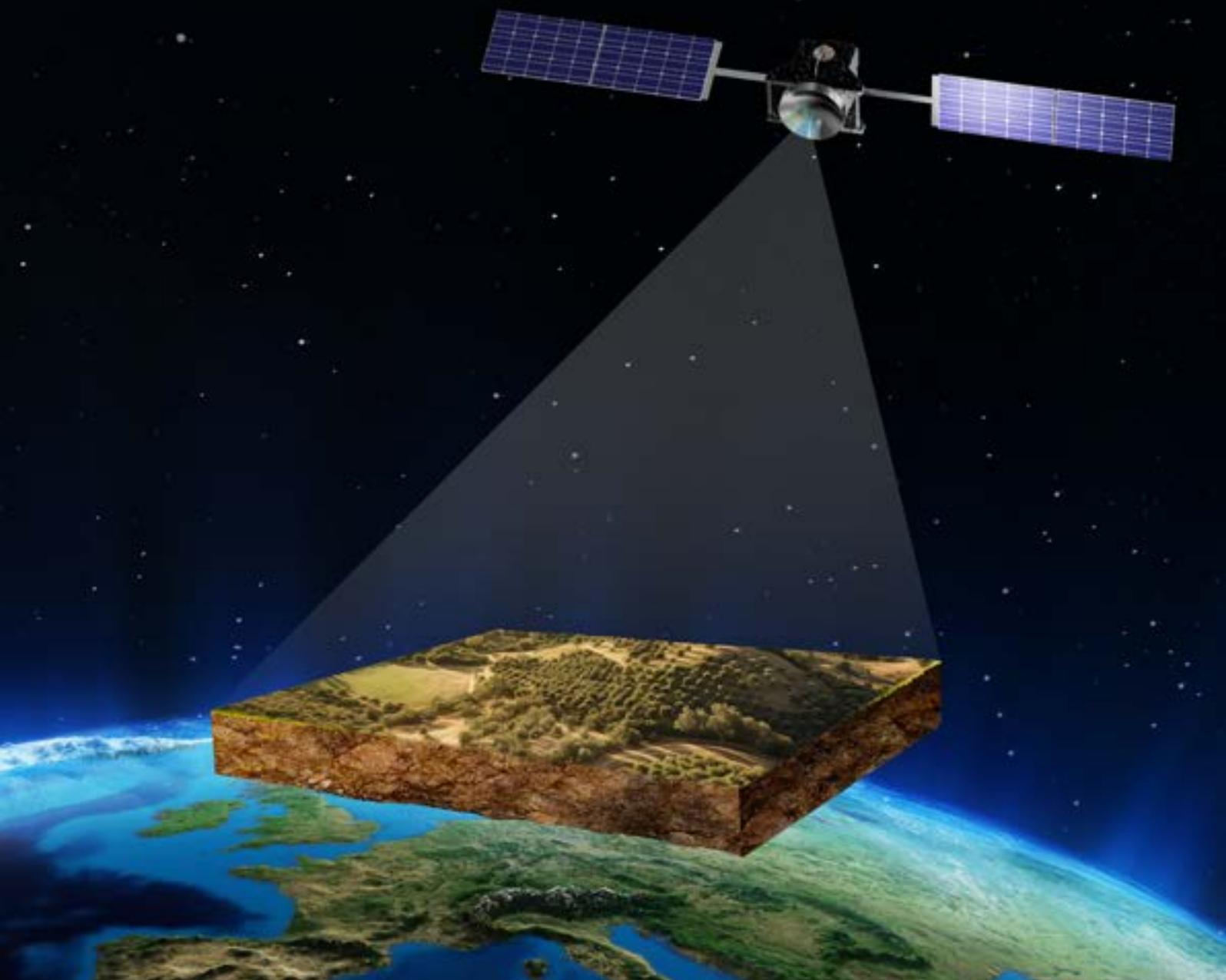


MONITOREO DE BOSQUE

PRIMARIO Y PURMA

USANDO IMÁGENES DE SATÉLITE SENTINEL-2 EN FINCAS DE CAFÉ



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA

Solidaridad

AMAZONÍA CONNECT - Rumbo a una producción agropecuaria baja en carbono y la conservación de la biodiversidad en la Amazonía

Amazonía Connect es una iniciativa de USAID, Solidaridad, Earth Innovation Institute, National Wildlife Federation, y la Universidad de Wisconsin-Madison. En colaboración con el Programa Regional Ambiental para la Amazonía, productores, compañías, gobiernos locales e instituciones financieras, Amazonía Connect promoverá y escalará la adopción de una agricultura de bajo carbono y la producción sostenible de productos básicos en Brasil, Colombia y Perú.

Créditos

Investigación:
Christian Vargas

Coordinación y revisión técnica:
Belinda Tello

Revisión:
Ada Lis Rosel, Solidaridad

Equipo técnico del PNCB:
Daniel Arturo Castillo
Rolando Eduardo Vivanco
Joselyn Montalban

Todo el equipo técnico del Programa Café:

Ezio Varese
Benjamin Kroll
Lourdes Villegas
Kevin Sulca
Raul Vega
Alexis Lopez
Alicia Rimapa
Juan Julca

Validado por:



CONTENIDO

Glosario	05
1. Introducción	06
1.1 Sobre SOLIDARIDAD.	
1.2 Sobre GEOBOSQUES.	
1.3 Monitoreo de la deforestación en el Perú.	
1.4 Objetivos.	
1.4.1 Objetivo general.	
1.4.2 Objetivo específico.	
2. Área de estudio	10
3. Datos satelitales	14
4. Metodología	17
4.1 Análisis espectral.	
4.2 Capa base de bosque y purma.	
4.3 Capa de pérdida de bosque - purma.	
5. Evaluación de la exactitud	27
6. Resultados	29
7. Discusión	42
8. Conclusiones y recomendaciones	46
9. Referencias	48



GLOSARIO

B

Bosque

Ecosistema en que predominan especies arbóreas en cualquier estado de desarrollo, cuya cobertura de copa supera el 10% en condiciones áridas o semiáridas o el 25% en circunstancias más favorables.

Bosque primario

Bosque con vegetación original caracterizado por la abundancia de árboles maduros con especies del dosel superior o dominante, que ha evolucionado de manera natural.

Bosque secundario

Bosque de carácter sucesional, surgido como proceso de recuperación natural de áreas en las cuales el bosque primario fue retirado como consecuencia de actividades humanas o por causas naturales.

D

Deforestación

Es la conversión del bosque a otro tipo de uso territorial, como la agricultura, pastizales, minería, etc. La ley forestal considera a la deforestación como la eliminación natural o antrópica de la cobertura de bosque natural.

Degradación de bosques

Cambios que afectan negativamente la estructura y funcionamiento de los bosques, reduciendo la capacidad del bosque para brindar productos y/o servicios ecosistémicos.

I

Imagen de satélite

Es la representación visual de la información capturada por el sensor montado en un satélite artificial.

P

Píxel

Unidad mínima de una imagen digital.

Proyección

La proyección cartográfica es un sistema de representación gráfica que establece una relación ordenada de los puntos de la curvatura de la tierra en una superficie plana (mapa, imagen satelital, otros).

Reflectancia BOA

Es la relación entre la radiación incidente sobre el píxel y las propiedades reflectivas de los elementos que están conformando el píxel considerando el efecto atmosférico.

Reflectancia TOA

Es la relación entre la radiación incidente sobre el píxel y las propiedades reflectivas de los elementos que están conformando el píxel (no considera el efecto atmosférico).

Resolución espacial

Se refiere al tamaño de píxeles que componen la imagen de satélite, mientras más pequeño es el píxel mayor es la resolución espacial.

Resolución espectral

Es el número y ancho de bandas que puede registrar el sensor.



01

INTRODUCCIÓN

1.1 Sobre SOLIDARIDAD

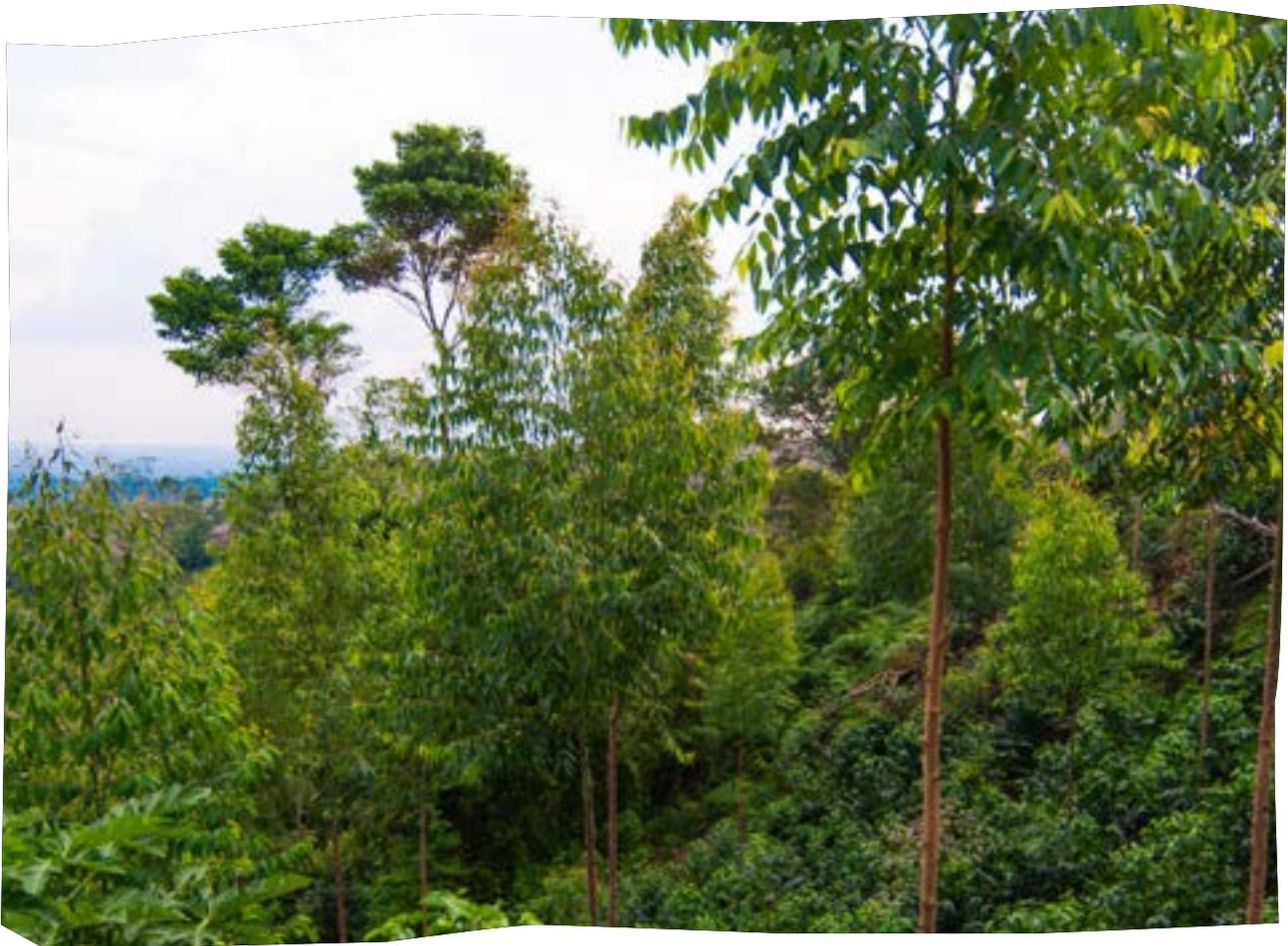
Solidaridad es una organización internacional sin fines de lucro, cuya misión es reunir a los actores de las cadenas de suministro, incluirlos en soluciones innovadoras para mejorar su producción, asegurando la transición hacia una economía sostenible e inclusiva que maximiza los beneficios para todos.

1.2 Sobre GEOBOSQUES

GEOBOSQUES es la plataforma de monitoreo de los cambios sobre la cobertura de los bosques, a través de la cual se distribuye información a los distintos usuarios de los cambios que ocurren en los bosques, esta información es distribuida a través de reportes, informes, mapas, visores y correos electrónicos.

La información del monitoreo de los bosques está articulada al Módulo de Monitoreo de la Cobertura de Bosques (MMCB), el cual se encuentra bajo la coordinación del Ministerio del Ambiente en forma colaborativa con el SERFOR y que constituye parte del SNIFFS y del SINIA, como lo indica el Decreto Legislativo N° 1220 del 2015.

Solidaridad y el PNCBMCC, han firmado un convenio de cooperación interinstitucional con el objetivo de realizar acciones orientadas a la conservación de bosques, a través del uso de herramientas digitales y el intercambio de información sobre monitoreo de bosques. Acorde a uno de los compromisos donde se establece la participación en el desarrollo de investigaciones conjuntas relacionadas al monitoreo de bosques, es que se ha trabajado el presente piloto de manera muy estrecha con el equipo del PNCBMCC, desde el diseño de la metodología, hasta la validación, esta última tarea se encomendó a un especialista del PNCBMCC, el detalle se muestra en el ítem 5. Evaluación de la exactitud.



1.3 Monitoreo de la deforestación en el Perú

Desde el año 2010, los bosques amazónicos peruanos son monitoreados de manera constante a través de la plataforma Geobosques en los siguientes módulos:

- Bosque/Pérdida de bosque; resultados anuales
- Alerta temprana de deforestación; resultados quincenales

Para ambos casos se usan imágenes satelitales de Landsat cuya resolución espacial es de 30 metros.

El resultado del monitoreo está disponible en informes, pero además en formato *.shp que puede ser descargado, para generar varios análisis relacionados a la deforestación, esta información está disponible para toda la región amazónica del Perú, es decir también en las áreas donde se desarrolla los cultivos de café; sin embargo, el ámbito de acción de Solidaridad son fincas familiares de aproximadamente 4 ha, lo ideal sería contar con un monitoreo con resolución espacial de mayor detalle, por lo que el presente piloto que se ubica en un sector de la Región San Martín, trabaja con imágenes satelitales Sentinel-2 de hasta 10m de resolución espacial, y que además al ser desarrollado con fines de monitoreo de fincas de café se optó por crear una nueva capa base de bosques y purma acorde a la nueva escala de monitoreo, para posteriormente detectar la pérdida de cobertura en estas áreas.



1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El objetivo general es monitorear a los agricultores capacitados con las buenas prácticas, conocer si están implementando lo aprendido, conservando bosques y siendo conscientes que es posible una agricultura libre de deforestación, además se necesita conocer como ha sido la dinámica de la cobertura en las fincas desde la implementación de la intervención en el año 2018, haciendo la comparación con los años posteriores.

1.4.2 Objetivo específico

El objetivo específico es desarrollar una metodología piloto para el monitoreo de bosques y purmas usando imágenes de satélite Sentinel-2 en el área que comprende las provincias de Moyobamba, Rioja y parte de Rodríguez de Mendoza que en total abarca 12 000.00 km².



02

**ÁREA DE
ESTUDIO**

El área de estudio corresponde al cuadrante MTU de las imágenes Sentinel-2 (E 199980, N 940000 y E 309770, N 9290210), el cuadrante posee un área de 100 km x 100 km y cubre casi en su totalidad las provincias de Rioja y Moyobamba en el departamento de San Martín, y parte de los departamentos de Amazonas y Loreto.

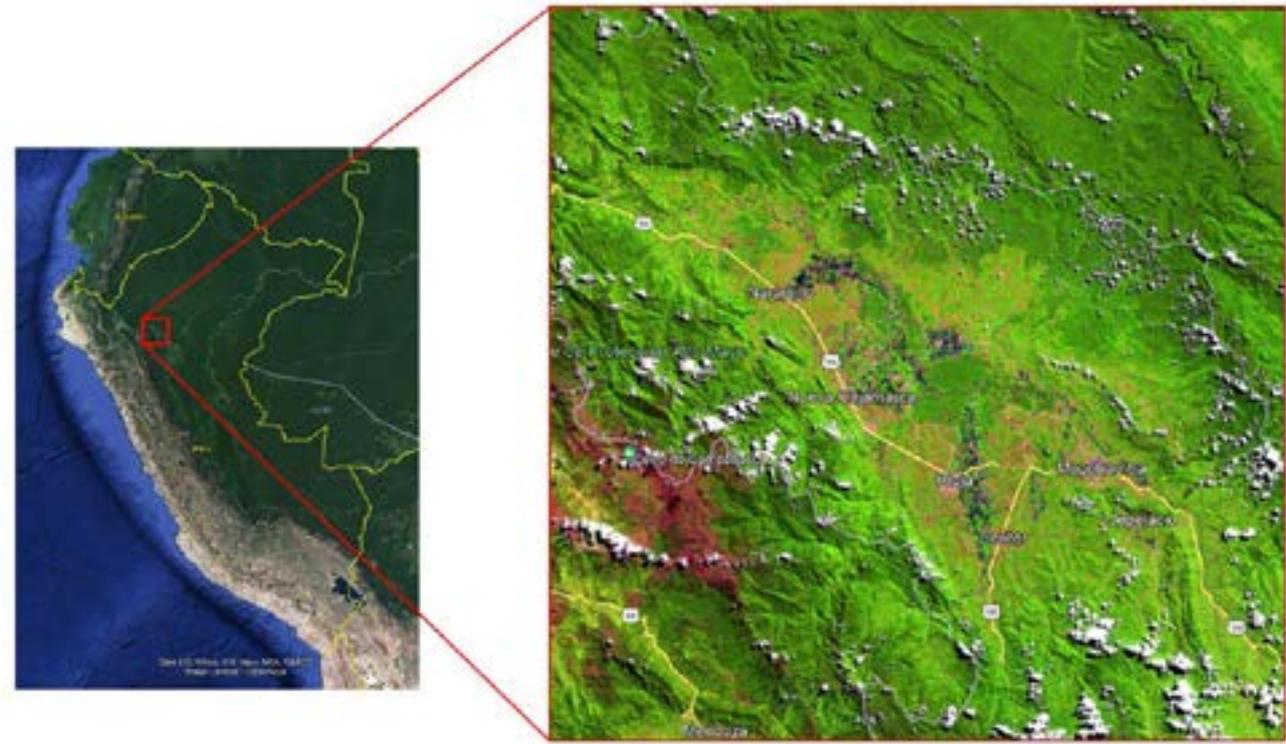


Figura 1. Área de estudio

El área de estudio al encontrarse dentro de la región Amazónica se caracteriza por tener una estación húmeda que se da principalmente entre noviembre y mayo, la cual se caracteriza por el incremento de nubosidad, limitando la obtención de imágenes idóneas para el monitoreo satelital. La estación seca por el contrario presenta menor presencia de nubes, por lo que la obtención de imágenes con baja presencia de nubes es más recurrente. Los sistemas de monitoreo para la detección de alertas tempranas de la deforestación que usan imágenes ópticas como Landsat reportan mayor ocurrencia de pérdida de bosques en la estación seca (Vargas, et al., 2019) (Hansen, et al., 2016). Por lo que esta estación es la idónea para la detección de la deforestación.

La disponibilidad del número de imágenes idóneas para el monitoreo puede variar dependiendo de los años y esto puede darse debido a los distintos fenómenos atmosféricos que se han venido dando, motivo por el cual tendremos años con mayor disponibilidad de imágenes con baja presencia de nubes que otros, entonces tendremos zonas donde no se detectó la deforestación debido a la presencia de nubes. Esta deforestación probablemente se detecte en el año siguiente.

Según datos de Geobosques en el área de estudio en el periodo 2001 al 2020 se perdieron 116 266.23 ha de bosques húmedos tropicales, siendo los años 2005, 2007 y 2010 en los que ocurrió la mayor pérdida de bosque. La figura 2 nos muestra que en el último decenio la tendencia fue decreciendo, teniendo los años 2018 y 2020 como años anómalos, presentando mayor pérdida de bosques que sus años vecinos. Saber qué sucedió en esos años necesita de un análisis más exhaustivo.

Es importante saber que la información de Geobosques está enfocada en toda la amazonía y tiene una escala de análisis aproximada de 1/100 000, por lo que un análisis de mejor detalle o que usen imágenes de mejor resolución espacial podría dar resultados distintos.



Figura 2. Pérdida de bosques primarios para el periodo 2001 - 2020 en el área de estudio







03

Datos

satelitales

La misión Sentinel-2 se basa en una constelación de dos satélites idénticos situados en misma órbita polar, con un desfase de 180° entre sí, para optimizar la cobertura. Está diseñada para proporcionar una alta frecuencia de revisita de 5 días en el Ecuador. El satélite Sentinel-2A se lanzó al espacio el 23 de junio de 2015 y el Sentinel-2B el 7 de marzo de 2017.

Cada uno de los satélites gemelos está equipado con un instrumento óptico multispectral (MSI, Multispectral Instrument) que permite capturar datos de 13 bandas espectrales: cuatro bandas con una resolución espectral de 10 m, seis bandas de 20 m y tres bandas de 60 m (ver tabla 1).

Tabla1. Características de las bandas de Sentinel-2

Bandas	Longitud de onda central (µm)	Resolución espacial (m)
1 – Aerosol costero	0.443	60
2 – Azul	0.490	10
3 – Verde	0.560	10
4 – Rojo	0.665	10
5 – Rojo borde	0.705	20
6 – Rojo borde	0.740	20
7 – Rojo borde	0.783	20
8 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.842	10
8A – Infrarrojo cercano (NIR)	0.865	20
9 – Vapor de agua	0.945	60
10 – Cirrus	1.375	60
11– Infrarrojo de onda corta	1.610	60
12 – Infrarrojo de onda corta	2.190	20

Sentinel-2, tienen mejor resolución espacial y espectral que Landsat-8, pero lamentablemente también tiene mayor presencia de ruido y píxeles con problemas. Los píxeles con problemas muchas veces no se aprecian a simple vista, pero sí en los resultados. En la figura 3, se muestra una imagen Sentinel-2 combinación RGB120904 y la componente 6 del Análisis de Componentes Principales (PCA) de las bandas de 20m, la cual muestra presencia de ruido y unos problemas lineales, los cuales están dispersos en forma de franjas en todas las imágenes, este problema se incrementa cuando hay presencia de nubes.

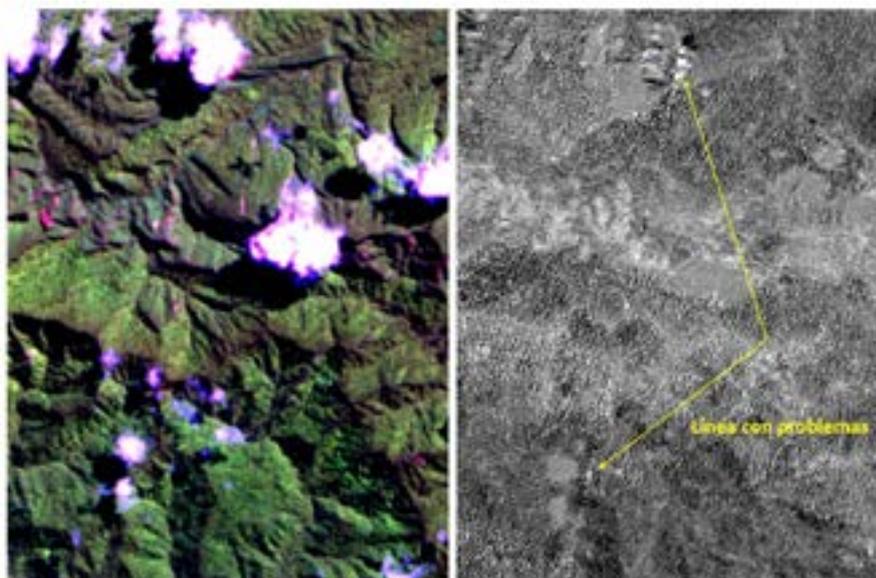


Figura 3. (Izquierda) Imagen Sentinel - 2, (Derecha) componente 6 del PCA a las bandas de 20m.

Sentinel-2 cuenta con varios productos con distinto nivel de procesamiento, de los cuales destacan el nivel 1C y 2A. El nivel 1C, se caracteriza por ser una imagen ortorectificada en la proyección UTM y con niveles digitales de reflectancia aparente al tope de la atmósfera (TOA, Top-of-Atmosphere reflectances), la imagen cubre 100km x 100km. El nivel 2A, es una evolución del Nivel 1C en el que se aplican correcciones atmosféricas para proporcionar las ortoimágenes con niveles digitales expresados en valores de reflectancia reales a nivel de superficie (BOA, Bottom-of-Atmosphere reflectances). Esta imagen posee las mismas dimensiones que el nivel 1C (Instituto Geografico Nacional, 2018).

Para este estudio se usaron 59 imágenes del nivel 1C con menos del 50% de cobertura de nubes en la imagen, la última imagen usada fue tomada el 10 de octubre del 2021.

El nivel 1C debido a que el nivel 2A solo está disponible desde finales del año 2018 y la mayoría de las imágenes no están disponibles para su inmediata descarga. Todas las bandas de las imágenes fueron integradas y remuestreadas a 10m.

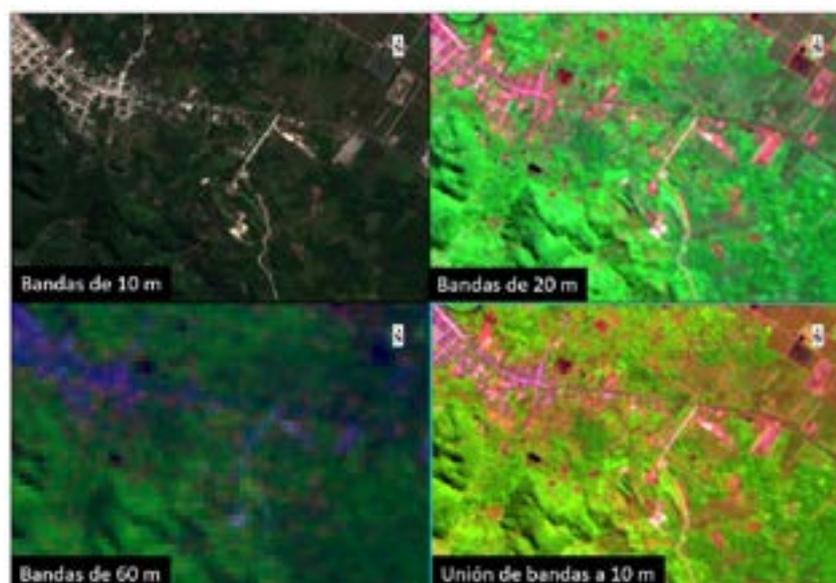


Figura 4. Resolución de imágenes de 10m, 20m, 60m, y la unión de todas las bandas a 10m



04

Metodología

La metodología se divide en 3 etapas: Análisis espectral, detección de bosque - purma y detección de la deforestación.

4.1 Análisis espectral

Para el análisis espectral se extrajeron muestras de la imagen Sentinel-2 tomada el 23 de julio del 2017, esta imagen fue elegida debido a que presenta baja presencia de nubes y neblina. También se usó como información auxiliar, imágenes de alta resolución de Google Earth e información de campo recolectada por Solidaridad.

Todos los píxeles que conforman la imagen tienen la reflectancia de los materiales que conforman el píxel. Los píxeles de Sentinel-2 tienen 10m, 20m y 60m, a mayor el tamaño, mayor la probabilidad de mezclas espectrales en el píxel. La figura 5, muestra una imagen de alta resolución espacial con la simulación del tamaño de píxeles de 20m x 20m de Sentinel-2, dentro de los recuadros se puede observar que hay más de un material dentro de ellos. En la zona urbana hay mezclas de casas, vías y árboles, así como algunos píxeles donde solo hay bosque secundario. En la figura 6, se puede ver la mixtura espectral que hay cuando un área es deforestada, algunos píxeles pueden estar cubiertos por bosque en pie y suelo, píxeles de árboles de copa ancha y de copa pequeña, así como árboles con purma o áreas de cultivos.



Figura 5. Mixtura espectral en zona urbana



Figura 6. Mixtura espectral en bosque y deforestación

Se extrajeron muestras espectrales de bosque primario, bosques secundarios, purmas, pastos, nubes, neblina, agua y sus respectivas mezclas espectrales. La figura 7, muestra el promedio de diferentes muestras de bosque primario, bosque secundario y purma, las cuales se caracterizan por tener valores de reflectancia similares en las bandas del espectro visible (1 – 4), presentando valores más bajos en la banda 4, los cuales se van incrementando progresivamente hasta la banda 1. En las bandas del SWIR (11 – 12), el bosque primario tiene valores más bajos, algo similar se puede apreciar en zonas de aguajales y la reflectancia en estas bandas aumenta ligeramente en purma u otros tipos de vegetación en proceso de crecimiento. En las bandas de rojo borde y NIR (5 – 9), la purma tiene valores más altos de reflectancia, seguido por el bosque secundario, el bosque primario tiene valores más bajos debido a las sombras que se encuentran entre las copas de los árboles. Otra característica es que la vegetación que está en proceso de crecimiento tenga mayor reflectancia en las bandas del NIR (8 - 9).

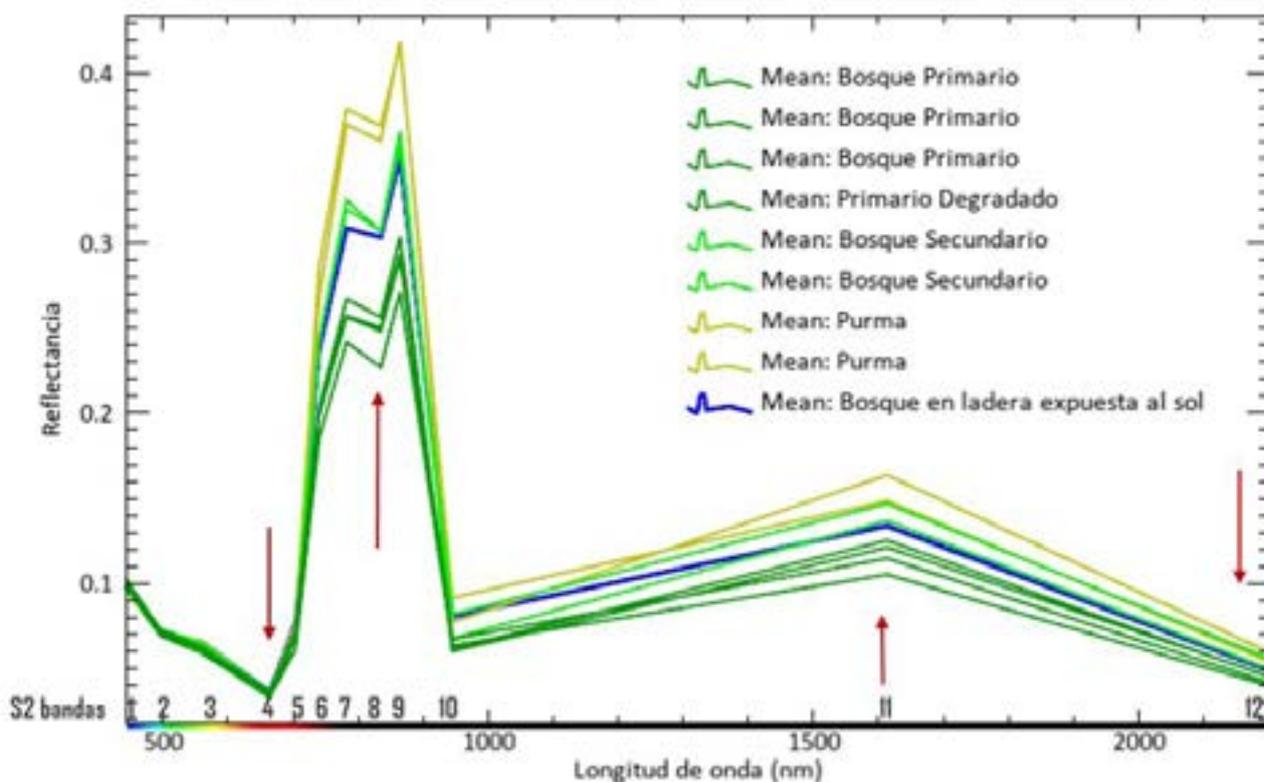


Figura 7. Firmas espectrales de bosque primario, bosque secundario y purma

Debido a estas características se consideró los siguientes conceptos operativos:

Bosque 1: Pixeles con presencia de árboles maduros densos, de copa ancha, presenta la reflectancia más baja en las bandas del rojo borde hasta el SWIR (5 – 12). Incluye aguajales densos. Puede confundirse con arrozales.

Bosque 2: Pixeles con presencia de árboles de copa ancha, su densidad varía de densa a semidensa, son árboles que podrían no haber terminado su proceso de crecimiento, incluye algunos tipos de bosque primario y bosques secundarios de copa ancha.

Puma: Pixeles con presencia de árboles jóvenes de copa pequeña y densos, puede incluir arbustos densos y/o árboles de copa ancha de baja densidad.

No bosque: Incluye áreas con presencia de suelo, presencia de vegetación no densa, áreas de arbustos dispersos, zonas urbanas, cuerpos de agua, áreas deforestadas, entre otros.

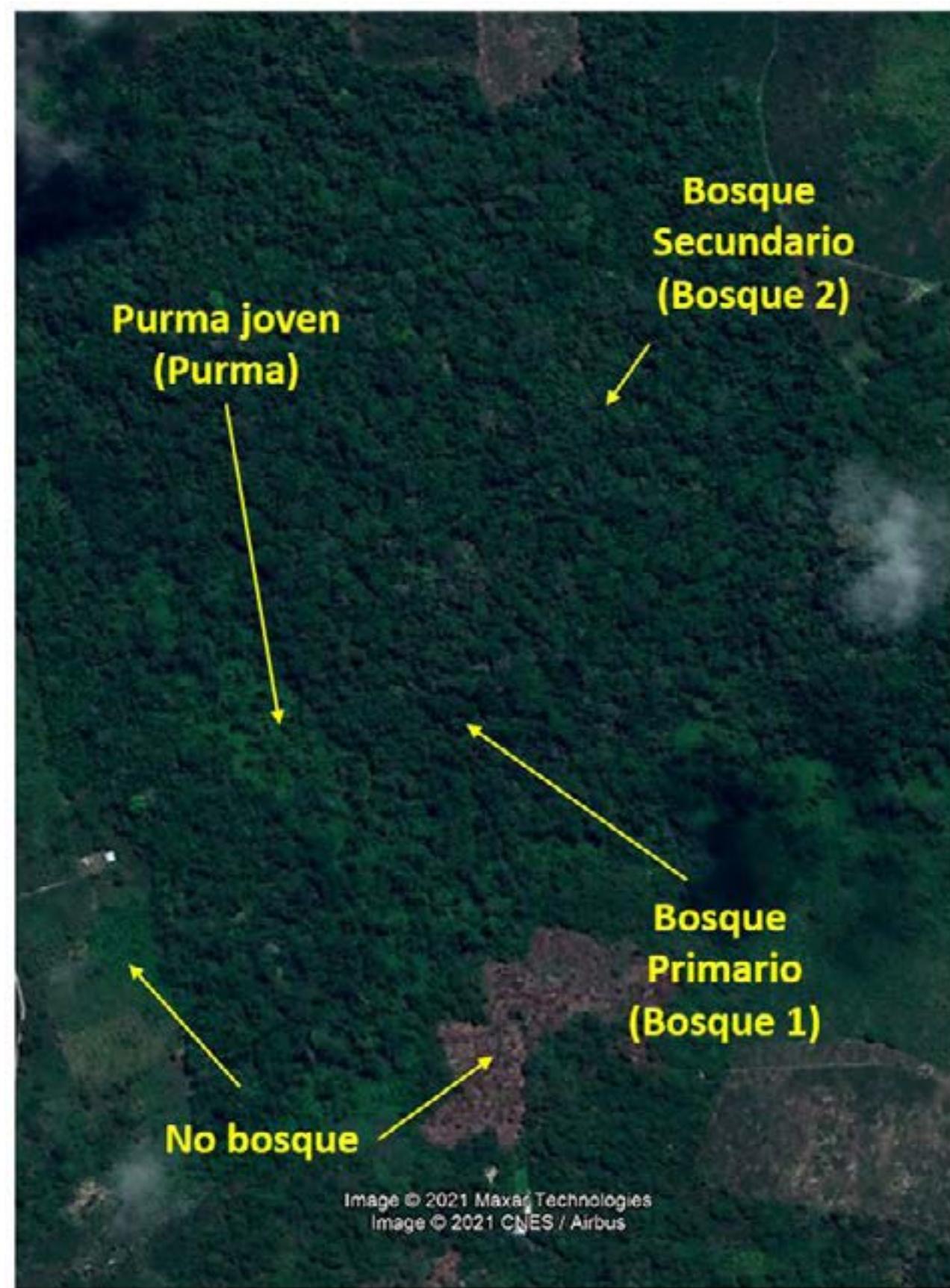


Figura 8. Coberturas mapeadas vistas desde una imagen de alta resolución espacial

La figura 9, muestra el promedio de algunas de las muestras de área urbana, suelo desnudo y deforestación, las cuales se caracterizan por tener una mayor reflectancia en la banda 11 con respecto a la banda 2 o 3, la intensidad de la reflectancia varía dependiendo de la variedad del tipo de suelo, contenido de humedad o la mezcla que este tenga con otros materiales como la vegetación. Las áreas urbanas se caracterizan por tener alta reflectancia en todas las bandas, esto se debe principalmente por contener superficies lisas y muy reflectantes como son los techos, especialmente si son de calamina. Los suelos desnudos por lo general tienen menor reflectancia que las áreas urbanas, esto puede variar, por ejemplo, las áreas de playas poseen altos valores de reflectancia, incluso podrían ser más altas que algunas zonas urbanas. La reflectancia de las áreas deforestadas varían dependiendo de la mezcla que tengan, el pixel de un área deforestada, está compuesto por suelo desnudo o la mezcla de suelo con vegetación muerta, vegetación verde, troncos de árboles, otros. Estas variedades de mezclas se muestran mejor en las bandas del NIR y SWIR (Vargas, et al., 2019)

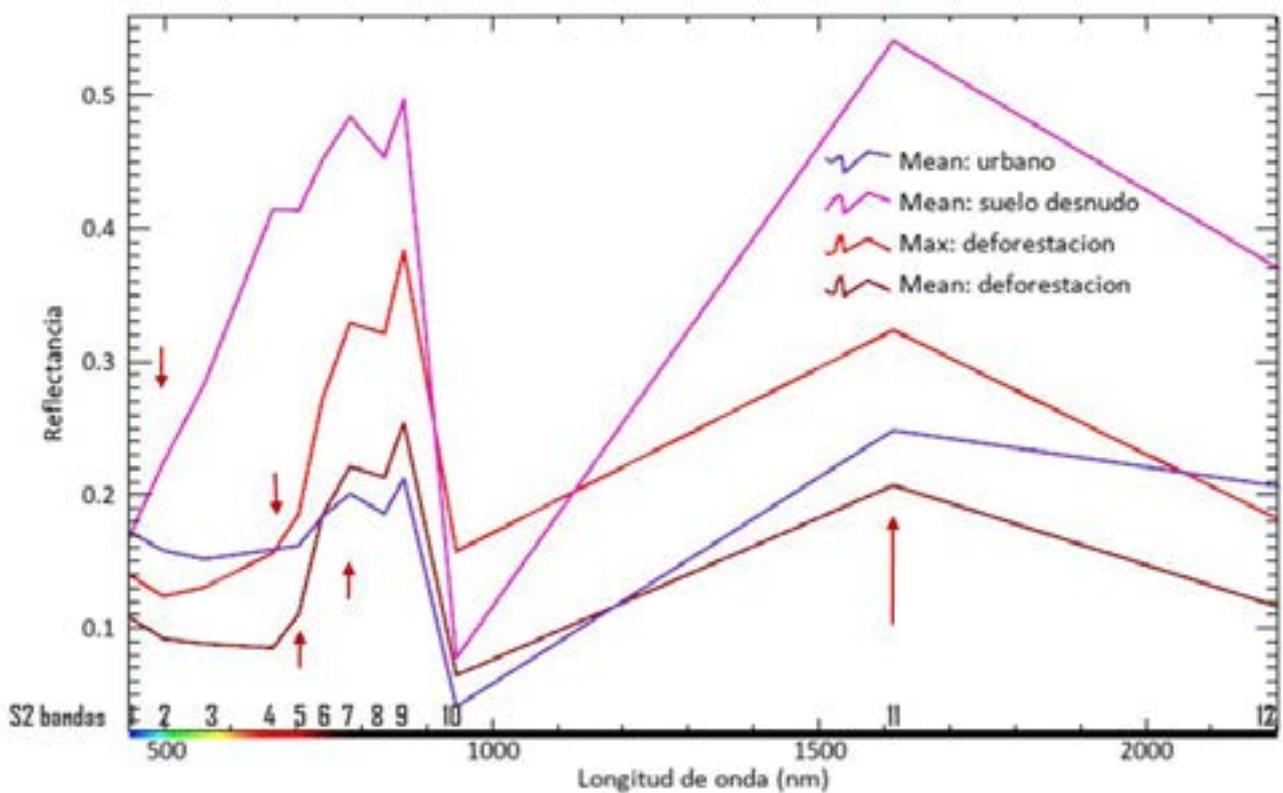


Figura 9. Ejemplos de firmas espectrales de área urbana, suelo desnudo y deforestación.

Las imágenes también están cubiertas por áreas con presencia de nubes y sombras, para conocer sus características espectrales se crearon muestras.

Las nubes tienen una alta reflectancia en todas las bandas cuando son densas, en algunos casos estas nubes pueden tener una reflectancia similar al de zonas urbanas o zonas de suelo seco muy reflectante como las zonas de playas con zonas urbanas y áreas de suelo seco o muy reflectante como las zonas de playas (ver figura 10). Las nubes delgadas y neblinas son las que más problemas da, debido a que su reflectancia se mezcla con el material que tiene bajo ella, esto hace sumamente difícil su identificación exacta. Las sombras poseen valores muy bajos de reflectancia, las sombras pueden confundirse con cuerpos de agua, agujales o algunos bosques localizados en áreas de fuerte pendiente donde no llega el sol a la hora de la toma de la imagen. (ver figura 11).

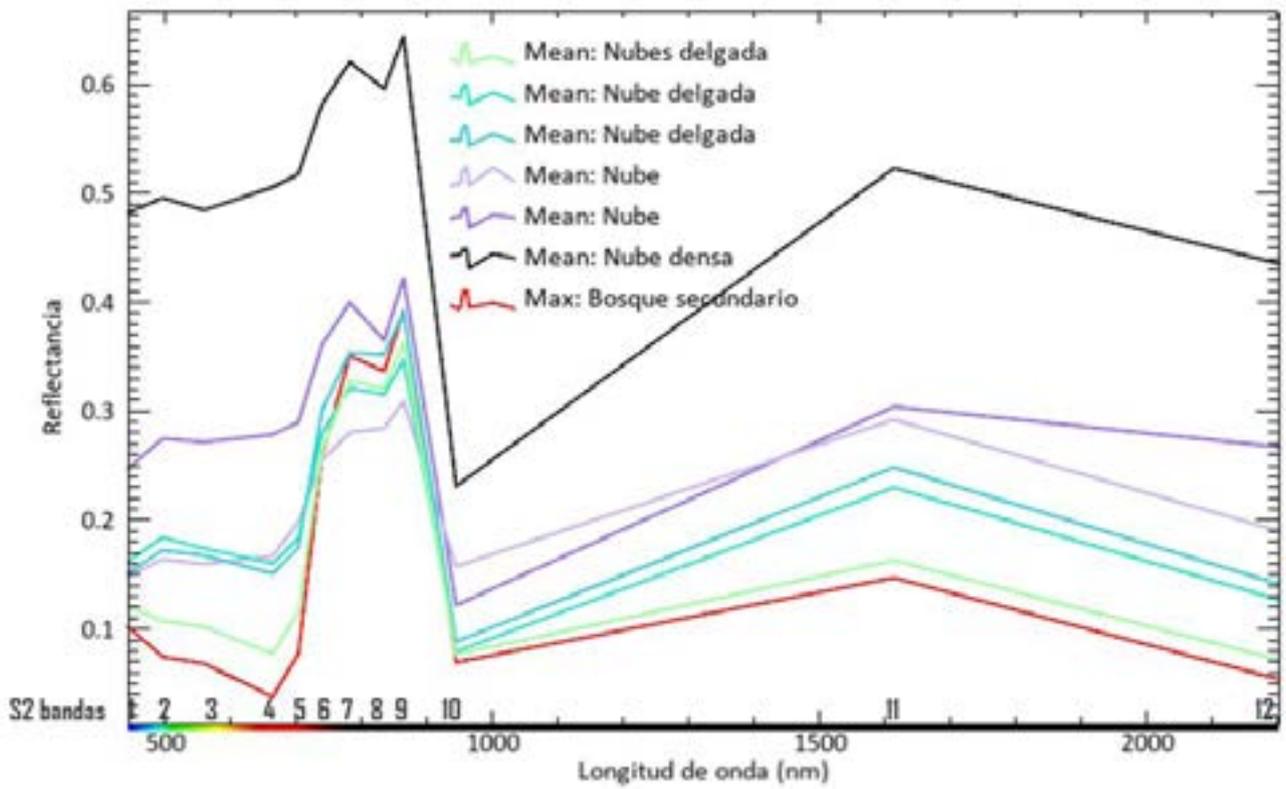


Figura 10. Ejemplos de firmas espectrales de nubes

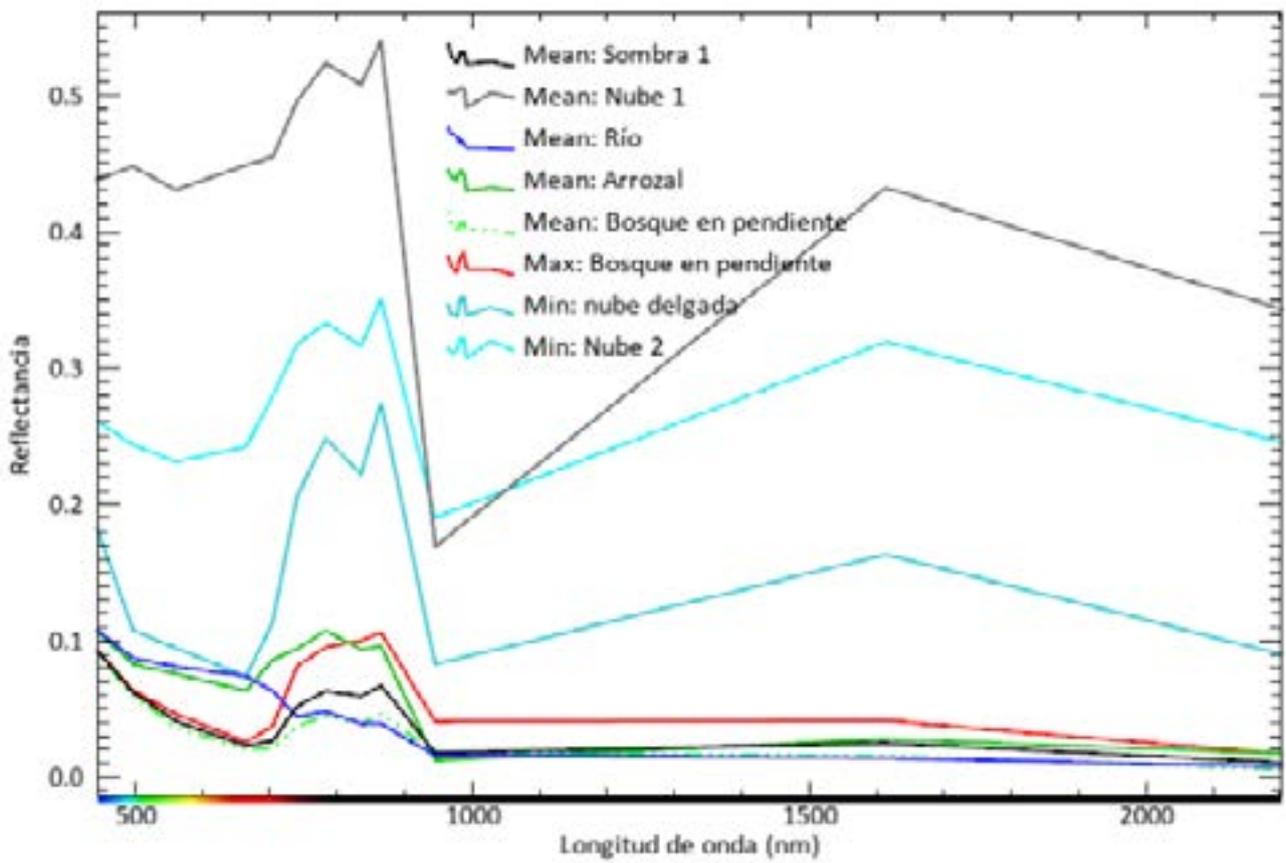


Figura 11. Ejemplos de firmas espectrales de nubes y sombras

Finalmente se crearon muestras en áreas donde la imagen presenta errores, estos errores poseen comportamientos espectrales muy variados, algunos muy similares al de la deforestación o el bosque, por lo que potencialmente son un problema a la hora de detectar estos materiales.

El análisis espectral permitió conocer el comportamiento espectral de los distintos materiales que conforman la imagen y sus respectivas mezclas espectrales.

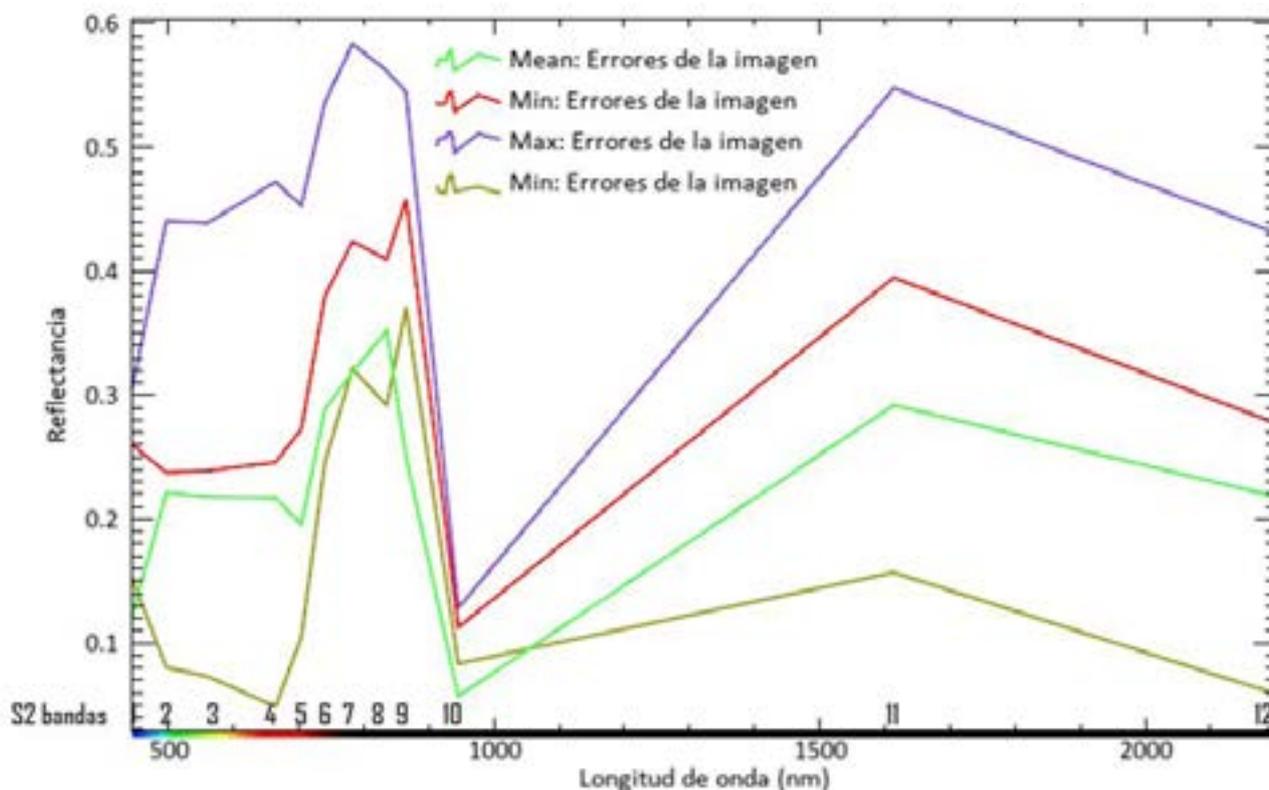


Figura 12. Firmas espectrales de áreas con errores de la imagen

4.2 Capa base de bosque y purma

Para la creación de la capa de bosque y purma se usaron 21 imágenes tomadas del 2016 al 2018, el primer paso es la extracción de cobertura vegetal libre de nubes, sombra y neblina, esto se hizo usando un árbol de decisiones binario, las expresiones y/o algoritmos para separar estas coberturas fueron derivados del análisis espectral, este árbol de decisiones se aplicó a todas las imágenes. El primer árbol es restrictivo elimina incluso áreas con presencia de neblina muy tenue, todas las imágenes fueron integradas en una sola, el resultado fue una imagen limpia de nubes, neblina y sombras, pero con muchos vacíos de información, para cubrir estos vacíos se modificó el árbol de decisiones con la finalidad de obtener resultados menos restrictivos, el resultado fue usado para cubrir los vacíos de información, finalmente se obtuvo el 97.14 % de área de estudio libre de nubes y/o sombras, al ver los resultados se pudo observar que a pesar de usar 21 imágenes todavía quedaban muchas áreas sin información, para rellenar estas áreas se aplicó un árbol de decisiones con ligeras modificaciones, obteniéndose resultados más conservadores, esta información fue usada para crear imágenes para cada año, incluyendo el valor máximo y mínimo de reflectancia de cada año (ver figura 13).

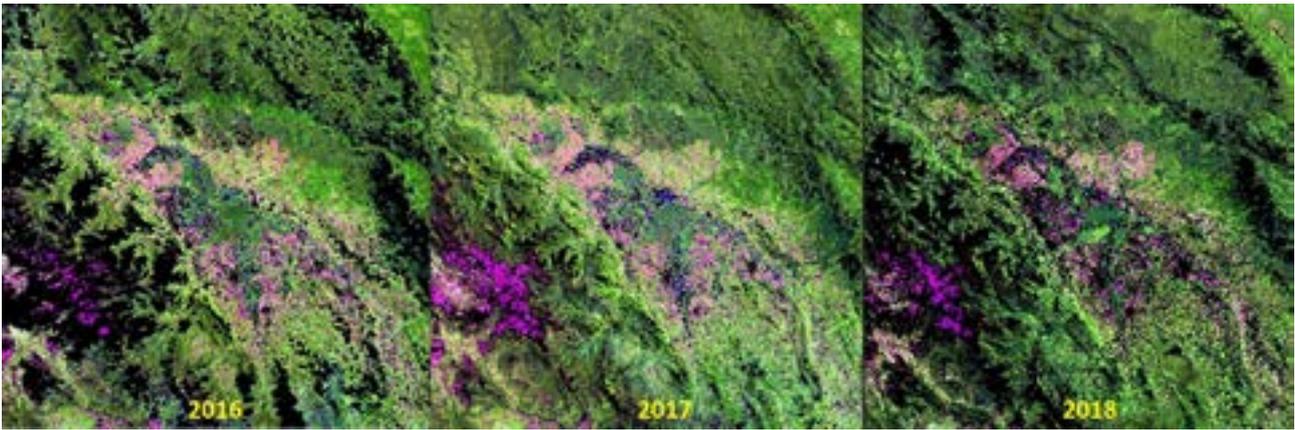


Figura 13. Imágenes libres de nubes para los años 2016, 2017 y 2018

La imagen base para la detección de la cobertura de bosques fue tomada el 27 de julio del 2017, esta imagen es la que presenta menos presencia de nubes, neblina y sombras, a esta imagen se le aplicó un árbol de decisiones diseñado para la detección de las coberturas de bosque 1, bosque 2 y purma (ver figura 14).

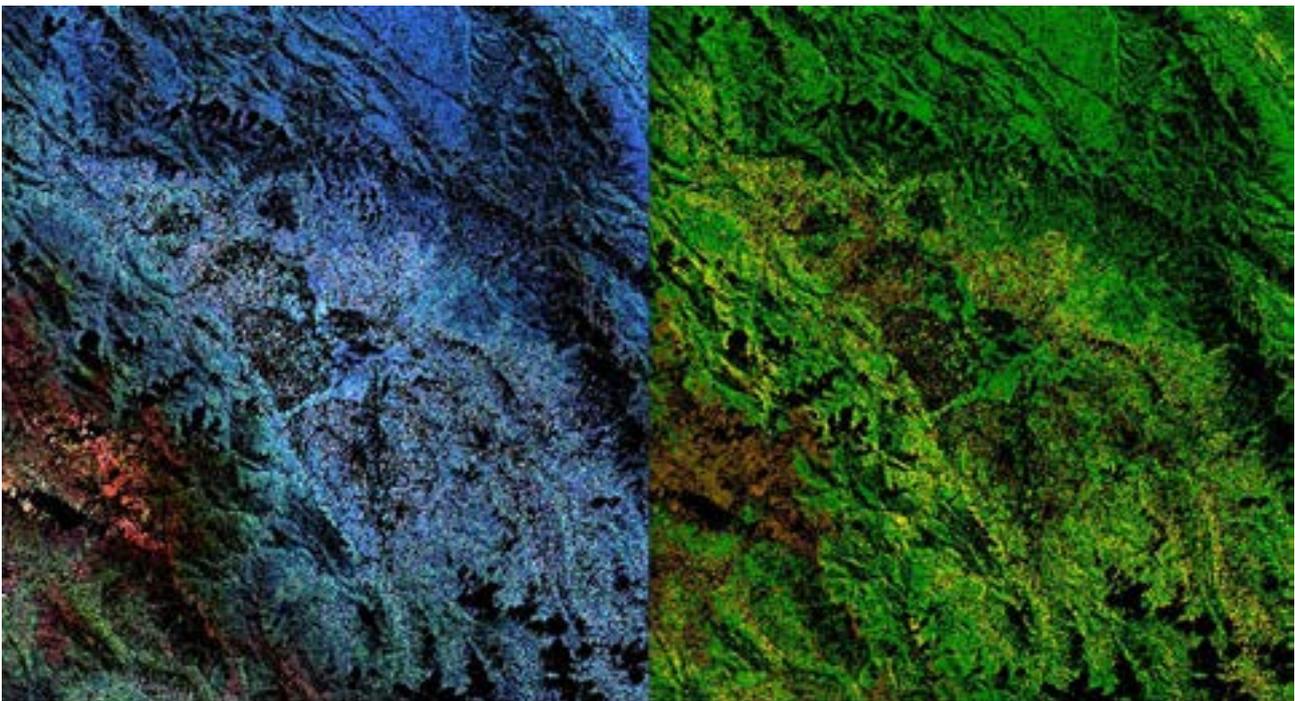


Figura 14. Imágenes de 23/07/2017 sin nubes y su resultado de la clasificación de coberturas.

Los espacios negros (sin información) fueron rellenados aplicando el árbol de decisiones a las otras imágenes. Obteniéndose un el 2.86% de áreas sin monitorear producto de la constante presencia de nubes y/o sombras.

4.3 Capa de pérdida de bosque-purma

Para detectar la pérdida de bosque-purma se aplicó inicialmente la técnica DSU, la cual es capaz de detectar distintos porcentajes de suelo y vegetación en el píxel (Vargas, et al., 2019), lamentablemente los errores que tiene la imagen Sentinel-2 también fueron detectados (Ver figura 15). Esto se debe a que algunos de estos errores poseen características espectrales similares a los del suelo desnudo o mezclado con vegetación (deforestación), especialmente en las bandas que usa DSU.



Figura 15. errores en la imagen detectados como deforestación

Para evitar este problema, los errores tuvieron que ser detectados antes que la pérdida, para esto se elaboraron expresiones y/o algoritmos que fueron usados en un árbol de decisiones binario, posteriormente se usaron otros para la detección de la pérdida de cobertura.

La detección se hizo en cada imagen disponible, la cual se intersectó con la capa base de bosque y purma al 2018, estas áreas fueron incluidas en la clase “No bosque” y obteniéndose la capa final base de bosque-purma. La detección de los años 2019, 2020, 2021 intersectada con la capa final base de bosque-purma dio como resultado la pérdida de cobertura de bosque y purma. El flujo de trabajo puede verse en la figura 16.

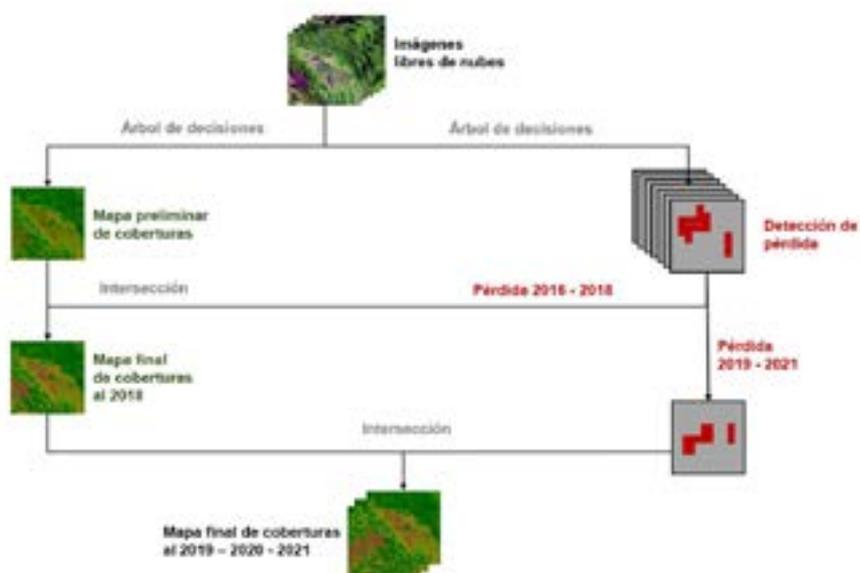


Figura 16. Flujo de trabajo para la obtención de capas de bosque-purma y deforestación

A man wearing a blue shirt and a dark cap with the number '8' is working in a coffee plantation. He is surrounded by dense green coffee bushes. A banana plant is visible in the upper left. The scene is outdoors with natural lighting.

05

**Evaluación
de la exactitud**

La evaluación de la exactitud se realizó usando un muestreo estratificado aleatorio en las fincas con las que trabaja SOLIDARIDAD y usando la capa de tipos de cobertura del 2021. Se usaron 304 muestras que fueron distribuidas de forma proporcional al área de cada clase. Las muestras de pérdida en purma, bosque 1 y bosque 2 fueron integradas en una sola.

La interpretación de cada muestra fue realizada por un experto ajeno al proceso metodológico usando imágenes Sentinel-2 de los años 2016 – 2018 para las coberturas de Bosque 1, Bosque 2, Purma y No bosque y para las coberturas de Pérdida/No pérdida se usaron imágenes SENTINEL-2 tomadas entre el 2019 y 2021. Como dato auxiliar se usó las imágenes de alta resolución disponible en la base cartográfica de ArcMap.

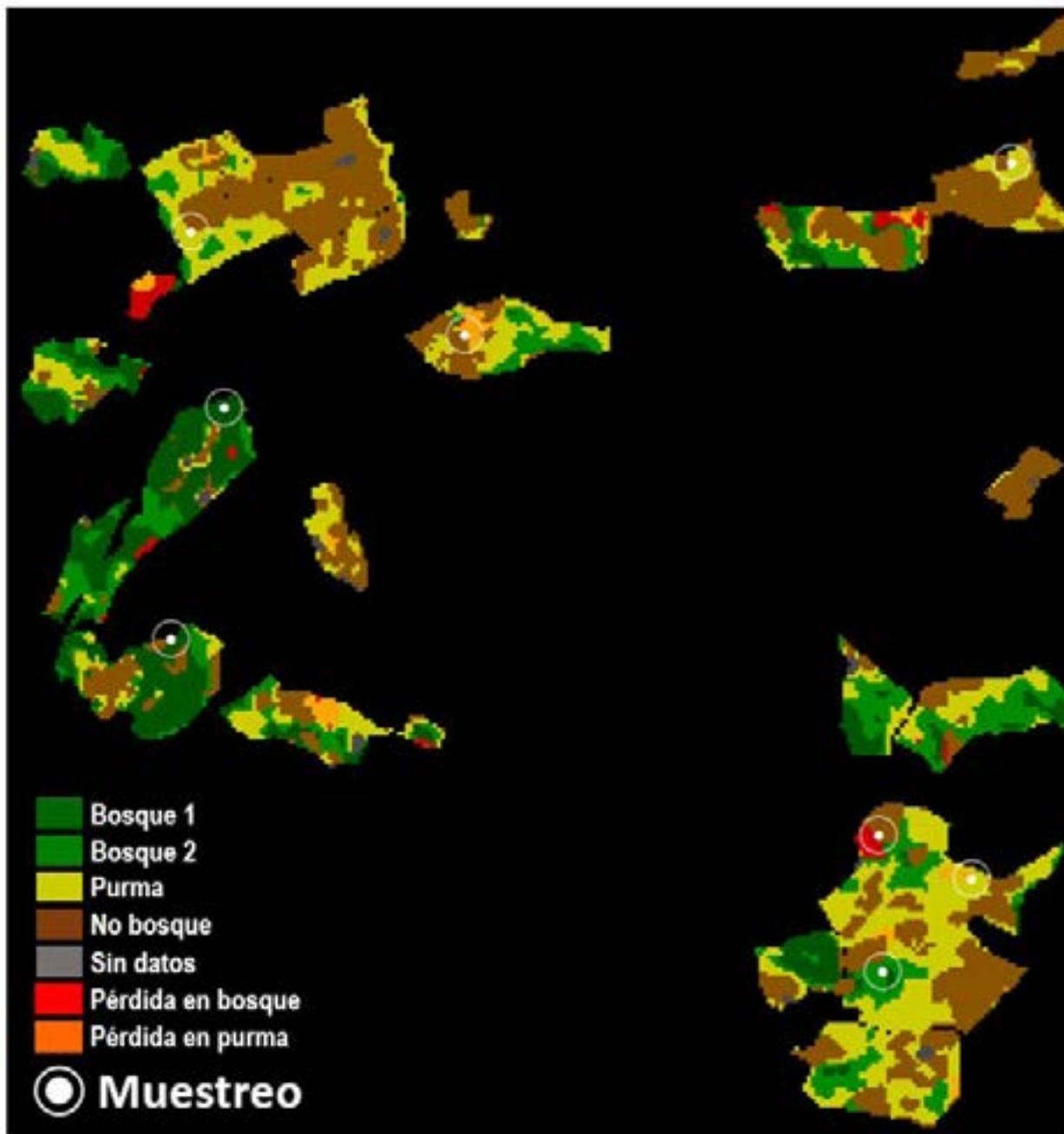


Figura 17. Ejemplo de muestreo distribuido sobre las coberturas mapeadas



06

Resultados

La metodología permitió detectar la cobertura de bosques-purma y no bosque al 2018, la cobertura de bosques fue de 732 157.7 ha, la purma de 186 490.8 ha y el no bosque 252 445.76 ha. La figura 18, muestra la capa final base de bosques-purma al 2018.

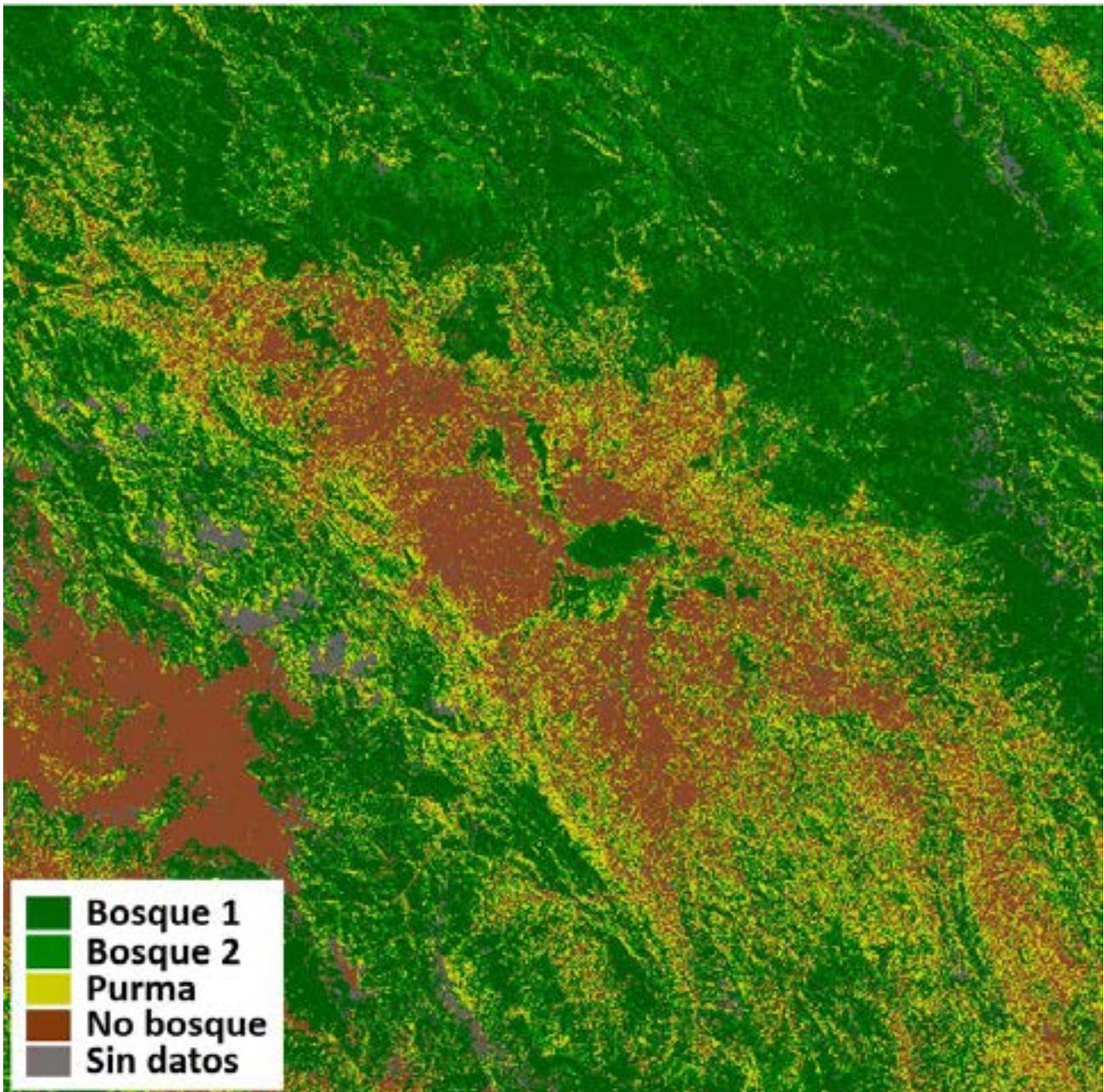


Figura 18. Capa base de bosque - purma al 2018

Las comparaciones de los resultados con imágenes de alta resolución espacial mostraron alta coincidencia en el mapeo de las coberturas. La figura 19, muestra la alta exactitud de la delimitación del bosque y purma.

La pérdida de bosques y purma tiene como unidad mínima de mapeo 1 pixel, que equivale a 0.01 ha. En la figura 20, se muestra ejemplos de la pérdida de bosque y purma detectadas.

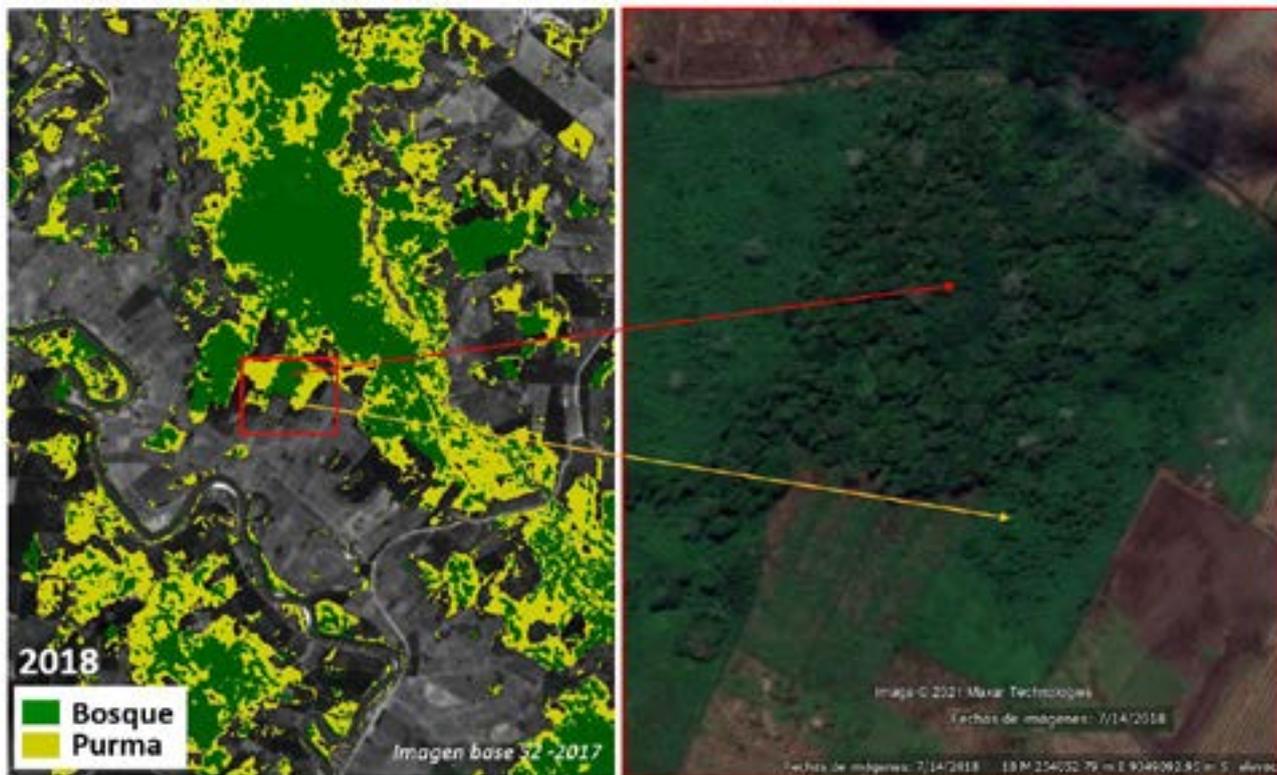


Figura 19. Mapeo de bosque y purma (izquierda) con una imagen de alta resolución (derecha)

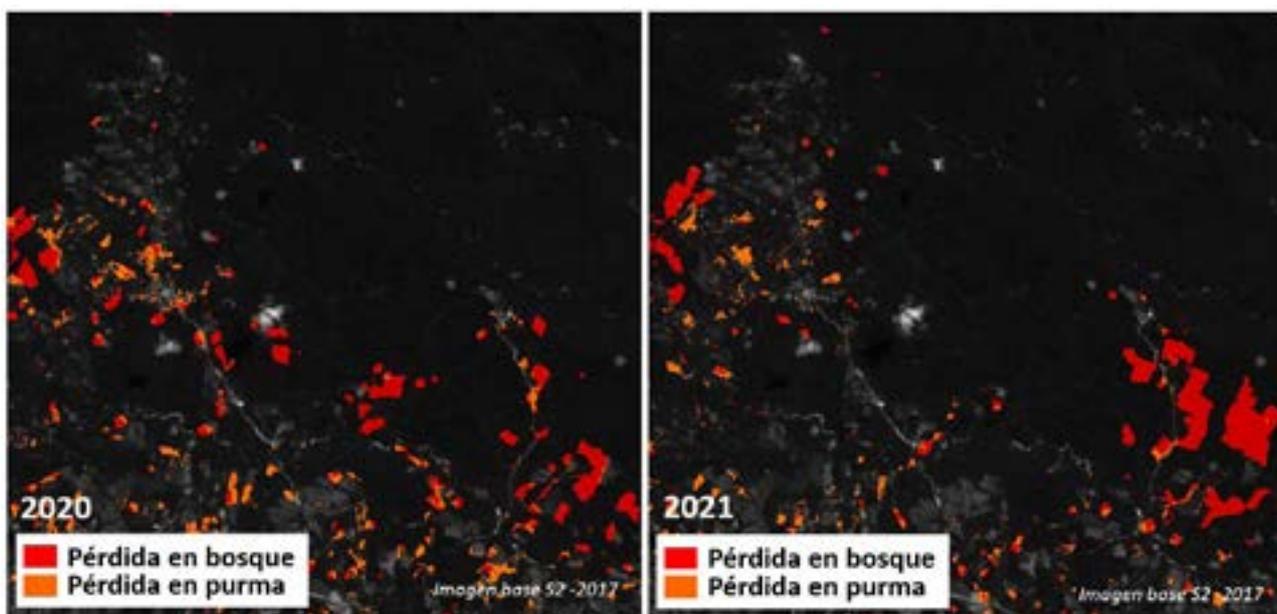


Figura 20. Ejemplo de pérdida de coberturas en los años 2020 y 2021

La pérdida de purma fue mucho mayor que la de bosque en todos los años, siendo el año con mayor pérdida el 2020, seguido por el 2019 y 2021 respectivamente (ver figura 21), la pérdida de purma en el 2021 hasta el 10 de octubre del 2021 fue de 8342.98 ha, siendo el más bajo de los años analizados. La pérdida de bosque en el año 2020 fue la más alta con 6054.5 ha, esto coincide con la pérdida de bosque de Geobosques para el área de estudio, hasta el 10 de octubre del 2021 la pérdida de bosques del año 2020 es mayor que la del 2021.

Para entender cuál fue la dinámica de la pérdida a nivel local se calculó la pérdida en un total de 727 fincas con las que trabaja Solidaridad (ver figura 22). El año con mayor pérdida en bosque y purma fue el 2020. En el caso de la purma el año donde ocurrió la menor pérdida fue el 2021. Los porcentajes de pérdida a nivel de finca y en toda el área de estudio son muy similares en la purma, pero en el bosque se ve una ligera disminución de la pérdida en al año 2021 con respecto a lo que ocurrió en toda el área de estudio.

Conocer los motivos de estas cifras requiere cruzar información socio-económica, como los precios de los productos, además se debe considerar que el 2020 fue un año anómalo, debido a las consecuencias socio-económicas y cambios de conducta humana debido al COVID 19.



Figura 21. Pérdida de cobertura en purma y bosque

Pérdida de cobertura en fincas

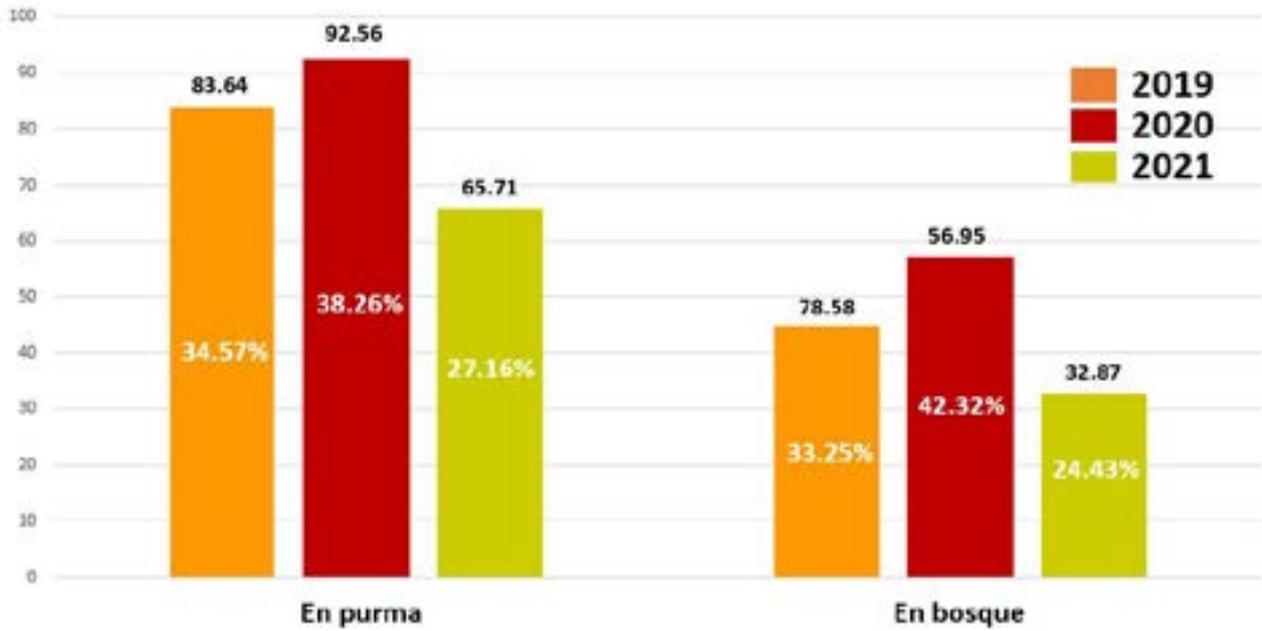


Figura 22. Pérdida de cobertura en purma y bosque en fincas

La verificación de la pérdida de purma y bosque detectada fue comparada con imágenes de alta resolución, mostrando una buena correspondencia. La figura 23, muestra la pérdida de cobertura detectada en el año 2020 y la imagen de alta resolución del año 2021 donde se ve que las coberturas mapeadas tienen correspondencia.

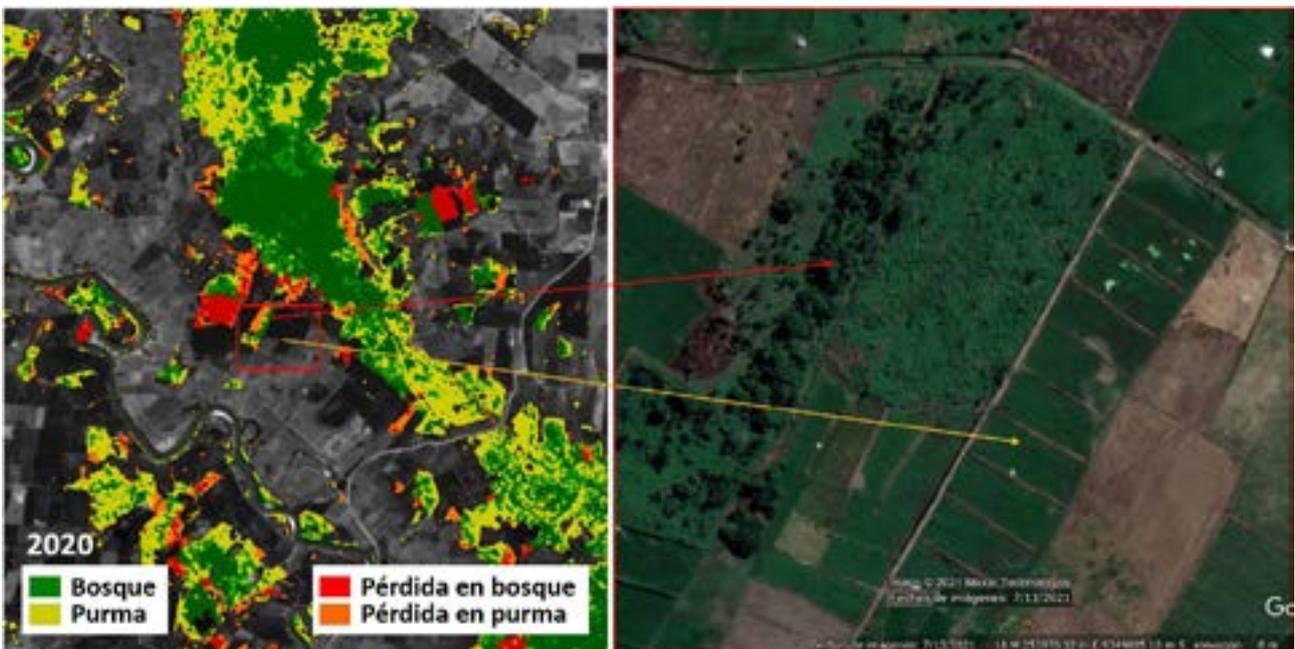


Figura 23. Ejemplo de pérdida de coberturas en los años 2020 y 2021

En la evaluación de la exactitud se excluyeron 13 muestras debido a que no se tuvo una interpretación certera del tipo de cobertura, estas muestras fueron calificadas como duday no se incluyeron para generar la matriz de confusión. En total se usaron 291 muestras. La tabla 2, muestra la matriz de confusión para Pérdida/No pérdida hasta el 2021, la exactitud de productor de 84.51% esto significa que hubo un 15.49% (error de omisión) de pérdida que faltó detectar (Ver sección 8), la exactitud de usuario para la pérdida fue de 90.91% lo que significa que de toda la pérdida detectada el 9.09% son falsos positivos. La exactitud para las áreas de no cambio fue mayor al 95%. La exactitud global fue del 94.16% lo que significa que hay una alta exactitud.

Tabla 2. Matriz de confusión para pérdida/no pérdida hasta el 2021

		<i>Interpretación</i>					
<i>Mapa</i>	CLASE	Pérdida	No Pérdida	Total	Exactitud del Usuario (%)	Error de Comisión (%)	
		Pérdida	60	6	66	90.91	9.09
	No pérdida	11	214	225	95.11	4.89	
	Total	71	220	291			
	Exactitud del Productor (%)	84.51	97.27	Exactitud global = 94.16%			
	Error de Omisión (%)	15.49	2.73				

Durante el proceso de interpretación de muestras el experto encargado reportó la presencia de muchos pixeles de borde, esto significa que muchas muestras se encontraban entre 2 tipos de cobertura distintos, por lo que elegir a que clase pertenece la muestra es complicado, debido a esto se decidió crear 2 matrices de confusión, la primera usando las 291 muestras y otra solo usando las muestras que no son pixeles de borde.

En la tabla 3, se muestra la matriz de confusión obtenida usando las 291, las exactitudes obtenidas se encuentran entre los 71% y 89%, las coberturas más difíciles de discriminar desde una imagen Sentinel-2 son Bosque 1 con Bosque 2, y Bosque 2 con Purma, sin embargo, cuando se hizo la comparación de los resultados con imágenes de alta resolución de Google Earth mostraron mayor correlación. Los motivos se muestran mejor en la tabla 4.

Tabla 3. Matriz de confusión para las coberturas de Bosque 1, Bosque 2, Purma y No bosque

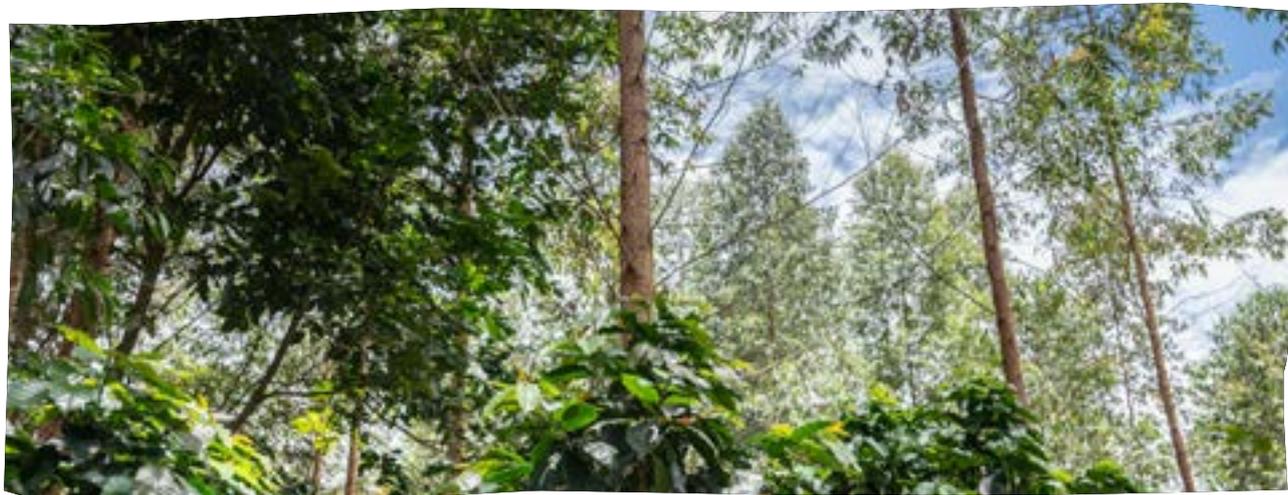
		<i>Interpretación</i>						
<i>Mapa</i>	CLASE	Bosque 1	Bosque 2	Purma	No bosque	TOTAL	Exactitud del Usuario (%)	Error de Comisión (%)
		Bosque 1	47	11	6	2	66	71.21
	Bosque 2	5	44	10	0	59	74.58	25.42
	Purma	0	7	84	5	96	87.50	12.50
	No Bosque	1	0	12	57	70	81.43	18.57
	TOTAL	53	62	112	64	291		
	Exactitud del Productor (%)	88.68	70.97	75.00	89.06	Exactitud Global = 79.73		
	Error de Omisión (%)	11.32	29.03	25.00	10.94			

La tabla 4, muestra la matriz de confusión obtenida excluyendo las muestras que caen en zonas de borde entre coberturas, los resultados aquí son muy distintos, obteniéndose exactitudes entre el 95% y 100%, esto muestra claramente la influencia de los pixeles de borde en la interpretación del experto para la definición del tipo de cobertura y/o clase. La exactitud global obtenida es del 98%, lo que significa que es muy alta.

Tabla 4. Matriz de confusión para las coberturas de Bosque 1, Bosque 2, Purma y No bosque

		<i>Interpretación</i>						
<i>Mapa</i>	CLASE	Bosque 1	Bosque 2	Purma	No bosque	TOTAL	Exactitud del Usuario (%)	Error de Comisión (%)
		Bosque 1	30	0	1	0	31	96.77
	Bosque 2	0	20	0	0	20	100.00	0.00
	Purma	0	1	46	0	47	97.87	2.13
	No Bosque	0	0	0	30	30	100.00	0.00
	TOTAL	30	21	47	30	128		
	Exactitud del Productor (%)	100.00	95.24	97.87	100.00		Exactitud Global = 98.3	
	Error de Omisión (%)	0.00	4.76	2.13	0.00			

Las figuras 24, 25 y 26 muestran la dinámica de la pérdida de cobertura de bosques y purma en ejemplo de finca N° 1, ejemplo de finca N° 2 y ejemplo de finca N° 3, el monitoreo de la pérdida de cobertura en el ejemplo de finca N° 1 muestra la remoción de purma en los años 2019, 2020 y 2021, siendo este último el de mayor área removida. En la imagen del 2017 se pudo observar que el área mapeada como purma tiene un tono verde claro con matices blanquecinos y amarillentos, esto puede deberse a que en esta área presenta una superficie no densa de árboles, los cuales están mezclados con otras especies vegetales, esta misma zona en el año 2021 se muestra con un tono verde opaco y con un tono uniforme en toda su superficie, esto puede indicar que los árboles han madurado y se estaría recuperando un área que en algún momento fue deforestada. En el ejemplo de finca N° 2, se puede observar pequeñas remociones de bosque y purma en el año 2020. La cual se incrementa en el año 2020 y en el 2021 no se detectó ninguna remoción. En el caso del ejemplo de finca N° 3, solo se observó remoción de purma en todos los años, pero solo en el año 2020 se observó remoción de bosque.



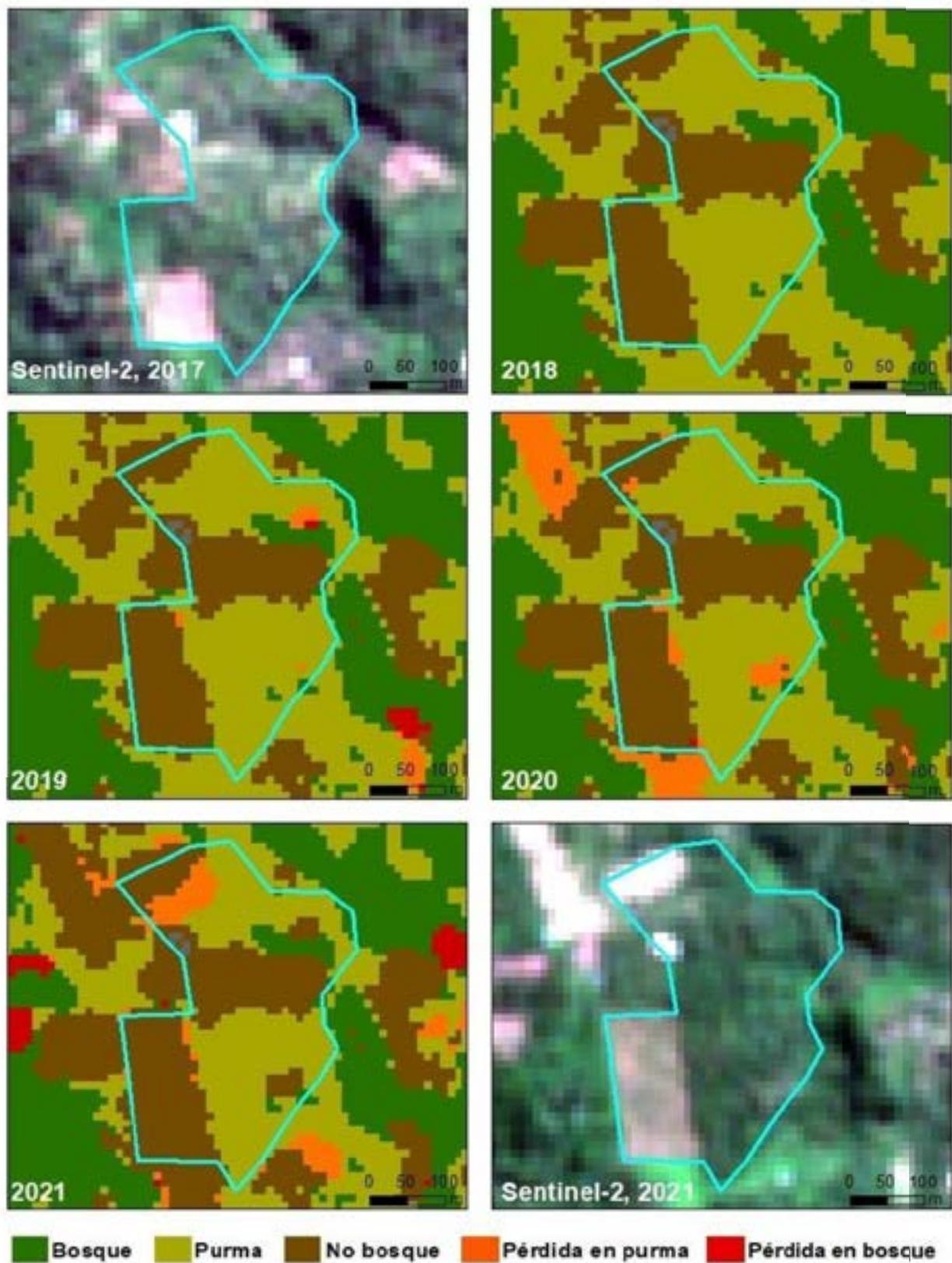


Figura 24. Monitoreo de ejemplo de finca N° 1

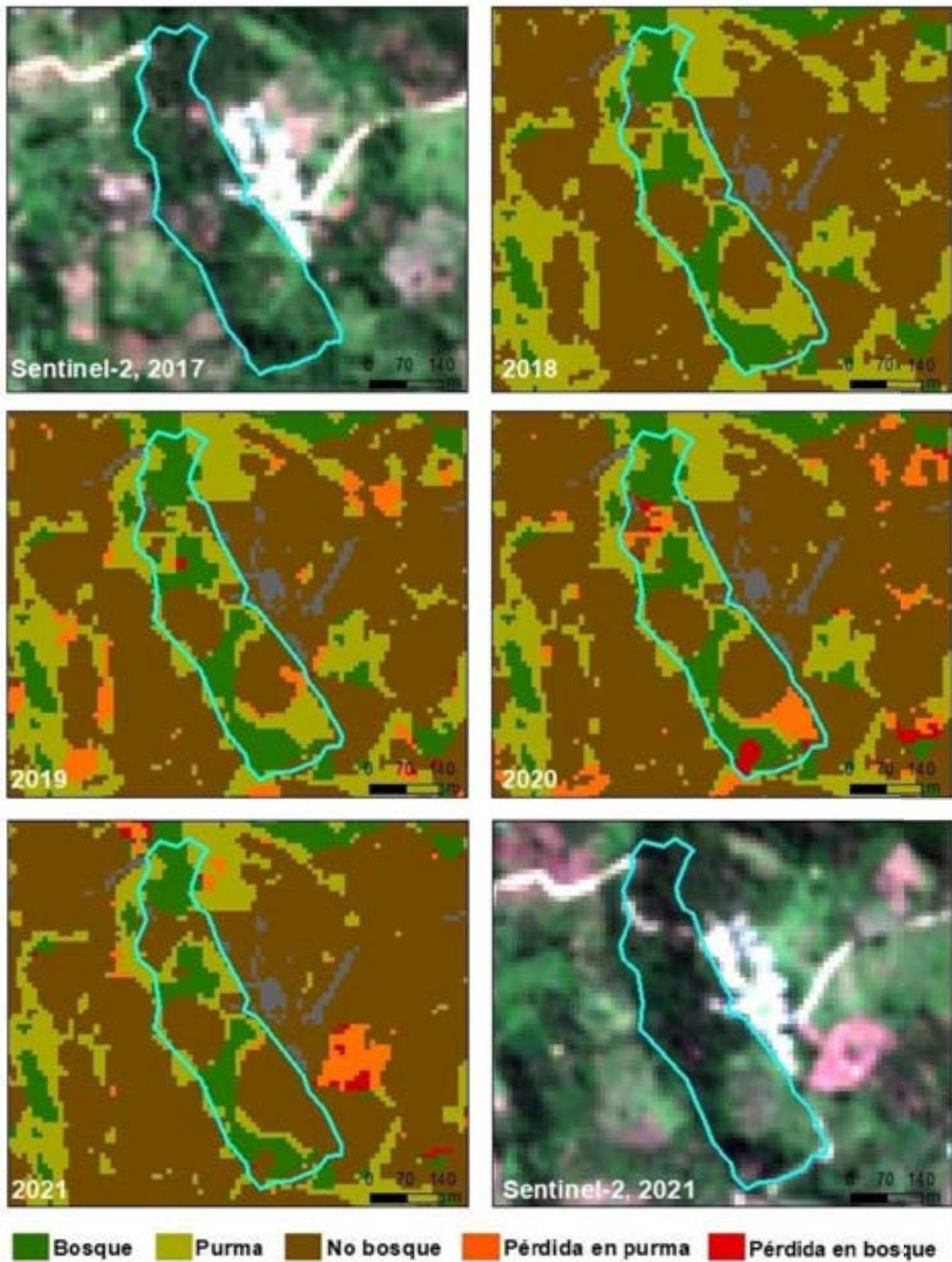


Figura 25. Monitoreo de ejemplo de finca N° 2

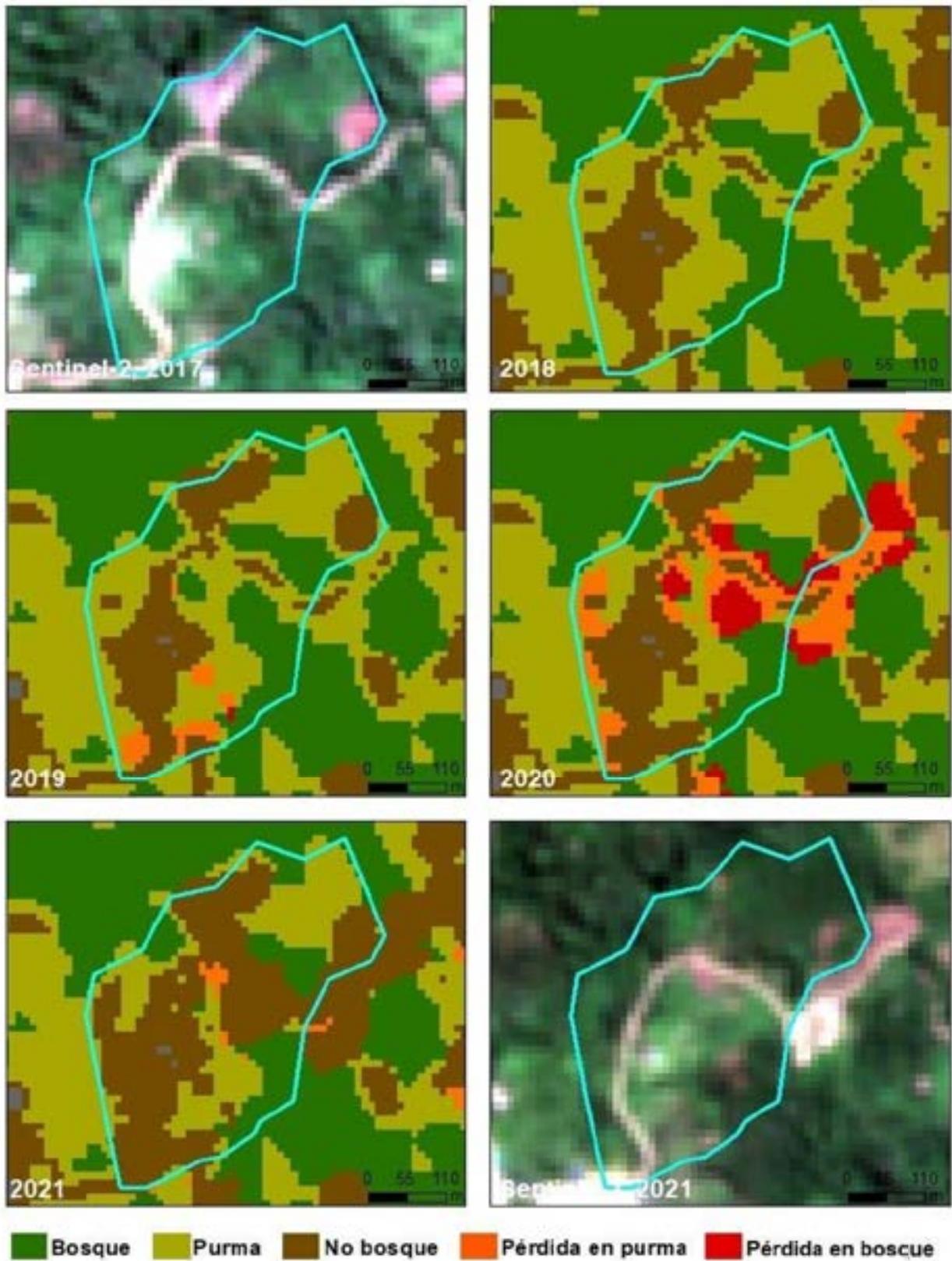


Figura 26. Monitoreo de ejemplo de finca N° 3

Los resultados obtenidos fueron comparados con los datos de alertas tempranas de Geobosques y con alertas tempranas del laboratorio GLAD2 (Global Land Analysis and Discovery) del departamento de Geografía de la Universidad de Maryland (Pickens, et al., s.f.). Ambas alertas se enfocan en detectar la pérdida de bosque primario.

Geobosques usa datos Landsat (30 m) y GLAD usa datos Sentinel-2 (10 m). Las fechas usadas para la comparación van desde enero del 2021 hasta el 28 de octubre del 2021 para el caso de Geobosques y desde enero del 2019 hasta el 27 de octubre del 2021 para el caso de GLAD. La figura 27, muestra las alertas de Geobosques y lo detectado con la metodología desarrollada. Se puede observar la gran diferencia en la definición de detalles en la detección, siendo mejor en la metodología desarrollada, esto se debe a la mejor resolución espacial de Sentinel-2. También se puede observar que la metodología desarrollada detecta más áreas de pérdida de bosques, esto puede deberse principalmente a la presencia de nubes en las imágenes, es importante tener en cuenta que la presencia de nubes en las imágenes Landsat y Sentinel-2 es distinta y la detección temprana de la pérdida está sujeta a la presencia de nubes.



¹ <https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/vfiew/index.php>

² [https://console.cloud.google.com/storage/browser/earthenginepartners-hansen/S2alert?pageState=\(%22StorageObjectListTable%22:\(%22\(%22-%22%255D%255D%22\)\)&prefix=&forceOnObjectsSortingFiltering=false](https://console.cloud.google.com/storage/browser/earthenginepartners-hansen/S2alert?pageState=(%22StorageObjectListTable%22:(%22(%22-%22%255D%255D%22))&prefix=&forceOnObjectsSortingFiltering=false)

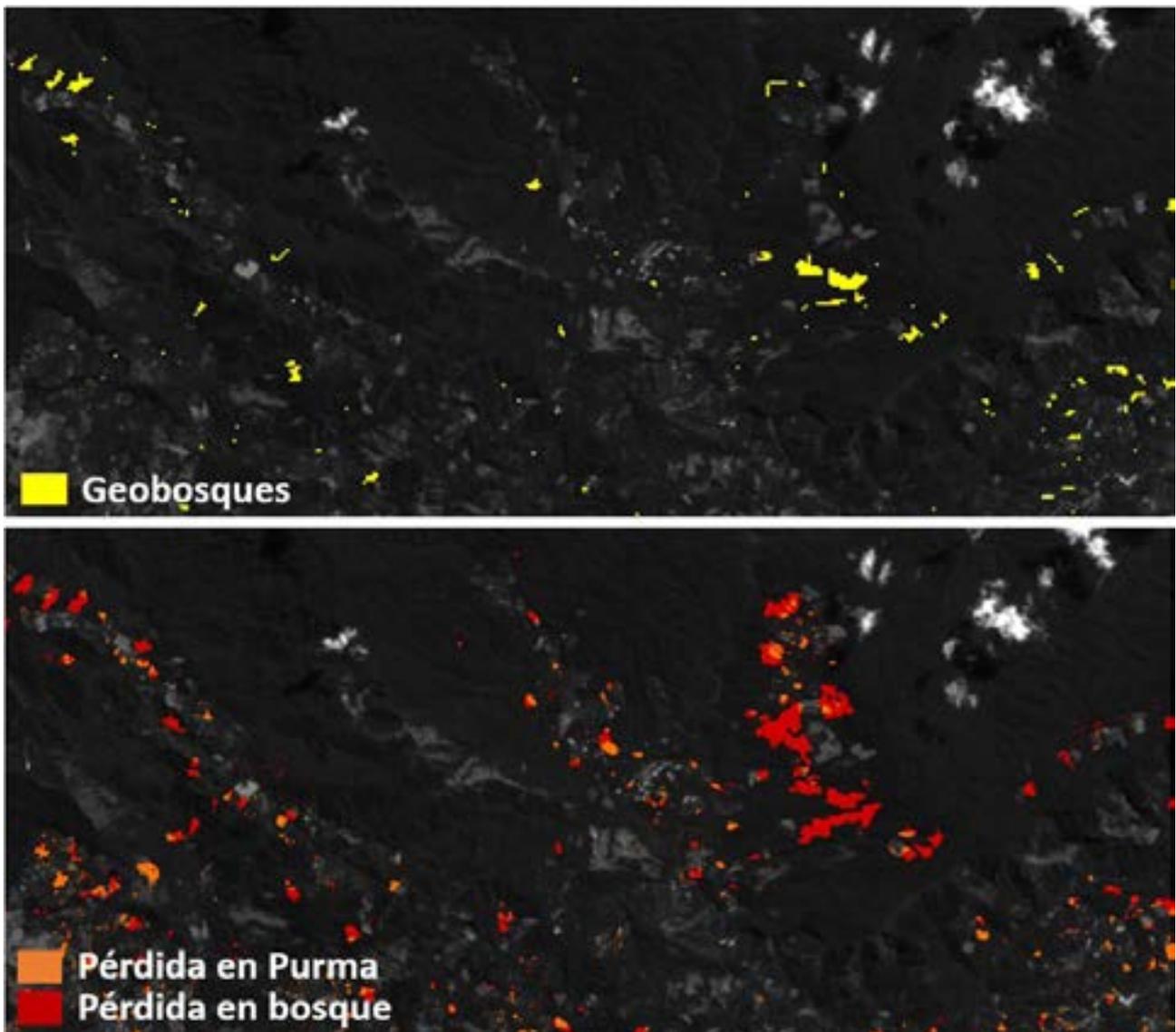


Figura 27. Comparación de la detección de pérdida de Geobosques (arriba) y la metodología desarrollada (abajo)

La figura 28, muestra la comparación de las alertas tempranas de GLAD y la pérdida detectada con la metodología desarrollada. GLAD detecta en 4 niveles, dividiéndose en detección de alta confianza, media confianza, baja confianza y recién detectados. En las imágenes se puede observar que la metodología desarrollada detecta mayor pérdida de bosque, esto se aprecia mejor en la parte central derecha e inferior izquierda de las imágenes (a), donde la metodología desarrollada detecta más pérdida de bosque. En la parte superior izquierda hay un pequeño parche de deforestación (b) que no fue detectada por la metodología desarrollada y si en la metodología de GLAD, esto puede deberse a que GLAD usa normalmente imágenes de hasta un 70 a 80% de áreas con nubes. Por lo que en teoría debería detectar más áreas deforestadas. Sin embargo, a pesar de esto la metodología desarrollada muestra una mejor definición de las áreas detectadas. También es importante mencionar que la metodología desarrollada es la única que detecta pérdida de purma.

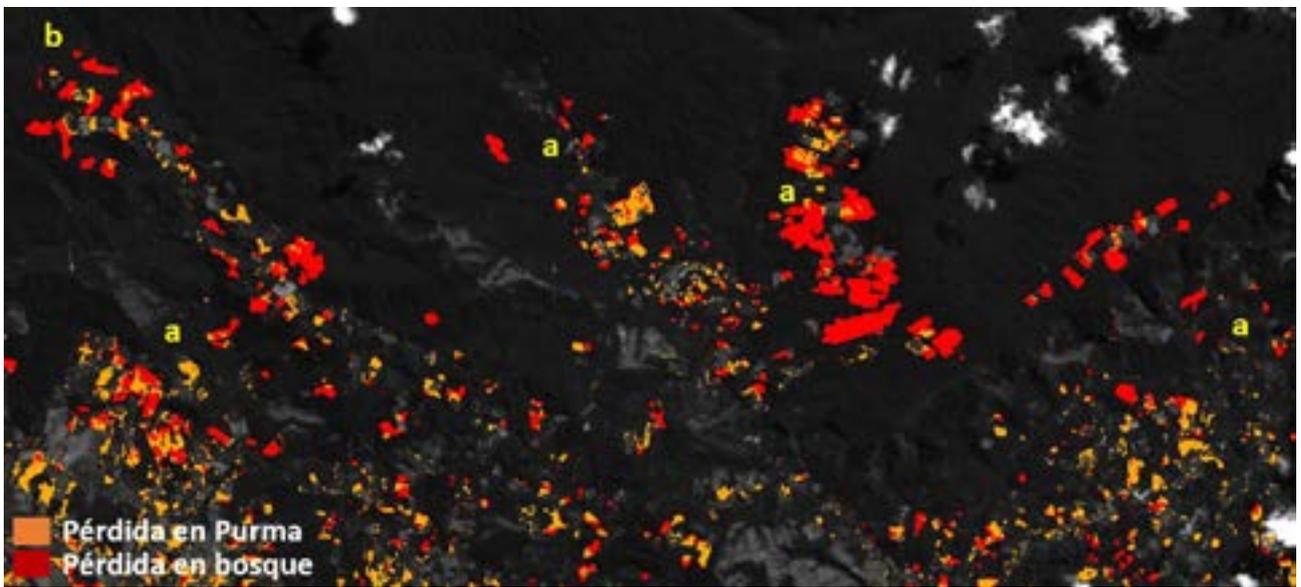
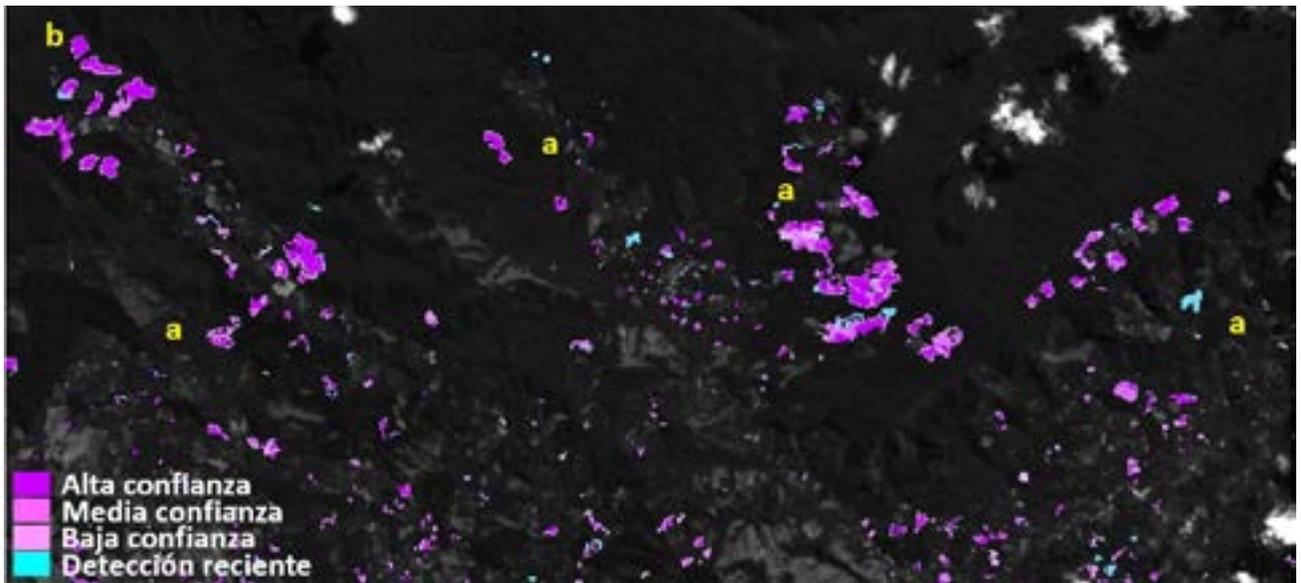


Figura 28. Comparación de la detección de pérdida de GLADs (arriba) y la metodología desarrollada (abajo)





07

Discusión

El desarrollo metodológico presentó varios retos desde el inicio, la idea inicial fue usar el nivel 2A de Sentinel-2, este nivel lamentablemente no está disponible para años anteriores al 2019, además, la plataforma <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, donde se encuentran disponibles, está presentando problemas y/o retrasos en procesar solicitudes de imágenes. Por lo que se decidió usar el nivel 1C, el cual está disponible de forma inmediata para todo el periodo de estudio.

El área de estudio se caracteriza por tener mucha presencia de nubes, entre el 2016 al 2018 solo la imagen del 23 de julio del 2017 presenta un bajo porcentaje de nubes y poca neblina (ver figura 29), por lo que fue elegida como imagen principal para crear la base de bosque y purma preliminar, lo ideal hubiese sido usar imágenes del 2018, pero en este año la presencia de nubes y neblina fue mayor a la de años anteriores.

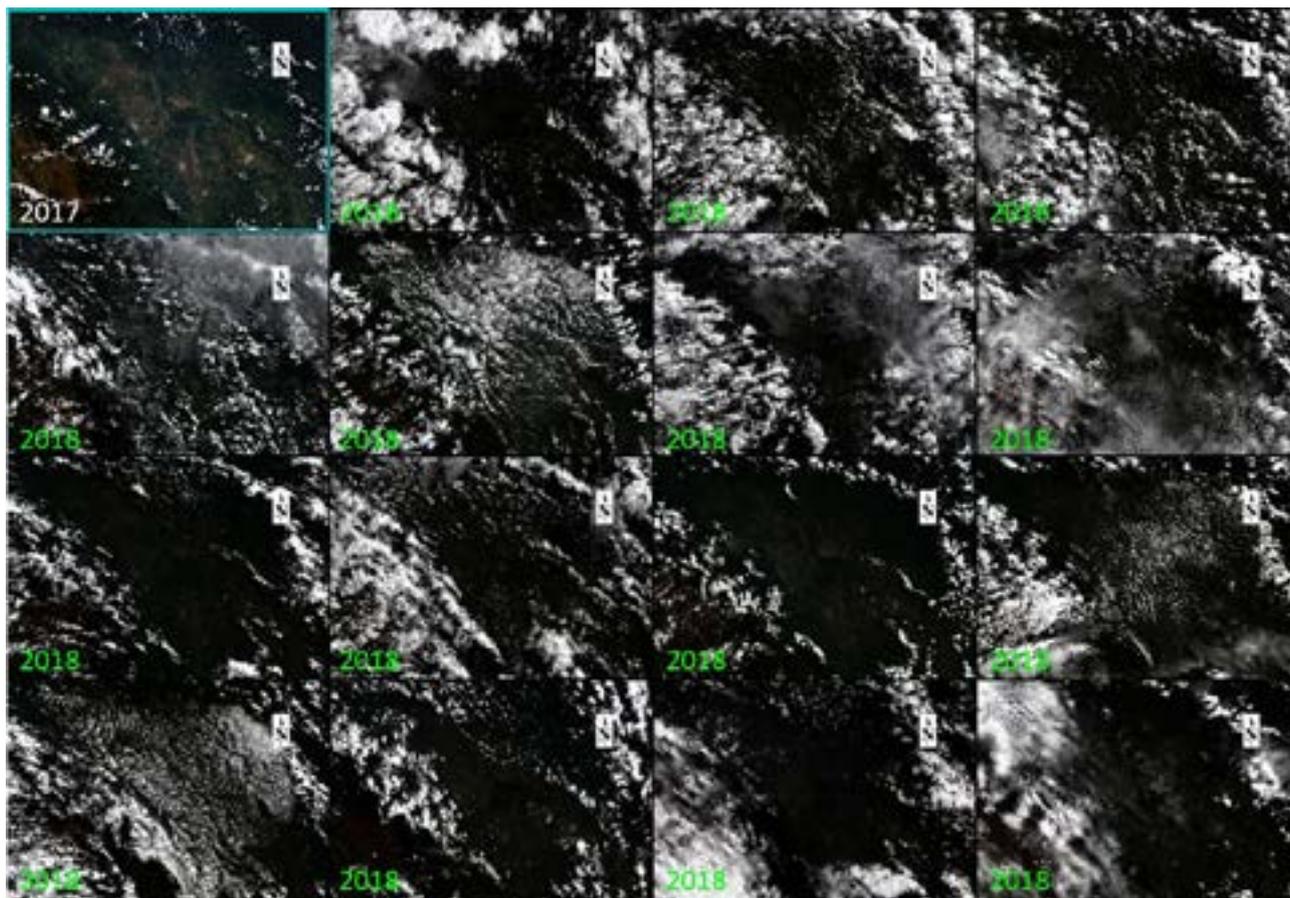


Figura 29. Presencia de nubes en imágenes Sentinel-2

Debido al alto porcentaje de presencia de nubes en las imágenes no se hizo un proceso normal de enmascaramiento de estas y se optó por crear una metodología para extraer las áreas de bosques y purma sin nubes, sombras o neblina, esto fue usado para la creación de la capa preliminar de bosque y purma. Para detectar la pérdida se creó una metodología que extraiga áreas de suelo y suelo con vegetación en un pixel, para esto se pensaba usar la técnica DSU, la cual es usada en la detección de alertas tempranas de Geobosques y ha brindado una alta exactitud (Vargas, et al., 2019), lamentablemente mediante el desarrollo de la consultoría se detectó errores en las imágenes Sentinel-2 (ver figura 15), Los errores se presentan en franjas y son muy visibles cuando se intersectan con las nubes, lamentablemente estos errores también se encuentran en el nivel 2A.

Parte de estos errores tienen mucha similitud espectral con áreas deforestadas, por lo que la técnica DSU lo detectaba como deforestación (falsos positivos). Los falsos positivos detectados tuvieron que ser analizados espectralmente para encontrar algún patrón espectral que los diferenciara de la mayoría de la pérdida de bosque, según las inspecciones visuales esto se logró en gran manera, la consecuencia de esto es una detección conservadora de la pérdida de cobertura, pudiendo haber áreas deforestadas que no fueron detectadas debido al gran parecido espectral con los errores de las imágenes, esto se puede observar en el error de omisión obtenido para la Pérdida. Sin embargo, esta deforestación podría ser detectada en la siguiente imagen analizada, ya que los errores no se presentan de forma sistemática en un mismo lugar. Una solución a esto es considerar como Pérdida a un área que sea detectada en 2 imágenes (Hansen, et al., 2016), sin embargo, cuando se aplicó al área de estudio, la detección de la deforestación fue mínima, esto se debe a la alta presencia de nubes del área de estudio, a pesar de esta limitación, la exactitud de productor es considerablemente alta.

La interpretación de muestras usando imágenes de satélite es una tarea complicada para cualquier experto debido a que la resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 no son lo suficiente para reconocer visualmente consideraciones como el ancho de copa, el estado de madurez del árbol o la mixtura espectral dentro del pixel, este reconocimiento debe ser acompañado del análisis de la respuesta espectral de las coberturas, a pesar de las limitaciones, Sentinel-2, es la opción más viable a usar para esta tarea, ya que el periodo de análisis obtenido requiere de una gran cantidad de imágenes que deben ser usadas para la interpretación de las muestras, y sería casi imposible que el área sea cubierta en su totalidad por imágenes de alta resolución espacial debido a la alta presencia de nubes y la limitación de su cobertura, además adquirir imágenes de alta resolución implica un costo que no se justificaría debido a que estas no solucionarían del todo la interpretación de las muestras debido a su limitada resolución espectral. Los píxeles de borde son un problema a la hora de interpretar las muestras, el alto número de píxeles de borde se debe a lo fragmentado del paisaje a nivel de finca, por lo que será un problema recurrente, y deberían ser evitados a la hora de evaluar la exactitud de las capas. También es importante mencionar que las coberturas compuestas por pocos píxeles podrían estar sujetas a errores en la interpretación debido a la mixtura de coberturas que podrían estar cubriendo el pixel o píxeles. Por lo que una interpretación de muestras a nivel contextual y de entorno de la muestra podría ayudar a dar una mejor asignación del tipo de clase a la que pertenece.

La metodología fue diseñada en base a las características espectrales de los distintos materiales que conforman la imagen, como son variedades de bosques, suelo, agua y sus mezclas espectrales, esta metodología no puede ser aplicada a áreas que presenten características espectrales distintas, como por ejemplo la región Madre de Dios, en donde gran parte de la deforestación se debe a minería ilegal, la que tiene rasgos espectrales distintos a una deforestación común.

Al finalizar el estudio se detectó que la imagen de fecha 21-09-2018 estaba desplazada 10 metros con respecto a las demás, esto influye directamente en la exactitud de los datos, especialmente en las áreas de borde. por lo que esto también explicaría la baja exactitud obtenida en la matriz de confusión que incluye las muestras que cayeron en píxeles de borde.





08

Conclusiones

y recomendaciones

La metodología desarrollada permitió detectar las coberturas de bosque y purma, así como la pérdida para los años 2019, 2020, y 2021 a una resolución espacial de hasta 10m. Esto es un gran avance en la detección de pérdida de cobertura forestal y brindaría información más fina que la obtenida usando datos Landsat.

El año donde ocurrió mayor pérdida de cobertura de bosques y purma fue el 2020, este año fue atípico debido a la situación de cuarentena y restricciones a la población, por lo que debería considerarse como un año anómalo y no ser usado para medir políticas y/o acciones con fines de frenar la deforestación.

La metodología desarrollada complementaria y brindaría información más detallada que la actualmente disponible en Geobosques, por lo que el uso combinado estaría dando mayores áreas de pérdida de cobertura, ya que por la presencia de nubes una metodología podría estar detectando la pérdida que la otra no pudo.

La resolución espacial de Sentinel-2 y la metodología desarrollada permite obtener áreas de pérdida más cercanas a la realidad, por lo que su uso a nivel local, como el de monitoreo de fincas es factible y recomendable.

Se recomienda incluir en el análisis imágenes con porcentajes de nubes mayor a 50%, especialmente en años con alta presencia de nubosidad.

La metodología desarrollada podría ser aplicada en condiciones biogeográficas similares, su aplicación en otras áreas debe ser estudiada.

La metodología desarrollada demostró tener una alta exactitud en la detección de coberturas.

Se recomienda monitorear constantemente el área de interés y si de ser posible monitorear las áreas de purma que se han venido recuperando, ya que sería potencialmente áreas de ganancia de bosque y también monitorear el crecimiento de vegetación secundaria o purmas en las áreas de no bosque.

Si bien se espera que las imágenes Sentinel-2 tengan correlación geográfica, esto no siempre es así, por lo que se recomienda revisar que todas las imágenes usadas tengan correlación, y las que no, sean corregidas y/o descartadas del análisis, esto evitaría la presencia de errores en los bordes de las clases.

A photograph of a forest with tall trees and a field of green plants in the foreground. The trees are tall and thin, with dense green foliage. The foreground is filled with various green plants, possibly a field or a garden. The sky is overcast and grey.

09

Referencias

- GEOBOSQUES, s.f. <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/servicios.php>. [En línea]
- Available at: <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/servicios.php> [Último acceso: 01 02 2021].
- Hansen, M. y otros, 2016. Humid tropical forest disturbance alerts using Landsat data. Environmental Research Letters.
- Instituto Geografico Nacional, 2018. <https://www.ign.es/>. [En línea] Available at: https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/3_componente_espacio_Copernicus.pdf [Último acceso: 2021].
- Pickens, A., Hansen, M., Adusei, B. & Potapov, P., s.f. Sentinel-2 Forest Loss Alert. Global
- Land Analysis and Discovery (GLAD), s.l.: GLAD/UMD, accessed through Global Forest Watch on 08/11/2021
- Vargas, C., Montalvan, Joselyn & León, A., 2019. Early warning tropical forest loss alerts in Peru using Landsat and direct spectral unmixing. Environmental Research Communications.



Proyecto

**AMAZONÍA
CONNECT**



Solidaridad



La publicación “Monitoreo de bosque primario y purma usando imagenes de satélite Sentinel-2 en fincas de café” fue posible gracias al apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). El contenido de esta publicación es responsabilidad de los autores y no refleja necesariamente los puntos de vista o posiciones de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional o del Gobierno de los Estados Unidos.