER, E. J., LENTI, F. E. B., PATERNOST, F. F., PAREYN, F. G. C., SIQUEIRA, J. V., VIERA, J. L., NETO, L. C. F., SARAIVA, M. M., SALES, M. H., SALGADO, M. P. G., VASCONCELOS, R., GALANO, S., MESQUITA, V. V. Y AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2020, vol. 12, no. 17. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs12172735.

SOUZA, J. C. M., SIQUEIRA, J. V., SALES, M. H., FONSECA, A. V., RIBEIRO, J. G., NUMATA, I., COCHRANE, M. A., BARBER, C. P., ROBERTS, D. A. Y BARLOW, J. Ten-Year Landsat Classification of Deforestation and Forest Degradation in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2013, vol. 5, no. 11, pp. 5493-5513. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs5115493.

VARGAS, C., MONTALBAN, J. Y LEON, A. A. Early warning tropical forest loss alerts in Peru using Landsat. *Environmental Research Communications*, 2019/10/29 2019, 1(12), 121002. doi:10.1088/2515-7620/ab4ec3

VERMA, R., VERMA, S. Y ABHISHEK, K. *Research methodology*. Edition ed.: Booksclinic Publishing, 2024. ISBN 935823573X.

VISCARRA, F. E. Y ZUTTA, B. R. Models of deforestation for setting reference levels in the context of REDD: A case study in the Peruvian Amazon. *Environmental Science & Policy*, 2022/10/01/ 2022, 136, 198-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.05.015>

WAHAP, N. A. Y SHAFRI, H. Z. M. Utilization of Google Earth Engine (GEE) for land cover monitoring over Klang Valley, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020/07/01 2020, 540(1), 012003. doi:10.1088/1755-1315/540/1/012003

WHITMORE, T. C. Y BURNHAM, C. P. *Tropical rain forests of the Far East*. Edition ed.: Clarendon Press, 1975. ISBN 0198541279.

WIMBERLY, M. C., DWOMOH, F. K., NUMATA, I., MENSAH, F., AMOAKO, J., NEKORCHUK, D. M. Y MCMAHON, A. Historical trends of degradation, loss, and recovery in the tropical forest reserves of Ghana. *International Journal of Digital Earth*, 2022/12/31 2022, 15(1), 30-51. doi:10.1080/17538947.2021.2012533

WULDER, M. A., ROY, D. P., RADELOFF, V. C., LOVELAND, T. R., ANDERSON, M. C., JOHNSON, D. M., HEALEY, S., ZHU, Z., SCAMBOS, T. A., PAHLEVAN, N., HANSEN, M., GORELICK, N., CRAWFORD, C. J., MASEK, J. G., HERMOSILLA, T., WHITE, J. C., BELWARD, A. S., SCHAAF, C., WOODCOCK, C. E., HUNTINGTON, J. L., LYMBURNER, L., HOSTERT, P., GAO, F., LYAPUSTIN, A., PEKEL, J.-F., STROBL, P. Y COOK, B. D. Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 2022/10/01/ 2022, 280, 113195. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195>

YAGHOBI, S., HEIDARIZADI, Z. Y MIRZAPOUR, H. Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall (Case study: Malekshahi, Ilam Province). *Environmental Resources Research*, 2019, 7(2), 117-128. doi:10.22069/IJERR.2019.4819

YESUF, G., BROWN, K. A. Y WALFORD, N. Assessing regional-scale variability in deforestation and forest degradation rates in a tropical biodiversity hotspot. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2019/12/01 2019, 5(4), 346-359. doi:<https://doi.org/10.1002/rse2.110>

ZHANG, G., WANG, J., XUE, Y., ZHANG, C., XU, B., CHENG, Y. Y REN, Y. Comparison of sampling effort allocation strategies in a stratified random survey with multiple objectives. *Aquaculture and Fisheries*, 2020/05/01/ 2020, 5(3), 113-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.02.002>

ZHU, Z. Y WOODCOCK, C. E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2014/03/25/ 2014, 144, 152-171.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>

ZUQUIM, G., VAN DONINCK, J., CHAVES, P. P., QUESADA, C. A., RUOKOLAINEN, K. Y TUOMISTO, H. Introducing a map of soil base cation concentration, an ecologically relevant GIS-layer for Amazonian forests. *Geoderma Regional*, 2023/06/01/ 2023, 33, e00645.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00645>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

Título: Análisis espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES/INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cómo y cuánto es el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo de detección continua (CODED) mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y el uso del análisis de mezcla espectral lineal (SMA) de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025?	Analizar el espaciotemporal de la deforestación y degradación forestal basados en el algoritmo de detección continua (CODED) mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) y el uso del análisis de mezcla espectral lineal (SMA) de imágenes Landsat por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025.	El algoritmo de detección continua mediante el índice de fracción de degradación normalizada y el uso del análisis de mezcla espectral lineal de imágenes Landsat, no estima con mayor proporcionalidad a la degradación forestal respecto a la deforestación como agentes de perturbación por actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005 – 2025.	Variable Dependiente: Magnitud de la deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025. Indicadores: NDFI y cambios en el NDFI para medir la deforestación y degradación forestal.	Diseño: No experimental Transaccional (transversal) y longitudinal. Tipo: descriptiva y correlacional. Método: 1. Descarga de imágenes Landsat con GEE. 2. Preprocesamiento con GEE. 3. Estimación de SMA y NDFI para 2005, 2015 y 2025 mediante CODED. 4. Cuantificación de la deforestación y degradación forestal. 5. Validación de los resultados con trabajos de campo, imágenes de alta resolución y puntos aleatorizados. 6. Cambios de cobertura. 7. Cambios continuos de la cobertura por degradación forestal y deforestación. Población y muestra: se empleará la distribución binomial de probabilidad. $n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N - 1)E^2 + Z^2 pq}$ “Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1,96 (95%)”. “p: indica el porcentaje de aciertos estimado, 0,50 (50%)”.
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS		Variable Independiente: reflectancia espectral de la deforestación y degradación forestal con el SMA de imágenes Landsat para NDFI por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu Indicadores: 1. SMA. NDFI, deforestación y degradación forestal (ha).	
P.E.1 ¿Cómo es el análisis de mezcla espectral (SMA) de imágenes Landsat en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025? P.E.2 ¿Cuál es la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025? P.E.3 ¿Cuál es la magnitud de la deforestación y degradación	O.E.1 Determinar el análisis de mezcla espectral (SMA) de imágenes Landsat en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025. O.E.2 Estimar la magnitud de la deforestación y degradación forestal mediante el índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025. O.E.3 Estimar la magnitud de la deforestación y degradación			

forestal mediante índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005, 2015 y 2025? P.E.4 ¿Cuánto es la precisión de los mapas de deforestación y degradación forestal del índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025? P.E.5 ¿Cuánto es la tasa de pérdida de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025? P.E.6 Cual es la magnitud de los cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025?	forestal mediante índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005, 2015 y 2025. O.E.4 Evaluar la precisión de los mapas de deforestación y degradación forestal del índice de fracción de degradación normalizada (NDFI) en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005, 2015 y 2025. O.E.5 Determinar la tasa de pérdida de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, para 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025. O.E.6 Cuantificar los cambios de cobertura por deforestación y degradación forestal por tipo de actividades productivas en títulos habilitantes en los bosques de la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios, periodo 2005-2015, 2015-2025 y 2005-2025.		2. Tasa de promedio anual de cambio de cobertura (%) y ha). 3. Matriz de confusión e índice de kappa (k). 4. Cambios de NDFI y cambios continuos con CODED (ha).	“q: Indica el porcentaje de errores ($q = 1 - p$), 0,50 (50%)”. “N: Tamaño de la población”. “E: El error permitido, 0,05 (5%)”.
---	---	--	--	--

Anexo 2. Puntos de muestreo distribuidos al azar por categoría y títulos habilitantes en los bosques de Tahuamanu.

N.º	Categoría	Actividad	Este	Norte
1	Bosque	PPA	485656	8683411
2	Bosque	PPA	486210	8685054
3	Bosque	PPA	486653	8686824
4	Bosque	PPA	483376	8690569
5	Bosque	PPA	481817	8692011
6	Bosque	PPA	479621	8694408
7	Bosque	PPA	480426	8695012
8	Bosque	PPA	479185	8696571
9	Bosque	PPA	480845	8697878
10	Bosque	PPA	481801	8701097
11	Bosque	PPA	481868	8703545
12	Bosque	PPA	478112	8705975
13	Bosque	PPA	478290	8708114
14	Bosque	PPA	476239	8710760
15	Bosque	PPA	471973	8712943
16	Bosque	PPA	471675	8713472
17	Bosque	PPA	471344	8714662
18	Bosque	PPA	471097	8715616
19	Bosque	PPA	470657	8717136
20	Bosque	PPA	468500	8721211
21	Bosque	PPA	468831	8723493
22	Bosque	PPA	462166	8733882
23	Bosque	PPA	459645	8738902
24	Bosque	PPA	456660	8740856
25	Bosque	PPA	440777	8753312
26	Bosque	PPA	439040	8767661
27	Bosque	PPA	436059	8782293
28	Bosque	PPA	432987	8788665
29	Bosque	PPA	435692	8756334
30	Bosque	PPA	443203	8761874
31	Bosque	PPA	438022	8762114
32	Bosque	PPA	438002	8771135
33	Bosque	CFM	455297	8726701
34	Bosque	CFM	448101	8727548
35	Bosque	CFM	433284	8734956
36	Bosque	CFM	426510	8755488
37	Bosque	CFM	429132	8762193
38	Bosque	CFM	431167	8769034
39	Bosque	CFM	427780	8771786
40	Bosque	CFM	417409	8775173
41	Bosque	CFM	411905	8772421

42	Bosque	CFM	421642	8765224
43	Bosque	CFM	418679	8759933
44	Bosque	CFM	417409	8754218
45	Bosque	CFM	426934	8736014
46	Bosque	CFM	434765	8726278
47	Bosque	CFM	442597	8726278
48	Bosque	CFM	446619	8724161
49	Bosque	CFM	451911	8721621
50	Bosque	CFM	445561	8723738
51	Bosque	CFM	434130	8725008
52	Bosque	CFM	430955	8730299
53	Bosque	CFM	427357	8732839
54	Bosque	CFM	421219	8736226
55	Bosque	CFM	414234	8738978
56	Bosque	CFM	410485	8742347
57	Bosque	CFM	407037	8741729
58	Bosque	CFM	406825	8750619
59	Bosque	CFM	404497	8754641
60	Bosque	CFM	400264	8756969
61	Bosque	CFM	398147	8758028
62	Bosque	CFM	401110	8761203
63	Bosque	CFM	433406	8755018
64	Bosque	CFM	435840	8755177
65	Bosque	CFPDM	435522	8759198
66	Bosque	CFPDM	433035	8761368
67	Bosque	CFPDM	432982	8763908
68	Bosque	CFPDM	434676	8763379
69	Bosque	CFPDM	452974	8746954
70	Bosque	CFPDM	452360	8746255
71	Bosque	CFPDM	453059	8745133
72	Bosque	CFPDM	456714	8716972
73	Bosque	CFPDM	461318	8717924
74	Bosque	CFPDM	465287	8718083
75	Bosque	CFPDM	464176	8714749
76	Bosque	CFPDM	463241	8712303
77	Bosque	CFPDM	467072	8706729
78	Bosque	CFPDM	468336	8702524
79	Bosque	CFPDM	470826	8703205
80	Bosque	CFPDM	469573	8699350
81	Bosque	CFPDM	471116	8692770
82	Bosque	CFPDM	475882	8705580
83	Bosque	CFPDM	476778	8698154
84	Bosque	CFPDM	478292	8690808
85	Bosque	CFPDM	483295	8699667
86	Bosque	CFPDM	482797	8706392

87	Bosque	CFPDM	477034	8719988
88	Bosque	CFPDM	450364	8708875
89	Bosque	CFPDM	463594	8699734
90	Bosque	CFPDM	470049	8690460
91	Bosque	CFPDM	477699	8687905
92	Bosque	CFPDM	430838	8738244
93	Bosque	CFPDM	457984	8728084
94	Bosque	CFPDM	456556	8724274
95	Bosque	CFPDM	445618	8774546
96	Bosque	CFPDM	443129	8772660
97	Bosque	CC	455127	8758961
98	Bosque	CC	454080	8760370
99	Bosque	CC	450810	8760620
100	Bosque	CC	450602	8764279
101	Bosque	CC	450841	8765787
102	Bosque	CC	447745	8767216
103	Bosque	CC	445126	8768169
104	Bosque	CC	443776	8768327
105	Bosque	CC	450602	8759437
106	Bosque	CC	454651	8756104
107	Bosque	CE	454449	8734433
108	Bosque	CE	454557	8733879
109	Bosque	CE	454119	8733656
110	Bosque	CE	453384	8733902
111	Bosque	CE	454045	8733376
112	Bosque	CE	455326	8733573
113	Bosque	CE	454978	8733871
114	Bosque	CE	451951	8752746
115	Bosque	CE	451967	8751952
116	Bosque	CCNN	451982	8751698
117	Bosque	CCNN	421479	8779627
118	Bosque	CCNN	419654	8779230
119	Bosque	CCNN	417590	8781214
120	Bosque	CCNN	415447	8782723
121	Bosque	CCNN	415368	8777722
122	Bosque	CCNN	410208	8781294
123	Bosque	CCNN	407748	8781532
124	Bosque	CCNN	405843	8782484
125	Bosque	CCNN	404334	8783993
126	Bosque	CCNN	402906	8785421
127	Bosque	CCNN	404573	8779548
128	Bosque	CCNN	403144	8777722
129	Degradación forestal	PPA	484532	8685937
130	Degradación forestal	PPA	484817	8686323
131	Degradación forestal	PPA	484254	8688481

132	Degradación forestal	PPA	482168	8691402
133	Degradación forestal	PPA	480273	8698577
134	Degradación forestal	PPA	479251	8699181
135	Degradación forestal	PPA	480743	8701276
136	Degradación forestal	PPA	482100	8701560
137	Degradación forestal	PPA	478949	8700103
138	Degradación forestal	PPA	476787	8706155
139	Degradación forestal	PPA	478781	8707311
140	Degradación forestal	PPA	477897	8709250
141	Degradación forestal	PPA	475345	8710010
142	Degradación forestal	PPA	475512	8710731
143	Degradación forestal	PPA	475295	8710983
144	Degradación forestal	PPA	473065	8709759
145	Degradación forestal	PPA	467801	8722499
146	Degradación forestal	PPA	467700	8722784
147	Degradación forestal	PPA	467499	8725115
148	Degradación forestal	PPA	468304	8725651
149	Degradación forestal	PPA	464163	8737000
150	Degradación forestal	PPA	463040	8737872
151	Degradación forestal	PPA	462822	8738258
152	Degradación forestal	PPA	462772	8738878
153	Degradación forestal	PPA	460877	8737503
154	Degradación forestal	PPA	461028	8738358
155	Degradación forestal	PPA	461582	8738526
156	Degradación forestal	PPA	460810	8739666
157	Degradación forestal	PPA	446662	8747025
158	Degradación forestal	PPA	446947	8749138
159	Degradación forestal	PPA	438950	8769908
160	Degradación forestal	PPA	439218	8770327
161	Degradación forestal	CFM	415356	8734896
162	Degradación forestal	CFM	414297	8734235
163	Degradación forestal	CFM	412313	8735028
164	Degradación forestal	CFM	411387	8736748
165	Degradación forestal	CFM	407947	8738997
166	Degradación forestal	CFM	409138	8734764
167	Degradación forestal	CFM	398951	8751432
168	Degradación forestal	CFM	396570	8754078
169	Degradación forestal	CFM	409535	8758973
170	Degradación forestal	CFM	408609	8761090
171	Degradación forestal	CFM	401465	8767043
172	Degradación forestal	CFM	400274	8769292
173	Degradación forestal	CFM	426071	8770615
174	Degradación forestal	CFM	427129	8768366
175	Degradación forestal	CFM	427129	8764662
176	Degradación forestal	CFM	429246	8766778

177	Degradación forestal	CFM	427659	8768498
178	Degradación forestal	CFM	423822	8772070
179	Degradación forestal	CFM	422367	8774054
180	Degradación forestal	CFM	428056	8727488
181	Degradación forestal	CFM	425807	8727488
182	Degradación forestal	CFM	419721	8725636
183	Degradación forestal	CFM	425145	8722196
184	Degradación forestal	CFM	429775	8714126
185	Degradación forestal	CFM	427262	8714523
186	Degradación forestal	CFM	424484	8713597
187	Degradación forestal	CFM	421838	8715449
188	Degradación forestal	CFM	421706	8718095
189	Degradación forestal	CFM	421309	8719682
190	Degradación forestal	CFM	419324	8719550
191	Degradación forestal	CFM	416546	8718889
192	Degradación forestal	CFM	414826	8719815
193	Degradación forestal	CFPDM	441086	8775652
194	Degradación forestal	CFPDM	440888	8775519
195	Degradación forestal	CFPDM	440954	8775255
196	Degradación forestal	CFPDM	441880	8775288
197	Degradación forestal	CFPDM	441913	8775751
198	Degradación forestal	CFPDM	445717	8773469
199	Degradación forestal	CFPDM	446907	8770360
200	Degradación forestal	CFPDM	437151	8766193
201	Degradación forestal	CFPDM	433248	8756271
202	Degradación forestal	CFPDM	434108	8755973
203	Degradación forestal	CFPDM	434968	8757627
204	Degradación forestal	CFPDM	434637	8757825
205	Degradación forestal	CFPDM	434406	8757991
206	Degradación forestal	CFPDM	433843	8760273
207	Degradación forestal	CFPDM	460878	8722356
208	Degradación forestal	CFPDM	460243	8721166
209	Degradación forestal	CFPDM	466799	8712407
210	Degradación forestal	CFPDM	466355	8710688
211	Degradación forestal	CFPDM	464450	8711561
212	Degradación forestal	CFPDM	464053	8708069
213	Degradación forestal	CFPDM	463180	8708625
214	Degradación forestal	CFPDM	442067	8709577
215	Degradación forestal	CFPDM	451988	8707037
216	Degradación forestal	CFPDM	452465	8709736
217	Degradación forestal	CFPDM	485009	8704021
218	Degradación forestal	CFPDM	484969	8704180
219	Degradación forestal	CFPDM	479849	8715173
220	Degradación forestal	CFPDM	480484	8714816
221	Degradación forestal	CFPDM	480722	8715570

222	Degradación forestal	CFPDM	479929	8719023
223	Degradación forestal	CFPDM	479373	8719300
224	Degradación forestal	CFPDM	479690	8719896
225	Degradación forestal	CC	453375	8754043
226	Degradación forestal	CC	453608	8754657
227	Degradación forestal	CC	453185	8754890
228	Degradación forestal	CC	452783	8755186
229	Degradación forestal	CC	452423	8755694
230	Degradación forestal	CC	450264	8757493
231	Degradación forestal	CC	450158	8758023
232	Degradación forestal	CC	449819	8758192
233	Degradación forestal	CC	449565	8758298
234	Degradación forestal	CC	452063	8758848
235	Degradación forestal	CE	453465	8733625
236	Degradación forestal	CE	453846	8732445
237	Degradación forestal	CE	453763	8732470
238	Degradación forestal	CE	454297	8732851
239	Degradación forestal	CE	454462	8733086
240	Degradación forestal	CE	454709	8733055
241	Degradación forestal	CE	454748	8733175
242	Degradación forestal	CE	454913	8733029
243	Degradación forestal	CE	452493	8751902
244	Degradación forestal	CE	451477	8752188
245	Degradación forestal	CCNN	423479	8780972
246	Degradación forestal	CCNN	424193	8780549
247	Degradación forestal	CCNN	414351	8781925
248	Degradación forestal	CCNN	413610	8782719
249	Degradación forestal	CCNN	414483	8784624
250	Degradación forestal	CCNN	414404	8785550
251	Degradación forestal	CCNN	415198	8785841
252	Degradación forestal	CCNN	415647	8784677
253	Degradación forestal	CCNN	411864	8784068
254	Degradación forestal	CCNN	411573	8784385
255	Degradación forestal	CCNN	409959	8782851
256	Degradación forestal	CCNN	409588	8784147
257	Deforestación	PPA	484382	8687700
258	Deforestación	PPA	484377	8687709
259	Deforestación	PPA	485420	8688081
260	Deforestación	PPA	485281	8689449
261	Deforestación	PPA	486968	8690487
262	Deforestación	PPA	487325	8691939
263	Deforestación	PPA	480566	8692548
264	Deforestación	PPA	480578	8693464
265	Deforestación	PPA	480205	8694575
266	Deforestación	PPA	479984	8695697

267	Deforestación	PPA	479821	8696094
268	Deforestación	PPA	479811	8696667
269	Deforestación	PPA	479745	8698077
270	Deforestación	PPA	479745	8698077
271	Deforestación	PPA	479596	8698420
272	Deforestación	PPA	479588	8699528
273	Deforestación	PPA	480631	8701453
274	Deforestación	PPA	474336	8710823
275	Deforestación	PPA	473061	8713550
276	Deforestación	PPA	472161	8715660
277	Deforestación	PPA	470837	8717640
278	Deforestación	PPA	469634	8718811
279	Deforestación	PPA	466094	8731151
280	Deforestación	PPA	466623	8732183
281	Deforestación	PPA	464536	8734233
282	Deforestación	PPA	463082	8738487
283	Deforestación	PPA	446779	8744116
284	Deforestación	PPA	449134	8748376
285	Deforestación	PPA	437360	8764251
286	Deforestación	PPA	439291	8766156
287	Deforestación	PPA	431101	8784535
288	Deforestación	PPA	433303	8787113
289	Deforestación	CFM	431328	8773152
290	Deforestación	CFM	424364	8775480
291	Deforestación	CFM	424237	8775290
292	Deforestación	CFM	423369	8775459
293	Deforestación	CFM	422967	8775480
294	Deforestación	CFM	422671	8775713
295	Deforestación	CFM	404476	8753317
296	Deforestación	CFM	404751	8755265
297	Deforestación	CFM	408540	8756260
298	Deforestación	CFM	408794	8756958
299	Deforestación	CFM	421202	8715056
300	Deforestación	CFM	421122	8714183
301	Deforestación	CFM	419892	8713151
302	Deforestación	CFM	418305	8714183
303	Deforestación	CFM	422869	8718311
304	Deforestación	CFM	423305	8721764
305	Deforestación	CFM	423980	8721843
306	Deforestación	CFM	425448	8722875
307	Deforestación	CFM	426917	8723034
308	Deforestación	CFM	427909	8722676
309	Deforestación	CFM	424051	8740001
310	Deforestación	CFM	405068	8744533
311	Deforestación	CFM	387255	8749957

312	Deforestación	CFM	390317	8744102
313	Deforestación	CFM	396270	8734445
314	Deforestación	CFM	449551	8720968
315	Deforestación	CFM	449021	8721629
316	Deforestación	CFM	447566	8725664
317	Deforestación	CFM	445582	8726921
318	Deforestación	CFM	444259	8728839
319	Deforestación	CFM	440356	8727450
320	Deforestación	CFM	436520	8726127
321	Deforestación	CFPDM	455742	8706525
322	Deforestación	CFPDM	455980	8707080
323	Deforestación	CFPDM	456059	8707398
324	Deforestación	CFPDM	456059	8708470
325	Deforestación	CFPDM	457934	8707326
326	Deforestación	CFPDM	458758	8707438
327	Deforestación	CFPDM	461997	8706374
328	Deforestación	CFPDM	459076	8696484
329	Deforestación	CFPDM	458441	8695531
330	Deforestación	CFPDM	466775	8702000
331	Deforestación	CFPDM	464596	8708360
332	Deforestación	CFPDM	464612	8708278
333	Deforestación	CFPDM	465422	8710709
334	Deforestación	CFPDM	465703	8711039
335	Deforestación	CFPDM	465952	8711519
336	Deforestación	CFPDM	435098	8757248
337	Deforestación	CFPDM	434734	8757149
338	Deforestación	CFPDM	433659	8757876
339	Deforestación	CFPDM	433940	8758257
340	Deforestación	CFPDM	434039	8758703
341	Deforestación	CFPDM	434172	8759795
342	Deforestación	CFPDM	434453	8759910
343	Deforestación	CFPDM	436437	8758753
344	Deforestación	CFPDM	448257	8730054
345	Deforestación	CFPDM	446405	8730186
346	Deforestación	CFPDM	438203	8736040
347	Deforestación	CFPDM	442900	8730285
348	Deforestación	CFPDM	439725	8731542
349	Deforestación	CFPDM	438038	8733063
350	Deforestación	CFPDM	438633	8734618
351	Deforestación	CFPDM	463118	8727497
352	Deforestación	CFPDM	461937	8729651
353	Deforestación	CC	447832	8769482
354	Deforestación	CC	447809	8769490
355	Deforestación	CC	447777	8769490
356	Deforestación	CC	447753	8769895

357	Deforestación	CC	444959	8769824
358	Deforestación	CC	445438	8769935
359	Deforestación	CC	447761	8769562
360	Deforestación	CC	444713	8769736
361	Deforestación	CC	444340	8769601
362	Deforestación	CC	445769	8769657
363	Deforestación	CE	454336	8733062
364	Deforestación	CE	454236	8733009
365	Deforestación	CE	454104	8732866
366	Deforestación	CE	454003	8732776
367	Deforestación	CE	453844	8732676
368	Deforestación	CE	453770	8732776
369	Deforestación	CE	453675	8732718
370	Deforestación	CE	453543	8732808
371	Deforestación	CE	453490	8732871
372	Deforestación	CE	453442	8732988
373	Deforestación	CCNN	422301	8786146
374	Deforestación	CCNN	422063	8786199
375	Deforestación	CCNN	420951	8786093
376	Deforestación	CCNN	420793	8785564
377	Deforestación	CCNN	421216	8785220
378	Deforestación	CCNN	421295	8784770
379	Deforestación	CCNN	421613	8784506
380	Deforestación	CCNN	412352	8783474
381	Deforestación	CCNN	412194	8784267
382	Deforestación	CCNN	417149	8790103
383	Deforestación	CCNN	417432	8789453
384	Deforestación	CCNN	415289	8789268

Anexo 3. Panel fotográfico.



Foto 1. Degradación forestal y deforestación en CFM.



Foto 2. Quema en PPA.



Foto 3. Deforestación en PPA.



Foto 4. Áreas en recuperación en PPA.



Foto 5. Extracción de madera en CFPDM.

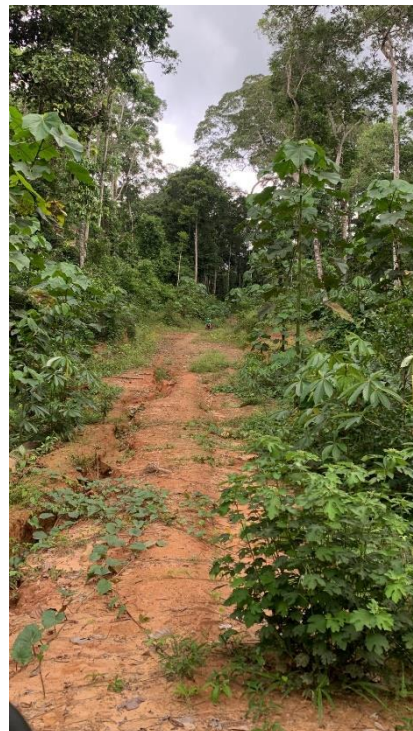


Foto 6. Caminos en CFPDM.



Foto 6. Degradación en CFM.



Foto 6. Degradación forestal y deforestación en CCNN.



Foto 7. Degradación forestal y deforestación en CFM.

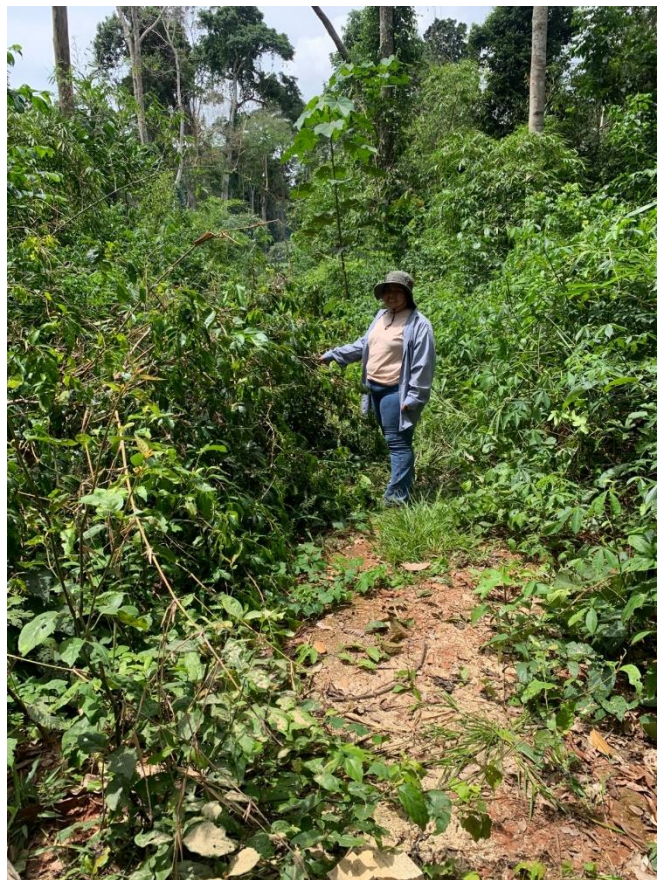


Foto 8. Degradación forestal en CFPDM.