

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN POR MINERÍA
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT EN LA ZONA
DE BOCA PARIAMANU - TAMBOPATA - MADRE DE DIOS, 2018 - 2023**

PRESENTADA POR:

ERIKA DORIS ARI MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO – PERÚ

2025



Repositorio Institucional ALCIRA by [Universidad Privada San Carlos](http://www.upsc.edu.pe) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



6.76%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 20 AUG 2025, 8:48 PM

Similarity report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

IDENTICAL 1.41%
CHANGED TEXT 5.34%

Report #28105179

ERIKA DORIS ARI MAMANI // ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN POR MINERÍA MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT EN LA ZONA DE BOCA PARIAMANU - TAMBOPATA - MADRE DE DIOS, 2018 - 2023 RESUMEN

La deforestación es uno de los principales indicadores de alteración ecosistémica en zonas de intervención antrópica, especialmente en áreas sensibles como Boca Pariamanu. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la pérdida de cobertura vegetal y los impactos colaterales asociados a la actividad minera en dicha zona, durante el periodo 2018–2023. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 y 9, corregidas a reflectancia superficial y procesadas mediante los softwares ArcGIS (v10.5), ENVI (v5.3), Python(v3.11) y Excel. El análisis integró el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la clasificación no supervisada con el algoritmo ISODATA y técnicas de evaluación espacial multitemporal. Los resultados revelaron una pérdida acumulada de 411 ha de cobertura vegetal, con una tasa compuesta de deforestación anual de -0.0208% . Si bien hubo incrementos puntuales en los primeros años, estos fueron superados por reducciones significativas en 2021 y 2023, consolidando una tendencia regresiva. Asimismo, se identificó una pérdida neta de 19.15 ha directamente asociadas a zonas de actividad minera, con una pérdida promedio anual de 3.83 ha. Este comportamiento no lineal evidencia la expansión intermitente de la minería informal. El análisis del NDVI mostró

Yudy Roxana ALANIA LAQUI

Oficina de Repositorio Institucional

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN POR MINERÍA
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT EN LA ZONA
DE BOCA PARIAMANU - TAMBOPATA - MADRE DE DIOS, 2018 - 2023

PRESENTADA POR:

ERIKA DORIS ARI MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

:


Dr. ESTEBAN ISIDRO LEON APAZA

PRIMER MIEMBRO

:


Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

SEGUNDO MIEMBRO

:


Mg. KATIA ELIZABETH ANDRADE LINAREZ

ASESOR DE TESIS

:


Mg. ELVIRA ANANI DURAND GOYZUETA

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub Área: Ingeniería Ambiental

Líneas de Investigación: Sensores Remotos.

Puno, 26 de agosto del 2025.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y ejemplo me han enseñado a luchar por mis sueños, a mantenerme firme ante las dificultades y a seguir siempre con humildad y perseverancia.

A mis hermanas y a mi hermano, por ser mi inspiración constante, por compartir conmigo alegrías, retos y aprendizajes, y por enseñarme el valor de la unión y el amor en cada paso del camino.

A mis asesores y jurados, por brindarme su guía, conocimientos y valioso tiempo durante todo este proceso. Gracias por sus observaciones y enseñanzas, que han contribuido significativamente a la elaboración de este trabajo.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Erika Doris Ari Mamani

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la fuerza, la salud y la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida profesional.

A la Universidad Privada San Carlos, por brindarme una formación académica de calidad que me permitirá contribuir al desarrollo de mi región, y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por ser el espacio donde se forjaron mis conocimientos y habilidades.

Agradezco a los docentes que, con su vocación y entrega, han inspirado a sus estudiantes a amar su profesión y querer hacer del mundo un lugar mejor. En especial, a la Mg. Elvira Anani Durand Goyzueta, por su apoyo, paciencia y orientación constante durante la elaboración de esta investigación.

A los miembros del jurado calificador, por su valioso tiempo y por contribuir con sus observaciones al enriquecimiento de este trabajo.

Finalmente, a mis padres y hermanos(as), quienes me animaron en cada etapa de este proceso, siendo siempre mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia.

Erika Doris Ari Mamani

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ANEXOS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	17
1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	17
1.2. ANTECEDENTES	18
1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	18
1.2.2. ANTECEDENTE NACIONALES	20
1.2.3. ANTECEDENTES REGIONALES O LOCALES	23
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	25
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	25
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO	27
2.2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	27
2.2.1. BIODIVERSIDAD	27
2.2.2. BOSQUES	28
2.2.3. DEFORESTACIÓN	29
2.2.4. DEFORESTACIÓN EN EL PERÚ	32
2.2.5. MINERÍA	35
2.2.6. TELEDETECCIÓN	39
2.2.7. SENSORES	39
2.2.8. ANÁLISIS MULTITEMPORAL	40
2.2.9. IMAGEN SATELITAL	41
2.2.10. SATÉLITE LANDSAT	43
2.2.11. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	50
2.2.12. MATRIZ DE PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO	50
2.3. MARCO CONCEPTUAL	54
2.4. MARCO LEGAL	55
2.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	57
2.5.1. HIPÓTESIS GENERAL	57
2.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	57

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO	58
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	60
3.2.1. POBLACIÓN	60

3.2.2. MUESTRA	60
3.3. MÉTODOS Y MATERIALES	60
3.3.1. MÉTODOS	61
3.3.2. MATERIALES Y EQUIPOS	61
3.4. METODOLOGÍA POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS	62
3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	74
3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO	74
CAPÍTULO IV	
EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS	
4.1. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS ÁREAS DEFORESTADAS POR ACTIVIDAD MINERA EN LA ZONA DE BOCA PARIAMANU ENTRE 2018 Y 2023.	77
4.2. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA TASA ANUAL DE DEFORESTACIÓN Y SUS EFECTOS COLATERALES POR ACTIVIDAD MINERA EN BOCA PARIAMANU ENTRE LOS AÑOS 2018 Y 2023.	84
4.3. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS	104
4.3.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 1.	104
4.3.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 2.	105
CONCLUSIONES	108
RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	112
ANEXOS	126

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Umbrales de la definición de bosque en el Perú para diferentes propósitos de reporte.	29
Tabla 02: Características de Landsat 8	45
Tabla 03: Tabla de Bandas Espectrales de Landsat 9	47
Tabla 04: Combinación de bandas	48
Tabla 05: Escala de intensidad de importancia	50
Tabla 06: Índice al azar SAATY	53
Tabla 07: Coordenadas de la Zona de Boca Pariamanu - Microcuenca del Pariamanu	59
Tabla 08: Parámetros de selección de imágenes Landsat 8 y 9	64
Tabla 09: Escala de comparación por pares según Saaty (1980)	70
Tabla 10: Valores del Índice Aleatorio (RI) según el número de criterios	71
Tabla 11: Fuentes de información utilizadas para el análisis espacial	73
Tabla 12: Operacionalidad de Variables	74
Tabla 13: Cambios multitemporales en la cobertura vegetal en la zona de boca Pariamanu 2018 - 2023	78
Tabla 14: Estadística descriptiva del NDVI - Cobertura Vegetal (2018 a 2023)	80
Tabla 15: Pruebas de normalidad para la variable NDVI - Cobertura Vegetal	83
Tabla 16: Cambios anuales en la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu (2018–2023)	86
Tabla 17: Tasa anual de deforestación en la zona de Boca Pariamanu (2018–2023)	88
Tabla 18: Distribución de Coberturas con Evidencia de Alteración Antrópica (2018–2023)	96
Tabla 19: Cambios anuales en superficie minera en Boca Pariamanu (2018–2023)	97
Tabla 20: Matriz de comparación por pares entre criterios (según escala de Saaty)	101
Tabla 21: Indicadores de consistencia del modelo AHP- en la Zona de Boca Pariamanu	102

Tabla 22: Correlaciones de las variables independientes y dependientes

107

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Hectáreas de Bosques deforestados desde el año 2001 al año 2023.	32
Figura 02: Principales causas de la pérdida de bosques en la Amazonía	33
Figura 03: Pérdida de cobertura arbórea en Madre de Dios, Perú - 2023	34
Figura 04: Mapa Base de deforestación por minería en la Zona Pariamanu	35
Figura 05: Producción minera en el Perú en el año 2023	36
Figura 06: Ubicación geográfica del área de estudio, zona de Boca Pariamanu - Tambopata - Madre de Dios.	59
Figura 07: Fotografía aérea de Landsat 8 y Landsat 9	64
Figura 08: Distribución espacial de muestras de validación en la clasificación no supervisada de cobertura vegetal en Boca Pariamanu - Madre de Dios.	65
Figura 09: Estructura jerárquica del modelo AHP aplicado al análisis de efectos colaterales de la deforestación minera	69
Figura 10: Cambios multitemporales en la Cobertura vegetal de la zona de Boca Pariamanu durante 2018 - 2023.	79
Figura 11: Cambios temporales de la cobertura vegetal de la Zona de Boca Pariamanu	81
Figura 12: Cambios temporales de la cobertura vegetal de la zona de Boca Pariamanu - parte baja	82
Figura 13: Regresión lineal de la cobertura vegetal , con respecto al tiempo.	83
Figura 14: Gráfico de Normalidad para la variable de Cobertura Vegetal - Zona Boca Pariamanu	84
Figura 15: Evolución de la cobertura vegetal (2018 - 2023)	87
Figura 16: Gráfico de tasa de cambio en los periodos del 2018 - 2023	88
Figura 17: Gráfico de Deforestación Neta y bruta entre los periodos 2018 - 2023	90

Figura 18: Tasa de deforestación acumulada (CAGR) en Boca Pariamanu entre 2018 y 2023	91
Figura 19: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2018. Presencia de actividad minera	93
Figura 20: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2019.	93
Figura 21: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2020.	94
Figura 22 : Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2021.	94
Figura 23: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2022.	95
Figura 24: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2023.	95
Figura 25: Comparación espacial del corredor minero en la zona de Boca Pariamanu: años 2018 - 2023	98
Figura 26: Distribución porcentual del uso del suelo en Boca Pariamanu (2018 y 2023)	99
Figura 27: Cálculo del peso relativo (W_i)	102
Figura 28: Métricas de consistencia individual (λ_i) de los criterios evaluados en el modelo AHP	103

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia	127
Anexo 02: Obtención de imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9 desde la plataforma USGS	128
Anexo 03: Análisis de Datos ENVI 5.3	129
Anexo 04: Análisis de Datos en ArcGis	130
Anexo 05: Análisis de Datos Python y Excel	131
Anexo 06: Pruebas Estadísticas de la variable	133
Anexo 07: Método de decisión multicriterio de Jerarquías - SAATY	134
Anexo 08: Panel Fotográfico	135
Anexo 09: Ficha de Observación usada por el Tesista.	137

RESUMEN

La deforestación es uno de los principales indicadores de alteración ecosistémica en zonas de intervención antrópica, especialmente en áreas sensibles como Boca Pariamanu. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la pérdida de cobertura vegetal y los impactos colaterales asociados a la actividad minera en dicha zona, durante el periodo 2018–2023. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 y 9, corregidas a reflectancia superficial y procesadas mediante los softwares ArcGIS (v10.5), ENVI (v5.3), Python(v3.11) y Excel. El análisis integró el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la clasificación no supervisada con el algoritmo ISODATA y técnicas de evaluación espacial multitemporal. Los resultados revelaron una pérdida acumulada de 411 ha de cobertura vegetal, con una tasa compuesta de deforestación anual de -0.0208% . Si bien hubo incrementos puntuales en los primeros años, estos fueron superados por reducciones significativas en 2021 y 2023, consolidando una tendencia regresiva. Asimismo, se identificó una pérdida neta de 19.15 ha directamente asociadas a zonas de actividad minera, con una pérdida promedio anual de 3.83 ha. Este comportamiento no lineal evidencia la expansión intermitente de la minería informal. El análisis del NDVI mostró una distribución normal de los datos ($p = 0.2514$), lo cual permitió aplicar medidas estadísticas confiables e identificar patrones de reducción de cobertura en zonas cercanas a frentes mineros activos. Mediante el modelo AHP, se jerarquizaron los efectos ecológicos colaterales más relevantes: pérdida de hábitat (40.2%), afectación a cuerpos de agua (24.5%) y fragmentación del ecosistema (13.7%), con un índice de consistencia adecuado ($CR = 0.008$). Se concluye que la actividad minera en Boca Pariamanu guarda una relación significativa con la deforestación y ocasiona impactos ambientales que comprometen la sostenibilidad ecológica del área.

Palabras claves: Análisis multitemporal, Cobertura vegetal, Deforestación, Minería, SIG.

ABSTRACT

Deforestation is one of the main indicators of ecosystem disturbance in areas affected by anthropogenic intervention, especially in sensitive regions such as Boca Paríamanu. This research aimed to evaluate the loss of vegetation cover and the collateral impacts associated with mining activity in this area between 2018 and 2023. For this purpose, Landsat 8 and 9 satellite images (Collection 2, Level 2) were used, corrected to surface reflectance and processed using ArcGIS (v10.5), ENVI (v5.3), Python (v3.11), and Excel. The analysis included the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), unsupervised classification using the ISODATA algorithm, and multitemporal spatial evaluation techniques. The results revealed a cumulative loss of 411 ha of vegetation cover, with a compound annual deforestation rate of -0.0208% . Although slight increases were recorded in the early years, these were outweighed by significant reductions in 2021 and 2023, consolidating a regressive trend. Additionally, a net loss of 19.15 ha directly associated with mining activity zones was identified, with an average annual loss of 3.83 ha. This non-linear pattern reflects the intermittent expansion of informal mining. NDVI analysis showed a normal data distribution ($p = 0.2514$), which allowed the use of reliable statistical measures and the identification of vegetation reduction patterns near active mining fronts. Through the Analytic Hierarchy Process (AHP) model, the most relevant ecological collateral effects were prioritized: habitat loss (40.2%), impact on water bodies (24.5%), and ecosystem fragmentation (13.7%), with an acceptable consistency ratio ($CR = 0.008$). It is concluded that mining activity in Boca Paríamanu is significantly related to deforestation and generates environmental impacts that compromise the ecological sustainability of the area.

Keywords: Deforestation, mining, multitemporal analysis, remote sensing (GIS), vegetation cover.

INTRODUCCIÓN

La deforestación en los bosques y selvas ha alcanzado cifras alarmantes en la última década, incrementándose en un 15% más de lo previsto para el 2022 (NatGeoES, 2022); Las actividades a gran escala realizadas por empresas madereras, agrícolas, ganaderas y mineras han agravado el problema, destruyendo millones de hectáreas de cobertura vegetal sin considerar las consecuencias para el ecosistema y la sostenibilidad de estos recursos. Los exhaustivos estudios realizados en las últimas décadas han encendido las alarmas ambientales, mostrando cifras preocupantes sobre la pérdida de cobertura vegetal. Hasta el año 2022, a pesar de múltiples compromisos para su restauración, las pérdidas siguen incrementado con el paso del tiempo, alcanzando un 21% por debajo de lo previsto para el 2030 (FDA, 2024).

La lucha por frenar la deforestación se ha convertido en un pilar fundamental contra el cambio climático, dado que la cobertura vegetal desempeña un papel crucial en la mitigación de los efectos del calentamiento global, el efecto invernadero y el almacenamiento de carbono neto (REPSOL, 2022). El acuerdo de los líderes globales hace hincapié en la implementación de medidas en la lucha en contra de la deforestación, que fue tomada por primera vez en la vigesimosexta Conferencia de las Partes (COP 26) que tuvo lugar en Glasgow (2021), 141 países que representan el 90% de la superficie forestal mundial, acordaron la implementación de medidas para la reducción de la deforestación y la promoción para la reforestación hacia el 2030 (COP, 2021).

El escenario problemático de la deforestación en el Perú no hace más que mantenerse en números rojos, el país se mantenido en el top 10 de los países en latinoamericanos con mayores índices de deforestación y en el último año se ha posicionado en el quinto lugar (Stakeholders, 2024), como uno de los países con bosques y selvas tropicales que mayor impacto está causando en el cambio climático; teniendo una pérdida de alrededor de 162 mil ha de bosques en el 2022 (GFW, 2022). El departamento de Madre de Dios se encuentra

dentro de la zona baja de la amazonia Peruana jugando un papel importante dentro del ecosistema sostenible dentro del Perú (Nalvarte y Mamani, 2021). Es reconocida mundialmente por sus áreas megadiversas y protegida por la Legislación como la "Capital de la Biodiversidad del Perú" (Ley N°. 26311) (Saucedo, 2023).

Sin embargo, la zona del Pariamanu, específicamente en Zona Boca Pariamanu, enfrenta una serie de desafíos ambientales debido al crecimiento de la minería ilegal (Sierra, 2020).

La implementación de nuevas tecnologías de delimitación y cuantificación para el monitoreo de la cobertura vegetal (Gamarra, 2023), el uso de imágenes satelitales es clave para la conservación de la biodiversidad ya que permiten la evaluación de la degradación y uso del suelo, cuerpos de agua y demás factores que ayuden a una toma de decisiones sostenibles e informativas (Grinand et al., 2013), la realización del estudio en base a un análisis multitemporal 2018 a 2023, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9 obtenidas del portal USGS Earth Explorer. Estas fueron procesadas en los softwares ArcGIS 10.5 y ENVI 5.3, previa clasificación y cuantificación, lo que permitió detectar cambios en la cobertura vegetal de la zona de Boca Pariamanu – Madre de Dios, asociados a la deforestación generada por la actividad minera.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la última década el planeta ha sufrido diversos cambios en sus diversos ecosistemas, la reducción de la cobertura forestal ha provocado el aumento del efecto invernadero que está en el punto más alto sobre el calentamiento global (Hernández, 2023). El área total de la superficie terrestre a nivel mundial es de 4060 millones de Ha, que equivale al 31% de bosques (FAO, 2022), teniendo como dominio los bosques tropicales con una mayor proporción en el mundo (45%), boreal (27%), templado (16%) y subtropical (11%). (Forest Stewardship, 2022). Sin embargo estas cifras no pueden estar más lejos de mantenerse en números verdes, durante el año 2023 la pérdida de bosque primarios ascendió a 3,7 millones de hectáreas (ha) una cifra preocupante teniendo un 27% de aumento más que el año 2022. (Weisse, Goldman, y Carter, 2024), toda esta pérdida de bosque produjo 2,4 Gt de emisiones de dióxido de carbono en el año 2023, estas emisiones de carbono alcanzaron un nivel equivalente a aproximadamente el 50% de los contaminantes producidos anualmente por el uso de combustibles fósiles en Estados Unidos.

El Perú posee al menos 78 305 540 ha de bosque húmedo amazónico y 3 378 284 ha de bosque de la costa (PNCBMCC, 2024), en 2023 el país perdió 227 kg/ha de bosque natural, que sería equivalente a 149 Mt de emisiones de CO₂ (GFW, 2023). De entre los 15

departamentos donde se distribuyen los bosques húmedos amazónicos son cinco departamentos los que presentan una mayor pérdida de cobertura vegetal durante el 2021, Ucayali (36 306 ha), Madre de Dios (30 846 ha), Loreto (19 829 ha), Huánuco (15 021 ha) y Junín (12 082 ha) (GEObosque, 2021). Ubicando al País en el quinto lugar con mayor degradación boscosa en el caribe y América Latina.

En el año 2020, se reportó la mayor pérdida de superficie en los bosques primarios de la Amazonia Peruana, llegando a superar las 190.000 ha (Sierra, 2021). El 76% de la deforestación y extinción de las áreas boscosas se debe al corredor minero, artesanal y a pequeña escala acabando con 114 682 ha, 24% por minería ilegal y 16 408 ha a causa de incendios forestales (CooperAcción, 2024).

El Departamento de Madre de Dios es uno de los principales focos en el Perú de la crisis de la deforestación, que ha generado un cambio drástico dentro de su ecosistema debido a la expansión descontrolada de la agricultura, la tala indiscriminada, la construcción de infraestructuras y la gran demanda y crecimiento de la actividad minera ilegal acuífera, minería aurífera y pequeña minería; registrando 30, 846 ha pérdidas registradas hasta la actualidad que se está expandiendo dentro de las regiones donde se encuentran las Áreas Protegidas, las Comunidades indígenas y los cuerpos de agua representan un 26% del área fuera del corredor minero (MAAP, 2024).

En la provincia de Tambopata, la actividad minera se lleva a cabo conforme a la ley N° 27651, que regula la formalización y promoción de la minería artesanal y pequeña minera, aprobada mediante decreto supremo N° 013-2002-EM (DAR, 2020), la actividad minería aluvial de extracción de oro se realiza de manera informal como formal, la demanda de esta práctica significa que millones de hectáreas son removidas indiscriminadamente para su búsqueda, lo que causa daños irreversibles para el entorno medio ambiental y que afecta el bienestar de las personas (Calderón, 2022, p. 12). Esta práctica se ha expandido por diversas áreas de Madre de Dios, llegando a la provincia de Tambopata específicamente en

la zona de Boca Paríamanu donde la deforestación, hostigamiento, daños a la salud y perjuicios a las tierras del Paríamanu en donde habitan los indígenas Amahuacas, esto a hecho que se denomine a esta zona como “La Nueva Pampa”, afectando a las zonas adyacentes del Río Paríamanu con un incremento del 70% en el transcurso del último año (Vera, 2020).

En este contexto, el monitoreo adecuado de la deforestación es esencial para formular políticas efectivas de conservación. Sin embargo, la vastedad de estas áreas y su difícil acceso requieren el uso de tecnologías avanzadas para evaluar el estado de los bosques de manera precisa y oportuna. Esta investigación busca cuantificar las áreas de pérdida forestal por la actividad minera, a través de un análisis multitemporal utilizando imágenes satelitales de diferentes periodos de tiempo, permitiendo analizar los cambios en la cobertura forestal con las imágenes de Landsat 8 y Landsat 9. Además, se utilizarán los programas ArcGIS 10.5 y ENVI para posteriormente procesar la información relacionada con los cambios en la superficie forestal y la utilización del suelo. Esta cuantificación será útil para analizar la deforestación provocada por la actividad minera en la zona de Boca Paríamanu, Madre de Dios en los periodos de 2018-2023, con la finalidad de observar estos cambios para así analizar áreas afectadas por la regresión de los años.

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo ha evolucionado la deforestación causada por la actividad minera en la región de Madre de Dios, específicamente en zona de Boca Paríamanu, durante los años 2018 - 2023, y cuáles son sus principales impactos en el ecosistema?

1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cómo el análisis multitemporal con imágenes satelitales Landsat permite cuantificar con precisión la evolución de la deforestación causada por la actividad minera en la zona de Boca Paríamanu y detectar patrones de cambio en la cobertura forestal?
- ¿Cuál ha sido la tasa de deforestación en la Zona de Boca Paríamanu, Tambopata -

Madre de Dios, como resultado de la minería y tala ilegal durante los años 2018 - 2023?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Yang et al. (2018), investigó sobre cómo las alteraciones generadas por la minería a gran escala impactan a las poblaciones humanas y el estado del medio ambiente en áreas mineras. El enfoque utilizado es el seguimiento de estas alteraciones ambientales frente a la minería y su caracterización, permitiendo su identificación mediante imágenes Landsat. Se analizan los índices de vegetación de diferencia normal (NDVI) con muestras de características espectrales multitemporales antes y durante las alteraciones, la trayectoria y la recuperación de la cobertura vegetal, utilizando 26 imágenes Landsat desde 1984 hasta 2015 para zonas mineras del condado de Martin, Kentucky, Logan. Los hallazgos presentados se establecieron mediante la interpretación directa, identificando las alteraciones mineras con un 97% positivas, y con una precisión del 90% en la ruta de recuperación para la recuperación de la cubierta vegetal (análisis de partición CV-Max).

Hurtado y Lizarazo (2019), evaluaron la utilidad de series temporales de índices de vegetación con fluctuaciones semestrales para detectar zonas afectadas por deforestación en Colombia. Aplicaron un diseño de detección en tres etapas, utilizando imágenes Landsat y mosaicos semestrales de mediana obtenidos de series temporales reflectantes. El análisis se basó en NDVI y SAVI para examinar variaciones de la vegetación entre 2000 y 2017. Los resultados se clasificaron en deforestación (89 %), degradación (6 %), plantación forestal (0.4 %) y regeneración (4.6 %). El uso de SAVI permitió corregir la influencia de la reflectancia del suelo y aprovechar bandas NIR para identificar cambios relevantes. Finalmente, el algoritmo Land Trend fue empleado para confirmar las detecciones en todas las categorías que mostraron alteraciones en la cobertura forestal.

Kayet et al. (2021), realizaron un estudio en la región forestal de Saranda, India, con el fin de evaluar la susceptibilidad a la deforestación provocada por minería y otras presiones

humanas. Implementaron una metodología comparativa que integró tres modelos de análisis espacial: Análisis Jerárquico de Proceso (AHP), Regresión Logística (LR) y Frecuencia de Razón (FR), aplicados en un entorno SIG. Se analizaron 25 variables, incluyendo factores topográficos, climáticos, ecológicos y antrópicos, como distancia a minas, NDVI, pendiente, litología y proximidad a asentamientos. El AHP obtuvo el mejor desempeño predictivo con un AUC de 0.72. Entre 1987 y 2020 se registró la degradación de más de 4,190 ha de bosque, concentrada principalmente en zonas cercanas a operaciones mineras ilegales. Este enfoque es comparable al del presente estudio, al mostrar que el AHP permite jerarquizar factores ambientales en áreas impactadas por minería, y resulta útil para el análisis multitemporal y espacial de la deforestación inducida por actividades extractivas.

Decuyper et al. (2022), la investigación tiene como objetivo la detección de perturbaciones a diferentes escalas espaciales, identificando cambios abruptos y graduales con fines de reforestación y restauración forestal. Utilizaron el algoritmo AVOCADO, basado en estimaciones Kernel para generar fenología de referencia y ajustar curvas, lo que permitió detectar variaciones con alta probabilidad. El método se aplicó en selvas tropicales, bosques miombo y bosques secos usando imágenes Landsat. Alcanzó un 90 % de precisión, con menor rendimiento en bosques secos por la similitud con cultivos detectada mediante NDMI. En bosques húmedos, las clases de bosque intacto y rebrote presentaron baja precisión debido a su reducida extensión tras la pérdida masiva ocurrida en los años noventa. Los resultados incluyeron mapas espacio-temporales de bosque intacto, secundario y no bosque, útiles para estimar almacenamiento de carbono y apoyar estrategias de restauración.

Sánchez (2022), la tesis presenta el objetivo sobre el análisis del uso del suelo y la deforestación usando imágenes de satélite OLI Landsat 5 y Landsat 8 para los siguientes períodos: 1989 - 2001 y 2001 - 2020 dentro de las provincias de Loja y Zamora Chinchipe. Se aplicó la metodología de interpretación de imágenes de satélite, analizando el cambio en

el suelo y estimación de la tasa de deforestación usando la fórmula por (Puyravaud, 2003), donde se aplicó el área del bosque inicial y el cierre; durante el periodo 1989–2001 fue de -0.08% mientras que para el período 200 –2020 fue de - 0.15%, mostrando un incremento por la invasión minera y extracción de madera. Los resultados mostraron la evolución del uso de suelo en PNP pese a ser una zona intangible (1982), mostrando así también el apilamiento de lineamientos de manejo de orden forestal para que los involucrados también sumen a la conservación del parque y cobertura vegetal.

Eckert et al. (2024), buscaron determinar las captaciones directas e indirectas de las actividades mineras que son causantes de la deforestación y degradación en Madagascar con el fin de mejorar las estrategias de compensación de biodiversidad. Utilizaron el algoritmo CODED (Continuous Degradation Detection), desarrollado por Bullock (Bullock, 2019) e implementado en Google Earth Engine, para analizar series temporales de imágenes Landsat entre 2006 y 2020. Los resultados mostraron que en áreas bajo compensación, la deforestación fue baja (18 ha, 0.4 % y 164 ha, 2.4 %), evidenciando cierta efectividad en la conservación. En contraste, la degradación forestal en estas zonas alcanzó 545 ha (11.4 %) y 662 ha (9.7 %). En áreas no protegidas, la deforestación fue de 451 ha (6.7 %) y 553 ha (4.9 %), mientras que la degradación alcanzó 2,360 ha (34.8 %) y 5,794 ha (51.1 %). El análisis multitemporal mostró que la minería genera impactos importantes en las zonas de compensación, requiriendo mayores medidas de prevención.

1.2.2. ANTECEDENTE NACIONALES

Caballero et al. (2018), se enfoca en la cuantificación de la deforestación causada por la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) en el sur de la Amazonía peruana entre 1984 y 2017. La metodología usada fue el uso de dos herramientas de detección basadas en landsat; CLASlite y el conjunto de datos de Global Forest Change, el enfoque principal de la metodología fue fusionar estos dos sistemas para la obtención de las imágenes más claras y precisas de la deforestación causada por la MAPE, permitiendo captar así la

pérdida de cobertura vegetal. Los resultados mostraron que casi 100 000 ha tuvo un aumento del 21% en comparación de las anteriores; encontrado deforestación en el año 2017 (10%) y el periodo donde se encontró mayor deforestación fue en el año 2011 con un 53% de pérdida; se ha demostrado que no toda actividad minera es igual a examinar patrones y técnicas de la ASM en su análisis temporal - espacial.

Chumpe (2022), llevó a cabo el estudio para su análisis sobre la actividad minera en los cambios de vegetación del Distrito de Espinar, Cusco, usando el estudio de pérdida de vegetación y crecimiento acelerado de la superficie minera. La metodología usada fue un modelo experimental de tipo descriptivo - correlacional, mediante el uso de imágenes Landsat, índice NDVI y una supervisión clasificada para la cuantificación y correlación en la disminución de la cobertura vegetal con el aumento de la superficie destinada a la minería, en particular la mina Antapaccay. Los resultados mostraron una pérdida de cobertura del 345.2 ha/año y la producción aumentó en 50.6 ha/año teniendo un 60.50% en los cambios de la cubierta vegetal y que se relacionan con la gran pérdida de cobertura vegetal y la demanda en la expansión minera genera pérdidas masiva de vegetación.

Janampa y Ponce (2022), realizó un estudio donde determinó e identificó que la construcción de infraestructuras como una de las causas más significativas de la pérdida de cobertura forestal dentro del distrito de Pangoa, identificando la construcción de infraestructuras como una de las causas principales. Utilizaron un enfoque descriptivo y no experimental, con imágenes satelitales del USGS Earth Explorer (2000–2020), procesadas y clasificadas en ENVI 5.3, y mapeadas en ArcGIS. Los resultados mostraron incrementos de deforestación de 280.61 ha (2000–2004), 475.96 ha (2004–2007), 1,184.69 ha (2007–2011), 982.42 ha (2011–2016) y 316.34 ha (2016–2020), acumulando un total de 3,240.03 ha en dos décadas. La principal causa fue la expansión de infraestructuras y agricultura. Se recomienda el uso de software especializado para optimizar la clasificación y corrección de imágenes satelitales en estudios similares.

Espinoza (2022), determinó el impacto de la influencia en el desarrollo y la expansión de la actividad minera sobre el cambio en la superficie forestal en Chumbivilcas, Cusco dentro de los años 2010-2021. El enfoque empleado se basa en la utilización de imágenes de satélite. Landsat 7 y 8, aplicando NDVI (índice de vegetación) para posteriormente realizar un análisis y combinar los análisis de las superficies mineras, procesada en Arcgis 10.8 y su análisis estadístico en SPSS v.26. Los resultados mostraron una expansión minera significativas y un deterioro en la cobertura vegetal de chumbivilcas, con una disminución anual de 28.27 ha/año en la cobertura densa y de 52.4 ha/año en la cobertura ligera, habiendo así una alteración en las coberturas vegetales influenciados por la minería.

Gamarra (2023), realizó un estudio donde determinó la evaluación para la deforestación transcurrida entre los años 2016-2022 del distrito de Castillo Grande, perteneciente a la provincia de Leoncio Prado, de la región de Huánuco, Perú. Mediante el uso de imágenes Sentinel 2 y el uso de tres algoritmos supervisados: Support Vector Machines (SVM), Decision Trees (DT) y Random Forest (RF), mostrando que el Random Forest (RF), presentando mejores resultados con los índices en Kappa que fueron de 0,85 y 0,90 para los años 2016 y 2022; estimando la pérdida de superficie boscosa en el año 2016 con un 3 284 59 ha, y para el año 2022 esta cifra se elevó a 5 440 23 ha. Teniendo un aumento anual de 368 63 ha así superando el 50% del área estudiada, los resultados mostraron la gran importancia del abordaje del problema en esta región para así poder crear y mejorar las estrategias de conservación de áreas boscosas y tener un mejor manejo de recursos forestales dentro de la región.

Saucedo (2023), el trabajo de investigación tiene como propósito el estudio sobre la deforestación del distrito de Huaral - Cajamarca entre los años 2005-2020 con una proyección al 2050. La metodología que se empleó fueron imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 5, clasificando la cobertura con el uso del algoritmo Random supervisado, mientras que la proyección hacia el año 2050, se aplicó el componente Molusce de QGIS 3.12.

Mostrando resultados que indicaron que en el periodo del 2005, el área forestal del distrito de Huabal - Cajamarca representaba el 42,46 %, mientras que en 2020 alcanzó un área de 29,56 %. Se estima que para 2050, el área boscosa será de 24,35%, lo que implica una disminución en 442 37 ha/año a causa de la deforestación actual y futura.

1.2.3. ANTECEDENTES REGIONALES O LOCALES

Barba (2019), realizó un estudio donde determinó las zonas afectadas entre los periodos de 1999-2030 en el sector la Pampa, Guacamayo del departamento de Madre de Dios. La metodología empleada incluyó el uso del sensor Landsat 5 TM (para los años 1999 y 2011) y Landsat 8 OLI (para el año 2016), para la predicción de área perdida se usó el módulo del software TerrSet y el módulo Land Change Modeler (LCM). Los resultados se mostraron de tres años (puntos); 1999 con 1 832 30 ha/año; 2011 con 10 530 72 ha/año y 2016 con 17 039 29 ha/año de áreas totales deforestadas, destacando áreas en saturación entre los años 1999-2011 (12 años) con 9 187 51 ha y del 2011- 2016 (5 años) con 9 469 71 ha. La elaboración de modelo predictivo desde el año 2016 hasta el años 2030 con el uso del software TerrSet mostró una alta concordancia (nivel Kappa) con un 96,20% y su cuantificación llegando a 25 091 37 ha de áreas con pérdida forestal, dentro de los 14 años correspondiendo a una pérdida de 12 980 33 ha de cobertura vegetal.

Perea (2020), realizó un estudio donde determinó el análisis y la comprensión de los conflictos socioambientales que fueron generados por las concesiones mineras en Tambopata, enfocándose en los impactos negativos y la defensa de los derechos de uso de la tierra para la sostenibilidad de recursos. La metodología combinó enfoques cualitativos y cuantitativos, recopilando información de estudios previos, informes de INGEMMET, MINEM, DREMH e INEI. Mediante SIG se georreferenció el uso de suelo, y se recolectaron muestras para analizar contaminantes por minería. Se aplicaron matrices de impacto para clasificar y priorizar efectos negativos y proponer medidas de mitigación. Los resultados identificaron 26 concesiones con titularidad y 43 en trámite en la Reserva de Tambopata; y en la Reserva

Comunal Amarakaeri, 1 con titularidad y 15 en trámite. Se evidenció falta de planificación territorial, altos niveles de contaminación por mercurio que afectan agua y biodiversidad, y una pérdida de más de 50 000 ha de bosque en dos décadas debido a la minería.

Nalvarte y Mamani (2021), realizó una investigación de espacio - tiempo (temporal) sobre el uso de suelo por concesiones castañas localizada dentro de la microcuenca del río Manuripe entre los años 2004-2020. La metodología de uso y técnica fueron la utilización de teledetección, con los programas de los sensores Landsat 5 (Thematic Mapper), Landsat 7 (ETM - Enhanced Thematic Mapper), y Landsat 8 (OLI - Operational Land Imagery) ofrecen clasificaciones supervisadas con resolución media y alta (PlanetScope y WorldView). Los resultados indican una pérdida de área de 9,435.12 ha, siendo su tasa anual de 0,046% y la pérdida de 160,11 ha/año, teniendo la agricultura como la mayor responsable reportando 4 681,36 ha en la zona.

Luque (2021), determinó la sistematización de evidencias acerca de la deforestación para identificar la disminución de cobertura vegetal en Madre de dios. La metodología usada fue investigativa - científica, se analizaron datos publicados optando por un estudio no experimental, en recolección de datos y análisis de documentos. Los resultados fueron que la mayor concentración de zonas deforestadas fueron encontradas en Madre de Dios siendo los mayores factores la minería ilegal y el mayor contribuidor a la destrucción del ecosistema.

Huacac (2022), determinó el impacto en la evaluación de pérdida de cobertura vegetal ocasionado por la actividad minera aluvial de extracción de oro dentro de la microcuenca del Pariamanu, en la provincia del Tambopata en el departamento de Madre de Dios entre los años de 201-2020. La metodología usada fue la plataforma de Google Earth Engine, SNAP ESA, ENVI y ArcMap, creando mediciones de precisión para la obtención de muestras con resolución media y alta (PlanetScope y WorldView), cuantificando las fechas de enero 2010 con 354 609,93 ha/año hasta el año 2020 con 353 838,13 ha/año. Los resultados reportaron

un índice de comienzo en 2010 de 1,19 ha/año y para el año 2020 con 99,73 ha/año, con una pérdida de 1 414 07 ha/año en la cobertura siendo la actividad minera extractiva de oro en un 7.05%, creando un tasa anual pérdida de 0.003% (9.85 ha/año) teniendo un crecimiento en la última década de 97,18 ha/año (6,98%) a esto se le suma a los responsables de agricultura e infraestructura con un 93.02%.

Alva et al. (2023), se enfoca en determinar los impactos causados por la deforestación en la biodiversidad en la región de Madre de Dios, de la Amazonia Peruana. La metodología usada fue del tipo cualitativa, con la revisión y análisis de estudios investigativos en existencia, para la obtención de datos estadísticos en los avances respecto a la deforestación en Madre de Dios entre los periodos del 2002 - 2021 tomando en cuenta la conservación de fauna de la zona. Los resultados mostraron un aumento trascendente sobre la pérdida de cobertura vegetal, creando impactos negativos para la fauna; deforestación por minería por niveles exasperantes en el año 2018 con 9 280 ha indicando un 49% de pérdida en Madre de Dios, teniendo una pérdida total de 20 641 ha 2003-2018, encontrado un 57% en las áreas de amortiguamiento de zonas protegidas, en cuanto a las amenazas en fauna los que encabezan esta lista son aves con un 32.40% y en mannigeron con un 35.38% por mayoría en primates.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la deforestación por la actividad minera a través del análisis multitemporal con la aplicación de Landsat 8 y Landsat 9 en la zona de Boca Pariamanu, entre los años 2018 - 2023.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las áreas deforestadas en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023 a través de un enfoque multitemporal, utilizando imágenes satelitales (Landsat-8 y 9, ENVI) para identificar cambios en la cobertura vegetal.

- Evaluar la tasa anual de deforestación en la zona de Boca Paríamanu por actividad minera y analizar sus efectos colaterales, como la pérdida de hábitat, fragmentación del ecosistema y el impacto en cuerpos de agua entre los años 2018 - 2023.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

La pérdida de cobertura vegetal está ocasionando que los niveles de CO₂ salgan disparados en la última década, siendo las actividades socioeconómicas que más cambios drásticos han ocasionado en la cobertura vegetal son la tala, agricultura y ganadería (Tognelli et al., 2019). Sin embargo una de las actividades que mayor impacto negativo ha tenido son aquellas actividades extractivas mineras, si bien esta puede generar un impacto en el desarrollo económico, está también juega un papel crucial en el cambio del ecosistema dañando millones de hectáreas para su extracción, la degradación de suelos y la deforestación en áreas naturales hace que sea imposible frenar y la poca información que se tiene no hacen más que agravar el problema (Eckert et al., 2024)

2.2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.2.1. BIODIVERSIDAD

La biodiversidad es un conjunto de especies en cuanto su organización y clasificación dentro del planeta tierra, la variación intrapoblacional y variación genética hacen de esta estructura una de las más productivas con demasiados beneficios para la supervivencia de los seres vivos. Estos incluyen diversos tipos de ecosistemas terrestres como acuáticos.

La producción de los diferentes ecosistemas está ligada directamente con la actividad biológica del suelo; otros procesos sustentables son la regulación de ciclos hidrológicos, de otra manera los bosques, praderas y cultivos son fijadores importantes de CO₂ (Morales

et al., 2011). Durante el acuerdo sobre el Convenio de diversidad biológica en 1992, se destacó la diversidad de organismos vivos provenientes de diversas fuentes y su integración en un ecosistema complejo, comprendiendo la variedad presente en cada especie y ecosistemas (Nations United, 1992).

2.2.1.1. DIVERSIDAD BIOLÓGICA FORESTAL

La diversidad biológica forestal se refiere a las distintas formas de vida que habitan en los ecosistemas forestales y las funciones ecológicas que desempeñan. No se limita únicamente a los árboles, sino que abarca una amplia variedad de plantas, animales y microorganismos que conforman estos ecosistemas. Este concepto analiza diferentes niveles, incluyendo el ecosistémico, territorial, poblacional, genético y de especies, lo que permite comprender su complejidad y la manera en que los organismos se adaptan a diversas condiciones ambientales (PNUMA y FAO, 2020). Asimismo, la Conferencia de las Partes del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), en el anexo de la Decisión II/9, ha reconocido que la diversidad biológica de los bosques es el resultado de un proceso evolutivo de millones de años. Este proceso ha sido impulsado por los cambios ecológicos a lo largo del tiempo y por los niveles de adaptación de las especies dentro de la diversidad biológica, garantizando así el mantenimiento de los procesos ecológicos (UNEP, 1995).

2.2.2. BOSQUES

Los bosques representan uno de los ecosistemas más relevantes a nivel global, teniendo una cobertura de la tercera parte del planeta y son las encargadas de albergar la mayoría de la biodiversidad terrestre, estas cubren el 31% de la superficie terrestre a nivel mundial, teniendo una cobertura forestal de 4060 millones de hectáreas (ha) siendo el hábitat del 80% de anfibios, 75% de aves y el 68% de mamíferos; pero estas no están distribuidas equitativamente a nivel global, más de la mitad de estos bosques se encuentran en los países de Rusia, Canadá, América Latina y China (FAO y UNEP, 2020).

No existe una definición única a este término, según el Protocolo de Kioto, los parámetros que determinan un bosque, como el área mínima, la cobertura y la altura, pueden variar según el contexto (GOFC, 2016); en el caso de los biomas de costa, sierra y amazonía, se establece que, para la Amazonía, un bosque debe tener un área mínima de 0.50 ha, un ancho de 20 m, una altura mínima de 5 m y una cobertura de copas de al menos el 10% (INF, 2021). Por otro lado, la definición utilizada en el Inventario Nacional Forestal es similar, aunque incorpora adaptaciones tecnológicas para su medición remota. En este caso, se considera un área mínima de 0.09 ha, una altura mínima de 5 m en los árboles, un ancho de 20 m y una cobertura de copas de al menos el 30% (NREF y MINAM, 2015).

Tabla 01: Umbrales de la definición de bosque en el Perú para diferentes propósitos de reporte.

Umbrales de bosque	FAO- FRA	LFFS	INFFS	MDL	NREF 2015 INGEI-BUR	NREF 2021
Superficie mínima (ha)	>0.5		>0.5	>0.5	0.09	>0.5
Cobertura forestal mínima (%)	10	10-25	10-30	30	30	30
Altura arbórea mínima (m)	5		2-5	5	5	5
Ancho mínimo del área total (m)			20			20

Fuente: SERFOR <http://repositorio.serfor.gob.pe/handle/SERFOR/620> (Ley N°29763)

Sin embargo, la superficie forestal continúa disminuyendo a pesar de los esfuerzos por prevenir la deforestación y restaurar las tierras degradadas.

2.2.3. DEFORESTACIÓN

La deforestación es la conversión de la cobertura vegetal o la reducción a largo plazo por debajo del parámetro establecido mínimo del 10% causado por la actividad humana directa

(FAO, 2000), durante los años 2015 al 2020 la estimación de deforestación fue de 10 millones ha/año, teniendo un a perdida de más de 100 millones de hectáreas (ha) afectadas por incendios forestales, plagas, sequías, tala, agricultura, ganadería y fenómenos meteorológicos adversos (FAO, 2022). Como se ha mencionado en el Protocolo de Kyoto (ONU, 2005), el uso sostenible y la disminución de emisiones de CO₂ en conjunto a la pérdida de la cobertura vegetal e incentivar a los países en los compromisos de reducción siguen siendo desafiantes.

En la última década, la deforestación ha causado cambios alarmantes en los ecosistemas, con la pérdida de aproximadamente 420 millones de hectáreas (ha) de cobertura vegetal a nivel mundial (FAO, 2022). Además, es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero debido a la reducción de la vegetación por diversos factores externos (Zvobgo y Tsoka, 2021).

En la Conferencia de las Partes (COP26) realizada en Colombia, los países miembros de la ONU adoptaron el Marco Mundial de Biodiversidad de Glasgow, que propone un esquema de financiamiento para frenar la deforestación en áreas verdes, bosques y selvas. Sin embargo, hasta la fecha, su implementación ha sido completamente ineficaz, lo que resalta la urgencia de destinar recursos adecuados para abordar este problema antes de 2030 (CMNUCC y ONU, 2021). Las imágenes satelitales de la Forest Global Review muestran un alarmante descenso de bosques y áreas verdes en diversas regiones del mundo, con un ritmo acelerado de pérdida especialmente en Europa y en zonas críticas de América, como la Amazonía (Weisse et al., 2024); Perú, Bolivia, Brasil y Colombia están entre los países con mayores índices de deforestación en los últimos años, con un punto crítico en 2023, cuando se registró una pérdida de 3,7 millones de ha (Jong, 2024). El Perú muestra una situación preocupante puesto que en el año 2020 tuvo una pérdida de 203 272 ha, esto marca una situación de emergencia y la urgencia de una implementación de medidas

forestales para su conservación y sostenibilidad de los recursos forestales en el país. (MINAM y PNCBMCC, 2024).

2.2.3.1. CAUSAS DE LA DEFORESTACIÓN

Los factores responsables de la deforestación generan no solo daños a las áreas afectadas sino también a la economía, la ecología y la sociedad en un sentido más amplio (Cruppe, 2021). Entre las principales consecuencias de la deforestación, se pueden identificar las siguientes:

- a) Agricultura: la expansión de cultivos como la soja o la palma requiere la destrucción de extensos territorios forestales.
- b) Ganadería: la necesidad de tierras de pastoreo para el ganado obliga a transformar bosques en pastizales.
- c) Explotación forestal: la tala de los bosques para sus recursos madereros, en particular, violan los territorios.
- d) Urbanismo: la expansión de los núcleos de población y la construcción de infraestructuras requieren la destrucción de terrenos, es decir, bosques.
- e) Minería: la búsqueda y extracción de varios minerales y metales destruye extensas áreas forestales.
- f) Cambio climático: como uno de los efectos secundarios de los actos humanos ha destacado, el cambio climático puede agrandar la deforestación, causándole con la desviación de los ecosistemas y la creación de locales de estrés en los bosques.
- g) Pobreza: la falta de oportunidades de ganar dinero u otra fuente de subsistencia a menudo obliga a las comunidades locales a talar.
- h) Malas políticas: la ausencia de regulaciones y políticas ambientales efectivas permite la continuación de varios actos destructivos.

2.2.4. DEFORESTACIÓN EN EL PERÚ

El Perú es uno de los países con mayor diversidad biológica, albergando numerosas especies forestales de gran valor, sin embargo, esta biodiversidad está en riesgo debido al aumento de la deforestación y la degradación de la cobertura vegetal. En los últimos 20 años, el país ha perdido en promedio 132 000 ha de bosques por año (MINAM y PNCBMCC, 2023). El año 2020 marcó un récord con la pérdida de más de 200 000 ha (2 000 km²) (Figura 1) de cobertura forestal, lo que representó más del 50% de las emisiones de CO₂ en el país durante la pandemia de COVID-19, esta problemática se agravó aún más (RAISG, 2020).

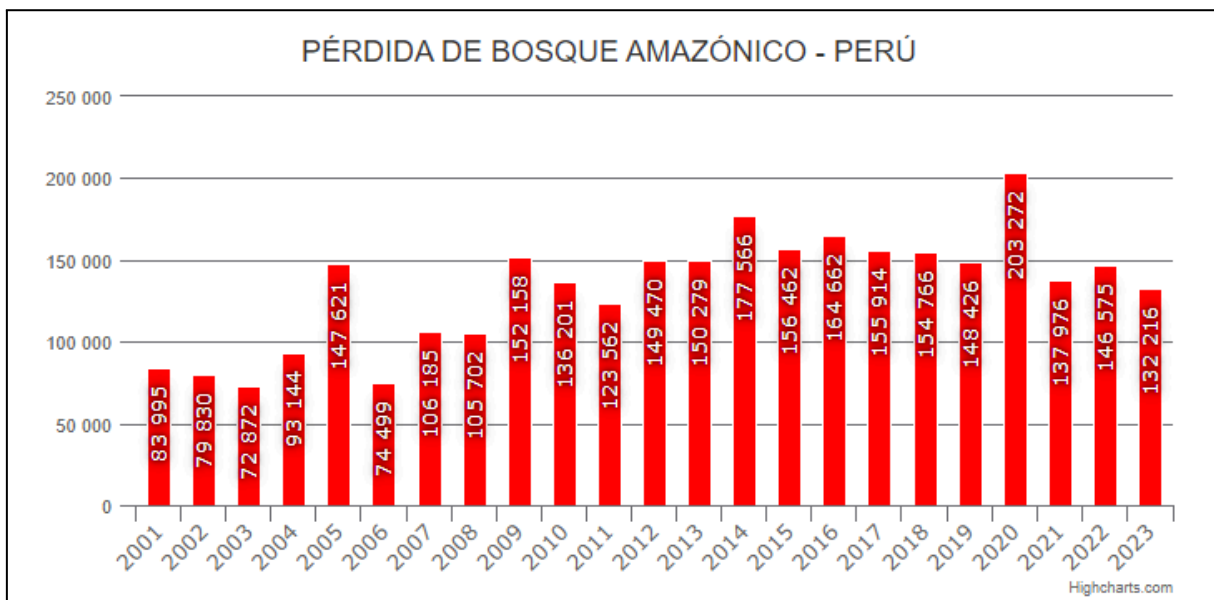


Figura 01: Hectáreas de Bosques deforestados desde el año 2001 al año 2023.

Fuente: GeoBosques (2023)

Los escasos monitoreos y la falta de vigilancia forestal durante la pandemia ha provocado un aumento en la deforestación impulsada por la tala ilegal, la minería tanto legal como ilegal, la agricultura y la invasión de los asentamientos humanos (RAISG, 2022). En particular, la minería aurífera se ha convertido en uno de los principales motores de la deforestación y la agotación de los recursos naturales, generando gran preocupación por sus impactos ambientales (DAR, 2020).

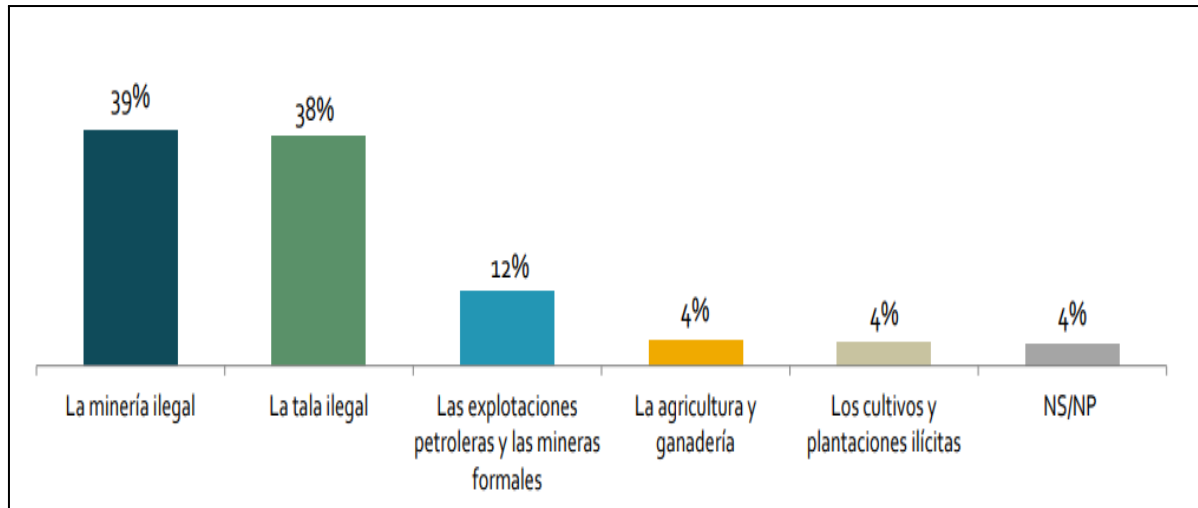


Figura 02: Principales causas de la pérdida de bosques en la Amazonía

Fuente: Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible (FCDS), 2023

A pesar de que Perú ha firmado acuerdos internacionales para reducir la deforestación, no se ha logrado disminuir en la última década. El programa REDD+, puesto en marcha desde 2007 como una medida para contrarrestar el cambio climático y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, sigue siendo un desafío (MINAM, 2022). La preocupación aumentó el último año debido a la aprobación de una modificación a la Ley Forestal (Ley N° 29763), que legaliza la deforestación ilegal en los bosques amazónicos, generando conflictos internos con los pueblos indígenas, la sociedad civil y ONGs (EIA, 2024).

2.2.4.1. DEFORESTACIÓN EN LA REGIÓN DE MADRE DE DIOS

Madre de Dios no se exenta de las amenazas en la pérdida de su cobertura vegetal y diversidad biológica. Sus bosques son constantemente explotados por empresas madereras, extractivas, agrícolas y ganaderas. Además, la quema indiscriminada ha incrementado la deforestación, en muchos casos de manera ilegal a pesar de contar con áreas protegidas, tanto el Estado como los pueblos indígenas enfrentan la presión de grupos interesados en la depredación de los bosques (ERI, 2023). Madre de Dios perdió 24,5 mil ha de cobertura vegetal, lo que generó 18,2 millones de toneladas de emisiones de CO₂ (GFW, 2023).

Una de las principales causas de esta pérdida acelerada es la minería aurífera aluvial, cuya falta de control ha provocado una grave contaminación ambiental en la región (Valencia, 2016).

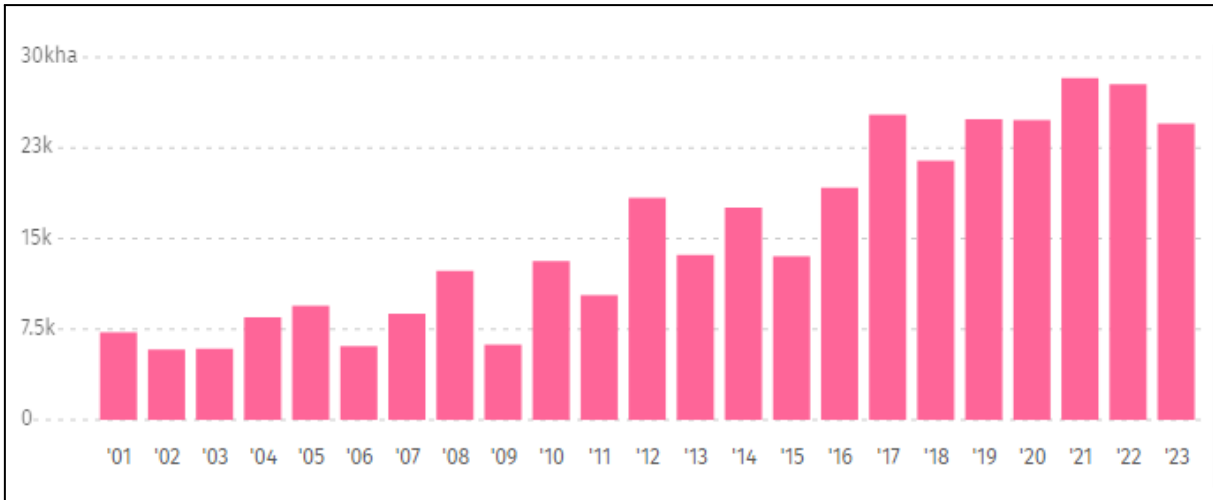


Figura 03: Pérdida de cobertura arbórea en Madre de Dios, Perú - 2023

Fuente : Global Forest Watch: Forest Monitoring - 2023

2.2.4.2. DEFORESTACIÓN EN LA ZONA DE BOCA PARIAMANU

En los últimos años La Zona de Boca Pariamanu (Río pariamanu y puerto pariamanu, ha experimentado un aumento significativo en la deforestación debido a la minería ilegal. Entre 2017 y 2021, se registró la pérdida de 204 ha de cobertura vegetal, con un avance que parece irreversible (Vera, 2021).

Las actividades mineras en la zona están causando una grave destrucción ecosistémica, afectando tanto al medio ambiente como a las comunidades indígenas locales. La explotación del oro ha generado una expansión descontrolada de la deforestación a lo largo de la cuenca del río Pariamanu, donde se encuentran diversas concesiones mineras ilegales. Este crecimiento ha ido acompañado de un aumento en la trata de personas, la propagación de enfermedades y el incremento de la inseguridad en la región.

La comunidad nativa Amahuaca de Boca Pariamanu, ubicada a orillas del río, se ha visto especialmente afectada por la expansión de la minería ilegal fuera del corredor minero ha

provocado una mayor incursión en su territorio, además del ingreso de personas ajenas a la comunidad. Como resultado, esta zona ha sido denominada "La Nueva Pampa", reflejando el crecimiento descontrolado de la deforestación, que ha alcanzado un 70% de pérdida de hectáreas boscosas afectando gravemente la producción de castañas, la principal actividad económica de la región (MAAP, 2021).

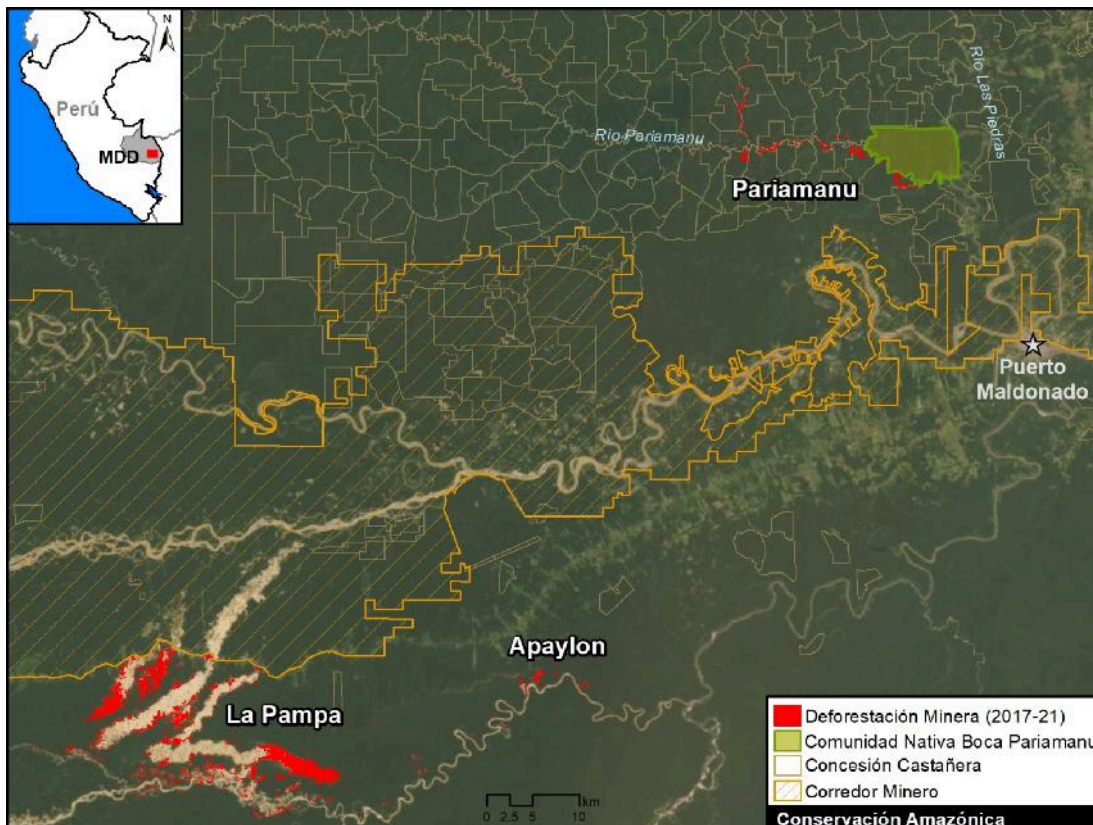


Figura 04: Mapa Base de deforestación por minería en la Zona Pariamanu

Fuente: MAAP, Minería ilegal en el río Pariamanu elaborado por Conservación Amazónica

2.2.5. MINERÍA

La transformación en el uso de suelos forestados causadas por la minería pueden ser identificados por imágenes satelitales sin embargo la poca información que se tiene de estas industrias hace que sea dificultoso una caracterización adecuada (MINAM y DAR, 2023). Para el año 2017 el Perú en el marco de la formalización de las concesiones mineras creó el Registro Integral De la Formalización minera, esta recolecta los diferentes datos sobre las mineras que inquirir sus actividades legalmente, contando con una totalidad de 54 584

inscritos de los cuales son personas jurídicas y naturales, registrando un elevado registro de mineros en Madre de Dios (Ramos, 2019).

Si bien la minería es un sector clave para el crecimiento económico del país, aportando significativamente al PBI y generando empleo, ha representado el 60% de las exportaciones nacionales en la última década (Narrea, 2018, pg. 15). Hasta junio de 2023, la producción minera mostró un incremento en varios minerales, destacando el cobre (+21.8%), zinc (+31.5%), plata (+5.8%), plomo (+17.2%), hierro (+13.0%), estaño (+15.1%) y molibdeno (+13.2%), alcanzando un total de 241,801 TMF, lo que representa un 21.8% más que en 2022 (OSINERGMIN, pg. 6, 2023). Al cierre del mismo año, la producción continuó en aumento, registrando un crecimiento en cobre (+12.7%), oro (+2.8%), zinc (+7.2%), plomo (+6.9%), hierro (+8.8%) y molibdeno (+6.0%) (OSINERGMIN, pg. 5, 2023).

Metal	Diciembre			Enero - Diciembre		
	2022	2023	Var. %	2022	2023	Var. %
Cobre (TMF)	251,919	255,144	1.3%	2,445,271	2,755,066	12.7%
Oro** (g finos)	8,512,473	9,315,084	9.4%	96,965,977	99,725,996	2.8%
Zinc (TMF)	122,917	148,851	21.1%	1,369,649	1,468,421	7.2%
Plata (kg finos)	278,608	296,800	6.5%	3,084,039	3,043,044	-1.3%
Plomo (TMF)	22,998	25,557	11.1%	255,443	273,015	6.9%
Hierro (TMF)	1,504,516	1,120,723	-25.5%	12,936,826	14,080,999	8.8%
Estaño (TMF)	2,666	3,166	18.8%	28,231	26,230	-7.1%
Molibdeno (TMF)	2,864	3,007	5.0%	31,588	33,476	6.0%

Figura 05: Producción minera en el Perú en el año 2023

Fuente: Declaración Estadística Mensual (ESTAMIN) - Ministerio de Energía y Minas (MINEM)

Sin embargo, la minería también conlleva un grave deterioro ambiental, incluyendo la erosión de los suelos y la pérdida masiva de bosques y áreas forestales. Tanto la minería ilegal y la pequeña minería (MYPES) como las grandes empresas mineras, cuando operan de manera irresponsable, contribuyen significativamente a la degradación del ecosistema.

2.2.5.1. MINERÍA AURÍFERA

La minería aurífera es una de las actividades con mayor impacto en la pérdida de cobertura vegetal en los últimos años. Para la extracción de oro, se emplean diversos procedimientos, siendo el uso de mercurio la principal técnica utilizada en el proceso de amalgamación y posterior aleación para la recuperación del metal. Estas prácticas siguen vigentes hasta la actualidad (Monteagudo, 2002). Sin embargo, el uso inadecuado e irresponsable del mercurio (Hg) genera un grave deterioro en el ecosistema, ya sea a través de los desechos provenientes del lavado del mineral o por su liberación en forma de gas, lo que ocasiona serios problemas ambientales y de salud.

La minería artesanal surgió entre las décadas de 1970 y 1980 como una alternativa de empleo, lo que llevó a la invasión de diversas zonas en busca del preciado oro. La ineficaz aplicación de reformas para la privatización del sector agravó la situación (MINEM, 1992). Actualmente, la minería aurífera ilegal está en su mayor auge en Madre de Dios, donde su impacto devastador ha resultado en la remoción masiva de tierras y bosques, generando cráteres de gran profundidad. Como consecuencia, vastas extensiones de terreno quedan convertidas en paisajes desérticos y contaminados, con una recuperación cada vez más lejana a las promesas del Estado peruano (ERI, 2023).

2.2.5.2. MINERÍA ALUVIAL

La minería aluvial es una actividad extractiva que se realiza en los cauces y orillas de los ríos. En muchos casos, no requiere maquinaria ni personal especializado, lo que facilita su desarrollo de manera ilegal, sin un compromiso adecuado con la conservación del medio ambiente ni con la salud humana (CEJIS, 2022). Esta actividad se ha expandido en diversas regiones del Perú, siendo el departamento de Madre de Dios uno de los principales focos de explotación minera. Aunque algunas concesiones mineras han implementado prácticas ambientalmente responsables para recuperar las áreas afectadas al cierre de sus operaciones, muchas otras no aplican estas técnicas adecuadas, dejando lagunas contaminadas con desechos tóxicos. Si bien estas prácticas no reemplazan las obligaciones

ambientales, pueden contribuir a una supervisión y fiscalización más efectiva a través de los instrumentos de gestión ambiental (IGA) correspondientes (MINAM et al., 2016). Según ley N° 27651, Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal, clasifica esta actividad en dos categorías: Pequeña Minería (PM) y Minería Artesanal (MA). Para garantizar un control adecuado, estas prácticas deben someterse a un proceso de muestreo de identificación (MI), conforme a lo establecido en el Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM “ECA para Suelos” y el Decreto Supremo N° 002-2014-MINAM (MINAM, 2014).

2.2.5.3. MINEROS INFORMALES

La minería informal es una actividad ilícita en el país, realizada por personas o entidades que no cuentan con las autorizaciones necesarias para la explotación de minerales. Estas autorizaciones, otorgadas por las entidades competentes, garantizan el cumplimiento de los estándares de calidad tanto laboral como ambiental. La inclusión de los mineros informales en la normativa peruana se formalizó en 2009 con el Decreto Supremo N° 005-2009-EM, que establece que cualquier persona natural o jurídica que realice actividades mineras sin los permisos correspondientes incurre en una infracción en cualquier punto del territorio nacional (MINEM, 2009). Asimismo, se han desarrollado reglamentos y modificaciones para transferir competencias a los gobiernos regionales con el fin de regular esta actividad (MINEM, 2021).

Es importante diferenciar la minería informal de la minería ilegal. La legislación peruana introdujo la definición de minería ilegal en 2012 mediante el Decreto Legislativo N° 1100, que prohíbe esta actividad en todo el territorio nacional e implementa medidas adicionales para su control. Posteriormente, el Decreto Legislativo N° 1105 establece reglas para la formalización de la minería artesanal y de pequeña escala. Sin embargo, en la actualidad, la minería informal sigue representando una amenaza para el país, ya que dificulta la formalización de esta actividad. Al operar fuera del marco legal, los mineros informales no

tributan ni están sujetos a sanciones, lo que impide una fiscalización adecuada y perpetúa la explotación descontrolada de los recursos naturales (Giraldo, 2020).

2.2.6. TELEDETECCIÓN

La teledetección es conocida por ser una técnica que nos permite la adquisición de imágenes sobre la superficie terrestres obtenidos de sensores aéreos o espaciales, ya sea por reflexión de luz solar o energía artificial que tiene una emisión propia, estas permiten la medición de las radiaciones electromagnéticas, con el uso de instrumentos adecuadamente calibrados que nos facilitan en la medición de temperaturas, humedad, altura y cambios en la atmósfera, hidrosfera y biosfera litosfera (NASA, 2021).

El uso de la teledetección ha experimentado importantes avances en los últimos años, permitiendo una medición más precisa y eficiente de parámetros clave para el ordenamiento territorial y el análisis de la estructura de la vegetación. Esta tecnología ha facilitado la evaluación tridimensional de aspectos como el espesor y volumen de las copas, así como la topografía del terreno, optimizando así la gestión de los recursos naturales (Martín et al., 2010).

2.2.7. SENSORES

Los sensores son aparatos instalados en plataformas satelitales y que son acrónimos que influyen nombres, estas captan energías electromagnéticas que son emitidas por objetos de la superficie terrestre (NASA, 2021). Encontrándose dos tipos:

a) Sensores Pasivos:

Los sensores pasivos son instrumentos que emplean microondas para medir y capturar las emisiones naturales generadas por los elementos de la superficie terrestre y la atmósfera. Estos sensores permiten analizar parámetros como la temperatura física, la composición de la superficie, la rugosidad y las características físicas de la cobertura terrestre. Su funcionamiento se basa en la detección de señales dentro de bandas de frecuencia específicas, determinadas por propiedades físicas como las resonancias moleculares. El

modelo de los sensores pasivos sigue principios similares a los empleados en radioastronomía, lo que les permite detectar emisiones de baja potencia con alta sensibilidad. Gracias a esta capacidad, pueden operar tanto de día como de noche, acumulando información de radiación en diferentes condiciones. (Manning, 2023). Entre los programas más utilizados para la obtención de datos mediante sensores pasivos se encuentran Landsat OLI/TIRS, Terra MODIS, GPM GMI y GRACE, los cuales emplean imágenes satelitales para la captura y análisis de datos.

b) Sensors Activos:

Los sensores activos son dispositivos que generan su propia fuente de energía para la iluminación de los objetos que analizan, lo que les permite operar tanto de día como de noche. Su capacidad para penetrar la atmósfera los hace especialmente útiles en diversas aplicaciones. Estos sensores, en su mayoría basados en tecnología radar, funcionan mediante la emisión de señales que interactúan con la superficie terrestre y su entorno, reflejándose, refractándose o dispersándose según las propiedades del terreno y la atmósfera.

Su aplicación varía desde el monitoreo meteorológico, a través de radares de precipitación y radares de perfil, hasta la observación y análisis de la superficie terrestre, permitiendo la generación de modelos tridimensionales de nubes y otros fenómenos atmosféricos. Entre los sistemas más utilizados en la teledetección con sensores activos destacan Sentinel-1 (C-SAR), ICESat-2 (ATLAS) y GPM (DPR), los cuales desempeñan un papel crucial en la detección y el seguimiento de cambios meteorológicos (Manning, 2023).

2.2.8. ANÁLISIS MULTITEMPORAL

El análisis multitemporal usa el método de contrastar dos imágenes satélites que tiene la misma ubicación de área de estudio pero con fechas distintas (días, meses e incluso años), este análisis se realiza mediante la comparación de capas y/o coberturas ed mapas e

imágenes del mismo lugar permitiendo evaluar el deterioro o evolución de medio natural o los accionares humanos (Tilton et al., 2003).

2.2.9. IMAGEN SATELITAL

Las imágenes satelitales son representaciones visuales obtenidas por sensores a bordo de satélites artificiales que capturan la energía reflejada por la superficie terrestre que son convertidos en planos de imágenes satelitales, que nos ayudan a la comprensión de las diferentes características en diferentes escalas, que se muestran en formatos raster que contra de una matriz (cuadrícula de píxeles) (Janampa y Ponce, 2022).

Las imágenes obtenidas mediante sensores satelitales son captadas a través de plataformas orbitales, las cuales se caracterizan por parámetros espaciales, espectrales y radiométricos que determinan su aplicación en diversas órbitas (Witting, 2019). La energía reflejada por la superficie terrestre produce variaciones en las longitudes de onda, que posteriormente se agrupan en bandas espectrales. Estas bandas permiten la generación de una matriz digital de píxeles, lo que facilita la interpretación y análisis de las imágenes satelitales, proceso conocido como "raster" (ARSET, 2023).

2.2.9.1. RESOLUCIÓN DE LA IMAGEN SATELITAL

La resolución de una imagen satelital se refiere al nivel de detalle que esta puede representar. Se mide en función de la cantidad de píxeles y su densidad en la imagen, lo que influye en su nitidez y claridad. A mayor cantidad de píxeles, la calidad visual de la imagen mejora, permitiendo la identificación de detalles más precisos. En el ámbito de la teledetección, las imágenes pueden presentar una resolución espacial alta, media o baja, según el propósito de su aplicación (Suwanprasit y Srichai, 2012).

La resolución es un atributo importante en la interpretación y el uso de la teledetección, puesto que determina la capacidad de los sensores satelitales para detectar detalles en la superficie terrestre. Su precisión depende principalmente del ángulo de captura, el cual influye en la nitidez y fidelidad de los detalles observados. Además, intervienen factores

como la distancia del satélite, la velocidad de desplazamiento y las características ópticas del sensor (Valenzuela et al., 2022).

El uso de imágenes de satélite depende de su resolución:

- a) **Alta resolución espacial:** Se emplea en el análisis de ciudades, infraestructuras y en la detección de objetos pequeños como vehículos o embarcaciones.
- b) **Baja resolución espacial pero alta resolución temporal:** Adecuado para estudios globales o regionales, como el monitoreo del clima, la vegetación o el desplazamiento de grandes cuerpos de agua.
- c) **Alta resolución espectral:** Útil para identificar plantas, suelos y minerales, así como para evaluar el estado de las plantas y la calidad del agua.
- d) **Alta resolución de radiación:** Se utiliza en investigaciones que requieren un análisis preciso de los niveles de reflexión o radiación, como el seguimiento de incendios forestales o la detección de actividad volcánica.

2.2.9.2. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

La clasificación de imágenes es un proceso fundamental en la teledetección, ya que permite convertir imágenes satelitales o aéreas en información útil para diversas aplicaciones.

Existen diferentes técnicas de clasificación, entre las que destacan las siguientes:

- a) **Clasificación supervisada:** Este método es realizado por especialistas en teledetección, quienes determinan manualmente las categorías de los píxeles en una imagen satelital a través de software especializado. Para ello, se emplean muestras de entrenamiento que permiten identificar patrones específicos de cobertura del terreno, facilitando la clasificación automatizada del resto de la imagen.
- b) **Clasificaciones no supervisadas:** A diferencia del método supervisado, este procedimiento se basa en el análisis de los valores relativos de color y tono dentro de la imagen, agrupando los píxeles en clases según sus similitudes espectrales sin

necesidad de una guía previa. Se realizan múltiples pruebas para obtener un resultado óptimo y representativo de la realidad geoespacial analizada (Janampa y Ponce, 2022).

2.2.10. SATÉLITE LANDSAT

Los satélites artificiales nos han permitido la obtención de información detallada de la superficie terrestre, lanzada en 1972 del ERTS-1 siendo renombrada como landsat 1, diseñado para la observación detallada en alta resolución de la cubierta terrestre. A lo largo de los años, la serie Landsat ha evolucionado constantemente, proporcionando datos cada vez más precisos y útiles para el análisis geoespacial. Esta evolución ha permitido el desarrollo de satélites más avanzados, como el Landsat 8 y Landsat 9, también conocido como *Landsat Data Continuity Mission (LDCM)*, asegurando la continuidad en la recopilación de datos geoespaciales y facilitando el uso de sistemas de coordenadas en estudios a largo plazo (García, 2001).

Landsat es uno de los mejores satélites para la observación de la cobertura terrestre predicción hacia el futuro, mejora y mantiene la calidad de 32 de 7 predecesores (Janampa y Ponce, 2022).

Landsat está compuesto por dos segmentos principales:

1. **Observatorio:** Se encuentra en una plataforma con la capacidad de transportar dos sensores clave: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Heating Sensor (TIRS). Estos sensores recopilan imágenes de diversas regiones, incluyendo áreas terrestres, polares e hídricas.
2. **Sistema Terrestre:** Es responsable de planificar y programar las operaciones del Landsat Data Continuity Mission (LDCM), optimizando su funcionalidad para la distribución de datos y su administración eficiente.

2.2.10.1. LANDSAT 8

El satélite Landsat 8, también conocido como Landsat Data Continuity Mission (LDCM), es una misión diseñada para dar continuidad a la recolección de datos de la serie de satélites Landsat. Este satélite está equipado con dos instrumentos de escaneado avanzados:

1. **Operational Land Imager (OLI):** Similar al sensor **Landsat 7 ETM+**, pero con mejoras significativas, como la inclusión de una nueva banda espectral y una barra de control de calidad.
2. **Sensor infrarrojo térmico (TIRS):** Un sensor térmico que capta dos bandas espectrales en el rango del infrarrojo térmico, lo que permite la medición precisa de la temperatura de la superficie terrestre (Ariza et al., 2013).

Cada día, Landsat 8 recopila aproximadamente 400 escenas de la superficie terrestre, las cuales son enviadas al servidor del United States Geological Survey (USGS) y están disponibles para su descarga en un plazo de 24 horas.

Las imágenes obtenidas por Landsat 8 cuentan con 11 bandas espectrales, distribuidas entre los sensores OLI y TIRS, con diferentes resoluciones espaciales:

- **OLI (9 bandas):** Resolución espacial de 30 metros .
 - **Banda 1:** Diseñada para estudios costeros y atmosféricos.
 - **Banda 9:** Utilizada para la detección de nubes cirrus.
 - **Banda 8:** Pancromática, con una resolución mejorada de 15 metros .
 - **Bandas térmicas 10 y 11:** Utilizada para temperaturas precisas con 100 m de resolución (USGS, 2013).

Tabla 02: Características de Landsat 8

Landsat 8	Sensor	Longitud de onda (μm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Radiométrica
Banda				
1.Ultra azul (costero / aerosol)	OLI	0.43 - 0.45	30	16 bits
2.Azul	OLI	0.45 - 0.51	30	16 bits
3.Verde	OLI	0.53 - 0.59	30	16 bits
4.Rojo	OLI	0.64 - 0.67	30	16 bits
5.Infrarrojo Cercano (NIR)	OLI	0.85 - 0.88	30	16 bits
6.Onda corta infrarroja (SWIR) 1	OLI	1.57 - 1.65	30	16 bits
7.Onda corta infrarroja (SWIR) 2	OLI	2.11 - 2.29	30	16 bits
8.Pancromática	OLI	0.52 - 0.90	15	16 bits
9.Cirrus	OLI	1.36 - 1.38	30	16 bits
10.Infrarrojo térmico 1	TIRS	10.60 -11.19	100 * (30)	16 bits
11.Infrarrojo térmico 2	TIRS	11.50 -12.51	100 * (30)	16 bits

Fuente:USGS: LDCM - Landsat Data Continuity Mission

2.2.10.2. LANDSAT 9

El satélite Landsat 9 es la más reciente incorporación a la misión Landsat, lanzada el 27 de septiembre de 2021 como una colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Este satélite fue diseñado para continuar con la recopilación de

datos de alta calidad sobre la superficie terrestre, garantizando la continuidad del programa Landsat y mejorando las capacidades de observación del planeta (NASA, 2021).

Landsat 9 mantiene la configuración de sensores introducida en Landsat 8, pero con mejoras en la precisión de los datos y en la calidad radiométrica. Cuenta con dos sensores principales:

1. **Operational Land Imager 2 (OLI-2):** Captura imágenes en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, con un total de 9 bandas espectrales y una resolución espacial de 30 metros .
2. **Sensor infrarrojo térmico 2 (TIRS-2):** Sensor de infrarrojos térmico que recopila datos en dos bandas térmicas , con una resolución espacial de 100 metros, utilizado para estudios de temperatura de la superficie terrestre (USGS, 2021a).

Este satélite desempeña un papel fundamental en el monitoreo ambiental, la gestión de recursos naturales y la evaluación de cambios en la superficie terrestre. Sus imágenes se utilizan en diversos campos, como:

- **Gestión del agua y agricultura:** Permite monitorear la humedad del suelo, el estado de los cultivos y la disponibilidad de agua en cuerpos hídricos.
- **Estudios climáticos y ambientales:** Facilitar la detección de cambios en los ecosistemas, la deforestación y la desertificación.
- **Monitoreo de desastres naturales:** Proporciona información para evaluar los impactos de incendios forestales, huracanes e inundaciones.

Las bandas espectrales de Landsat 9 capturan diferentes longitudes de onda, cada una asociada a un color específico o funciones específicas en el análisis de imágenes satelitales.

Aquí tienes la tabla con las bandas de Landsat 9 y sus colores correspondientes:

Tabla 03: Tabla de Bandas Espectrales de Landsat 9

Landsat 9	Longitud de	Resolución	Resolución
Banda	onda (μm)	Espacial (m)	Radiométrica
1.Ultra azul (costero / aerosol)	0.43 - 0.45	30	12 bits
2.Azul	0.45 - 0.51	30	12 bits
3.Verde	0.53 - 0.59	30	12 bits
4.Rojo	0.64 - 0.67	30	12 bits
5.Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30	12 bits
6.Onda corta infrarroja (SWIR) 1, Naranja-marrón	1.57 - 1.65	30	12 bits
7.Onda corta infrarroja (SWIR) 2, Rojo oscuro-marrón	2.11 - 2.29	30	12 bits
8.Pancromática, Blanco y negro	0.52 - 0.90	15	12 bits
9.Cirrus, Azul oscuro	1.36 - 1.38	30	12 bits
10.Infrarrojo térmico 1	10.60 -11.19	100 * (30)	12 bits
11.Infrarrojo térmico 2	11.50 -12.51	100 * (30)	12 bits

Fuente: USGS: LDCM - Landsat Data Continuity Mission

2.2.10.3. COMBINACIÓN DE BANDAS

Para la visualización de imágenes satelitales en color, se emplea una combinación de bandas espectrales mediante el uso de tres colores primarios (rojo, verde y azul) para representar diferentes franjas del espectro electromagnético. Mediante este proceso, es

posible resaltar características específicas del terreno y sustituir los colores reales por otros que permitan un análisis más detallado según el objetivo del estudio (Kogut, 2021). En la siguiente tabla muestra posibles combinaciones:

Tabla 04: Combinación de bandas

Combinación de Bandas	Combinación (RGB)	Descripción	Aplicación
Color natural	4-3-2	Simula la visión humana con colores naturales.	Análisis del uso del suelo, vegetación y cuerpos de agua.
Infrarrojo Cercano/ Falso Color	5-4-3	La vegetación aparece en tonos rojos, el agua en azul y las áreas urbanas en cian.	Evaluación de la salud de la vegetación y detección de cuerpos de agua.
Infrarrojo de Onda Corta/ Falso Color	7-6-4	Resalta áreas áridas y cuerpos de agua en tonos azulados.	Estudios geológicos y detección de humedad en el suelo.
Color Agrícola Falso Color	6-5-2	Diferencia áreas de cultivo y zonas forestales mediante contrastes de color.	Monitoreo agrícola y planificación del uso del suelo.
Color Natural Mejorado	5-6-4	Resalta detalles en la vegetación y cuerpos de agua con mayor precisión.	Estudios ambientales y análisis de ecosistemas.

Fuente: MappingGIS 2019,
<https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>.

2.2.10.4. CORRECCIÓN DE IMÁGENES

La corrección de imágenes satelitales es un proceso esencial para garantizar la precisión y calidad de los datos obtenidos. Existen tres tipos principales de correcciones que permiten reducir o eliminar errores causados por factores geométricos, radiométricos y atmosféricos, asegurando que las imágenes reflejen de manera fiel la realidad del terreno.

- a) **Corrección geométrica:** Consiste en ajustar las distorsiones espaciales de una imagen para que sus píxeles coincidan con las coordenadas geográficas reales. Para ello, se utilizan modelos matemáticos y puntos de control en superficie (GCP), alineando la imagen a sistemas de referencia como UTM o WGS84.
- b) **Corrección radiométrica:** Ajusta la intensidad de los píxeles para corregir errores en la captura de la energía reflejada o emitida desde la superficie terrestre. Factores como la iluminación, el ángulo solar, la sensibilidad del sensor y las condiciones atmosféricas pueden afectar la precisión de la imagen. Esta corrección permite homogeneizar los niveles de radiación y reflectancia, compensando posibles fallos del sensor (Domingo y Conde, 2023).
- c) **Corrección atmosférica:** Elimina las interferencias causadas por la atmósfera entre los sensores y la superficie terrestre. Factores como la dispersión y absorción de la luz por nubes, gases y la reflexión solar pueden alterar los valores radiométricos de los píxeles. Esta corrección ajusta la imagen para minimizar estos efectos y mejorar su precisión (Mather y Tso, 2009)

Estas tres correcciones son fundamentales para optimizar la calidad de las imágenes satelitales, permitiendo un análisis más preciso y confiable en diversas aplicaciones, como

estudios ambientales, planificación territorial y monitoreo de cambios en la superficie terrestre.

2.2.11. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

El Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta fundamental para la gestión, análisis y visualización de datos geoespaciales. Permite integrar información de diversas fuentes según su ubicación y características geográficas, facilitando su aplicación en múltiples sectores como planificación urbana, gestión de recursos naturales, agricultura, transporte y respuesta a desastres naturales, entre otros (Jonker, 2023).

2.2.12. MATRIZ DE PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

El método de análisis jerárquico es uno de los métodos que resalta a los escenarios con conflictos y/o problemas que requieren decisiones responsables pues estas indican los criterios y asignan un valor de importancia creando criterios de acuerdo a una escala predeterminada por pares de una matriz cuadrada, para finalmente establecer una medida cuantitativa de consistencia; este método emplea de 3 a 15 variables (Saaty, 1987).

Tabla 05: Escala de intensidad de importancia

Intensidad de importancia en una escala absoluta	Definición	Explicación
1	Igual importancia.	Dos actividades contribuyen de igual manera a un objetivo.
3	Moderada importancia.	Experiencia y juicio ligeramente más a favor que otra.
5	Importancia fuerte	Experiencia y juicio fuertemente a favor de otra.

7	Importancia demostrada muy fuerte.	La actividad favorece fuertemente una sobre otra, su dominancia se corrobora en la práctica.
9	Extremadamente importante.	La evidencia que está favoreciendo una actividad sobre otra, es el orden más alto de afirmación al que puede ser asignado.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Algunas veces una necesita comprometer un juicio numérico porque no hay una palabra adecuada para describirla.
Valores recíprocos de arriba	Si la actividad "i" tiene asignado uno de los números distintos de cero presentados anteriormente, en comparación con la actividad "j", entonces "j" tiene el valor recíproco cuando se compara con "i".	Una comparación que selecciona el elemento más pequeño como la unidad y estima el largo de uno como un múltiplo de esa unidad.
Racionales	Relaciones que surgen de la escala.	Si la consistencia fuera forzada por obtener un valor "n" numérico para abarcar la

matriz.

1.1 - 1.9

Para actividades vinculadas.

Cuando los elementos son estrechamente indistinguibles, 1.3 es moderado y 1.9 es extremo.

Fuente: Saaty, 1994.

a) Comparaciones pareadas

Este proceso prioriza los elementos ordenadamente entre millones de opciones, con el uso de escalas fundamentales, que relacionan expresión lingüísticas con escalas cardinales, brindando así una posibilidad de transformar conceptos en valores numéricos operables. (Saaty, 1987)

b) Índice de Consistencia

Otra ventaja de AHP es que permite al usuario determinar el porcentaje de coherencia lógica de comparaciones por pares. El propósito de lograr esta coherencia es garantizar que se construya una interpretación coherente de un conjunto de hechos. Esto se consigue utilizando el llamado coeficiente de consistencia (CR), cuyo valor debe ser inferior a 0,1, es decir, aceptando un 10% de poder no discriminatorio. Los resultados son resultados que se producen por casualidad.

El índice de consistencia se calcula según los siguientes pasos:

Primero, evalúe qué tan cercanas están las comparaciones por pares a los juicios obtenidos por casualidad.

Ecuación del índice de consistencia (IC):

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}$$

$\lambda_{\max} = n$ (el valor propio máximo)

Luego se calcula el CI de la matriz generada aleatoriamente, denominado RI (índice aleatorio), que se deriva de las matrices inversas generadas aleatoriamente utilizando los números enteros de escala básicos de Saaty para finalmente combinar la ecuación $CR = CI/RI$.

Tabla 06: Índice al azar SAATY

Número de criterios	RI
1	0.00
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Fuente: Saaty - 1987

2.2.13. ARCGIS

Esri le da el nombre de ArcGIS a su sistema de información geográfica que abarca y coordina el resto de sus aplicaciones. El software se emplea de manera extendida en empresas, gobiernos y entornos académicos. por su análisis raster, análisis 3D, análisis de relieve y geoestadísticas (González et al., 2017).

2.2.14. ENVI

Se trata de un completo software para la visualización y el análisis de las imágenes satelitales de teledetección, con capacidad de corrección de radiación y atmosférica, que permite visualizar y analizar diversos formatos de imágenes.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

Deforestación: Pérdida permanente o a largo plazo de la cubierta forestal que conduce a un cambio en el uso de la tierra; dicha pérdida sólo puede ser causada y sostenida por intervención natural o humana (FAO y UNEP, 2020)

Bosque: Superficie mínima de terreno de 0,05 a 1,0 ha con cobertura arbórea (o nivel de población equivalente) superior al 10-30% con árboles maduros en el área que puedan alcanzar una altura mínima de 2 a 5 metros.(NREF y MINAM, 2015).

Minería de oro: La minería de oro se realiza en todos los continentes excepto en la Antártida, a menudo en regiones remotas y empobrecidas con poca infraestructura y actividades económicas alternativas. Por su naturaleza, la extracción de oro es una tarea de varios años que requiere grandes inversiones iniciales.(WGC, 2021).

Minería Aluvial: Este tipo de minería es puramente de lecho y ribera de ríos, donde no necesariamente se utiliza maquinaria y personal especializado, y es en gran medida ilegal sin obligaciones adecuadas de proteger el medio ambiente y la salud humana.(CEJIS, 2022)

Análisis multitemporal: Estudio de una zona concreta mediante imágenes de satélite tomadas en diferentes momentos, con posibilidad de cambiar mes, día y hora para analizar variaciones en el tiempo.(MINAM, 2019)

Teledetección: Es el proceso que permite detectar y monitorear las características físicas de un área midiendo la radiación reflejada y emitida desde largas distancias (generalmente desde satélites o aviones). con el uso de cámaras especiales que ayudan a la recopilación de imágenes con sensores remotos que ayudan a los investigadores a observar la Tierra.(NASA, 2021).

Imágenes satelitales: Las imágenes de satélite son datos recopilados por sensores que reflejan energía de la superficie de la Tierra, estas se convierten en planos de imágenes de satélite que nos ayudan a comprender diferentes características a diferentes escalas entre sí y se muestran en formato rasterizado en la matriz y el raster. (ARSET, 2023)

Matriz Saaty: Es un método de jerarquía analítica que sirve para identificar escenarios de conflicto y/o problemas que deben resolverse de manera responsable, ya que identifica criterios y asigna valores importantes, creando escalas pares de matrices cuadradas según corresponda para que finalmente establezca una medida cuantitativa de coherencia (Saaty, 1987),

ArcGIS: Es un sistema que proporciona un conjunto completo de capacidades para crear, administrar, analizar y mapear información geográfica. (ESRI, 2020)

ENVI: Es un software que se especializa en el análisis de imágenes satelitales, permitiendo la corrección atmosférica y clasificación de áreas de cobertura. (ESRI, 2018).

Landsat: Considerada como una serie de satélites de observación de la Tierra operados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos para proporcionar información sobre los recursos ambientales. (USGS, 2013)

Píxel: También llamado elemento de imagen que suele ser una porción de la unidad de color uniforme mínima de una imagen digital (Ordoñez, 2005).

Sensor: Son dispositivos instalados en plataformas satelitales y las siglas influyen en el nombre. Detectan la energía electromagnética emitida por objetos en la superficie de la Tierra y los convierten en una señal digitalmente (NASA, 2021).

2.4. MARCO LEGAL

- ★ La Ley Forestal y de Fauna Silvestre (Ley N° 29763), regula el manejo sustentable de los recursos forestales y silvestres del Perú, promoviendo su conservación y uso sustentable. Esta Ley es fundamental para la protección de los bosques porque es la base para el manejo responsable de los recursos naturales.

- ★ Ley de Protección de los Bosques (Ley N° 29408), Proteger y conservar los bosques y su biodiversidad, y promover la restauración de áreas degradadas.
- ★ Ley del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Ley N° 28611), Regular y establecer un sistema de áreas protegidas en el Perú para proteger la biodiversidad y los ecosistemas.
- ★ Ley de Minería (Ley N° 28611), regulan las operaciones mineras en el Perú, incluidas las normas ambientales.
- ★ Ley N° 30355 - Ley de Promoción del Desarrollo Sostenible de la Agricultura, promueve la agricultura sostenible para minimizar el impacto ambiental, ayudando indirectamente a reducir la deforestación asociada con la expansión agrícola.
- ★ Decreto Supremo N° 004-2016-MINAGRI, establece las regulaciones detalladas sobre el manejo forestal, incluidas la concesión de licencias y el seguimiento. Los procedimientos de planificación se describen en detalle.
- ★ Decreto Supremo N° 005-2019-MINAM, establece un marco de acción para combatir la minería y la tala ilegales, incluyendo; promoviendo la participación de la comunidad local en la gestión.
- ★ Decreto Supremo N° 018-2017-MINAM, regular el proceso de evaluación del impacto ambiental de los proyectos, incluidos los proyectos mineros, para garantizar que se tenga en cuenta el impacto sobre la deforestación.
- ★ D.S. N° 013-2002-EM.- Aprueba el Reglamento de la Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal.
- ★ El Plan Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático (PNCB) (2017), desarrolla estrategias para reducir la deforestación y promover la recuperación de los ecosistemas forestales. Su objetivo es fortalecer la gobernanza y la participación comunitaria en la conservación de los bosques.

- ★ DL 1105 (04/2012), Establece los pasos para la formalización de la MAPE y distingue entre minería informal e ilegal, modificando la definición del DL 1100. Constituye el Instrumento de Gestión Ambiental Correctivo (IGAC) y crea el Fondo para el Proceso de Formalización de las Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal.

2.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.5.1. HIPÓTESIS GENERAL

La creciente deforestación por la actividad minera mediante el uso de imágenes Landsat 8 y 9 en la zona de Boca Pariamanu, no presenta una alta pérdida de cobertura vegetal en relación con la expansión de la actividad minera y los cambios en las áreas deforestadas.

2.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- La deforestación ocasionada por la actividad minera en la zona de Boca Pariamanu, entre los años 2018-2023 ha crecido de forma ascendente.
- El uso de tecnologías satelitales facilitará la identificación de áreas con una mayor concentración de actividades mineras, detectando tanto áreas deforestadas recientes y aquellas que presenten un avance deforestación entre los años 2018 - 2023.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El departamento de Madre de Dios se encuentra en el sur de la Amazonía peruana, limitando por la zona sur con el departamento de Puno, por la zona oeste con el Departamento de Cusco, por la zona norte con la región de Ucayali y Brasil y al este con Bolivia, su capital es Puerto Maldonado, con la influencia de los ríos de Madre de Dios y el Tambopata. Su superficie es de aproximadamente de 85,873.22 km² (8 587 322 ha), lo que equivale a un 6.7% del ámbito nacional y el 15,4% del total de la región Amazónica peruana, con un perímetro cercano a los 1,446.96 Km, de los cuales el 40% corresponde a la frontera internacional. Cuenta con 116 mil 742 habitantes (82.8%) y en centros rurales es de 24 mil 327 habitantes (17.2%) (INEI, 2017).

La presente investigación se llevó a cabo en la zona de Boca Paríamanu en el distrito de Tambopata, provincia de Tambopata perteneciente al departamento de Madre de Dios; que abarca una delimitación espacial territorial correspondiente a la microcuenca del Paríamanu, Peque Peque y delimitando al río de las Piedras cuya superficie es de un aproximado de 410 131.58 ha (4 101.32 km²), que engloban áreas agrícolas, concesiones forestales madereras; cuenta con un pueblo nativo Amahuaca en Boca Paríamanu con una extensión de 4 561.15 ha (45.61 km²) (COFOPRI y INEI, 2007), con su principal actividad de recolección de castañas de Brasil (Reaño, 2018); y el desarrollo indiscriminado de la

actividad minera ilegal, que ha generado procesos de deforestación progresiva y alteración de los ecosistemas locales (Vera, 2020). Está situada entre las coordenadas:

Tabla 07: Coordenadas de la Zona de Boca Pariamanu - Microcuenca del Pariamanu

Ubicación	Latitud	Longitud
Nacimiento del río	11° 54' 17.28" S	70° 43' 41.16" O
Desembocadura del río	12° 25' 50.16" S	69° 16' 26.76" O

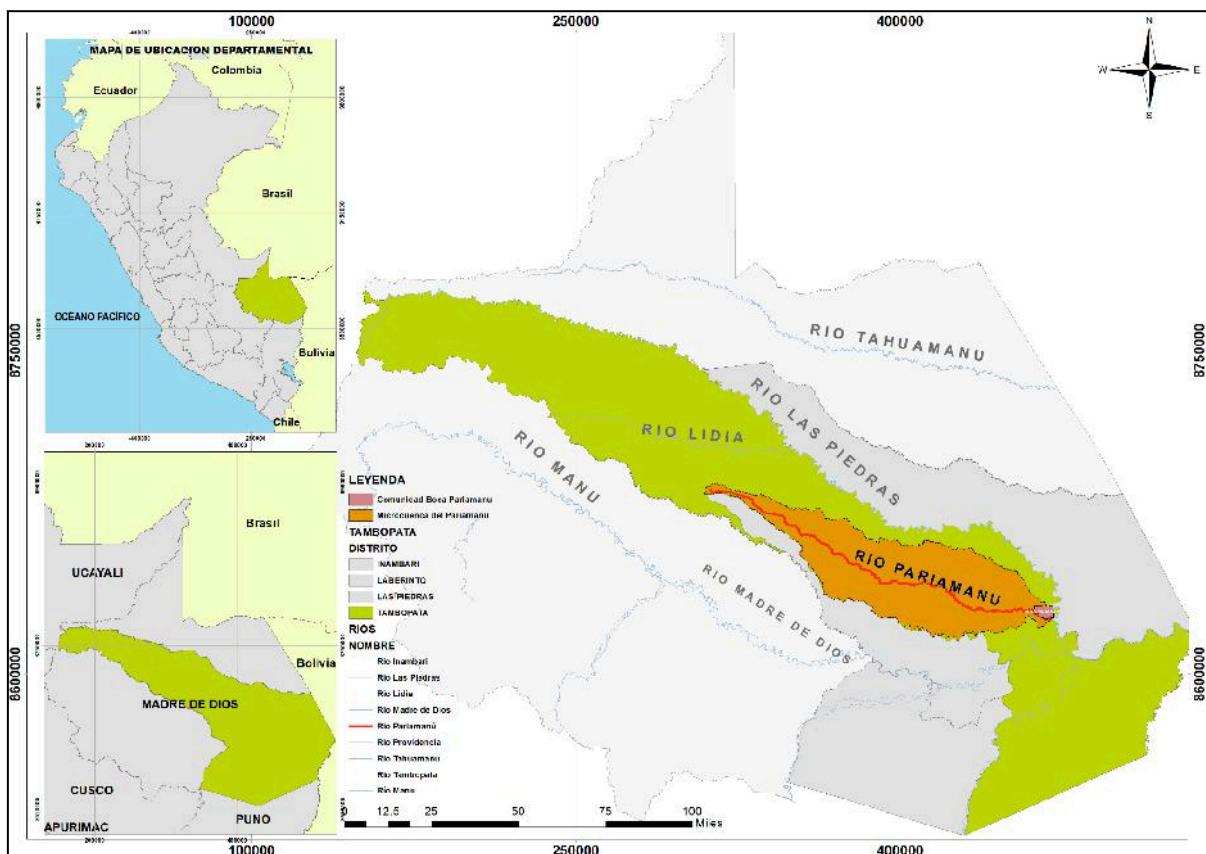


Figura 06: Ubicación geográfica del área de estudio, zona de Boca Pariamanu - Tambopata - Madre de Dios.

Fuente: Elaboración personal con base en datos de la (NASA, 2020) y cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2023).

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

El área de estudio abarcara la región geográfica de la zona de Boca Pariamanu, situada en el distrito de Tambopata, provincia de Tambopata, en el departamento de Madre de Dios. La microcuenca del Pariamanu tiene una extensión de 4 101.32 km² (410,131.58 ha); mientras que la Comunidad nativa de Boca Pariamanu ocupa 4 561.15 ha (45,61 km²).

3.2.2. MUESTRA

La muestra fue seleccionada estratégicamente en la zona de Boca Pariamanu, ubicada dentro de la microcuenca del río Pariamanu, incluyendo a su comunidad nativa asentada a orillas de este. Se aplicó un enfoque de muestreo por criterio e intencionalidad, asegurando que las áreas analizadas cumplieran con las características necesarias para el estudio multitemporal correspondiente al periodo 2018–2023.

La distribución de la muestra se realizó en la zona de Boca Pariamanu previamente identificados como afectados por intervención de la actividad minera, responsables de procesos de pérdida de cobertura vegetal. Se empleó el método de clasificación no supervisada (ISODATA) sobre imágenes NDVI, lo que permitió delimitar las zonas de deforestación inducida por actividad extractiva y enfocar el análisis en las áreas con mayor impacto ambiental registrado.

3.3. MÉTODOS Y MATERIALES

El presente trabajo se desarrolló a partir de la recopilación y procesamiento de datos satelitales sobre áreas con indicios de deforestación y actividad minera en la zona de Boca Pariamanu. Se utilizaron imágenes provenientes de los sensores Landsat 8 y Landsat 9 (NASA/USGS), procesadas en el software ENVI 5.3 y ArcGIS. Como principal indicador, se aplicó el índice de vegetación NDVI, calculado para cada píxel de las imágenes, lo cual permitió evaluar la cobertura vegetal a lo largo de los años de análisis. Las imágenes fueron georeferenciadas utilizando el datum WGS 84. La interpretación y análisis espacial de los

resultados permitió identificar los cambios más significativos en la cobertura boscosa y relacionarlos con la expansión de la actividad minera.

3.3.1. MÉTODOS

Tipo de investigación

Dado que la investigación identificó áreas donde la vegetación presenta cambios bajo influencias externas, como la actividad minera, el enfoque empleado fue un análisis cuantitativo de tipo no experimental. Se trabajó con estadísticas e imágenes geoespaciales sin manipular las variables, permitiendo observar los fenómenos tal como ocurrieron en su entorno natural (Anexo 09).

Diseño de Investigación.

El trabajo de investigación fue de carácter no experimental, dado que no se intervinieron las variables del fenómeno estudiado. En vez de ello, se observó a las unidades empíricas o variables en su contexto natural, lo que permitió su análisis y evaluación.

3.3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.3.2.1. Materiales para la etapa de salida de campo

- Tablero de plástico.
- Ficha de observación (para la evaluación del lugar).
- Lapiceros.

3.3.2.2. Recursos cartográficos

- Imágenes satelitales
- Mosaicos del año 2018 y 2023 de Landsat 8 y Landsat 9.

3.3.2.3. Herramientas de teledetección

- Google Earth Engine (GEE).

3.3.2.4. Softwares

- Microsoft Word
- ArcGis 10.5

- Microsoft Excel
- ENVI
- Python 3.11

3.3.2.5. Equipos

- Laptop RYZEN 7

3.4. METODOLOGÍA POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Método inductivo: Se refiere al proceso de razonamiento que tiene como objetivo explicar las causas de los acontecimientos desde lo específico a lo general, consiste en la observación de características para encontrar conexiones o rasgos similares que permitan formular una generalización (Zamora y Guzmán, 2023).

Método deductivo: Es un proceso lógico que comienza con principios generales sólidos y los aplica a casos específicos para descubrir consecuencias desconocidas. Se utiliza para descubrimiento y es más sencillo que el método inductivo. Su proceso incluye formulación, consolidación, demostración, síntesis, generalización y aplicación de políticas (Zamora y Guzmán, 2023).

Técnica de observación: Es el proceso de estudiar algo detenidamente para aprender sobre ello, abarcando su naturaleza integral, incluido un conjunto de datos, hechos y fenómenos, la técnica se desarrolló mediante herramientas de teledetección, utilizando los softwares ArcGIS 10.5, ENVI 5.3 y Python 3.11, Excel, junto con imágenes satelitales Landsat 8 y 9 (colección 2, nivel 2), corregidas a reflectancia superficial. Se aplicó el índice de vegetación de diferencia normalizada ($NDVI > 0.3$) y una clasificación no supervisada con el algoritmo ISODATA para delimitar la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu, departamento de Madre de Dios, durante el periodo 2018–2023. Además, se estimó la tasa anual compuesta de deforestación (CAGR) y se evaluaron los efectos colaterales de la deforestación causada por la actividad minera mediante el modelo AHP (Análisis Jerárquico

de Proceso), identificando espacialmente la pérdida de hábitat, la fragmentación del ecosistema y la afectación a cuerpos de agua.

Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Fuente de los datos:

Los datos utilizados en este estudio provinieron de fuentes primarias, incluyendo bases de datos espaciales como USGS y archivos de imágenes satelitales, además de observaciones de campo realizadas en la zona de Boca Pariamanu. Estos datos fueron seleccionados cuidadosamente por el tesista para garantizar la relevancia y precisión en relación con los objetivos del estudio y el periodo de análisis (2018-2023).

La técnica empleada para la recopilación de datos consistió en la observación sistemática de imágenes satelitales multitemporales descargadas desde la plataforma del United States Geological Survey (USGS). Esta técnica permitió registrar de manera estructurada y confiable los cambios observados en la cobertura vegetal, organizando la información en categorías temáticas, que posteriormente fueron analizadas en entornos SIG.

Para el procesamiento y análisis de la información espacial, se utilizaron los programas ArcGIS 10.5, ENVI 5.3, Python y Microsoft Excel, herramientas que facilitaron la elaboración de mapas, gráficos y tablas, representando los cambios en la cobertura boscosa y los impactos derivados de la actividad minera en la zona de estudio.

Metodología para el objetivo específico O1: Analizar las áreas deforestadas en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023 a través de un enfoque multitemporal, utilizando imágenes satelitales (Landsat-8 y 9, ENVI) para identificar cambios en la cobertura vegetal.

Para el desarrollo del objetivo específico 01: se utilizaron imágenes satelitales provenientes de las misiones Landsat 8 y Landsat 9, adquiridas a través de los sensores OLI (Operational Land Imager). El sensor OLI ofrece imágenes multiespectrales con una resolución espacial de 30 metros, además de una banda pancromática de 15 metros. Estas imágenes fueron

descargadas desde el sitio oficial del United States Geological Survey (USGS), entidad que pone a disposición una amplia colección histórica y actual de datos satelitales para el análisis de la superficie terrestre.

Tabla 08: Parámetros de selección de imágenes Landsat 8 y 9

Escena	Ruta	Fila	Cobertura de nube
1	003	069	<15
2	003	068	<15
3	002	069	<15

Fuente: (USGS, 2023)

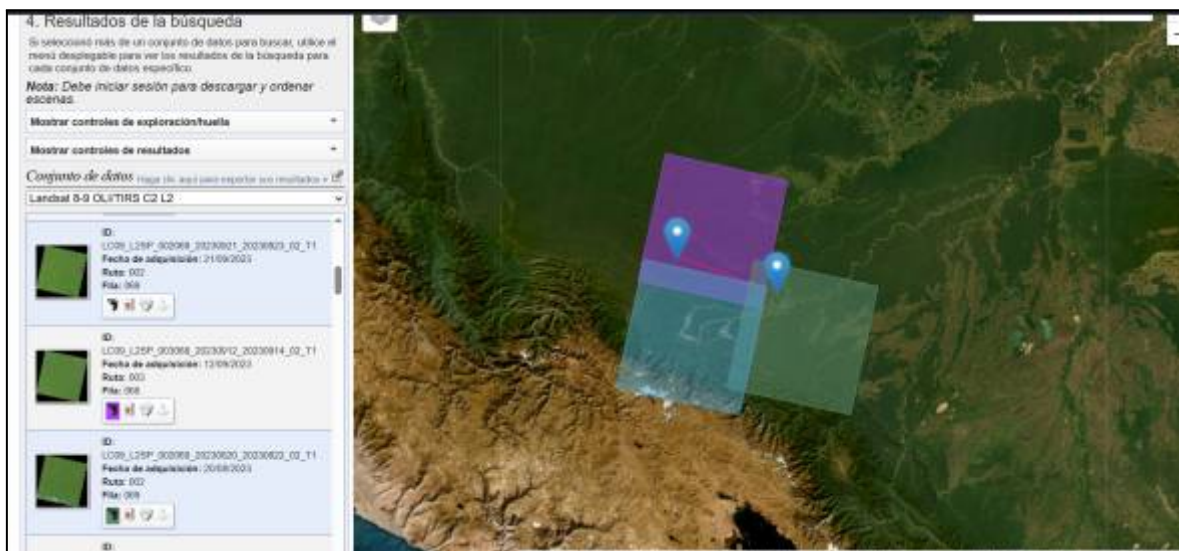


Figura 07: Fotografía aérea de Landsat 8 y Landsat 9

Fuente: Las imágenes satelitales Landsat 8 y 9 fueron obtenidas a través de la plataforma EarthExplorer del United States Geological Survey (USGS)

El análisis multitemporal de las imágenes satelitales (Landsat 8 y 9) se realizó con la metodología de clasificación no supervisada que permitió la evaluación de los cambios ocurridos en las áreas afectadas de la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 a 2023.

Las muestras del mapa fueron distribuidas mediante la técnica ISODATA que es el agrupamiento automático de píxeles según su firma espectral, sin la necesidad de datos previos.

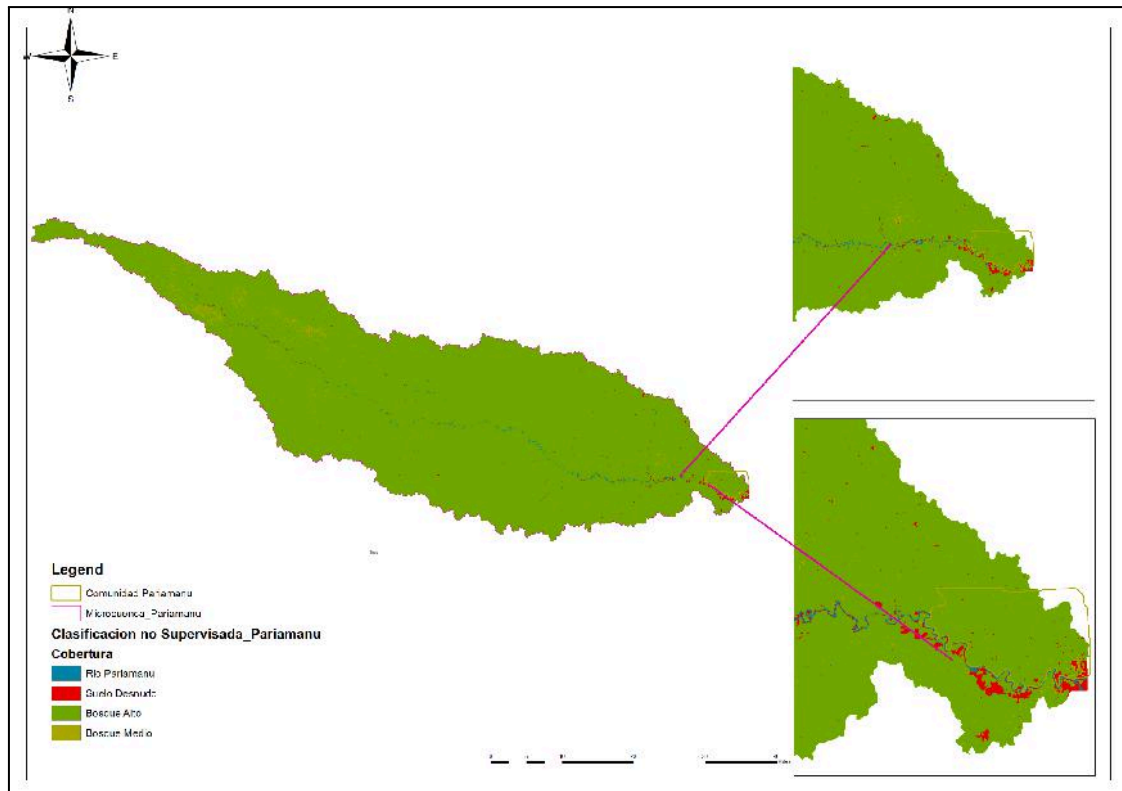


Figura 08: Distribución espacial de muestras de validación en la clasificación no supervisada de cobertura vegetal en Boca Paríamanu - Madre de Dios.

Fuente: Elaboración Propia

Las imágenes satelitales fueron procesadas y analizadas en el software ENVI 5.3 con el fin de identificar las áreas afectadas por la deforestación por actividad minera a lo largo del periodo entre 2018 a 2023. Para complementar este análisis, se utilizó el índice de vegetación NDVI, lo que permitió medir el estado de la cobertura vegetal y detectar variaciones en la densidad del bosque. La aplicación de herramientas de análisis geoespacial en ENVI 5.3 facilitó la visualización de los patrones de deforestación y su evolución en la zona de estudio.

Índice normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI):

Este indicador espectral es ampliamente empleado para analizar la cobertura vegetal a partir de imágenes satelitales. Su cálculo se basa en la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y la correspondiente a la banda roja (Red), lo que permite estimar tanto la cantidad como el estado de la vegetación (USGS, 2023).

$$NDVI (Landsat) = \frac{(NIR (B5) - RED (B4))}{(NIR (B5) + RED (B4))}$$

$$NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$$

Donde:

B5: corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR)

B4: corresponde a la banda roja (Red)

Clasificación no supervisada del NDVI

Los valores del NDVI varían entre -1 y 1. Valores negativos o cercanos a cero indican ausencia de vegetación (agua, nubes, suelos desnudos), mientras que valores positivos cercanos a 1 representan vegetación densa y saludable.

Metodología para el objetivo específico O2: Evaluar la tasa anual de deforestación en la zona de Boca por actividad minera y analizar sus efectos colaterales, como la pérdida de hábitat, fragmentación del ecosistema y el impacto en cuerpos de agua entre los años 2018 - 2023.

Para obtener la tasa de deforestación anual, se calculó la tasa anual de deforestación en la zona de Boca Pariamanu mediante el uso de imágenes satelitales multitemporales entre los años 2018 a 2023. La evaluación se realizó mediante la técnica de análisis acumulativo sobre el cambio de cobertura vegetal, aplicando técnicas de clasificación y detección de cambios en la zona. Posteriormente se analizaron los efectos colaterales asociados a la deforestación por la actividad minera, incluyendo la pérdida de hábitat, fragmentación del ecosistema y los impactos sobre cuerpos de agua cercanos. Este enfoque permitió establecer zonas críticas de impacto y evaluar cómo la actividad minera ha afectado el

entorno natural, no solo por la pérdida directa de vegetación, sino también por sus efectos colaterales en hábitats, cuerpos de agua y conectividad ecológica.

La evaluación de la cobertura boscosa se llevó a cabo a partir del cálculo del NDVI para cada año, lo que permitió delimitar la superficie con vegetación. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales provenientes de las misiones Landsat 8 y Landsat 9, adquiridas a través de los sensores OLI (Operational Land Imager). El sensor OLI ofreció imágenes multiespectrales con una resolución espacial de 30 metros, además de una banda pancromática de 15 metros. Estas imágenes fueron descargadas desde el sitio oficial del United States Geological Survey (USGS), entidad que pone a disposición una amplia colección histórica y actual de datos satelitales para el análisis de la superficie terrestre.

Cálculo de la tasa anual de deforestación

Para estimar la pérdida progresiva de cobertura vegetal provocada por la actividad minera en la zona de Boca Paríamanu entre los años 2018 a 2023, se aplicó un enfoque cuantitativo basado en el análisis multitemporal del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). A partir de los valores obtenidos de NDVI para cada año, se delimitó la superficie cubierta por vegetación; para ello, se consideró como área vegetada a los píxeles cuyo valor de NDVI fue superior a > 0.3 , umbral adoptado para identificar zonas con cobertura boscosa densa o moderada. Esta delimitación permite calcular la tasa anual de deforestación utilizando la fórmula de crecimiento anual compuesto (CAGR).

$$T_d = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 * 100$$

$$Td (\%) = [(S2 / S1)^{(1/n)} - 1] \times 100$$

Donde:

Td = Tasa anual de deforestación

S1 = Superficie forestal al inicio del período

S2 = Superficie forestal al final del período

n = número de años entre ambos periodos

Análisis espacial de los efectos colaterales

Se generaron mapas de cambio para la visualización espacial del avance de las zonas deforestadas por la actividad minera, empleando herramientas SIG como ArcGIS 10.5 y ENVI 5.3, junto con la superposición de capas temáticas ambientales. Esta representación espacial permitió identificar áreas de pérdida de hábitat, fragmentación del ecosistema y posibles impactos sobre cuerpos de agua cercanos.

Aplicación del Análisis Jerárquico (AHP)

Con el objetivo de profundizar en la evaluación de los impactos secundarios derivados de la deforestación por la actividad minera, se empleó el método de Análisis Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas Saaty. Esta técnica permitió realizar comparaciones por pares entre los efectos identificados, como la pérdida de hábitat, la fragmentación del ecosistema y la alteración de cuerpos de agua y los suelos degradados o expuestos, asignando a cada uno un peso relativo en función de su relevancia.

Para estructurar el análisis, se definió una jerarquía con tres niveles: la meta general, los criterios ambientales y los juicios de comparación. Esta estructura permitió visualizar con claridad la relación entre los factores evaluados, como se muestra en la siguiente figura:

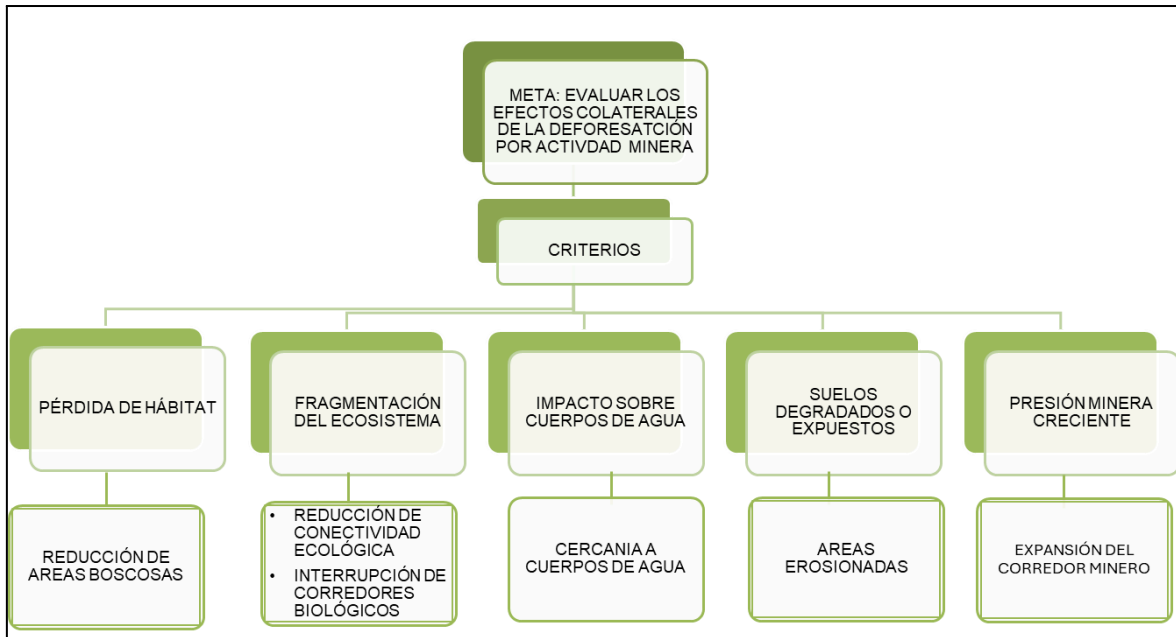


Figura 09: Estructura jerárquica del modelo AHP aplicado al análisis de efectos colaterales de la deforestación minera

Fuente: Elaboración basada en Saaty (1986).

Mediante la construcción de una matriz de juicio y la aplicación de la escala propuesta por Saaty, que va del valor 1 (igual importancia) al 9 (importancia extrema), se determinó la prioridad de cada uno de los factores analizados.

Tabla 09: Escala de comparación por pares según Saaty (1980)

Valor	Significado
1	Igual Importancia
3	Moderada Importancia
5	Fuerte Importancia
7	Muy Fuerte
9	importancia Extrema
2,4,6,8	Valores Intermedios

Fuente: Saaty,1986.

Para obtener los pesos relativos (W_i) de cada criterio se utilizó el promedio de los valores normalizados por columna, según la siguiente fórmula:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n}$$

Donde:

W_i = Peso relativo del criterio i

a_{ij} = Valor normalizado del criterio i con respecto al j

n = Número total de criterios

Para asegurar la coherencia de los juicios establecidos en la matriz del modelo AHP, se procedió al cálculo del índice de razón de consistencia (CR), el cual permite evaluar si las comparaciones por pares realizadas entre los criterios presentan un nivel aceptable de lógica interna. El CR se obtuvo aplicando la fórmula:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

donde CI representa el índice de consistencia, calculado mediante:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

Donde:

$\lambda_{\text{máx}}$ (lambda máximo): es el valor propio máximo de la matriz cuadrada AHP.

n: es el número total de criterios evaluados.

CI: mide cuánta inconsistencia hay en los juicios de la matriz.

y RI es el índice aleatorio asignado de acuerdo con el número de criterios utilizados, según los valores propuestos por Saaty (1980). En este estudio, se considerará aceptable un resultado de $CR \leq 0.10$, correspondiente a una matriz consistentemente estructurada. Para cuatro criterios evaluados (pérdida de hábitat, fragmentación, cuerpos de agua y suelos degradados), el valor de RI aplicado será 0.90.

Tabla 10: Valores del Índice Aleatorio (RI) según el número de criterios

Número de criterios (n)	RI
1	0.00
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Fuente: Saaty, 1980

Definición de criterios jerarquizados

Para la definición de los criterios ambientales a jerarquizar en el marco del análisis de los efectos colaterales por deforestación de la actividad minera en la zona de Boca Pariamanu, se recopiló información geoespacial proveniente de fuentes oficiales, como imágenes satelitales, mapas temáticos y datos ambientales disponibles en portales públicos y bases de datos nacionales e internacionales.

Dado que el área de estudio presenta zonas boscosas, cuerpos de agua, suelos desnudos, cultivos de castaña y actividad minera informal, se identificaron las variables clave asociadas a los impactos más significativos. Toda la información fue homogenizada al mismo sistema de coordenadas geográficas para su integración en un entorno SIG.

Los factores considerados para el análisis AHP fueron:

- A. V1 Pérdida de hábitat
- B. V2 Fragmentación del ecosistema
- C. V3 Impacto sobre cuerpos de agua
- D. V4 Suelos degradados o expuestos
- E. V5 Presión minera creciente

Estos criterios fueron evaluados mediante la matriz AHP y sus respectivos pesos integrados en el análisis espacial con herramientas SIG.

Fuentes de información para el análisis espacial

La obtención de los criterios ambientales seleccionados para el análisis AHP se respaldó mediante información geoespacial proveniente de fuentes oficiales, datos satelitales y resultados derivados del procesamiento digital de imágenes. Toda la información fue normalizada al mismo sistema de coordenadas y preparada para su uso en ambientes SIG.

Tabla 11: Fuentes de información utilizadas para el análisis espacial

Tipo de información	Variable	Representación	Fuente / Herramienta
Imágenes satelitales	Cobertura vegetal (NDVI)	Landsat 8 y 9	USGS / Procesado en ENVI 5.3
Cartografía base	Ríos y cuerpos de agua	Hidrografía	IGN del Perú / SIG
Cartografía base	Comunidad	Centro poblado cercano	IGN / INEI
Procesamiento satelital	Suelos deforestados	Clasificación no supervisada	ENVI 5.3 y ArcGIS 10.5
Información temática	Corredor minero (zona externa)	Polígono de actividad minera	GEOCATMIN – MINEM

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente para evaluar los efectos colaterales, como la pérdida de hábitat, la fragmentación del paisaje y el impacto en cuerpos de agua, se utilizará la ficha de observación del lugar (Anexo 09); que permitirá realizar una verificación directa en el terreno de los cambios observados en las imágenes satelitales.

3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Tabla 12: Operacionalidad de Variables

Variables	Indicadores	Escala de Medición	Tipos de Variables
(VI) Actividad minera	<ul style="list-style-type: none"> Superficie modificada por actividad minera. 	Ha %	Independiente
(VD) Evolución de la deforestación	<ul style="list-style-type: none"> Pérdida de bosque primario. Pérdida de bosque secundario. Tasa de deforestación total anual. 	Ha %	Dependiente

3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

El presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo, fundamentado en el análisis espacial y el procesamiento digital de imágenes satelitales para evaluar los cambios en la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu durante el periodo 2018–2023.

La metodología se basó mayoritariamente en el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), calculado a partir de imágenes satelitales Landsat 8 y 9 procesadas anualmente, lo que permitió realizar un análisis multitemporal de la cobertura vegetal. Este análisis no requirió el uso de inferencias estadísticas ni de muestreo probabilístico, ya que los datos abarcaron la totalidad del área de estudio durante el periodo considerado.

Tratamiento estadístico en Excel

Todos los cálculos estadísticos promedios fueron procesados en Microsoft Excel 2019, el estudio no utilizó pruebas paramétricas ni muestras, sino análisis sobre la totalidad del área de estudio (cobertura completa). Por lo tanto, el diseño es de carácter no inferencial.

Como complemento al análisis realizado en Excel, se utilizó el lenguaje de programación Python, mediante bibliotecas como pandas, statsmodels y matplotlib, para calcular de forma automatizada la tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR), la tasa bruta de deforestación, así como los valores de ganancia, pérdida neta y volatilidad interanual.

Prueba de normalidad - Shapiro-Wilk

Se verificó la distribución de los datos del NDVI como paso esencial en el análisis estadístico. Para ello, se empleó la prueba de Shapiro-Wilk, recomendada particularmente en conjuntos de datos reducidos ($n < 50$). Dicha prueba permite identificar si la información sigue una distribución normal, lo cual es un requisito relevante para la correcta aplicación de determinados procedimientos estadísticos.

Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

- Hipótesis alternativa (H_a): Los datos no presentan una distribución normal.
- Hipótesis nula (H_0): Los datos siguen una distribución normal.

El criterio de decisión se basa en el valor de significancia (p-valor):

- Si el valor p (Sig.) obtenido es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis alternativa (H_a): los datos presentan una distribución normal.
- Si el valor p es menor o igual que 0.05, se acepta la hipótesis nula (H_0): los datos no presentan una distribución normal.

Con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0.05$), verificar la normalidad de los datos permite asegurar que las estimaciones sean consistentes y adecuadas para la interpretación estadística.

Aplicación del modelo AHP (Análisis Jerárquico de Proceso)

Se utilizó el modelo AHP para priorizar los efectos colaterales de la deforestación minera, mediante la construcción de una matriz de comparación por pares. Los factores fueron ponderados usando la escala de Saaty, y se calcularon los pesos relativos de cada criterio. La coherencia de los juicios fue evaluada a través del índice de razón de consistencia (CR), aceptando los resultados cuando $CR < 0.1$.

Para contrastar la hipótesis:

Con el fin de observar la evolución de la cobertura vegetal en el tiempo, se aplicó una regresión lineal simple, empleando como variable independiente el año y como variable dependiente la superficie vegetada (ha). El análisis fue realizado en Microsoft Excel, calculando el coeficiente de determinación (R^2) como indicador del grado de ajuste. No se aplicaron pruebas inferenciales, dado que el estudio es de carácter descriptivo.

Este diseño permitió caracterizar y cuantificar la deforestación causada por la actividad minera mediante el NDVI, y aplicar el modelo AHP para priorizar sus impactos colaterales. De este modo, se logró vincular la evolución temporal del paisaje con los procesos de la actividad minera presentes en Boca Pariamanu.

Criterio para decidir:

P-valor = $< \alpha$, se rechaza la H_0 (Se acepta la H_A).

P-valor = $> \alpha$, se acepta la H_0 (Se rechaza la H_A)

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS ÁREAS DEFORESTADAS POR ACTIVIDAD MINERA EN LA ZONA DE BOCA PARIAMANU ENTRE 2018 Y 2023.

Se evaluó la variación de la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) durante el periodo comprendido entre los años 2018 y 2023. Para este análisis se utilizaron imágenes satelitales Landsat-8 y Landsat-9, descargadas desde la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), las cuales fueron seleccionadas por presentar un nivel de nubosidad inferior al 15%, como se detalla en el (Anexo 02). Ambos satélites cuentan con 11 bandas espectrales, de las cuales se utilizaron la banda 4 (rojo) y la banda 5 (infrarrojo cercano o NIR) para el tratamiento de datos. El cálculo del NDVI, indicador clave para representar áreas con presencia de vegetación, se desarrolló en el software ENVI 5.3 (Anexo 03), mediante funciones algebraicas aplicadas a las bandas mencionadas, tal como se muestra en los Anexos correspondientes.

Tabla 13: Cambios multitemporales en la cobertura vegetal en la zona de boca Pariamanu 2018 - 2023

PERIODOS	Vegetación o Áreas Boscosas En la Zona de Boca Pariamanu			
	Área (Ha)	Variación del Área (Ha)	Tasa de Cambio en (%)	Porcentajes
2018	394,674	0	0	16.4
2019	399,72	5,046	1.28	16.7
2020	407,338	7,618	1.91	17
2021	399,977	-7,361	- 1.81	16.7
2022	404,052	4,075	1.02	16.8
2023	394,263	-9,789	- 2.42	16.4
TOTAL	2,400,024	-411	- 0.03	100.00

En la Tabla 13 se muestran los cambios multitemporales de la cobertura vegetal en la microcuenca de Boca Pariamanu durante el periodo 2018–2023. En 2018, la superficie boscosa registrada fue de aproximadamente 394,674 ha, equivalente al 16 % del área total evaluada. En los años siguientes se evidenciaron variaciones tanto positivas como negativas en la extensión de dicha cobertura. En 2019, se observó un ligero incremento de 5,046 ha (1.28 %), seguido por un crecimiento adicional de 7,618 ha en 2020, equivalente a una tasa del 1.91 %. Sin embargo, en 2021 se registró una pérdida de 7,361 ha (–1.81 %), lo que marcó un retroceso en la cobertura vegetal. Aunque en 2022 hubo una recuperación de 4,075 ha (1.02 %), en 2023 nuevamente se redujo en 9,789 ha (–2.42 %), retornando a niveles similares a los de 2018. Estos resultados coinciden con lo señalado por (Chumpe, 2022), quien identificó una disminución promedio anual de 345.2 ha en el distrito de Espinar,

con una correlación del 60.5% con la expansión minera. Asimismo, los hallazgos son consistentes con el estudio de (Gamarra, 2023), quien utilizando algoritmos supervisados como Random Forest, identificó alteraciones del paisaje en zonas de alta presión antrópica, similares a las evidenciadas en Boca Pariamanu. Además coincide con lo reportado por (Barba, 2019), quien proyectó una pérdida acumulada de 25,091 ha en la zona de La Pampa hacia 2030. Ambos estudios identifican una tendencia regresiva y sostenida de la cobertura boscosa en Madre de Dios, atribuida a presiones como la minería informal, caminos no planificados y otras actividades antrópicas.

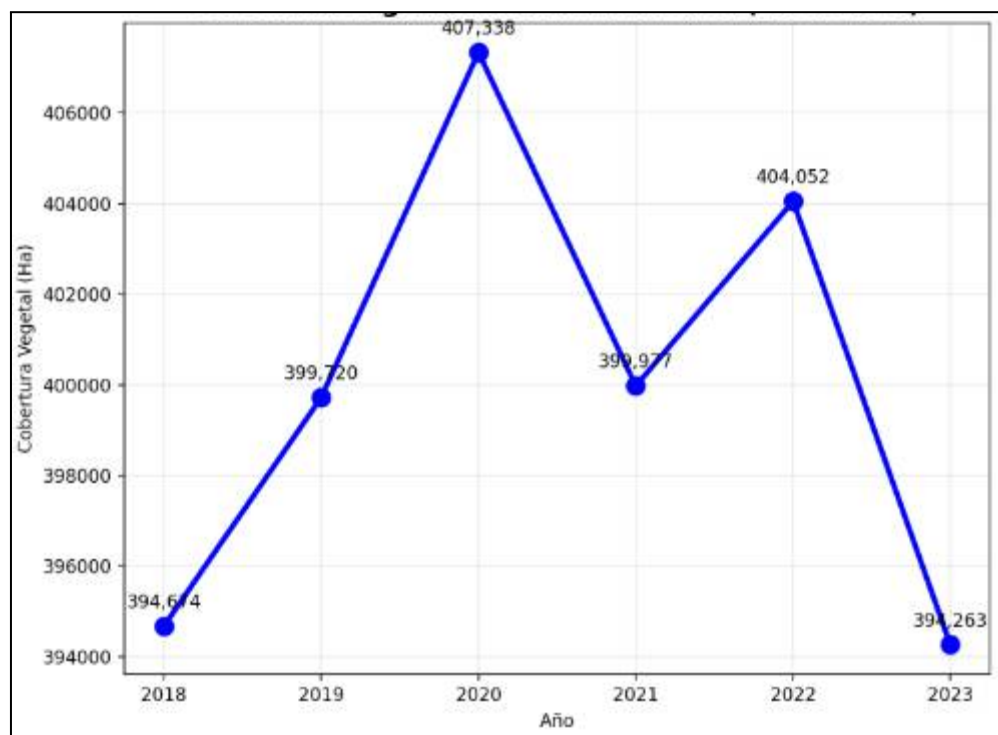


Figura 10: Cambios multitemporales en la Cobertura vegetal de la zona de Boca Pariamanu durante 2018 - 2023.

En la figura 10, los resultados del comportamiento de las áreas boscosas entre los periodos de 2018 a 2023 en la zona de Boca Pariamanu, se observó un ligero retroceso en la cobertura boscosa. En 2018, las áreas boscosas alcanzaban un total de 394,674 ha, representando aproximadamente el 16 % de la superficie analizada. Para el año 2023, esta cobertura se redujo levemente a 394,263 ha, manteniéndose proporcionalmente también en

un 16 %. Aunque la variación cuantitativa es mínima, estos resultados evidencian una tendencia regresiva que, si bien no es drástica, no deja de representar una señal de alerta. Esto sugiere que la zona continúa siendo vulnerable a procesos de deforestación, lo cual podría intensificarse si no se implementan medidas efectivas de conservación y monitoreo ambiental.

Tabla 14: Estadística descriptiva del NDVI - Cobertura Vegetal (2018 a 2023)

Variable	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación	
					estándar	Curtosis
NDVI - cobertura vegetal (ha)	408,039.66	408,037.41	408,361.86	407,548.08	264.32	1.07

*Nivel de confianza(95.%)**

En la tabla 14, se presenta la estadística descriptiva de la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu, durante el periodo 2018–2023. La variable NDVI - cobertura vegetal (ha) muestra un promedio de 408,039.66 ha, con un valor máximo de 408,361.86 ha y un mínimo de 407,548.08 ha. La mediana registrada fue de 408,037.41 ha, y la desviación estándar de 264.32 ha indica una baja dispersión de los datos con respecto a la media. La curtosis de 1.07 sugiere una distribución levemente leptocúrtica, es decir, con ligera concentración de valores en torno a la media, sin presencia de valores atípicos extremos.

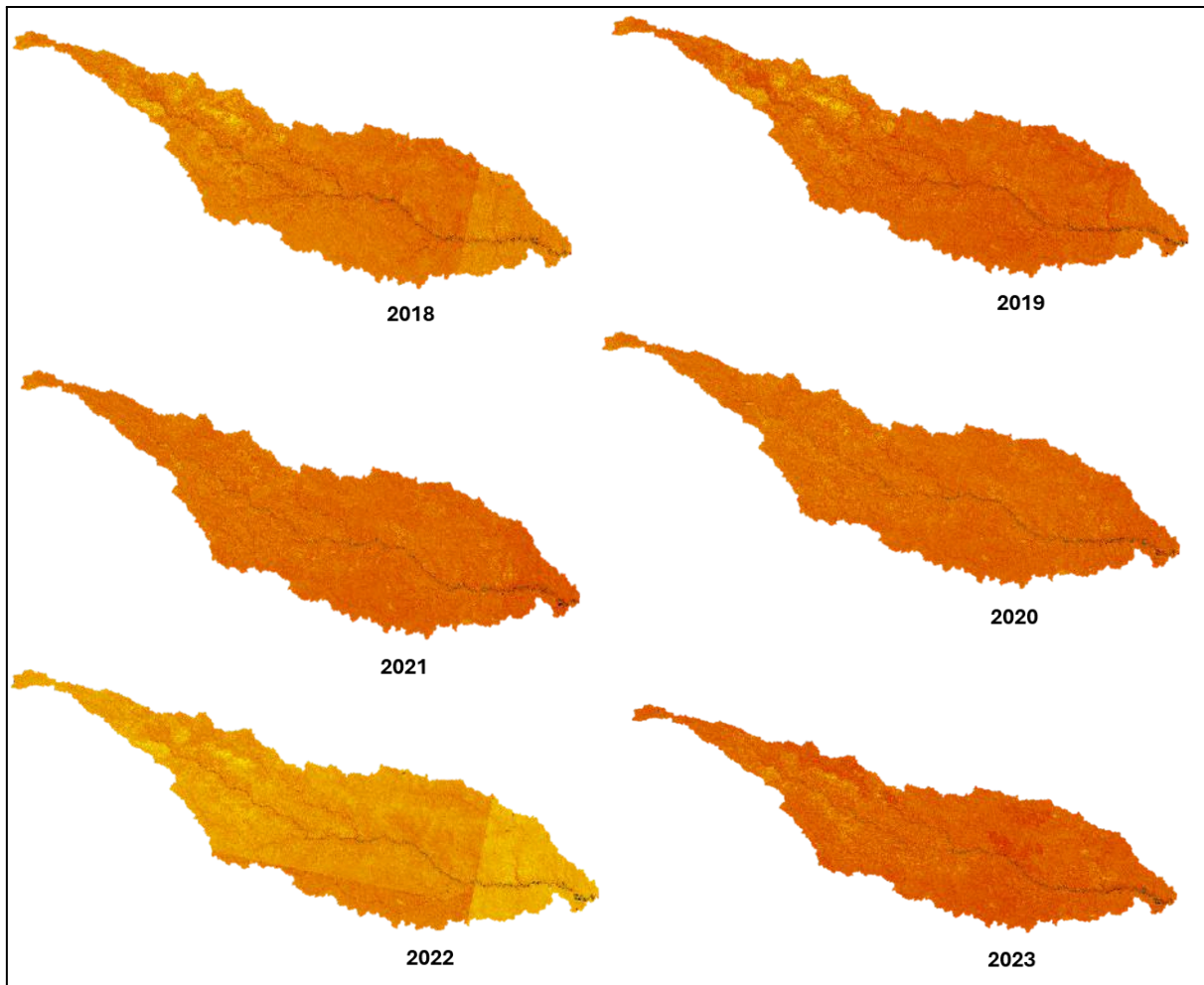


Figura 11: Cambios temporales de la cobertura vegetal de la Zona de Boca Pariamanu

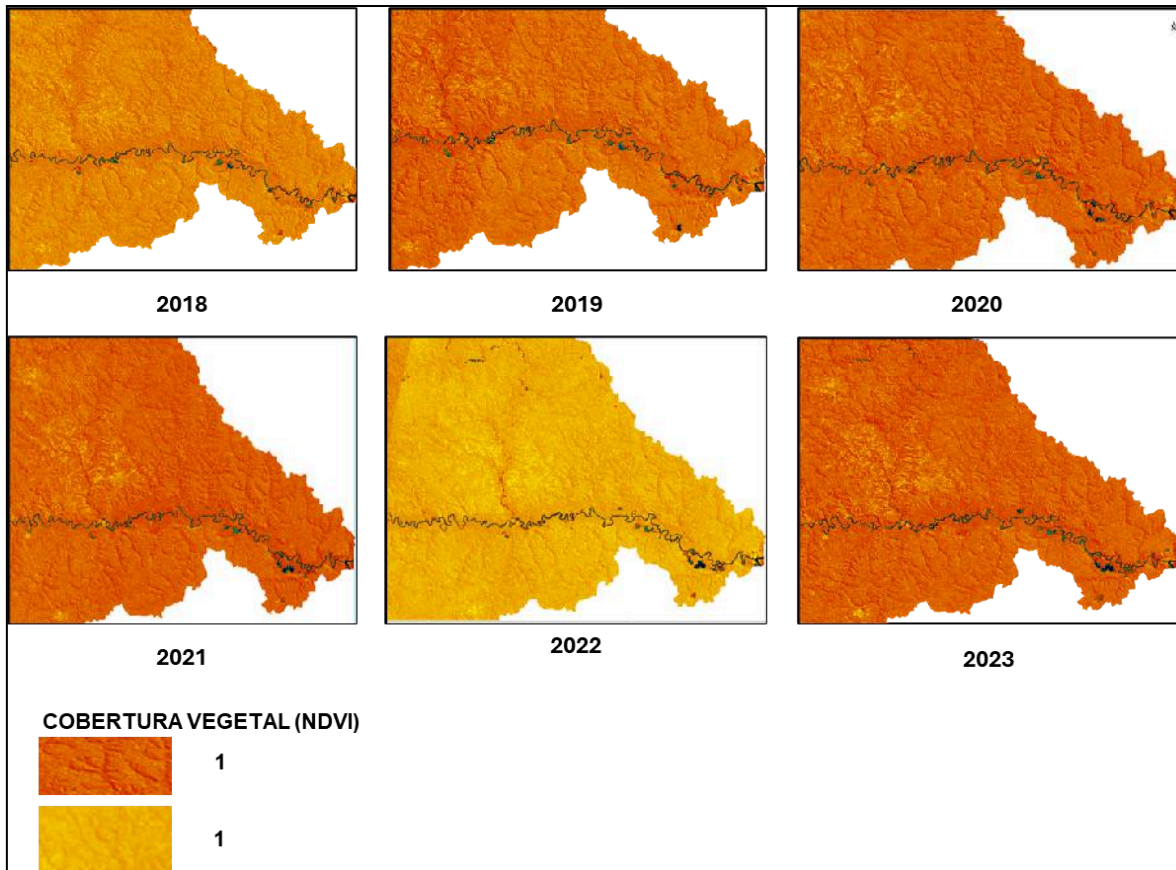


Figura 12: Cambios temporales de la cobertura vegetal de la zona de Boca Pariamanu - parte baja

En la figura 12, se muestra la variación multitemporal de la cobertura vegetal entre los años 2018 y 2023. Los valores binarios utilizados (1 y 0) corresponden a la presencia (1) o ausencia (0) de vegetación, donde las áreas clasificadas como 0 representan suelos desnudos o zonas impactadas por minería ilegal y otras actividades antrópicas.

Durante el periodo analizado, se observa que las áreas boscosas no presentaron variaciones abruptas, manteniéndose relativamente estables en términos de cobertura. La identificación de estas áreas se realizó mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Anexo 04) y fue complementada con una clasificación no supervisada (ISODATA), utilizando imágenes satelitales Landsat 8 y 9 - Collection 2, Nivel 2 (L2), las cuales ya cuentan con corrección atmosférica y reflectancia de superficie, garantizando

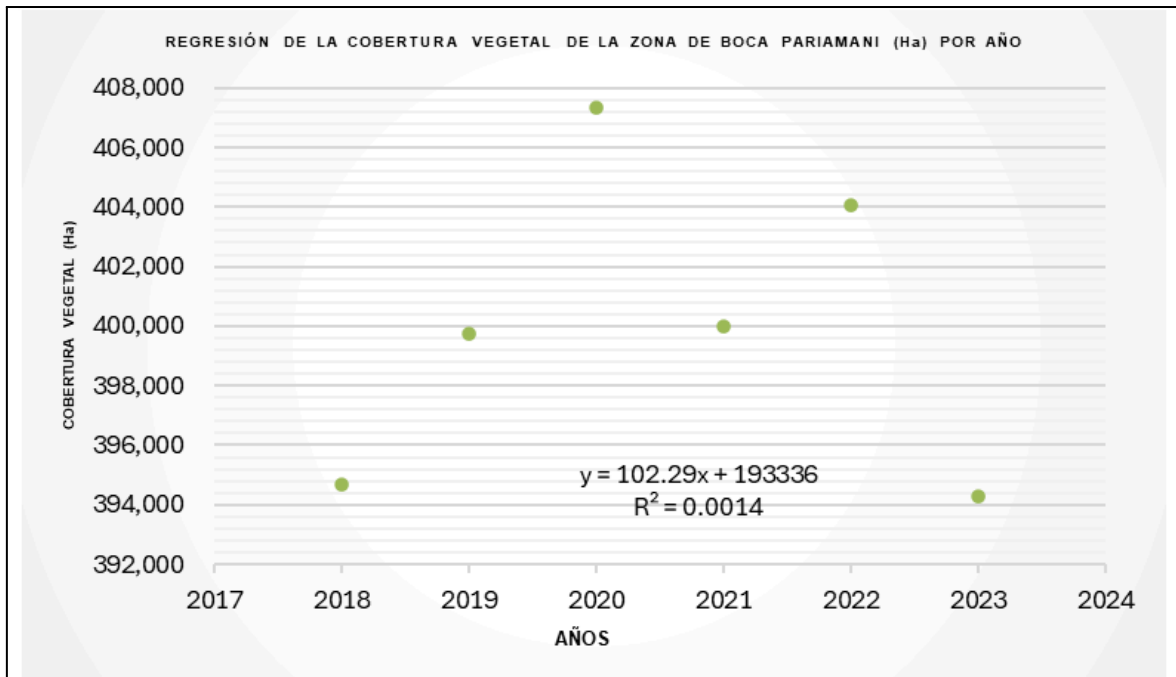


Figura 13: Regresión lineal de la cobertura vegetal , con respecto al tiempo.

En la figura 13, se muestra la relación entre la cobertura vegetal y el tiempo en la zona de Boca Pariamanu, durante el periodo 2018–2023. La ecuación de regresión presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.0014$, lo cual indica que sólo el 0.14 % de la variabilidad en la cobertura vegetal se explica por el paso del tiempo. Esto demuestra que no existe una tendencia significativa, y que la cobertura vegetal se ha mantenido relativamente constante a lo largo del periodo evaluado.

Tabla 15: Pruebas de normalidad para la variable NDVI - Cobertura Vegetal

Normalidad de la Cobertura Vegetal mediante (Shapiro-Wilk)

Variable	Statistic	p-value
NDVI - Cobertura Vegetal	0.8685	0.2514

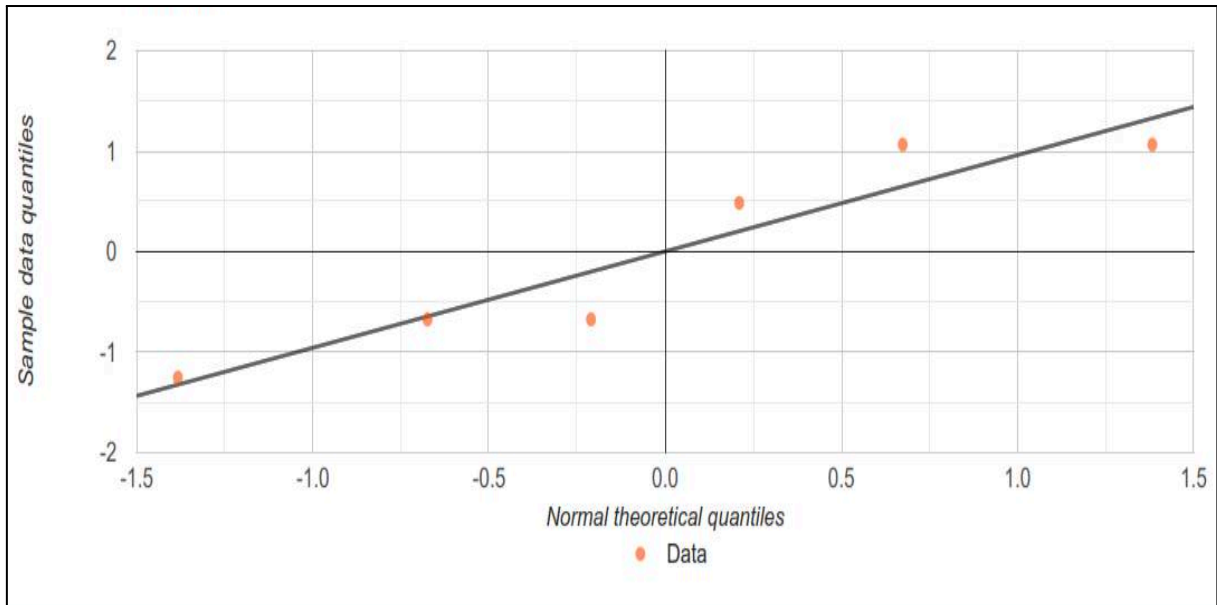


Figura 14: Gráfico de Normalidad para la variable de Cobertura Vegetal - Zona Boca Pariamanu

En la tabla 15 y figura 14 se presenta el resultado de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, aplicada a los valores medios anuales del NDVI en la zona de Boca Pariamanu. El estadístico obtenido fue $W = 0.8685$ con un $p\text{-valor} = 0.2514$. Dado que el valor p es mayor al nivel de significancia de 0.05, se acepta la hipótesis nula de normalidad. Por tanto, se concluye que los valores del NDVI se distribuyen normalmente con un nivel de confianza del 95 %.

4.2. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA TASA ANUAL DE DEFORESTACIÓN Y SUS EFECTOS COLATERALES POR ACTIVIDAD MINERA EN BOCA PARIAMANU ENTRE LOS AÑOS 2018 Y 2023.

Para determinar la tasa anual de deforestación en la zona de Boca Pariamanu durante el periodo 2018–2023, se utilizó un enfoque cuantitativo basado en imágenes satelitales Landsat 8 y 9, aplicando el análisis multitemporal del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). El procesamiento de las imágenes se realizó mediante el software ENVI 5.3, delimitando las áreas con cobertura vegetal a partir de un umbral de $NDVI > 0.3$ (Anexo 05), correspondiente a zonas con vegetación densa o moderada. Posteriormente, se

calculó la tasa de cambio anual mediante la fórmula del crecimiento anual compuesto (CAGR), permitiendo evaluar la pérdida progresiva de cobertura forestal atribuida a la actividad minera informal en la región.

Este análisis multitemporal se complementa con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de clasificación no supervisada (ISODATA) (Anexo 06), utilizando ArcGIS 10.5 para la generación de mapas de deforestación acumulada, donde se identificaron los sectores más afectados por el avance de actividades extractivas. La representación espacial permitió visualizar la intensidad y extensión de la deforestación, así como su distribución respecto a cuerpos de agua, suelos expuestos y corredores mineros activos.

En cuanto a los impactos colaterales derivados de esta pérdida de cobertura vegetal, se aplicó el modelo de Análisis Jerárquico (AHP) para priorizar los efectos ecológicos más significativos. A través de matrices de comparación por pares y juicios expertos, se jerarquizaron criterios como la pérdida de hábitat, la fragmentación del ecosistema, el impacto sobre cuerpos de agua y la presencia de suelos degradados. Esta evaluación se integró al análisis geoespacial para definir zonas críticas de afectación ambiental.

La validación de los cambios detectados por sensores remotos fue complementada mediante una ficha de observación de campo (Anexo 09), la cual permitió contrastar los resultados satelitales con evidencia directa en la zona de estudio, fortaleciendo así la interpretación de los efectos colaterales derivados de la actividad minera.

Tabla 16: Cambios anuales en la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu (2018–2023)

Año	Cobertura Vegetal (Ha)	Cambio anual (Ha)	Tasa de cambio (%)
2018	394,674	—	—
2019	399,720	5,046	1.28%
2020	407,338	7,618	1.91%
2021	399,977	- 7,361	-1.81%
2022	404,052	4,075	1.02%
2023	394,263	-9,789	-2.42%

En la Tabla 16 se presenta la evolución anual de la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023. Durante el periodo 2018–2020 se evidencia una fase de expansión de la superficie vegetada, alcanzando su valor máximo en el año 2020. A partir de 2021 se observa una tendencia decreciente, con una pérdida acumulada que culmina en el año 2023 con $-9,789$ ha, lo cual revela un patrón bifásico caracterizado por una fase inicial de recuperación seguida de una contracción asociada a la intensificación de la actividad minera informal.



Figura 15: Evolución de la cobertura vegetal (2018 - 2023)

La figura 15, muestra la evolución espacial de la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu durante el periodo 2018–2023. Cada año se visualiza en forma diferenciada, lo cual permite identificar los sectores donde se produjo recuperación o pérdida de vegetación, asociada a la intensificación de la actividad minera informal de la zona.

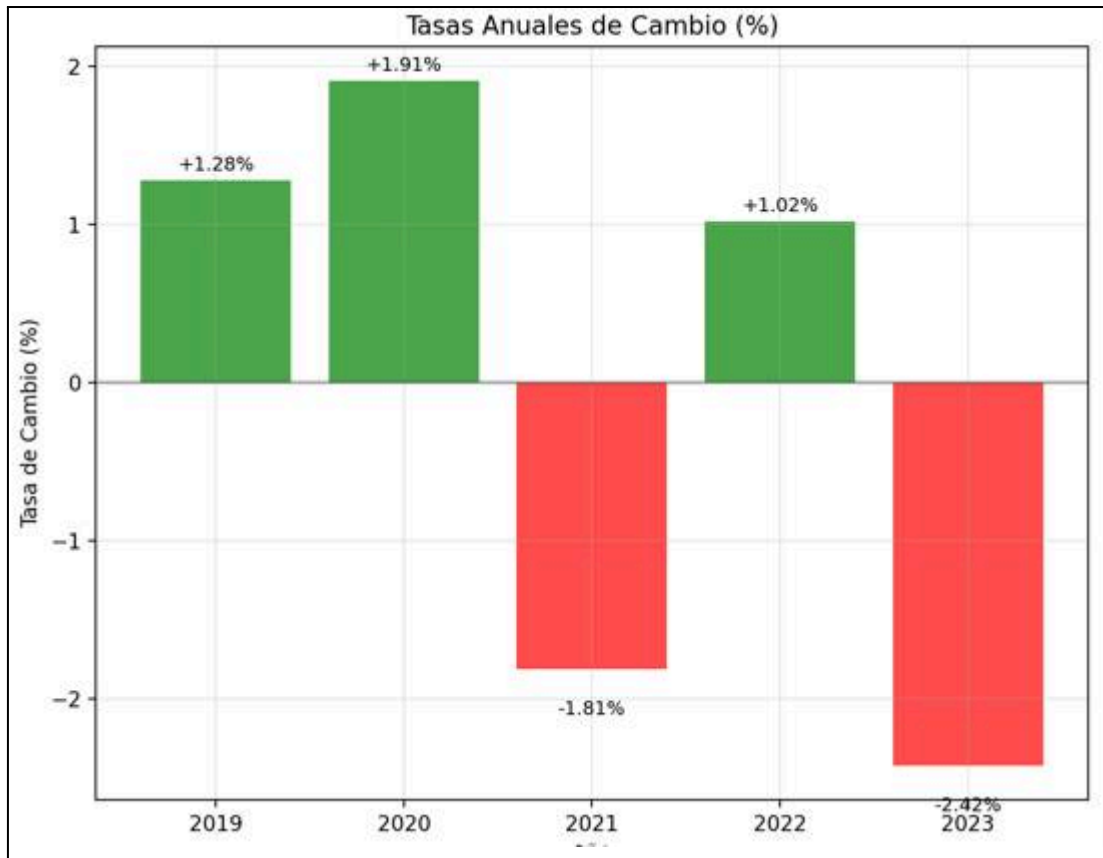


Figura 16: Gráfico de tasa de cambio en los periodos del 2018 - 2023

En la figura 16, se muestra la tasa porcentual de cambio anual en la cobertura vegetal, calculada a partir del NDVI. El comportamiento refleja un incremento positivo en los primeros años, alcanzando un pico en 2020 (1.91 %), y una caída significativa en 2023 (–2.42 %). Estos resultados confirman la tendencia decreciente de cobertura vegetal durante el periodo reciente.

Tabla 17: Tasa anual de deforestación en la zona de Boca Pariamanu (2018–2023)

Periodo evaluado	Superficie inicial (ha)	Superficie final (ha)	Tasa anual de deforestación (CAGR %)
2018–2023	394,674	394,263	–0.0208 %

Con el fin de estimar el ritmo de pérdida forestal, se calculó la tasa anual compuesta de deforestación (CAGR), obteniéndose un valor de –0.0208 % entre los años 2018 y 2023.

Esta tasa, aunque moderada, refleja una reducción sostenida del área boscosa durante el periodo evaluado. Si bien se registraron aumentos puntuales en la vegetación, especialmente en los años 2019 y 2020, estos fueron contrarrestados por descensos significativos en 2021 y 2023, configurando una tendencia general ligeramente decreciente. Esta dinámica se refleja en la disminución del porcentaje de áreas con vegetación densa ($NDVI > 0.3$) y el aumento de zonas clasificadas como sin vegetación o con vegetación dispersa, particularmente en sectores cercanos a zonas de intervención minera informal, lo cual sugiere una relación directa entre esta actividad extractiva y la pérdida progresiva de cobertura vegetal. Estos resultados coinciden con los hallazgos de (Chumpe, 2022), quien, en el distrito de Espinar (Cusco), reportó una pérdida anual de 345.2 ha de cobertura vegetal, explicada en un 60.5% por la expansión minera, especialmente la mina Antapaccay. Del mismo modo, los hallazgos son consistentes con (Espinoza, 2022), quien evidenció un deterioro progresivo de la cobertura vegetal en la provincia de Chumbivilcas, con una pérdida de hasta 52.4 ha/año en coberturas ligeras, también asociadas a las actividades mineras

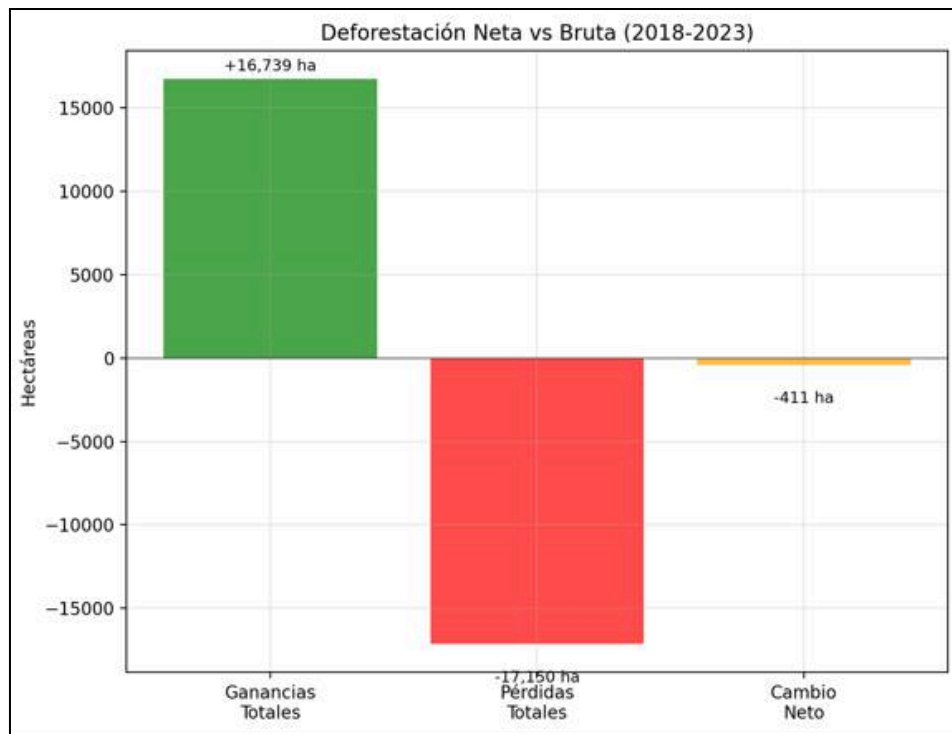


Figura 17: Gráfico de Deforestación Neta y bruta entre los periodos 2018 - 2023

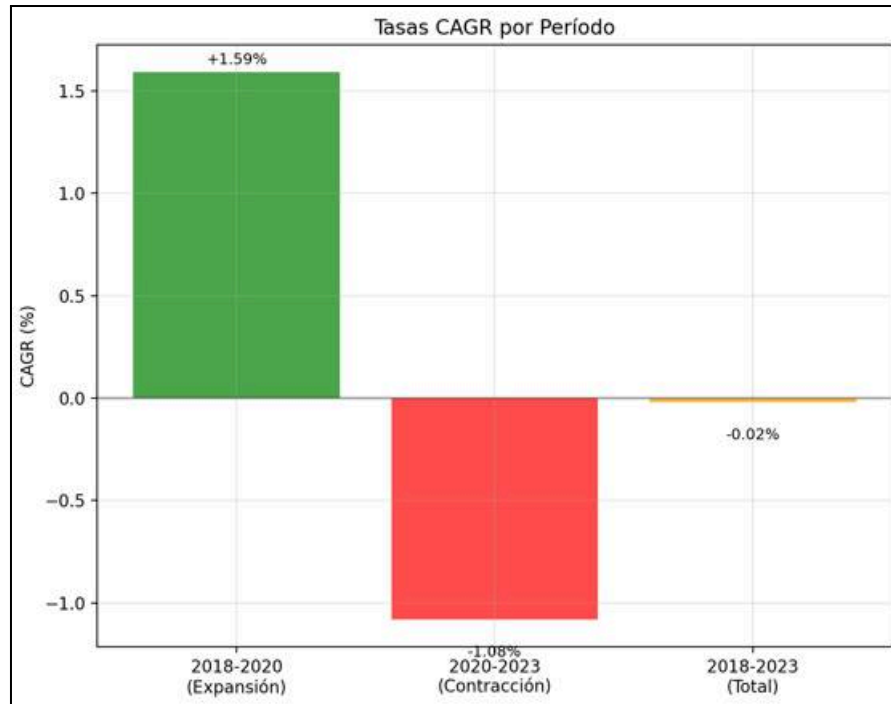


Figura 18: Tasa de deforestación acumulada (CAGR) en Boca Pariamanu entre 2018 y 2023

En la Figura 17 y Figura 18 se sintetiza el comportamiento de la deforestación en la zona de Boca Pariamanu durante el periodo 2018–2023. La Figura 17 muestra los valores consolidados de las tasas de deforestación neta y bruta, revelando una tasa neta anual (CAGR) de -0.0208% , equivalente a una pérdida mínima de 411 ha en cinco años. Este cambio resalta la intensificación de la minería informal y refuerza la utilidad del análisis multitemporal con NDVI como herramienta para detectar estos procesos acelerados de transformación del paisaje forestal. Sin embargo, la tasa bruta anual alcanzó las 6,778 ha por año, lo que indica una dinámica más activa de pérdida y recuperación, probablemente influenciada por factores estacionales o actividades de regeneración natural. Asimismo, se identificó una alta volatilidad interanual, con una desviación estándar de $\pm 1.97\%$, reflejando oscilaciones marcadas entre los años evaluados.

Por su parte, la Figura 18 expone el patrón bifásico de la deforestación observado en el área. Entre 2018 y 2020 se registra una fase de expansión de la cobertura vegetal, con una

tasa positiva de +1.59 % anual, mientras que entre 2020 y 2023 se evidencia una contracción con una tasa negativa de -1.08 % anual. Esta alternancia sugiere que el proceso de deforestación no fue lineal, sino que respondió a presiones variables posiblemente relacionadas con cambios socioeconómicos, intensificación de la minería informal o variaciones en la política ambiental local. El año 2023 destaca como el de mayor pérdida registrada (-9,789 ha), mientras que 2020 presentó el mayor incremento de vegetación (+7,618 ha), reforzando la idea de un comportamiento dinámico y no uniforme en la cobertura forestal.

Evaluación de los efectos colaterales por deforestación minera

Además de los cambios cuantitativos en la cobertura vegetal, el análisis multitemporal en la clasificación no supervisada evidenció diversos impactos colaterales derivados de la actividad minera informal, los cuales afectan significativamente al ecosistema de la zona de Boca Pariamanu. En particular, se detectaron patrones de pérdida de vegetación en zonas ecológicamente sensibles, como cuerpos de agua, áreas de transición ribereña y sectores con suelos expuestos. La interpretación de estas alteraciones se apoya en las imágenes mostradas a continuación, donde se destaca la ubicación y extensión de los impactos ambientales directos e indirectos.

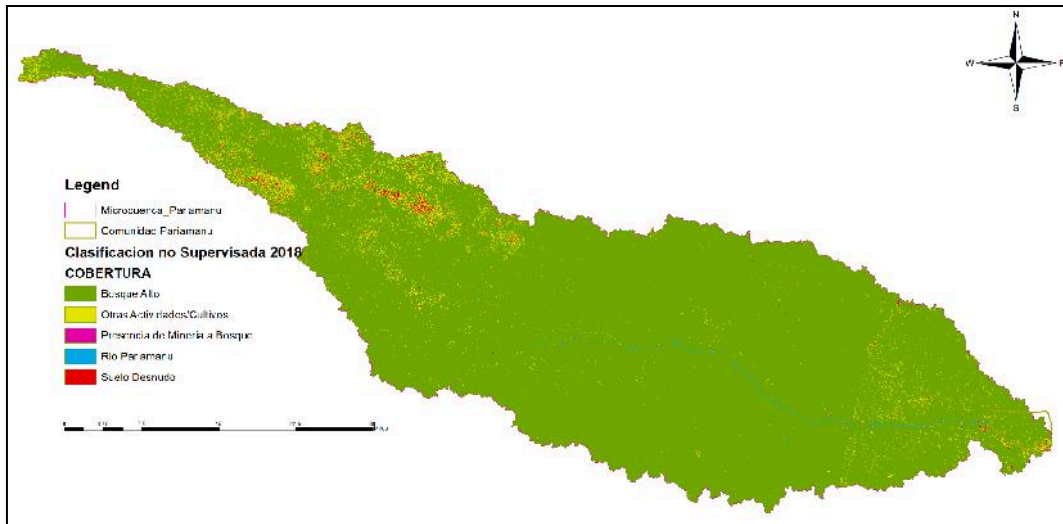


Figura 19: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2018.

Presencia de actividad minera

Predomina la cobertura vegetal; se identifica una presencia reducida de actividad minera (0.04 %), suelo desnudo (0.36 %) y áreas dedicadas a otras actividades o cultivos de castaña (3.18 %).

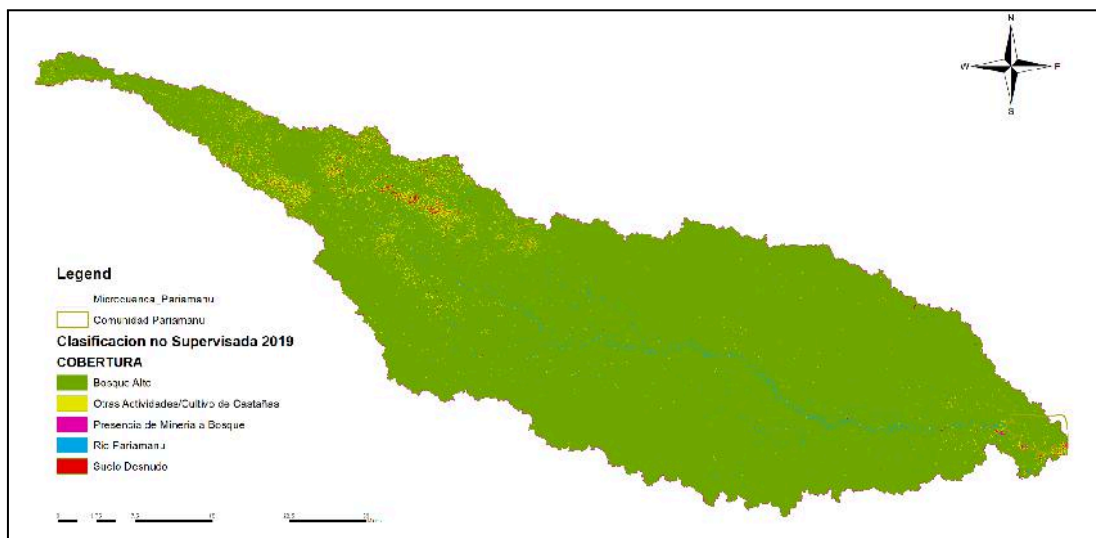


Figura 20: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2019.

Se mantiene la dominancia de cobertura vegetal, con una leve disminución del suelo desnudo (0.21 %), actividad minera (0.03 %) y otras actividades o cultivos (1.77 %).

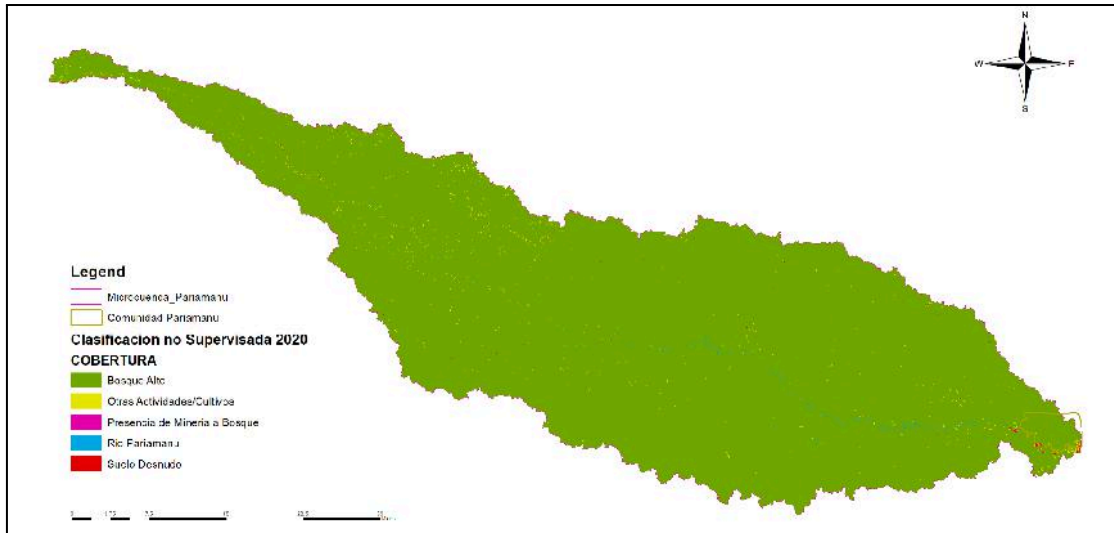


Figura 21: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2020.

Se observa un descenso significativo del suelo desnudo (0.06 %), actividad minera (0.02 %) y otras actividades o cultivos (0.48 %), en correlación con el mayor incremento de cobertura vegetal registrado ese año.

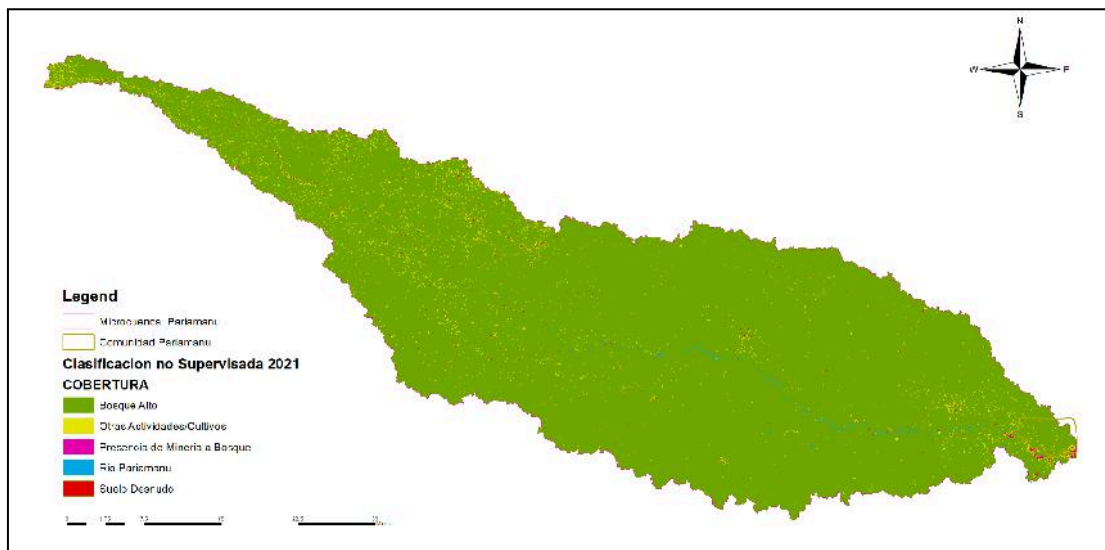


Figura 22 : Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2021.

Aumenta la presencia de actividad minera (0.07 %), suelo desnudo (0.21 %) y otras actividades o cultivos (1.97 %), evidenciando un repunte de las presiones extractivas en la zona.

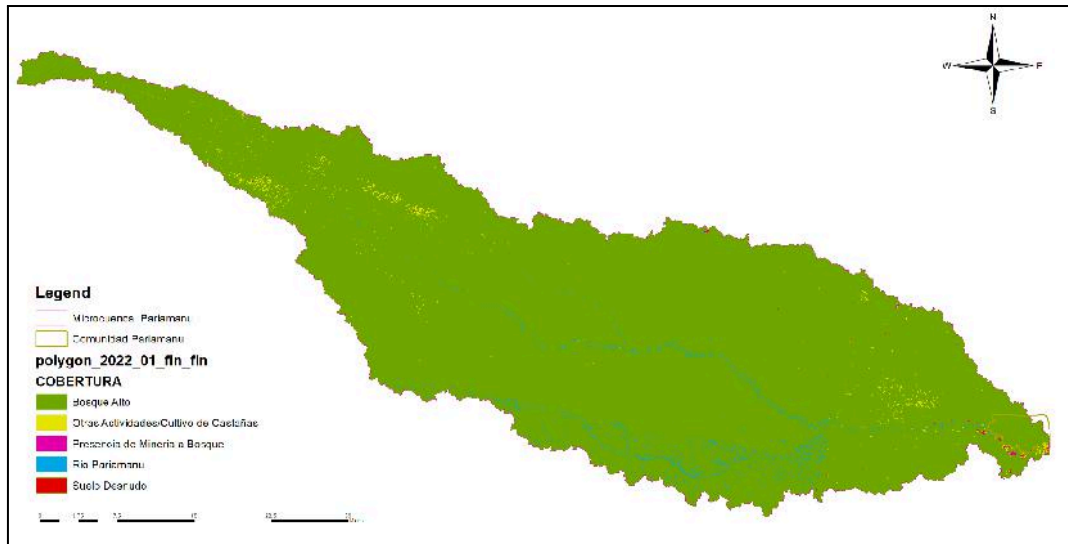


Figura 23: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2022.

La superficie de suelo desnudo se incrementa a 0.4 %, mientras que la actividad minera se reduce a 0.04 % y otras actividades o cultivos se sitúan en 0.54 %.

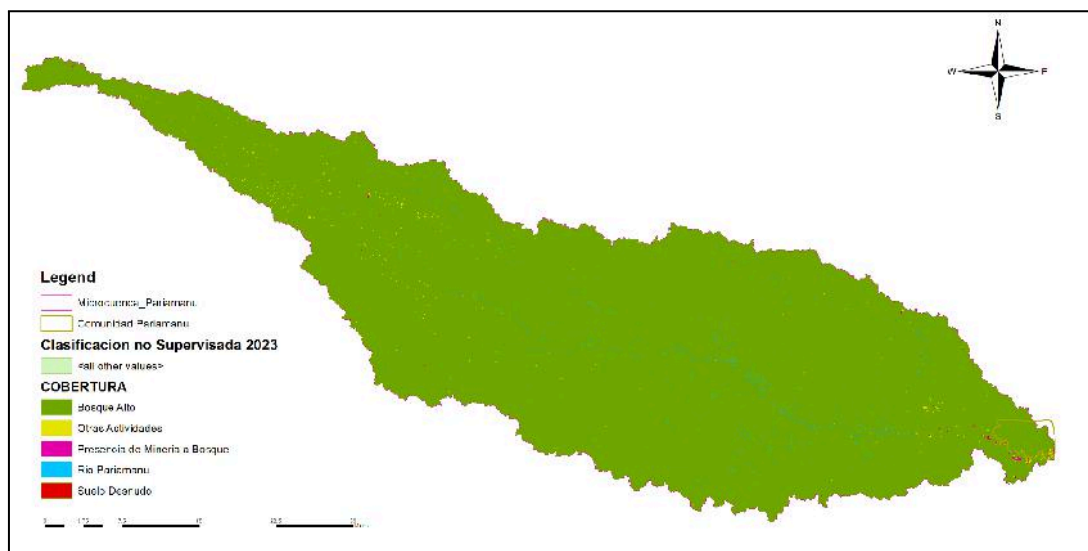


Figura 24: Uso de suelo en la Zona de Boca Pariamanu - Madre de dios, año 2023.

Se mantiene el suelo desnudo en 0.4 %, la actividad minera en 0.04 % y otras actividades o cultivos en 0.23 %, coincidiendo con el mayor valor de pérdida de cobertura vegetal observado en todo el periodo.

Las Figuras 19 a 24 permiten identificar un patrón de transformación progresiva del uso del suelo en la zona de Boca Pariamanu durante el periodo 2018–2023. Se evidencia una

disminución interanual de la cobertura vegetal, acompañada por un incremento de áreas clasificadas como suelo desnudo y de presencia minera, con mayor énfasis en los años 2021 y 2023. Asimismo, se observan fluctuaciones en las áreas dedicadas a cultivos y otras actividades extractivas, como la tala y la recolección de castaña. Este comportamiento respalda la hipótesis de que la minería informal constituye un factor determinante en la alteración del paisaje, generando impactos colaterales que trascienden la pérdida de vegetación, tales como la exposición del suelo, la interrupción de flujos hídricos y la fragmentación del ecosistema. Estos hallazgos son coherentes con lo reportado por Gamarra (2023), quien, utilizando métodos supervisados como el algoritmo Random Forest, identificó patrones similares de degradación en zonas con alta presión antrópica.

Tabla 18: Distribución de Coberturas con Evidencia de Alteración Antrópica (2018–2023)

Año	Superficie total (ha)	Porcentaje (%)
2018	14 716.45	3.59
2019	8 244.69	2.01
2020	2 289.16	0.56
2021	9 211.83	2.25
2022	2 550.28	0.62
2023	1 241.64	0.30
TOTAL	38 254.05	9.33

La tabla 18, presenta la superficie y el porcentaje anual correspondientes a zonas con actividad minera, suelo desnudo y otras actividades entre 2018 y 2023. Los valores más altos se registran en 2018 (14,716.45 ha) y 2021 (9,211.83 ha), mientras que 2023 muestra la cifra más baja (1,241.64 ha). En conjunto, estas coberturas abarcan el 9.33 % del área evaluada, reflejando una presión antrópica significativa sobre el ecosistema de Boca Pariamanu.

Tabla 19: Cambios anuales en superficie minera en Boca Pariamanu (2018–2023)

Año	Superficie minera	Cambio	Observación
	(ha)	interanual (ha)	
2018	167.23	—	Año base
2019	120.69	–46.54	Disminución
2020	64.80	–55.89	Disminución
2021	271.99	207.19	Aumento significativo (pico)
2022	181.12	–90.87	Disminución moderada
2023	148.08	–33.04	Disminución leve
Total pérdida neta (2018–2023)	–19.15 ha	—	Tendencia general de reducción
Promedio anual	—	–3.83 ha/año	Reducción neta promedio anual

La tabla 19, muestra la evolución anual de la superficie asociada a actividad minera en la zona de Boca Pariamanu, calculada a partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales. Entre los años 2018 y 2020 se observó una reducción sostenida de la superficie minera, seguida de un repunte en 2021, y una nueva disminución hacia 2023. El balance neto indica una pérdida de 19.15 ha en cinco años, equivalente a una disminución promedio

anual de 3.83 ha. Este patrón no lineal evidencia la volatilidad en la expansión minera informal, con incrementos puntuales y descensos posteriores, lo cual concuerda con la naturaleza intermitente de estas actividades en la zona. Estos resultados discrepan parcialmente con lo reportado por (Huacac, 2022), quien estimó una pérdida promedio anual de 9.85 ha asociada exclusivamente a actividad minera entre 2010 y 2020 en la microcuenca del río Pariamanu. Esta diferencia puede atribuirse a la naturaleza intermitente de la minería informal, así como a diferencias metodológicas en el tratamiento de imágenes, resolución temporal y definición de unidades mineras.

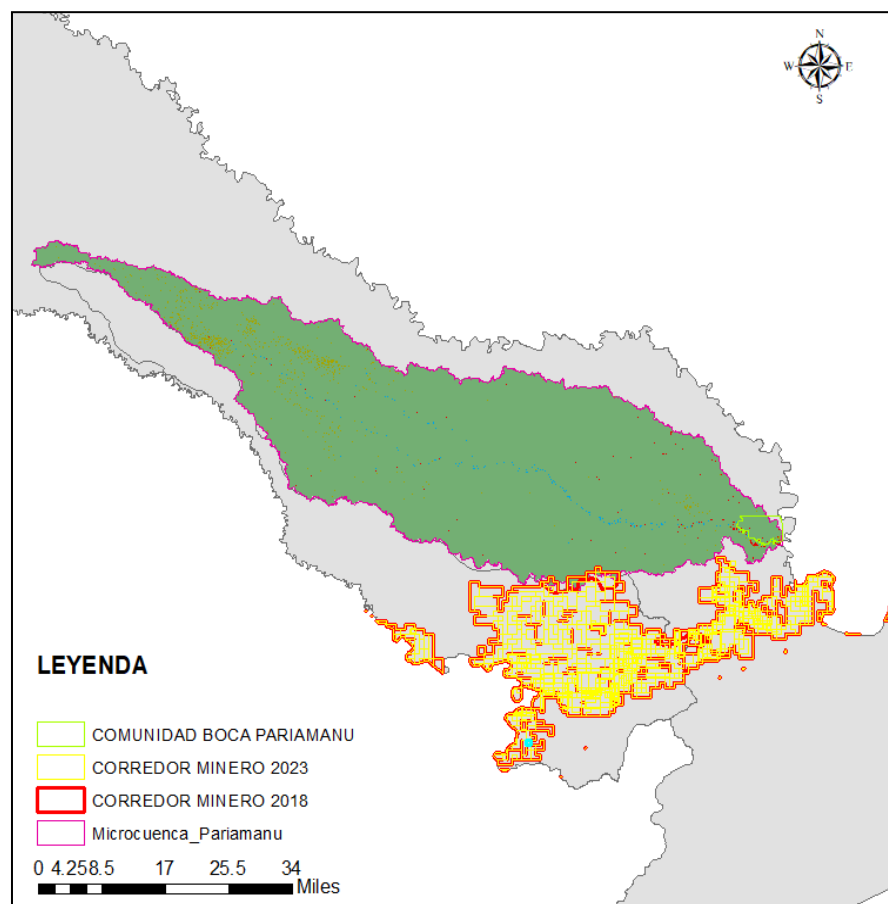


Figura 25: Comparación espacial del corredor minero en la zona de Boca Pariamanu: años 2018 - 2023

La imagen 25, muestra la evolución espacial del corredor minero informal en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023. Se aprecia una expansión visible de las zonas afectadas por actividades extractivas, con un avance desde focos dispersos en 2018 hacia

áreas más amplias y continuas en 2023. Esta transformación confirma un patrón progresivo de presión minera sobre el territorio, afectando principalmente áreas de cobertura vegetal densa y zonas ribereñas. La comparación respalda los análisis multitemporales realizados mediante NDVI y clasificación no supervisada.

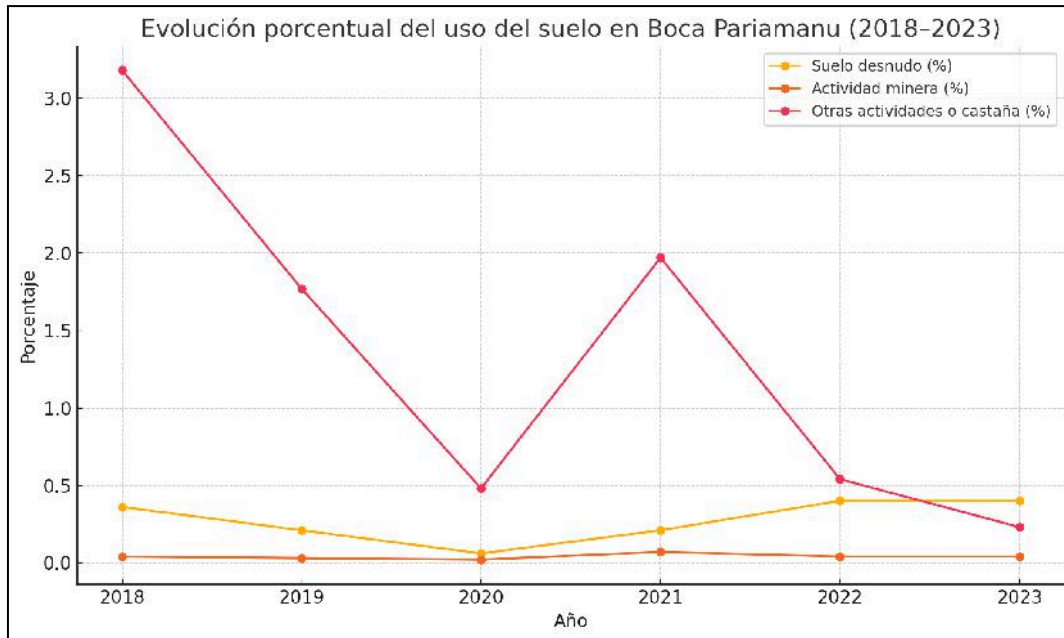


Figura 26: Distribución porcentual del uso del suelo en Boca Pariamanu (2018 y 2023)

La figura presenta la variación porcentual en tres tipos de cobertura de suelo en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023. En 2018, predominó una baja incidencia de alteraciones: el suelo desnudo representó el 0.36 %, la actividad minera el 0.04 % y otras actividades o cultivos, como la recolección de castaña, el 3.18 %. Para 2023, se observa una ligera reducción en la categoría de otras actividades (0.23 %) y un aumento sostenido del suelo desnudo (0.4 %), mientras que la actividad minera se mantiene constante (0.04 %). Estos cambios reflejan una tendencia de transformación progresiva del uso del suelo, asociada principalmente a presiones extractivas y a procesos de deforestación. La información respalda la hipótesis del estudio sobre el impacto ambiental de la minería informal en la zona.

Aplicación del modelo AHP para priorización de impactos ambientales colaterales

Como complemento al análisis multitemporal del uso del suelo y la cobertura vegetal, se aplicó el método de Análisis Jerárquico de Proceso (AHP) con el fin de establecer una ponderación objetiva de los efectos colaterales asociados a la actividad minera informal en la zona de Boca Pariamanu. Esta técnica, propuesta por Thomas Saaty, permite estructurar problemas complejos en niveles jerárquicos y asignar valores cuantitativos a partir de comparaciones entre pares, basadas en criterios expertos. En este caso, se seleccionaron cinco variables de impacto ambiental identificadas a partir del procesamiento geoespacial, observación en campo y revisión documental:

Nº	Criterio
V1	Pérdida de hábitat
V2	Fragmentación del ecosistema
V3	Afectación a cuerpos de agua
V4	Degradación del suelo
V5	Presión minera creciente

Tabla 20: Matriz de comparación por pares entre criterios (según escala de Saaty)

	V1	V2	V3	V4	V5	Wi	Ci	LAMDAi
V1	1	3	2	4	3	2.352	40.2%	0.972
V2	1/3	1	1/2	2	1	0.803	13.7%	1.029
V3	1/2	2	1	3	2	1.431	24.5%	1.060
V4	1/4	1/2	1/3	1	1/2	0.461	7.9%	0.946
V5	1/3	1	1/2	2	1	0.803	13.7%	1.029
PROME DIO	2.417	7.5	4.333	12	7.5	5.850	100	5.036

La tabla 20, refleja las valoraciones relativas entre cada par de variables, basadas en juicio experto. Se utilizó la escala de Saaty (1–9) para indicar el grado de importancia de una variable respecto a otra. La tabla muestra los pesos relativos obtenidos tras la normalización de la matriz de comparación. La variable con mayor peso es la pérdida de hábitat (40.2%), lo cual indica su alta relevancia en la afectación ambiental. Le sigue la afectación a cuerpos de agua (24.5%), que evidencia la influencia minera en zonas hídricas vulnerables. Fragmentación del ecosistema y Presión minera creciente comparten un mismo peso (13.7%), reflejando impactos significativos pero secundarios. Por último, la "Degradación del suelo" presenta el menor peso (7.9%), aunque sigue siendo relevante en el análisis integral del paisaje.

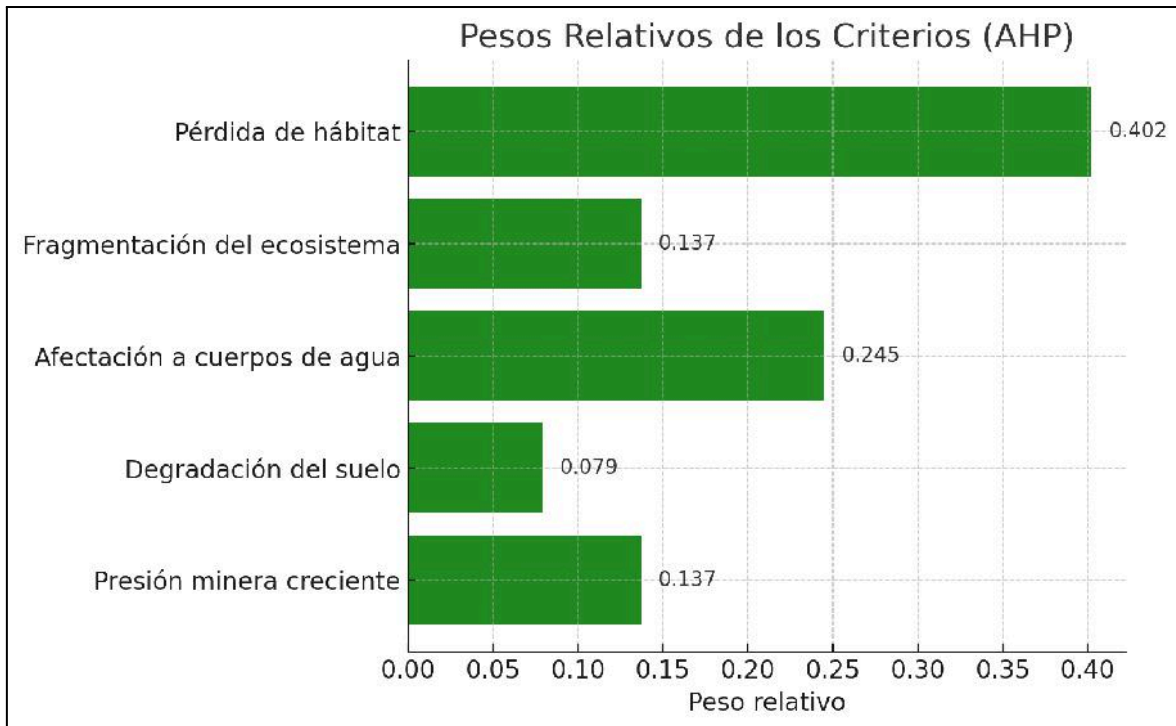


Figura 27: Cálculo del peso relativo (W_i)

Este cálculo permite establecer prioridades de atención ambiental, orientando los esfuerzos de mitigación hacia los impactos más significativos identificados en la zona de estudio, como la pérdida de cobertura vegetal y la alteración de ecosistemas acuáticos.

Tabla 21: Indicadores de consistencia del modelo AHP- en la Zona de Boca Pariamanu

INDICADOR	C_i	R_{ci}	CR
VALOR	0,009	1,12	0,008

Los indicadores de consistencia permiten validar la coherencia lógica de los juicios realizados en la matriz comparativa. En este caso, el valor de CR es 0.008, lo que indica que el modelo AHP es altamente consistente y por tanto sus resultados son confiables. Relación de consistencia ($CR < 0.1$ es aceptable). Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Kayet et al. (2021), quienes en la región forestal de Saranda (India) identificaron una pérdida de más de 4,190 ha debido a la minería ilegal, usando también NDVI como indicador. Ambos estudios evidencian que la deforestación asociada a

actividades extractivas sigue un patrón progresivo, detectable mediante análisis multitemporal con imágenes satelitales.

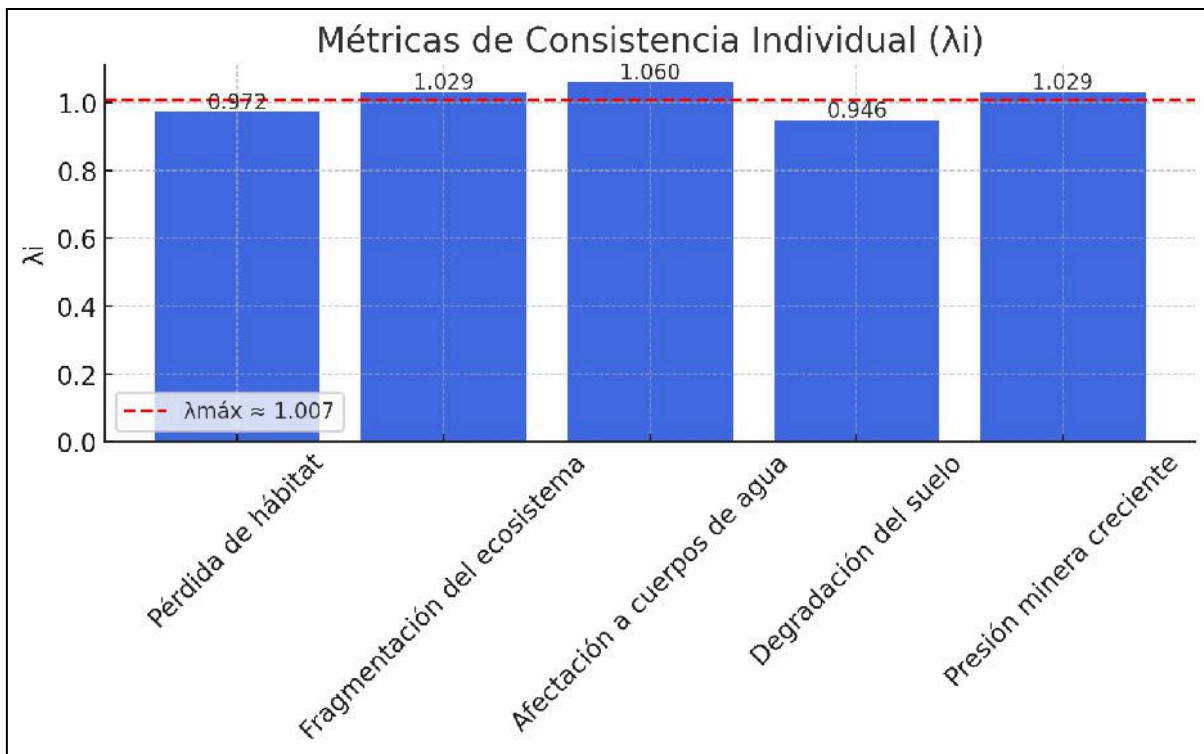


Figura 28: Métricas de consistencia individual (λ_i) de los criterios evaluados en el modelo AHP

La tabla 21 y figura 28 presentan los indicadores que validan la coherencia lógica del modelo AHP aplicado al análisis de impactos colaterales por actividad minera en la zona de Boca Pariamanu. El índice de consistencia ($CI = 0.009$) y la razón de consistencia ($CR = 0.008$) se encuentran por debajo del umbral aceptado de 0.1, lo cual confirma que los juicios emitidos en la matriz comparativa son consistentes y confiables. La figura muestra los valores individuales de λ_i para cada criterio, los cuales se aproximan al valor ideal de 1. Esto indica que no existen desviaciones significativas en las comparaciones por pares a nivel de cada variable, reforzando así la robustez y la validez del modelo jerárquico propuesto. En conjunto, ambos elementos demuestran que los pesos obtenidos en el AHP representan adecuadamente la influencia relativa de cada factor en la afectación ambiental de la zona.

4.3. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS

Criterio de decisión:

P-valor $\leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (HN) y se acepta la hipótesis alternativa (HA).

P-valor $> \alpha$, se acepta la hipótesis nula (HN) y se rechaza la hipótesis alternativa (HA).

Se define que la hipótesis nula (HN) y la hipótesis alternativa (HA) se evaluaron considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, equivalente a un nivel de confianza del 95 %. Este criterio se aplicó empleando los valores obtenidos a través de un análisis de regresión lineal en Microsoft Excel, junto con las tasas de deforestación respaldadas por el análisis multitemporal y el método jerárquico AHP.

4.3.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 1.

Formulación de la hipótesis estadística:

- HA: El cambio del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023 es estadísticamente significativo.
- HN: El cambio del índice NDVI en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023 no es estadísticamente significativo.

Resultado de la prueba de hipótesis:

En la Figura 13 se muestra la regresión lineal simple entre los valores anuales del NDVI y los años del periodo 2018–2023. El análisis arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.0014$ y un p-valor = 0.9441, el cual es mayor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, lo que indica que no existe una relación estadísticamente significativa entre el año y los valores del NDVI durante el periodo evaluado. Por otro lado, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los valores del NDVI (ver Tabla 15 y Figura 14) obtuvo un p-valor = 0.2514, superior al umbral de significancia de 0.05. Esto indica que los datos presentan una distribución normal, lo que valida la aplicación de análisis estadísticos de tipo paramétrico en el estudio.

Hipótesis Alternativa = El cambio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023 es estadísticamente significativo.

4.3.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 2.

Formulación de la hipótesis estadística:

- Hipótesis Alternativa (H_1): La actividad minera tiene relación significativa con la tasa de deforestación y genera impactos colaterales ambientales en la zona de Boca Pariamanu.
- Hipótesis Nula (H_0): La actividad minera no tiene relación significativa con la tasa de deforestación ni genera impactos colaterales importantes en la zona de Boca Pariamanu.

Resultado de la prueba de hipótesis:

En la Tabla 17 y la Figura 18 se muestra el comportamiento multitemporal de la cobertura vegetal en la zona de Boca Pariamanu, evaluado mediante el cálculo de la tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR). El resultado obtenido fue de -0.0208% , equivalente a una pérdida neta acumulada de 411 ha entre los años 2018 y 2023. Esta reducción sostenida de la cobertura forestal fue más notoria en los años 2021 y 2023, coincidiendo con un incremento en la presión minera, como se observa en la comparación espacial de uso de suelo (Figuras 19 a 24). Además, se aplicó una clasificación no supervisada del uso de suelo, integrando imágenes Landsat y el índice NDVI ($NDVI > 0.3$), procesados con los softwares ENVI 5.3, ArcGIS 10.5, Excel y Python 3.11, lo cual permitió identificar áreas de transformación progresiva de vegetación a suelo desnudo y zonas de actividad minera. Esta clasificación fue validada mediante una ficha de observación de campo y análisis geoespacial, reforzando la fiabilidad de los resultados. En relación con la actividad minera, los datos muestran una evolución intermitente: de 167.23 ha en 2018, la superficie disminuyó hasta 64.80 ha en 2020, con un repunte en 2021 (271.99 ha) y una posterior reducción a 148.08 ha en 2023. En conjunto, se evidenció una pérdida neta de 19.15 ha en el periodo 2018–2023, con una reducción promedio anual de 3.83 ha, lo que respalda la asociación entre la actividad minera y la pérdida de cobertura vegetal.

Complementariamente, se implementó el modelo de Análisis Jerárquico de Proceso (AHP) para jerarquizar los principales impactos colaterales ambientales. La Tabla 19 y la Figura 24 presentan los pesos relativos asignados a cinco criterios: pérdida de hábitat (40.2 %), afectación a cuerpos de agua (24.5 %), fragmentación del ecosistema (13.7 %), degradación del suelo (7.9 %) y presión minera creciente (13.7 %). El índice de razón de consistencia obtenido fue de $CR = 0.008$, valor dentro del rango aceptable ($CR < 0.1$), lo que valida la coherencia interna de los juicios comparativos emitidos. En síntesis, los resultados reflejan una disminución progresiva de la cobertura vegetal, acompañada de impactos ambientales colaterales que afectan de forma significativa al ecosistema local, especialmente en zonas ribereñas y áreas de transición ecológica. La expansión intermitente de la minería informal y los cambios observados en el uso del suelo permiten establecer una relación clara y consistente entre la actividad minera y el proceso de deforestación en la zona de estudio.

Hipótesis alterna: La actividad minera desarrollada entre los años 2018 y 2023 tiene una relación significativa con la deforestación en la zona de Boca Pariamanu, generando impactos colaterales ambientales medibles, como la pérdida de hábitat, la afectación a cuerpos de agua y la fragmentación del ecosistema.

Tabla 22: Correlaciones de las variables independientes y dependientes

Análisis aplicado	Variable(s) evaluada(s)	Resultado	Interpretación
Regresión lineal	Año vs. Área vegetada (NDVI > 0.3)	p = 0.9441	No existe relación estadísticamente significativa
Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)	NDVI (2018–2023)	p = 0.2514	Los datos presentan distribución normal
Tasa anual compuesta (CAGR)	Cobertura vegetal total	–0.0208 %	Pérdida acumulada de 411 ha en el periodo
Análisis jerárquico (AHP)	5 criterios de impacto colateral	CR = 0.008	Modelo válido (coherencia estadística aceptable)

CONCLUSIONES

PRIMERA: Durante el periodo 2018–2023, la zona de Boca Pariamanu registró una pérdida total de 411 ha de cobertura vegetal, evidenciada mediante el análisis multitemporal con imágenes Landsat 8 y 9. Aunque algunos años presentaron ligeros incrementos de vegetación, estos fueron superados por pérdidas significativas, particularmente en 2021 y 2023. La tendencia general fue de disminución progresiva, aunque de baja magnitud, lo que confirma la presión continua de la actividad minera sobre el ecosistema boscoso de la zona de estudio.

SEGUNDA: El análisis de las áreas deforestadas mediante NDVI reveló una distribución normal de los valores anuales ($p = 0.2514$) y la ausencia de una tendencia lineal global, aunque se identificaron zonas críticas con regresión localizada, especialmente cercanas a focos de minería informal. La clasificación no supervisada permitió identificar cinco clases de cobertura, mostrando una reducción sostenida de áreas vegetadas. Además, se confirmó una correlación negativa entre el tiempo y la superficie forestal, evidenciando el retroceso de la vegetación frente al avance antrópico.

TERCERA: La evaluación de la tasa compuesta anual de deforestación reflejó un valor negativo de -0.0208% . Adicionalmente, se identificó una pérdida neta de 19.15 ha directamente asociadas a zonas de minería, con una pérdida promedio anual de 3.83 ha, lo cual demuestra que, si bien la deforestación total fue leve, su origen es atribuible en parte al avance de la minería informal. A través del modelo AHP se jerarquizaron los impactos colaterales asociados, identificando como principales afectaciones la pérdida de hábitat

(40.2%), la alteración de cuerpos de agua (24.5%) y la fragmentación del ecosistema (13.7%). El índice de razón de consistencia ($CR = 0.008$) validó la coherencia del modelo. Estos resultados permiten rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna, estableciendo una relación significativa entre la actividad minera, la deforestación y sus efectos colaterales en Boca Paríamanu.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda a las instituciones encargadas de la gestión ambiental en Madre de Dios y y otros departamentos del sur Peruano, implementar un sistema de monitoreo satelital continuo que utilice indicadores como el NDVI y herramientas SIG, con el fin de detectar a tiempo los focos de deforestación minera en zonas vulnerables como Boca Pariamanu y tomar medidas preventivas.

SEGUNDA: A partir del análisis multitemporal realizado, se recomienda a las autoridades regionales y locales establecer zonas de amortiguamiento ecológico en torno a áreas con alta presencia de minería informal, así como promover la restauración de las zonas degradadas, priorizando la reforestación con especies nativas que ayuden a recuperar la cobertura vegetal y conservar los corredores ecológicos.

TERCERA: A los investigadores y académicos interesados en la Amazonía sur, se les recomienda continuar desarrollando estudios con enfoque multitemporal y geoespacial en comunidades nativas y zonas de amortiguamiento, para ampliar el conocimiento sobre los efectos colaterales de la minería ilegal, incorporando modelos como el AHP para jerarquizar los impactos ambientales y sociales.

CUARTA: A la comunidad de Boca Pariamanu y zonas aledañas, se recomienda fortalecer los procesos de educación y sensibilización ambiental, enfocándose en la importancia de conservar la cobertura vegetal y los ecosistemas acuáticos, así como en generar prácticas sostenibles que reduzcan la dependencia directa de la minería informal, fomentando

alternativas económicas viables como la recolección de castaña, agroforestería y ecoturismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alva A., R. O., Briones, I. D. F., Hinsbi A., N. A. L., Ramírez V., C. A., Saravia I., J. F., Valverde A., S. L., y Malca C., N. R. C. (2023). Deforestación en Madre de Dios: Un infierno para la biodiversidad. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 26(51), e24189-e24189. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24189>
- Ariza, A., IGAC, y UNSPIDER. (2013). *Descripción y corrección de productos landsat 8 LDCM*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21308.44167>
- ARSET. (2023). NASA Air Quality-Focused Remote Sensing for EPA Applications | NASA Applied Sciences. <http://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-nasa-air-quality-focused-remote-sensing-epa-applications>
- Barba, R. D. (2019). Análisis prospectivo del proceso de deforestación en el sector la Pampa-Guacamayo, Tambopata—Madre de Dios, Periodo 1999 al 2030. *Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios - UNAMAD*. <http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/20.500.14070/415>
- Bullock, E. L. (2019). *Deforestation, degradation, and natural disturbance in the Amazon: Using a new monitoring approach to estimate area and carbon loss*.
- Caballero E., J., Messinger, M., Román-D., F., Ascorra, C., Fernandez, L. E., y Silman, M. (2018). Deforestation and Forest Degradation Due to Gold Mining in the Peruvian Amazon: A 34-Year Perspective. *Remote Sensing*, 10(12), 1903. <https://doi.org/10.3390/rs10121903>
- Calderón, L. (2022). *COORDINACIÓN, EDICIÓN Y COMPILACIÓN*. 2do, 12.
- CEJIS. (2022). *Minería aluvial del oro en el río Madre de Dios – CEJIS 2024* (N.º II; p. 28). Bolivia. <https://www.cejis.org/publicacion/mineria-aluvial-del-oro-en-el-rio-madre-de-dios/>

- Chumpe, J. M. (2022). Evolución temporal de la cobertura vegetal mediante el NDVI y su relación con la expansión minera en el distrito de Espinar durante el periodo 2013—2020. *Universidad Privada del Norte*.
<http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6382103>
- CMNUCC, y ONU. (2021). Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021.
<https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230418102109/https://ukcop26.org/>
- COFOPRI, y INEI. (2007). Boca Paríamanu | BDPI.
<https://bdpi.cultura.gob.pe/index.php/localidades/boca-pariamanu>
- CooperAcción. (2024). Más de 23 mil hectáreas de bosques perdidos por la minería—CooperAcción.
<https://cooperaccion.org.pe/mas-de-23-mil-hectareas-de-bosques-perdidos-por-la-mineria/>
- COP. (2021). Glasgow Leaders' Declaration on Forests and Land Use—UN Climate Change Conference (COP26).
<https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230418175226/https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/>
- Cruppe, M. (2021). *Joelma Diarroi de la Associação Povo Indígena Jiahui (APIJ), fotografiada en la Asociación de Defensa Etno-Ambiental Kanindé, ubicada en los alrededores de Porto Velho, Rondônia, Brasil*.
- DAR. (2020). Derecho, Ambiente y Recursos Naturales | DAR.ORG.PE. <https://dar.org.pe/>
- Decuyper, M., Chávez, R. O., Madelon Lohbeck, José A. Lastra, Nandika Tsendbazar, Julia Hackländer, Tor-G Vågen. (2022). Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112829.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112829>

Domingo, F. R., y Conde, F. (2023). PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE: CORRECCIONES.

https://personales.unican.es/rasillad/docencia/g174/7_preprocesamiento/correccion.html

Eckert, S., Schmid, L., Messerli, P., y Zaehring, J. G. (2024). 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*, 36, 101269.

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101269>

EIA, U. (2024). *Parcelando la Amazonía—EIA*. <https://eia.org/report/parcelando-la-amazonia/>

ERI. (2023). *Impactos del Cambio Climático sobre los pueblos indígenas de Madre de Dios*.

Recuperado de <https://earthrights.org/>

Espinoza, P. L. V. (2022). Influencia de la expansión minera Constancia sobre la cobertura vegetal durante el periodo 2010 – 2021 Cusco—Perú.

ESRI. (2018). Software de análisis de imágenes—ENVI.

<https://www.telematica.com.pe/plataforma/envi/>

ESRI. (2020). Impulsa la Modernización Digital de la Red Ahora.

https://mediaspace.esri.com/media/t/1_1rrjn3bq

FAO. (2000). *The state of food and agriculture, 2000* (p. 353). Roma: FAO.

<https://www.fao.org/common-pages/search/es/?q=FAO+2000>

FAO. (2022). *El estado de los bosques del mundo 2022*. FAO.

<https://doi.org/10.4060/cb9360es>

FAO, y UNEP. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020*. Roma. Recuperado de

<https://doi.org/10.4060/ca8642es>

FAO, UNEP. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020*. Roma: FAO and UNEP.

<https://openknowledge.fao.org/items/bed1fb7f-8939-4774-b6c5-e4ab98218910>

- FDA. (2024). *2024 Forest Declaration Assessment: Forests under fire* (p. 67).
<https://forestdeclaration.org/resources/forest-declaration-assessment-2024/>
- Forest Stewardship, C. (2022). In the world.
<https://adria-balkan.fsc.org/en/forest-ecosystems/world>
- Gamarra, R. F. (2023). *Análisis de la deforestación de los años 2016 y 2022 en el distrito Castillo Grande, Huánuco, Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2603>
- García, A. (2001). *Landsat-Sistemas de Comunicación Vía Satélite*.
<https://www.kimerius.com/satélites/>
- GEObosque. (2021).
Reporte_Cobertura_y_Perdida_de_Bosque_Humedo_Amazonico_2021.pdf.
PNCBMCC.https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/url_cambiar
- GFW. (2022). Peru Deforestation Rates & Statistics | GFW.
<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/PER?category=undefined>
- GFW. (2023). *Madre de Dios, Peru Deforestation Rates & Statistics* | GFW. Recuperado de
<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/PER/18>
- Giraldo, U. F. (2020). *MINERÍA INFORMAL EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RAMIS. IMPACTOS EN EL PAISAJE Y EVOLUCIÓN DEL CONFLICTO SOCIOAMBIENTAL | SINIA* (SIAR Puno). Perú.
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/mineria-informal-cuenca-alta-rio-ramis-impactos-paisaje-evolucion>
- GOFC. (2016). Reunión del equipo de implementación de GOFC Fire, 2016, Chile | GOFC GOLD.
<https://gofcgold.org/index.php/meetings/gofc-fire-implementation-team-meeting-2016-chile>
- González, V., Fries, A., Oñate, F., Pucha, D., y Pucha, F. (2017). *Fundamentos de SIG - Aplicaciones con ArcGIS*. Recuperado de

<https://books.google.com.ec/books?id=XOIsDwAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Grinand, C., Rakotomalala, F., Gond, V., Vaudry, R., Bernoux, M., y Vieilledent, G. (2013). Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment*, 139, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.008>

Hernández, M. (2023). Alianzas globales en la lucha contra la deforestación. <https://openroom.fundacionrepsol.com/content/openroom/master/es/contenidos/lucha-deforestacion-mitigar-cambio-climatico.html>

Huacac, A. J. L. (2022). *Evaluación de la deforestación por minería de oro mediante imágenes de satélites SAR en la microcuenca del río Pariamanu—Madre de Dios, Periodos 2010-2020* (Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios - UNAMAD). Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios - UNAMAD. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNA_bc62acb08b86b24b9871476f11431a99

Hurtado, L., y Lizarazo, I. (2019). Identification of disturbances in the Colombian tropical rainforest from Landsat satellite image time series using the Landtrendr algorithm. *Revista de Teledetección*, (54), 25-39. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12285>

IGN. (2023). Instituto Geográfico Nacional—IGN - Plataforma del Estado Peruano. Recuperado 8 de enero de 2025, de <https://www.gob.pe/ign>

INEI. (2017). *Resultados Definitivos de los Censos Nacionales 2017 – Censos Nacionales 2017*. <https://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/>

INF, M. (2021). *Nivel de referencia de emisiones forestales por deforestación bruta del Perú en el bioma amazónico*. Recuperado de

https://redd.unfccc.int/media/nref_peru_final.pdf

Janampa, T. S., y Ponce, C. J. J. (2022). Análisis multitemporal de la deforestación por imágenes satelitales en el distrito de Pangoa, Junín desde el año 2000 al 2020.

Universidad Continental. Recuperado de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12239>

Jong, H.-N. (2024). Tropical forest loss puts 2030 zero-deforestation target further out of reach.

<https://news.mongabay.com/2024/04/tropical-forest-loss-puts-2030-zero-deforestation-target-further-out-of-reach/>

Jonker, A. (2023). Geographic Information System (GIS). Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://www.ibm.com/topics/geographic-information-system>

Kayet, N., Pathak, K., Kumar, S., Singh, C. P., Chowdary, V. M., Chakrabarty, A., ... Ghosh, A. (2021). Deforestation susceptibility assessment and prediction in hilltop mining-affected forest region. *Journal of Environmental Management*, 289, 112504. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112504>

Kogut, P. (2021). Bandas Del Landsat 8: Funcionamiento Y Combinaciones. <https://eos.com/es/blog/bandas-landsat-8/>

Luque, L. (2021). Análisis de la deforestación de la Amazonia peruana: Madre de Dios. *Revista Innova Educación*, 3(3), 198-212. <https://doi.org/10.35622/j.rie.2021.03.013>

MAAP. (2021). MAAP #137: Nuevo Foco de Minería Ilegal en la Amazonía Peruana: Río Pariamanu (Madre de Dios). <https://www.maaproject.org/es/mineria-peru-pariamanu/>

MAAP. (2024). MAAP #208: Minería de Oro en la Amazonía peruana sur, resumen 2021-2024. <https://www.maaproject.org/2024/mineria-peru/>

Manning, G. C. (2023). Teledetección—NASA. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/r-emote-sensing/>

- Martín, M. P. I., García, A., y Vega, F. J. M. (2010). *Avances en teledetección: Instrumentos y aplicaciones*. Vol. XLII(165-166), 14.
- Mather, P., y Tso, B. (2009). *Métodos de clasificación para datos obtenidos mediante teledetección* (2nd Edition). Boca Raton.
- MINAM. (2014). *Guía para Muestreo de Suelos* (p. 78).
<https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2702-guia-para-muestreo-de-suelos>
- MINAM. (2019). *Guía para la Evaluación de Sitios Contaminados y la elaboración de Planes dirigidos a la Remediación*.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2017046-118-2021-minam>
- MINAM. (2022). *Lineamientos para la implementación de REDD+ y la gestión de sus Unidades de Reducción de Emisiones y Remociones de Gases de Efecto Invernadero*. Recuperado de
<https://www.minam.gob.pe/transparencia-/recomendaciones-de-auditoria/2022-2/>
- MINAM, y DAR. (2023). *Metaestudio basado en la literatura existente que describe impulsores de deforestación y degradación en la Amazonía peruana*. Recuperado de
<https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/4197299-metaestudio-basado-en-la-literatura-existente-que-describe-impulsores-de-deforestacion-y-degradacion-en-la-amazonia-peruana>
- MINAM, Giz, y Cabanillas, F. (2016). *Manual de buenas prácticas en minería aurífera aluvial para facilitar una adecuada recuperación de áreas*. Recuperado de
<http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/110>
- MINAM, P. M. del A. V. de D. E. de los R., y PNCBMCC, P. de C. de B. para la M. del C. (2023). Apuntes del bosque n° 9: Cobertura de bosques al 2021. En *Ministerio del Ambiente*. Ministerio del Ambiente. Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático. Recuperado de

- <http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/1165>
- MINAM, y PNCBMCC. (2024). *Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático—PNCBMCC*. <https://www.gob.pe/bosques>
- MINEM. (1992). *Ministerio de Energía y Minas—MINEM*. <https://www.gob.pe/minem>
- MINEM. (2009). *Decreto Supremo N° 005-2009-EM – Reglamento de la Ley N° 27651, Ley de formalización y promoción de la pequeña minería y la minería artesanal*. Recuperado de <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC085872/>
- MINEM. (2021). *COMISIÓN DE ENERGÍA Y MINAS Período anual de sesiones 2020-2021*. https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/2016_2021/Dictámenes/Proyectos_de_Ley/06195DC11MAY20210512.pdf
- Monteagudo, F. A. (2002). *Evaluación de la contaminación por mercurio en población de mineros artesanales de oro de la comunidad de Santa Filomena-Ayacucho-Perú durante el periodo agosto 2002-septiembre 2001* (Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/17a56e39-6167-47e9-b6b1-d572ee97a138>
- Morales, M., y César, C. (2011). *Biodiversidad*. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4770/>
- Nalvarte, G., y Mamani, M. (2021). *Bachilleres: NALVARTE SILVA, Guadalupe MAMANI MAMANI, Maritza*.
- Narrea, O. (2018). *Agenda 2030. La minería como motor de desarrollo económico para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 8, 9, 12 y 17* (p. 68). REPEC. Recuperado de REPEC website: <https://cies.org.pe/publicaciones/agenda-2030-la-mineria-como-motor-de-desarrollo-economico-para-el-cumplimiento-de-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible-8-9-12-y-17/>
- NASA. (2020). Your Gateway to NASA Earth Observation Data.

<https://www.earthdata.nasa.gov/>

NASA, A. (2021). *Fundamentals of Remote Sensing*. <https://appliedsciences.nasa.gov/>

NatGeoES. (2010). Deforestación, todavía se puede frenar esta crisis climática. Recuperado 29 de mayo de 2024, de National Geographic website: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/deforestacion>

Nations United, U. (1992). Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil, 3-14 de junio de 1992 | Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/conferences/environment/rio1992>

NREF, MINAM. (2015). *Presentación de Perú de un Nivel de Referencia de Emisiones Forestales (NREF) para reducir las emisiones por deforestación en la Amazonía Peruana*.

<https://www.gob.pe/institucion/bosques/informes-publicaciones/3119834-presentacion-de-peru-de-un-nivel-de-referencia-de-emisiones-forestales-nref-para-reducir-las-emisiones-por-deforestacion-en-la-amazonia-peruana>

ONU. (2005). Protocolo de Kyoto [De la Convención Marco sobre el Cambio Climático] | Observatorio del Principio 10. <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratado/protocolo-kyoto-la-convencion-marco-cambio-climatico>

Ordoñez, C. A. (2005). *FORMATOS DE IMAGEN DIGITAL*. 5(7), 10.

OSINERGMIN. (2023). *PERÚ: CONSOLIDA SU CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN MUNDIAL CIERRE 2023* (p. 36). OSINERGMIN. <https://wimperu.org/wp-content/uploads/2024/02/Boletin-Estadistico-Minero-Diciembre-2023.pdf>

OSINERGMIN. (2023). *Balance del primer semestre: MINERÍA PERUANA: MOTOR QUE IMPULSA EL CRECIMIENTO Actualización de la Cartera de Inversión Minera 2023—OSINERGMIN* (p. 36).

- <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4953859/BEM%2006-2023.pdf>
- Perea, A. G. (2020). *Superposición de la minería aurífera en terrenos de la selva amazónica de Tambopata 2018- 2019*. Recuperado de <http://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/4324>
- Peru GFW. (2023). Peru Deforestation Rates & Statistics | GFW. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/PER?category=undefined>
- PNCBMCC. (2024). *Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático—PNCBMCC*. Recuperado de <https://www.gob.pe/bosques>
- PNUMA, y FAO. (2020). El estado de los bosques del mundo: Los bosques, la biodiversidad y las personas | UNEP - UN Environment Programme. <https://www.unep.org/es/resources/el-estado-de-los-bosques-del-mundo-los-bosques-la-biodiversidad-y-las-personas>
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1), 593-596.
- RAISG. (2020). *Amazonía Bajo Presión 2020*. www.amazoniasocioambiental.org
- RAISG. (2022). *Deforestación en la Amazonía al 2025* | ECOCIENCIA. <https://ecociencia.org/deforestacion-en-la-amazonia-al-2025/>
- Ramos, L. W. (2019). *Manual sobre la formalización de la Minería en Pequeña Escala* | SINIA. Lima: CooperAcción - Acción Solidaria para el Desarrollo. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/manual-formalizacion-mineria-pequena-escala>
- Reaño, G. (2018). REPORTAJE | Madre de Dios: Comunidad Boca Pariamanu y su lucha contra la deforestación. <https://www.actualidadambiental.pe/reportaje-madre-de-dios-comunidad-boca-pariamanu-y-su-lucha-contra-la-deforestacion/>
- REPSOL, F. (2022). Observatorio de Soluciones Basadas en la Naturaleza. *REPSOL*, 8.

- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176.
[https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Sánchez, N. E. L. (2022). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE DEFORESTACIÓN EN EL PARQUE NACIONAL PODOCARPUS (PNP) Y SU ZONA DE AMORTIGUAMIENTO (UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK)*. UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, Loja, Ecuador.
<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4566/1/L%c3%b3pez%20S%c3%a1nchez%20Nicole%20Elizabeth.pdf>
- Saucedo, L. A. (2023). Análisis de la deforestación del Distrito Huabal – Región Cajamarca durante el periodo 2005 – 2020 y su proyección al año 2050 con teledetección. *Universidad Nacional de Cajamarca*.
<http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/5608>
- Sierra, Y. (2020). En Mongabay realiza un estudio que revela seis focos de minería ilegal tras Operación Mercurio en Madre de Dios. Recuperado de Noticias ambientales website:
<https://es.mongabay.com/2020/12/peru-imagenes-satelitales-operacion-mercurio/>
- Sierra, Y. (2021). Perú alcanza cifra de deforestación más alta en los últimos 20 años.
<https://es.mongabay.com/2021/10/peru-aumenta-deforestacion-cifras-bosques/>
- Stakeholders. (2024). Perú es el quinto país con mayor pérdida de bosques.
<https://stakeholders.com.pe/medio-ambiente/peru-es-el-quinto-pais-con-mayor-perdida-de-bosques/>
- Suwanpravit, C., y Srichai, N. (2012). Impacts of spatial resolution on land cover classification. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 33, 39.
<https://doi.org/10.7125/APAN.33.4>
- Tilton, J. C., Smits, P. C., y Bruzzone, L. (2003). *Foreword special issue on analysis of*

multitemporal remote sensing images | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore.

Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1245229>

Tognelli, M. F., Anderson, E. P., Jiménez-Segura, L. F., Chuctaya, J., Chocano, L., Maldonado-Ocampo, J. A., Villa-Navarro, F. A. (2019). Assessing conservation priorities of endemic freshwater fishes in the Tropical Andes region. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 29(7), 1123-1132. <https://doi.org/10.1002/aqc.2971>

UNEP. (1995). *CONFERENCIA DE LAS PARTES EN EL CONVENIO SOBRE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA*. 50. Yakarta. <https://undocs.org/Home/Mobile?FinalSymbol=UNEP%2FCBD%2FCOP%2F2%2F19&Language=E&DeviceType=Desktop&LangRequested=False>

USGS. (2013). *Landsat 8: El nuevo satélite proveedor de imágenes gratuitas para la observación de la Tierra*. | SIB, Parques Nacionales, Argentina. Recuperado de <https://sib.gob.ar/novedades/landsat-8-el-nuevo-satelite-proveedor-de-imagenes-gratuitas-para-la-observacion-de-la-tierra>

USGS. (2021). Landsat 9 | Servicio Geológico de Estados Unidos. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>

USGS. (2021). Active Sensors | Earthdata [Backgrounder]. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/active-sensors>

USGS. (2023). USGS - Monitoreo de la vegetación—NDVI global eVIIRS/ Archivo EROS. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-vegetation-monitoring-e-viirs-global-ndvi>

Valencia, L. (2016). *Políticas de pequeña minería y deforestación: El caso de Madre de Dios* (N.º 14; p. 36). SPDA. <https://spda.org.pe/publicacion/politicas-de-pequena-mineria-y-deforestacion-el-caso-de-madre-de-dios/>

- Valenzuela, A., Reinke, K., y Jones, S. (2022). A new metric for the assessment of spatial resolution in satellite imagers. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103051. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103051>
- Vera, E. (2020). Madre de Dios: Nuevo foco de minería ilegal amenaza a indígenas del Pariamanu
<https://es.mongabay.com/2020/08/madre-de-dios-mineria-ilegal-boca-pariamanu-indigenas-peru/>
- Vera, E. (2021). *Madre de Dios: Deforestación por minería ilegal crece en el Pariamanu y ya supera las 200 hectáreas*. América del Sur: MONGABAY.
<https://es.mongabay.com/2021/05/deforestacion-mineria-ilegal-pariamanu-peru/>
- Weisse, M., Goldman, E., y Carter, S. (2024). *Forest Pulse: Lo último sobre los bosques del mundo | Investigación del Instituto de Recursos Mundiales*. Recuperado de <https://research.wri.org/gfr/latest-analysis-deforestation-trends>
- WGC. (2021). *The social and economic contribution of gold mining—Spanish*. Recuperado de <https://www.gold.org>
- Witting, N. J. (2019). *Cambio de cobertura y uso del suelo en diferentes períodos a partir del uso de imágenes satelitales en el distrito de Codo del Pozuzo, Huánuco*.
<https://hdl.handle.net/20.500.14292/1507>
- Yang, Z., Li, J., Zipper, C. E., Shen, Y., Miao, H., y Donovan, P. F. (2018). Identification of the disturbance and trajectory types in mining areas using multitemporal remote sensing images. *Science of The Total Environment*, 644, 916-927.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.341>
- Zamora, E. J. A., y Guzmán, M. del C. (2023). Metodología de la investigación aplicada a las ciencias de la salud y la educación. En *Repositorio MAWIL*. Repositorio MAWIL.
<https://doi.org/10.26820/978-9942-622-59-4>
- Zvobgo, L., y Tsoka, J. (2021). (PDF) *Deforestation rate and causes in Upper Manyame*

Sub-Catchment, Zimbabwe: Implications on achieving national climate change mitigation targets.

https://www.researchgate.net/publication/351076794_Deforestation_rate_and_causes_in_Upper_Manyame_Sub-Catchment_Zimbabwe_Implications_on_achieving_national_climate_change_mitigation_targets?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoieX2RpcmVjdCJ9fQ

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

“Análisis multitemporal de la deforestación por minería mediante el uso de imágenes satelitales landsat en la zona de Boca Pariamanu - Tambopata - Madre de Dios, 2018 - 2023.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE DATOS
<p>GENERAL ¿Cómo ha evolucionado la deforestación causada por la actividad minera en la región de Madre de Dios, específicamente en zona de Boca Pariamanu, durante los años 2018 - 2023, y cuáles son sus principales impactos en el ecosistema?</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cómo el análisis multitemporal con imágenes satelitales Landsat permite cuantificar con precisión la evolución de la deforestación causada por la actividad minera en la zona de Boca Pariamanu y detectar patrones de cambio en la cobertura forestal? ¿Cuál ha sido la tasa de deforestación en la Zona de Boca Pariamanu, Tambopata - Madre de Dios, como resultado de la minería y tala ilegal durante los años 2018 - 2023? 	<p>GENERAL Evaluar la deforestación por la actividad minera a través del análisis multitemporal con la aplicación de Landsat 8 y Landsat 9 en la zona de Boca Pariamanu, entre los años 2018 - 2023.</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> Analizar las áreas deforestadas en la zona de Boca Pariamanu entre los años 2018 y 2023 a través de un enfoque multitemporal, utilizando imágenes satelitales (Landsat-8 y 9, ENVI) para identificar cambios en la cobertura vegetal. Evaluar la tasa anual de deforestación en la zona de Boca Pariamanu por actividad minera y analizar sus efectos colaterales, como la pérdida de hábitat, fragmentación del ecosistema y el impacto en cuerpos de agua entre los años 2018 - 2023. 	<p>GENERAL La creciente deforestación por la actividad minera mediante el uso de imágenes Landsat 8 y 9 en la zona de Boca Pariamanu, no presenta una alta pérdida de cobertura vegetal en relación con la expansión de la actividad minera y los cambios en las áreas deforestadas.</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> La deforestación ocasionada por la actividad minera en la zona de Boca Pariamanu, entre los años 2018-2023 ha crecido de forma ascendente. El uso de tecnologías satelitales facilitará la identificación de áreas con una mayor concentración de actividades mineras, detectando tanto áreas deforestadas recientes y aquellas que presenten un avance deforestación entre los años 2018 - 2023. 	<p>Independiente :</p> <p>Actividad minera</p> <p>Dependiente: Evolución de la deforestación</p>	<p>Superficie modificada por actividad minera (ha), (%).</p> <p>* Pérdida de bosque primario (%).</p> <p>* Pérdida de bosque secundario (%).</p> <p>* Tasa de deforestación total anual (%).</p>	<p>Programas computacionales</p> <ul style="list-style-type: none"> Microsoft Word ArcGis 10.5 Microsoft Excel ENVI Python 3.11 <p>Herramientas de teledetección</p> <ul style="list-style-type: none"> Google Earth Engine (GEE). USGS 	<ul style="list-style-type: none"> Imágenes satelitales Mosaicos del año 2018 y 2023 de Landsat 8 y Landsat 9 <p>Tipo de Investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> Descriptivo y correlacional <p>Aplicada de enfoque cuantitativo.</p> <p>Tipo de Investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> No Experimental <p>Método</p> <ul style="list-style-type: none"> Deductivo Inductivo. <p>Población y muestra: Zona de Boca Pariamanu - Tambopata - Madre de Dios</p>

Anexo 02: Obtención de imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9 desde la plataforma USGS

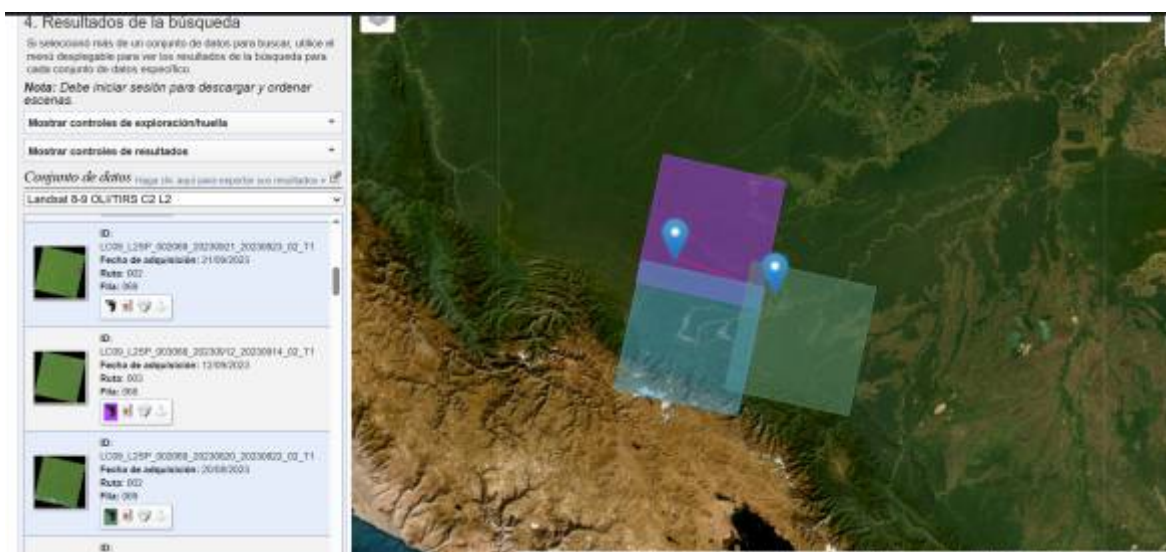


Figura 01: Descarga de las imágenes satelitales LandSat 8 y 9



Figura 02: Procesamiento en ENVI 5.3

Anexo 03: Análisis de Datos ENVI 5.3

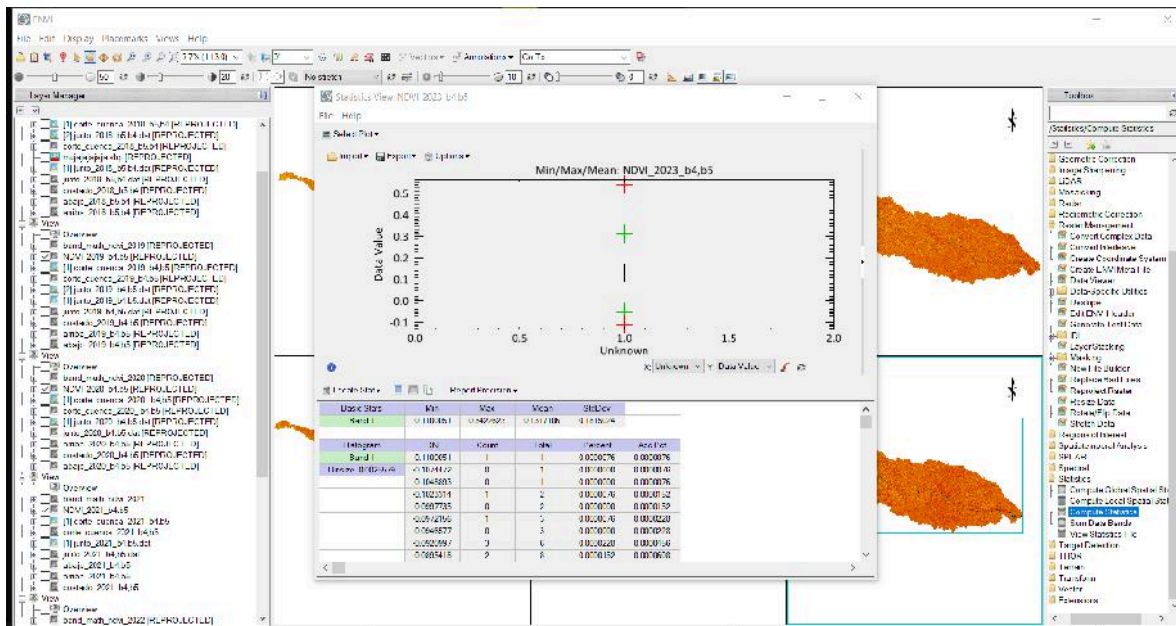


Figura 01: Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI por año 2018 - 2023

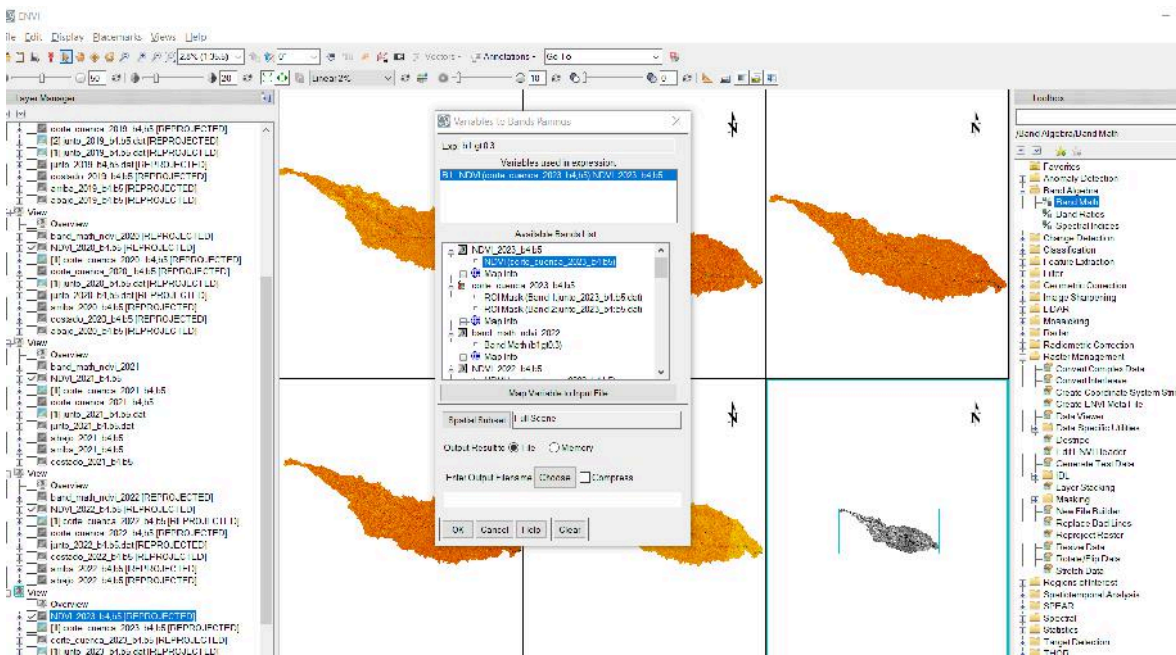


Figura 02: Procesamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) - NDVI > 0.3

Anexo 04: Análisis de Datos en ArcGIS

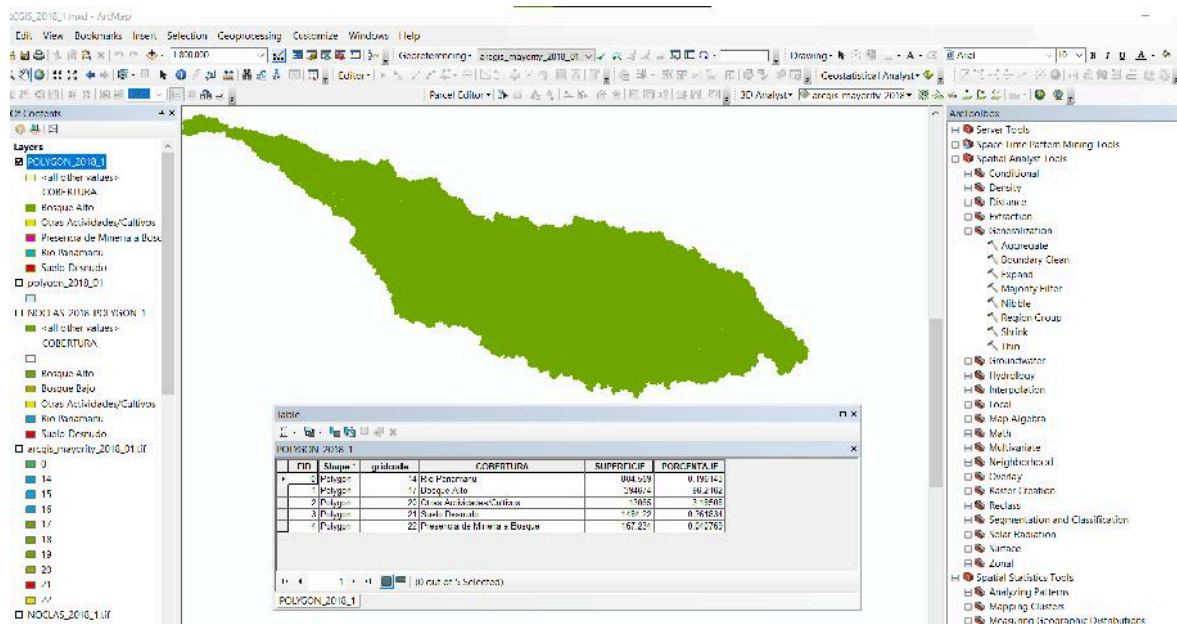


Figura 01: Clasificación no Supervisada (ISODATA) en el periodo 2018

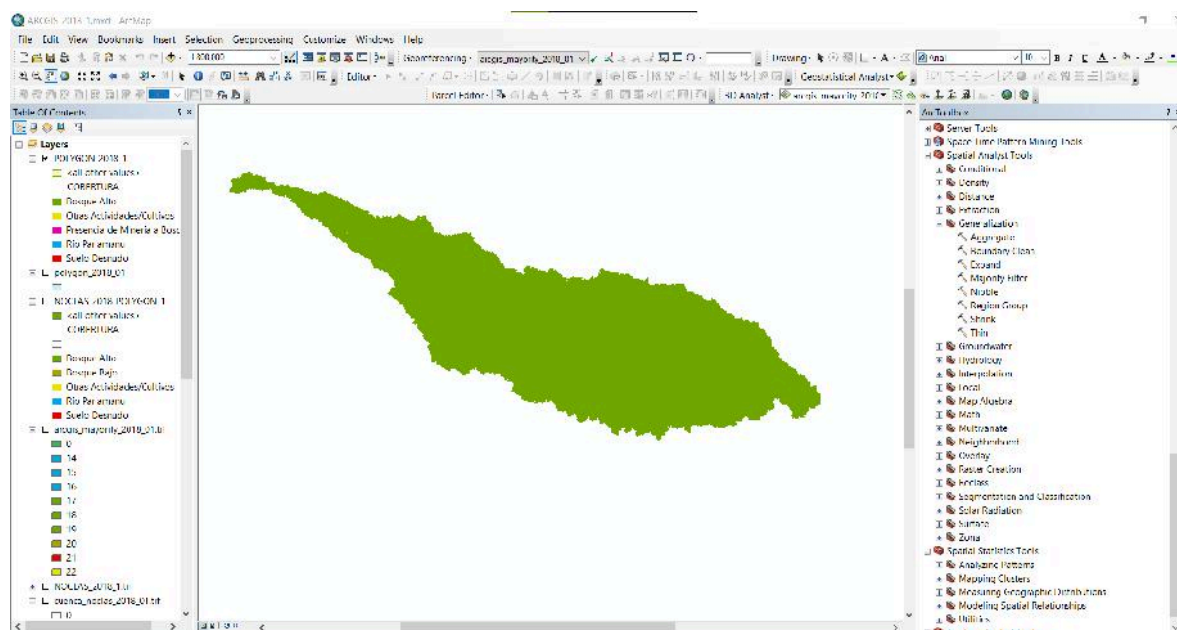


Figura 01: Clasificación no Supervisada (ISODATA) en el periodo 2023

Anexo 05: Análisis de Datos Python y Excel

```

python

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Crear DataFrame con los datos multitemporales
data = {
    'Año': [2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023],
    'cobertura_vegetal_ha': [394674, 399720, 407338, 399977, 404052, 394263],
    'Variación_ha': [0, 5046, 7618, -7361, 4075, -9789],
    'Tasa_cambio_%': [0, 1.28, 1.91, -1.81, 1.02, -2.42],
    'Porcentaje_total': [16.4, 16.7, 17.0, 16.7, 16.8, 16.4]
}

df = pd.DataFrame(data)
df

# Fórmula CAGR
inicio = df.loc[df['Año'] == 2018, 'cobertura_vegetal_ha'].values[0]
fin = df.loc[df['Año'] == 2023, 'cobertura_vegetal_ha'].values[0]
periodos = 5

CAGR = ((fin / inicio) ** (1 / periodos) - 1) * 100
print(f"Tasa Anual Compuesta de Deforestación (CAGR): {CAGR:.4f} %")

Tasa Anual Compuesta de Deforestación (CAGR): -0.0208 %

# Cálculo de correlación entre año y cobertura vegetal
correlacion = np.corrcoef(df['Año'], df['cobertura_vegetal_ha'])[0,1]
print(f"Correlación año vs. cobertura vegetal: {correlacion:.4f}")
    
```

Figura 01: Análisis multitemporal de la cobertura vegetal

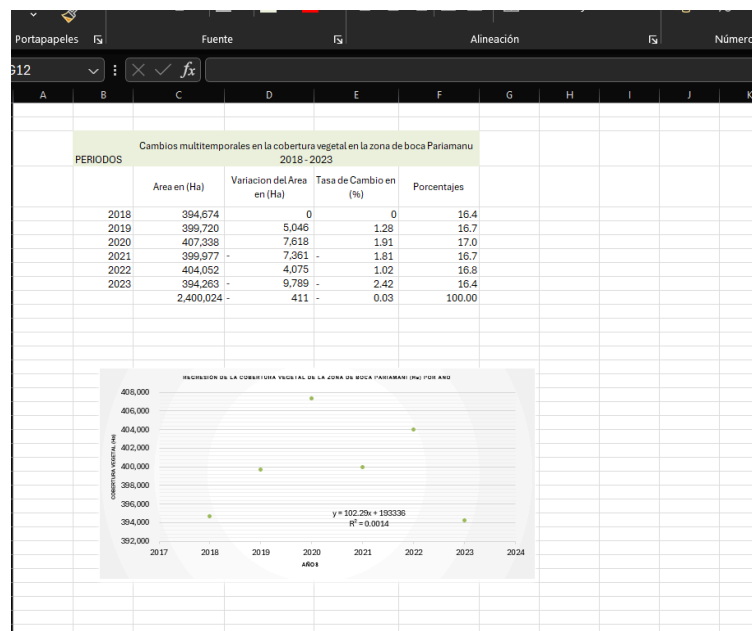


Figura 02: Análisis de cobertura vegetal - Excel - zona de boca Pariamanu 2018 - 2023

```

62 # 2. Tasas anuales de cambio
63 colores = ['verde' si x > 0 de lo contrario 'rojo' para x en df ['Tasa_cambio_pct'] [1 :
64 barras = ax2 . barra ( df ['Año'] [1 : ], df ['Tasa_cambio_pct'] [1 : ], color = colores ,
65 ax2 . axhline ( y = 0 , color = 'negro' , estilo de línea = '-' , alfa = 0.3 )
66 hacha2 . set_title ( 'Tasas Anuales de Cambio (%) ' )
67 ax2 . set_xlabel ( 'Año ' )
68 hacha2 . set_ylabel ( 'Tasa de Cambio (%) ' )
69 ax2 . grid ( Verdadero , alfa = 0.3 )
70
71 # ...
72 # ...
73 # ...
74 # ...
75 # ...
76 # ...
77 # ...
78 # ...
79 # ...
80 # ...
81 # ...
82 # ...
83 # ...
84 # ...
85 # ...
86 # ...
87 # ...
88 # ...
89 # ...
90 # ...
91 # ...
92 # ...
93 # ...
94 # ...
95 # ...
96 # ...
97 # ...
98 # ...
99 # ...
100 # ...
101 # ...
102 # ...
103 # ...
104 # ...
105 # ...
106 # ...
107 # ...
108 # ...
109 # ...
110 # ...
111 # ...
112 # ...
113 # ...
114 # ...
115 # ...
116 # ...
117 # ...
118 # ...
119 # ...
120 # ...
121 # ...
122 # ...
123 # ...
124 # ...
125 # ...
126 # ...
127 # ...
128 # ...
129 # ...
130 # ...
131 # ...
132 # ...
133 # ...
134 # ...
135 # ...
136 # ...
137 # ...
138 # ...
139 # ...
140 # ...
141 # ...
142 # ...
143 # ...
144 # ...
145 # ...
146 # ...
147 # ...
148 # ...
149 # ...
150 # ...
151 # ...
152 # ...
153 # ...
154 # ...
155 # ...
156 # ...
157 # ...
158 # ...
159 # ...
160 # ...
161 # ...
162 # ...
163 # ...
164 # ...
165 # ...
166 # ...
167 # ...
168 # ...
169 # ...
170 # ...
171 # ...
172 # ...
173 # ...
174 # ...
175 # ...
176 # ...
177 # ...
178 # ...
179 # ...
180 # ...
181 # ...
182 # ...
183 # ...
184 # ...
185 # ...
186 # ...
187 # ...
188 # ...
189 # ...
190 # ...
191 # ...
192 # ...
193 # ...
194 # ...
195 # ...
196 # ...
197 # ...
198 # ...
199 # ...
200 # ...
201 # ...
202 # ...
203 # ...
204 # ...
205 # ...
206 # ...
207 # ...
208 # ...
209 # ...
210 # ...
211 # ...
212 # ...
213 # ...
214 # ...
215 # ...
216 # ...
217 # ...
218 # ...
219 # ...
220 # ...
221 # ...
222 # ...
223 # ...
224 # ...
225 # ...
226 # ...
227 # ...
228 # ...
229 # ...
230 # ...
231 # ...
232 # ...
233 # ...
234 # ...
235 # ...
236 # ...
237 # ...
238 # ...
239 # ...
240 # ...
241 # ...
242 # ...
243 # ...
244 # ...
245 # ...
246 # ...
247 # ...
248 # ...
249 # ...
250 # ...
251 # ...
252 # ...
253 # ...
254 # ...
255 # ...
256 # ...
257 # ...
258 # ...
259 # ...
260 # ...
261 # ...
262 # ...
263 # ...
264 # ...
265 # ...
266 # ...
267 # ...
268 # ...
269 # ...
270 # ...
271 # ...
272 # ...
273 # ...
274 # ...
275 # ...
276 # ...
277 # ...
278 # ...
279 # ...
280 # ...
281 # ...
282 # ...
283 # ...
284 # ...
285 # ...
286 # ...
287 # ...
288 # ...
289 # ...
290 # ...
291 # ...
292 # ...
293 # ...
294 # ...
295 # ...
296 # ...
297 # ...
298 # ...
299 # ...
300 # ...
301 # ...
302 # ...
303 # ...
304 # ...
305 # ...
306 # ...
307 # ...
308 # ...
309 # ...
310 # ...
311 # ...
312 # ...
313 # ...
314 # ...
315 # ...
316 # ...
317 # ...
318 # ...
319 # ...
320 # ...
321 # ...
322 # ...
323 # ...
324 # ...
325 # ...
326 # ...
327 # ...
328 # ...
329 # ...
330 # ...
331 # ...
332 # ...
333 # ...
334 # ...
335 # ...
336 # ...
337 # ...
338 # ...
339 # ...
340 # ...
341 # ...
342 # ...
343 # ...
344 # ...
345 # ...
346 # ...
347 # ...
348 # ...
349 # ...
350 # ...
351 # ...
352 # ...
353 # ...
354 # ...
355 # ...
356 # ...
357 # ...
358 # ...
359 # ...
360 # ...
361 # ...
362 # ...
363 # ...
364 # ...
365 # ...
366 # ...
367 # ...
368 # ...
369 # ...
370 # ...
371 # ...
372 # ...
373 # ...
374 # ...
375 # ...
376 # ...
377 # ...
378 # ...
379 # ...
380 # ...
381 # ...
382 # ...
383 # ...
384 # ...
385 # ...
386 # ...
387 # ...
388 # ...
389 # ...
390 # ...
391 # ...
392 # ...
393 # ...
394 # ...
395 # ...
396 # ...
397 # ...
398 # ...
399 # ...
400 # ...
401 # ...
402 # ...
403 # ...
404 # ...
405 # ...
406 # ...
407 # ...
408 # ...
409 # ...
410 # ...
411 # ...
412 # ...
413 # ...
414 # ...
415 # ...
416 # ...
417 # ...
418 # ...
419 # ...
420 # ...
421 # ...
422 # ...
423 # ...
424 # ...
425 # ...
426 # ...
427 # ...
428 # ...
429 # ...
430 # ...
431 # ...
432 # ...
433 # ...
434 # ...
435 # ...
436 # ...
437 # ...
438 # ...
439 # ...
440 # ...
441 # ...
442 # ...
443 # ...
444 # ...
445 # ...
446 # ...
447 # ...
448 # ...
449 # ...
450 # ...
451 # ...
452 # ...
453 # ...
454 # ...
455 # ...
456 # ...
457 # ...
458 # ...
459 # ...
460 # ...
461 # ...
462 # ...
463 # ...
464 # ...
465 # ...
466 # ...
467 # ...
468 # ...
469 # ...
470 # ...
471 # ...
472 # ...
473 # ...
474 # ...
475 # ...
476 # ...
477 # ...
478 # ...
479 # ...
480 # ...
481 # ...
482 # ...
483 # ...
484 # ...
485 # ...
486 # ...
487 # ...
488 # ...
489 # ...
490 # ...
491 # ...
492 # ...
493 # ...
494 # ...
495 # ...
496 # ...
497 # ...
498 # ...
499 # ...
500 # ...
501 # ...
502 # ...
503 # ...
504 # ...
505 # ...
506 # ...
507 # ...
508 # ...
509 # ...
510 # ...
511 # ...
512 # ...
513 # ...
514 # ...
515 # ...
516 # ...
517 # ...
518 # ...
519 # ...
520 # ...
521 # ...
522 # ...
523 # ...
524 # ...
525 # ...
526 # ...
527 # ...
528 # ...
529 # ...
530 # ...
531 # ...
532 # ...
533 # ...
534 # ...
535 # ...
536 # ...
537 # ...
538 # ...
539 # ...
540 # ...
541 # ...
542 # ...
543 # ...
544 # ...
545 # ...
546 # ...
547 # ...
548 # ...
549 # ...
550 # ...
551 # ...
552 # ...
553 # ...
554 # ...
555 # ...
556 # ...
557 # ...
558 # ...
559 # ...
560 # ...
561 # ...
562 # ...
563 # ...
564 # ...
565 # ...
566 # ...
567 # ...
568 # ...
569 # ...
570 # ...
571 # ...
572 # ...
573 # ...
574 # ...
575 # ...
576 # ...
577 # ...
578 # ...
579 # ...
580 # ...
581 # ...
582 # ...
583 # ...
584 # ...
585 # ...
586 # ...
587 # ...
588 # ...
589 # ...
590 # ...
591 # ...
592 # ...
593 # ...
594 # ...
595 # ...
596 # ...
597 # ...
598 # ...
599 # ...
600 # ...
601 # ...
602 # ...
603 # ...
604 # ...
605 # ...
606 # ...
607 # ...
608 # ...
609 # ...
610 # ...
611 # ...
612 # ...
613 # ...
614 # ...
615 # ...
616 # ...
617 # ...
618 # ...
619 # ...
620 # ...
621 # ...
622 # ...
623 # ...
624 # ...
625 # ...
626 # ...
627 # ...
628 # ...
629 # ...
630 # ...
631 # ...
632 # ...
633 # ...
634 # ...
635 # ...
636 # ...
637 # ...
638 # ...
639 # ...
640 # ...
641 # ...
642 # ...
643 # ...
644 # ...
645 # ...
646 # ...
647 # ...
648 # ...
649 # ...
650 # ...
651 # ...
652 # ...
653 # ...
654 # ...
655 # ...
656 # ...
657 # ...
658 # ...
659 # ...
660 # ...
661 # ...
662 # ...
663 # ...
664 # ...
665 # ...
666 # ...
667 # ...
668 # ...
669 # ...
670 # ...
671 # ...
672 # ...
673 # ...
674 # ...
675 # ...
676 # ...
677 # ...
678 # ...
679 # ...
680 # ...
681 # ...
682 # ...
683 # ...
684 # ...
685 # ...
686 # ...
687 # ...
688 # ...
689 # ...
690 # ...
691 # ...
692 # ...
693 # ...
694 # ...
695 # ...
696 # ...
697 # ...
698 # ...
699 # ...
700 # ...
701 # ...
702 # ...
703 # ...
704 # ...
705 # ...
706 # ...
707 # ...
708 # ...
709 # ...
710 # ...
711 # ...
712 # ...
713 # ...
714 # ...
715 # ...
716 # ...
717 # ...
718 # ...
719 # ...
720 # ...
721 # ...
722 # ...
723 # ...
724 # ...
725 # ...
726 # ...
727 # ...
728 # ...
729 # ...
730 # ...
731 # ...
732 # ...
733 # ...
734 # ...
735 # ...
736 # ...
737 # ...
738 # ...
739 # ...
740 # ...
741 # ...
742 # ...
743 # ...
744 # ...
745 # ...
746 # ...
747 # ...
748 # ...
749 # ...
750 # ...
751 # ...
752 # ...
753 # ...
754 # ...
755 # ...
756 # ...
757 # ...
758 # ...
759 # ...
760 # ...
761 # ...
762 # ...
763 # ...
764 # ...
765 # ...
766 # ...
767 # ...
768 # ...
769 # ...
770 # ...
771 # ...
772 # ...
773 # ...
774 # ...
775 # ...
776 # ...
777 # ...
778 # ...
779 # ...
780 # ...
781 # ...
782 # ...
783 # ...
784 # ...
785 # ...
786 # ...
787 # ...
788 # ...
789 # ...
790 # ...
791 # ...
792 # ...
793 # ...
794 # ...
795 # ...
796 # ...
797 # ...
798 # ...
799 # ...
800 # ...
801 # ...
802 # ...
803 # ...
804 # ...
805 # ...
806 # ...
807 # ...
808 # ...
809 # ...
810 # ...
811 # ...
812 # ...
813 # ...
814 # ...
815 # ...
816 # ...
817 # ...
818 # ...
819 # ...
820 # ...
821 # ...
822 # ...
823 # ...
824 # ...
825 # ...
826 # ...
827 # ...
828 # ...
829 # ...
830 # ...
831 # ...
832 # ...
833 # ...
834 # ...
835 # ...
836 # ...
837 # ...
838 # ...
839 # ...
840 # ...
841 # ...
842 # ...
843 # ...
844 # ...
845 # ...
846 # ...
847 # ...
848 # ...
849 # ...
850 # ...
851 # ...
852 # ...
853 # ...
854 # ...
855 # ...
856 # ...
857 # ...
858 # ...
859 # ...
860 # ...
861 # ...
862 # ...
863 # ...
864 # ...
865 # ...
866 # ...
867 # ...
868 # ...
869 # ...
870 # ...
871 # ...
872 # ...
873 # ...
874 # ...
875 # ...
876 # ...
877 # ...
878 # ...
879 # ...
880 # ...
881 # ...
882 # ...
883 # ...
884 # ...
885 # ...
886 # ...
887 # ...
888 # ...
889 # ...
890 # ...
891 # ...
892 # ...
893 # ...
894 # ...
895 # ...
896 # ...
897 # ...
898 # ...
899 # ...
900 # ...
901 # ...
902 # ...
903 # ...
904 # ...
905 # ...
906 # ...
907 # ...
908 # ...
909 # ...
910 # ...
911 # ...
912 # ...
913 # ...
914 # ...
915 # ...
916 # ...
917 # ...
918 # ...
919 # ...
920 # ...
921 # ...
922 # ...
923 # ...
924 # ...
925 # ...
926 # ...
927 # ...
928 # ...
929 # ...
930 # ...
931 # ...
932 # ...
933 # ...
934 # ...
935 # ...
936 # ...
937 # ...
938 # ...
939 # ...
940 # ...
941 # ...
942 # ...
943 # ...
944 # ...
945 # ...
946 # ...
947 # ...
948 # ...
949 # ...
950 # ...
951 # ...
952 # ...
953 # ...
954 # ...
955 # ...
956 # ...
957 # ...
958 # ...
959 # ...
960 # ...
961 # ...
962 # ...
963 # ...
964 # ...
965 # ...
966 # ...
967 # ...
968 # ...
969 # ...
970 # ...
971 # ...
972 # ...
973 # ...
974 # ...
975 # ...
976 # ...
977 # ...
978 # ...
979 # ...
980 # ...
981 # ...
982 # ...
983 # ...
984 # ...
985 # ...
986 # ...
987 # ...
988 # ...
989 # ...
990 # ...
991 # ...
992 # ...
993 # ...
994 # ...
995 # ...
996 # ...
997 # ...
998 # ...
999 # ...
1000 # ...

```

Figura 03: Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) - Python:

Año	Superficie vegetada (ha)	Cambio respecto al año anterior (ha)	Tasa de cambio (%)
2018	394,674	—	—
2019	399,720	5,046	1.28%
2020	407,338	7,618	1.91%
2021	399,977	-7,361	-1.81%
2022	404,052	4,075	1.02%
2023	394,263	-9,789	-2.42%
	2,400,024	411	-0.03%
Calcular la tasa anual de deforestación (CAGR)			0.0002
			0.0208
Periodo evaluado	Superficie inicial (ha)	Superficie final (ha)	Tasa anual de deforestación (CAGR %)
2018-2023	394,674	394,263	-0.0208 %
	411	0	

Figura 04: Tasa Anual de Deforestación (CAGR) - Excel

Anexo 06: Pruebas Estadísticas de la variable

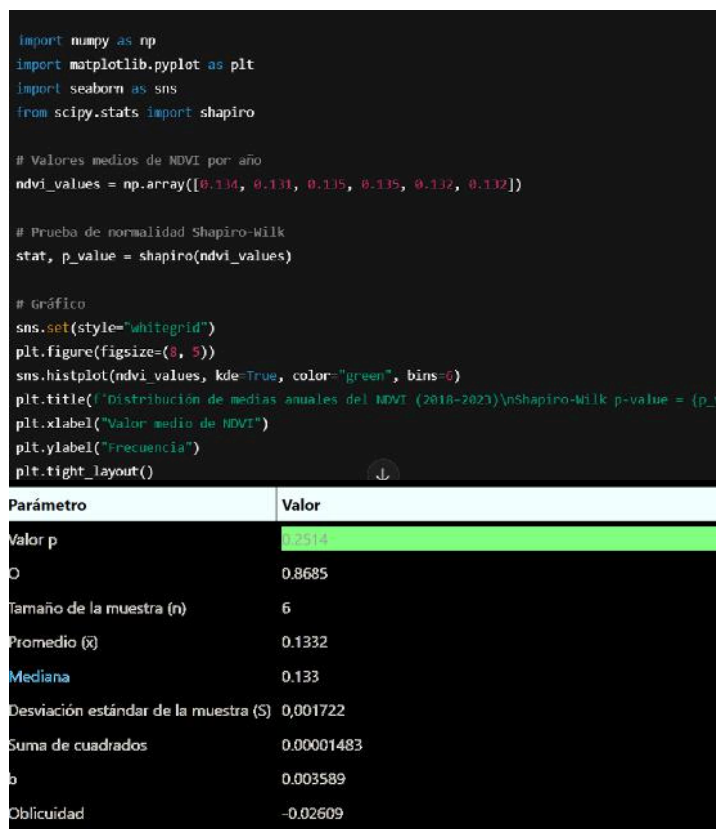


Figura 01: Prueba de Normalidad - Shapiro - Wilk

Anexo 07: Método de decisión multicriterio de Jerarquías - SAATY

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Nº	Criterio		V1 (Hábitat)	V2 (Frag. ecosis.)	V3 (Agua)	V4 (Suelos degr.)	V5 (Minería)	WI	CI	LAMDAI	
C1	Pérdida de hábitat	V1	1	3	2	4	3	2.352	40.2%	0.972	
C2	Fragmentación del ecosistema	V2	1/3	1	1/2	2	1	0.803	13.7%	1.029	
C3	Afectación a cuerpos de agua	V3	1/2	2	1	3	2	1.431	24.5%	1.060	
C4	Degradación del suelo	V4	1/4	1/2	1/3	1	1/2	0.461	7.9%	0.946	
C5	Presión minera creciente	V5	1/3	1	1/2	2	1	0.803	13.7%	1.029	
	Más importante			2.417	7.5	4.333	12	7.5	5.850		5.036
9	absolutamente importante										
8											
7	demostrablemente más importante		Pérdida de hábitat					PESOS			
6			Fragmentación del ecosistema					40%			
5	notablemente más importante		Afectación a cuerpos de agua					14%			
4			Degradación del suelo					24%			
3	ligeramente más importante		Presión minera creciente					8%			
2								14%			
1	Igual importancia		indicador	vaalor				100%			
1/2											
1/3	ligeramente menos importante		CI=	0.009				0.0090047			
1/4											
1/5	notablemente menos importante		RCI=	1.12	1.188						
1/6			CR=	0.008	Consistente						
1/7	demostrablemente menos importante										
1/8											
1/9	absolutamente menos importante										
	Menos importante										

Figura 01: Matriz de comparación por pares entre criterios - AHP

Anexo 08: Panel Fotográfico



Figura 01: Reconocimiento de actividad minera - suelo desnudo



Figura 02: Campamentos mineros - Actividad minera aluvial.

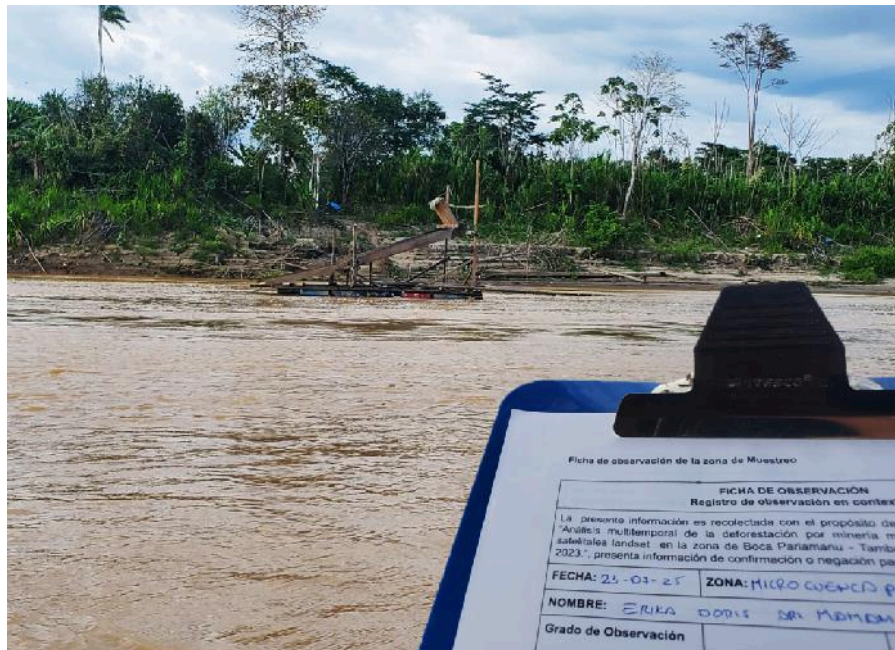


Figura 03: Maquinaria para la extracción de oro - presencia en río.

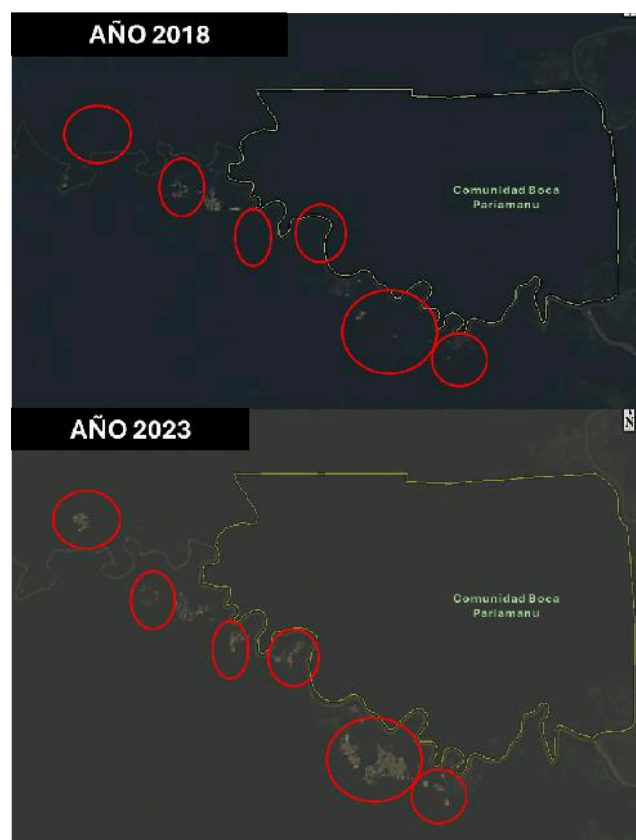


Figura 04: Las imágenes satelitales muestran el avance de la deforestación entre el 2018 a 2023

Anexo 09: Ficha de Observación usada por el Tesista.

Ficha de observación de la zona de Muestreo

FICHA DE OBSERVACIÓN						
Registro de observación en contexto						
La presente información es recolectada con el propósito de saber si el proyecto de tesis "Análisis multitemporal de la deforestación por minería mediante el uso de imágenes satelitales landsat en la zona de Boca Pariamanu - Tambopata - Madre de Dios, 2018 - 2023.", presenta información de confirmación o negación para el contexto.						
FECHA: 23 / 07 / 2025			ZONA: BOCA PARIAMANU - MICROCUENCA DEL PARIAMANU			
NOMBRE: ERIKA DORIS ARI MAMANI						
Grado de Observación	VALORACIÓN					OBSERVACIONES
	C	NC	CP	CD	CV	
1. Cumple (C) 2. No Cumple (NC) 3. Cumplimiento parcial (CP) 4. Condición degradada (CD) 5. Condición vulnerable (CV)						
Cumplen con los requisitos establecidos para deforestar		X				La mayoría de las intervenciones mineras no cuentan con autorización legal ni estudios de impacto ambiental aprobados.
Áreas estables para una sostenibilidad adecuada		X				El territorio presenta signos evidentes de degradación ambiental, pérdida de cobertura vegetal y contaminación del suelo, lo cual compromete su recuperación.

Cumplen con las áreas delimitadas dentro del corredor minero en la provincia de Tambopata			X			Aunque algunas actividades se desarrollan dentro del corredor reconocido, otras se han expandido hacia zonas sin habilitación ni supervisión.
La zona de uso minero tiene arraigo a la comunidad más cercana			X			Si bien algunos pobladores locales participan en la actividad minera, gran parte de las operaciones están vinculadas a agentes externos sin arraigo territorial.
¿Las zonas afectadas por minería cuentan con la aprobación para su ejecución?		X				No existen títulos habilitantes o permisos vigentes para la mayoría de las áreas intervenidas.
¿Cómo califica la calidad del uso de suelo dentro de la zona?				X		Se evidencia compactación del suelo, pérdida de materia orgánica y exposición de áreas desnudas que impiden un uso agrícola o forestal sostenible.
¿Qué condición mantiene el área desde el crecimiento acelerado por la actividad minera en la zona?					X	El crecimiento minero ha provocado fragmentación de ecosistemas y pérdida de funcionalidad ecológica.
¿Los pobladores cuentan con una preservación adecuada para su salud y territorio?		X				Existen riesgos sanitarios por exposición a contaminantes (mercurio, sedimentos), así como conflictos territoriales no resueltos.
¿Existen áreas acuáticas y zonas de reservas afectadas por la actividad minera de oro?				X		Se han identificado cuerpos de agua impactados por sedimentación y alteración de caudales, incluyendo sectores de valor ecológico priorizado.

Fuente: Elaboración propia.