

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de

INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

“MODELO DE ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES SATELITALES
PARA LA DETECCIÓN DE SUPERFICIES DEGRADADAS POR ACTIVIDAD MINERA
ILEGAL E INFORMAL – MADRE DE DIOS”

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES Y SEÑALES

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

AUTOR

QUISPE CANCHANYA, LUIS ALBERTO

ASESOR

SANDOVAL RICCI, ALDO JUAN

JURADO

ALVA VELÁSQUEZ, MIGUEL

GUILLEN LEÓN, ROGELIA

MARTÍNEZ CABRERA, RUBÉN

LIMA – PERÚ

2021

Índice

Resumen	7
Abstract	8
I. Introducción.....	9
1.1. Descripción y formulación del problema.....	11
1.1.1. Descripción del problema	11
1.1.2. Formulación del problema	12
1.2. Antecedentes	13
1.2.1. Antecedentes internacionales.....	14
1.2.2. Antecedentes nacionales	16
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo general.....	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
1.4. Justificación	20
1.5. Hipótesis	21
II. Marco teórico	22
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación	22
2.1.1. Teoría del desarrollo sostenible	22
2.1.2. Enfoque de neutralidad de degradación de la tierra.....	24
2.1.3. Enfoque de la iniciativa 20x20	25
2.1.4. Sistemas de información geográfica	27
2.1.5. La teledetección	30
2.1.6. Espectro electromagnético	32
2.1.7. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI).....	39
2.1.8. Contexto de la pérdida y cambios en la cobertura vegetal en el territorio peruano.....	39

2.1.9. Lenguaje de programación R	42
III. Método	43
3.1. Tipo de investigación	43
3.1.1. Enfoque de la investigación	43
3.1.2. Diseño de la investigación	43
3.1.3. Tipo de diseño.....	43
3.2. Ámbito temporal y espacial	43
3.2.1. Ámbito temporal	43
3.2.2. Ámbito espacial	43
3.3. Variables	44
3.3.1. Variable independiente	44
3.3.2. Variable dependiente	45
3.4. Población y muestra.....	45
3.4.1. Población.....	45
3.4.2. Muestra	46
3.5. Instrumentos y materiales	46
3.5.1. Instrumentos.....	46
3.5.2. Materiales.....	46
3.6. Procedimientos.....	46
3.6.1. Presupuesto	48
3.7. Análisis de datos	49
IV. Resultados.....	51
4.1. Fase 1: Identificación y recopilación de información de plataformas de datos abiertos ..	52
4.2. Fase 2: Arquitectura metodológica: procesamiento de imágenes satelitales e identificación de áreas degradadas por minería ilegal e informal.....	55

4.3. Resultados obtenidos	70
V. Discusión de resultados.....	73
VI. Conclusiones.....	81
VII. Recomendaciones	83
VIII. Referencias.....	84

Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de consistencia	45
Tabla 2 Costo estimado para la generación de información de áreas degradadas	48
Tabla 3 Superficie degradada identificadas hasta el año 2018	56
Tabla 4 Matriz de confusión con los datos del mapa y valores de referencia	68
Tabla 5 Valoración del coeficiente de Kappa	69
Tabla 6 Superficie degradada identificadas en los distritos del departamento de Madre de Dios	70
Tabla 7 Distritos con superficie degradada por minería ilegal e informal a julio 2020.....	71
Tabla 8 Superficie degradadas por minería ilegal e informal en comunidades nativas.....	72
Tabla 9 Superficie degradadas por minería ilegal e informal en Áreas Naturales Protegidas.	73
Tabla 10 Superficie degradada por minería ilegal e informal en zonas de amortiguamiento..	73
Tabla 11 Distritos con superficie degradada por minería ilegal e informal a julio 2020.....	76
Tabla 12 Comparación de metodologías de monitoreo	80

Índice de figuras

Figura 1 Las tres dimensiones del concepto de sostenibilidad	23
Figura 2 Esquema de un SIG con sus tres subsistemas fundamentales	29
Figura 3 Elementos que forman el sistema SIG.....	30
Figura 4 Elementos de un proceso de teledetección desde satélites	32
Figura 5 Espectro electromagnético y sus principales regiones de interés	33
Figura 6 Firmas espectrales tipo de algunos elementos habituales.....	35
Figura 7 Mapa de ámbito espacial del área de estudio	44
Figura 8 Fases y pasos de la metodología de análisis de series temporales	47
Figura 9 Flujo del proceso de evaluación de exactitud temática	50
Figura 10 Flujo de proceso de modelo para la identificación de áreas degradadas por actividad minera.....	51
Figura 11 Path/row landsat 002069 y 003069 de la zona de interés.....	53
Figura 12 Plataforma de descarga de imágenes satelitales sentinel 2.....	54
Figura 13 Imágenes en reflectancia de los path/row 002069 y 003069.....	58
Figura 14 Ejemplo de imágenes de NDVI generadas para cada tile y años	59
Figura 15 Ejemplo de generación de mosaicos por cada año del 2000-2020.....	59
Figura 16 Ejemplo de cortes realizados a los mosaicos de NDVI.....	60
Figura 17 Script en R para la detección de superficie de pérdida de vegetación.....	61
Figura 18 Mapa de áreas degradadas por minería ilegal e informal en Madre de Dios	63
Figura 19 Flujo del proceso de evaluación de exactitud temática	65
Figura 20 Mapa de distribución de puntos de muestreo (96 puntos)	66
Figura 21 Datos del PNCB de la deforestación en el departamento de Madre de Dios	76
Figura 22 Datos de terra-i sobre la pérdida de cobertura vegetal para Perú a julio 2020.....	78

Resumen

La degradación de los bosques amazónicos en el Perú producto de la actividad minera ilegal e informal, viene causando daños significativos en los ecosistemas y en su biodiversidad, así como en la población y sus medios de vida. Siendo el departamento de Madre de Dios el más impactado. Ante esta problemática, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo elaborar un modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales, que permite identificar de manera oportuna el incremento de la superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero en el departamento de Madre de Dios. Este modelo muestra múltiples ventajas en comparación con otros modelos, debido a que usa como insumos las imágenes satelitales Landsat y Sentinel 2 que son de libre acceso, y usa softwares no comerciales para su procesamiento; generando así información que permite discriminar si la degradación es causada por actividad minera ilegal o informal. Como resultado, se ha identificado a julio del año 2020 una superficie degradada por minería de 88 256.89 hectáreas, de la cual 27 449.87 hectáreas corresponden a la minería ilegal y 60 807.02 hectáreas a la minería informal. El presente modelo y la información que genera, permitirá contribuir a los tomadores de decisiones de las entidades públicas y privadas, a tomar acciones de monitoreo, evaluación, fiscalización, interdicción y orientar a través de proyectos de inversión, la recuperación y conservación de los ecosistemas.

Palabras claves: degradación, ecosistemas, imágenes satelitales.

Abstract

The degradation of the amazonian forests in Peru, as a result of illegal and informal mining activity, has been causing significant damage to ecosystems and their biodiversity, as well as to the population and their livelihoods. Being the department of Madre de Dios the most impacted. Faced with this problem, the present research work aims to develop a model for the analysis of time series of satellite images, which allows to identify in a timely manner the increase in degraded surfaces as a result of illegal and informal mining activity in the area of the mining corridor. in the department of Madre de Dios. This model shows multiple advantages compared to other models, because it uses Landsat and Sentinel 2 satellite images as inputs, which are freely accessible; and uses non-commercial software to process; thus generating information that, allows to discriminate if the degradation is caused by illegal or informal mining activity. As a result, an area degraded by mining of 88 256.89 hectares has been identified as of July 2020, of which 27 449.87 hectares correspond to illegal mining and 60 807.02 hectares to informal mining. This model and the information it generates, will allow decision makers of public and private entities to contribute to take monitoring, evaluation, interdiction and guide through investment projects, the recovery and conservation of ecosystems.

Keywords: degradation, ecosystems, satellite images.

I. Introducción

En los últimos años a nivel mundial se viene acrecentando el problema de la degradación de las tierras, esto, producto de las múltiples actividades humanas que están relacionadas a la agricultura, el sobrepastoreo, la deforestación, la actividad minera, entre otras actividades que transforman los ecosistemas. Ante esta problemática, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en su lucha contra la degradación de las tierras, la desertificación y el cambio climático, dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del año 2015, en especial el ODS 15, Meta 15.3, establece las orientaciones y lineamientos al que tienen que alinearse los países para combatir la desertificación y degradación de las tierras, a fin de buscar a nivel mundial eliminar la pobreza, proteger el planeta, y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad.

Por su parte el Perú, que también aqueja esta problemática de degradación de las tierras producto de las múltiples actividades antrópicas insostenibles, viene adoptando políticas y lineamientos alineados a los ODS, estableciéndose normativas y herramientas que permitan gestionar a escala nacional esta problemática.

Si bien la degradación producto de la actividad minera está presente en todo el país, el departamento de Madre de Dios es el más afectado, especialmente por la actividad minera aluvial aurífera del tipo ilegal e informal (ejercida por los pequeños mineros y mineros artesanales); que viene transformando y degradando los bosques, perdiendo así los servicios ecosistémicos que estos brindan y afectando la calidad y los medios de vida de las personas.

Es por ello, que ante esta problemática y a partir de mi experiencia en el uso de imágenes satelitales y de las herramientas de Sistema de Información Geográfica y de Teledetección, se ha llevado a cabo el presente trabajo de investigación, generando un modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales, el cual a través del uso de imágenes satelitales de plataformas de datos abiertos (gratuitos), y de una arquitectura metodológica de

análisis de series temporales de imágenes satelitales, permite generar de manera continua información confiable, oportuna y con bajo costo, sobre la superficie degradada por actividad minera ilegal e informal presentes en el departamento de Madre de Dios.

Para el presente trabajo, en descripción y formulación del problema, se realiza la descripción de la problemática y se formula el problema a estudiar, se revisa los antecedentes a nivel mundial, nacional y departamental, se propone los objetivos generales y específicos, se establece la justificación y la hipótesis.

En el marco teórico, se desarrolla las bases teóricas y las definiciones que enmarcan la presente investigación, y también se hacen mención al marco legal peruano.

En el método, se describe a qué tipo de investigación corresponde el presente trabajo, asimismo se establece el ámbito espacial y temporal a estudiar, las variables analizadas, se establece la población y muestra, los instrumentos y materiales a usar, así como el procedimiento y el análisis de datos.

En resultados, se describe y desarrolla las dos fases establecidas en la metodología, con sus correspondientes cinco pasos a seguir; siendo la fase I, la correspondiente a la identificación y recopilación de información de plataformas de datos abiertos, y la fase II referido al desarrollo de la arquitectura metodológica.

En discusión de resultados, se compara los resultados obtenidos en la presente investigación con las dos experiencias descritas en antecedentes, uno internacional y otro nacional. Y, por último, se establecen las “conclusiones y recomendaciones” consideradas en la presente investigación.

El presente trabajo de investigación, a través de su modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales para la detección de superficie degradada por actividad minera ilegal e informal, con su aplicación y generación de información contribuirá para que los tomadores de decisiones del sector público y privado, puedan tomar acciones que estén

dentro de sus competencias y funciones, respecto a la evaluación, fiscalización, monitoreo, interdicción, recuperación de ecosistemas degradados, y conservar aquellos ecosistemas que están próximos y son vulnerables a ser degradados por la actividad minera.

1.1. Descripción y formulación del problema

1.1.1. Descripción del problema

El departamento de Madre de Dios es uno de los que mayor impacto ambiental negativo a sufrido en la amazonía peruana, producto de la pérdida de sus bosques, a su vez, es el primero que cuenta con la mayor superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal (minería aluvial aurífera), el cual se viene desarrollando desde hace más de 50 años, causando daños en los ecosistema referidos a la contaminación del suelo, el agua y el aire, así como en la sociedad, referidos a la prostitución, explotación sexual de menores, trata de personas, el contrabando, el comercio ilegal del oro, entre otros; y que a la actualidad sigue avanzando dentro de los límites de las Comunidades Indígenas y de la Reserva Nacional Tambopata y su zona de amortiguamiento.

En el Perú existen algunas experiencias referidas al monitoreo de la deforestación y degradación de ecosistemas, siendo en uno de ellos el caso del Ministerio del Ambiente (MINAM), quien a través del Programa Nacional de Conservación de Bosques (PNCB), tiene un sistema de identificación de pérdida de bosques - deforestación que monitorea la amazonía peruana, brindando información con una periodicidad anual, y lo publica en su plataforma virtual denominado Geobosques; sin embargo, esta información no especifica si la deforestación fue ocasionado por la actividad minera ilegal e informal, u otra actividad antrópica.

Otra iniciativa que tuvo el MINAM en los años 2016 y 2017, fue de monitorear la superficie degradada por minería con un sistema denominado Sistema de Detección Temprano y Vigilancia Ambiental (SIDETEVA), que solo monitoreaba zonas focalizadas en los

departamentos de Madre de Dios, Puno e Ica; sin embargo para la generación de su información requería un alto costo debido al uso imágenes satelitales comerciales (que era complementada con imágenes gratuitas), siendo esto uno de las razones que no le permitió ser sostenible.

También existen otras iniciativas por parte de entidades privadas, como es el caso de Monitoring of the Andean Amazon Project (MAAP), el cual en colaboración con Conservación Amazónica (ACCA), vienen generando y publicando información del proceso de deforestación y avance de la actividad minera en ámbitos bien focalizados en el departamento de Madre de Dios; sin embargo, en su análisis utiliza mayormente imágenes satelitales comerciales con altos costos en el mercado, y no discrimina si la deforestación fue causada por la actividad minera ilegal o informal.

A partir de lo expuesto, se hace necesario contar con un modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales, que permita generar información sobre el proceso de degradación de los bosques producto de la actividad minera ilegal e informal, para que los tomadores de decisiones puedan tomar acciones que estén referidos a la recuperación y conservación de ecosistemas para el ámbito del departamento de Madre de Dios.

1.1.2. Formulación del problema

Problema general

¿Cómo un modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales permite identificar de manera oportuna el incremento de la superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero del departamento de Madre de Dios?

Problema específico

- ¿Cómo las plataformas de datos abiertos de series temporales de imágenes satelitales, permiten generar oportunamente información de superficie de pérdida de la cobertura vegetal en la Amazonía peruana?

- ¿Cómo una arquitectura metodológica de análisis de series temporales de imágenes satelitales permite identificar de manera oportuna el incremento de la superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero del departamento de Madre de Dios?

1.2. Antecedentes

El Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre ([OSINFOR], 2016), manifiesta lo siguiente:

El departamento de Madre de Dios, es reconocido como la “Capital de la Biodiversidad”, esto se debe a su extraordinaria variedad de especies forestales, flora y fauna silvestre, siendo ocupada en un 40% por Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Comunidades Nativas. En los últimos años, se ha experimentado un desarrollo socio-económico y de infraestructura vial considerable, integrando y comunicando pueblos en su recorrido, pero este crecimiento también trae consecuencias negativas. Actualmente, se están canalizando esfuerzos en conjunto orientados en preservar el recurso forestal y de fauna silvestre. Las actividades extractivas mal conducidas incentivan la degradación y erradicación de hábitats amazónicos, por tal motivo el camino que debemos seguir es la planificación, distribución y aprovechamiento racional del recurso forestal de nuestro territorio. (p. 13)

Asner (2017), manifiesta que una de las actividades antrópicas que impactan negativamente nuestra Amazonía peruana es:

La extracción de oro, el cual implica la eliminación de bosques, la excavación del suelo y el uso de mercurio líquido, que en conjunto representan una gran amenaza para la biodiversidad, la calidad del agua, las reservas forestales de carbono y la salud humana. Dentro del hotspot global de biodiversidad, en Perú,

específicamente en Madre de Dios, la minería ha continuado a pesar de numerosos decretos del gobierno desde el año 2012 y acciones de ejecución en su contra. Ahora también se cree que la minería entró en áreas protegidas federalmente, pero se desconocen las tasas de invasión de mineros. (p. 1)

Torres (2015), manifiesta lo siguiente:

Actualmente la región de Madre de Dios destaca no sólo por concentrar la mayor parte de la producción y de los productores informales de oro del Perú, sino también porque concentra la mayor parte de los productores formales. Sin embargo, este resultado está muy influenciado por la presencia de los productores “golondrinos”, pues no se correlaciona con la mínima importancia relativa que dichos productores formales tienen en la producción nacional de oro.

Es por ello, que es importante llevar a cabo la detección y monitoreo del proceso de degradación que viene generando la actividad minera ilegal e informal en el departamento de Madre de Dios, esto a fin de tener un mejor conocimiento cuantitativo de la superficie degradada y como se viene desplazando en el departamento, y que permita a su vez conocer los efectos, así como la selección de medidas eficaces para su control y recuperación. Ante esta problemática expuesta, podemos mencionar que en el Perú desde el sector público y privado se tienen diferentes experiencias de monitoreo de la deforestación y degradación de ecosistemas. Es preciso mencionar que algunas de estas experiencias no han sido sostenibles en el tiempo, en otros casos vienen generando información utilizando como insumos imágenes satelitales comerciales de alto costo, en otros casos generan información y se reportan con un retraso de un año a más después de ocurrido el problema, y, en casi todos los casos no se logra identificar qué actividad antrópica ha causado la deforestación o degradación del ecosistema.

1.2.1. *Antecedentes internacionales*

Se tienen diversas experiencias internacionales que vienen monitoreando los bosques y su deforestación, que se muestran a continuación:

Galindo *et al* (2014), en el caso de Sudamérica tenemos a Colombia, que, a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, viene monitoreando la deforestación de sus bosques usando una metodología que analiza imágenes satelitales para identificar los cambios de cobertura de bosques.

Sin embargo, esta metodología no llega al detalle de identificación del causante de la deforestación por ejemplo la minería.

Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador (s.f.), en su sistema de monitoreo de la deforestación, igualmente utiliza imágenes satelitales para identificar la deforestación, pero sólo analizando imágenes de dos fechas distintas.

La cual, no tiene la robustez de análisis de una serie de tiempo de imágenes satelitales, donde se puede conocer el comportamiento fenológico de los bosques y detectar mejor los cambios; tampoco llega al detalle de identificar la pérdida de bosque por la actividad minera ilegal e informal.

World Resources Institute ([WRI], s.f.), en una de sus investigaciones que tiene como objetivo buscar la mejor calidad de vida de las personas y la protección del planeta, presenta la siguiente experiencia:

Sistema de monitoreo de la deforestación a través de su herramienta Global Forest Watch, herramienta que monitorea a nivel mundial la deforestación usando imágenes satelitales Landsat y publicando datos de alertas cada 16 días; pero estos resultados no llegan al nivel de identificar la causa de la deforestación como por ejemplo la minería, y mucho menos a discriminar si es ilegal e informal.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

([FAO], 2012), manifiesta en uno de sus estudios de monitoreo de bosques lo siguiente:

Muestra una experiencia de método de medición de la degradación de bosques en México, donde se utilizó imágenes satelitales MODIS, y que a través de su Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y sus umbrales fenológicos, datos del inventario forestal y trabajos de campo, se midió la degradación forestal al año 2009. Cabe mencionar, que este estudio fue puntual para un año específico, 2009, pero este método no permite monitorear el proceso de degradación, y tampoco llegó al nivel de identificar al causante de la degradación forestal.

El Centro de Investigación de Amazonia Tropical ([CIAT], s.f.), a través de su experiencia en el monitoreo del territorio, muestra el siguiente método:

Método sobre el monitoreo de los cambios de la cobertura y uso del territorio, basado en el análisis de la pérdida e incremento de la cobertura vegetal a partir del análisis de las imágenes satelitales de NDVI de MODIS (pixel de 250 m), que genera información en tiempo casi real (16 días); esta iniciativa viene generando información para las zonas de amazonía en Colombia, Perú, Honduras y Vietnam. Si bien se genera información de pérdida de la cobertura vegetal, esta herramienta tiene una resolución baja (escala gruesa de análisis en el territorio, con tamaño de pixel de 250 m), asimismo, no llega al nivel de identificar cual ha sido el causante de la pérdida de la cobertura vegetal, como por ejemplo la actividad minera.

1.2.2. *Antecedentes nacionales*

Asimismo, se tienen diversas experiencias nacionales tanto del sector público como del privado, que han monitoreado o vienen monitoreando los bosques y su deforestación, y que se

detallan a continuación:

El MINAM (2019), a través del PNCB presenta un sistema de monitoreo de los bosques en la amazonía peruana, que se describe a continuación:

Sistema que tiene un método de identificación de la pérdida de bosques (deforestación), que monitorea toda la amazonía peruana a partir del análisis de imágenes satelitales Landsat (pixel de 30 m), brindando información por año; siendo su última información publicada al año 2018, obteniendo un acumulado para el departamento de Madre de Dios de 186 242 ha.

Cabe precisar que la información que genera el PNCB, no identifica la causa de la deforestación, no logrando así identificar la deforestación causada por la actividad minera (mucho menos discriminar la actividad minera ilegal e informal), otro punto importante a mencionar es que sus datos son publicados después de un año a más después de haber ocurrido la deforestación, no permitiendo así efectuar acciones reactivas o preventivas en el corto plazo, conociendo que la actividad minera aluvial avanza rápidamente en la Amazonía.

MINAM (2017), a través de la Dirección General de Ordenamiento Territorial Ambiental (DGOTA), contaba con un sistema de monitoreo de la degradación por actividad minera que se describe a continuación:

Este sistema de monitoreo, identificaba la degradación de la tierra producto de la actividad minera, el cual fue implementado y operó los años 2016 y 2017, y se denominó Sistema de Detección Temprana y Vigilancia Ambiental (SIDETEVA), el cual, a través de una metodología de análisis de imágenes satelitales (usando imágenes comerciales y gratuitas) generaba información de áreas afectadas por minería en Ica, Puno y Madre de Dios.

Sin embargo, para la generación de su información requería un alto costo debido al uso imágenes satelitales comerciales (que era complementada con imágenes gratuitas), así como

del uso de software comercial; en el caso de sus reportes eran publicados con un año a más de retraso después de ocurrido la degradación. Estos fueron alguna de las razones que no le permitieron a este sistema ser sostenible.

MINAM (2018), a través de la DGOTA cuenta con un sistema de monitoreo de la degradación para el Perú, el cual se muestra a continuación:

Muestra una experiencia de monitoreo de las áreas degradadas en ecosistemas terrestres a nivel nacional, considerando como indicadores al cambio de la cobertura de la tierra y la productividad primaria neta, indicadores establecidos por las Naciones Unidas para la lucha contra la desertificación y degradación de las tierras, esto ha permitido generar para el Perú el primer mapa de áreas degradadas al año 2018 que se encuentra publicada en su plataforma web denominado Geoservidor.

Es preciso mencionar que esta información al año 2020 no ha sido actualizada (no hay publicación de la degradación ocurrida en el año 2019 y 2020), y los datos que se genera no identifica cuál ha sido la causa u origen que ha provocado esta degradación.

Asner (2017), como una experiencia por parte del sector privado aplicado al Perú, muestra lo siguiente:

Desarrolló un estudio en el departamento de Madre de Dios, donde utilizó los sensores remotos de alta resolución espacial para evaluar los cambios anuales en la minería del oro de 1999 a 2016 en todo el departamento, incluyendo la Reserva Nacional de Tambopata y su zona de amortiguamiento. A nivel regional, las pérdidas relacionadas con la minería aurífera de bosque promediaron 4 437.00 ha año. (p. 1)

Cabe precisar que este estudio utilizó imágenes satelitales gratuitas y comerciales (alto costo), generando información solo al año 2016; sin embargo, esta información generalizó los

datos y no determinó de manera clara qué superficie correspondían a otros usos como la agricultura o áreas urbanas, y mucho menos logró discriminar la superficie degradada por minería ilegal de la informal. Estos datos fueron generados con el procesamiento de un software comercial “Claslite”.

El Monitoring of the Andean Amazon Project ([MAAP], (s.f.), en colaboración con Conservación Amazónica (ACCA), muestra la siguiente experiencia del sector privado:

Esta iniciativa viene generando y publicando información en ámbitos focalizados sobre el proceso de deforestación presentes en diferentes partes de la amazonía peruana; asimismo, genera información de actividad minera que se presenta en el departamento de Madre de Dios para ámbitos focalizados, utilizando para ello como insumos imágenes satelitales comerciales (alto costo) y gratuitas.

Se puede mencionar que este sistema no cuenta con un monitoreo temporal definido, por lo tanto, no garantiza la provisión de información con una continuidad para la gestión reactiva y prospectiva, además que solo genera información en ámbitos focalizados, no permitiendo una toma de decisión e intervención que permita actuar en conjunto y de manera integral para combatir esta problemática.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo general*

Elaborar un modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales que permita identificar de manera oportuna el incremento de la superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero en el departamento de Madre de Dios.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Identificar las plataformas de datos abiertos de series temporales de imágenes

satelitales, que permiten generar oportunamente información de superficie de pérdida de la cobertura vegetal en la amazonía peruana.

- Elaborar una arquitectura metodológica de análisis de series temporales de imágenes satelitales que permita identificar de manera oportuna el incremento de la superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero del departamento de Madre de Dios.

1.4. Justificación

Debido al incremento progresivo en las últimas décadas de la degradación de los ecosistemas amazónicos en el Perú, producto de la actividad minera aluvial aurífera, y siendo el departamento de Madre de Dios el más afectado; se hace necesario contar con información del incremento de la degradación por actividad minera para este ámbito, que sea información continua, de calidad y en tiempo casi real; y conocer cómo se ha desplazado espacialmente en los ecosistemas amazónicos, en ámbitos de las comunidades nativas, en las ANP y sus zonas de amortiguamiento, a fin de que se puedan tomar acciones desde el sector público o privado para combatir esta problemática.

Es por ello que se hace pertinente y necesario, que a partir de mi experiencia en el uso de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica y de Teledetección para monitorear los fenómenos presentes en el territorio, se proponga a partir del presente trabajo de investigación, el modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales y de cartografía temática, que permita monitorear e identificar la superficie degradada causadas por la actividad minera ilegal e informal, de manera continua, en tiempo casi real, y con información de calidad, haciendo uso para ello de las plataformas de datos abiertos de imágenes satelitales y de softwares no comerciales; pudiendo a su vez ser replicado este modelo en otros departamentos amazónicos que presenten esta problemática.

Cabe resaltar, que la información que se genera con el presente modelo es de vital

importancia, ya que contribuiría al cierre de la brecha de información referidos a degradación de ecosistemas del departamento de Madre de Dios, proporcionando información estadística y georreferenciada de manera continua, de calidad y en tiempo casi real, para que los tomadores de decisiones de las instituciones públicas y privadas, cada una dentro de sus funciones y competencias, puedan tomar acciones que permitan controlar y disminuir del proceso de degradación de los ecosistemas, a través de la fiscalización, evaluación, sanción y recuperación de las áreas degradadas y, de protección y conservación de los bosques.

1.5. Hipótesis

Hipótesis general

La aplicación de un modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales permite identificar de manera oportuna el incremento de la superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero del departamento de Madre de Dios.

Hipótesis específica

- El uso de plataformas de datos abiertos de series temporales de imágenes satelitales, permite generar oportunamente información de superficie de pérdida de la cobertura vegetal en la Amazonía peruana.
- La aplicación de una arquitectura metodológica de análisis de series temporales de imágenes satelitales permite identificar de manera oportuna el incremento de la superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero del departamento de Madre de Dios.

II. Marco teórico

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. *Teoría del desarrollo sostenible*

En el libro titulado “De las teorías del desarrollo al desarrollo sustentable – Historia de la construcción de un enfoque multidisciplinario”, describe el desarrollo sustentable como:

La aparición del desarrollo sustentable en el campo discursivo de las teorías del desarrollo ha representado un cambio cualitativo en la cadena de significación que articula el crecimiento económico, la equidad social y la conservación ecológica. Sin embargo, a partir de las críticas de los movimientos ambientalistas a los resultados de los proyectos de desarrollo que se ponían en marcha principalmente en relación a sus impactos en la integridad de los ecosistemas y en la pérdida de calidad de vida de la población. la trayectoria del desarrollo sustentable ha sido recurrentemente estudiada, aunque sin reconstruir apropiadamente los procesos de cambio conceptual y político que moldearon su aparición.

Desde su inicio, las teorías del desarrollo delimitaron como campo de conocimiento el estudio de las transformaciones de las estructuras económicas de las sociedades en el mediano y largo plazos, así como de las restricciones específicas que bloquean dichos cambios estructurales en las sociedades tradicionales, denominadas también: países subdesarrollados, dependientes, periféricos o emergentes, entre otras acepciones. (Gutierrez, 2007, p. 45)

Para alcanzar el desarrollo sostenible, se debe tener una política adecuada, que pueda incorporar nuevas tecnologías y la mejora continua del capital humano, que pueda conseguir la protección del medio ambiente, en términos de crecimiento y empleo. De igual manera, la protección del medio ambiente, es un argumento, para potenciar, los procesos de liberación y

el incremento de la competencia, en los mercados de productos y de capitales, así como, la flexibilización del mercado de trabajo, para que las próximas generaciones, vivan en un mundo de continuo crecimiento, cuyo desarrollo económico, se dé en un ambiente intacto, con calidad de vida.

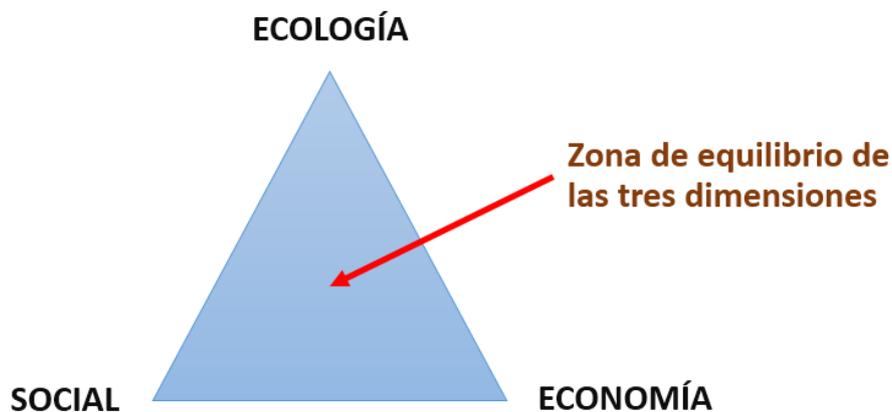
Artaraz (2002), menciona respecto a las dimensiones del desarrollo sostenible lo siguiente:

En el Consejo Europeo de Gotemburgo de 2001 su presidenta Nicole Fontaine recalca "la voluntad de la Unión Europea a favor de un desarrollo sostenible, cuyas tres dimensiones, la económica, la social y la medioambiental, son indisociables". Siendo este una de las interpretaciones de desarrollo sostenible que coinciden que, para llegar a ello, las políticas y acciones para lograr el crecimiento económico deberán respetar el medio ambiente y además ser socialmente equitativas para alcanzar el crecimiento económico.

Figura

1

Las tres dimensiones del concepto de sostenibilidad



Nota. Adaptado de Artaraz (2002)

A fin de trabajar y tomar acciones enfocados en el desarrollo sostenible, las Naciones Unidas en el año 2015 estableció los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), orientados al año 2030, como ayuda a evaluar el punto de partida de los países de la región y a analizar y formular los medios para alcanzar esta nueva visión del desarrollo sostenible, que se expresó de manera colectiva y quedó plasmada en la Agenda 2030. Los ODS son también una herramienta que brinda los lineamientos para la planificación de los países, tanto a nivel nacional como local. Con su visión a largo plazo, constituirán un apoyo para cada país en su senda hacia un desarrollo sostenido, inclusivo y en armonía con el medio ambiente, a través de políticas públicas e instrumentos de presupuesto, monitoreo y evaluación.

2.1.2. Enfoque de neutralidad de degradación de la tierra

En septiembre del 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó la “agenda 2030 para el desarrollo sostenible”, en la que se incluyeron 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y 169 metas. El ODS 15 insta a los países a proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar los bosques de forma sostenible, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica. La meta 15.3 se centra en “luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo” para 2030. El indicador adoptado para medir los resultados obtenidos en la meta 15.3 del ODS consiste en la “Proporción de tierra degradada en relación a la superficie total de tierra”.

Según Orr (2017), en la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), y en el marco de la Neutralidad de la Degradación de las Tierras (NDT) se logró avanzar según se menciona a continuación:

En octubre de 2015, la NDT fue oficialmente reconocida por la CLD, por

decisión de la decimosegunda sesión de la Conferencia de las Partes (CP 12), que manifestó que “los esfuerzos por alcanzar la meta 15.3 de los ODS permitirán imprimir un fuerte impulso a la aplicación de la CLD, dentro del ámbito de la Convención” y endorsó la definición de la NDT (decisión 3/COP.12, UNCCD, 2015a). En la misma decisión, la CP invitó a los países Parte a que “formularan metas voluntarias para alcanzar la NDT, de manera acorde con sus circunstancias nacionales específicas y sus prioridades en materia de desarrollo” y a que integraran tales objetivos en sus Programas de Acción Nacional (PAN), un los órganos de la Convención que “elaboraran orientaciones para la formulación de metas e iniciativas nacionales de NDT”; en concreto, las Partes solicitaron a la Interfaz Ciencia-Política (ICP) que “impartiera orientación científica para llevar a la práctica la meta voluntaria de la NDT”. Este informe responde a este requerimiento, aportando un marco científico conceptual para apoyar la operacionalización de la NDT.

Como respuesta a esta decisión, se está desarrollando o se prevé que se desarrolle un gran número de iniciativas y proyectos para la NDT. Entre ellos destaca el Mecanismo Mundial (MM) de la CLD quien, en estrecha colaboración con la Secretaría de la CLD y a través de un programa global, está apoyando a países interesados en el proceso de establecimiento de metas nacionales en materia de NDT, incluida la definición de líneas de base, medidas y objetivos nacionales para alcanzar la NDT. (p. 22)

2.1.3. Enfoque de la iniciativa 20x20

La WRI (s.f.), realiza una descripción sobre la deforestación y degradación de los bosques en América Latina y el Caribe de la siguiente manera:

En los últimos años, más del 40 por ciento (650 millones de hectáreas) de los

bosques de América Latina y el Caribe han sido completamente deforestados o degradados. América Latina y el Caribe contienen algunos de los ecosistemas forestales de mayor valor ecológico del mundo, pero en la historia reciente el 20% de las tierras forestales (casi 350 millones de hectáreas) han sido completamente deforestadas y otro 20% (300 millones de hectáreas) gravemente degradado. Los impulsores de este cambio incluyen la agricultura, la infraestructura y la minería a gran y pequeña escala. Como resultado, la mayor parte de las emisiones en la región latinoamericana no se generan a partir de la energía, sino del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura. De las 4,7 GT emitidas por los países de América Latina y el Caribe en 2010, alrededor del 67 por ciento fueron por uso de la tierra y pérdida de bosques. La Iniciativa 20x20 es un esfuerzo liderado por un país que busca cambiar la dinámica de la degradación de la tierra en América Latina y el Caribe mediante la restauración de 20 millones de hectáreas de tierra para 2020, con US \$ 2080 millones de inversión privada. Diecisiete países de América Latina y el Caribe y tres programas regionales se han comprometido a comenzar a restaurar 53,2 millones de hectáreas (o unas 205,400 millas cuadradas, un área aproximadamente del tamaño de Francia) de tierras degradadas para 2020. La iniciativa apoyará la reforestación (natural y asistida), la conservación de los bosques y la deforestación evitada como elementos de un proceso de restauración integral. Consciente de los diversos grados de degradación de la tierra en la región, la iniciativa también apoyará los esfuerzos para recuperar la funcionalidad de la tierra (conservación y recuperación de suelos; almacenamiento de carbono; retención de agua e hidrologías estables; conservación y recuperación de la biodiversidad) a través de la agrosilvicultura,

silvopastolas y otras esquemas de uso de la tierra. Consultado el 20 de setiembre del 2019.

Al ser la iniciativa 20 x 20 multinacional garantiza que los esfuerzos se ajusten a las distintas estrategias nacionales según sus realidades para la restauración de las tierras. Los programas tendrán que adaptarse al contexto social, económico y ecológico de cada zona.

La iniciativa 20 X 20 cuenta con el apoyo del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), del WRI, del CIAT, y de la Unión Internacional para la Conservación de la (UICN). La Iniciativa 20x20 también contribuirán a otros objetivos como es el Desafío de Bonn, cuya meta global es de llevar a 150 millones de hectáreas de tierra degradada a la restauración para el año 2020. La iniciativa 20x20 tiene como ambición la recuperación de un poco más de 20 millones de ha:

- México: 8.5 millones de ha.
- Perú: 3.2 millones de ha.
- Guatemala: 1.2 millón de ha.
- Colombia: 1 millón de ha.
- El Salvador: 1 millón de ha.
- Ecuador: 0.5 millón de ha.
- Chile: 0.1 millón de ha.
- Costa Rica: 50 000.00 ha.
- Programa Regional “Conservación Patagónica”: 4.1 millones de ha.
- Programa Regional “Bosques Modelo”: 1.6 millones de ha.

2.1.4. Sistemas de información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG), es un sistema que se puede considerar de

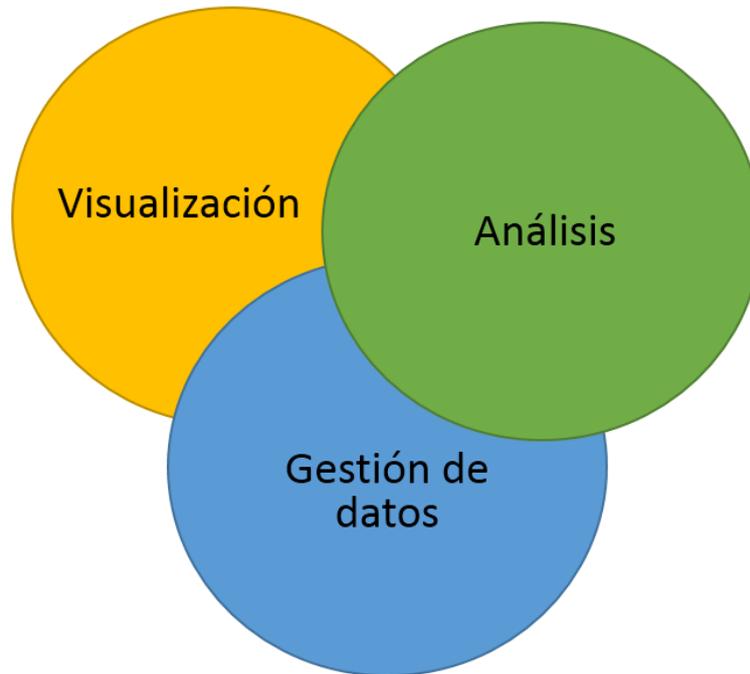
la siguiente manera:

En su concepción actual los SIG son sistemas complejos que integran una serie de distintos elementos interrelacionados. El estudio de todos y cada uno de estos elementos es el fundamento para el estudio global de los SIG, y de ese modo se aborda mostrando las propias características de cada elemento y los conceptos necesarios para entender las relaciones entre ellos. Es habitual citar tres subsistemas fundamentales. (Olaya, 2011)

- Subsistema de datos. Se encarga de las operaciones de entrada y salida de datos, y la gestión de estos dentro del SIG. Permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones en base a ellos. (Olaya, 2011)
- Subsistema de visualización y creación cartográfica. Crea representaciones a partir de los datos (mapas, leyendas, etc.), permitiendo así la interacción con ellos. Entre otras, incorpora también las funcionalidades de edición. (Olaya, 2011)
- Subsistema de análisis. Contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos. (Olaya, 2011)

Figura**2**

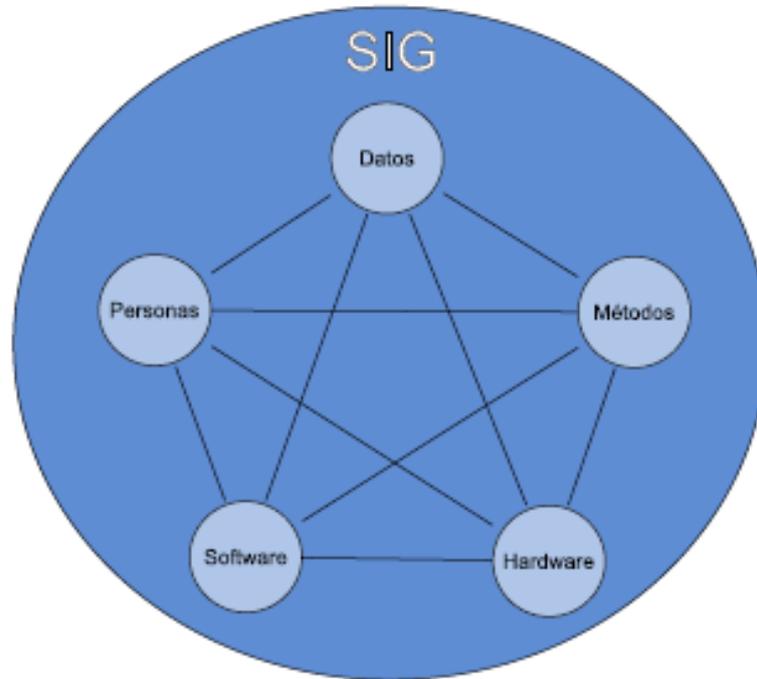
Esquema de un SIG con sus tres subsistemas fundamentales



Nota. Adaptado de Olaya (2011)

Otra forma distinta de ver el sistema SIG es atendiendo a los elementos básicos que lo componen. Cinco son los elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto. (Olaya, 2011, p. 15)

- Datos: los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG.
- Métodos: un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.
- Software: es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- Hardware: el equipo necesario para ejecutar el software.
- Personas: las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG.

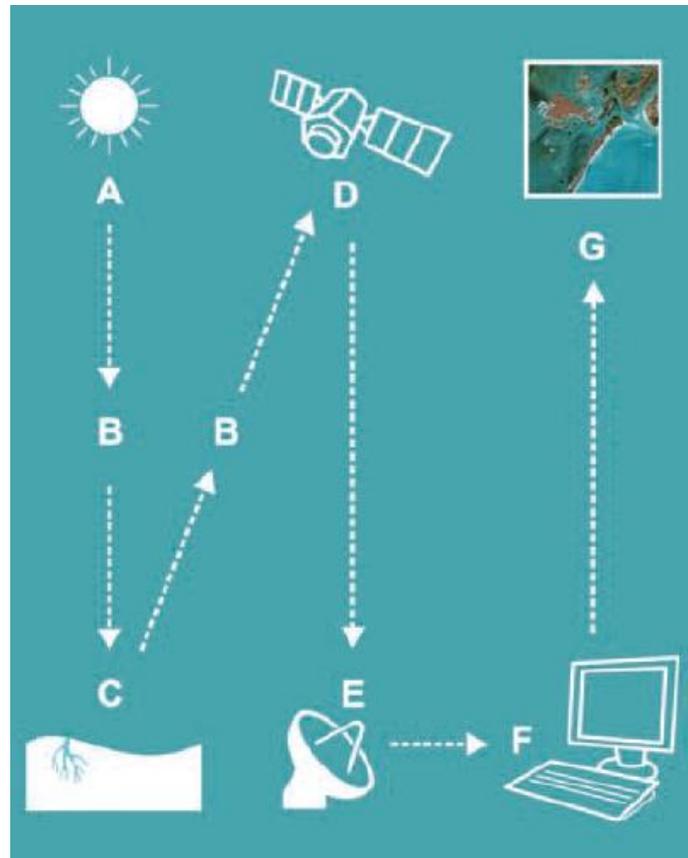
Figura**3***Elementos que forman el sistema SIG**Nota.* Olaya (2011)**2.1.5. La teledetección**

La teledetección espacial es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. (Chuvieco, 1995, p. 27)

A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una determinada aplicación. (Chuvieco, 1995, p. 27)

Asimismo, se manifiestan aquellos elementos del procesos de teledeteccion a continuación:

Los elementos involucrados en un proceso de teledetección desde satélites se muestran en la Figura 4. El primer requerimiento supone disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía al objeto de interés (cultivo, bosque, mar, ciudad, etc.). El caso más habitual consiste en que esa fuente sea el Sol (A). La radiación solar, en su “viaje” hacia la Tierra, atraviesa e interacciona con la atmósfera (B). Una vez alcanza la superficie terrestre interactúa con los objetos que en ella se encuentran. La radiación reflejada dependerá de las características de esos objetos, permitiendo distinguir a unos de otros (C). Un sensor a bordo de un satélite recoge y graba esa radiación reflejada por la superficie terrestre y la propia atmósfera (D). La energía captada por el sensor se transmite a una estación de recepción y procesamiento donde los datos se convierten en imágenes digitales (E). La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca de los objetos que fueron iluminados (F). El paso final del proceso de teledetección consiste en aplicar la información extraída de la imagen para conseguir un mejor conocimiento de la zona de estudio, revelando nuevas informaciones o ayudándonos a resolver un problema particular (G). (Labrador, 2012, p. 12)

Figura**4***Elementos de un proceso de teledetección desde satélites**Nota.* Labrador (2012)**2.1.6. Espectro electromagnético**

A continuación se describe al espectro electromagnético y su comparación respecto a los sensores humanos y sensores remotos.

La radiación electromagnética se presenta como una distribución continua de frecuencias que conocemos con el nombre de espectro electromagnético (EE). Dicho espectro suele estar estructurado en una serie de bandas espectrales donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. No todas las bandas presentan igual interés desde el punto de vista de la teledetección. (García, s.f.)

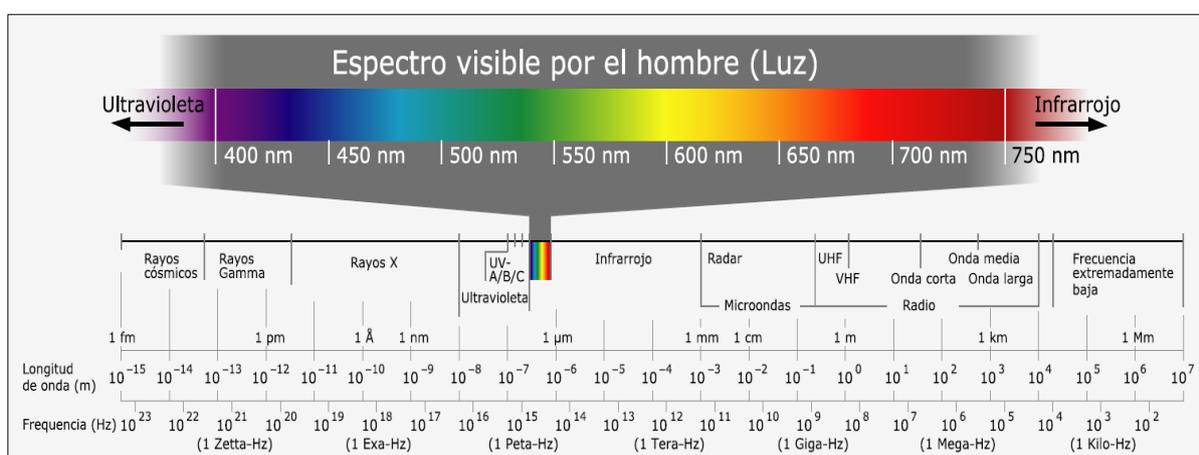
Los ojos de los seres humanos se pueden considerar como sensores remotos ya que detectan la luz reflejada por los objetos de nuestro entorno. Sin embargo, la visión humana sólo es capaz de percibir una pequeña parte del espectro electromagnético, el visible. La luz visible es sólo una de las muchas formas de radiación electromagnética que existen. Así, las ondas de radio, el calor, los rayos ultravioletas o los rayos X son otras formas comunes. En teledetección, lo normal es caracterizar a las ondas electromagnéticas por su longitud de onda en micrómetros (μm , 10 m) o nanómetros (nm, 10 m), es decir, por la posición que ocupan dentro del espectro electromagnético.

De esta forma quedan definidas varias regiones del espectro. Aunque por conveniencia se les asignan diferentes nombres a estas regiones (ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, etc.), no existen divisiones exactas entre unas y otras, se puede observar ello en la Figura 5. Los sensores montados a bordo de los satélites de teledetección son capaces de detectar y grabar radiaciones de las regiones no visibles del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas. (Labrador, 2012, p. 13)

Figura

5

Espectro electromagnético y sus principales regiones de interés



Nota. Olaya (2011)

Respecto a las reflectancias espectrales de la superficie terrestre, se puede mencionar lo siguiente:

La reflectancia espectral es una característica de la superficie terrestre, algo fundamental en teledetección. Se define como la proporción de energía incidente que es reflejada por una superficie. Por lo tanto, es una magnitud adimensional que puede tomar valores entre 0 y 1 ó porcentajes entre 0 y 100%. Para una determinada superficie este parámetro varía en función de la longitud de onda. Al gráfico de la reflectancia espectral frente a la longitud de onda se le denomina curva de reflectancia espectral o firma espectral, ver Figura 6. La configuración de estas curvas permite extraer las características espectrales de una superficie y tiene una gran influencia sobre la elección de la región espectral en la cual los datos de teledetección se deben adquirir para una aplicación particular.

Así, por ejemplo, las curvas de reflectancia espectral para la vegetación casi siempre manifiestan los picos y valles que se muestran en la Figura 6. Los valles en la región del visible vienen dados por los pigmentos en las hojas de las plantas.

La clorofila absorbe energía fuertemente en las bandas centradas en 0.45 y 0.67 μm . Es por ello que nuestros ojos perciben la vegetación sana de color verde, debido a la gran absorción en azul y rojo por las hojas y la reflexión en el verde. Cuando la vegetación no está sana, disminuye la clorofila, y el resultado es un incremento de la reflectancia espectral en el rojo, por lo que las hojas se ven con un tono amarillento (mezcla de verde y rojo). Al llegar al IR próximo la reflectancia de la vegetación sana aumenta drásticamente. La región 0.7-1.3 μm refleja entre el 40 y el 50% de la energía incidente. El resto de la energía es transmitida casi en su totalidad, ya que en esta región la absorción es menor al 5%. La reflectancia de 0.7 a 1.3 μm es función de la estructura interna de las hojas. Como estas son distintas, nos permite diferenciar distintos tipos de

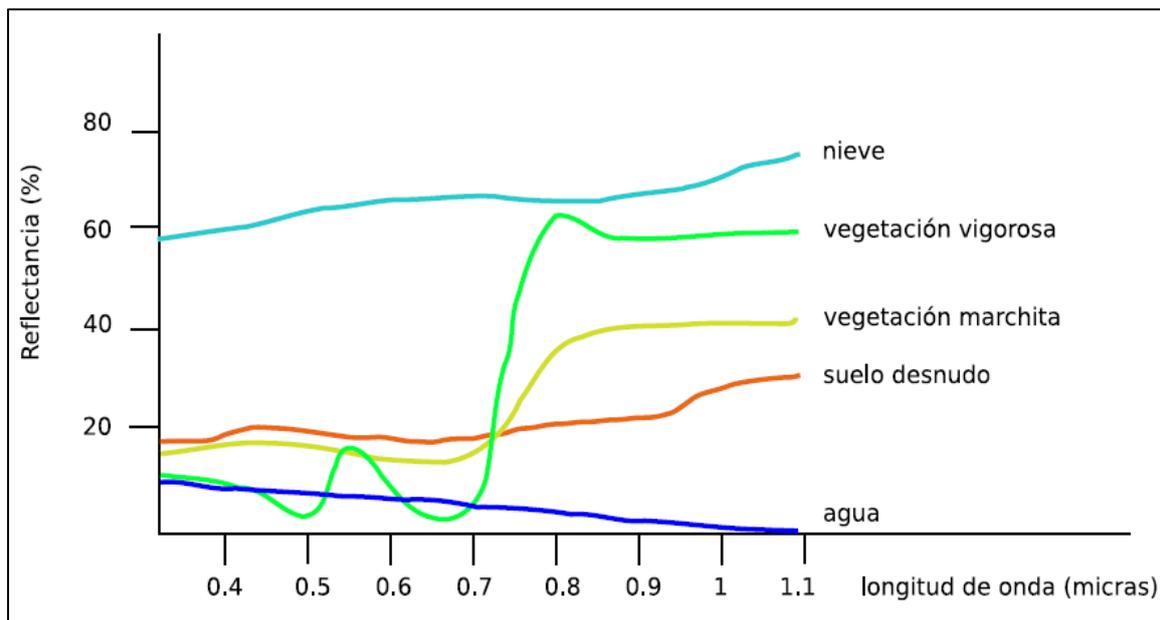
vegetación, aunque en el visible sean muy similares. Más allá de 1.3 μm la reflectancia de las hojas es inversamente proporcional a su contenido de agua total, por lo que esta región del espectro es útil para detectar estrés hídrico en la vegetación.

Los suelos casi no presentan variación en la reflectancia a lo largo de todo el espectro electromagnético, ver Figura 6. Los principales factores que la afectan son: humedad, textura, rugosidad, presencia de óxidos de hierro y materia orgánica. La presencia de humedad hace decrecer la reflectancia, al igual que la rugosidad, la materia orgánica y la presencia de óxidos de hierro, estos últimos principalmente en el visible. (Labrador, 2012, p. 14)

Figura

6

Firmas espectrales tipo de algunos elementos habituales



Nota. Olaya (2011)

Tipos de imágenes de teledetección

Se establece y describe los tipos y características de imágenes satelitales de la siguiente manera:

El tipo de producto más común que suministran los satélites de teledetección es una imagen digital tipo raster, donde cada píxel tiene asignado uno o varios valores numéricos (niveles digitales) que hacen referencia a la energía media recibida dentro de una determinada banda espectral (Labrador, 2012, p. 21), Teniendo esto en cuenta, se pueden adquirir los siguientes tipos de imágenes:

- **Imagen multispectral (MS):** imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Así, por ejemplo, el satélite IKONOS proporciona una imagen multispectral con 4 bandas, que cubren las regiones espectrales correspondientes al azul, verde, rojo e infrarrojo próximo. Cuanto mayor sea el número de bandas que proporciona el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos presentes en la imagen. Aparte de las multispectrales también existen las denominadas imágenes hiperespectrales, menos habituales. Vienen caracterizadas por poseer información en un gran número de bandas. Se requieren para estudios de identificación y clasificación muy precisos, principalmente en mineralogía. A día de hoy provienen de algunos satélites de tipo experimental, como es el caso del sensor HYPERION (220 bandas), a bordo del satélite EO-1, por lo que su disponibilidad es limitada. (Labrador, 2012, p. 21)
- **Imagen pancromática (PAN):** dispone de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises

(imagen en blanco y negro). Como contrapartida, tienen la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multiespectrales que proporciona el mismo satélite. Es por ello que son muy interesantes para la detección de pequeños elementos de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multiespectral. En aquellos satélites donde existe la posibilidad de obtener imágenes multiespectrales y pancromáticas de forma simultánea es habitual la opción de suministrar, bajo pedido, ambas imágenes en lo que se conoce como opción Bundle. (Labrador, 2012, p. 21)

- **Imagen fusionada (PS).** Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión de una imagen multiespectral con una pancromática. Las siglas PS provienen de pan-sharpened, su denominación en inglés. Básicamente, consiste en asignar a cada píxel de la imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multiespectral. El resultado final es una imagen multiespectral con la resolución espacial de la pancromática. El inconveniente de este tipo de imágenes es que se modifica la información espectral original captada por los sensores a través de los algoritmos usados, por lo que se suelen utilizar únicamente como herramientas de interpretación visual y no para análisis espectral. Esta fusión se encuentra dentro de la oferta de los distribuidores oficiales de los satélites capaces de obtener una imagen multiespectral y pancromática. Dicha fusión, con el software adecuado, puede ser realizada por los usuarios. (Labrador, 2012, p. 21)
- **Imagen estéreo:** en realidad, se refiere a dos imágenes de una misma zona tomadas con ángulos de visión distintos. Muchos satélites tienen la capacidad de reorientar el sensor, lo que les permite tomar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de

imágenes. Se suelen emplear para generar modelos de elevación del terreno. (Labrador, 2012, p. 21)

Satélite Landsat

El programa Landsat, está dirigido por la NASA y el USGS de Estados Unidos, el cual ha lanzado al espacio un conjunto de satélites que contienen sensores que permiten obtener información de la superficie de la tierra, siendo el primer satélite Landsat 1, lanzado al espacio en el año 1972, permitiendo así obtener una nueva percepción del planeta, y conocer su evolución histórica.

Respecto al programa Landsat y sus imágenes satelitales, se puede mencionar y describir lo siguiente:

- **Características orbitales:** los primeros tres satélites de la serie tenían unas características similares. El peso total del sistema se aproximaba a los 960 Kg. Su órbita era heliosíncrona, esto es que pasa por el mismo lugar a la misma hora, polar, ligeramente inclinada (99.1 grados). Con una altura orbital media de 917 Km, circundaba la tierra cada 103 minutos, con lo que realizaba 14 órbitas diarias para volver sobre la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días, y a la misma hora local (entre 9:30 y las 10:30 según latitudes). Con el fin de reducir al máximo las alteraciones en las condiciones de observación se dotó a los satélites de un sistema de estabilización según tres ejes, orientados hacia la superficie terrestre y la vertical del punto nadir. Las correcciones en la órbita, por tanto, se hacían desde las estaciones terrestres, lo que confería una gran estabilidad en la toma de datos. (García, s.f.)
- **Instrumentos de observación:** en lo que a equipamiento se refiere el programa Landsat puede ser estructurado en 3 generaciones. Una primera fase constituida por los Landsat 1, 2 y 3 cuyo equipamiento estaba formado por un explorador de barrido

multiespectral MSS (Multispectral Scanner) y un conjunto de tres cámaras vidicon RBV (Return Beam Vidicon). Los satélites de la segunda generación Landsat 4 y 5 mantienen el sensor MSS para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor denominado TM (Thematic Mapper) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. Con el lanzamiento del Landsat 7 (ya que el 6 no llegó a funcionar) se entra en una versión mejorada de la segunda generación con la incorporación de una versión actualizada del TM denominado ETM (Enhanced Thematic Mapper). (García, s.f.)

Para el caso de Landsat 8, contiene dos sensores, el Operacional de Imágenes de Tierra (OLI), formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas, y el Sensor Infrarrojos Térmico (TIRS) que está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la tierra.

2.1.7. Índice normalizado diferencial de vegetación (NDVI)

El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres. Aplicado a las comunidades de plantas, el índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de -1 a +1. (FAO, 2012, p. 40)

La fórmula para la obtención de este índice es fácil de aplicar usando las bandas R y NIR, y donde la escala de valores obtenidos va del -1 al 1 con el valor cero representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación, y los valores negativos representan superficie sin vegetación. La fórmula para el cálculo: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$

2.1.8. Contexto de la pérdida y cambios en la cobertura vegetal en el territorio peruano

En el mundo ante el cambio que viene presentando las diferentes coberturas de la tierra en especial la cobertura vegetal, diferentes entidades y organizaciones internacionales vienen monitoreando y generando información a escalas regionales y nacionales sobre la deforestación, perturbación, degradación y cambios que viene presentando la cobertura vegetal, esto a fin que las diferentes entidades nacionales puedan gestionar su territorio a fin de minimizar el impacto que en ellos se presentan, y usando a la vez esta información como insumo para la serie de investigaciones que aporten a la minimización de los impactos en los ecosistemas.

Es así que, en el Perú una de las actividades que vienen impactando en los ecosistemas es la minería, que en las dos últimas décadas se ha ido intensificando por la demanda de metales en el mercado internacional, siendo el caso del departamento de Madre de Dios el más resaltante por sus constantes denuncias en los medios de comunicación, donde podemos apreciar los daños irreparables provocados por la minería aurífera aluvial sobre los recursos forestales, cuerpos de agua, pantanos, suelo y salud de las personas. Siendo una de las herramientas capaces de detectar en cierto grado estos cambios en el ecosistema los SIG y la teledetección utilizando para ello las imágenes satélites.

Tenemos a diferentes instituciones como el WRI, quien estableció el Global Forest Watch, como una plataforma en línea que proporciona datos y herramientas para el monitoreo de bosques. Mediante el aprovechamiento de tecnología de punta, permitiendo a cualquier persona acceder a información en tiempo casi real sobre dónde y cómo los bosques están cambiando en todo el mundo. (Global Forest Watch, s.f.)

La institución norteamericana Stanford que a través de Carnegie, entidad sin fines de lucro que investiga sobre la pérdida de bosques a nivel mundial (deforestación), brindó así a la comunidad mundial una herramienta de análisis de datos espaciales que nos permite generar información de deforestación y perturbación que viene presentando los bosque tropicales a

nivel mundial, siendo el Perú uno de los países que viene aplicándose esta metodología por diferentes entidades y centros de investigación. (Stanford, s.f.)

Otra institución internacional es el Centro de Investigación de la Amazonía Tropical (CIAT) de Colombia, quien viene generando información de los cambios por pérdida de la cobertura vegetal que viene presentando los bosques tropicales, siendo Perú uno de ellos, estos cambios de la cobertura corresponden a diferentes causas, siendo uno de ellos la minería ilegal e informal, siendo esta información generada a nivel nacional y encontrándose a una escala muy gruesa. (Terra-i, s.f.)

Minería ilegal y minería informal

En el Decreto Legislativo N° 1105 del Perú, que establece disposiciones para el proceso de formalización de las actividades de pequeña minería y minería artesanal menciona lo siguiente:

Minería ilegal: actividad minera ejercida por persona, natural o jurídica, o grupo de personas organizadas para ejercer dicha actividad, usando equipo y maquinaria que no corresponde a las características de la actividad minera que desarrolla (Pequeño Productor Minero o Productor Minero Artesanal) o sin cumplir con las exigencias de las normas de carácter administrativo, técnico, social y medioambiental que rigen dichas actividades, o que se realiza en zonas en las que esté prohibido su ejercicio. Sin perjuicio de lo anterior, toda actividad minera ejercida en zonas en las que esté prohibido el ejercicio de actividad minera, se considera ilegal.

Minería informal: actividad minera que es realizada usando equipo y maquinaria que no corresponde a las características de la actividad minera que desarrolla (Pequeño Productor Minero o Productor Minero Artesanal) o sin cumplir con las exigencias de las normas de carácter administrativo, técnico,

social y medioambiental que rigen dichas actividades, en zonas no prohibidas para la actividad minera y por persona, natural o jurídica, o grupo de personas organizadas para ejercer dicha actividad que hayan iniciado un proceso de formalización conforme se establece en el presente dispositivo.

(Poder Ejecutivo, 2012)

2.1.9. *Lenguaje de programación R*

R es un lenguaje y entorno para computación estadística y gráficos. Es un proyecto GNU que es similar al lenguaje S y al entorno que fue desarrollado en los Laboratorios Bell (anteriormente AT&T, ahora Lucent Technologies) por John Chambers y sus colegas.

R proporciona una amplia variedad de técnicas estadísticas (modelos lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series de tiempo, clasificación, agrupamiento) y gráficos, y es altamente extensible. R es un lenguaje de programación de código abierto.

Una de las fortalezas de R es la facilidad con la que se pueden producir trazados bien diseñados con calidad de publicación, incluidos símbolos matemáticos y fórmulas cuando sea necesario. Se ha tenido mucho cuidado con los valores predeterminados para las elecciones de diseño menores en gráficos, pero el usuario conserva el control total.

R está disponible como Software libre bajo los términos de la Licencia pública general GNU de la Free Software Foundation en forma de código fuente. Compila y se ejecuta en una amplia variedad de plataformas UNIX y sistemas similares (incluidos FreeBSD y Linux) y Windows.

III.Método

3.1. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación, de acuerdo a la problemática planteada y a los objetivos del estudio, el tipo de investigación es aplicada.

3.1.1.*Enfoque de la investigación*

El enfoque empleado para el presente trabajo de investigación es el cuantitativo, ya que engloba un conjunto de procesos a seguir de manera secuencial, permitiendo dentro de ello la recolección de datos con base en la medición numérica y el análisis estadístico.

3.1.2.*Diseño de la investigación*

El diseño de la investigación es el no experimental. Ya que no se manipula deliberadamente variables; es decir se trata de un estudio en los que no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre la variable dependiente. Alineados a este diseño, se observa cómo se desarrolla el fenómeno en su contexto natural.

3.1.3.*Tipo de diseño*

Al ser un diseño no experimental, el presente trabajo de investigación se encuentra en el tipo Longitudinal, ya que recolecta datos en diferentes momentos en el tiempo, para conocer el fenómeno, su comportamiento e inferir acerca de su evolución y distribución.

3.2. **Ámbito temporal y espacial**

3.2.1.*Ámbito temporal*

Periodo de análisis de imágenes satelitales están comprendidos del año 2000 al 2020, para identificar las áreas degradadas por minería ilegal e informal al año 2020.

3.2.2.*Ámbito espacial*

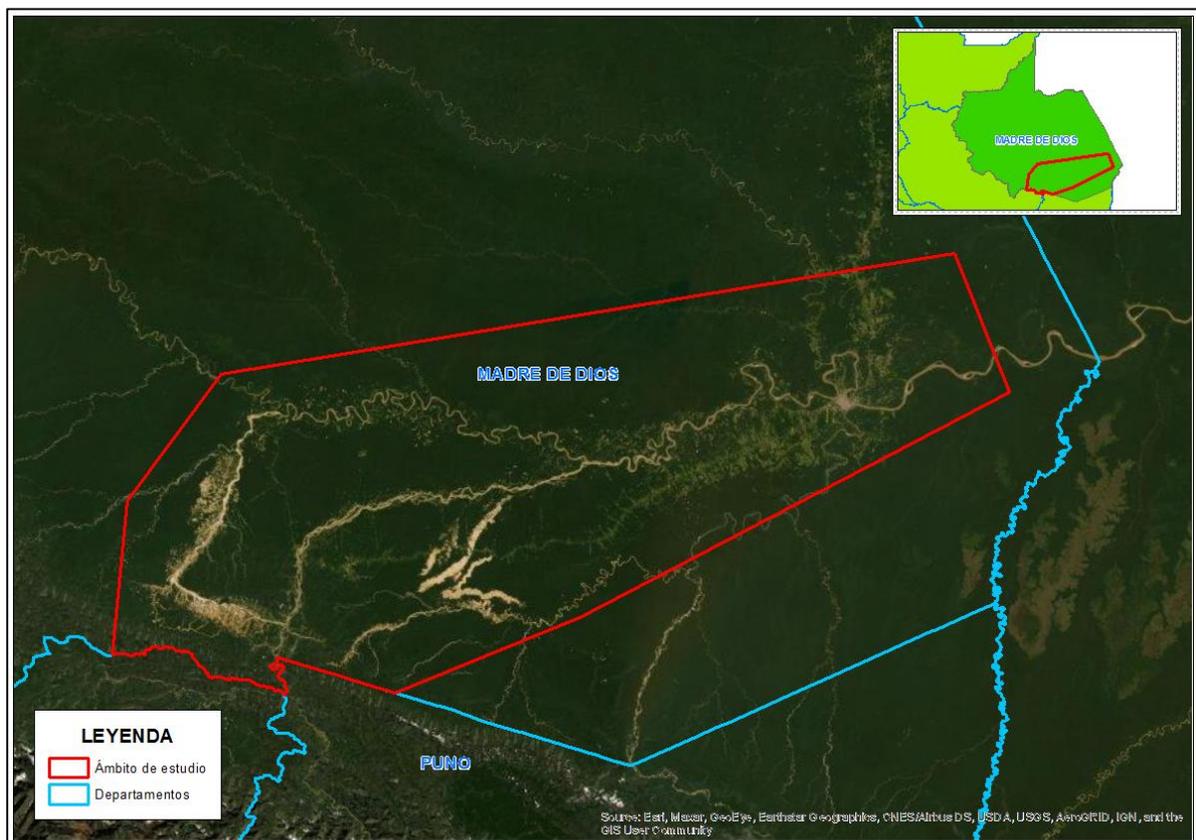
Ámbito que cubre el corredor minero y tiene una superficie de 1 226 419.74 ha. Este ámbito está ubicado en el departamento de Madre de Dios, y como se puede observar en la Figura 7, está representado por el polígono de color rojo, y, tiene como límites referenciales al

Este a la zona de amortiguamiento de Tambopata y la Zona 2 del Bosque de Producción Permanente, al Oeste a las Comunidades Nativas de Puerto Luz y San José de Karene, y el Área Natural Protegida Amakaeri y su zona de amortiguamiento, al Norte a la Comunidad Nativa Boca Pariamanu y el río Los Amigos, y al Sur al Área Natural Protegida Tambopata, y a los límites del departamento de Cusco y Puno; y que a su vez contiene en su superficie el recorrido de los ríos Inambari y Madre de Dios.

Figura

7

Mapa de ámbito espacial del área de estudio



3.3. Variables

3.3.1. Variable independiente

Imágenes satelitales.

3.3.2. *Variable dependiente*

Superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal.

Tabla

1

Matriz de consistencia

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Variable independiente: Imágenes satelitales.	Imágenes satelitales	Número de imágenes satelitales utilizadas en el modelo.	Ficha de recolección de datos.
		Número de Plataformas de datos abiertos usados para descargar imágenes satelitales.	
Variable dependiente: Superficie degradada por actividad minera ilegal e informal.	Degradación por actividad minera. Ley general de minería. Concesiones mineras	Hectáreas de superficie degradada por actividad minera. Hectáreas de superficie degradada por tipo de actividad minera. Cantidad de concesiones mineras presentes en el ámbito de estudio. Número de distritos que registran superficie degradada por actividad minera.	Sistemas de información geográfica. Lenguaje de programación R.

3.4. **Población y muestra**

3.4.1. *Población*

El presente trabajo de investigación ha establecido como su población de estudio, un ámbito de análisis que cubre el corredor minero en el departamento de Madre de Dios, el cual contiene una superficie de 1 226 419.74 hectáreas (13 626 886 píxeles monitoreados con imágenes satelitales Landsat, con tamaño de píxel de 30 m); que cubre parte de la provincia de Manu con sus distritos de Huepetuhe e Inambari, y la provincia de Tambopata con sus distritos de Laberinto, Las Piedras, Madre de Dios y Tambopata.

3.4.2. *Muestra*

La muestra está representada con una superficie de 8.64 ha, el cual ha sido estimada a partir de los 96 píxeles ráster de las imágenes Landsat (imágenes con tamaño de píxel de 30 m, y cuya superficie de cada píxel es de 0.09 ha), que han sido seleccionados a partir de la superposición con los 96 puntos de muestreo distribuidos de manera aleatoria en el área de estudio; estos puntos de muestreos han sido estimados en el proceso de evaluación de la exactitud temática del mapa de áreas degradadas por actividad minera ilegal e informal, generadas para el área de estudio en Madre de Dios (el desarrollo completo se puede ver en el paso 6 del ítem IV), evaluación alineado a las recomendaciones de buenas prácticas que propone Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), para estimar áreas y evaluar la precisión de cambios en la tierra.

3.5. **Instrumentos y materiales**

3.5.1. *Instrumentos*

- Software Qgis 2.18.5
- Software de lenguaje de programación R.

3.5.2. *Materiales*

Los materiales utilizados para el presente trabajo de investigación son los siguientes:

- Imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 (del año 2000 a julio 2020).
- Imágenes satelitales Sentinel 2.
- Cartografía digital (shapefile de límites políticos administrativos, ANP y su zona de amortiguamiento, corredor minero, comunidades nativas, ríos, centros poblados).

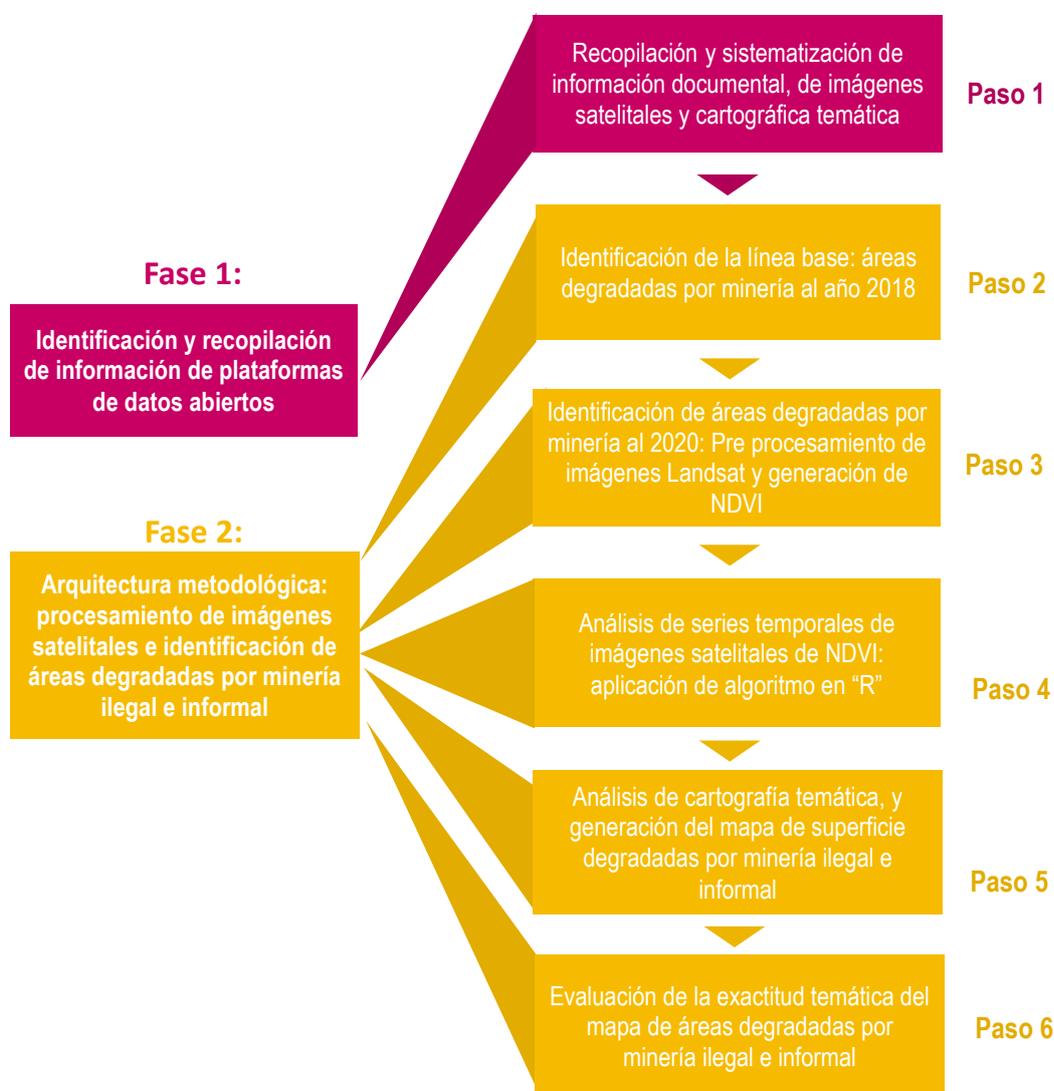
3.6. **Procedimientos**

El modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales, considera para la identificación de superficie degradada producto de la actividad minera ilegal e informal, una serie de procedimientos a seguir, que inicia con la recopilación de información documental y

cartográfica, y cierra como procedimiento final, con la generación del mapa de áreas degradadas por minería ilegal e informal para el ámbito de estudio. Todo el procedimiento a seguir se encuentra estructurada en dos grandes fases, y estos a su vez se distribuyen en seis pasos, que se muestran en la siguiente Figura 8.

Figura 8

Fases y pasos de la metodología de análisis de series temporales



3.6.1. Presupuesto

Para el monitoreo e identificación de áreas degradadas por actividad minera ilegal e informal, se hace necesario para el procesamiento y generación de información, un tiempo efectivo estimado de 5 días, que se inicia con la descarga de imágenes satelitales gratuitas hasta la identificación y generación de información estadística. A continuación, en la Tabla 2, se muestra el tiempo y costo estimado.

Tabla 2

Costo estimado para la generación de información de áreas degradadas

Insumos	Costo x día (S/.)	Días laborados	Costo total (S/.)
Profesional (mano de obra)	133.33	5	666.65
Laptop	2.19	5	10.95
Energía eléctrica (laptop y foco)	2.94	5	14.70
Agua de baños y servicios	-	-	5.40
Imágenes satelitales	-	-	-
Software: Qgis y lenguaje de programación R	-	-	-
Cartografía temática oficial	-	-	-
Gasto total			697.70

Nota. El valor de depreciación de laptop por día, se establecido para un tiempo de vida de 4 años y un costo de laptop de S/. 3,000.00. Para el costo de energía eléctrica, se ha considerado la aplicación de calculadora de consumo de luz, del organismo supervisor de la inversión en energía y minería.

El costo total estimado para identificar las áreas degradadas por actividad minera ilegal e informal para el ámbito de monitoreo en el departamento de Madre de Dios, es de S/. 697.70. Es necesario precisar, que por la disponibilidad de imágenes satelitales Landsat con porcentaje de nubes menores al 50 %, se podría actualizar la identificación de áreas degradadas en periodos aproximados de 3 meses.

El uso de imágenes satelitales gratuitas con este Modelo, permite ahorrar un costo aproximado 153,300.00 dólares para cada fecha que se desea actualizar; ya que el uso de imágenes satelitales comerciales con una resolución espacial alta (0.50 metro – 1.00 metro),

tiene un costo aproximado en el mercado de 12 dólares por km²; y este multiplicado por el área de monitoreo establecido para el departamento de Madre de Dios de 12 264.19 km², permitiría ahorrar el monto en mención.

3.7. Análisis de datos

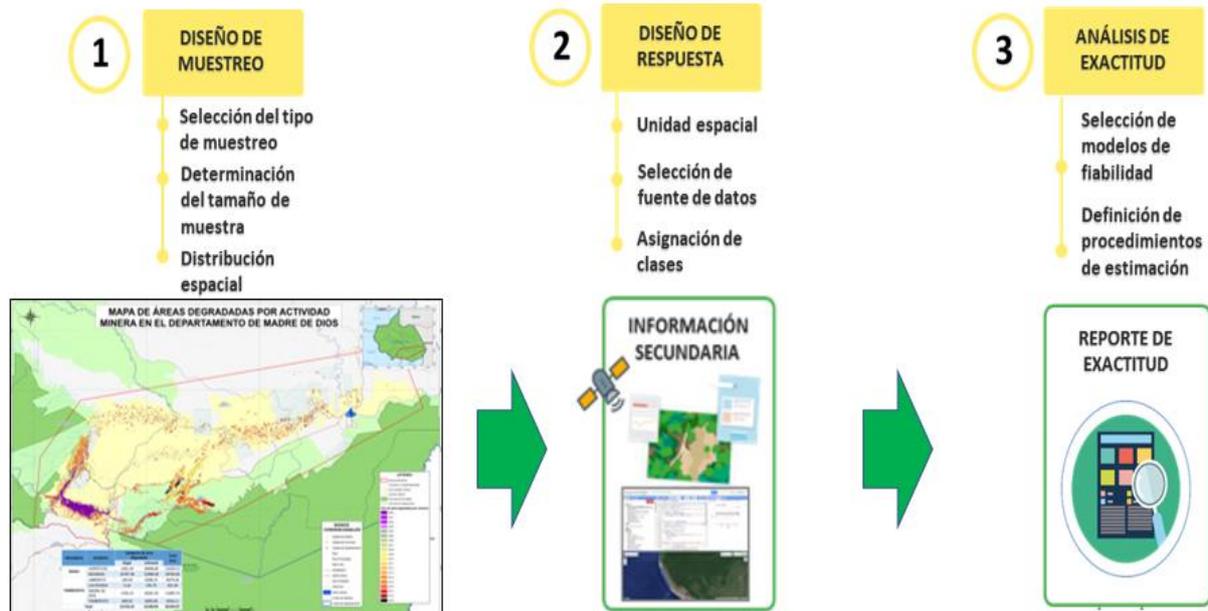
Para el análisis de los datos de superficie degradada por actividad minera ilegal e informal generadas para el ámbito de estudio, se ha considerado evaluar la exactitud temática de la información cartográfica, esto, siguiendo las buenas prácticas para estimar áreas y evaluar la precisión de cambios en la tierra, el cual ofrece un conjunto de recomendaciones de “buenas prácticas” para diseñar e implementar una evaluación de precisión de un mapa de cambios y estimar el área basada en la referencia de la muestra. Esto aborda tres componentes principales, el diseño de muestreo, el diseño de respuesta y análisis de respuesta. (Olofsson *et al.*, 2014)

El procedimiento completo para evaluar la exactitud temática se desarrolla en el paso 6 del ítem IV de resultados.

Figura

9

Flujo del proceso de evaluación de exactitud temática

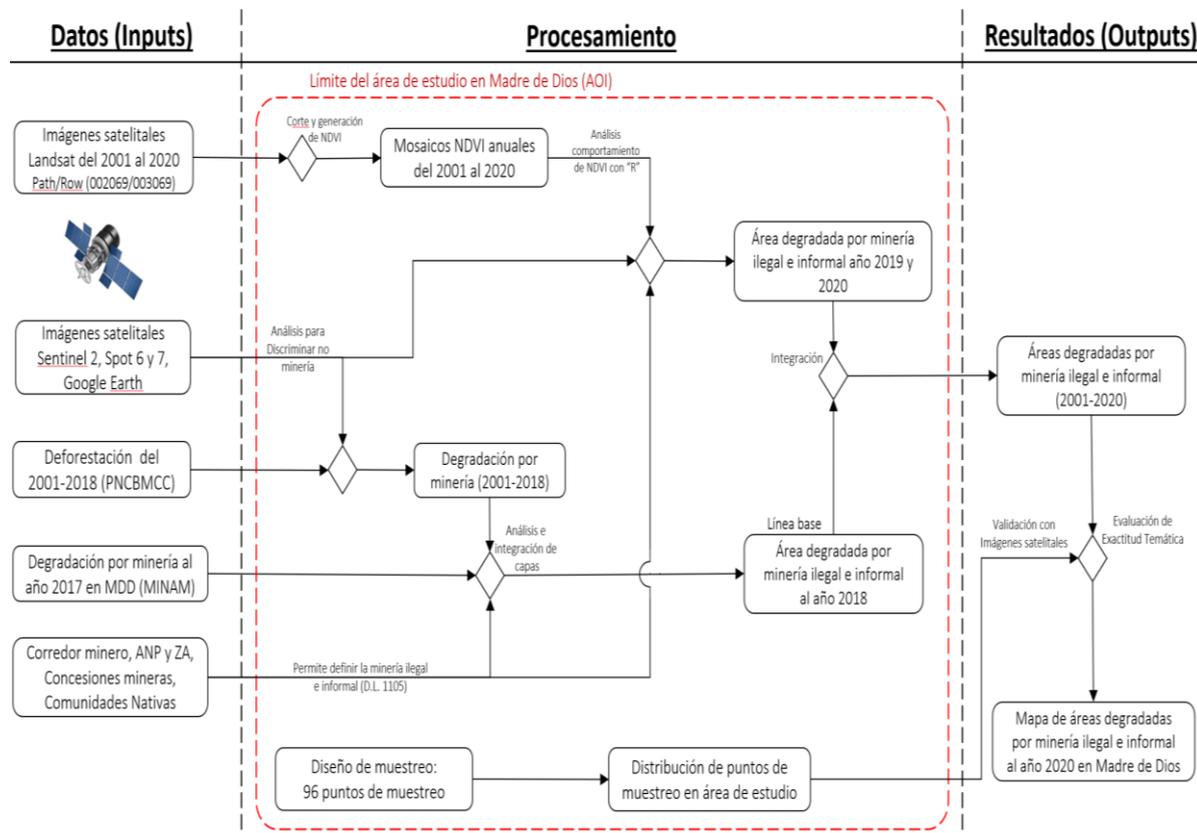


IV. Resultados

El presente modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales, ha considerado dentro de sus procedimientos, dos fases y seis pasos a seguir, como se puede observar en la Figura 8, que se desarrollan en el presente apartado. Asimismo, el flujo de todo el proceso que sigue el modelo propuesto, se muestra en la siguiente Figura 10, el cual permite identificar las áreas degradadas producto de la actividad minera ilegal e informal en el ámbito del corredor minero del departamento de Madre de Dios.

Figura 10

Flujo de proceso de modelo para la identificación de áreas degradadas por actividad minera



A continuación, se desarrolla cada fase y paso, con la aplicación del modelo para en el ámbito

de estudio.

4.1. Fase 1: identificación y recopilación de información de plataformas de datos abiertos

Esta fase inicial consideró la búsqueda, recopilación, adecuación y sistematización de toda la información documental y cartográfica disponible de diferentes plataformas de datos abiertos, que haya sido generada por instituciones públicas y privadas, nacionales e internacionales (publicaciones científicas, estudios, información vectorial y ráster de diferentes temáticas, entre otros), y que han permitido el desarrollo de la presente metodología a través de las diferentes fases y pasos.

Paso 1: recopilación y sistematización de información documental, de imágenes satelitales y cartográfica temática

El desarrollo de este paso comprendió lo siguiente:

Identificación y recopilación de imágenes satelitales, cartografía temática e información documental relacionada a coberturas, cambios en la cobertura de la tierra (asociada a pérdida de cobertura vegetal y/o áreas degradadas), capas temáticas (límites políticos administrativos, ANP, Comunidades Nativas, otros), derechos de usos (concesiones mineras y concesiones forestales), identificación de plataformas y sus procedimientos para la descarga de imágenes satelitales de libre acceso (Landsat y Sentinel 2), acceso a imágenes satelitales de alta resolución espacial Spot 6, y documentación para la generación de NDVI, de métodos de análisis de series temporales haciendo uso del lenguaje de programación R, y de evaluación de la exactitud temática de mapas de cambios en la cobertura de la tierra.

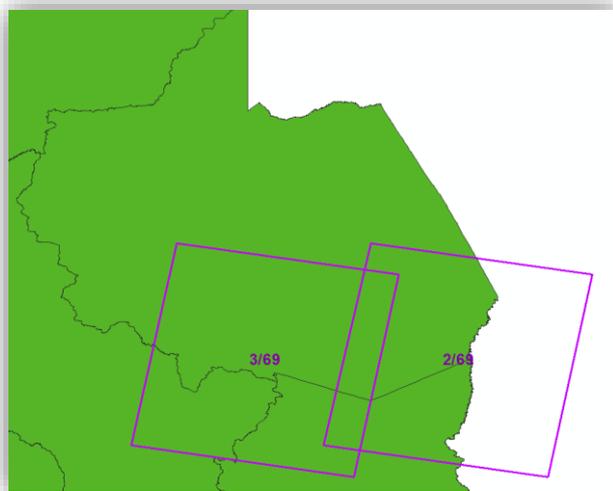
Las informaciones cartográficas recopiladas son:

- Cartografía de deforestación al año 2018 (PNCB-MINAM).
- Cambios en la cobertura de la tierra por pérdida de la cobertura vegetal (Terra-i, MINAM).
- Concesiones mineras.

- ANP y sus zonas de amortiguamiento (SERNANP).
- Comunidades Nativas.
- Corredor minero en Madre de Dios.
- Centros poblados, límites políticos administrativos distrital, provincial, departamental y nacional del Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI).
- Imágenes satelitales Landsat, descargada de la NASA de forma gratuita desde la plataforma de earth explorer (link de descarga: <https://earthexplorer.usgs.gov>); para nuestro caso se ha descargado las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 (tamaño de pixel de 30 m), teniendo para ello en cuenta una serie de criterios mínimos que se describen a continuación: Las imágenes satelitales tienen que corresponder a los Path/Row Landsat 002069 y 003069, que se muestran en la Figura 11, se deben descargar las imágenes 1 por año desde el año 2000 hasta el año 2020 (se descargó a julio) teniendo en cuenta que estas deben de tener un porcentaje de nube menores al 20 %.

Figura**11**

Path/row landsat 002069 y 003069 de la zona de interés

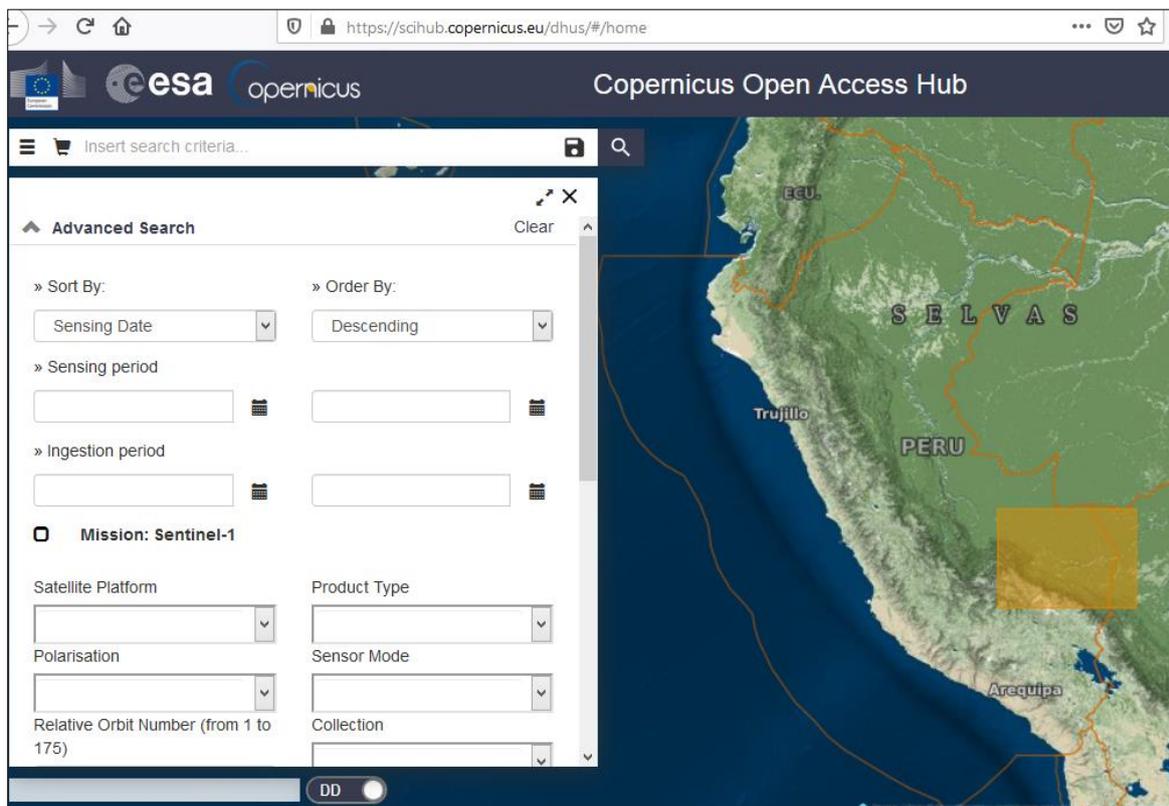


- Imágenes satelitales Sentinel 2 (resolución espacial 10 m) del año 2016 al 2020, descargada de la plataforma de la Agencia Espacial Europea (ESA) proyecto Copernicus, desde donde se han descargado las imágenes para las zonas que cubren el corredor minero de Madre de Dios, el cual se puede observar en la siguiente Figura 12.

Figura

12

Plataforma de descarga de imágenes satelitales Sentinel 2



Nota. Proyecto COPERNICUS – Agencia Espacial Europea

- Imágenes Spot 6 (resolución espacial 1.5 m), imagen solicitada y adquirida de la plataforma del MINAM.

En base a la información recopilada se realizó la revisión, análisis y sistematización, donde se agrupó y gestionó por un lado la información de carácter georeferenciada (datos

cartográficos), y por otro lado la información documental (no georreferenciada que permitió definir conceptualmente la metodología propuesta).

La herramienta utilizada para la gestión de la información geoespacial (cartográfica) fue el Qgis.

4.2. Fase 2: arquitectura metodológica: procesamiento de imágenes satelitales e identificación de áreas degradadas por minería ilegal e informal

Para el presente trabajo de investigación, se ha diseñado una arquitectura metodológica que ha contemplado 04 pasos que han permitido la generación de información de áreas degradadas por minería ilegal e informal para el ámbito de monitoreo en Madre de Dios. A continuación, se describe brevemente cada paso.

Paso 2: identificación de la línea base: áreas degradadas por minería al año 2018

Para esta actividad se utilizó la información cartográfica de deforestación al año 2018, que ha sido generado por el PNCB del MINAM. Para ello se ha realizado el corte de esta información con el límite de nuestra área de estudio, para posteriormente ser analizado con información de apoyo como son las imágenes satelitales Landsat 8, donde se determinó cuáles son las superficie deforestada que correspondía a áreas degradadas por la actividad minera; para ello se analizó el color, la textura, brillo, patrón de desplazamiento, forma, y otros elementos de las imágenes, que permitieron a través del espertís del profesional la discriminación de las áreas degradadas.

Otra información incorporada en este paso, es la recogida de la plataforma de SIDETEVA del MINAM, donde se contaba como última información publicada de áreas degradadas por minería al año 2017; asimismo, se incorporó para un análisis de la degradación por años la información de cambios de la cobertura vegetal publicada en la plataforma de Terra-i Perú del MINAM (resolución espacial de 250 metros, y tiene información del año 2004 al 2020), a esta información cartográfica generada se le realizó una limpieza de datos para definir cuales

correspondían a superficie degradada por minería.

Adicionalmente se utilizó las imágenes satelitales Landsat, Sentinel 2 y Google Earth, para mejorar la precisión de las fechas a las que corresponden la superficie degradada por minería identificadas.

Es así, que en esta primera etapa se logró obtener la información de áreas degradadas al año 2018, que se encuentra agrupada de la siguiente manera:

- Acumulado al año 2000.
- Información anualizada del año 2001 al año 2018.

Tabla

3

Superficie degradada identificada hasta el año 2018

Año	Superficie degradada (ha)
Acumulado al año 2000	14 785.61
2001	353.26
2002	411.36
2003	871.25
2004	887.11
2005	747.66
2006	1 532.94
2007	2 194.69
2008	2 255.89
2009	1 755.26
2010	4 714.90
2011	4 705.96
2012	3 616.31
2013	4 176.09
2014	5 229.01
2015	10 686.36
2016	10 517.10
2017	5 929.99
2018	4 078.19
Total	79 448.94

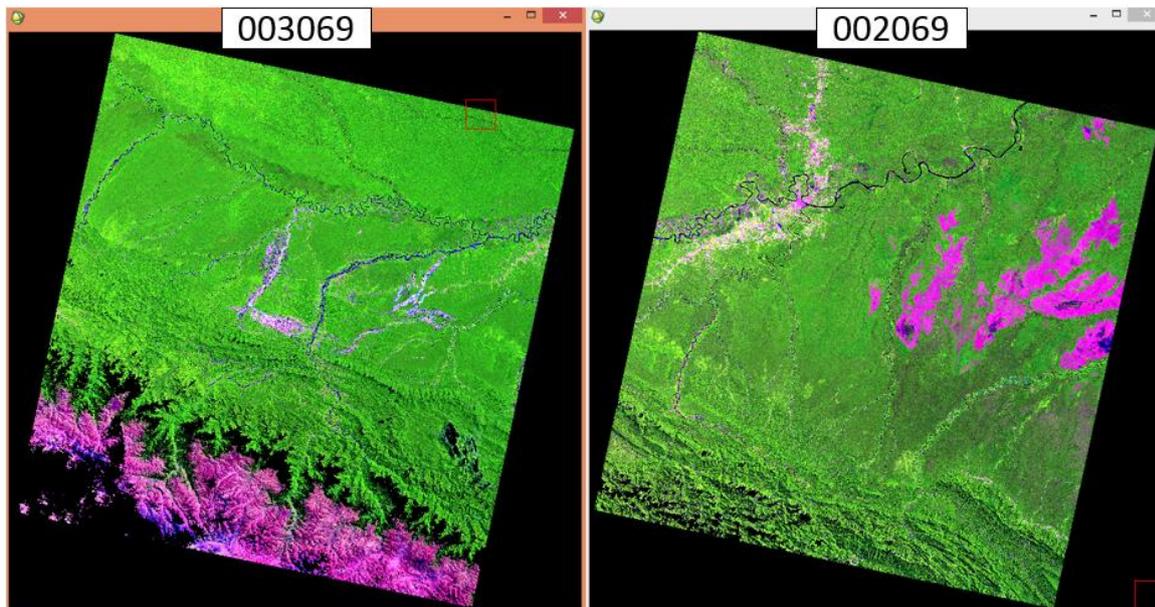
Paso 3: identificación de áreas degradadas por minería al 2020: pre procesamiento de imágenes Landsat y generación de NDVI

La información disponible de imágenes Landsat es a julio del año 2020.

- **Pre procesamiento de las imágenes Landsat**, para poder obtener las imágenes en reflectancia, los valores de los píxeles de las imágenes se encuentran generalmente en unidades de niveles digitales y se deben transformar en unidades de energía reflejada, lo que se conoce como calibración radiométrica (Asner et al., 2013). Adicionalmente, debido a que los datos radiométricos contienen información tanto de la superficie terrestre como de la atmósfera, se requiere aplicar una corrección que minimice los efectos atmosféricos en los valores de cada píxel, obteniendo una imagen de superficie de reflectancia. Esta superficie tiene una mayor consistencia en las respuestas radiométricas dentro y entre imágenes, permitiendo la aplicación de procesos y modelos estándar para todas las escenas y fechas analizadas (Hansen & Loveland, 2012). Para la etapa de pre procesamiento de las imágenes satelitales (correcciones radiométricas y atmosféricas), existen muchas herramientas que pueden ser utilizadas, para la presente investigación se ha usado una herramienta del programa Carnegie Landsat Analysis System Lite – ClasLite, que otorga licencias gratuitas que son solicitadas a la Institución Carnegie para la Ciencia que viene trabajando en el monitoreo de bosques. Asimismo, con esta herramienta enmascaramos las nubes que pudiesen tener algunas imágenes.

Figura**13**

Imágenes en reflectancia de los path/row 002069 y 003069



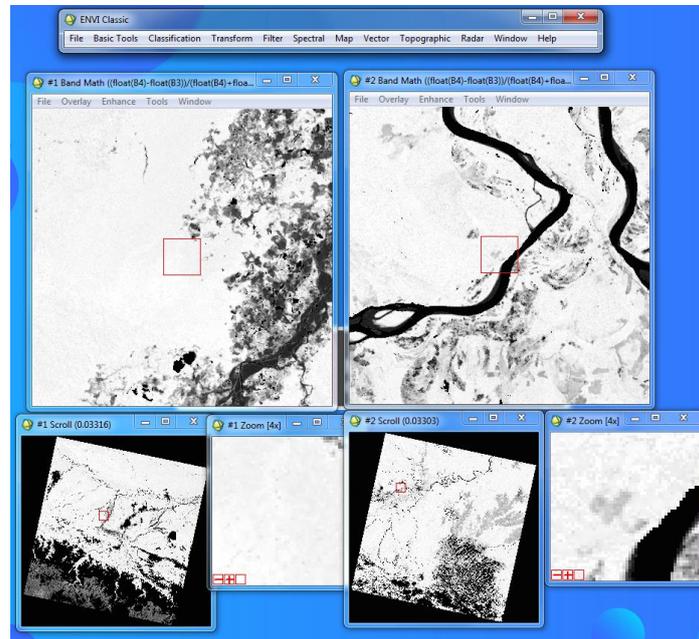
- **Generación de NDVI - serie de tiempo del 2000 al 2020**, se ha realizado el procesamiento de las imágenes satelitales en reflectancia Landsat, a fin de poder generar las imágenes de Índices de Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI) de cada imagen satelital para el periodo 2000-2020. Para ello se ha utilizado la siguiente formula que usa las bandas rojo (R) e infrarojo cercano (NIR) de las imágenes Landsat.

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \dots\dots\dots (1)$$

Figura

14

Ejemplo de imágenes de NDVI generadas para cada tile y años

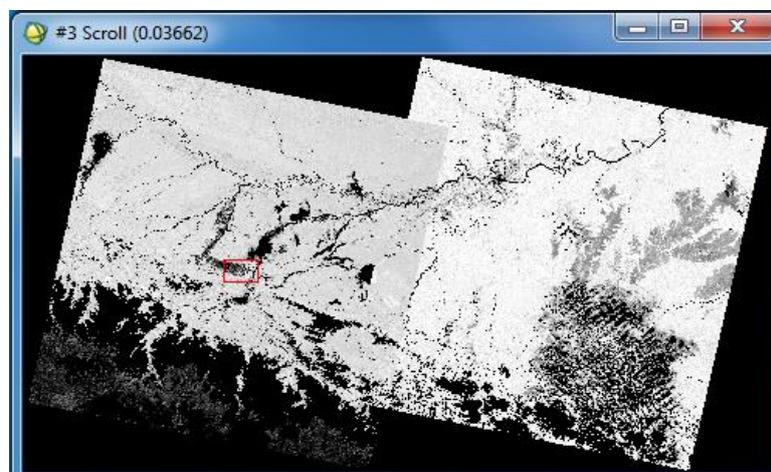


Seguidamente se procedió a generar mosaicos de las imágenes de NDVI de los path/row 002069 y 003069, como se puede observar en la siguiente Figura 15.

Figura

15

Ejemplo de generación de mosaicos por cada año del 2000-2020

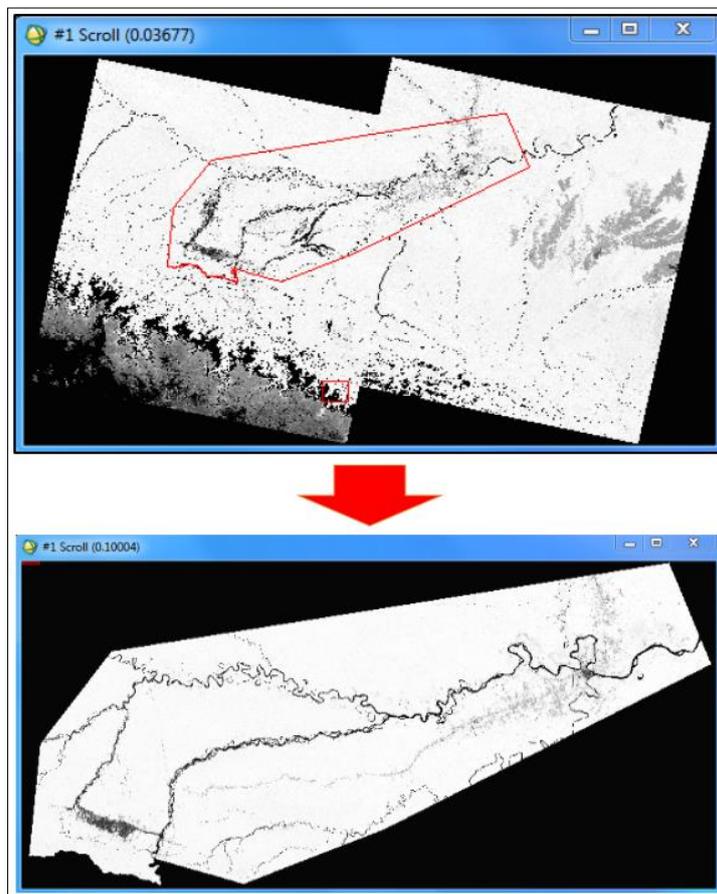


Asimismo, se procedió a generar el corte de los mosaicos de NDVI (2000-2020) generados anteriormente, usando para ello el límite del ámbito de monitoreo establecido sobre el corredor minero en el departamento de Madre de Dios. Visualización de las imágenes con el software ENVI 5.0.

Figura

16

Ejemplo de cortes realizados a los mosaicos de NDVI



Paso 4: análisis de series temporales de imágenes satelitales de NDVI – aplicación de algoritmo en “R”

Una vez obtenido las imágenes de NDVI cortadas para el ámbito de monitoreo, se procede a organizar la información a manera de que todas las imágenes tengan un código que

contenga el año al que corresponde cada imagen, esto a fin de que los datos se ordenen y sean analizados con el script en R que se llevarán a cabo en los procesos siguientes. Ejemplo del nombre: “NDVI_2000_AOI”.

Posteriormente se utiliza el script generado en el lenguaje de programación R, donde se testea haciendo pruebas con las imágenes en NDVI analizando las medianas y desviaciones estándar aplicados a los valores de las series temporales de cada pixel, realizándose un análisis pixel a pixel hasta poder determinar los valores que permiten conocer el comportamiento fenológico del bosque a partir del análisis del NDVI que ha sido corroborado visualmente con las imágenes Landsat y Sentinel 2, a partir del cual permitió establecer umbrales que nos permitan conocer si la cobertura de bosque se mantiene o si ha cambiado a otra cobertura con un análisis al último año (2020). A continuación, se muestra el código en R que ha sido utilizado.

Figura

17

Script en R para la detección de superficie de pérdida de vegetación

```

## identificación de pérdida de bosque al 2020
df<-c()
system.time(
  for(i in 1:18){
    img<-as.vector(raster(lista.vf[[i]]))
    df<-cbind(df,img)
  })

## 1. ASIGNAR 100 A LAS FILAS
system.time(
  for(i in 1:dim(df)[1]){
    df[i,][df[i,] < 0]<- NA
    df[i,][df[i,] == 0]<- NA
    df[i,][summary(df[i,])[7] >= 17] <- 100
  })

system.time(
  for(i in 1:dim(df)[1]){
    df[i,] <- na.interp(df[i,])
  })

system.time(
  for(i in 1:dim(df)[1]){
    for(j in 2:17){
      df[i,][j]<-ifelse(((df[i,][j]-df[i,][j-1])< -0.04*df[i,][j-1]) & ((df[i,][j]-df[i,][j+1])< -0.01*df[i,][j+1]),
        (df[i,][j-1]+df[i,][j+1])/2,df[i,][j])
    }
  })

media<-apply(df[,1:17], 1, mean)
l1<- media-5*sd

break.2019<- ifelse(df[,18]<l1,1,0)

vf.2019<-raster("VF_2019_AoI.tif")
vf.2020<-raster("VF_2020_AoI.tif")
def.2018[vf.2017 < 80]<- 0
def.2018[vf.2018>=80]<-0

```

Limpieza de datos

Una vez obtenido los datos de pérdida de la cobertura boscosa generado hasta el año 2020 con el análisis de NDVI con el lenguaje de programación R, se ha procedido a la limpieza de datos, para ello hemos utilizado las imágenes Landsat usadas para la generación de los NDVI. Para este proceso se utilizó el software Qgis para realizar el layer staking a las imágenes (apilar capas), para así poder realizar las combinaciones de bandas y visualizarlas en color natural RGB y otros tipos de combinaciones. Posteriormente en Qgis se cargó las detecciones de cambios por pérdida de la cobertura de bosque identificados a julio del año 2020 generadas con R así como las imágenes satelitales apiladas, para seguidamente proceder a eliminar los datos detectados que han sido generado por el ruido de las nubes y que no fueron enmascarados en su totalidad en los pasos anteriores; esta actividad se realizó a partir del análisis del comportamiento y patrón que presenta la actividad minera, así como su textura, forma, brillo y color característico que han sido identificados en las imágenes satelitales Landsat y Sentinel 2 del año 2020 a partir del espertís del profesional; y las otras áreas que correspondían a actividades asociados a agricultura, expansión urbana y eventos naturales (desviación del curso del río o por vientos huracanados que tumban los árboles) fueron eliminados.

Paso 5. análisis de cartografía temática, y generación del mapa de superficie degradada por minería ilegal e informal

En esta etapa, la superficie degradada por minería identificadas en el área de estudio tanto en el paso 2 (al año 2018) como en el paso 4 (actualizado a julio 2020), son integrados y analizadas con las diferentes capas temáticas recopiladas de diferentes plataformas de datos abiertos mencionadas en el paso 1, esto a fin de poder diferenciar la superficie degradada que corresponden a actividades mineras ejercidas de manera ilegal y de manera informal, conociendo así su distribución espacial en el área de estudio. Para ello, se partió utilizando como criterio lo establecido en las normativas peruanas respecto a las definiciones conceptuales y al tratamiento de la actividad minera, como es el caso del D.L. N° 1010 y el D.L. N° 1105 (definidos en el

marco teórico), donde se define y nos permite hacer esta diferenciación de las actividades mineras ilegales de las informales.

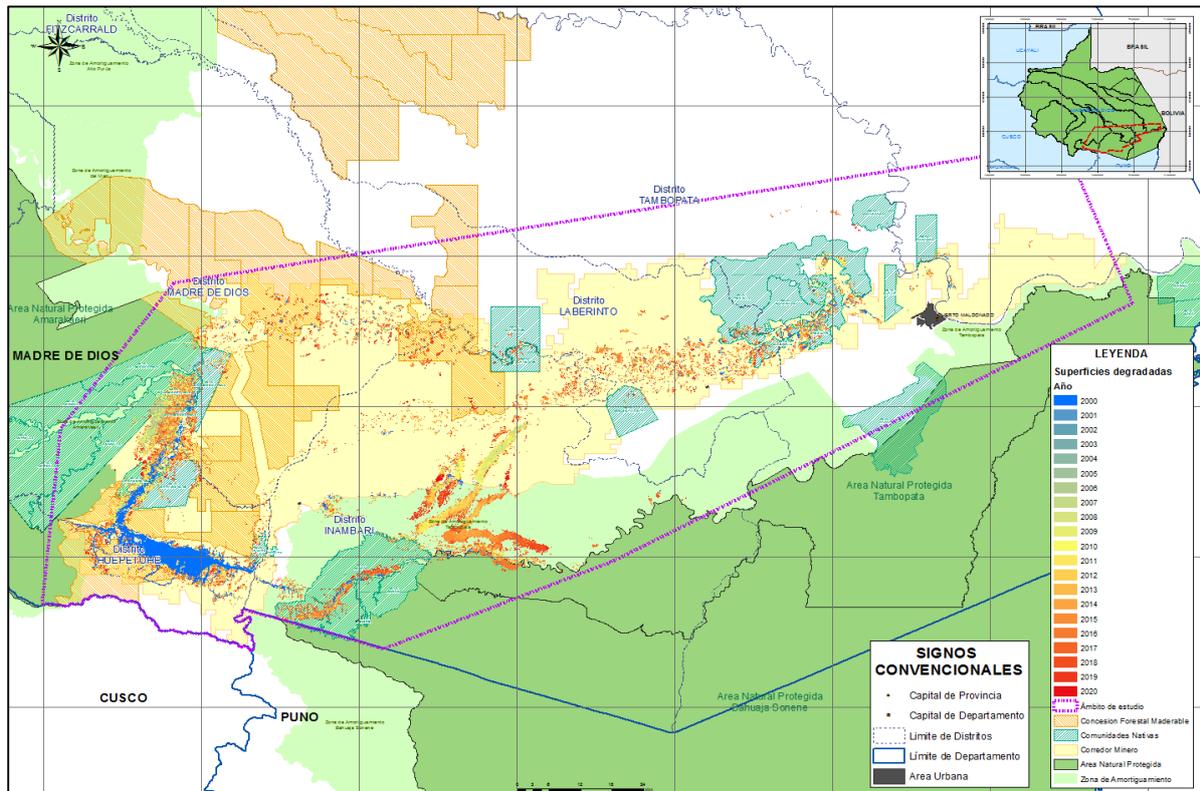
Para el análisis cartográfico, se usó las cartografías (shapefile) de concesiones mineras, ANP con sus zonas de amortiguamiento, Comunidades Nativas, corredor minero y cuerpos de agua, para ser analizados con las áreas degradadas identificadas y poder determinar que superficie corresponden a actividades de minería ilegal y a actividades de minería informal. Asimismo, en un segundo análisis se usó las capas de límites políticos administrativos para el departamento de Madre de Dios, a fin de poder tener una mayor información estadísticas de los impactos que viene presentando en el territorio en un proceso histórico hasta el año 2020.

La información cartográfica usada para los análisis es:

- ANP.
- Zonas de amortiguamiento de las ANP.
- Concesiones mineras.
- Comunidades Indígenas.
- Corredor minero.
- Límites políticos administrativos.

En la siguiente Figura 18, se puede observar el mapa de áreas degradadas por minería ilegal e informal identificadas en el ámbito de estudio del departamento de Madre de Dios; el mayor detalle de los datos generados se muestra en el ítem de resultados.

Mapa de áreas degradadas por minería ilegal e informal en Madre de Dios



Paso 6: evaluación de la exactitud temática del mapa de áreas degradadas por minería ilegal e informal

Siguiendo las buenas prácticas para estimar áreas y evaluar la precisión de cambios en la tierra (Pontus Olofsson , Giles M. Foody, Martin Herold, Stephen V. Stehman, Curtis E. Woodcock , Michael A. Wulder), se ha estimado la exactitud temática de la información generada. Para ello se ha establecido tres componentes principales, el diseño de muestreo, el diseño de respuesta y análisis:

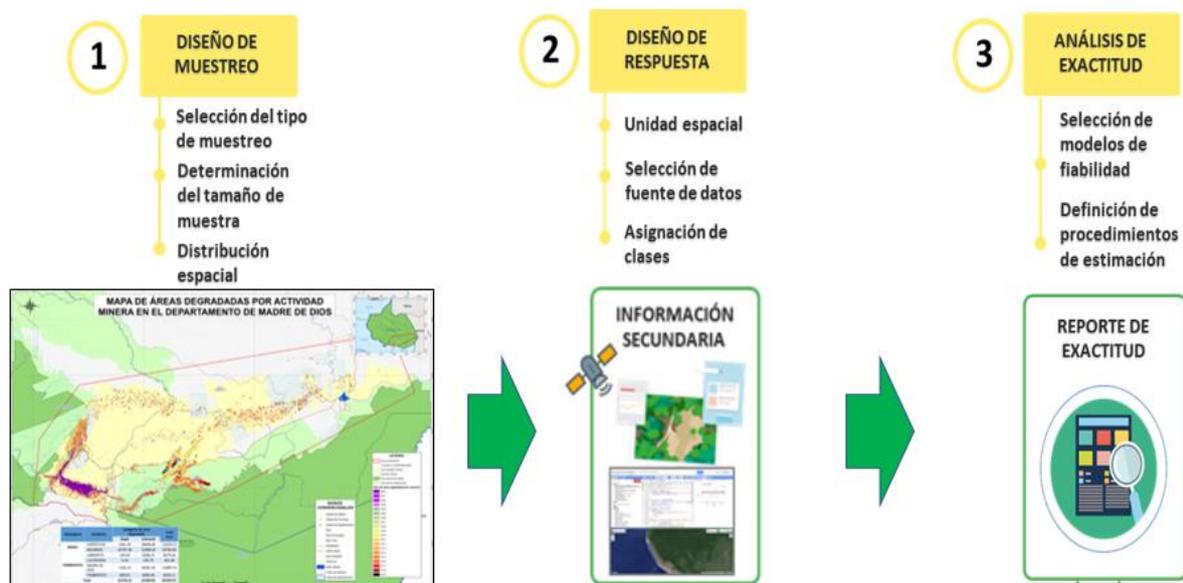
- El diseño de muestreo es para seleccionar ese subconjunto del área de estudio.
- El diseño de respuesta abarca todos los aspectos que conducen a determinar si el mapa y las clasificaciones de referencia están de acuerdo.
- El análisis permite definir como cuantificar la precisión y área y cuantificación de

incertidumbre de lo estimado como degradado.

Figura

19

Flujo del proceso de evaluación de exactitud temática



A) Diseño de muestreo

- **Selección del tipo de muestreo:** el tipo de muestreo será probabilístico, ya que se entiende que son aquellos que se basan en el principio de equiprobabilidad. Es decir, aquellos en los que todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser elegidos para formar parte de una muestra y, consiguientemente, todas las posibles muestras de tamaño tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas. Asimismo, dentro del método de muestreo probabilístico se utilizará el tipo de muestreo aleatorio simple.
- **Determinación del tamaño de la muestra:** para determinar el número de unidades de muestreo para un muestreo aleatorio simple, se ha usado la siguiente fórmula (Cochran, 1977):

$$N = (z^2 O(1-O))/d^2 \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

O: recisión general expresado como una proporción 50 % (0.5)

z: percentil de la distribución normal estándar ($z=1.96$ para un 95 % de intervalo de confianza)

d: la mitad del ancho del intervalo de confianza para O (0.05)

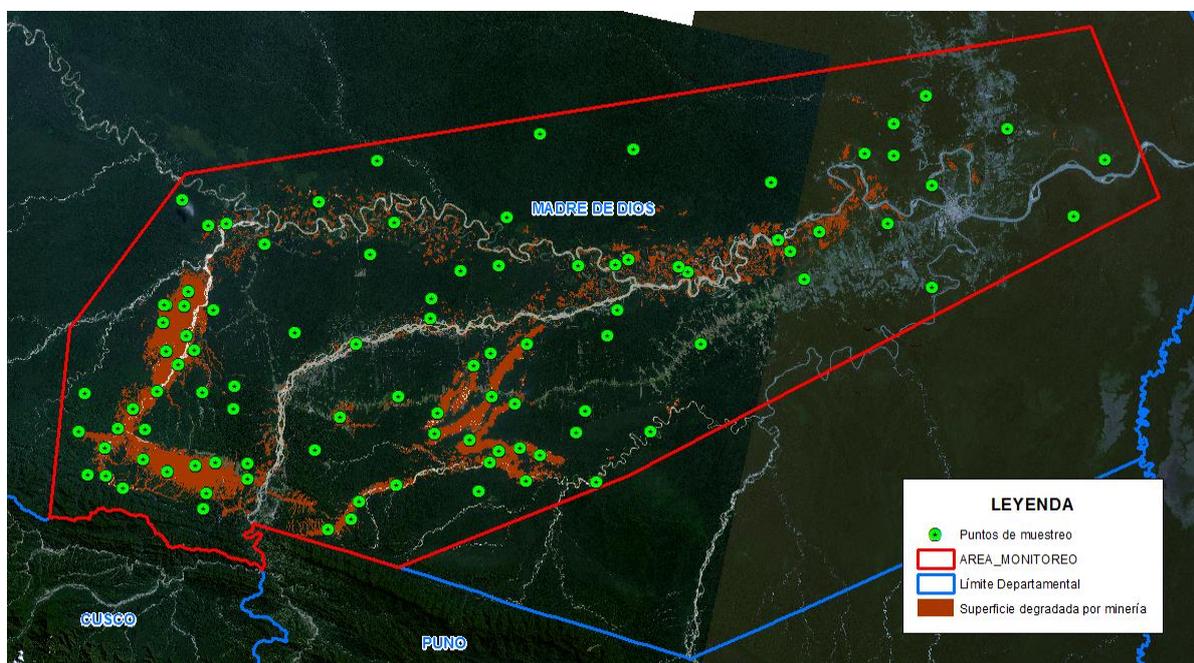
Este cálculo permitió establecer que la cantidad de unidades de muestreo son 96.

- **Distribución espacial de las unidades muestrales:** las unidades muestrales determinadas en el paso anterior (96 unidades), se han distribuido aleatoriamente en todos los pixeles identificados como áreas degradadas por la actividad minera a fin de que estas sean validadas.

Figura

20

Mapa de distribución de puntos de muestreo (96 puntos)



B)Diseño de respuesta

- **Unidad espacial:** la unidad espacial es de un pixel de las imágenes Landsat (NDVI) utilizados para mapear y determinar las áreas degradadas, es decir de 30 metros (0.09 ha).
- **Selección de fuente de datos:** la información que se ha tomado como referencia para validar las áreas degradadas, corresponde a información secundaria, en este caso a imágenes satelitales de alta resolución espacial que corresponden al año 2020, en este caso imágenes satelitales Sentinel 2 (10 m de tamaño de pixel), e imágenes satelitales Spot 5 y Spot 6 (1.5 m de tamaño de pixel).
- **Asignación de clases:** usando la información secundaria (imágenes satelitales) se procedió a asignar clases al resultado que se obtenga de la evaluación de cada pixel (puntos centroides de cada pixel). Si corresponde a un pixel verificado como degradado por minería se le asignará la clase “degradado”, si por el contrario corresponde el pixel a una superficie no degradada por minería, se le coloca la categoría “no degradado”.

C) Análisis de la exactitud

El análisis de la exactitud especifica cómo traducir la información contenida en la comparación del mapa y los datos de referencia en estimaciones de área y precisión, y cómo cuantificar la incertidumbre asociada con ellos. La mayoría de los cálculos se basan en la matriz de errores (también denominada comúnmente matriz de confusión), que contrasta el mapa y la clasificación de referencia (FAO, 2016).

- **Selección del modelo para expresar la exactitud del mapa:** para evaluar la exactitud del mapa se usaron las medidas de error de comisión y omisión, exactitud del usuario, la exactitud del productor, la precisión Global y la exactitud general del mapa (índice de Kappa).
- **Definición de procedimientos para estimar las medidas de fiabilidad**

seleccionadas:

Matriz de confusión:

Se elaboró la matriz de confusión de acuerdo al “Protocolo de evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación” (MINAM, 2014), tal como se muestra en la Tabla 4. En esta matriz las filas representan generalmente las clases de referencia y las columnas las clases del mapa clasificado. La diagonal de la matriz expresa el número de sitios de verificación para los cuales hay concordancia entre el mapa y los datos de referencia, mientras los extremos indican errores de asignación.

Medidas para evaluar la exactitud a nivel de clases:

Exactitud del usuario: valor correctamente clasificado de una clase respecto al total dado como dicha clase.

Exactitud del productor: porcentaje de elementos bien clasificados para cada clase en las columnas. Indica en qué medida ha sido bien clasificada una clase dada.

Medidas de precisión:

Error de comisión: indica la probabilidad de que el usuario del mapa encuentre información incorrecta durante su uso.

Error de omisión: indica en qué medida el productor del mapa representó incorrectamente los rasgos del terreno.

Siguiendo estos pasos, en la Tabla 4, se puede apreciar los valores de cada métrica:

Matriz de confusión con los datos del mapa y valores de referencia

Resultados información de referencia						
Resultados de clasificación (mapa)	Clase	Degradado	No degradado	Total	Exactitud usuario	Error comisión
	Degradado	46	2	48	0.96	0.04
	No degradado	1	47	48	0.98	0.02
	Total	47	49	96		
	Exactitud de productor	0.98	0.96			
	Error de omisión	0.02	0.04			

Nota. Adaptado de información MINAM (2014)

Métrica para evaluar la precisión del mapa (índice de Kappa): es la proporción de coincidencias obtenidas en un producto cartográfico sustrayendo aquellos generados de forma fortuita (confiabilidad global).

Tabla

5

Valoración del coeficiente de Kappa

Coeficiente de Kappa (k)	Fuerza de concordancia
< 0.00	Pobre
0.01 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecta

Nota. Landis y Koch (1977).

$K = (Po - Pe) / (1 - Pe)$, siendo:

Po= Número de aciertos / Número total de clases

Pe= Cálculo generado desde la matriz de confusión

$$P_o = (46 + 47) / 96,$$

$P_o = 0.97 \rightarrow 97\%$ de Exactitud Global de la información de áreas degradadas

$$P_e = (0.98 * 0.96) + (0.96 * 0.98)$$

$$P_e = 1.8816$$

$$K = (0.97 - 1.8816) / (1 - 1.8816)$$

$$K = 1.00$$

La evaluación de la precisión del mapa a partir del índice de Kappa, permite conocer que nos encontramos en nivel de concordancia de “casi perfecta”.

4.3. Resultados obtenidos

Con el presente modelo se ha logrado identificar la superficie degradada por la actividad minera para un acumulado histórico al año 2000 y anualizado del año 2001 al año 2020 (a julio), llegando a sumar un total 88 256.89 ha; la fortaleza de este modelo radica en que permite generar información con datos de imágenes satelitales y cartografía temática de libre acceso (gratuitos), pudiendo generar información continua en tiempo casi real en periodos menores a un año (meses), utiliza softwares no comerciales para su procesamiento de datos geoespaciales, y a su vez, permite identificar la información a un detalle de conocer donde la superficie degradada se encuentran asentadas, a nivel de provincias, distritos, Comunidades Nativas, ANP y sus zonas de amortiguamiento, conocer cuál ha sido su tendencia en los años analizados, y permite discriminar la minería ilegal de la informal. Los resultados estadísticos se pueden observar en las siguientes Tablas; Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10.

Superficie degradada identificada en los distritos del departamento de Madre de Dios

Años analizados	Distritos						Total superficie (ha)
	Huepetuhe (ha)	Madre de Dios (ha)	Inambari (ha)	Laberinto (ha)	Las Piedras (ha)	Tambopata (ha)	
Hasta el año 2000	10 729.81	1 810.80	1,216.47	364.22	70.69	593.64	14 785.61
2001	63.85	124.67	86.53	45.90	4.23	28.09	353.26
2002	115.97	86.15	79.87	85.89	5.45	38.04	411.36
2003	250.58	328.54	125.72	119.84	2.82	43.75	871.25
2004	246.58	279.19	216.78	105.51	0.67	38.37	887.11
2005	138.91	214.45	117.30	125.31	6.59	145.10	747.66
2006	266.56	807.42	186.12	166.69	2.74	103.43	1 532.94
2007	336.10	1 292.41	358.51	108.64	10.41	88.63	2 194.69
2008	265.25	761.47	907.75	136.28	4.88	180.28	2 255.89
2009	222.91	505.84	796.37	96.61	4.30	129.23	1 755.26
2010	742.57	1 727.54	1 629.98	342.35	10.60	261.86	4 714.90
2011	810.43	1 329.22	2 065.15	229.17	10.82	261.17	4 705.96
2012	439.01	1,020.25	1 833.15	253.28	5.63	64.99	3 616.31
2013	656.85	1 318.43	1 644.75	414.18	6.65	135.23	4 176.09
2014	596.75	1 041.35	2 210.52	773.90	43.35	563.15	5 229.01
2015	1 586.82	2,978.84	3 760.74	1,776.77	24.85	558.34	10 686.36
2016	1 272.57	1,859.91	4 567.86	1,867.01	78.71	871.03	10 517.10
2017	903.08	1 319.20	3 123.33	484.51	1.42	98.45	5 929.99
2018	607.67	842.39	2 134.16	338.07	3.36	152.54	4 078.19
2019	781.75	1 359.10	2 531.61	657.46	2.84	150.80	5 483.56
2020	479.98	883.02	1 160.47	615.65	3.63	181.64	3 324.39
Total (ha)	21 513.98	21 890.17	30 753.11	9 107.24	304.63	4 687.77	88 256.89

Nota. En la presenta tabla se muestra la superficie degradada identificada por distritos del departamento de Madre de Dios, registradas para un histórico al año 2000 y seguidamente anualizado del año 2001 a julio 2020, logrando identificar una superficie total de 88 256.89 ha, siendo el distrito de Inambari el que cuenta con mayor superficie degradada con 30 753.11 ha.

Distritos con superficie degradada por minería ilegal e informal a julio 2020

Provincia	Distrito	Categoría de área		Total (ha)
		Ilegal (ha)	Informal (ha)	
Manu	Huepetuhe	1 834.52	19 679.46	21 513.98
	Inambari	19 215.19	11 537.92	30 753.11
Tambopata	Laberinto	1 278.22	7 829.01	9 107.24
	Las Piedras	5.17	299.46	304.63
	Madre de Dios	3 532.75	18 357.42	21 890.17
	Tambopata	1 584.02	3 103.75	4 687.77
Total (ha)		27 449.87	60 807.02	88 256.89

Nota. En la presenta tabla se muestra la clasificación de la superficie degradada causadas tanto por la minería informal como la minería ilegal, donde se identificó como área degradada por minería ilegal una superficie de 27 449.87 ha, y para minería informal una suma de 60 807.02 ha.

Tabla

8

Superficie degradada por minería ilegal e informal en comunidades nativas

Comunidad nativa	Superficie (ha) degradada por minería		Total (ha)
	Minería ilegal	Minería informal	
Arazaire	176.38	182.91	359.28
Barranco Chico	2 448.02	751.80	3 199.82
Boca del Inambari	172.59	3.80	176.39
Boca Pariamanú	9.11	0.00	9.11
El Pilar	9.43	0.00	9.43
Kotsimba	3 234.60	491.17	3 725.77
Puerto Arturo	2.46	6.54	9.00
Puerto Luz	248.46	226.63	475.09
San Jacinto	1,022.55	565.07	1,587.62
San Jose de Karene	2 302.66	2 530.38	4 833.04
Shiringayoc	353.84	15.58	369.42
Tres Islas	1 274.43	658.89	1 933.32
Total (ha)	11 254.52	5 432.77	16 687.29

Nota. En la presenta tabla se muestra aquellas Comunidades Nativas del departamento de Madre de Dios que cuentan con superficies degradada producto de la actividad minera ilegal e informal, en total son 12 las CCNN afectadas y que cuentan con un total de 16 687.29 ha. Siendo la CCNN San José de Karene la más afectada con 4 833.04 ha.

- En las siguientes Tabla 9 y Tabla 10, se muestra la superficie degradada por la minería ilegal e informal presentes en las ANP y sus zonas de amortiguamiento que se

encuentran presente en el departamento de Madre de Dios. La suma total de superficie degradada en las ANP es de 1 075.35 ha, y en su Zonas de amortiguamientos suman 35 782.73 ha. A fin de precisar, se puede mencionar que existen casos de superficie degradada dentro de algunas ANP y que tienen la categoría de informal, debido a que estas zonas cuentan con concesiones mineras asignadas antes de la creación de las ANP.

Tabla**9***Superficie degradada por minería ilegal e informal en ANP*

Área Natural Protegida	Superficie (ha) degradada por		Total (ha)
	minería Ilegal	Informal	
Amarakaeri	3.71	6.68	10.41
Bahuaja Sonene	2.49	0.00	2.49
Tambopata	986.10	76.35	1 062.45
Total (ha)	992.32	83.03	1 075.35

Nota. En la presenta tabla se muestra las superficies degradadas en ANP, donde suma un total de 1 075.35 ha, siendo la más afectada Tambopata el cual cuenta con 1 062.45 ha de superficie degradada.

Tabla**10***Superficie degradada por minería ilegal e informal en zonas de amortiguamiento*

Zona amortiguamiento de ANP	Superficie (ha) degradada por		Total (ha)
	de minería Ilegal	Informal	
Amarakaeri	3 130.59	8 203.41	11 334.01
Bahuaja Sonene	4 028.32	642.60	4 670.92
Tambopata	17 907.36	1 870.44	19 777.80
Total (ha)	25 066.28	10 716.45	35 782.73

Nota. En la presenta tabla se muestra las superficies degradadas en zonas de amortiguamiento (ZA) de ANP, donde suma un total de 35 782.73 ha, siendo la más afectada la ZA de Tambopata el cual cuenta con 19 777.80 ha de superficie degradada.

V. Discusión de resultados

El presente modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales y cartografía temática, tiene una metodología robusta que permite ser sostenible en el tiempo usando insumos y softwares de libre acceso (no comerciales), genera información en periodos cortos (aproximadamente cada 3 meses), y permite identificar al detalle si la degradación fue causada por la actividad minera ilegal o informal. Obteniendo así ventajas en comparación a otras metodologías. A continuación, se desarrolla la comparación de la metodología desarrollada, frente a otras que se viene aplicando en el Perú y a nivel internacional:

5.1. Comparación de la metodología propuesta con la metodología del sistema de monitoreo de deforestación del PNCB del MINAM - Perú

Para el caso de ambas metodologías, usan como insumo datos de la Plataforma de datos abiertos de imágenes satelitales de la USGS, siendo estas las imágenes satelitales Landsat (30 m de tamaño de pixel). Para una siguiente etapa de validación de datos y evaluación de la exactitud temática, la presente metodología usa imágenes satelitales gratuitas Sentinel 2 de la Plataforma Copernicus, que también son de libre acceso y descarga; para el caso de la metodología del PNCB, en esta etapa se desconoce si utilizan imágenes satelitales gratuitas o comerciales de mayor resolución espacial.

Cabe mencionar que otra de las ventajas de la presente metodología, es que utiliza softwares no comerciales como el “Qgis 2.18.5”, para el pre procesamiento y la generación de las imágenes de NDVI del año 2000 al año 2020, y el software de lenguaje de programación “R”, para el análisis de esta serie de tiempo de las imágenes de NDVI. En el caso de la metodología que aplica el PNCB, utiliza en su procesamiento de imágenes software comercial ArcGis de propiedad de ESRI, teniendo este un alto costo en el mercado.

Otra de las ventajas de la presente metodología, es que en su arquitectura metodológica contempla el análisis de imágenes satelitales de NDVI para una serie de tiempo de 21 años (2000 - 2020), esto para conocer el comportamiento de fenológico de los bosques respecto a

sus valores de NDVI, permitiendo así establecer umbrales más preciso para las detecciones de pérdida de bosque; que en comparación del PNCB, que utiliza la metodología de la Universidad de Maryland, que solo analiza imágenes en dos momentos para establecer un umbral y determinar la pérdida de bosque.

Otra de las ventajas, es que contempla la generación de información en tiempo casi real (meses) usando las imágenes Landsat que son publicadas cada 16 días, pudiendo así obtener datos continuos y conocer como se viene comportando el proceso de pérdida de bosque producto de la actividad minera. En comparación de los reportes del PNCB, que monitorea y publica sus datos con una periodicidad de un año a más. De esta manera, la presente metodología permite tomar acciones oportunas a los tomadores de decisiones para poder combatir esta problemática.

Asimismo, otra de las ventajas importantes de la presente arquitectura metodológica, es que haciendo uso de cartografía temática de datos abiertos y oficiales, puede lograr identificar la actividad que ha causado la pérdida del bosque, siendo para este caso la actividad minera, y logrando discriminar a un detalle de conocer si fue causado por la actividad minera ilegal e informal; que en comparación con la metodología del PNCB, en su metodología no contempla la identificación de la causa de la degradación, quedándose solo en el nivel de identificación de la deforestación.

La comparación de resultados de ambas metodologías se muestran a continuación, donde se puede observar que a agosto 2020, la metodología de la presente investigación muestra en la Tabla 11 (y las Tablas 6, 7, 8, 9 y 10 en el ítem IV) información de la degradación de los bosques a julio del 2020 por distrito, al detalle de identificar que el causante ha sido la actividad minera y discriminando si es ilegal o informal (mayores datos estadísticos sobre la identificación 2000-2020 en el ítem IV, resultados); en el caso de los datos reportados por el PNCB, mostraba en su plataforma de GEOBOSQUES, datos de deforestación en Madre de

Dios identificado del 2001 al 2018, más no llega al detalle de identificar el causante de la deforestación; esto se puede observar en la Figura 21.

Tabla

11

Distritos con superficie degradada por minería ilegal e informal a julio 2020

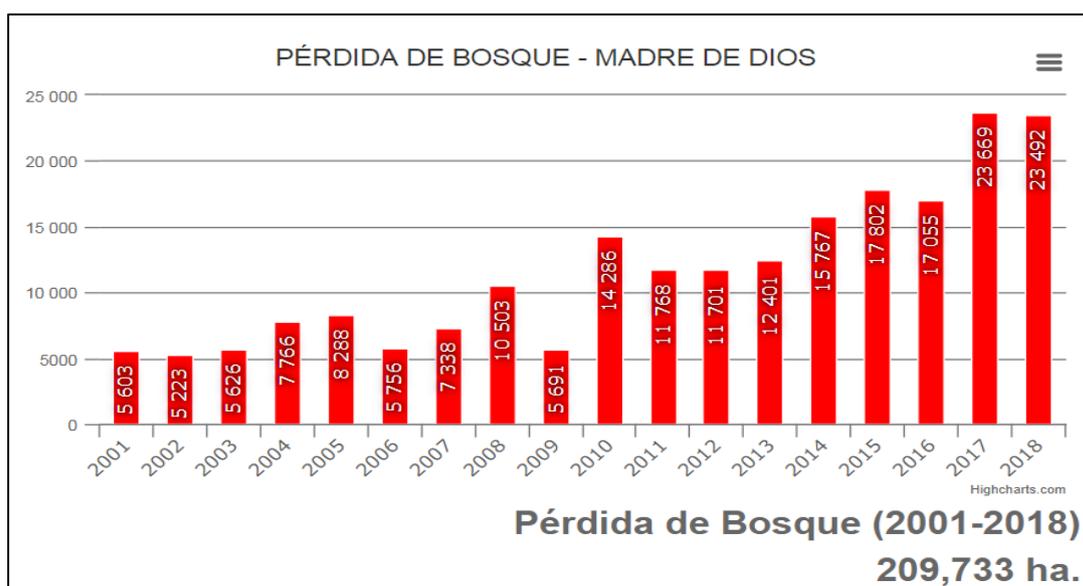
Provincia	Distrito	Categoría de área degradada		Total (Ha)
		Ilegal (ha)	Informal (ha)	
Manu	Huepetuhe	1 834.52	19 679.46	21 513.98
	Inambari	19 215.19	11 537.92	30 753.11
Tambopata	Laberinto	1 278.22	7 829.01	9 107.24
	Las Piedras	5.17	299.46	304.63
	Madre de Dios	3 532.75	18 357.42	21 890.17
	Tambopata	1 584.02	3 103.75	4 687.77
Total (ha)		27 449.87	60 807.02	88 256.89

Nota. En la presenta tabla se muestra las superficies degradadas identificadas por distritos y si corresponde a minería ilegal o informal, siendo el distrito que presenta mayor degradación Inambari con una superficie de 30 753.11 ha.

Figura

21

Datos del PNCB de la deforestación en el departamento de Madre de Dios



Nota. PNCB (2018)

5.2. Comparación de la metodología propuesta con la metodología de monitoreo de

cambios en la cobertura de Terra-i, del CIAT de Colombia

Para el caso de ambas metodologías, usan como insumo datos de la Plataforma de datos abiertos de imágenes satelitales de la USGS, en el caso de la metodología propuesta usa imágenes satelitales Landsat de 30 metros de tamaño de pixel (mediana resolución espacial), el cual permite tener una información más precisa y a detalle local, en comparación con la metodología de Terra-i que utiliza imágenes MODIS de 250 metros de tamaño de pixel (baja resolución espacial) mostrando así los resultados menos preciso y gruesos para trabajar a escala local.

Cabe mencionar que otra de las ventajas de la presente metodología, es que utiliza softwares no comerciales como el “Qgis 2.18.5”, para el pre procesamiento y la generación de las imágenes de NDVI del año 2000 al año 2020, y el software de lenguaje de programación “R”, para el análisis de esta serie de tiempo de las imágenes de NDVI. En el caso de la metodología que aplica el Terra-i, combina la utilización de softwares libre como Python y R y comercial como el ArcGis de propiedad de ESRI, y es conocido que este último tiene un alto costo en el mercado.

Otra característica a resaltar y que son similares en ambas metodologías, es que la presente metodología en su arquitectura metodológica contempla el análisis de imágenes satelitales de NDVI de Landsat para una serie de tiempo de 21 años (2000 - 2020), esto para conocer el comportamiento fenológico de los bosques respecto a sus valores de NDVI (verdor), permitiendo así establecer umbrales más preciso para las detecciones de pérdida de bosque; y en el caso de Terra-i en su metodología analiza también una serie de tiempo de imágenes MODIS del año 2000 al 2020 para extraer los valores de umbrales para su detección de pérdida de cobertura vegetal. Aquí la diferencia y mejora de la metodología propuesta radica en que los datos usados son Landsat que permite tener un mayor detalle local (pixel 30 m), en comparación de la propuesta de Terra-i que utiliza datos MODIS para un trabajo de detalle

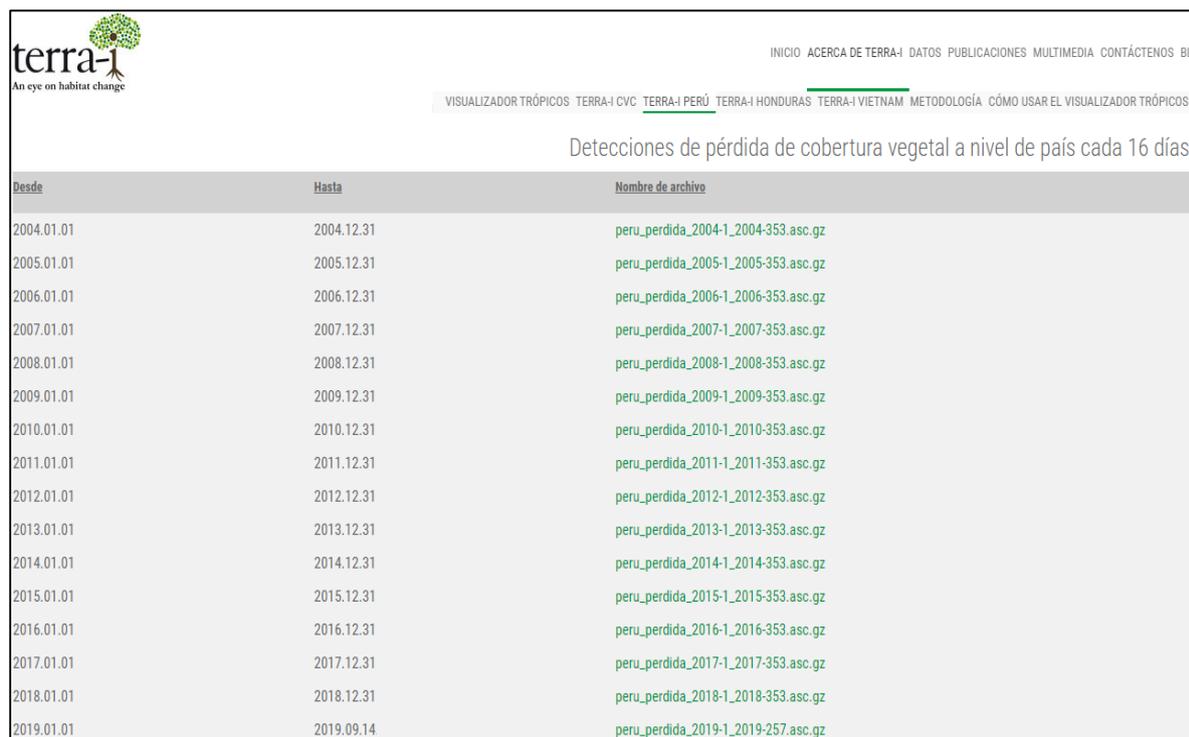
grueso (pixel 250 m).

En el caso de ambas metodologías, tienen el potencial de brindar información en tiempo casi real, ya que ambas utilizan como insumos imágenes satelitales que son publicadas cada 16 días en las Plataformas de datos abiertos.

Asimismo, otra de las ventajas importantes de la presente arquitectura metodológica, es que haciendo uso de cartografía temática de datos abiertos y oficiales, puede lograr identificar la actividad que ha causado la pérdida del bosque, siendo para este caso la actividad minera, y logrando discriminar a un detalle de conocer si fue causado por la actividad minera ilegal e informal a nivel local; que en comparación con la metodología de Terra-i, que no contempla la identificación de la causa de la deforestación, quedándose solo en el nivel de identificación de la pérdida de bosque a una escala gruesa. De esta manera, logrando generar información de la superficie degradada por la actividad minera ilegal e informal en el área de estudio, permite a los tomadores de decisiones tomar acciones oportunas en el territorio para poder combatir esta problemática.

La comparación de resultados de ambas metodologías analizado a agosto 2020, muestra para la presente investigación en las Tablas 6, 7, 8, 9 y 10 en el ítem IV, como se ha generado información de la degradación de los bosques en el área de estudio del año 2004 a julio 2020, identificando a la actividad minera como causante y discriminando si es ilegal o informal; en el caso de los datos reportados por Terra-i, mostró en su plataforma, datos de cambios en la cobertura vegetal (deforestación) en Madre de Dios desde el año al 2001 a julio 2020, más no llega al detalle de identificar el causante de la deforestación, ver Figura 22.

Datos de Terra-i sobre la pérdida de cobertura vegetal para Perú a julio 2020



Desde	Hasta	Nombre de archivo
2004.01.01	2004.12.31	peru_perdida_2004-1_2004-353.asc.gz
2005.01.01	2005.12.31	peru_perdida_2005-1_2005-353.asc.gz
2006.01.01	2006.12.31	peru_perdida_2006-1_2006-353.asc.gz
2007.01.01	2007.12.31	peru_perdida_2007-1_2007-353.asc.gz
2008.01.01	2008.12.31	peru_perdida_2008-1_2008-353.asc.gz
2009.01.01	2009.12.31	peru_perdida_2009-1_2009-353.asc.gz
2010.01.01	2010.12.31	peru_perdida_2010-1_2010-353.asc.gz
2011.01.01	2011.12.31	peru_perdida_2011-1_2011-353.asc.gz
2012.01.01	2012.12.31	peru_perdida_2012-1_2012-353.asc.gz
2013.01.01	2013.12.31	peru_perdida_2013-1_2013-353.asc.gz
2014.01.01	2014.12.31	peru_perdida_2014-1_2014-353.asc.gz
2015.01.01	2015.12.31	peru_perdida_2015-1_2015-353.asc.gz
2016.01.01	2016.12.31	peru_perdida_2016-1_2016-353.asc.gz
2017.01.01	2017.12.31	peru_perdida_2017-1_2017-353.asc.gz
2018.01.01	2018.12.31	peru_perdida_2018-1_2018-353.asc.gz
2019.01.01	2019.09.14	peru_perdida_2019-1_2019-257.asc.gz

Nota. CIAT (2020)

Los detalles comparativos y ventajas de la metodología del presente modelo de análisis de series temporales de imágenes satelitales, con las metodologías del PNCB (Perú) y la metodología Terra-i (Colombia), y se puede visualizar en la siguiente Tabla 12.

Tabla**12***Comparación de metodologías de monitoreo*

	Metodología propuesta (series temporales)	Metodología PNCB (MINAM Perú)	Metodología TERRA-I (CIAT Colombia)
Insumo (imágenes satelitales)	Landsat (pixel 30 m)	Landsat (pixel 30 m)	MODIS (pixel 250 m)
Uso softwares	de Qgis y R (gratuitos)	Arcgis (comercial)	Arcgis (comercial) Python y R (gratuitos)
Análisis imágenes	de serie de tiempo (2000-2020)	2 años (2017-2018)	serie de tiempo (2000-2020)
Reporte resultados	de Cada 3 meses aproximadamente	Más de 1 año	mensual
Fecha de datos reportados a agosto 2020	julio 2020	2018	julio 2020
Identificación de la causa de la degradación	Sí (minería ilegal e informal)	No	No
Nivel espacial de análisis	micro/local	micro/local	meso/micro

VI. Conclusiones

El presente modelo, considera una arquitectura metodológica de análisis de series temporales de imágenes satelitales, que presenta una serie de ventajas frente a otras metodologías, de las cuales se puede mencionar a la del PNCB del MINAM en Perú, y la de Terra-i del CIAT de Colombia.

1. La metodología propuesta utiliza como insumo principal para su análisis de series temporales, datos de imágenes satelitales no comerciales como son las Landsat y Sentinel 2, descargadas de plataformas de datos abiertos como Earth Explorer de la NASA, que brinda datos Landsat cada 16 días, habiéndose utilizado datos desde el año 2001, y Copernicus de la ESA que brinda datos Sentinel 2 cada 5 días con datos desde el año 2015. Asimismo, usa softwares no comerciales como el “Qgis” y “R”; siendo esto una importante ventaja al no irrogar ningún costo la adquisición de datos insumos y de software de procesamiento.
2. La arquitectura metodológica elaborada para identificar la degradación producto de la actividad minera ilegal e informal, ha considerado el análisis multitemporal de imágenes satelitales, y el uso de cartografía temática oficial en el Perú; el cual ha permitido generar información a nivel de distritos, provincias, ANP, CCNN, entre otros, de la actividad que ha causado la degradación, siendo en este caso la actividad minera, y ha permitido discriminar si la degradación corresponde a una minería ilegal o informal. Los resultados obtenidos con el presente modelo, ha seguido un procedimiento recomendado de análisis estadístico que ha permitido evaluar su exactitud temática, a partir del cual, se ha calculado que la exactitud global de los datos es de 97 %, y que el nivel de concordancia a partir del índice de Kappa (1.00) es de “casi perfecta” (el procedimiento completo se encuentra en el ítem 3.6). Estos resultados obtenidos a julio del 2020, han identificado que la superficie degradada por

minería es de 88 256.89 ha, de las cuales 27 449.87 ha corresponden a lo producido por la minería ilegal, y 60 807.02 ha producido por la minería informal.

El potencial de la generación de información con el presente modelo, radica en que permite a los tomadores de decisiones de las diferentes instituciones a nivel nacional (Presidencia del Consejo de Ministros, Ministerio de Energía y Minas, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Servicio Nacional de Certificación Ambiental, MINAM), regional y distrital (Gerencias referidos a Medio Ambiente y Recursos Naturales), así como a las entidades privadas, de acuerdo a sus funciones y competencias, puedan tomar acciones referidos al monitoreo, fiscalización, sanción, protección, conservación y recuperación de la superficie afectada y que se ven vulnerables ante esta problemática, que afecta a los ecosistemas y a los medios de vida de la población.

VII. Recomendaciones

1. Utilizar la información que se genere con el presente modelo, a fin de poder generar otros trabajos de investigación que permitan analizar los impactos negativos que genera la actividad minera en cada componente de los ecosistemas y en la salud de las personas.
2. Utilizar la información que se genere con el presente modelo, a fin de poder generar otros modelos de análisis estadísticos, que permita establecer proyecciones si es que no se toman acciones para minimizar la problemática de áreas degradadas por minería.
3. Implementación del presente modelo por las entidades públicas y privadas, para que dentro de sus funciones puedan generar información oportuna y confiable de áreas degradadas por minería ilegal e informal, para tomar acciones de monitoreo y evaluación para la conservación y recuperación de ecosistemas y su biodiversidad.

VIII. Referencias

- Artaraz, M. (2002). *Teoría de las dimensiones de desarrollo sostenible*.
<http://www.aeet.org/ecosistemas/022/informe1.htm>
- Asner, G.P., y Tupayachi, R. (2017). *Accelerated losses of protected forests from gold mining*.
IOP Science, 12(9), 1 - 8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7dab>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*.
<http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Decreto Legislativo N° 1105. *Que establece disposiciones para el proceso de formalización de las actividades de pequeña minería y minería artesanal*. 21 de abril de 2012. Diario Oficial El Peruano. <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-legislativo-que-establece-disposiciones-para-el-proc-decreto-legislativo-n-1105-778570-2/>
- FAO (2012). *Medir la degradación del bosque*. <http://www.fao.org/3/i2560s/i2560s.pdf>
- Galindo, G., Espero, O., Rubiano, J., Vergara, L. y Cabrera, I. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. V 2.0.
http://www.ideam.gov.co/documents/11769/44688974/Protocolo+de+PDI+para+la+cuantificacion+de+la+deforestacion+en+colombia+v2_1_.pdf/00b95004-53dd-49f9-ab09-16d8803ccd92?version=1.0
- Gutierrez, E. (2007). *De las teorías del desarrollo al desarrollo sustentable. Historia de la construcción de un enfoque multidisciplinario*.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=607/60715120006>
- Labrador, M., Évora, J. y Arbelo, P. (2012). *Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio*.
https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para

_la_gestion_del_territorio

- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica*. <http://volaya.github.io/libro-sig/>
- Olofsson, P., Foody, G., Herold, M., Stehman, S., Woodcock, C. y Wulder, M. (2014). *Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Orr, B. J., Cowle, V. M., Sanchez C., Chasek, P., Crossman, N.D., Erlewein, A., Louwagle, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. and Welton, S. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality*. https://www.researchgate.net/publication/314939844_SCIENTIFIC_CONCEPTUAL_FRAMEWORK_FOR_LAND_DEGRADATION_NEUTRALITY
- OSINFOR (2016). *Contribución en el monitoreo del actividad minera en títulos habilitantes forestales, año 2014 departamento de Madre de Dios*. <https://www.osinfor.gob.pe/publicaciones/contribucion-en-el-monitoreo-de-la-actividad-minera-en-titulos-habilitantes-forestales-ano-2014/>
- Resource Institute World. (20 de setiembre de 2019). *Global Forest Watch*. <https://www.wri.org/initiatives/global-forest-watch>
- Stanford. (s.f.). *Stanford Courses on the Lagunita Learning Platform*. <https://lagunita.stanford.edu/courses/Aula/Carnegie/CLASlite/about>
- Terra-i. (s.f.). *Terra-i an eye on habitat change*. http://www.terra-i.org/terra-i/data/data-terra-i_peru.html
- Torres, V. (2015). *Minería Ilegal e Informal en el Perú: Impacto Socioeconómico*. <http://cooperacion.org.pe/publicaciones/mineria-ilegal-e-informal-en-el-peru-impacto-socioeconomico-2/>
- Watch, G. F. (s.f.). *Global Forest Watch*. <https://www.globalforestwatch.org/about/>