

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

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



**TESIS**

**EVALUACION DE LA DEFORESTACIÓN POR MINERÍA DE ORO  
MEDIANTE IMÁGENES DE SATELITES SAR EN LA MICROCUENCA  
DEL RÍO PARIAMANU – MADRE DE DIOS, PERIODOS 2010-2020.**

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

**Tesis presentada por:**

Bachiller:

HUACAC AUCCAPURI, Jose Luis

**Asesor:** Dr. Gabriel Alarcón Aguirre

**Puerto Maldonado, octubre de 2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

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



**TESIS**

**EVALUACION DE LA DEFORESTACIÓN POR MINERÍA DE ORO  
MEDIANTE IMÁGENES DE SATELITES SAR EN LA MICROCUENCA  
DEL RÍO PARIAMANU – MADRE DE DIOS, PERIODOS 2010-2020.**

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

**Tesis presentada por:**

Bachiller:

HUACAC AUCCAPURI, Jose Luis

**Asesor:** Dr. Gabriel Alarcón Aguirre

**Puerto Maldonado, octubre de 2021**

## **Dedicatoria**

**A Dios** por guiarme y protegerme para que concluya satisfactoriamente en mi etapa de formación profesional; por cuidar de mi familia y por haberme dado salud para lograr mis odjetivos propuestos.

**A mis padres**, Barbara y Iván por que ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo incondicional y sus consejos para hacer de mi una mejor persona; por ser esa razón el mas grande aliciente para el cumplimiento de mis odjetivos que significan alegría y orgullo para mi y también para ellos.

**A mis hermanos**, Ivan, Juan Carlos, Meli, Noemi, Carolay y Beni por el apoyo que he recibido de ustedes.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer una y mil veces a mi querida casa de estudios, “Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios”, a la Facultad de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, por permitirme ser parte de su gran familia estudiantil, por albergarme durante la que ha sido la mejor etapa de mi vida, a mis docentes por compartir su sabiduría, conocimientos, experiencias y por darme la mejor formación académica.

A mi asesor, el Dr. Gabriel Alarcón Aguirre, por haber compartido sus conocimientos y por el tiempo brindado durante el proceso de elaboración de este presente trabajo de investigación y así cumplir con mis objetivos, mi agradecimiento sincero e infinito por su ayuda.

En especial al Dr. Percy Amilcar Zevallos Pollito por su apoyo incondicional, sus consejos y siempre darme la motivación para seguir adelante.

A mis queridos amigos y compañeros que siempre estuvieron conmigo en esta etapa tan importante de mi formación universitaria, y que fueron parte de mi formación profesional, y recibí de cada uno de ellos una gran amistad.

## Resumen

Madre de Dios integra el grupo de los países con bosque Amazónicos, es capital de la biodiversidad del Perú y es reconocida en el mundo por su alta Biodiversidad. A pesar de ello, las amenazas de la deforestación son permanentes. Los bosques están sujetos a fuertes presiones por invasión de tierras, expansión de la frontera agrícola, la minería de oro, y efectos colaterales que ocasionan. El presente estudio evalúa la deforestación por minería de oro mediante la aplicación de sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Paríamanu – Madre de Dios, durante los periodos 2010-2020. Para determinar la deforestación por minería de oro se utilizaron técnicas de teledetección, imágenes de los sensores Alos Palsar (2010) y Sentinel-1 (2015-2020). El método de clasificación supervisada fue Random Forest. El procesamiento utilizó la plataforma Google Earth Engine, SNAP ESA, ENVI, y ArcMap. La medición de la precisión fue obtenida a través muestras en campo e imágenes de media y alta resolución (PlanetScope y WorldView). La cuantificación de bosque mostro al inicio (enero de 2010) 354 609,93 ha, seguida de 354 477,20 ha, con 354 125,48 ha, y 353 838,13 ha a diciembre de 2010, 2015 y 2020. La deforestación por minería de oro reporta 1,19 ha para 2010, con 36,94 ha para 2015, y 99,73 ha para 2020. De 2010 a 2020 se perdieron 1 414,07 ha de bosque, siendo la minería de oro responsable de 7,05%, con una tasa anual de pérdida (q) de 0,003% (9,85 ha/año). Respecto al cambio de cobertura y uso de suelo, en 10 años, 1 392,23 ha de bosque pasaron a otra categoría, de los cuales 97,18 ha (6,98%) corresponde a la minería de oro. Siendo la agricultura y la construcción de infraestructura responsable de 93,02% en la microcuenca del río Paríamanu.

**Palabras clave:** Bosque, pérdida de cubierta forestal, cambios de cobertura y uso de suelo, Random Forest, Alos Palsar y Sentinel-1.

## Abstract

Madre de Dios is part of the group of countries with Amazonian forests, it is the capital of Peru's biodiversity and is recognized in the world for its high Biodiversity. Despite this, the threats of deforestation are permanent. Forests are subject to strong pressure from land invasions, expansion of the agricultural frontier, gold mining, and the collateral effects they cause. This study evaluates deforestation due to gold mining through the application of Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors in the Micro-basin of the Paríamanu River - Madre de Dios, during the periods 2010-2020. To determine deforestation due to gold mining, remote sensing techniques, images from the Alos Palsar (2010) and Sentinel-1 (2015-2020) sensors were used. The supervised classification method was Random Forest. The process used the Google Earth Engine platform, SNAP ESA, ENVI, and ArcMap. The precision measurement was obtained through field samples and medium and high-resolution images (PlanetScope and WorldView). The forest quantification showed at the beginning (January 2010) 354 609,93 ha, followed by 354 477,20 ha, with 354 125,48 ha, and 353 838,13 ha as of December 2010, 2015 and 2020. Deforestation by gold mining it reports 1,19 ha for 2010, with 36,94 ha for 2015, and 99,73 ha for 2020. From 2010 to 2020, 1 414,07 ha of forest were lost, with gold mining being responsible for 7,05%, with an annual loss rate (q) of 0,003% (9,85 ha/year). Regarding the change in land cover and use, in 10 years, 1 392,23 ha of forest went to another category, of which 9,18 ha (6.98%) correspond to gold mining. Being agriculture and the construction of infrastructure responsible for 93,02% in the micro-basin of the Paríamanu river.

**Key words:** Forest, loss of forest cover, changes in cover and land use, Random Forest, Alos Palsar and Sentinel-1.

## Índice de contenidos

	<b>Pág.</b>
Dedicatoria.....	i
Agradecimientos .....	ii
Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Introducción .....	1
<b>CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del problema de investigación.....	3
1.2 Formulación del problema .....	4
1.2.1 Problema general.....	4
1.2.2 Problemas específicos .....	4
1.3 Justificación e importancia.....	5
1.4 Objetivos de la investigación.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos .....	6
1.5 Hipótesis .....	6
1.6 Variables de la investigación.....	7
1.6.1 Identificación de variables.....	7
1.6.2 Operacionalización de variables .....	7
1.7 Consideraciones éticas.....	8
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
2.1 Antecedentes de la investigación .....	10
2.1.1 A nivel internacional.....	10
2.1.2 Alcance local .....	13

2.2 Base teórica.....	15
2.2.1 Deforestación.....	15
2.2.2 Bosque.....	16
2.2.3 Minería aurífera .....	18
2.2.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	18
2.2.5 Sensoramiento remoto .....	19
2.2.3 Energía electromagnética.....	20
2.2.4 Teledetección activa y pasiva .....	22
2.2.5 Plataforma y sensores .....	23
Sensores.....	24
Plataformas.....	25
2.2.6 Escáneres multiespectrales .....	26
2.2.7 RADAR .....	27
Resolución espacial .....	30
Radar de Apertura Sintética (SAR) .....	30
Distorsiones en imágenes de radar .....	31
Clasificación de imágenes .....	32
Proceso de clasificación de imágenes .....	33
Clasificación supervisada de imágenes .....	33
Algoritmos de clasificación.....	33
Método de clasificación Random Forest (RF) .....	34
2.2.8 Software de procesamiento de imágenes.....	35
SNAP ESA.....	35
Google Earth Engine.....	35
ENVI .....	35
ArcMap .....	36



ArcGIS Pro.....	36
2.2.9 JAXA.....	36
Alos-Palsar.....	37
2.2.10 Programa Copérnico.....	37
Sentinel-1.....	38
2.3 Definición de términos .....	39
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>43</b>
3.1 Tipo de investigación .....	43
3.2 Diseño de la investigación .....	43
3.3 Delimitación espacial y temporal .....	43
3.3.1 Clima e hidrografía.....	45
3.4 Población y muestra .....	46
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	47
3.5.1 Método y técnicas .....	47
3.5.2 Procesamiento de datos y análisis estadístico.....	50
Tratamiento y análisis de la imagen SAR .....	53
Tratamiento de datos .....	56
Análisis estadístico .....	58
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>60</b>
4.1 Clasificación, pérdida y tasa de cubierta forestal por minería de oro en la microcuenca del río Paríamanu .....	60
4.1.1 Clasificación de SAR .....	60
4.1.2 Pérdida de cubierta forestal (bosque) .....	65
4.1.3 Evaluación de precisión de clasificación.....	68
4.2 Cambios de cobertura y uso del suelo.....	69
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>

RECOMENDACIONES.....	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
ANEXOS.....	85

## Índice de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Operacionalización de variables .....	7
Tabla 2. Información de adquisición de imágenes Alos Palsar y Sentinel-1	51
Tabla 3. Características de la imagen de satélite Radar Alos Palsar.....	51
Tabla 4. Características de la imagen de satélite Radar Sentinel-1.....	52
Tabla 5. Valoración del coeficiente kappa .....	57
Tabla 6. Uso de suelo en el área de estudio.....	62
Tabla 7. Tasa y pérdida de bosque (deforestación por minería de oro) anual promedio en el área de estudio .....	67
Tabla 8. Precisión de resultados de SAR Sentinel-1 .....	68
Tabla 9. Cambio de uso de suelo en concesiones forestales de castaña en la microcuenca del río Manuripe.....	72

## Índice de Figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Un sensor de detección remota mide la energía reflejada o emitida. Un sensor activo tiene su propia fuente de energía.....	20
<i>Figura 2.</i> Energía electromagnética. ....	21
<i>Figura 3.</i> Diferencia entre sensor activo y pasivo. ....	23
<i>Figura 4.</i> Descripción general de los sensores. ....	25
<i>Figura 5.</i> Geometría de captura de información de RADAR. ....	29
<i>Figura 6.</i> Funcionamiento de los SAR. ....	31
<i>Figura 7.</i> El proceso de clasificación; El componente más importante es el entrenamiento en combinación con la selección del algoritmo. ....	33
<i>Figura 8.</i> Ubicación del área de estudio.....	44
<i>Figura 9.</i> Distribución de muestras para validar el cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios.....	47
<i>Figura 10.</i> Imágenes Alos Palsar (2010) y Sentinel-1 (2015 y 2020), polarización HH HV, y RGB HH HV HH/HV de la Microcuenca del río Pariamanu. ....	53
<i>Figura 11.</i> Esquema metodológico Random Forest.....	55
<i>Figura 12.</i> Validación de bosque, minería de oro y otros usos con imágenes WorldView de 0,38 m x 0,38 m de resolución espacial (a y b) e imágenes PlanetScope de 3 m x 3 m de resolución espacial (c). ....	58
<i>Figura 13.</i> Imagen de Satélite Sentinel-1, firmas espectrales en las bandas R (HH) G (HV) B (HH/HV); (a) Bosque, (b) Minería, (c y d) Otros usos (áreas agrícolas e infraestructura). ....	61
<i>Figura 14.</i> Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, enero de 2010. Sin presencia de minería. ....	63
<i>Figura 15.</i> Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, diciembre de 2010. Inicio de la minería de oro. ....	63

<i>Figura 16.</i> Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, diciembre de 2015. ....	64
<i>Figura 17.</i> Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, diciembre de 2020. ....	64
<i>Figura 18.</i> Pérdida de la cubierta forestal por la minería de oro y otras actividades en la Microcuenca del río Manuripe. ....	66
<i>Figura 19.</i> Pérdida de la cubierta forestal por la minería de oro y otras actividades en la Microcuenca del río Manuripe. ....	70
<i>Figura 20.</i> Cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, años 2010 a 2015. ....	71
<i>Figura 21.</i> Cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, años 2015 a 2020. ....	71
<i>Figura 22.</i> Cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, años 2010 a 2020. ....	72

## Índice de anexos

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Puntos de muestreo tomados en la microcuenca del río Pariamanu. .....	86
Anexo 2. Panel fotográfico.....	95
Anexo 3. constancia de autorización.....	98

## Introducción

La deforestación de la Amazonia es una preocupación para el mundo y de los países Amazónicos, sin embargo, han sido vulnerados por la débil acción del sistema estatal. La reducción de la alta biodiversidad en la mayor extensión de selva tropical del planeta, es una amenaza permanente (Puzzi et al. 2020, p. 302; Song et al. 2018, p. 1480; Whittle et al. 2012, p. 37).

Comprender los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo que impulsan la deforestación es relevante para una gestión de la tierra más sostenible (Briceño et al. 2019, p. 250). Por lo tanto, comprender los motores de la deforestación es fundamental para el desarrollo de políticas y medidas para reducir las emisiones, así como plantear políticas de gestión forestal (Briceño, et al. 2019, p. 319). Además, identificar los motores de la deforestación es una necesidad en la tecnología actual de teledetección, actualmente, existe una limitación en los datos disponibles para identificar los motores de la deforestación (Alarcón et al. 2016, p. 319), la investigación científica relacionada con la deforestación se ha basado principalmente en evaluaciones regionales y globales (Leblois et al. 2017, p. 307; Puzzì, et al. 2020, p. 302; Zhou et al. 2018, p. 45) y, en general, no se ha centrado en criterios específicos, como lo proporcionan; el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, Cambio Forestal Global de la Universidad de Maryland, y el Ministerio de Ambiente del Perú a través de la plataforma , GeoBosques (Puzzi, et al. 2020, p. 303).

Sin embargo, estos sistemas de monitoreo se basan en sensores ópticos (por ejemplo, Landsat) y la deforestación en general, además están fuertemente influenciados por la presencia de la nubosidad (Leinenkugel et al. 2014, p. 150; Puzzì, et al. 2020, p. 303), la parte noroeste del Amazonas presenta una condición nubosa aproximada por un período de 10 meses. Por otro lado, los sensores ópticos presentan limitaciones en la discriminación de usos de la tierra que dan como resultado características de cobertura terrestre similares, por ejemplo, tierras de cultivo, pastos, diferentes tipos de pastos, y minería (Briceño, et al. 2019, p. 319; Hagensieker et al. 2017, p. 342; Puzzì, et al. 2020, p. 303). Esta variedad de usos de la tierra conlleva a la

deforestación de los bosques Amazónicos de manera fragmentada (Briceño, et al. 2019, p. 320; Puzzi, et al. 2020, p. 304; Whelen y Siqueira 2018, p. 310). El desarrollo de actividades en la Amazonia de Madre de Dios, no es tan diferenciada a otras regiones, sin embargo, se observa en sectores focalizados como Huepetuhe, Boca Colorado, La Pampa, Laberinto, entre otros, con mayor presencia e impacto de la actividad minera de oro (Alarcón, et al. 2016, p. 322; Asner y Tupayachi 2017, p. 96; Briceño, et al. 2019, p. 322; Puzzi, et al. 2020, p. 305). La Microcuenca Pariamanu se ubica al noreste de la ciudad de Puerto Maldonado, y la interacción de actividades va desde el desarrollo de actividades como la agricultura, ganadería, y forestales; concesiones dedicadas al aprovechamiento de madera, productos diferentes a la madera (castaña), conservación, y ecoturismo (Alarcón, et al. 2016, p. 322; Briceño, et al. 2019, p. 323). A pesar de ello, en la última década, se ve la presencia de actividad minera de oro ilegal, que pasó desapercibida, y que hoy va ganando terreno, y es una amenaza a las actividades sustentables en la microcuenca (Alarcón, et al. 2016, p. 322; Briceño, et al. 2019, p. 323).

En este contexto, los sensores de radar de apertura sintética (SAR) son una alternativa para mapear la deforestación por minería de oro en regiones tropicales, ya que tienen una capacidad para todo clima y en cualquier momento, y proporcionan información física diferente a los datos ópticos, como textura, estructura y humedad (Whittle, et al. 2012, p. 40).

Los datos de Sentinel-1 presentan un potencial enorme para incorporar los SAR en el monitoreo de la deforestación, alertas y sistemas de cambio de usos de la tierra, por ser de disposición libre a partir de 2014 (Meyer et al. 2015, p. 1001; Puzzi, et al. 2020, p. 309).

Por lo tanto, la investigación evaluó la deforestación mediante la aplicación de sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Pariamanu, en los periodos 2010 – 2010, y facilitando información útil sobre la aplicabilidad de los datos Sentinel-1 para detección de la deforestación por minería de oro.



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

### **1.1 Planteamiento del problema de investigación**

Los bosques Amazónicos tropicales son responsables de importantes servicios de los ecosistemas, como el mantenimiento de la biodiversidad, la regulación del clima y el almacenamiento de carbono (Briceño, et al. 2019, p. 300; Caballero et al. 2018, p. 1904; Miñano et al. 2018, p. 500). Los cambios en estos ecosistemas, como la tala o la degradación de los bosques, pueden causar graves impactos ambientales a escala local, regional o global, con el potencial de alterar los bosques remanentes con el tiempo (Puzzi, et al. 2020, p. 310; Tello 2015, p. 67). Por lo tanto, el monitoreo y la comprensión de los cambios de los ecosistemas forestales, como la Amazonia peruana, el caso específico de Madre de Dios (microcuenca del río Paríamanu), no solo es afectado por la agricultura, la ganadería, y la tala ilegal, sino también por la minería de oro, que se ha convertido en un tema científico relevante en la aplicación del sensoramiento remoto para monitorear la región en el espacio y tiempo (Alarcón, et al. 2016, p. 325; Pérez 2020, p. 110). Estos proyectos se desarrollaron principalmente en base a datos ópticos (Alarcón, et al. 2016, p. 325; Pérez 2020, p. 110). Sin embargo, los datos ópticos se ven afectados por la presencia de nubes, humo y otras condiciones meteorológicas y atmosféricas (Jensen 2009, p. 43), que pueden llevar a la detección de cambios falsos o fallas en la detección de cambios reales. En zonas como la Amazonia peruana de Madre de Dios, donde la nubosidad es frecuente durante todo el año, la obtención de datos ópticos con baja cobertura de nubes en determinados períodos del año es una tarea difícil.

Los datos del radar de apertura sintética (SAR) pueden ser útiles para la detección de cambios en áreas tropicales, ya que los sistemas de imágenes SAR operan en el dominio de microondas y son capaces de obtener imágenes

casi independientemente de las condiciones atmosféricas. Ya sea para estudios de detección de cambios ópticos o basados en SAR, para ello se deben usar datos del mismo sensor y en épocas próximas del año, para minimizar la detección de falsos cambios causados por imágenes o aspectos fenológicos (Whittle, et al. 2012, p. 88).

Por otro lado, la falta de datos del sensor Sentinel-1 (2014 hacia adelante), genera el uso de datos de dos o más sensores con características diferentes, lo que puede ser un desafío, pero, con los procesos correctamente desarrollados se pueden obtener resultados muy confiables (Belenguer-Plomer et al. 2019).

La investigación propone un método más convincente, cuantificar la deforestación por minería de oro mediante sensores a Radar de Apertura Sintética (SAR) en la microcuenca del río Pariamanu, que, a diferencia de los datos ópticos, no presenta problemas climatológicos o meteorológicos.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿Cuánto será la deforestación por minería de oro mediante la aplicación de sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Pariamanu, provincia de Tambopata – Madre de Dios, ¿durante los periodos 2010-2020?

### **1.2.2 Problemas específicos**

P.E.1 ¿Cuánto será la deforestación por minería de oro mediante la aplicación de sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) Alos Palsar (AP) y Sentienel-1 (S1) en la Microcuenca del río Pariamanu, en los periodos 2010 (AP), 2015 y 2020 (S1)?

P.E.2 ¿Cuánto será la tasa anual de deforestación por minería de oro en la Microcuenca del río Pariamanu, entre los periodos 2010, 2015 y 2020?

P.E.3 ¿Cuál será el cambio de cobertura y uso de suelo (bosque a deforestación por minería de oro) en la Microcuenca del río Pariamanu, entre los periodos 2010, 2015 y 2020?

### **1.3 Justificación e importancia**

El uso de tecnologías de sensoramiento remoto es cada vez más usual y necesario en la evaluación de recursos y eventos climáticos. Los resultados son cada vez más precisos y a menor costo. Sin embargo, ello implica la inversión en recursos humanos para garantizar el correcto procedimiento para certificar su fiabilidad.

Los sensores ópticos, están supeditados a la disponibilidad de información a los fenómenos atmosféricos, por consiguiente, realizar la evaluación con problemas climáticos, se hace imposible.

En este contexto, a nivel científico y ambiental, el uso de los SAR en comparación con los ópticos opera obteniendo información precisa independientemente de las condiciones atmosféricas. Asimismo, a pesar de no ser un procedimiento nuevo, tampoco es de amplio conocimiento.

En el aspecto social, el uso de tecnologías SAR, genera información precisa sobre la deforestación por minería de oro en la microcuenca del río Pariamanu, debido a la captura de imágenes de alta resolución por técnicas de alargamiento artificial de la antena de un sensor al capitalizar el movimiento de vuelo, así como la diferenciación de la dispersión según la rugosidad de la superficie objetivo y polarización empleada, útil para las poblaciones directas e indirectas, entidades del gobierno, y para la comunidad científica y académica, debido a que proporciona técnicas de procesamiento de sensores activos SAR replicables.

A nivel económico, en la actualidad el uso de tecnologías SAR no representa gastos significativos, más si, proporciona información valiosa para adoptar planes de gestión en la recuperación de áreas degradadas por minería de oro.

Asimismo, para el desarrollo favorable de la investigación, se contó con el apoyo y asesoramiento de los especialistas del Centro de Teledetección para el Estudio y Gestión de los Recursos Naturales (CETEGERN).

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar la deforestación por minería de oro mediante la aplicación de sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Pariamanu, provincia de Tambopata – Madre de Dios, durante los periodos 2010-2020.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

O.E.1 Cuantificar la deforestación por minería de oro mediante la aplicación de sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) Alos Palsar (AP) y Sentinel-1 (S1) en la Microcuenca del río Pariamanu, en los periodos 2010 (AP), 2015 y 2020 (S1).

O.E.2 Determinar la tasa anual de deforestación por minería de oro en la Microcuenca del río Pariamanu, entre los periodos 2010, 2015 y 2020.

O.E.3 Cuantificar los cambios de cobertura y uso de suelo (bosque a deforestación por minería de oro) en la Microcuenca del río Pariamanu, entre los periodos 2010, 2015 y 2020.

## **1.5 Hipótesis**

**Hipótesis nula (H0):** La deforestación por minería de oro mediante el procesamiento de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Pariamanu, en los periodos 2010–2020, no presenta una alta fiabilidad y una tendencia creciente.

**Hipótesis alterna (H1):** La deforestación por minería de oro mediante el procesamiento de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Pariamanu, en los periodos 2010–2020, presenta una alta fiabilidad y una tendencia creciente.

## 1.6 Variables de la investigación

### 1.6.1 Identificación de variables

#### Variable Dependiente

- ✓ Comportamiento de la vegetación por la deforestación por minería de oro en la unidad mínima de la imagen (píxel).

#### Variable Independiente

- ✓ Áreas deforestadas por la minería de oro en los periodos 2010, 2015 y 2020.

### 1.6.2 Operacionalización de variables

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

Tabla 1. *Operacionalización de variables*

Objetivo	Variable	Dimensión	Indicadores	Finalidad
Cuantificar la deforestación por minería de oro mediante la aplicación de sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del	Área de deforestación por minería de oro.	Áreas deforestadas en hectáreas en la Microcuenca del río Pariamanu	1. Superficie total 2. Validación	Superficie total

río Pariamanu, en los periodos 2010, 2015, y 2020.				
Determinar la tasa anual de deforestación por minería de oro en la Microcuenca del río Pariamanu, entre los periodos 2010, 2015, y 2020.	Tasa anual de deforestación por minería en la microcuenca.	Tasa anual de la deforestación por minería en la Microcuenca Pariamanu	Tasa anual de deforestación por minería de oro	Determinar la tasa anual de deforestación por la minería de oro en la Microcuenca del río Pariamanu
Cuantificar los cambios de cobertura y uso de suelo (bosque a deforestación por minería de oro) en la Microcuenca del río Pariamanu, entre los periodos 2010, 2015, y 2020.	Cambios de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu	Conversión de bosque a deforestación en la Microcuenca del río Pariamanu	Cambios de cobertura y uso de suelo	Cuantificar los cambios de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu

## 1.7 Consideraciones éticas

La investigación desarrollo métodos aplicados al análisis y procesamiento de imágenes de RADAR de Apertura Sintética (SAR), para se dispondrá de los softwares SNAP ESA y Google Earth Engine de plataforma abierta, así como ENVI 5.3®, ArcGisPro 2,1®, y ArcGIS 10,5® del CETEGERN.

Por protocolos de seguridad de la pandemia (COVID19), el tesista y colaboradores usaron licencia del CETEGERN, mas no, accedieron a las instalaciones en la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

A nivel de política institucional, la investigación cumple con la política marco de la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA), creada por Decreto Ley N° 20643.

Los trabajos de campo considerados para la validación de los resultados, mantuvieron el cumplimiento estricto de los protocolos de seguridad COVID19; transporte, alimentación, y entrevista.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes de la investigación**

#### **2.1.1 A nivel internacional**

Whittle, et al. (2012, pp. 83-98) “determinaron la deforestación tropical usando Alos Palsar en Sumatra Indonesia, ciudad que tiene una de las tasas de deforestación más altas del mundo” (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98). “También cubre un área extensa y, a menudo, inaccesible, frecuentemente oscurecida por las nubes, lo que dificulta el monitoreo preciso y oportuno de sus bosques” (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98). “El radar de banda L Palsar de Jaxa Advanced Land Observing Satellite (ALOS) proporcionó polarización Scansar HH con imágenes repetidas cada 46 días” (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98), “proporcionando así imágenes claras con mucha más frecuencia que otras herramientas de monitoreo rápido de la deforestación disponibles, y aproximadamente pares de imágenes de Haz Fino Dual (FBD) anuales con polarizaciones HH y HV” (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98). “Los resultados muestra que la deforestación en la provincia de Riau en Sumatra identifica valores grandes de la desviación estándar temporal, pero las altas tasas de detección están asociadas con altas tasas de falsas alarmas, particularmente en bosque pantanosos” (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98). “Es posible lograr mejoras significativas en el rendimiento combinando datos FBD y Scansar, lo que proporciona una detección de deforestación del 72% para una tasa de falsas alarmas (detección de deforestación en bosques no perturbados) del 20%” (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98).

Khati et al. (2018, pp. 503-512) “identificaron la tala de bosques en Haldwani, India, utilizando datos SAR de ALOS-2/PALSAR-2, último satélite SAR que proporciona datos de banda L multipolarizados. Con el aumento de la deforestación, es importante evaluar el potencial de los datos SAR para



identificar talas en las regiones forestales” (Khati, et al. 2018, pp. 503-512). “En este trabajo de investigación, se adquieren datos de SAR multitemporales de ALOS-2/PALSAR-2 y conjuntos de datos ópticos suplementarios de Landsat-8 en bosques tropicales de la India, y los SAR se analizan en una plantación de teca progresivamente talada” (Khati, et al. 2018, pp. 503-512). “Se estima la sensibilidad de los parámetros de SAR a los cortes claros progresivos y se encuentra que la retrodispersión con polarización cruzada, el parámetro de entropía  $H$  son más sensibles tanto a la tala total como parcial” (Khati, et al. 2018, pp. 503-512). “El estudio destaca la utilidad de los parámetros SAR para monitorear la tala de bosques para una mejor gestión forestal” (Khati, et al. 2018, pp. 503-512).

Sica et al. (2019, pp. 111-277) “exploraron el potencial del SAR interferométrico de repetición (InSAR) para fines de clasificación de la cobertura terrestre. Desarrollaron mapas temáticos a gran escala, basado en el uso de datos multitemporales, adquiridos en breves intervalos de observación (series de tiempo corto)” (Sica, et al. 2019, pp. 111-277). “Por lo tanto, la idea básica es modelar con precisión la evolución en el tiempo de la descorrelación temporal y utilizar los parámetros estimados con la retrodispersión, en la clasificación de aprendizaje automático de Random Forest” (Sica, et al. 2019, pp. 111-277). “El trabajo se llevó a cabo en Europa central, considerando las pilas interferométricas de banda C Sentinel-1, adquiridas durante un período de tiempo de aproximadamente un mes” (Sica, et al. 2019). “Se han considerado tres clases diferentes de cobertura del suelo: superficies artificiales como, por ejemplo, áreas urbanas, bosques y áreas no boscosas como el conjunto de vegetación baja, suelo desnudo y áreas agrícolas” (Sica, et al. 2019, pp. 111-277). “Los resultados muestran un nivel de acuerdo superior al 91%, en comparación con el producto del mapa de cobertura terrestre CORINE de 2012, utilizado como referencia para la prueba del algoritmo de clasificación” (Sica, et al. 2019, pp. 111-277).

Puzzi, et al. (2020, pp. 102-214) “evaluaron los datos de la banda C de SAR para distinguir eficazmente los usos modificados de la tierra en un bosque amazónico muy perturbado” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214).

“Comprender los usos modificados de la tierra y los impulsores de la deforestación es fundamental para el desarrollo de políticas y medidas para reducir las emisiones y para desarrollar niveles de referencia forestal” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214). “Los datos de SAR de la banda C de Sentinel-1 presentan un potencial sin precedentes ya que las observaciones son gratuitas y están disponibles abiertamente, lo que proporciona los primeros datos de SAR regulares y estandarizados” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214). “Este estudio analiza la aplicabilidad de los datos de Sentinel-1 para la clasificación de usos de suelo como un esfuerzo por diferenciar los usos modificados de la tierra, que es una necesidad actual para los sistemas de deforestación de alerta temprana” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214). “El área de estudio cubre una frontera de deforestación en la Amazonía peruana donde el paisaje se caracteriza por un mosaico de tipos de usos” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214). “La amplitud de series de tiempo abarca el período 2017-2019, y se analizan junto con métricas estadísticas para cada clase y se desarrolla un árbol de decisiones de clasificación en Google Earth Engine” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214). “La precisión global obtenida se considera baja (52%), los resultados muestran una alta precisión del usuario para la clasificación de bosques y aguas” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214), “hay mucha confusión entre agricultura, vegetación secundaria y bosque, y se sugiere que el uso de la relación de polarización VV/VH es útil para la clasificación de pastos” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214). “Este estudio proporciona información para futuras investigaciones sobre cambio de usos de suelo y la identificación de impulsores en los sistemas de monitoreo de la deforestación que podrían resultar en información procesable adicional para la toma de decisiones” (Puzzi, et al. 2020, pp. 102-214).

Reis et al. (2020, pp. 777-780) “detectaron los cambios de múltiples fuentes con datos PALSAR en el sur del estado de Pará en la Amazonía brasileña, los datos ópticos se utilizan ampliamente para estudios de detección de cambios, a pesar de que se ven obstaculizados por las condiciones atmosféricas” (Reis, et al. 2020). “Los datos del radar de apertura sintética (SAR) pueden ser útiles para la detección de cambios en áreas con

cobertura frecuente de nubes, ya que los sistemas SAR son capaces de obtener imágenes casi independientemente de las condiciones atmosféricas” (Reis, et al. 2020, pp. 777-780). “Los resultados indican que el SAR de banda L y los enfoques de sensores múltiples son adecuados para la identificación de la deforestación, incluso si los resultados posteriores a la clasificación no lograron valores de precisión global superiores a 0,86” (Reis, et al. 2020, pp. 777-780). “Los resultados de detección de cambios más precisos obtenidos en este trabajo no se asociaron con la precisión general de las clasificaciones de cobertura terrestre, sino con la distribución y precisión de clases específicas” (Reis, et al. 2020, pp. 777-780).

### **2.1.2 Alcance local**

Swenson et al. (2011, pp. 1-7) “proporcionan una prueba de la degradación medioambiental y de la demanda mundial causada por la minería del oro, cuando se descubre que la minería aluvial representa un nuevo patrón de deforestación que supera a la de las comunidades vecinas” (Swenson, et al. 2011, pp. 1-7). Utilizaron imágenes de satélite para cuantificar la deforestación inducida por la minería del oro en Madre de Dios entre 2003 y 2009, así como el vínculo entre los precios mundiales del oro y las importaciones de mercurio en Perú.” Swenson, et al. (2011) encontraron que la minería y el aumento de los precios del oro han sido los factores clave de la conversión de los bosques primarios y desde agosto de 2009 se han deforestado más de 15.500 hectáreas de bosque primario y humedales en tres emplazamientos mineros (Guacamayo, Colorado-Punquiri y Huepetuhe), lo que demuestra un aumento de la tasa de crecimiento (Swenson, et al. 2011, pp. 1-7). Estos autores manifiestan que les preocupa mucho que la deforestación minera se haya ido ampliando con el tiempo y parezca superar la deforestación neta en los últimos años, asimismo, manifiestan que las imágenes de satélite deberían impulsar una mayor investigación sobre la relación entre el uso y el cambio del suelo y los factores económicos (Swenson, et al. 2011).

Asner et al. (2013, pp. 18454-18459), utilizaron estudios de campo, mapas aéreos y datos satelitales de alta resolución para determinar la extensión

de la minería de oro en la región de Madre de Dios entre 1999 y 2012, lo que provocó la deforestación de más de 50 000 hectáreas. Asimismo, entre 2009 y 2011, CLASlite (Carnegie Landsat Analysis System-lit) detectó 46.417 hectáreas de deforestación, lo que supone el 94% del total, un seguimiento mediante fotos de alta resolución para la cuantificación, que muestra que la extracción de oro está aumentando y muestra que hay un número limitado de actividades no verificadas (Asner, et al. 2013, pp. 18454-18459), “a finales de 2006, se descubrió una nueva y enorme mina llamada Guacamayo, que representó hasta el 13% de toda la zona minera regional hasta 2012.” (Asner, et al. 2013, pp. 18454-18459).

Moreno (2013, pp. 85-91) ha comprobado que la deforestación en la provincia de Tambopata ha aumentado en el transcurso de cuatro años, de 2007 a 2011, utilizando imágenes de LANDSAT. Desde 2007, el ritmo de deforestación ha aumentado de 212,89 ha a 4 041,72 ha en un corto período de tiempo. (Moreno 2013, pp. 85-91).

Alarcón, et al. (2016, pp. 319-330) cuantificaron al suroeste de Puerto Maldonado han sido cuantificadas por los investigadores (Puerto Maldonado - Inambari). Las imágenes del Landsat TM 5 y 8 OLI fueron procesadas utilizando el método de clasificación Random Forest (Alarcón, et al. 2016, pp. 319-330). “encontraron una tasa anual de deforestación del 0,22% y una tasa media de deforestación de 3.246 hectáreas por año entre 1999 y 2013” (Alarcón, et al. 2016, pp. 319-330), “de ello se deducen las tasas de variación anuales del 0,18%, 0,30% y 0,31% durante 1999-2008, 2008-2011 y 2011-2013 con una tasa de deforestación anual de 2.594 ha/año, 4.427 ha/año y 4.410 ha/año, respectivamente.” (Alarcón, et al. 2016, pp. 319-330), la minería de oro aluvial y la ampliación de la frontera agrícola, la ganadería y las actividades forestales son las principales responsables “de la conversión sistemática de bosque a deforestación para el año 2008-2011 con 29 478 hectáreas (Alarcón, et al. 2016, pp. 319-330).

Asner y Tupayachi (2017, pp. 94-104) encontraron que que los bosques protegidos de la Amazonía peruana se estaban perdiendo a un ritmo acelerado en favor de la minería del oro, utilizando la teledetección de alta resolución para

examinar los cambios anuales en la superficie de la minería del oro en la región de Madre de Dios entre 1999 y 2016 (Asner y Tupayachi 2017, pp. 94-104). Las cantidades de tierra perdidas por la minería de oro en la región fueron en promedio 4437 hectáreas cada año (Asner y Tupayachi 2017, pp. 94-104). En 2013 y 2014, el ritmo de deforestación por la minería casi se duplicó después de la acción gubernamental de 2012 sobre la pérdida de bosques relacionada con la minería (Asner y Tupayachi 2017, pp. 94-104). La Reserva Nacional de Tambopata experimentó un aumento del 40 por ciento en el área de minería de oro entre 2012 y 2016, según un nuevo informe (Asner y Tupayachi 2017, pp. 94-104).

Caballero, et al. (2018, p. 1903) desarrollaron un estudio de 34 años sobre la deforestación y la degradación de los bosques de la Amazonia peruana a causa de la minería del oro.. A nivel mundial, las tasas de deforestación han disminuido, pero en la Amazonia occidental han aumentado (Caballero, et al. 2018, p. 1903). “Utilizaron la fusión de CLASlite y el conjunto de datos Global Forest Change, con Landsat, cuantificando la deforestación causada por la minería de oro en el período 1984-2017 en el sur de la Amazonía peruana” (Caballero, et al. 2018, p. 1903). Según el estudio, la cantidad de deforestación causada por la minería del oro aumentó un 21% a lo largo del período de 34 años estudiado (Caballero, et al. 2018, p. 1903). Desde 2011, se ha producido el 53% de la deforestación en el periodo de investigación, siendo el 10% en 2017 la mayor cantidad anual de deforestación. (Caballero, et al. 2018, p. 1903).

## **2.2 Base teórica**

### **2.2.1 Deforestación**

Según Schoene et al. (2007, p. 8) “la conversión directa inducida por el hombre de tierras boscosas en tierras no boscosas”. “La conversión del bosque a otro uso de la tierra o la reducción a largo plazo de la cobertura del dosel de árboles por debajo del umbral mínimo del 10 por ciento” (Schoene, et al. 2007, p. 8).

La deforestación se refiere a la eliminación de la cubierta forestal de forma permanente o durante un largo periodo de tiempo para dar paso a un tipo de uso diferente de la tierra. Mientras se perturbe el medio ambiente, éste perderá su capacidad de sostenerse (FAO 2016, p. 18; Leite-Filho et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 8).

Incluye áreas de bosque reconvertidas a agricultura, pastos, reservorios de agua y áreas urbanas (FAO 2016, p. 18; Leite-Filho, et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 8).

Las regiones de tala y desbroce quedan notablemente excluidas de la definición de "bosque", ya que el bosque está destinado a repoblarse espontáneamente o con la ayuda de la silvicultura. Si no se tala el resto del bosque cortado para introducir usos alternativos de la tierra, o se mantienen los claros mediante perturbaciones continuas, los bosques suelen recuperarse, aunque en una condición secundaria distinta. La deforestación y la reforestación se producen en pequeños parches en regiones de agricultura cambiante, donde los barbechos forestales y los campos agrícolas surgen en un patrón dinámico. El cambio neto en una región mayor se suele utilizar para facilitar la presentación de informes sobre estas áreas (FAO 2016, p. 18; Leite-Filho, et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 8).

Los bosques que han sido perturbados, sobreutilizados o afectados por cambios en las circunstancias ambientales también se consideran lugares deforestados, ya que no pueden mantener una cobertura arbórea superior al 10% (FAO 2016, p. 18; Leite-Filho, et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 8).

### **2.2.2 Bosque**

“El bosque es un área mínima de tierra de 0,05-1.0 hectáreas con una cobertura de copa de árboles (o nivel de población equivalente) de más del 10-30 por ciento con árboles que tienen el potencial de alcanzar una altura mínima de 2-5 metros en la madurez in situ” (Schoene, et al. 2007, p. 15). “Un bosque puede consistir en formaciones forestales cerradas, donde árboles de

varios pisos y maleza cubren una gran proporción del suelo, o bosque abierto” (Schoene, et al. 2007, p. 15). “Hay zonas forestales que aún no han alcanzado una densidad de copas de entre el 10% y el 30% o una altura de los árboles de entre 2 y 4 metros, así como zonas que normalmente forman parte de la zona forestal pero que han quedado temporalmente deshabitadas por la intervención humana (como la tala o por causas naturales) pero que se espera que vuelvan a poblarse como bosques en el futuro” (Schoene, et al. 2007, p. 15).

“El bosque es un área de tierra de más de 0,5 ha, con una cobertura de dosel de árboles de más del 10 por ciento, que no se encuentra principalmente bajo la agricultura u otro uso específico de la tierra no forestal” (FAO 2016, p. 14). “En el caso de bosques jóvenes o regiones donde el crecimiento de los árboles está climatizado, los árboles deben ser capaces de alcanzar una altura de 5 m in situ y de cumplir con el requisito de cobertura del dosel” (FAO 2016, p. 14).

“Incluye los terrenos con árboles de más de 5 metros de altura y una cubierta de copas del 10% o más, o árboles que puedan alcanzar estos niveles in situ. No incluye los terrenos que se utilizan principalmente para la agricultura o el desarrollo urbano” (FAO 2016, p. 14).

El bosque está determinado tanto por la presencia de árboles como por la ausencia de otros usos predominantes de la tierra (FAO 2016, p. 14; Leite-Filho, et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 15).

Debe haber una altura mínima de 5 metros para que los árboles prosperen en la naturaleza. Los terrenos que aún no han alcanzado, pero que se prevé que alcancen un 10% de cobertura de copas y una altura de árboles de 5 metros se incluyen en esta categoría, así como las áreas temporalmente sin sembrar, resultantes de la intervención humana o causas naturales, que se espera que se regeneren (FAO 2016, p. 14; Leite-Filho, et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 15).

Si se alcanzan los estándares de altura y cobertura de las copas de los árboles de bambú y palmeras, se incluyen los caminos forestales y los

cortafuegos, así como otros espacios abiertos menores, los bosques de los parques nacionales y las reservas naturales y otras zonas protegidas, como las de singular importancia científica o cultural o espiritual. Así como las plantaciones que se utilizan principalmente para la silvicultura y la protección, como las plantaciones de caucho y las de alcornoques, que tienen una superficie superior a 0,5 hectáreas y una anchura superior a 20 m (FAO 2016, p. 14; Leite-Filho, et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 15).

Los sistemas agroforestales, como los huertos frutales, no se incluyen en esta definición. Los árboles de los parques y jardines urbanos no se incluyen en esta definición (FAO 2016, p. 14; Leite-Filho, et al. 2020, pp. 2328-2341; Schoene, et al. 2007, p. 15).

### **2.2.3 Minería aurífera**

“La minería de oro es una actividad económica que consiste en extraer oro del suelo, y existe varias maneras de extracción de este mineral a lo largo de la historia” (Swenson, et al. 2011, pp. 1-7). “La extracción del oro, por el valor del mismo, ha sido generadora de procesos económicos, sociales e históricos en todo el mundo; lo cual ha hecho de la minería uno de los motores de desarrollo de varios países” (Swenson, et al. 2011, pp. 1-7).

La minería puede afectar el drenaje de agua del área, contaminar el agua con la escorrentía de la mina y amenazar a las comunidades locales, incluidos los pueblos indígenas, al afectar la calidad del suministro de alimentos (Swenson, et al. 2011, pp. 1-7).

Décadas de extracción ilegal de oro en la Amazonía peruana ha dejado miles de hectáreas de selva tropical en un desierto. Los mineros sin permiso despejaron vastas secciones de árboles e infundieron mercurio en la tierra, lo que provocó un desastre ambiental (Swenson, et al. 2011, pp. 1-7).

### **2.2.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)**



Un sistema de información geográfica (SIG) es un marco para recopilar, administrar y analizar datos. El SIG es un sistema de información geoespacial que combina muchos tipos de datos. Se utiliza una escena 3D y un mapa para crear representaciones visuales de la posición espacial y las capas de información. Gracias a ello, los SIG ayudan a los usuarios a tomar mejores decisiones al proporcionar una mayor comprensión de los datos con los que trabajan (Jiang 2020, pp. 1-36).

Los sistemas de información geográfica (SIG) combinan el conocimiento geográfico con herramientas de análisis y colaboración. Para que todos puedan trabajar con el mismo objetivo de extraer información útil de una gran variedad de fuentes (Jiang 2020, pp. 1-36). Cientos de miles de empresas de prácticamente todos los sectores utilizan los SIG para generar mapas que comunican, hacen análisis, intercambian información y resuelven problemas difíciles en todo el mundo (Jiang 2020, pp. 1-36).

### **2.2.5 Sensoramiento remoto**

"La teledetección es la ciencia (y, hasta cierto punto, el arte) de adquirir información sobre la superficie de la Tierra sin estar realmente en contacto con ella. Esto se hace detectando y registrando la energía reflejada o emitida y procesando, analizando y aplicando esa información" (Sabins Jr 1987, p. 25).

"Los sensores remotos recopilan datos al detectar la energía que se refleja desde la Tierra. Estos sensores pueden estar en satélites o montados en aviones" (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle et al. 2004, pp. 23-34).

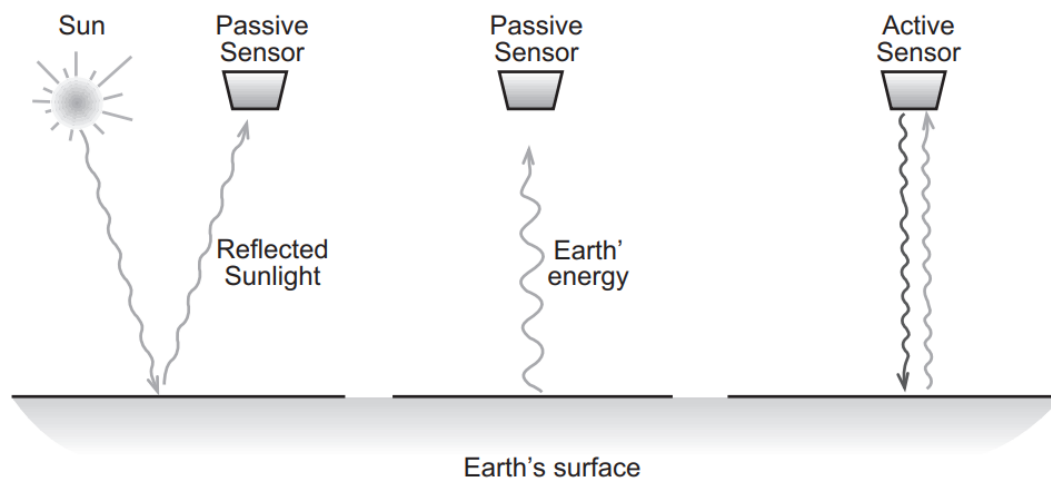
Hay dos tipos de sensores remotos: pasivos y activos. Los sensores pasivos se activan en respuesta a estímulos ambientales. Recogen la energía natural radiada o reflejada por la superficie de la Tierra. La fuente de radiación más identificada por los sensores pasivos es la luz solar (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34).

En cambio, los sensores activos adquieren datos sobre la Tierra a través de la estimulación interna. Por ejemplo, un sistema de teledetección por rayo

láser hace brillar un láser sobre la superficie de la Tierra y controla el tiempo necesario para que la luz se refleje en su sensor (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34).

### 2.2.3 Energía electromagnética

La radiación electromagnética es la base misma de la tecnología de teledetección. Todo emite radiación electromagnética. Más específicamente, todos los objetos con una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación. Debido a que la radiación puede transportar energía incluso sin un medio, es la única forma en que la tierra interactúa con el resto del universo. Los instrumentos de teledetección en satélites buscan medir con precisión la energía electromagnética que irradia la tierra y la atmósfera. Comprender las capacidades y limitaciones de la tecnología de teledetección requiere una comprensión más profunda de la radiación electromagnética (luz) y el espectro electromagnético (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34).



*Figura 1.* Un sensor de detección remota mide la energía reflejada o emitida. Un sensor activo tiene su propia fuente de energía.

Fuente: Kerle, et al. (2004, p. 28).

El espectro electromagnético es simplemente el rango completo de frecuencias de ondas que caracteriza a la radiación solar. Aunque estamos hablando de luz, la mayor parte del espectro electromagnético no puede ser detectado por el ojo humano. Incluso los detectores de satélite solo capturan una pequeña parte de todo el espectro electromagnético.

Desde las longitudes de onda más largas a las más cortas, el espectro generalmente se divide en las siguientes secciones: radio, microondas, infrarrojos, visible, ultravioleta, rayos y radiación de rayos gamma. Los humanos solo pueden ver una banda estrecha de luz visible, que es una pequeña fracción del espectro electromagnético. Percibimos esta radiación como los colores del arco iris que van del rojo al violeta, con los rojos con longitudes de onda más largas (~ 0,7 micrómetros) y el violeta con longitudes de onda más cortas (~ 0,4 micrómetros). Pero tenga en cuenta cuán "largas" son realmente estas longitudes de onda. Un micrómetro ( $\mu\text{m}$ ) es igual a una millonésima parte de un metro, que es aproximadamente 1/100 del diámetro de un cabello humano, ¡eso es pequeño! A modo de comparación, las microondas tienen una longitud del orden de un centímetro y las ondas de radio y televisión tienen una longitud superior a un metro (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34).

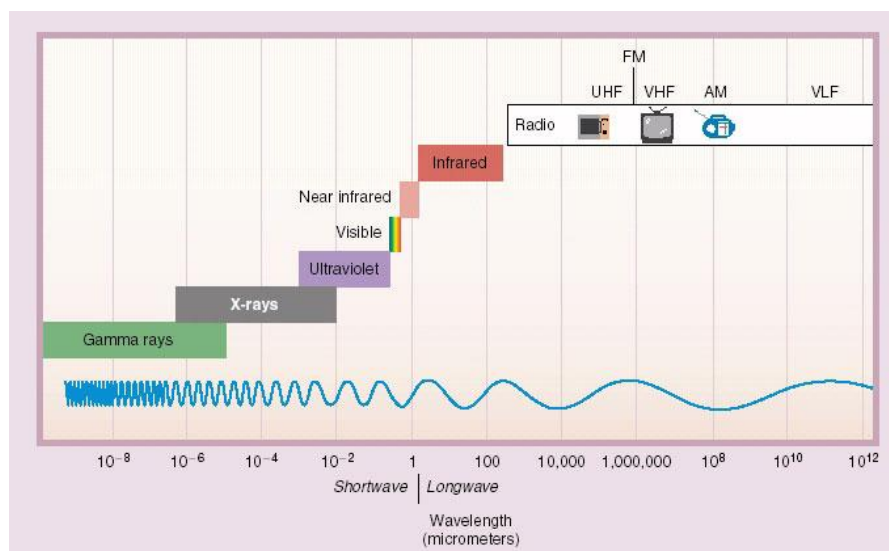


Figura 2. Energía electromagnética.

Fuente: Kerle, et al. (2004).

#### **2.2.4 Teledetección activa y pasiva**

Los instrumentos de teledetección son de dos tipos principales; activo y pasivo. Los sensores activos (por ejemplo, escáneres de radar y láser) emiten radiación artificial para monitorear la superficie terrestre o las características atmosféricas (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34). Los radares son instrumentos de generación de imágenes, mientras que los altímetros y dispersómetros de radar no son imágenes (Figura 3). Radar es la abreviatura de Radio Detection and Ranging, un método para la detección y rango de características de la superficie terrestre (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34). Los satélites de radar utilizan pulsos cortos de radiación electromagnética en el rango espectral de microondas, por lo tanto, no dependen de la luz del día y apenas se ven afectados por las nubes, el polvo, la niebla, el viento y las malas condiciones meteorológicas (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34). Miden los pulsos de radar reflejados desde el suelo, analizan la intensidad de la señal para recuperar información sobre la estructura de la superficie terrestre y detectan el tiempo transcurrido entre la emisión y el retorno del pulso (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34). Los resultados se pueden utilizar para medir distancias, dependiendo de la misión del satélite, se utilizan diferentes operaciones y procedimientos para procesar las señales en información viable (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34).

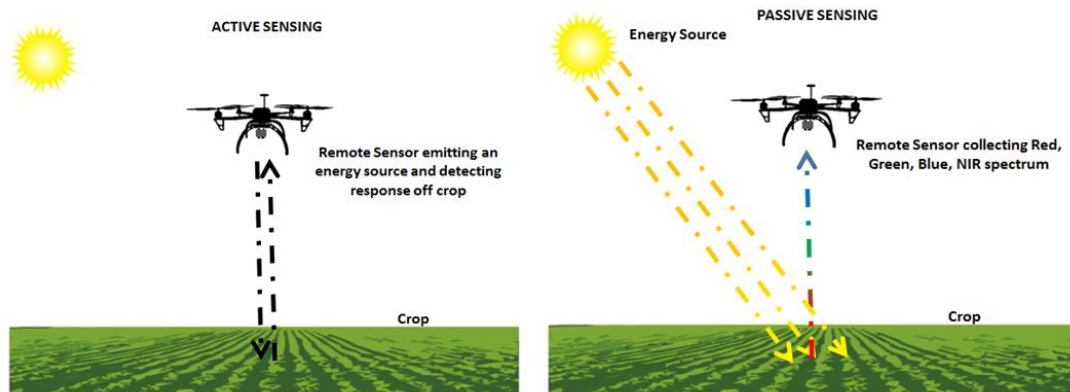


Figura 3. Diferencia entre sensor activo y pasivo.

Fuente: Kerle, et al. (2004, p. 30).

Los sensores pasivos detectan la radiación solar reflejada desde la tierra y la radiación térmica en el visible e infrarrojo del espectro electromagnético (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34). No emiten su propia radiación, sino que reciben luz natural y radiación térmica de la superficie terrestre, la mayoría de los sensores pasivos utilizan un escáner para obtener imágenes (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34). Equipados con espectrómetros, miden señales en varias bandas espectrales simultáneamente, lo que da como resultado las llamadas imágenes multispectrales que permiten numerosas interpretaciones de los espectros de la Tierra (Figura 3) (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34).

### 2.2.5 Plataforma y sensores

Utilizando la definición más amplia de teledetección, existen innumerables tipos de plataformas sobre las que desplegar un instrumento. La discusión en este curso se limitará a las plataformas comerciales y sensores más comúnmente utilizados en aplicaciones de mapas y SIG. Los satélites y las aeronaves recopilan la mayoría de los datos e imágenes de mapas base utilizados en SIG; Los sensores normalmente desplegados en

estas plataformas incluyen cámaras de película y digitales, sistemas de detección de luz y alcance (lidar), sistemas de radar de apertura sintética (SAR), escáneres multiespectrales e hiperespectrales. Muchos de estos instrumentos también se pueden montar en plataformas terrestres, como furgonetas, camiones, tractores y tanques. En el futuro, es probable que un porcentaje significativo de los datos cartográficos y de SIG provengan de fuentes terrestres; sin embargo, debido a limitaciones de tiempo (Jensen 2009, pp. 18-25; Kerle, et al. 2004, pp. 23-34).

## **Sensores**

“Un sensor es un dispositivo que mide y registra la energía electromagnética. Los sensores se pueden dividir en dos grupos. Los sensores pasivos dependen de una fuente de energía externa, generalmente el Sol (aunque a veces la Tierra misma)” (Jensen 2009, p. 38; Kerle, et al. 2004, p. 34).

“El grupo de sensores pasivos cubre el espectro electromagnético en el rango de menos de 1 picómetro (rayos gamma) a más de 1 metro (micro ondas y ondas de radio)” (Jensen 2009, p. 38; Kerle, et al. 2004, p. 34). “El más antiguo y el tipo más común de sensor pasivo es la cámara (fotográfica), los sensores activos tienen su propia fuente de energía, las mediciones de los sensores activos están más controladas porque no dependen de las (variables) condiciones de iluminación” (Jensen 2009; Kerle, et al. 2004). Los sensores activos incluyen el altímetro láser (que usa luz infrarroja) y el radar, la Figura 4 ofrece una descripción general de los tipos de sensores que se presentan en esta sección (Jensen 2009, p. 39; Kerle, et al. 2004, p. 35).

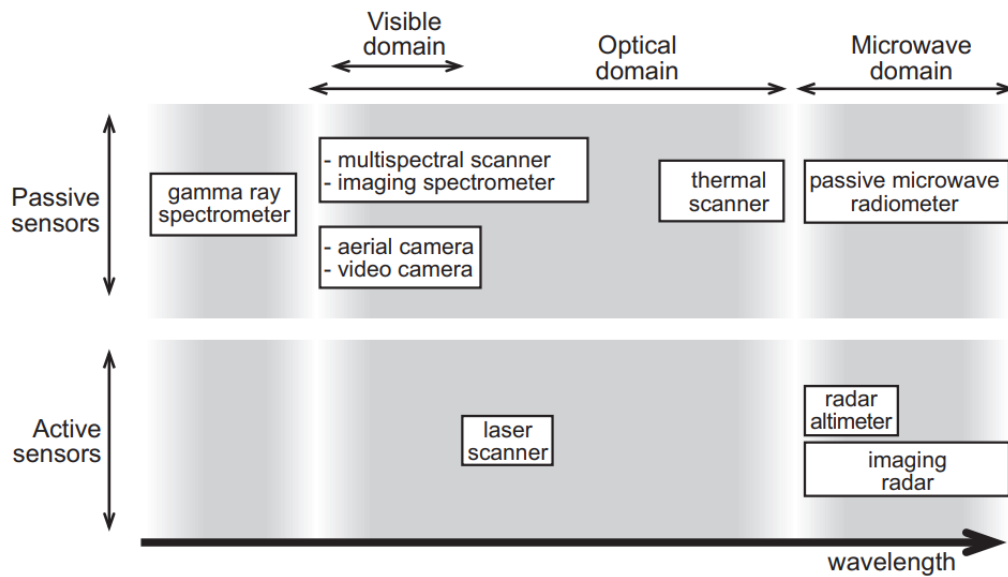


Figura 4. Descripción general de los sensores.

Fuente: Kerle, et al. (2004, p. 35).

## Plataformas

“En la teledetección, el sensor está montado en una plataforma, en general, los sensores de teledetección están conectados a plataformas móviles como aviones y satélites” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45). “Las plataformas estáticas se utilizan ocasionalmente en un contexto experimental, por ejemplo, al usar un sensor multispectral montado en un poste, se pueden evaluar las características cambiantes de reflectancia de un cultivo específico durante el día o la temporada” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45).

“Las observaciones aéreas se llevan a cabo utilizando aviones con modificaciones específicas para llevar sensores, un avión que lleva una cámara aérea o un escáner necesita un agujero en el piso del avión” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45). “A veces, se utilizan vehículos ultraligeros (ULV), globos, dirigibles o cometas para la teledetección aérea, las observaciones aéreas son posibles desde 100 m hasta 30–40 km de altura, hasta hace poco, la navegación de un avión era una de las partes más difíciles

y cruciales de la teledetección aerotransportada” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45).

“En los últimos años, la disponibilidad de tecnología de navegación por satélite ha mejorado significativamente la calidad de la ejecución de los vuelos, para la teledetección espacial, se utilizan satélites” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45). “Los satélites se lanzan al espacio con cohetes, los satélites para la observación de la Tierra se colocan en órbitas entre 150 y 36 000 km de altitud, la órbita específica depende de los objetivos de la misión, por ejemplo, observación continua de grandes áreas u observación detallada de áreas más pequeñas” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45).

### **2.2.6 Escáneres multiespectrales**

“Los escáneres multiespectrales miden la energía electromagnética reflejada escaneando la superficie de la Tierra, esto da como resultado datos de imagen digital, de los cuales la unidad elemental es un elemento de imagen: píxel” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45). “Como sugiere el nombre multiespectral, las mediciones se realizan para diferentes rangos del espectro EM, los escáneres multiespectrales se han utilizado en la teledetección desde 1972 cuando se lanzó el primer satélite Landsat” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45). “Después de la cámara aérea, es el sensor más utilizado. Las aplicaciones de los datos del escáner multiespectral se encuentran principalmente en el mapeo de la cobertura terrestre, la vegetación, la mineralogía superficial y el agua superficial” (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45).

“Se distinguen dos tipos de escáneres multiespectrales: el escáner de barrido y el escáner de escenas, los escáneres multiespectrales se montan en plataformas aéreas y espaciales” (Jensen 2009; Kerle, et al. 2004). “Los escáneres más comunes, pero necesariamente las más importantes son: Meteosat, NOAA, Landsat, SPOT, IRS, IKONOS, CBERS, Terra, Planet, EO, Sentinel, entre otros (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45).



### **2.2.7 RADAR**

La palabra "radar" se deriva de "radiodetección y alcance", lo que deja claro el contexto militar en el que se desarrolló por primera vez. Implica la transmisión de señales en radiofrecuencias. Estas señales se dispersan de los objetos en el rayo del radar, y la información sobre estos objetos se obtiene midiendo la radiación dispersa (los murciélagos emplean el mismo principio, pero utilizando sonido en lugar de ondas electromagnéticas). Para fines militares (y también para muchas tareas civiles, como el control del tráfico aéreo o la vigilancia de buques), los objetos de interés suelen ser de fabricación humana y relativamente pequeños, y el problema es detectarlos en un contexto de dispersión de su entorno (comúnmente llamado "desorden") y ruido aleatorio del sistema. Sin embargo, desde un punto de vista ambiental, el desorden es a menudo la parte más interesante del regreso, porque la dispersión de las superficies naturales puede proporcionar información sobre una amplia gama de fenómenos geofísicos (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45).

Experimentos sistemáticos, que comenzaron en la década de 1960 con sistemas terrestres, demostraron la sensibilidad del radar a fenómenos como el estado del mar, la humedad del suelo, el desarrollo de la vegetación, etc. Esto motivó el desarrollo de radares de teledetección diseñados para mirar hacia la tierra. Los primeros sistemas se llevaron a cabo en aviones, pero el evento que realmente demostró el valor de esta tecnología fue la misión del satélite Seasat en 1978. Como su nombre lo indica, el propósito de Seasat era recopilar información sobre los océanos. Para ello, llevaba tres instrumentos de radar: un altímetro, un dispersómetro y un radar de apertura sintética (SAR). La misión Seasat duró solo 100 días, pero produjo imágenes verdaderamente notables, incluidos mapas de la topografía de la superficie del océano, mediciones del viento en la superficie, velocidades sobre el océano y firmas inesperadas de olas internas dentro del océano, también hubo imágenes interesantes de superficies terrestres, lo que indica la

posibilidad de medir procesos terrestres (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45).

Los sistemas de detección remota por radar operan en el rango de frecuencias de radio (microondas), desde aproximadamente 0,03 a 30 GHz. Esto es de cinco a seis órdenes de magnitud menos que los de las bandas ópticas, y corresponde a longitudes de onda de aproximadamente 1 cm a unos 10 m. De ello se derivan muchas consecuencias, tanto para las posibles mediciones de estos sistemas como para su respuesta al medio ambiente. Entre estos se encuentran (Jensen 2009, pp. 38-45; Kerle, et al. 2004, pp. 35-45):

- ✓ Estas longitudes de onda, la atmósfera es esencialmente transparente, por lo que el radar no se ve afectado por las nubes. Excepto en las longitudes de onda más cortas, tampoco se ve afectado por la lluvia. Por tanto, el radar puede adquirir imágenes de la Tierra en todas las condiciones meteorológicas.
- ✓ A medida que aumenta la longitud de onda, también aumenta la capacidad del radar para penetrar en las copas de la vegetación y en el suelo, lo que brinda la posibilidad de medir las propiedades del suelo a través de la vegetación suprayacente y observar las estructuras subterráneas.
- ✓ Mientras que los sensores ópticos responden esencialmente a las bandas de energía rotacional y vibratoria de los materiales de la superficie, el radar es sensible a la estructura geométrica y al dieléctrico. Para muchos tipos de cobertura terrestre, como la vegetación, el contenido de agua es un determinante principal del dieléctrico, y los cambios en el contenido de agua tienen grandes efectos en las propiedades de la señal devuelta. Por ejemplo, la profundidad a la que una señal de radar puede penetrar en el suelo depende en gran medida de la humedad del suelo. En las zonas áridas, las longitudes de onda largas pueden penetrar muchos metros; Este se ha utilizado, por ejemplo, para delinear antiguos patrones de drenaje bajo lo que ahora son desiertos de arena.

- ✓ La tecnología en estas longitudes de onda permite medir la fase de la señal devuelta. Esto tiene consecuencias importantes, porque la fase lleva información sobre la naturaleza de la interacción con la superficie terrestre. Se utiliza para explorar las propiedades de polarización de la tierra en polarimetría de radar. Además, la fase diferencial (entre los retornos a dos antenas a la misma antena en diferentes momentos), medida en una determinada posición del sensor, permite realizar medidas de altura. Ésta es la base de la interferometría de radar, a partir de la cual se pueden realizar modelos digitales de elevación y mediciones extremadamente precisas del movimiento de la superficie.
- ✓ Relacionada con la capacidad de medir la fase está la sensibilidad del radar al movimiento, a través del efecto Doppler. Esto tiene tanto buenas como malas consecuencias: permite hacer inferencias sobre la velocidad de objetos en movimiento como barcos o automóviles, pero también complica enormemente la obtención de imágenes de objetivos como la superficie del océano, que están en constante movimiento.

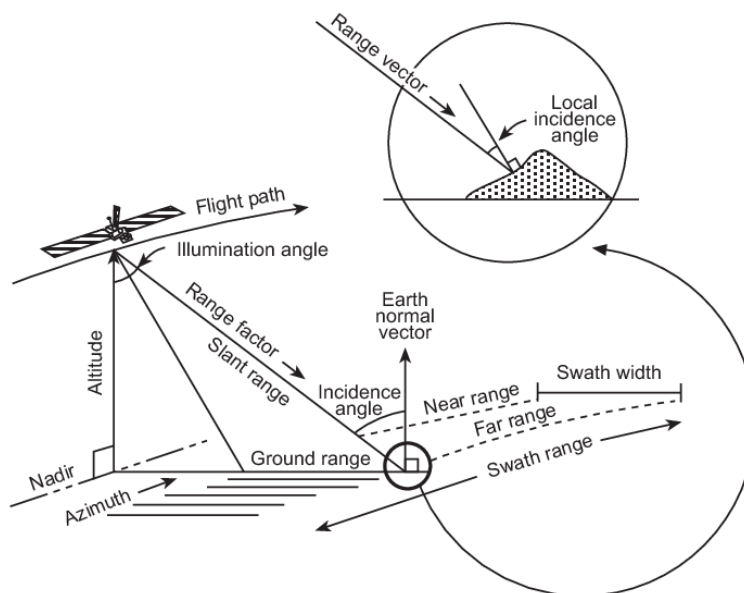


Figura 5. Geometría de captura de información de RADAR.

Fuente: Kerle, et al. (2004, p. 44).

## **Resolución espacial**

“En la teledetección por radar, las imágenes se crean a partir de señales transmitidas y retrodifundidas, si cada pulso transmitido forma un elemento en la imagen, el sistema se llama Radar de Apertura Real” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “Las resoluciones espaciales en el rango inclinado y en la dirección del acimut se definen por la longitud del pulso y el ancho del haz de la antena, respectivamente” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “Debido a los diferentes parámetros que determinan la resolución espacial en rango y resolución azimutal, es obvio que la resolución espacial en las dos direcciones es diferente” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “Para el procesamiento e interpretación de imágenes de radar, es útil volver a muestrear los datos de la imagen a un espaciado de píxeles regular en ambas direcciones” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

## **Radar de Apertura Sintética (SAR)**

Una descripción detallada de la teoría de funcionamiento del radar de apertura sintética (SAR) es compleja y está fuera del alcance de este sitio. Una imagen de radar de apertura sintética (SAR) es perpendicular a la velocidad de la aeronave, como se muestra en la figura 6. Normalmente, el radar de apertura sintética (SAR) produce una imagen bidimensional (2-D). Una dimensión en la imagen se llama rango (o trayectoria cruzada) y es una medida de la distancia de "línea de visión" desde el radar al objetivo. La medición de rango y la resolución se logran en el radar de apertura sintética (SAR) de la misma manera que la mayoría de los demás radares: el rango se determina midiendo el tiempo desde la transmisión de un pulso hasta la recepción del eco de un objetivo y, en el radar de apertura sintética más simple (SAR), la resolución de rango está determinada por el ancho del pulso transmitido, es decir, los pulsos estrechos producen una resolución de rango fino (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

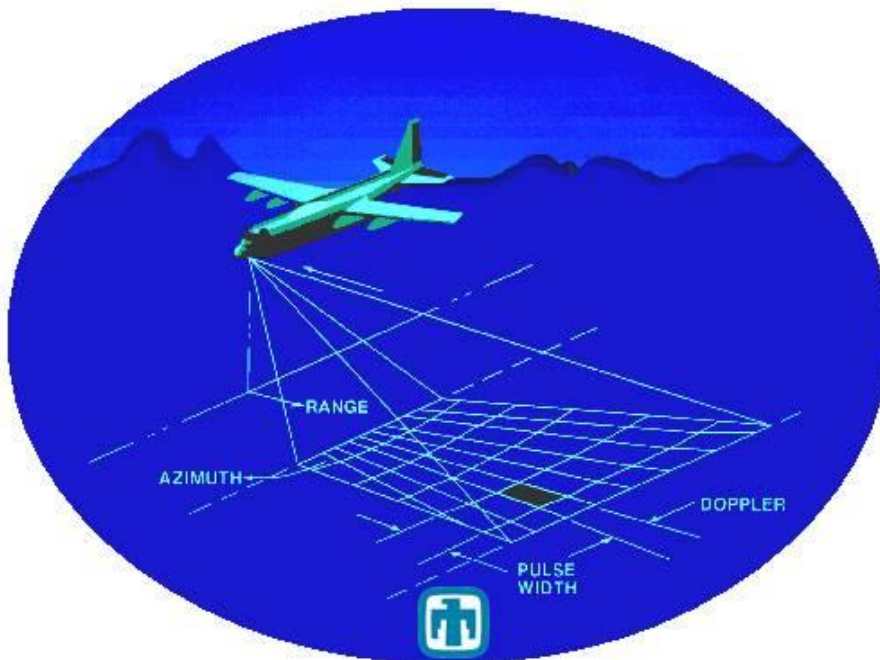


Figura 6. Funcionamiento de los SAR.

Fuente: Kerle, et al. (2004, p. 47).

La otra dimensión se llama azimut (o a lo largo de la trayectoria) y es perpendicular al rango. La capacidad del radar de apertura sintética (SAR) para producir una resolución de azimut relativamente fina lo diferencia de otros radares. Para obtener una resolución de azimut fina, se necesita una antena físicamente grande para enfocar la energía transmitida y recibida en un haz nítido. La nitidez del haz define la resolución del azimut (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

### **Distorsiones en imágenes de radar**

“Debido a la geometría de visualización lateral, las imágenes de radar sufren graves distorsiones geométricas y radiométricas” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “En las imágenes de radar, encontrará variaciones en la escala (conversión de rango inclinado a rango terrestre), escorzos, escalas y sombras (elevación del terreno), la interferencia debida a la coherencia de la señal provoca efectos de moteado” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

## **Clasificación de imágenes**

“Las imágenes proporcionan información sobre la distribución de los valores de píxeles correspondientes en las bandas de una imagen, las muestras en el espacio determinan las características en el que se han trazado los vectores para las clases específicas de cobertura terrestre” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “Cada grupo de vectores de características (clase) ocupa su propia área en el espacio de características” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “Una parte específica del espacio de características corresponde a una clase específica, una vez que las clases se han definido en el espacio de características, cada píxel de la imagen puede compararse con estas clases y asignarse a la clase correspondiente” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

“Las clases que se deben distinguir en una clasificación de imágenes deben tener diferentes características espectrales, esto se puede analizar, por ejemplo, comparando curvas de reflectancia espectral” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

“El principio de clasificación de imágenes es que un píxel se asigna a una clase según su vector de características, comparándolo con grupos predefinidos en el espacio de características” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “Hacerlo para todos los píxeles de la imagen da como resultado una imagen clasificada, el quid de la clasificación de imágenes es compararla con grupos predefinidos, lo que requiere la definición de grupos y métodos de comparación” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “La definición de los clústeres es un proceso interactivo y se lleva a cabo durante el proceso de formación, la comparación de los píxeles individuales con los grupos se realiza utilizando algoritmos de clasificación” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

## Proceso de clasificación de imágenes

El proceso de clasificación de imágenes (Figura 7) generalmente implica cinco pasos:

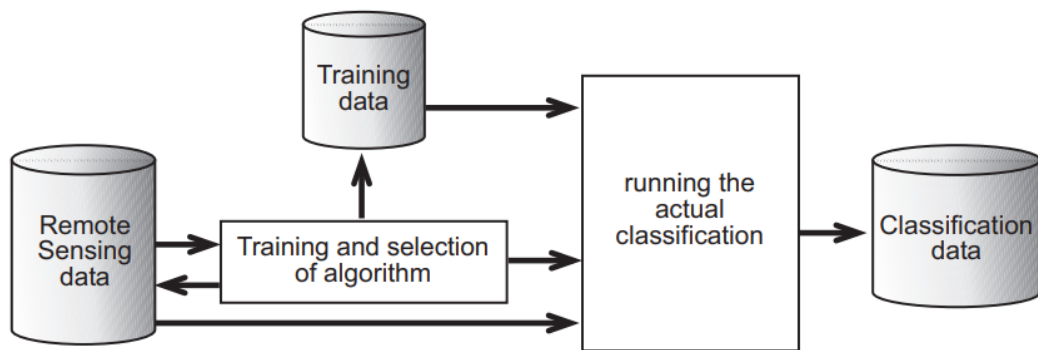


Figura 7. El proceso de clasificación; El componente más importante es el entrenamiento en combinación con la selección del algoritmo.

Fuente: Kerle, et al. (2004, p. 50).

## Clasificación supervisada de imágenes

La clasificación de imágenes es el proceso de asignar clases de cobertura terrestre a píxeles. En la clasificación supervisada, selecciona muestras representativas para cada clase de cobertura terrestre. A continuación, el software utiliza estos "sitios de formación" y los aplica a toda la imagen (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

Los tres pasos básicos para la clasificación supervisada son: seleccionar áreas de entrenamiento, generar archivo de firma, y clasificar (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

## Algoritmos de clasificación

“Definidos las muestras de entrenamiento, se puede realizar la clasificación de la imagen aplicando un algoritmo de clasificación, existen varios algoritmos, la elección depende del propósito de la clasificación y las

características de la imagen y los datos de entrenamiento” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “El operador debe decidir si se permite una clase rechazada o desconocida, a continuación, se explican dos algoritmos clasificadores” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51)

“Primero se explica el clasificador de cajas, por su simplicidad para ayudarlo a comprender el principio, en la práctica, el clasificador de cajas casi nunca se utiliza” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51). “También, algoritmos predictores basados en índices, en este caso se aplicará índices absolutos y relativos de quemas en imágenes SAR” (Jensen 2009, pp. 45-56; Kerle, et al. 2004, pp. 45-51).

### **Método de clasificación Random Forest (RF)**

El Random Forest es un conjunto de un gran número de árboles de decisión individuales. Cada árbol genera una predicción de clase, y la clase que recibe más votos se convierte en la predicción de nuestro modelo. La noción central es sencilla pero eficaz: en la ciencia de datos, la razón por la que el modelo de RF funciona tan eficazmente es porque 1. Un gran número de modelos altamente descorrelacionados (árboles) que trabajan juntos para superar a cualquiera de los modelos constituyentes individualmente. 2. La baja correlación entre los modelos es fundamental. Este maravilloso resultado se produce porque los árboles se protegen mutuamente de sus errores únicos (siempre que no se equivoquen sistemáticamente en la misma dirección). Aunque algunos árboles pueden ser incorrectos, muchos otros serán correctos, lo que permite que los árboles crezcan en la dirección correcta como grupo (Breiman 2001, pp. 5-32). Entonces, los requisitos previos para que el bosque aleatorio funcione bien son:

- ✓ “Las predicciones (y por lo tanto los errores) realizados por los árboles individuales deben tener bajas correlaciones entre sí” (Breiman 2001, pp. 5-32).



- ✓ “Es necesario que haya alguna señal real en nuestras funciones para que los modelos creados con esas funciones funcionen mejor que la adivinación aleatoria” (Breiman 2001, pp. 5-32).

## **2.2.8 Software de procesamiento de imágenes**

### **SNAP ESA**

“La plataforma de cliente extensible, portátil y modular, la abstracción genérica de los datos EO, la gestión de la memoria en mosaico y una arquitectura de procesamiento de gráficos hacen que este programa sea ideal para procesar y analizar los datos de los satélites de observación de la Tierra” (Zuhlke et al. 2015, p. 21), es de acceso abierto.

### **Google Earth Engine**

Es un visor de datos de imágenes geoespaciales liviano con acceso a un gran conjunto de conjuntos de datos globales y regionales disponibles en el Catálogo de datos de Earth Engine. Permite una visualización rápida de datos con la capacidad de hacer zoom y desplazarse en cualquier lugar de la Tierra, ajustar la configuración de visualización y superponer datos para inspeccionar los cambios a lo largo del tiempo (Gorelick et al. 2017, pp. 18-27).

### **ENVI**

“ENVI es conocido por su amplio conjunto de herramientas de análisis de imágenes y por sus flujos de trabajo automatizados, que te permiten extraer información crítica de las imágenes muy fácilmente” (Canty 2014, p. 12).

“ENVI 5 incluye nuevos usos automatizados y herramientas mejoradas que expanden tus posibilidades de procesamiento de imágenes y la capacidad de análisis para obtener respuestas imágenes y toma de decisiones más inteligentes” (Canty 2014, p. 12), su uso es comercial.

## **ArcMap**

“ArcMap es el componente principal del conjunto de programas de procesamiento geoespacial ArcGIS de Esri, y se utiliza principalmente para ver, editar, crear y analizar datos geoespaciales” (Shaner y Wrightsell 2000). “ArcMap permite al usuario explorar datos dentro de un conjunto de datos, simbolizar características en consecuencia y crear mapas. Su uso es comercial” (Shaner y Wrightsell 2000, pp. 3-5).

## **ArcGIS Pro**

“ArcGIS Pro es una aplicación SIG de escritorio para crear y trabajar con datos espaciales. Proporciona herramientas para visualizar, analizar, compilar y compartir datos en entornos 2D y 3D” (Shaner y Wrightsell 2000, pp. 5-7).

### **2.2.9 JAXA**

La Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), literalmente "Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial", JAXA se fundó el 1 de octubre de 2003, como resultado de la fusión de tres entidades anteriormente autónomas. La JAXA es responsable de la investigación, el desarrollo tecnológico y el lanzamiento de satélites, y participa en diversas misiones avanzadas, como la exploración de asteroides y la posible exploración lunar (Merritt et al. 1990, p. 13).

Está activo en varias áreas, incluido el programa de observación de la Tierra (misiones como ALOS, GOSAT). Uno de los satélites de JAXA está especializado en proporcionar datos para Sentinel (Merritt, et al. 1990, p. 13).

## **Alos-Palsar**

El radar de apertura sintética de banda L tipo Phased Array (PALSAR) es un sensor de microondas activo que utiliza una frecuencia de banda L para lograr una observación terrestre sin nubes y de día y de noche. Proporciona un mayor rendimiento que el radar de apertura sintética (SAR) del JERS-1. Resolución fina en un modo convencional, pero PALSAR tendrá otro modo de observación ventajoso. ScanSAR, que nos permitirá adquirir un ancho de 250 a 350 km de imágenes SAR (dependiendo del número de escaneos) a expensas de la resolución espacial. Esta franja es de tres a cinco veces más ancha que las imágenes SAR convencionales. El desarrollo de PALSAR es un proyecto conjunto entre JAXA y la Organización del Sistema de Observación de Recursos de Japón (JAROS) (Shimada et al. 2014, pp. 14-16).

### **2.2.10 Programa Copérnico**

Copérnico es el programa de observación de la Tierra de la Unión Europea, que la Comisión Europea coordina y gestiona en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), los Estados miembros de la UE y las instituciones comunitarias. Su objetivo es proporcionar una capacidad mundial, continua, autónoma, de alta calidad y de amplio alcance para la observación de la Tierra. Ofrecer información precisa, oportuna y fácilmente disponible para mejorar la gestión medioambiental, comprender mejor y mitigar las consecuencias del cambio climático y proteger la seguridad civil, entre otras cosas (Li et al. 2020, pp. 14-20; Torres et al. 2012, pp. 23-36).

Una de las ventajas del programa Copérnico es que los datos y la información generados se hagan accesibles abiertamente a todos sus usuarios y al público en general, permitiendo la creación de servicios posteriores (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).

Los servicios prestados se dividen en seis categorías interconectadas: atmósfera, mar, tierra, meteorología, emergencia y seguridad. Se compone de tres elementos (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).

- ✓ Redes de mediciones in situ, recopilación de datos terrestres y aéreos que proporcionan información sobre los mares, la superficie continental y la atmósfera;
- ✓ Componente del espacio (satélites de observación y segmento asociado a las misiones de observación de los parámetros terrestres, atmosféricos y oceanográficos). Esta categoría incluye dos tipos de misiones por satélite: Las cinco familias de centinelas de la ESA y las misiones de contribución de otras organizaciones espaciales;
- ✓ Los servicios se desarrollan, gestionan y ponen a disposición del público en general y de sus usuarios.

### **Sentinel-1**

“Los Sentinels son los satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA), diseñados para entregar una gran cantidad de datos e imágenes para el programa Copernicus de Europa” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).

“El Sentinel-1 está equipado con satélites gemelos en órbita polar diseñados para proporcionar datos espaciales para garantizar el medio ambiente y la seguridad, el crecimiento económico y empresarial global” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36). “Los satélites operarán día y noche y realizarán una apertura sintética con imágenes de radar., las bandas Sentinel-1 permiten obtener imágenes en todas las condiciones climáticas” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36). “Funciona en un modo de operación libre de conflictos preprogramado que permite alcanzar una alta confiabilidad del servicio y crear archivos de datos consistentes a largo plazo para ser utilizados en la aplicación basada en series de tiempo largas” (Li, et al. 2020; Torres, et al. 2012).

“También presenta misiones patrimoniales, áreas temáticas, características de la órbita y cobertura junto con la carga útil del instrumento” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).

Por otra parte, habrá que tener en cuenta el modo en que se tomen los datos:

- ✓ Stripmap (SM): “que proporcionará datos con una resolución de 5x5m y un ancho de escena máximo 80km” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).
- ✓ Interferometric Wide Swath (IW): “este modo combina un ancho de escena de 250 km con una resolución moderada de 5x20m. Este es el modo por defecto sobre tierra” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).
- ✓ Extra-Wide Swath (EW): “La anchura máxima de la escena en este modo es de 400 km con una resolución de 20x40 m, y se emplea en lugares marinos y polares donde se requiere una amplia cobertura y rápidos tiempos de revisita” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).
- ✓ Wave Mode (WV): “este modo pretende ayudar en la determinación de la dirección y altura de olas en el océano. Se compone de imágenes con una resolución de 20x20km que se adquieren alternativamente con dos ángulos de incidencia cada 100km, es decir, dos imágenes con el mismo ángulo de incidencia están separadas 200 km” (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).

Además, hay que tener en cuenta la polarización. Los productos en el modo WV serán accesibles en polarización simple (VV o HH) o en polarización doble (VV+VH o HH+HV). Los productos en los modos SM, IW y EW estarán disponibles en una sola polarización (VV+VH o HH+HV) (Li, et al. 2020, pp. 14-20; Torres, et al. 2012, pp. 23-36).

### 2.3 Definición de términos

**Deforestación:** “pérdida a largo plazo o permanente de la cubierta forestal e implica la transformación a otro uso del suelo, tal pérdida sólo puede ser causada y mantenida por una perturbación natural o inducida por el ser humano” (FAO 2016, p. 7; Leite-Filho, et al. 2020, p. 5; Schoene, et al. 2007, p. 10).

**Bosque:** “área mínima de tierra de 0,05-1,0 hectáreas con una cobertura de copa de árboles (o nivel de población equivalente) de más del 10-30 por ciento con árboles que tienen el potencial de alcanzar una altura mínima de 2-5 metros en la madurez in situ” (Schoene, et al. 2007, p. 13).

**Minería de oro:** “es una actividad económica que consiste en extraer oro del suelo, y existe varias maneras de extracción de este mineral a lo largo de la historia” (Swenson, et al. 2011, p. 1190)

**Teledetección:** “proceso de detectar y monitorear las características físicas de un área midiendo su radiación reflejada y emitida a distancia (generalmente desde un satélite o una aeronave), cámaras especiales recolectan imágenes de detección remota, que ayudan a los investigadores a "sentir" cosas sobre la Tierra” (Chuvienco 1996, p. 17).

**Radar:** “término derivado del acrónimo inglés radio detection and ranging, (detección de radio y rango) es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno” (Handbook 2005, p. 11).

**SAR:** “un Radar de Apertura Sintética (acrónimo SAR, del inglés Synthetic Aperture Radar) es un tipo de sistema radar, que consiste en procesar mediante algoritmos la información capturada por la antena del radar en un solo barrido virtual” (Handbook 2005, p. 13).

**Polarimetría:** “las ondas de radar tienen una polarización, diferentes materiales reflejan las ondas de radar con diferentes intensidades, pero los materiales anisotrópicos tales como pasto frecuentemente reflejan diferentes polarizaciones con diferentes intensidades” (Handbook 2005, p. 14).

**Programa Copérnico:** “es un programa de observación de la Tierra más ambicioso de la historia, diseñado para proporcionar información de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, y gestionar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana” (Handbook 2005). “Copérnico es el nuevo nombre del programa para la Vigilancia Mundial del

Medio Ambiente y la Seguridad, antes conocido como GMES” (Handbook 2005, p. 16).

**Sentinel-1:** “satélite de órbita polar de la ESA dentro del Programa Copérnico destinado a la monitorización terrestre y de los océanos” (Handbook 2005). “Lanzado al espacio el 3 abril de 2014 desde el puerto espacial Kourou (Guayana Francesa), mediante un cohete Soyuz” (Serrano et al. 2015, pp. 1-5).

**Jaxa:** “la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial, es producto de la fusión de tres organizaciones previamente independientes, JAXA se formó el 1 de octubre de 2003” (Merritt, et al. 1990, pp. 3-10). “JAXA es responsable de la investigación, el desarrollo de tecnología y el lanzamiento de satélites en órbita, y participa en muchas misiones más avanzadas, como la exploración de asteroides y posible exploración de la Luna” (Merritt, et al. 1990, pp. 3-10).

**Alos Palsar:** “es un sensor de microondas activo que utiliza una frecuencia de banda L para lograr una observación terrestre sin nubes y de día y de noche” (Shimada, et al. 2014, pp. 13-31).

**Clasificación supervisada:** “proceso en que pixeles de identidad conocida, ubicados dentro de las áreas de entrenamiento, se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida, involucra procesos de entrenamiento, selección del algoritmo de clasificación adecuado, y clasificación, operaciones de post clasificación” (Lizarazo 2008, pp. 4-18).

**Algoritmo:** “conjunto de operaciones de álgebra de mapas y/o sobre bases de datos que permiten obtener un resultado mediante combinación de información espacial y alfanumérica validada de un algoritmo” (Brassard y Bratley 1996, pp. 12-25).

**Clasificación supervisada Random Forest:** “método que consta de una gran cantidad de árboles de decisión individuales que operan como un conjunto, cada árbol individual determina una predicción de clase y la clase con más votos se convierte en la predicción de nuestro modelo” (Breiman 2001, p. 18).

**Firma espectral:** “es la variación de reflectancia o emitancia de un material con respecto a las longitudes de onda (es decir, reflectancia/emitancia en función de la longitud de onda)” (Hernández y Montaner 2009, pp. 978-996).

**Ráster:** “Modelo de datos en el que la realidad se representa mediante teselas elementales que forman un mosaico regular cada tesela del mosaico es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud, reflectancia)” (Hijmans y van Etten 2014, p. 23).

**Pixel:** “Cada elemento discreto en los que se divide una imagen digital tecnicismo de origen inglés que procede de la contracción de picture element” (Li et al. 2017, pp. 100-112).



## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

### **3.1 Tipo de investigación**

La investigación aplico el procesamiento de imágenes de RADAR a través de algoritmos geoespaciales en la determinación de la deforestación por minería de oro en la Microcuenca del río Paríamanu, provincia de Tambopata – Madre de Dios, periodos 2010–2020. Para ello, se desarrollará una investigación de tipo descriptiva, correlacional y predictivo (Escobar et al. 2018, pp. 89-98; Hernández et al. 2010, pp. 95-121).

### **3.2 Diseño de la investigación**

La investigación corresponde a un diseño longitudinal (tendencial), debido a que se avalúa en diferentes cortes de tiempo (2010, 2015, y 2020) la deforestación por minería de oro en la Microcuenca del río Paríamanu, provincia de Tambopata – Madre de Dios, periodos 2010–2020 (Escobar, et al. 2018, pp. 89-98; Hernández, et al. 2010, pp. 95-121).

### **3.3 Delimitación espacial y temporal**

Madre de Dios se ubica en el sur este de la Amazonia del Perú, limita con el departamento de Puno al sur, Cusco al oeste y Ucayali al norte (GOREMAD y IIAP 2009, p. 19). Internacionalmente, limita con los países de Bolivia y Brasil, y comprende una superficie aproximada de 85 183,96 km<sup>2</sup> (8 518 396 ha) (6,64 % del territorio nacional), donde habitan cerca de 141 070 personas (INEI 2017).

El área de estudio comprende una delimitación espacial correspondiente a la microcuenca del río Paríamanu en la provincia de Tambopata del departamento de Madre de Dios, cuya superficie total es de 3

594,52 km<sup>2</sup> (359 452,34 ha) (Figura 8), y comprende áreas agrícolas, títulos habilitantes (concesiones forestales maderables y no maderables), y el desarrollo de la minería de oro ilegal (Dourojeanni 2019). Está situada entre los paralelos 11° 49' 5" y 12° 30' 9" de latitud Sur y los meridianos 69° 14' 58" y 70° 48' 3" de longitud Oeste; altitud entre 250 y 350 msnm (Alarcón, et al. 2016, p. 322; Chávez et al. 2013, p. 131; GOREMAD y IIAP 2009, p. 19; Perz et al. 2016, p. 250; Perz et al. 2013, p. 30).

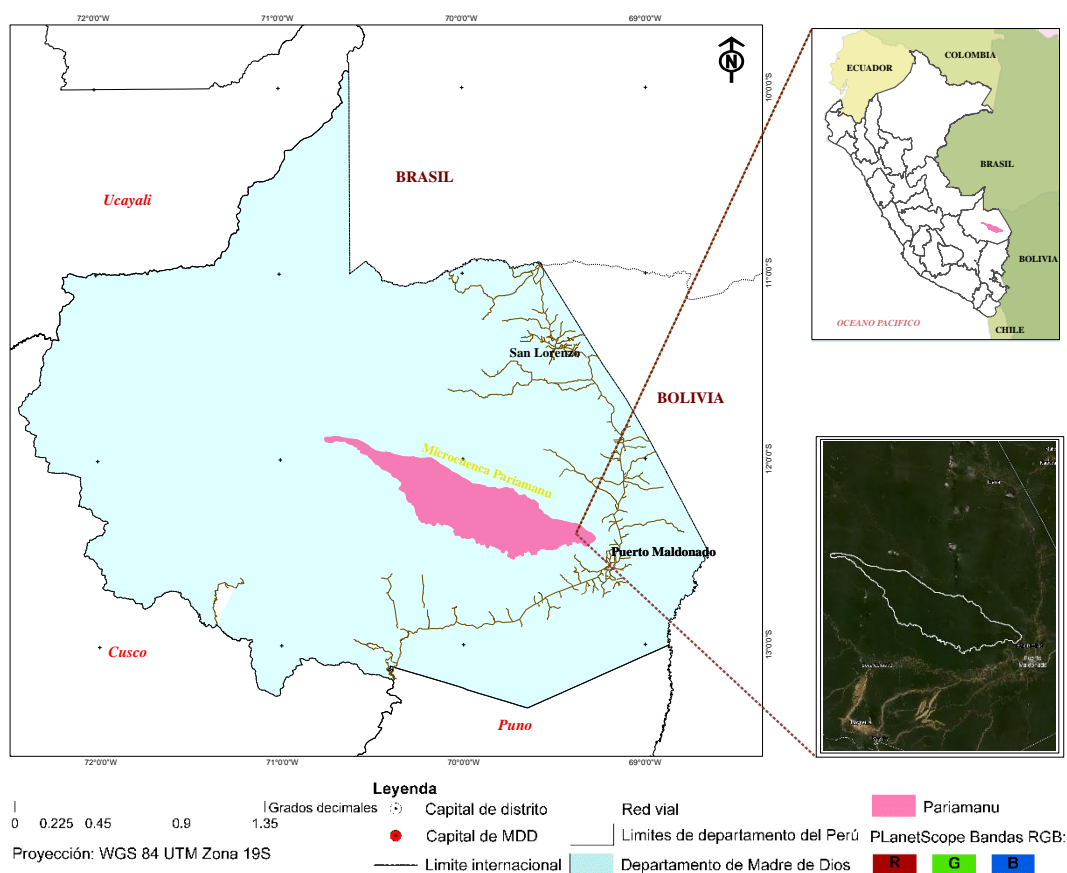


Figura 8. Ubicación del área de estudio.

La delimitación temporal, la evaluación de la deforestación por minería de oro en la microcuenca del río Paríamanu mediante imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR), corresponde al 2010, 2015, y 2020.

### 3.3.1 Clima e hidrografía

La temperatura promedio anual fluctúa entre 22°C a 26°C, con poca variación durante el año, los promedios mensuales más altos se reportan en los meses de septiembre y abril; mientras que los promedios mensuales más bajos entre los meses de mayo y agosto, los datos corresponden a la Estación de Puerto Maldonado (GOREMAD y IIAP 2009, p. 19; Perz, et al. 2016, p. 250).

Los meses más calientes son septiembre y octubre, mientras que julio, es el mes más frío. Sin embargo, existen registros de temperatura máxima absoluta de 41°C (1959), 39°C (1970) reportados por la Estaciones de Puerto Maldonado y Assis-Brasil. Asimismo, la temperatura mínima absoluta reportada es de 6°C (1957); 6,4°C (1974). Se presentan descensos conocido comúnmente "Friaje" o "Surazo", este fenómeno atmosférico tiene presencia entre meses de mayo a septiembre (GOREMAD y IIAP 2009, p. 19; Perz, et al. 2016, p. 250).

La precipitación media anual total es de 1 800 mm. Entre los meses de mayo a septiembre se presenta la menor ocurrencia de lluvias, descendiendo entre el 20 al 25% del total anual. De octubre a abril son los meses más intensos, con el 75 al 80% del total. La tendencia de intensidad de lluvias ocurre en sentido de Sureste a Noroeste. Entre los meses de julio a septiembre se manifiesta la menor humedad relativa. Sin embargo, en general el clima es de tipo muy lluvioso, cálido, muy húmedo con invierno seco y abundante precipitación durante todo el año, con alta concentración de vapor de agua en la atmósfera, por lo que las zonas son muy inestables. La humedad relativa fluctúa entre 63% y 90%, en cuanto a la evapotranspiración oscila entre 598,4 mm y 652,6 mm (GOREMAD y IIAP 2009, p. 19; Perz, et al. 2016, p. 250).

La hidrografía de la microcuenca comprende los siguientes ríos: Manuripe y Pariamarca, y otros afluentes de menor orden (GOREMAD y IIAP 2009, p. 19; Perz, et al. 2016, p. 250).

### 3.4 Población y muestra

Se considerará como población la microcuenca del río Pariamanu, que comprende una superficie de 3 594,52 km<sup>2</sup> (359 452,34 ha).

Para determinar la deforestación por minería de oro mediante imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR, Sentinel-1) se considerará el número de puntos de validación en campo y a través de imágenes de alta resolución PlanetSope y WorldView. Para ello, se empleará la distribución binomial de probabilidad (Anaya y Chuvieco 2010, p. 25; Chuvieco y Hantson 2010, p. 14; Ochoa y Páez 2019, p. 33). El tamaño de muestra se calculará mediante la siguiente fórmula (Ecuación 1):

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

Dónde:

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

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

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

N: Tamaño de la población.

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

$$n = \frac{(1,96)^2 * 0,5(0,5 * 359\ 452,34)}{(359\ 452,34 - 1) * 0,05^2 + 1,96^2 + (0,5 * 0,5)}$$

$$n = 382,39 = 382$$

El número total de puntos de muestreo corresponde a 382. Siendo la unidad mínima de cada punto de muestreo de 0,005 km<sup>2</sup> (0,5 ha).

La distribución de la muestra en la microcuenca del río Pariamanu en áreas deforestadas por minería de oro, “se aplicó un método de muestreo probabilista, donde todas las unidades de muestreo presentes en el área

tengan una posibilidad conocida superior a cero de ser seleccionadas (inclusión y exclusión)” (Ochoa y Páez 2019, p. 55).

Las muestras sobre el mapa fueron distribuidas mediante la técnica aleatorio simple estratificado: (1) 150 muestras en bosque, (2) 116 en minería de oro, y (3) 116 en otros usos (áreas agrícolas e infraestructuras).

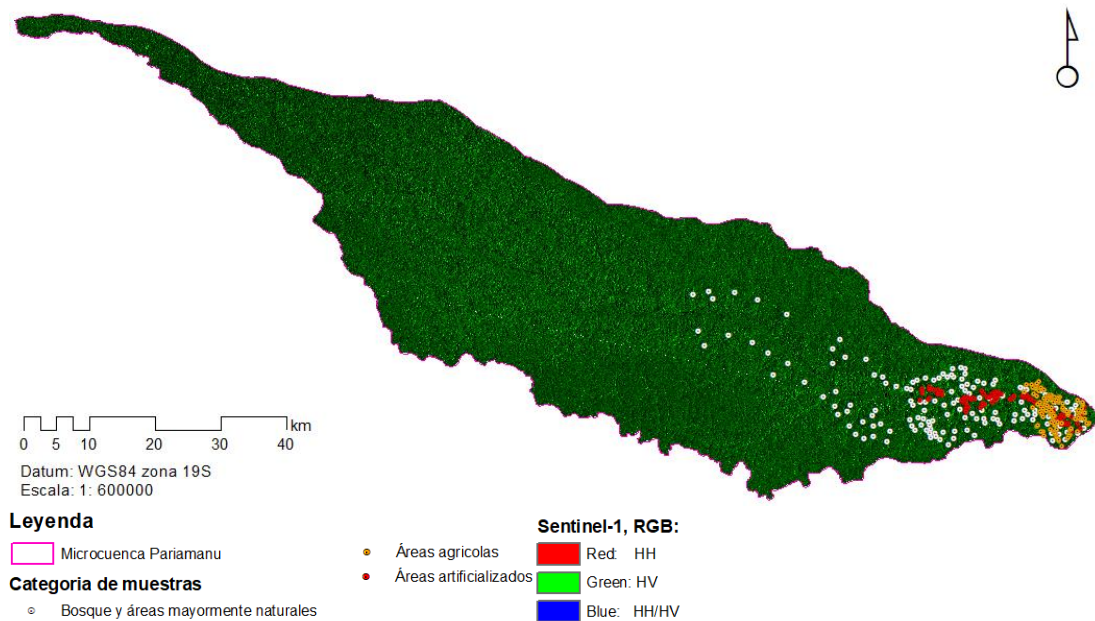


Figura 9. Distribución de muestras para validar el cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios.

### 3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### 3.5.1 Método y técnicas

Los sensores SAR Alos Palsar y Sentinel-1, fueron usados en la investigación. El radar de apertura sintética Alos Palsar es un sensor de microondas activo que utiliza una frecuencia de banda L para lograr una observación terrestre sin nubes de día y de noche. El desarrollo de Palsar es un proyecto conjunto entre JAXA y la Organización del Sistema de Observación de Recursos de Japón (JAROS) (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98).

El radar Sentinel-1 comprende una constelación de satélites utiliza imágenes de radar de apertura sintética de banda C para captar fotos sin

importar el tiempo que haga, y consta de dos satélites de órbita polar que funcionan de día y de noche. Se producen archivos de datos consistentes a largo plazo para aplicaciones basadas en series temporales a largo plazo utilizando Sentinel-1, que funciona en un modo de operación preprogramado. (Whittle, et al. 2012, pp. 83-98).

Para el procesamiento e interpretación de las imágenes del satélite Alos Palsar, Sentinel-1, y la validación estadística de la interpretación espacial de la deforestación por minería de oro en la microcuenca Pariamanu, se aplicó técnicas de lectura y dispersión del SAR, datos que son sensibles a la estructura de la vegetación y la biomasa, asimismo, la eliminación de hojas y ramas de los árboles después de los incendios altera los mecanismos de dispersión que provocan variaciones temporales del coeficiente de retrodispersión (Addison y Oommen 2018, pp. 292-299; Polychronaki et al. 2013, pp. 5680-5701). Sin embargo, la alteración de la cobertura del suelo permite mapear la deforestación por minería de oro con buena precisión. La longitud de onda y la polarización del sensor SAR influyen mucho en la precisión de la salida. Cuanto mayor sea la longitud de onda, más penetración serán capaces de lograr las señales SAR. Por lo tanto, la mayor longitud de onda se logra en la banda L (30 cm -15 cm) de doble polarización (HH o VV) a 1,27 GHz, resolución espacial de la Imagen de 6,25 o 12,5 m, ángulo de Incidencia 8°. La información que proporciona Alos Palsar presenta un modo de observación ventajoso (ScanSAR), que permite adquirir un ancho de 250 a 350 km de imágenes SAR (dependiendo del número de escaneos) a expensas de la resolución espacial (Martins et al. 2016; Whittle, et al. 2012). Alos Palsar, también el ScanSAR de haz ancho (WB1, WB2) funciona con una importante pérdida de resolución cuando se utilizan los modos de polarización simple (FBS) o de polarización dual (FBD) o de polarización cuádruple (PLR) del ScanSAR de haz fino (Martins, et al. 2016, p. 34; Whittle, et al. 2012, p. 22). Mientras que el Sentinel-1 presenta un máximo en la banda C (5,6 cm y 3 cm), de doble polarización a 5,405 GHz cada 6-12 días con un ángulo de incidencia entre 33° y 37° en el área de estudio. Los datos se adquieren en diferentes modos de obtención de imágenes, y aquí son de particular interés

las imágenes adquiridas en el modo de barrido ancho interferométrico (IW) a una resolución espacial de 5 m por 20 m en las direcciones de alcance y azimut, respectivamente, este detalle le da menores capacidades de penetración, pero de gran utilidad en la cuantificación de la deforestación por minería de oro (Addison y Oommen 2018, p. 295; Tanase et al. 2015a, p. 23; Tanase et al. 2015b, p. 34).

La sensibilidad de los cambios en función a la polarización, el comportamiento del área y el volumen presentan un mejor comportamiento en la cruzada (HV), por consiguiente, las áreas de bosques o con vegetación más afectada por la eliminación de cobertura vegetal y seca ofrecen menor retrodispersión. Estos procesos se traducen en el contraste necesario en la imagen SAR para discernir cambios (Addison y Oommen 2018, p. 294).

El radar de apertura sintética de banda C y L de satélite de observación terrestre avanzada Alos Palsar y Sentinel-1 serán los sensores empelados en la investigación. Esto es debido a que la evaluación histórica (Alos Palsar para el 2010, Sentinel-1 para el 2015 y 2020) son uno de los pocos de libre acceso. Los datos se descargarán a través de la plataforma Alaska Satélite Facility (ASF) como productos de polarización dual de haz fino (FBD), lo que significa que tendrán información de polarización HH y HV. La data mostrara que los lugares deforestados por la minería de oro registrarán coeficientes de retrodispersión más altos (Addison y Oommen 2018, p. 294).

Los datos de Alos Palsar y Sentinel-1 fueron descargados con corrección radiométrica del terreno (RTC) de ASF. ASF realiza una corrección previa donde convierte los datos complejos en datos radiométricos y geo codificados del terreno, realiza el co-registro de escenas. Adicionalmente, debe realizarse correcciones del tamaño de píxeles representativos, reducción del ruido de moteado de los datos de SAR. Para mantener la correcta resolución radiométrica y espacial se corregirá el ruido moteado en las imágenes, se realizará un filtrado adicional aplicando un filtro adaptativo o no adaptativo adecuado para el sensor (Addison y Oommen 2018, p. 295; Bernhard et al. 2011, p. 56). La corrección del terreno se hizo a través del mejor modelo de elevación digital (DEM) disponible.

El análisis aplicó el método de clasificación supervisada Random Forest o clasificador de bosque aleatorio, utiliza la salida de clase que es el modo de las clases (clasificación) o la predicción media/promedio (regresión) para los árboles individuales utilizando datos de retrodispersión HH y HV para medir la deforestación de la minería de oro, que es un enfoque de aprendizaje de conjunto para la clasificación, la regresión y otras tareas.. La figura 9 y la ecuación (2) muestra el esquema metodológico del algoritmo (Addison y Oommen 2018, p. 295).

Para el procesamiento se aplicó softwares de acceso libre; SNAP ESA, Google Earth Engine, y con licencia; ENVI 5.3®, ArcGIS Pro 2,1®, ArcGIS 10,5® proporcionadas por el Centro de Teledetección para el Estudio y Gestión de los Recursos Naturales (CETEGERN) de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (Alarcón, et al. 2016, p. 321).

Para la verificación de resultados, se distribuyó puntos en campo e imágenes de alta resolución PlanetScope y WorldView, para ello se recolectó puntos de deforestación por minería de oro en la microcuenca Pariamanu. El levantamiento de información en campo se hizo mediante el empleo de GPS (Garmin Map 60 CSx, y Garmin Map 72 CSx) (Alarcón, et al. 2016). Para medir la confiabilidad de los resultados de la clasificación se aplicó la matriz de confusión e Índice de Kappa (Alarcón, et al. 2016, p. 321).

El uso de software e información cartográfica del área de estudio fueron proporcionadas por el CETEGERN.

### **3.5.2 Procesamiento de datos y análisis estadístico**

Material bibliográfico: búsqueda especializada de información en la Biblioteca Virtual de CONCYTEC, en base de datos de ScienceDirect Freedom Collection, EBSCO, IEEE, IOP, Scopus, Sage, SAGE Research Methods, Taylor & Francis, Wiley, y Google Académico.

Selección de coberturas y obtención de imágenes de satélite:



1. Como parte inicial de la investigación, la información cartográfica de la microcuenca Pariamanu se obtendrá del Centro de Teledetección para el Estudio y Gestión de Recursos Naturales (CETEGERN) de la UNAMAD (Alarcón et al. 2016, p. 321).
2. Seguidamente, la descarga de imágenes SAR Alos Palsar (2010) y Sentinel-1 (2015 y 2010) será del portal Alaska Satellite Facility (ASF) (Tabla 2, 3 y 4).

Tabla 2. Información de adquisición de imágenes Alos Palsar y Sentinel-1

Sensor	Cobertura	Fecha de Imagen
Alos Palsar	Microcuenca del río Pariamanu	Enero a abril 2010
		Diciembre de 2010
Sentinel-1		Diciembre de 2015
		Diciembre 2020

Tabla 3. Características de la imagen de satélite Radar Alos Palsar

Características	Parámetros		ScanSAR	Polarimétrico (modo experimental) * 1
Frecuencia central	1270 MHz (banda L)			
Ancho de banda	28 MHz	14 MHz	14 MHz, 28 MHz	14 MHz
Polarización	HH o VV	HH + HV o VV + VH	HH o VV	HH + HV + VH + VV
Ángulo de incidencia	8 a 60 grados	8 a 60 grados	18 a 43 grados	8 a 30 grados
Resolución de rango	7 hasta 44m	14 hasta 88m	100 m (múltiples miradas)	24 hasta 89m

Franja de observación	40 a 70km	40 a 70km	250 hasta 350km	20 hasta 65km
Longitud de bits	5 bits	5 bits	5 bits	3 o 5 bits
Longitud de bits	5 bits	5 bits	5 bits	3 o 5 bits
Velocidad de datos	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps, 240 Mbps	240 Mbps
NE sigma cero * 2	<-23dB (ancho de franja 70 km) <-25dB (ancho de franja 60 km)		<-25dB	<-29dB
S / A * 2, * 3	> 16dB (ancho de franja 70 km) > 21dB (ancho de franja 60 km)		> 21dB	> 19dB
Precisión radiométrica	escena: 1dB / órbita: 1,5 dB			

Fuente: Shimada et al. (2014, p. 18).

Tabla 4. Características de la imagen de satélite Radar Sentinel-1

Parámetro	Sentinel-1
Fecha de lanzamiento	03 de abril de 2014 de S1-A 22 de abril de 2016 de S1-B
Tipo de órbita	SSO (órbita sincrónica del sol) ciclo de repetición de 12 días LTAN = 18:00 horas
Altitud orbital	693 kilómetros
Complemento de sensor	C-SAR (radar de apertura sintética de banda C)
Masa de la nave espacial Tamaño de la nave espacial Potencia de la nave espacial	2300 kg 3,4 mx 1,3 mx 1,3 m 4,8 kW (EOL)
Velocidad de datos de banda X de enlace descendente	520 Mbit/s

Banda S TT&C	64 kbit/s enlace ascendente 128 kbit/so 2 Mbit/s enlace descendente
Almacenamiento de datos científicos	1,4 Tbit (EOL)
Calidad de datos requerida	BER (tasa de error de bit): $< 10^{-9}$
Autonomía operativa	8 días
contratista principal	TAS-I (Thales Alenia Space-Italia)
Lanzador de línea de base	Soyuz (Kourou)

Fuente: Serrano et al. (2015, p. 21).

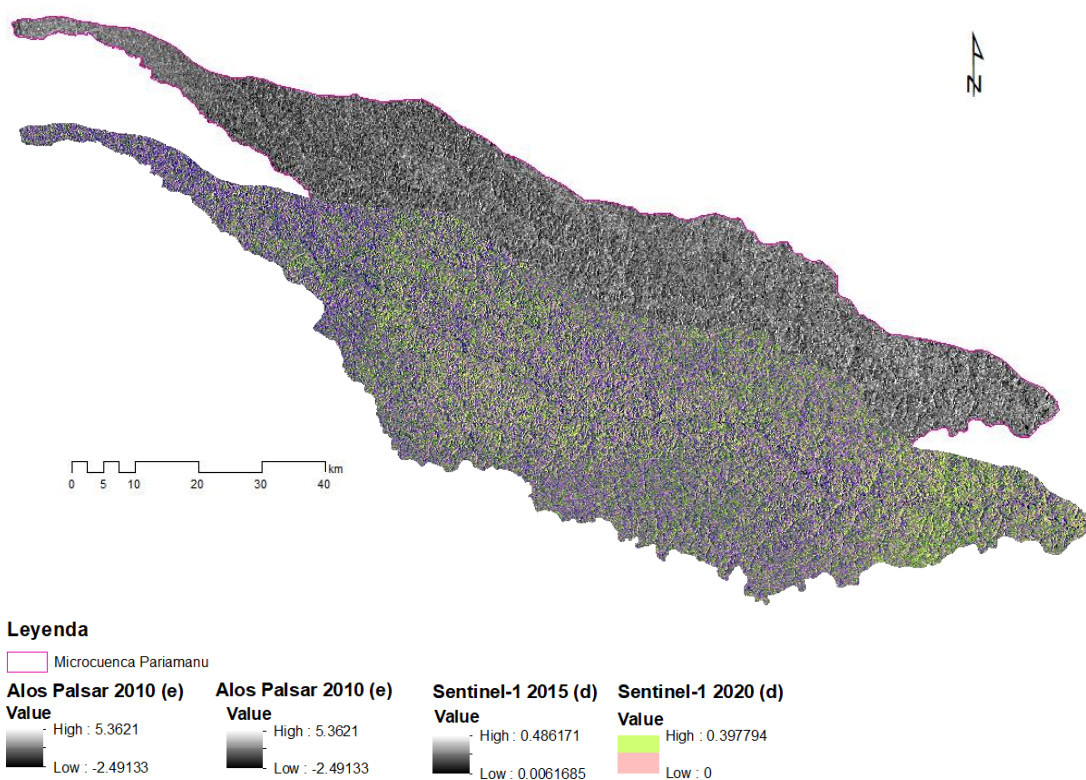


Figura 10. Imágenes Alos Palsar (2010) y Sentinel-1 (2015 y 2020), polarización HH HV, y RGB HH HV HH/HV de la Microcuenca del río Pariamanu.

### ✓ Tratamiento y análisis de la imagen SAR

El tratamiento digital comprendió la corrección de datos Alos Palsar (2010) y Sentinel-1 (2015 y 2020) descargados del portal Alaska satélite Facility (ASF). La clasificación para el presente estudio se dio en tres (3) fases:

- 1. Pre-Procesamiento**, tratamiento digital de imágenes SAR previo a la clasificación supervisada Random Forest, el cual consiste en; Multilook (corrección de moteado), Calibración, Filtro de Speckle, Corrección por Topografía, y Recorte en función al área de estudio (Addison y Oommen 2018, p. 295).
- 2. Procesamiento**, Las imágenes de SAR Alos Palsar y Sentinel-1 contaron con polarización cruzada (HH y HV), la localización de áreas deforestadas por minería de oro en la microcuenca del río Paríamano mostro que los coeficientes de retrodispersión son más bajos en comparación con las áreas no deforestadas para las polarizaciones HH y HV (Addison y Oommen 2018, p. 295; Tanase et al. 2015; Tanase et al. 2013).

La cuantificación de la deforestación por minería de oro fueron a través de procesos de clasificación supervisada Random Forest (RF) (Ecuación 2 y Figura 9) (Breiman 2001, p. 28).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (f_i - y_i)^2 \quad (2)$$

Donde:

N: número de puntos de datos

$f_i$ : valor retornado del modelo

$y_i$ : valor actual de puntos de datos

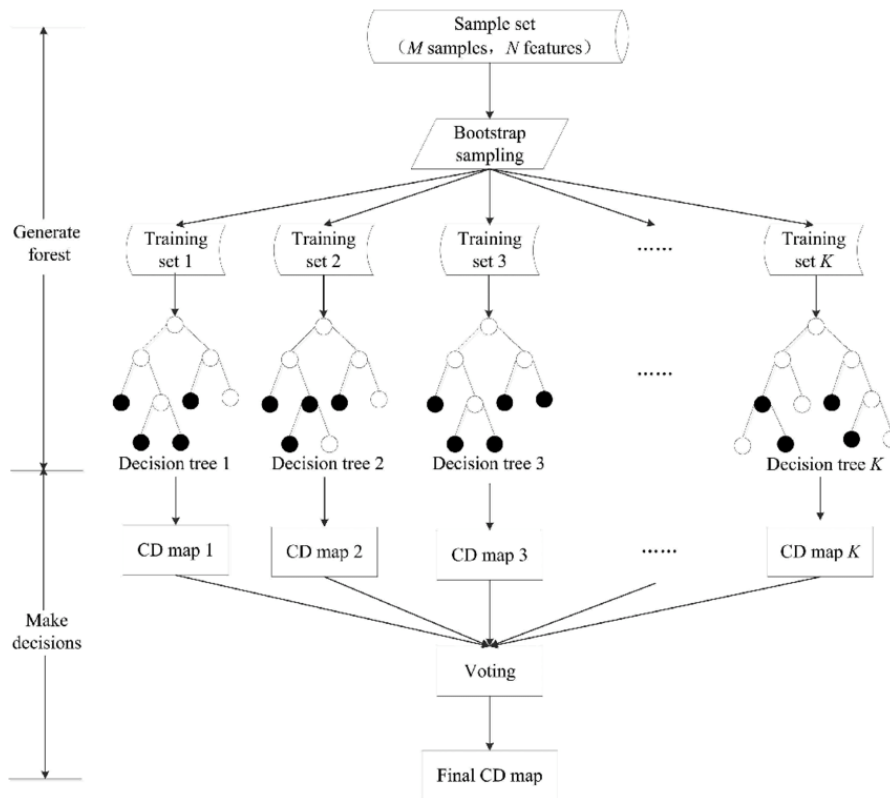


Figura 11. Esquema metodológico Random Forest.

La tasa de deforestación por minería de oro se cuantifico por medio de la matriz de cambio de cobertura, diferencias de áreas iniciales y finales, para un periodo establecido (R) (Ecuación 3) (Alarcón et al. 2016, p. 321; Asner y Tupayachi 2017, p. 98; CA 2007, p. 45; INRENA et al. 2006; Puyravaud 2003, p. 58).

$$R = (A1 - A2) / (t2 - t1) \quad (3)$$

Donde A2 y A1 son las áreas de bosque en la fecha final (t2) e inicial (t1), se calcula la tasa de cambio anual (q), que se obtiene comparando el área cubierta por bosque en la misma región en dos épocas diferentes.

La tasa de cambio anual (q) (Ecuación 4) se calculara en base a la tasa porcentual anual, usualmente aplicada en la cuantificación de

pérdida de bosques (Alarcón et al. 2016, p. 321; Puyravaud 2003, p. 58).

$$q = (A1 - A2) / (t2 - t1) \quad (4)$$

Donde A1, A2, t1, t2 se definen en la Ecuación 2.

Para determinar el cambio de cobertura entre los años de 2010 - 2015, 2015-2010 y 2010-2020, se realizó una operación de diferencia entre las coberturas de cada época (Ecuación 4) (Alarcón et al. 2016, p. 321; Asner y Tupayachi 2017, p. 98; CA 2007, p. 45; INRENA et al. 2006; Puyravaud 2003, p. 58).

$$\text{Época 2010} * 10 + \text{Época 2015} \dots 2010 \quad (5)$$

- 3. Post-Clasificación**, la Post-clasificación es el “método que requiere de la rectificación y clasificación de cada imagen, para luego ser comparados píxel a píxel” (Alarcón et al. 2016; Jensen et al. 1991; Xiuwan 2002), luego de realizar la clasificación supervisada Random Forest a partir de los datos de retrodispersión HH y HV para cuantificar la deforestación por minería de oro en la microcuenca Pariamanu, la verificación de los resultados se realizó mediante el empleo de la matriz de confusión y el Índice de Kappa. Finalmente, los datos fueron transformados a formato vectorial, para su análisis en un SIG (Alarcón et al. 2016, p. 322).

### ✓ Tratamiento de datos

Los productos de los resultados de la clasificación supervisada Random Forest fueron analizados por procedimientos estadísticos; se empleó la matriz de confusión y el coeficiente kappa ( $\kappa$ ), como un test de evaluación de los datos predictivos y la información de campo (Alarcón et al. 2016, p. 322; Chuvieco 2002, p. 67; Chuvieco y Hantson 2010; Elijah y Jensen 1996, p. 34). “La precisión del test fue medido por el Índice de Kappa, que refleja la *concordancia inter-observador* y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión, siempre y cuando se contrasten dos observadores” (Alarcón et al.

2016, p. 323; Cerda y Villarroel 2008, p. 45). En cuanto a kappa, toma valores entre -1 y +1; mientras más cercano a +1, mayor grado de concordancia, mientras un valor de  $\kappa = 0$ , refleja una concordancia observada a causa del azar (Alarcón et al. 2016; Cerda y Villarroel 2008). Los resultados se interpretaron en función a los niveles de concordancia cualitativa (Tabla 5) (Alarcón et al. 2016, p. 323; Cerda y Villarroel 2008, p. 45).

Tabla 5. *Valoración del coeficiente kappa*

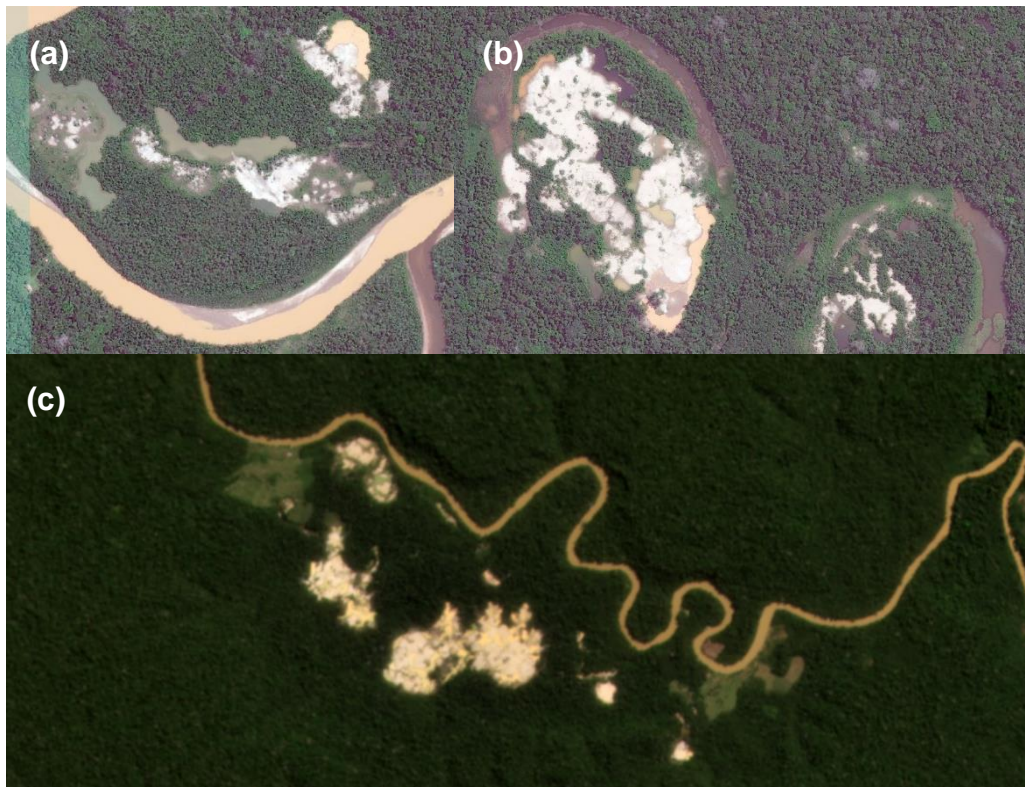
<b>Fuerza de la Concordancia</b>	<b>Coeficiente Kappa</b>
Pobre ( <i>Poor</i> )	<b>0,00</b>
Leve ( <i>Slight</i> )	<b>0,01 – 0,20</b>
Aceptable ( <i>Fair</i> )	<b>0,21 – 0,40</b>
Moderada ( <i>Moderate</i> )	<b>0,41 – 0,60</b>
Considerable ( <i>Substantial</i> )	<b>0,61 – 0,80</b>
Casi perfecta ( <i>Almost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

Fuente: Cerda y Villarroel (2008, p. 45); Landis y Koch (1977, p. 34).

La investigación contemplo un método mixto; 1. Salida de campo para detectar bosque, área deforestadas por minería de oro y otros usos (282 muestras), y 2. Los bosques, áreas deforestadas por minería de oro y otros usos fueron validadas en imágenes ópticas de alta resolución PlanetScope (50 muestras) y WorldView (50 muestras) (Alarcón et al. 2016, p. 324).

El levantamiento de datos de campo del año 2020 se realizó en tres etapas, entre los meses de junio a septiembre. En el mes de junio se dio la primera salida en la zona intermedia de la microcuenca (Este: 409932 y Norte: 8644575). La segunda salida en el mes de agosto (Este: 444219 y Norte: 8629832). Finalmente, la tercera y última salida se dio en el mes de septiembre, al inicio de la microcuenca (Este: 467349 y Norte: 8625260).

“El protocolo de levantamiento de información de campo se basará al método aplicado por el Centro para el Estudio de Instituciones, Población y Cambios en el Medio Ambiente de la Universidad de la Indiana (CIPEC)” (Alarcón et al. 2016, p. 324).



*Figura 12.* Validación de bosque, minería de oro y otros usos con imágenes WorldView de 0,38 m x 0,38 m de resolución espacial (a y b) e imágenes PlanetScope de 3 m x 3 m de resolución espacial (c).

Fuente: Planet-Team (2021).

### ✓ **Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico se aplicó la estadística descriptiva e inferencial, para ello se usó el programa de acceso abierto y con licencia; Microsoft Excel, ENVI 5,3®, ArcGis 10,5®, SNAP ESA, y la plataforma Google Earth Engine.

Para el primer y segundo objetivo, sobre cuantificar y determinar la tasa anual de la deforestación por minería de oro mediante la aplicación de



sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Pariamanu, en los periodos 2010, 2015, y 2020, se utilizó el algoritmo predictivo de clasificación supervisada Random Forest a partir de los datos de retrodispersión HH y HV de los sensores SAR Alos Palsar y Sentinel-1. (Addison y Oommen 2018; Belenguer-Plomer et al. 2019; Khati et al. 2018). La precisión de la predicción fue validada a través de una matriz de confusión y el índice de Kappa (Alarcón et al. 2016, p. 324; Cerda y Villarroel 2008, p. 45; Landis y Koch 1977, p. 45).

Respecto al tercer objetivo, sobre cuantificar los cambios de cobertura y uso de suelo (bosque a deforestación por minería de oro) en la Microcuenca del río Pariamanu, entre los periodos 2010, 2015, y 2020, se utilizó la estadística descriptiva espacial mediante los softwares ArcGis Pro 2,1®, ArcGIS 10,5®, Microsoft Excel (Alarcón et al. 2016, p. 321; Asner y Tupayachi 2017, p. 98; CA 2007, p. 45; INRENA et al. 2006; Puyravaud 2003, p. 58).

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Clasificación, pérdida y tasa de cubierta forestal por minería de oro en la microcuenca del río Pariamanu**

#### **4.1.1 Clasificación de SAR**

Las imágenes SAR Alos Palsar (2010) y Sentinel-1 (2015 y 2020), se descargó del portal Alaska satélite Facility (ASF) y Google Earth Engine (GEE). Temporalmente corresponde; enero y diciembre de 2010, y diciembre de 2015 y 2020 (Figura 10 y 13).

La clasificación se realizó mediante el software SNAP ESA y la plataforma GEE, a través de su herramienta geométrica.

La clasificación, considero las categorías. Bajo este criterio, se determinaron las siguientes categorías; (1) 150 muestras en bosque, (2) 116 en minería de oro, y (3) 116 en otros usos (áreas agrícolas e infraestructura) (Figura 9 y 13).

La clasificación supervisada basada en el algoritmo Random Forest (RF), con la combinación de bandas polarimétricas HH/HV/(HH/HV) para los SAR Alos Palsar y Sentinel-1, se realizó en la microcuenca del río Pariamanu (Figura 10 y 13), seguidamente se realizó la postclasificación en el software ENVI mediante el método Majority/Minority Analysis (kernel size de 3x3) (Figura 14, 15, 16, y 17).

Con la finalidad de no tener conflictos en los cambios de categorías entre periodos, se sumó las superficies de agua de los años 2010, 2015 y 2020, y posteriormente, se excluyó de cada periodo.

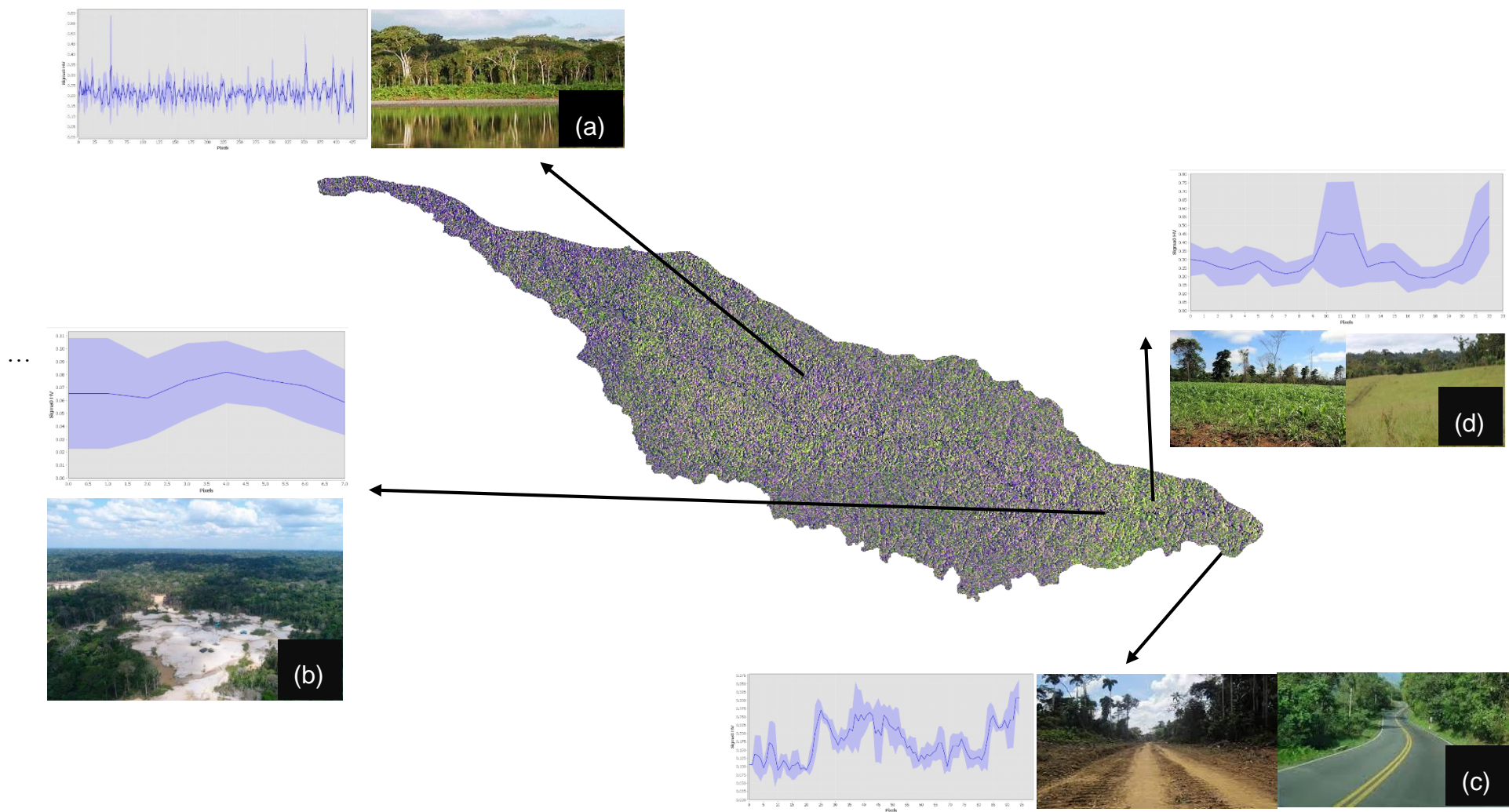


Figura 13. Imagen de Satélite Sentinel-1, firmas espectrales en las bandas R (HH) G (HV) B (HH/HV); (a) Bosque, (b) Minería, (c y d) Otros usos (áreas agrícolas e infraestructura).

La evaluación de la deforestación por minería de oro en la microcuenca del río Pariamanu de los años 2010, 2015, y 2020 (Tabla 6, y Figura 14, 15, 16, y 17), muestran que la dinámica de la conversión de bosque a minería ha comenzado en diciembre del 2010 y aumentado progresivamente a 2020 (Tabla 6). Sin embargo, en la actualidad, la dinámica de cambio de cobertura y uso de suelo está determinado mayormente por la agricultura e infraestructura (otros usos).

Tabla 6. *Uso de suelo en el área de estudio*

Años	Clases (ha)		
	Bosque	Minería	Otros usos
2010*	354609,93	0,00	642,26
2010**	354477,20	1,19	773,80
2015**	354125,48	36,94	1089,78
2020**	353838,13	99,73	1314,34

Nota: \* enero, \*\* diciembre.

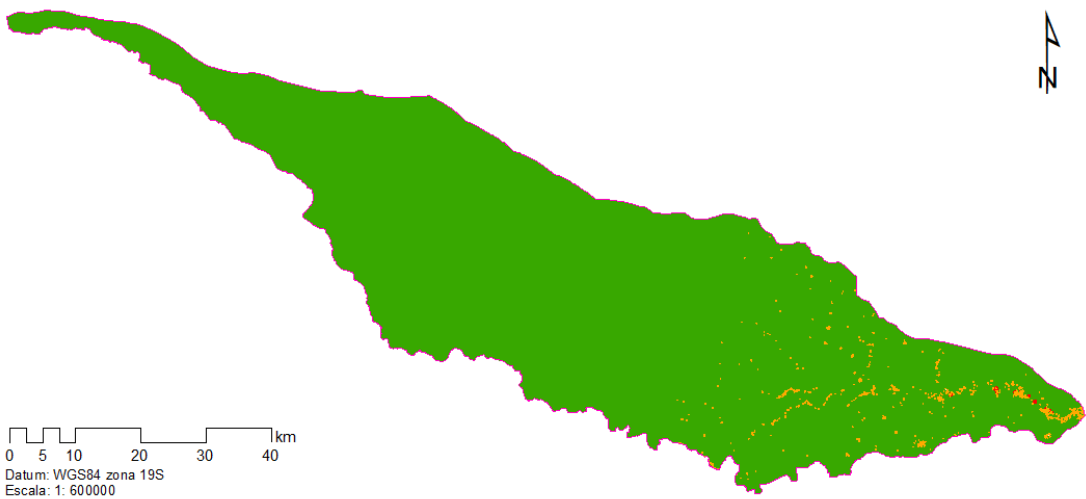
Los resultados con el SAR Alos Palsar y Sentinel-1 (Tabla 6, y Figura 14, 15, 16, 17), reportan que, en enero de 2010, no se encontró indicios espaciales de la minería de oro. Sin embargo, en diciembre del mismo año se cuantifica 1,19 ha, en 2015 con 36,94 ha, y de 99,73 ha a 2020. Si bien, la proporcionalidad de pérdida de bosque por minería de oro respecto a otros usos (agricultura e infraestructura) es pequeña, no se puede desmerecer el impacto y efectos colaterales de la actividad, situación similar a los inicios en los sectores de Guacamayo – La Pampa (Alarcon 2011; Alarcón 2016; Alarcón et al. 2021; Asner et al. 2013; Asner y Tupayachi 2017; Caballero et al. 2018; Swenson et al. 2011; Velásquez Ramírez et al. 2021)



**Leyenda**

- Microcuenca Pariamanu
- Bosque
- Minería
- Otros usos

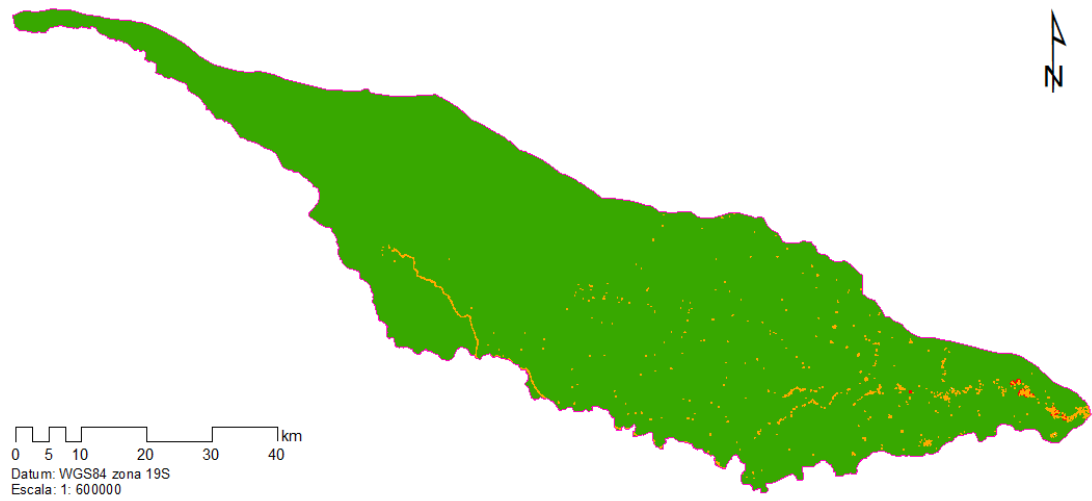
*Figura 14.* Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, enero de 2010. Sin presencia de minería.



**Leyenda**

- Microcuenca Pariamanu
- Bosque
- Minería
- Otros usos

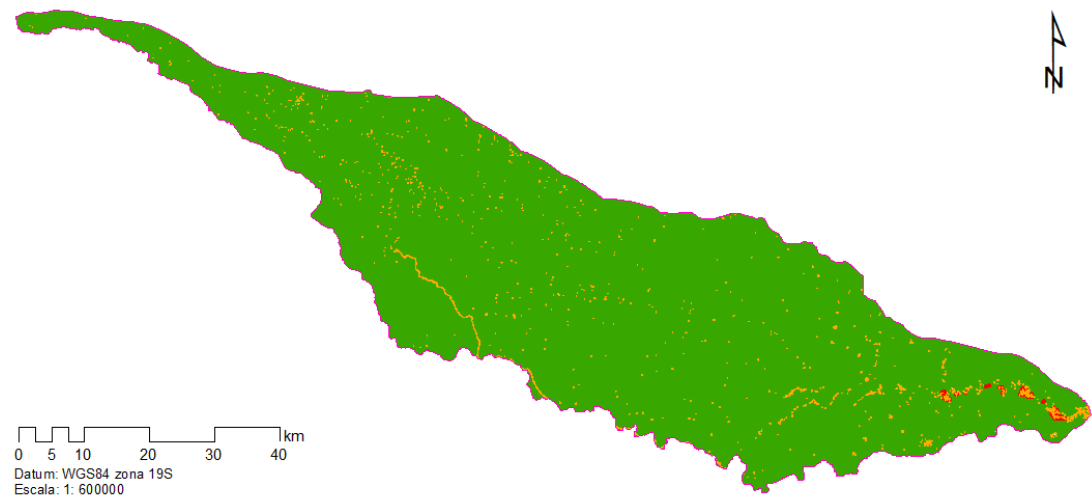
*Figura 15.* Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, diciembre de 2010. Inicio de la minería de oro.



**Leyenda**

- Microcuenca Pariamanu
- Bosque
- Minería
- Otros usos

*Figura 16.* Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, diciembre de 2015.



**Leyenda**

- Microcuenca Pariamanu
- Bosque
- Minería
- Otros usos

*Figura 17.* Uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, diciembre de 2020.

Las tecnologías SAR representan una oportunidad enorme en el monitoreo de los recursos naturales y en los bosques Amazónicos aún más, por sus características peculiares en cuanto a radiación solar, nubosidad y precipitación, que obstaculizan la observación en el caso de los sensores ópticos. Sin embargo, los SAR (sensores activos) trabajan independientemente de las condiciones atmosféricas y climáticas, permitiendo un monitoreo permanente, la aplicación de la polarización dual HH, VV, HV, y VH, permiten una correcta penetración de las bandas C y L en el caso de Alos Palsar y Sentinel-1 que facilitan la captura horizontal y vertical de los objetos. La precisión, se fundamenta en los hallazgos reportados en trabajos e investigaciones desarrollados en el África, Europa, la India, entre otros (Khati et al. 2018; Puzzi et al. 2020; Reis et al. 2020; Sica et al. 2019; Whittle et al. 2012).

Los resultados muestran problemas ya conocidos en la Amazonia de Madre de Dios, el inicio de la actividad minera de oro y la desatención por las autoridades, originando un problema progresivo, como sucedió en el sector Guacamayo y La Pampa, como lo reporta autores como; Alarcón et al. (2016); Asner et al. (2013); Asner y Tupayachi (2017); Swenson et al. (2011).

La aplicación de las tecnologías SAR en la cuantificación de la deforestación por minería de oro en la microcuenca del río Pariamanu es inédita, se aproximan estudios utilizando la teledetección con sensores ópticos, como el MINAM (2020), donde estima para la provincia de Tambopata, con 1 658 ha en el 2020, y un consolidado de 2001-2020 con 23 588 ha. De igual manera investigadores como; Alarcón et al. (2021); Asner et al. (2013); Asner y Tupayachi (2017); Swenson et al. (2011) reportan áreas deforestadas por la minería de oro mediante el uso de sensores ópticos.

#### **4.1.2 Pérdida de cubierta forestal (bosque)**

La pérdida de cubierta forestal está ligada a la conversión de bosque a minería de oro y mayormente a otros usos (agricultura e infraestructura), variando espacialmente en los periodos cuantificado, de 354 609,93 ha de

bosque en enero de 2010 a 353 838,13 ha a 2020 (Tabla 7 y Figura 18). Con una pérdida global de 1 414,07 ha, aportando la minería de oro con 7,05%.

Los resultados indican una tasa anual de pérdida por minería de oro (q) de 0,003% (9,85 ha/año) para los años 2004-2020 (Tabla 9 y Figura 15).

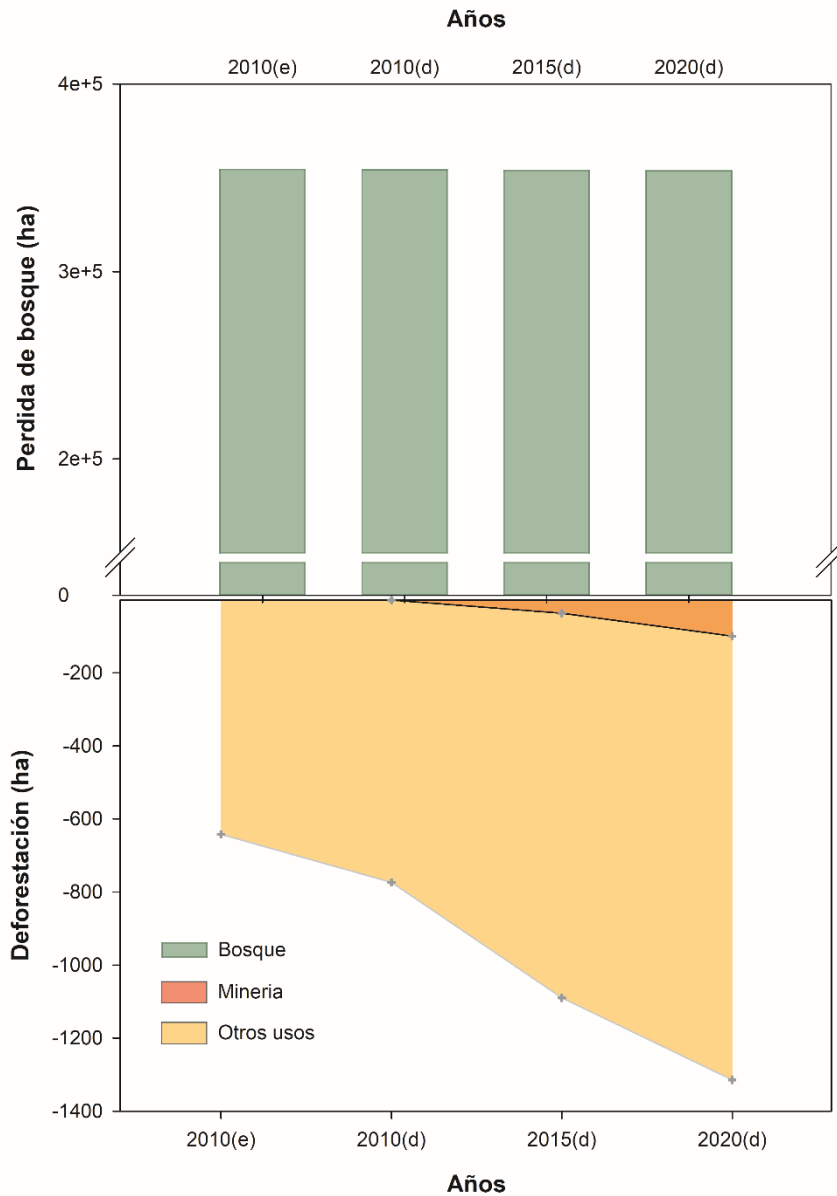


Figura 18. Pérdida de la cubierta forestal por la minería de oro y otras actividades en la Microcuenca del río Parímanu.



La tasa anual de pérdida por minería de oro (q) más intensa se da en los periodos 2015-2020 con 0,004% y una pérdida anual promedio de 12,56 ha/año, mientras con menor intensidad en los periodos 2010-2015, con 0,002% (7,15 ha/año) (Tabla 7 y Figura 21).

Tabla 7. *Tasa y pérdida de bosque (deforestación por minería de oro) anual promedio en el área de estudio*

<b>Periodo</b>	<b>Tasa anual de pérdida de bosque (%)</b>	<b>Perdida de bosque total anual promedio (ha) (r)</b>
2010-2015	0,002	7,15
2015-2020	0,004	12,56
2010-2020	0,003	9,85

Según Southworth et al. (2011), las mayores tasas de pérdidas de bosque, se dan cerca de las vías de acceso (corredores viales y fluviales), los resultados en el microcuenca del río Pariamanu no es la excepción, la deforestación por minería de oro, se da con mayor intensidad en las orillas del río Pariamanu (Tabla 7, Figura 17, 18 y 19).

La pérdida de bosque por la minería de oro durante 10 años en el área de estudio, mediante sensores SAR Alos Palsar y Sentinel-1, se da a una tasa de 0,003% y un ritmo de 9,85 ha/año (98,50 ha) (Figura 19 y 22). Sin embargo, el reporte en relación a otros sectores geográficos de la región de Madre de Dios es mínima. A pesar de ello, no debe desestimarse la cuantificación de la deforestación por la minería de oro, debido a que, hallazgos similares se dieron en otros sectores (Guacamayo y La Pampa) como lo reportan Alarcón et al. (2021); Asner et al. (2013); Asner y Tupayachi (2017) y Swenson et al. (2011).

Por otro lado, a nivel regional, la agricultura sigue siendo el motor principal de conversión del bosque, aportando con más del 90% en la microcuenca del río Pariamanu, confirmando los resultados de MINAM (2020); MINAM (2015); MINAM (2012), y otros autores locales, nacionales e

internacionales (Alarcon 2011; Alarcón et al. 2021; Alarcón et al. 2016; Caballero et al. 2018; Chávez et al. 2013; Perz et al. 2013).

#### 4.1.3 Evaluación de precisión de clasificación

La validación del proceso de clasificación supervisada Random Forest para los años 2010 y 2015, se calcularon con información secundaria, datos obtenidos de proyectos ejecutados en la región (área de estudio) sobre cambio de cobertura y uso de suelo, como del Consorcio Madre de Dios-Pando, Consorcio Madre de Dios, así como la base de datos compartidos por investigadores locales y extranjeros (Alarcón et al. 2021; Alarcón et al. 2016; Alarcón et al. 2011; Chávez et al. 2012; Chávez et al. 2013; Chavez y Perz 2013; Perz et al. 2005; Perz et al. 2016; Perz et al. 2013).

Las clases evaluadas con la información secundaria fueron bosque, minería de oro, y otros usos (agricultura e infraestructura). Los resultados para 2010 y 2015, arrojaron una precisión global de 82,30%, 81,89%. Mientras que, el coeficiente Kappa ( $\kappa$ ) presento valores de 0,78 y 0,79. Según Hudson (1987); Cerda y Villarroel (2008); los resultados presentan una fuerza de concordancia considerable (0,61-0,80), lo que dan una confiabilidad de los mapas de la deforestación por la minería de oro en la microcuenca del rio Pariamanu (Lesschen et al., 2005).

Tabla 8. *Precisión de resultados de SAR Sentinel-1*

Nivel de clasificación	Referencia Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Productores (omisión) Precisión	Usuarios (comisión) Precisión
Bosque (1)	150	147	135	90,00%	91,84%
Minería de oro (2)	116	118	95	81,89%	80,51%
Otros usos (2) *	116	117	90	77,59%	76,92%
<b>Totales</b>	382	382	320		

Nota: \* Agricultura e infraestructura.

La precisión de la clasificación del SAR Sentinel-1 del año 2020, reporta una precisión global de 83,16% y un coeficiente Kappa de 0,80. Según Cerda y Villarroel (2008) una fuerza de concordancia considerable (adecuada) se encuentra entre los rangos de 0,61 a 0,80 (Tabla 8).

La exactitud de la clasificación SAR del año 2020, reporto la precisión de productores y usuarios de las categorías; de 150 puntos designadas para bosque, de los cuales 135 fueron asignados correctamente y 15 fueron consignados en otra categoría. La clase minería de oro utilizo 116 puntos de muestreo, 95 clasificadas correctamente y 21 confundidas con otros usos (agricultura e infraestructura). Finalmente, la categoría de otros usos empleo 116 puntos, de los cuales 90 fueron correctos y 26 confundidos con minería de oro y bosque. Los resultados se enmarcan dentro de los parámetros estadísticos aplicados en teledetección espacial (Hart 1968; Martins et al. 2016; Ochoa y Páez 2019; Polychronaki et al. 2013; Pontius 2000; Preparata y Shamos 1985; Stroppiana et al. 2015).

## **4.2 Cambios de cobertura y uso del suelo**

La evaluación y cuantificación del cambio de cobertura y uso de suelo, específicamente la deforestación por la minería de oro en la microcuenca del río Pariamanu (Tabla 9, Figura 19, 20, 21, y 22), los resultados siguen una tendencia creciente de la pérdida de bosque debido a la minería de oro. Sin embargo, la mayor deforestación de data por la agricultura y construcción de infraestructura, denominado en la investigación como otros usos.

De los años 2010 a 2015 reporta 5,4 ha/año de áreas deforestadas por minería de oro; 24,01 ha/año de 2015-2020 y un global de 27,19 ha/año de 2010-2020. Mientras que la categoría de otros usos aporta con 1 295,15 ha de áreas deforestadas de 2010-2020 (Tabla 9 y Figura 19).

La persistencia de áreas con minería de oro de 2010 a 2020 representa 0,86 ha. En cuanto a bosque, se mantienen 353 858,77 ha (2020) de 3546 09,93 ha al inicio (2010). Esta dinámica en los cambios, permitió que la deforestación por minería de oro se incrementara aproximadamente cinco (5)

veces de 2010 a 2020 (Tabla 9, Figura 19 y 22). Adicionalmente, los mapas muestran una pequeña área de un tipo de cobertura con vegetación inicial, arbustiva y arbórea con variados años de abandono por la minería de oro y otros usos, cuantificándose 0,23 ha/año de 2010 a 2020 (Tabla 9, Figura 19 y 22).

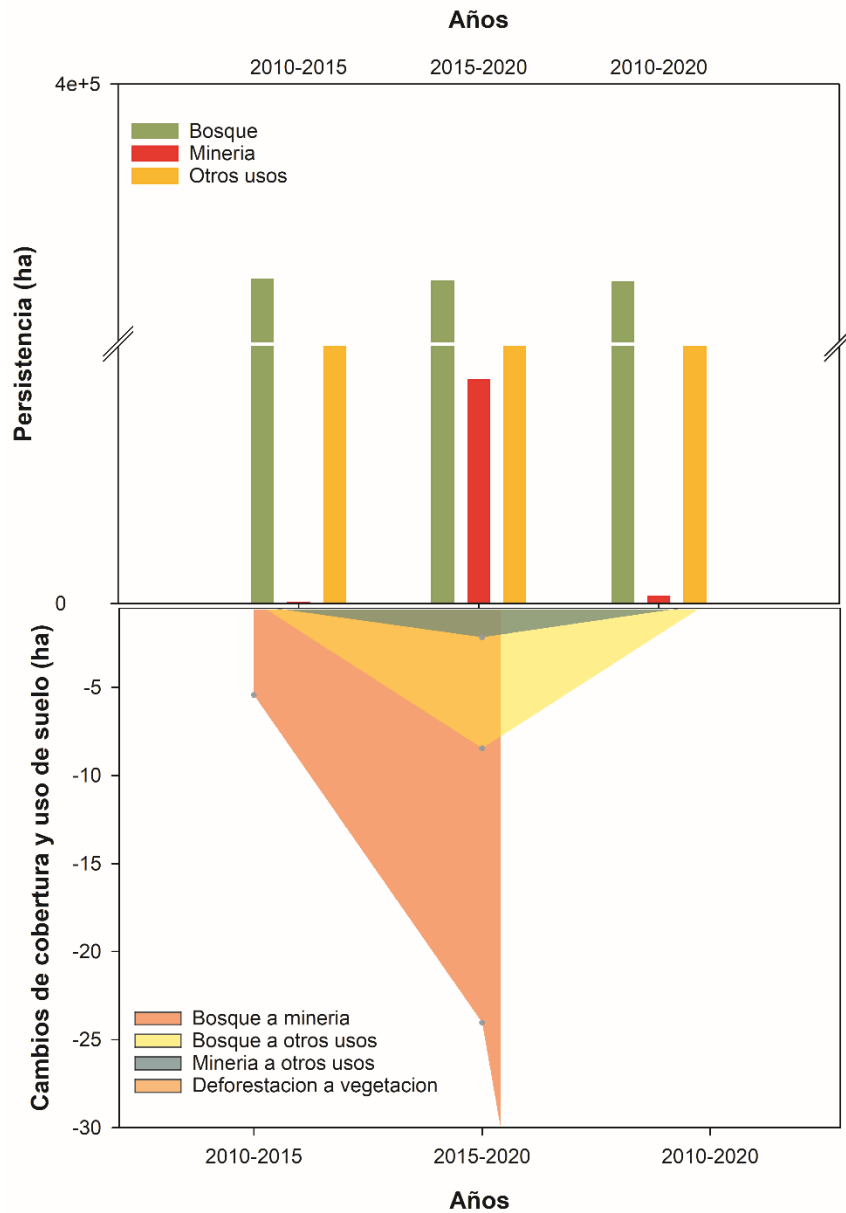


Figura 19. Pérdida de la cubierta forestal por la minería de oro y otras actividades en la Microcuenca del río Manuripe.

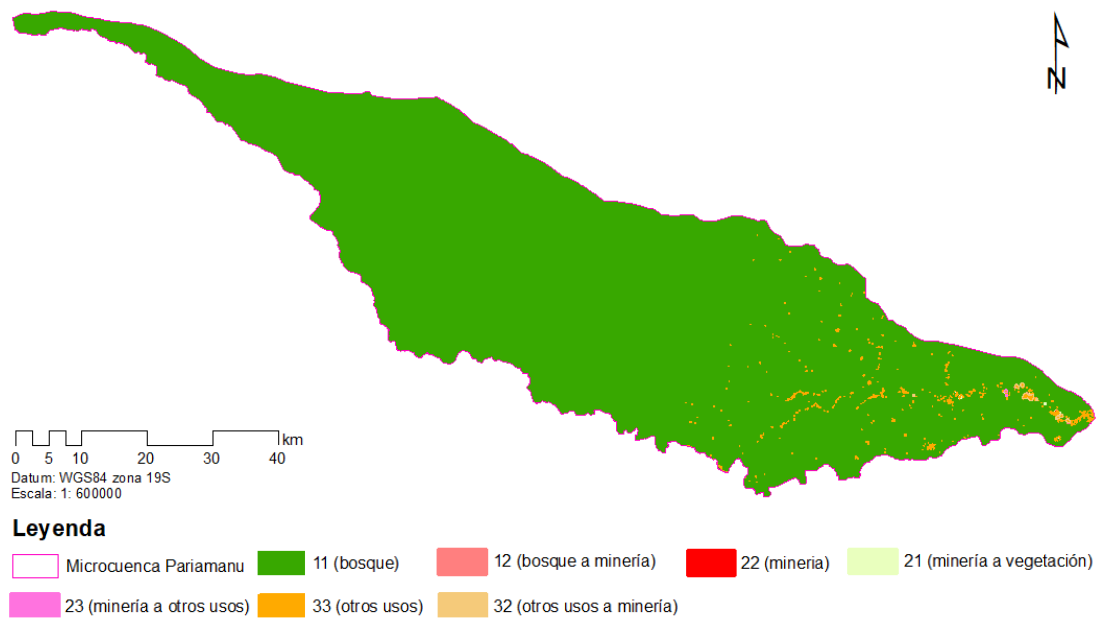


Figura 20. Cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, años 2010 a 2015.

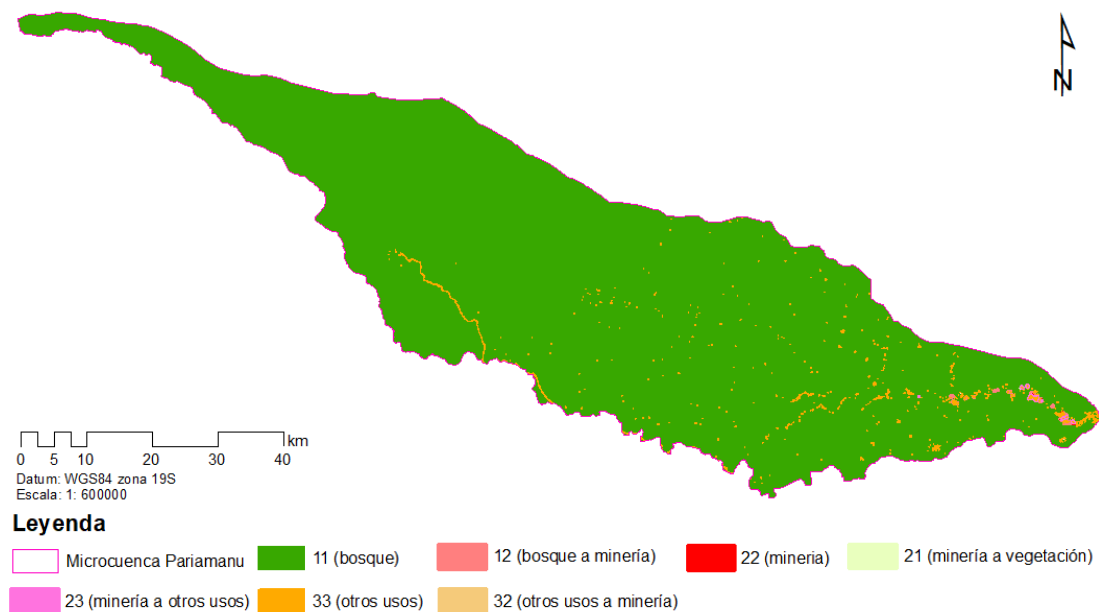


Figura 21. Cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, años 2015 a 2020.

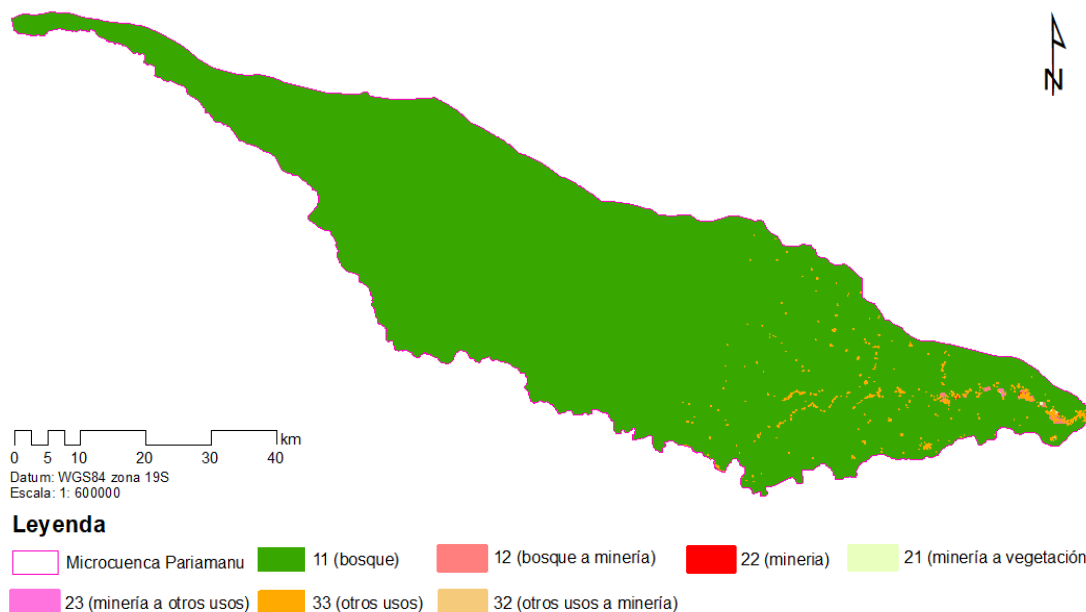


Figura 22. Cambio de cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Pariamanu – Madre de Dios, años 2010 a 2020.

Tabla 9. Cambio de uso de suelo en concesiones forestales de castaña en la microcuenca del río Manuripe

Años	Categoría (ha)					
	PB *	PM **	POU ***	BAM ****	MAOU *****	DAV *****
2010-2015	354 472,43	0,15	773,80	5,40	0,10	0,31
2015-2020	354 101,73	26,12	1 089,78	24,01	8,43	2,13
2010-2020	353 858,77	0,86	1 295,15	97,08	0,10	0,23

Nota: \* Persistencia de bosque, \*\* persistencia de minería, \*\*\* persistencia de otros usos, \*\*\*\* bosque a minería, \*\*\*\*\* minería a otros usos, y \*\*\*\*\* deforestación (agricultura y minería) a vegetación.

La dinámica de cambio de la cobertura y uso de suelo se da con la decisión del gobierno del Perú, la planificación e inicio de la pavimentación del Corredor Vial Interoceánico-Sur, específicamente el Tramo III (2001 a 2010) (Alarcón et al. 2016; Chávez et al. 2013; Perz et al. 2013). La culminación de la pavimentación trajo consigo la inmigración de otras regiones del país, con anhelo de conseguir tierras para cultivos, pastos, zonas urbanas, y la fiebre

del oro como actividad minera. Esta acción, se da con mayor intensidad e impacto cercanas al corredor vial principal y ríos primarios, decreciendo en vías accesos secundarias, trochas y quebradas (Alarcon 2011; Alarcón et al. 2021; Alarcón et al. 2016; Alarcón et al. 2011; Asner et al. 2013; Asner y Tupayachi 2017; Caballero et al. 2018; Swenson et al. 2011; Velásquez Ramírez et al. 2021). Según Southworth et al. (2011) en Madre de Dios la mayor intensidad e impacto de conversión de bosque a otros usos, producto de la conectividad, transporte y comercio, se da en umbral de 18 km (Perz et al. 2016). Situación que difiere en la frontera Amazónica Trinacional; Madre de Dios-Perú, Acre-Brasil, y Pando-Bolivia (MAP), donde las mayores tasas de pérdida de bosque ocurren en un umbral de 5 km de vías o caminos sin pavimentar (Baraloto et al. 2015).

Por otro lado, la seguridad jurídica que genera los predios agrícolas titulados y títulos habilitantes forestales en la microcuenca del río Pariamanu (Alarcón et al. 2021; Anderson et al. 2019; Chávez et al. 2013; MINAM 2020; Perz et al. 2013), no garantiza que en el tiempo, que sean invadidas, y áreas con cobertura de bosques pasen a uso agrícola y la minería de oro.

Los resultados de cambio de cobertura y uso de suelo, confirman que la agricultura es el motor principal de deforestación en Madre de Dios, a excepción de sectores focalizados como Huepetuhe, Delta, Inambari, y Guacamayo – La Pampa, donde la minería de oro es la mayor responsable de pérdida de bosque (Alarcon 2011; Alarcón et al. 2021; Alarcón et al. 2016; Alarcón et al. 2011; Cortés-McPherson 2019; Duff y Downs 2019; Glinskis y Gutiérrez-Vélez 2019; Kahhat et al. 2019; MINAM 2015; MINAM 2020; Moody et al. 2020). El área de estudio presenta una tendencia creciente de la deforestación por minería de oro, con 5,40 ha de 2010 a 2015, con 24,01 ha de 2015 a 2020, y un global de 97,08 ha de 2010 a 2020, en referencia a la microcuenca y límites administrativos de la provincia de Tambopata parecen insignificantes, pero no deben desestimarse, como sucedió en el sector Guacamayo – La Pampa. Asimismo, reportes realizados por MINAM (2020); (MINAM 2015) no muestran la deforestación por minería de oro en la microcuenca del río Pariamanu, por lo que, a nivel de gobierno podría

subestimarse acciones de control. A pesar ello, investigadores como Alarcón et al. (2021); Asner y Tupayachi (2017); Asner et al. (2013), y Caballero et al. (2018), ya cuantifican la presencia de la minería de oro en la microcuenca.



## CONCLUSIONES

La cuantificación de la deforestación por minería de oro mediante el uso de SAR Alos Palsar y Sentinel-1 en la microcuenca del río Pariamanu, reporta 354 609,93 ha en enero de 2010, 354 477,20 ha, 354 125,48 ha, y 353 838,13 ha a diciembre de los años 2010, 2015 y 2020 respectivamente. Siendo la pérdida de bosque por deforestación por minería de oro de 1,19 ha en 2010, de 36,94 ha en 2015, y 99,73 ha en 2020.

En 10 años (2010 a 2020) se perdieron 1 414,07 ha de bosque, siendo la minería de oro responsable de 7,05%, con una tasa anual de pérdida (q) de 0,003% (9,85 ha/año).

Respecto al cambio de cobertura y uso de suelo, en 10 años, 1 392,23 ha de bosque pasaron a otra categoría, de los cuales 97,18 ha (6,98%) corresponde a la minería de oro. Siendo la agricultura y la construcción de infraestructura responsable de 93,02% en la microcuenca del río Pariamanu.

Finalmente, se rechaza la hipótesis nula, donde la deforestación por minería de oro mediante el procesamiento de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la Microcuenca del río Pariamanu, en los periodos 2010–2020, presenta una alta fiabilidad y una tendencia creciente.

## **RECOMENDACIONES**

El avance tecnológico en teledetección espacial mediante SAR permite el monitoreo de la cuenca Amazónica sin tener en cuenta los factores climáticos, por lo que debe, desarrollar capacitaciones o especializaciones en el procesamiento de productos de sensores de Radar.

Las carreras profesionales vinculados con la gestión del territorio, deben incorporar el uso de los SARs en la curricula, con la finalidad de mejorar el conocimiento de la teledetección espacial con sensores activos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, P. y OOMMEN, T. Utilizing satellite radar remote sensing for burn severity estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73, 292-299.

ALARCON, G. Analisis multitemporal de la deforestacion en Madre de Dios. *Biodiversidad Amazonica*, 2011, 2(Forestal), 11.

ALARCÓN, G. Valor de existencia de la comunidad nativa San Jacinto, Tambopata - Madre de Dios. Universidad Nacional del Altiplano - Puno, Perú., 2016.

ALARCÓN, G., DIAZ-REVOREDO, J. L. y BARRIGA-PAREDES, V. Á. M. Dinámica de la pérdida de bosques en el sureste de la Amazonia peruana 2021.

ALARCÓN, G., DÍAZ, J., VELA, M., GARCÍA, M. y GUTIÉRREZ, J. Deforestación en el sureste de la amazonia del Perú entre los años 1999-2013; caso Regional de Madre de Dios (Puerto Maldonado–Inambari). *Journal of High Andean Research*, 2016, 18(3), 319-330.

ALARCÓN, G., FRISANCHO, R., CORREA, G., ULLOA, J., VELA, M., DÍAZ, J., PUMA, M., PORTAL, L., BOURONCLE, C., MENDOZA, J. R. y VÁSQUEZ, J. Detección de cambios de cobertura boscosa a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales en el distrito de Inambari. *Biodiversidad Amazonica*. ISSN: 2075-8081, 2011, 3, 9.

ANDERSON, C. M., ASNER, G. P. y LAMBIN, E. F. Lack of association between deforestation and either sustainability commitments or fines in private concessions in the Peruvian Amazon. *Forest Policy and Economics*, 2019/07/01/ 2019, 104, 1-8.

ASNER, G. P., LLACTAYO, W., TUPAYACHI, R. y LUNA, E. R. Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(46), 18454-18459.

ASNER, G. P. y TUPAYACHI, R. Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(9), 94-104.

BARALOTO, C., ALVERGA, P., QUISPE, S. B., BARNES, G., CHURA, N. B., DA SILVA, I. B., CASTRO, W., DA SOUZA, H., DE SOUZA MOLL, I. E. y CHILO, J. D. A. Effects of road infrastructure on forest value across a tri-national Amazonian frontier. *Biological conservation*, 2015, 191, 674-681.

BELENGUER-PLOMER, M. A., TANASE, M. A., FERNANDEZ-CARRILLO, A. y CHUVIECO, E. Burned area detection and mapping using Sentinel-1 backscatter coefficient and thermal anomalies. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233, 111345.

BREIMAN, L. Random forests. *Machine learning*, 2001, 45(1), 5-32.

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

CABALLERO, J., MESSINGER, M., ROMÁN-DAÑOBEYTIA, F., ASCORRA, C., FERNANDEZ, L. E. y SILMAN, M. Deforestation and forest degradation due to gold mining in the Peruvian Amazon: A 34-year perspective. *Remote Sensing*, 2018, 10(12), 1903.

CERDA, J. y VILLARROEL, L. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena de pediatría*, 2008, 79(1), 54-58.

CHÁVEZ, A., GUARIGUATA, M. R., CRONKLETON, P., MENTON, M., CAPELLA, J. L., ARAUJO, J. P. y QUAEDVLIEG, J. Superposición espacial en la zonificación de bosques en Madre de Dios: implicaciones para la sostenibilidad del recurso castaño. 2012.

CHÁVEZ, A., HUAMANI, L., FERNANDEZ, R., BEJAR, N., VALERA, F., PERZ, S., BROWN, I., DOMÍNGUEZ, S., PINEDO, R. y ALARCÓN, G. Regional Deforestation Trends within Local Realities: Land-Cover Change in Southeastern Peru 1996–2011. *Land*, 2013, 2(2), 131.

CHAVEZ, A. B. y PERZ, S. G. Path dependency and contingent causation in policy adoption and land use plans: The case of Southeastern Peru. *Geoforum*, 2013, 50, 138-148.

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

CHUVIECO, E. y HANTSON, S. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Version1. Plan Nacional de Teledetección. Instituto Geográfico Nacional. En línea; [http://www.ign.es/PNT/pdf/especificacionestecnicas-pnt-medar-landsat\\_v2-2010.pdf](http://www.ign.es/PNT/pdf/especificacionestecnicas-pnt-medar-landsat_v2-2010.pdf), 2010.

CORTÉS-MCPHERSON, D. Expansion of small-scale gold mining in Madre de Dios: 'capital interests' and the emergence of a new elite of entrepreneurs in the Peruvian Amazon. *The Extractive Industries and Society*, 2019/04/01/ 2019, 6(2), 382-389.

DUFF, P. M. y DOWNS, T. J. Frontline narratives on sustainable development challenges/opportunities in the 'illegal' gold mining region of Madre de Dios, Peru: Informing an integrative collaborative response. *The Extractive Industries and Society*, 2019/04/01/ 2019, 6(2), 552-561.

ELIJAH, R. y JENSEN, J. R. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data 1996.

GLINSKIS, E. A. y GUTIÉRREZ-VÉLEZ, V. H. Quantifying and understanding land cover changes by large and small oil palm expansion regimes in the Peruvian Amazon. *Land Use Policy*, 2019/01/01/ 2019, 80, 95-106.

HART, P. The condensed nearest neighbor rule (Corresp.). *IEEE transactions on information theory*, 1968, 14(3), 515-516.

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

JENSEN, J. R., LIN, H., YANG, X., RAMSEY III, E., DAVIS, B. A. y THOEMKE, C. W. The measurement of mangrove characteristics in southwest Florida using SPOT multispectral data. *Geocarto International*, 1991, 6(2), 13-21.

KAHHAT, R., PARODI, E., LARREA-GALLEGOS, G., MESTA, C. y VÁZQUEZ-ROWE, I. Environmental impacts of the life cycle of alluvial gold mining in the Peruvian Amazon rainforest. *Science of The Total Environment*, 2019/04/20/ 2019, 662, 940-951.

KHATI, U., KUMAR, V., BANDYOPADHYAY, D., MUSTHAFA, M. y SINGH, G. Identification of forest cutting in managed forest of Haldwani, India using ALOS-2/PALSAR-2 SAR data. *Journal of Environmental Management*, 2018, 213, 503-512.

LANDIS, J. R. y KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 1977, 159-174.

MARTINS, F. D. S. R. V., DOS SANTOS, J. R., GALVÃO, L. S. y XAUD, H. A. M. Sensitivity of ALOS/PALSAR imagery to forest degradation by fire in

northern Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 49, 163-174.

MINAM. Informe Final del Proyecto: Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad Andina. In *Componente Nacional Perú–Primera Etapa. Centro de Datos para la Conservación (CDC-UNALM). Laboratorio de Teledetección (LTAUNALM). Dirección General de Ordenamiento Territorial-Ministerio del Ambiente (DGOT-MINAM). Fundación para el Desarrollo Agrario (FDA). Lima-Perú. 2012.*

------. Ministerio del Ambiente. Cuantificación y análisis de la deforestación en la Amazonía Peruana en el periodo 2010 – 2011 – 2013 – 2014. Dirección General de Ordenamiento Territorial. 2015.

------. Bosque y pérdida de bosque del Perú. Perú 2020.

MOODY, K. H., HASAN, K. M., ALJIC, S., BLAKEMAN, V. M., HICKS, L. P., LOVING, D. C., MOORE, M. E., HAMMETT, B. S., SILVA-GONZÁLEZ, M., SENEY, C. S. y KIEFER, A. M. Mercury emissions from Peruvian gold shops: Potential ramifications for Minamata compliance in artisanal and small-scale gold mining communities. *Environmental Research*, 2020/03/01/ 2020, 182, 109042.

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

PERZ, S., ARAMBURÚ, C. y BREMNER, J. Population, land use and deforestation in the Pan Amazon Basin: a comparison of Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú and Venezuela. *Environment, development and sustainability*, 2005, 7(1), 23-49.

PERZ, S., CASTRO, W., ROJAS, R., CASTILLO, J., CHÁVEZ, A., GARCÍA, M., GUADALUPE, Ó., GUTIÉRREZ, T., HURTADO, A., MAMANI, Z., MAYNA, J., MELLO, R., PASSOS, V., REYES, J., SAAVEDRA, M., DE WIT, F.,

ACUÑA, N., ALARCÓN, G. y ROJAS, D. La Amazonia como un sistema socio-ecológico: Las dinámicas de cambios complejos humanos y ambientales en una frontera trinacional. In J. POSTIGO y K. YOUNG eds. *Naturaleza y sociedad: Perspectivas socio-ecológicas sobre cambios globales en América Latina*. Lima-Perú: desco, IEP e INTE-PUCP, 2016, p. 444.

PERZ, S., QIU, Y., XIA, Y., SOUTHWORTH, J., SUN, J., MARSIK, M., ROCHA, K., PASSOS, V., ROJAS, D., ALARCÓN, G., BARNES, G. y BARALOTO, C. Trans-boundary infrastructure and land cover change: Highway paving and community-level deforestation in a tri-national frontier in the Amazon. *Land Use Policy*, 2013, 34, 27-41.

PLANET-TEAM. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. 2021. Available from Internet: <<https://api.planet.com>>.

POLYCHRONAKI, A., GITAS, I. Z., VERAVERBEKE, S. y DEBIEN, A. Evaluation of ALOS PALSAR imagery for burned area mapping in Greece using object-based classification. *Remote Sensing*, 2013, 5(11), 5680-5701.

PONTIUS, R. G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2000, 66(8), 1011-1016.

PREPARATA, F. P. y SHAMOS, M. I. Introduction. In *Computational Geometry*. Springer, 1985, p. 1-35.

PUYRAVAUD, J.-P. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1), 593-596.

PUZZI, A., FLORES-ANDERSON, A., GRIFFIN, R., HERNDON, K. y MEYER, F. J. Assessing SAR C-band data to effectively distinguish modified land uses in a heavily disturbed Amazon forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 94, 102-214.



REIS, M. S., DUTRA, L. V., SANT'ANNA, S. J. S. y ESCADA, M. I. S. Multi-source change detection with PALSAR data in the Southern of Pará state in the Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 84, 777-780.

SERRANO, M. A. M., CATANIA, M., SÁNCHEZ, J., VASCONCELOS, A., KUIJPER, D. y MARC, X. Sentinel-1A flight dynamics LEOP operational experience. In., 2015.

SHIMADA, M., ITOH, T., MOTOOKA, T., WATANABE, M., SHIRAISHI, T., THAPA, R. y LUCAS, R. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155, 13-31.

SICA, F., PULELLA, A., NANNINI, M., PINHEIRO, M. y RIZZOLI, P. Repeat-pass SAR interferometry for land cover classification: A methodology using Sentinel-1 Short-Time-Series. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232, 111-277.

SOUTHWORTH, J., MARSIK, M., QIU, Y., PERZ, S., CUMMING, G., STEVENS, F., ROCHA, K., DUCHELLE, A. y BARNES, G. Roads as Drivers of Change: Trajectories across the Tri-National Frontier in MAP, the Southwestern Amazon. *Remote Sensing*, 2011, 3(5), 1047-1066.

STROPPIANA, D., AZAR, R., CALÒ, F., PEPE, A., IMPERATORE, P., BOSCHETTI, M., SILVA, J., BRIVIO, P. A. y LANARI, R. Integration of optical and SAR data for burned area mapping in Mediterranean Regions. *Remote Sensing*, 2015, 7(2), 1320-1345.

SWENSON, J. J., CARTER, C. E., DOMEQ, J.-C. y DELGADO, C. I. Gold mining in the Peruvian Amazon: global prices, deforestation, and mercury imports. *PloS one*, 2011, 6(4), e18875.

TANASE, M. A., KENNEDY, R. y APONTE, C. Radar Burn Ratio for fire severity estimation at canopy level: An example for temperate forests. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170, 14-31.

TANASE, M. A., SANTORO, M., APONTE, C. y DE LA RIVA, J. Polarimetric properties of burned forest areas at C-and L-band. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 7(1), 267-276.

VELÁSQUEZ RAMÍREZ, M. G., VEGA RUIZ, C. M., GOMRINGER, R. C., PILLACA, M., THOMAS, E., STEWART, P. M., GAMARRA MIRANDA, L. A., DAÑOBEYTIA, F. R., GUERRERO BARRANTES, J. A., GUSHIKEN, M. C., BARDALES, J. V., SILMAN, M., FERNANDEZ, L., ASCORRA, C. y TORRES, D. D. C. Mercury in soils impacted by alluvial gold mining in the Peruvian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 2021/06/15/ 2021, 288, 112364.

WHITTLE, M., QUEGAN, S., URYU, Y., STÜEWE, M. y YULIANTO, K. Detection of tropical deforestation using ALOS-PALSAR: A Sumatran case study. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124, 83-98.

XIUWAN, C. Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International journal of remote sensing*, 2002, 23(1), 107-124.

## **ANEXOS**

Anexo 1. Puntos de muestreo tomados en la microcuenca del río Pariamanu.

N°	Categoría	Coordinada UTM (WGS84)	
		Este	Norte
1	Bosque	467947	8625711
2	Bosque	467597	8625987
3	Bosque	467170	8626460
4	Bosque	466937	8627130
5	Bosque	466354	8627367
6	Bosque	465424	8627247
7	Bosque	464104	8627443
8	Bosque	463718	8625982
9	Bosque	462749	8625152
10	Bosque	462903	8626178
11	Bosque	465810	8628471
12	Bosque	463252	8626810
13	Bosque	463450	8623692
14	Bosque	464575	8623615
15	Bosque	464612	8624799
16	Bosque	465699	8623892
17	Bosque	465468	8622827
18	Bosque	463567	8622508
19	Bosque	467328	8623658
20	Bosque	468181	8624448
21	Bosque	466936	8628038
22	Bosque	467866	8628355
23	Bosque	463870	8628390
24	Bosque	463016	8628981
25	Bosque	462511	8629572
26	Bosque	461890	8630124
27	Bosque	460923	8627241
28	Bosque	460963	8626610
29	Bosque	460615	8625781
30	Bosque	459063	8625976
31	Bosque	459838	8626529
32	Bosque	459411	8627160
33	Bosque	459716	8630397
34	Bosque	459057	8630554
35	Bosque	458707	8630712
36	Bosque	458943	8628502
37	Bosque	456071	8629445
38	Bosque	454248	8628929

39	Bosque	452657	8629045
40	Bosque	448857	8628249
41	Bosque	449712	8627303
42	Bosque	452314	8625847
43	Bosque	451614	8626754
44	Bosque	454680	8625890
45	Bosque	455651	8625142
46	Bosque	455066	8626799
47	Bosque	457861	8625540
48	Bosque	453517	8625257
49	Bosque	453361	8625928
50	Bosque	453087	8627190
51	Bosque	450599	8630225
52	Bosque	451840	8630701
53	Bosque	453391	8631217
54	Bosque	454710	8631100
55	Bosque	455097	8631693
56	Bosque	452382	8631610
57	Bosque	450792	8631094
58	Bosque	449516	8628684
59	Bosque	447461	8627970
60	Bosque	447851	8626550
61	Bosque	450568	8626041
62	Bosque	450804	8624108
63	Bosque	449019	8624026
64	Bosque	451969	8623360
65	Bosque	455301	8625812
66	Bosque	458015	8626606
67	Bosque	451143	8629753
68	Bosque	448466	8629985
69	Bosque	446024	8628520
70	Bosque	444550	8628478
71	Bosque	443813	8628437
72	Bosque	442728	8627961
73	Bosque	442455	8628592
74	Bosque	442374	8630250
75	Bosque	442760	8631355
76	Bosque	443341	8631791
77	Bosque	444660	8631991
78	Bosque	445824	8631756
79	Bosque	446599	8632113
80	Bosque	447802	8632233
81	Bosque	448733	8632156

82	Bosque	450133	8630856
83	Bosque	450053	8631922
84	Bosque	450556	8632633
85	Bosque	450594	8633501
86	Bosque	449856	8633618
87	Bosque	448653	8633498
88	Bosque	448500	8632590
89	Bosque	447180	8632706
90	Bosque	445681	8625559
91	Bosque	444245	8625833
92	Bosque	444475	8627175
93	Bosque	443585	8626068
94	Bosque	443936	8625003
95	Bosque	444791	8624176
96	Bosque	446033	8623744
97	Bosque	447197	8623786
98	Bosque	448827	8622920
99	Bosque	447976	8621971
100	Bosque	446772	8622640
101	Bosque	446228	8623152
102	Bosque	445375	8623032
103	Bosque	445180	8623624
104	Bosque	445334	8624295
105	Bosque	445255	8625006
106	Bosque	445060	8625360
107	Bosque	443045	8624212
108	Bosque	442656	8624843
109	Bosque	442305	8625710
110	Bosque	441830	8630446
111	Bosque	440316	8630837
112	Bosque	438686	8631268
113	Bosque	438296	8632215
114	Bosque	437220	8627200
115	Bosque	433494	8627902
116	Bosque	436640	8626409
117	Bosque	436799	8624752
118	Bosque	437923	8625030
119	Bosque	436937	8632528
120	Bosque	412220	8645134
121	Bosque	435729	8634854
122	Bosque	409932	8644574
123	Bosque	412962	8643913
124	Bosque	419639	8643774

125	Bosque	432701	8635202
126	Bosque	431278	8630028
127	Bosque	421882	8632452
128	Bosque	421097	8635765
129	Bosque	415268	8638393
130	Bosque	426619	8631319
131	Bosque	433307	8624783
132	Bosque	434164	8623483
133	Bosque	435445	8622814
134	Bosque	435285	8625340
135	Bosque	432914	8626953
136	Bosque	430724	8634290
137	Bosque	416142	8644869
138	Bosque	423876	8641654
139	Bosque	430836	8636500
140	Bosque	431803	8637845
141	Bosque	410764	8639090
142	Bosque	424089	8634155
143	Bosque	418802	8637417
144	Bosque	431050	8627778
145	Bosque	411702	8636804
146	Bosque	429340	8629155
147	Bosque	431597	8626437
148	Bosque	436919	8623133
149	Bosque	438821	8622388
150	Bosque	439322	8624007
151	Minería	465942	8625311
152	Minería	465849	8625279
153	Minería	465860	8625153
154	Minería	465860	8625090
155	Minería	465767	8625058
156	Minería	465736	8625216
157	Minería	465612	8625121
158	Minería	465508	8625195
159	Minería	465167	8625205
160	Minería	465074	8625110
161	Minería	464991	8625047
162	Minería	465322	8625279
163	Minería	464597	8625572
164	Minería	464452	8625667
165	Minería	464628	8625667
166	Minería	464607	8625825
167	Minería	464576	8625920

168	Minería	464607	8626035
169	Minería	464338	8626056
170	Minería	464276	8626130
171	Minería	465259	8626152
172	Minería	464855	8626320
173	Minería	464927	8626604
174	Minería	465320	8626352
175	Minería	466386	8626217
176	Minería	467349	8625260
177	Minería	466347	8623975
178	Minería	467381	8624197
179	Minería	467733	8624471
180	Minería	467999	8626755
181	Minería	467978	8627155
182	Minería	467968	8627366
183	Minería	468050	8627460
184	Minería	468133	8627587
185	Minería	468195	8627692
186	Minería	468236	8627818
187	Minería	463758	8627013
188	Minería	463685	8627192
189	Minería	463633	8627276
190	Minería	463591	8627550
191	Minería	460869	8628412
192	Minería	460804	8628649
193	Minería	460158	8628832
194	Minería	460028	8628845
195	Minería	459950	8628990
196	Minería	460041	8629174
197	Minería	460170	8629029
198	Minería	460339	8628951
199	Minería	459394	8629252
200	Minería	459265	8629252
201	Minería	459601	8629371
202	Minería	459678	8629463
203	Minería	459730	8629542
204	Minería	458993	8629343
205	Minería	459174	8629528
206	Minería	457157	8628959
207	Minería	457416	8628920
208	Minería	457687	8629078
209	Minería	457816	8629355
210	Minería	455927	8629747



211	Minería	455708	8629760
212	Minería	455565	8629838
213	Minería	455410	8630009
214	Minería	455061	8629982
215	Minería	454776	8629850
216	Minería	454557	8629626
217	Minería	454441	8629389
218	Minería	454234	8629218
219	Minería	454027	8629218
220	Minería	453807	8629217
221	Minería	453263	8629703
222	Minería	453434	8628098
223	Minería	453085	8627861
224	Minería	452918	8627584
225	Minería	453124	8628243
226	Minería	451894	8628885
227	Minería	451700	8628885
228	Minería	451532	8628924
229	Minería	451403	8628898
230	Minería	451764	8629056
231	Minería	450511	8628475
232	Minería	450278	8628488
233	Minería	450149	8628593
234	Minería	450032	8628698
235	Minería	450393	8629106
236	Minería	450548	8629265
237	Minería	450769	8629068
238	Minería	451014	8629252
239	Minería	453069	8630163
240	Minería	450900	8627963
241	Minería	451017	8627568
242	Minería	450823	8627423
243	Minería	450616	8627489
244	Minería	450655	8627225
245	Minería	450682	8626989
246	Minería	454623	8628495
247	Minería	455037	8628772
248	Minería	455282	8629035
249	Minería	455269	8629285
250	Minería	455036	8629377
251	Minería	447117	8629521
252	Minería	447137	8629690
253	Minería	447147	8629911

254	Minería	446413	8629625
255	Minería	446444	8629909
256	Minería	445163	8628844
257	Minería	445173	8629044
258	Minería	443787	8628789
259	Minería	444219	8629832
260	Minería	444095	8630147
261	Minería	444084	8630400
262	Minería	445295	8630223
263	Minería	445232	8630507
264	Minería	445304	8630823
265	Minería	445812	8630350
266	Minería	446412	8630299
267	Otros usos	469030	8625240
268	Otros usos	468940	8625319
269	Otros usos	468914	8625148
270	Otros usos	468759	8625240
271	Otros usos	468460	8625950
272	Otros usos	468330	8626910
273	Otros usos	467299	8624041
274	Otros usos	466226	8623579
275	Otros usos	466110	8623514
276	Otros usos	466045	8623369
277	Otros usos	465942	8623066
278	Otros usos	465039	8621815
279	Otros usos	464508	8622577
280	Otros usos	464547	8622683
281	Otros usos	464132	8623195
282	Otros usos	464119	8623498
283	Otros usos	464080	8623695
284	Otros usos	463963	8623866
285	Otros usos	464040	8624235
286	Otros usos	464157	8624274
287	Otros usos	466187	8624329
288	Otros usos	466367	8624514
289	Otros usos	465912	8626566
290	Otros usos	465899	8626750
291	Otros usos	466002	8627026
292	Otros usos	465783	8626960
293	Otros usos	463701	8626642
294	Otros usos	463339	8626628
295	Otros usos	463767	8625524
296	Otros usos	463405	8625431

297	Otros usos	463949	8624998
298	Otros usos	463923	8625274
299	Otros usos	464375	8625432
300	Otros usos	464905	8625341
301	Otros usos	462399	8623404
302	Otros usos	463213	8624286
303	Otros usos	467425	8626699
304	Otros usos	467632	8626791
305	Otros usos	467180	8625870
306	Otros usos	466948	8625843
307	Otros usos	467723	8626147
308	Otros usos	467529	8626133
309	Otros usos	467722	8627094
310	Otros usos	467528	8627120
311	Otros usos	467528	8627252
312	Otros usos	467851	8627476
313	Otros usos	467941	8627568
314	Otros usos	468070	8627949
315	Otros usos	468122	8628186
316	Otros usos	468147	8628463
317	Otros usos	467332	8628738
318	Otros usos	463559	8626839
319	Otros usos	463481	8627076
320	Otros usos	463118	8627312
321	Otros usos	462032	8627219
322	Otros usos	461850	8627797
323	Otros usos	462046	8626482
324	Otros usos	462046	8626719
325	Otros usos	461645	8627087
326	Otros usos	462127	8624061
327	Otros usos	461894	8623982
328	Otros usos	461260	8624718
329	Otros usos	461376	8624928
330	Otros usos	462124	8626166
331	Otros usos	463908	8626405
332	Otros usos	463740	8626405
333	Otros usos	465058	8627328
334	Otros usos	465148	8627525
335	Otros usos	465174	8627630
336	Otros usos	465083	8628341
337	Otros usos	464539	8628432
338	Otros usos	464539	8628564
339	Otros usos	463866	8629050

340	Otros usos	463892	8629181
341	Otros usos	463931	8629273
342	Otros usos	464629	8629169
343	Otros usos	464603	8629301
344	Otros usos	464513	8629261
345	Otros usos	464383	8629077
346	Otros usos	464151	8628682
347	Otros usos	463699	8628392
348	Otros usos	463414	8628825
349	Otros usos	463427	8629062
350	Otros usos	463401	8629181
351	Otros usos	463413	8629378
352	Otros usos	463361	8629536
353	Otros usos	463128	8629536
354	Otros usos	463064	8629338
355	Otros usos	463051	8629220
356	Otros usos	462961	8629075
357	Otros usos	462547	8629061
358	Otros usos	462340	8629048
359	Otros usos	462445	8628364
360	Otros usos	462510	8628101
361	Otros usos	462846	8627996
362	Otros usos	463467	8627615
363	Otros usos	462718	8627219
364	Otros usos	462239	8627521
365	Otros usos	462845	8628680
366	Otros usos	461746	8628494
367	Otros usos	461423	8628126
368	Otros usos	460674	8627677
369	Otros usos	461176	8629349
370	Otros usos	460736	8629743
371	Otros usos	461511	8630244
372	Otros usos	462326	8630390
373	Otros usos	461821	8630692
374	Otros usos	461058	8630427
375	Otros usos	460657	8630572
376	Otros usos	461096	8630822
377	Otros usos	461251	8631059
378	Otros usos	461290	8631349
379	Otros usos	461483	8631546
380	Otros usos	460514	8631150
381	Otros usos	459699	8631083
382	Otros usos	459300	8630044

Anexo 2. Panel fotográfico.

Foto 1. Reconocimiento de campo.



Foto 2. Puntos UTM en campo, minería de oro.





Foto 3. Captura de puntos UTM, bosque.



Foto 4. Levantamiento de punto de campo, minería de oro.





Foto 5. Levantamiento de punto de campo, bosque y vegetación.



Foto 6. Puntos de muestreo, vegetación y suelo desnudo.





ANEXO 3. Constancia de autorización.

 **GOBIERNO REGIONAL DE MADRE DE DIOS**  
**GERENCIA REGIONAL FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE** 

"Año del Bicentenario del Perú: 200 Años de Independencia"  
" Madre de Dios Capital de la Biodiversidad del Perú"

Puerto Maldonado, 06 enero del 2022

**CONSTANCIA DE AUTORIZACION N°001-**  
**2022-GRFFS**

Visto la solicitud con Expediente N° 075, de fecha 06 de enero del 2022, presentado por el Bach. **JOSE LUIS HUACAC AUCCAPURI**, identificada con **DNI N° 70764244**, quien solicita constancia de Autorización para Ingreso de Verificación de Muestras y Validación de Puntos de Muestreo en Campo en la Microcuenca del Rio Pariamanu.

**HACE CONSTAR:**

Que, **AUTORIZO** el ingreso a la **MICROCUCENCA DEL RIO PARIAMANU** al Sr. Bach. **JOSE LUIS HUACAC AUCCAPURI**, Identificado con **DNI 70764244**; para verificación de muestras y validación de puntos de muestreo, dentro del ámbito de la jurisdicción de Tambopata de la Gerencia Regional Forestal y de Fauna Silvestre del Gobierno Regional de Madre de Dios.

Se expide la presente constancia al interesado para su conocimiento y fines que crea conveniente.

Atentamente;

   
Ing. **Rosa María Baca Cusshuaman**  
GERENTE REGIONAL

**EXPEDIDO** 05/01/2022  
**CADUCA** 05/04/2022