## UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



## FACULTAD DE INGENIERÍA

## CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

## TRABAJO DE TITULACIÓN

## Título del proyecto

## "ESTUDIO DE LA DEFORESTACIÓN DE BOSQUE TROPICAL AMAZÓNICO MEDIANTE UN ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES RADAR (SAR)".

## Autor(es)

Latacunga Vega Byron Humberto

Toaza Garcés Indira Monserratte

## Tutor

PhD. César Cisneros

**Riobamba - Ecuador** 

2021

## **REVISIÓN DEL TRIBUNAL**

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: ESTUDIO DE LA DEFORESTACIÓN DE BOSQUE TROPICAL AMAZÓNICO MEDIANTE UN ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES RADAR (SAR), presentado por: Latacunga Vega Byron Humberto y Toaza Garcés Indira Monserratte, y dirigido por: PhD. César Cisneros.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en de la biblioteca de la facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

PhD. Julia Calahorrano Presidente del Tribunal irma PhD. César Cisneros Director del Proyecto irma PhD. Iván Ríos 5 Miembro del Tribunal Firma Ing. Patricio Santillán Miembro del Tribunal Firma

## DECLARACIÓN EXPRESA DE LA AUTORÍA

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del grado de INGENIERO AMBIENTAL, con el tema: "ESTUDIO DE LA DEFORESTACIÓN DE AMAZÓNICO ANÁLISIS BOSQUE TROPICAL MEDIANTE UN MULTITEMPORAL DE IMÁGENES RADAR (SAR)" ha sido elaborado por LATACUNGA VEGA BYRON HUMBERTO Y TOAZA GARCÉS INDIRA MONSERRATTE, el mismo que ha sido revisado y analizado en un cien por ciento con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor, por lo que se encuentran apta para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

PhD. César Cisneros

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Nosotros, LATACUNGA VEGA BYRON HUMBERTO, con cédula de identidad No. 050372445-2 y TOAZA GARCÉS INDIRA MONSERRATTE con cédula de identidad No. 185025353-3, somos responsables de las ideas, doctrinas, resultados y propuesta realizada en la presente investigación y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.

Latacunga Vega Byron Humberto C.I.: 050372445-2

Toaza Garcés Indira Monserratte C.I.: 185025353-3

#### AGRADECIMIENTO

El presente trabajo no sería posible sin el conocimiento alcanzado en la Universidad Nacional de Chimborazo a través de sus buenos docentes que fueron parte fundamental en la carrera, quienes nos apoyaron con su confianza, conocimiento y paciencia, a nuestros familiares por el apoyo continuo durante este largo proceso y los buenos amigos que nos colaboraron con su apoyo moral y anímico.

De manera especial demostramos nuestra gratitud al PhD. Cesar Cisneros por el apoyo incondicional y la confianza depositada en nosotros y por el conocimiento brindado durante todo el proceso para la realización de este proyecto.

A esos seres maravillosos que sin darse cuenta formaron parte de nuestras vidas para estar hoy culminando esta etapa, ya fuese con sus conocimientos, compañía, palabras de ánimo, gestos desinteresados que nos llevaron a ir mejorando como estudiantes y como persona durante el proceso.

A todos muchas gracias.

### DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Ángel Toaza y Silvia Garcés por haberme dado lo más importante la vida, esta victoria les pertenece por el apoyo incondicional durante esta trayectoria.

A mis ángeles desde el cielo, mis abuelas y tíos que de una forma u otra me han cuidado en cada paso les dedico mi carrera, a mis hermanos Miguel, Jairo y Sergio por ayudarme y apoyarme en mis estudios en este largo camino de formación profesional.

A todos quienes me han dado fuerza y apoyo entre ellos Luiggi, Karen y Jenny gracias por todo, han sido seres de luz que iluminaron mi carrera universitaria compartiendo su confianza y compañía no puede haber mejor compañía en este camino que ustedes.

Una profunda dedicatoria a mi abuelita Hilda en donde quiera que este, desde muy pequeña me inculco el estudio y me enseñó a no rendirme, gracias por darme fuerzas en esos momentos de debilidad gracias por permanecer siempre presente en mi corazón te agradezco con toda mi vida.

### **Indira Monserratte Toaza Garcés**

El desarrollo de mi formación académica no tendría sentido sin la fiel e incondicional compañía de mis padres José Latacunga y Digna Vega, mis hermanos Cristian, Stalin y Wilmer, tíos, primos y demás familiares, a quienes dedico todo mi tesón y esfuerzo realizado en estos 5 años. A todos aquellos que pude conocer en la vida universitaria, a todos quienes considero mis colegas y amigos queridos, quienes estuvieron en las buenas y en las malas, enseñándome que la constancia y la disciplina nos llevarán muy lejos.

A ti Jefferson, Jonathan, Stalyn, Ximena, Estefanía y varios más que llevo en mi memoria, con quienes compartí las vivencias de colegio y de la calle. A mi grupo de danza "Tamia Suyay" donde conocí a personas maravillosas, talentosas y de buen corazón. En especial a mi gran hermano del alma, Geovanny Trávez, alias Tiko Landázuri, de los pocos que puedo catalogar como una persona de confianza, con quien compartí escenarios de baile y experiencias de la vida, no alcanzarían adjetivos ni verbos para describir el oro de ser humano que representa este muchacho.

De corazón dedico el total de este trabajo a mi abuelita Aurora, siempre cariñosa y llena de fe en mí, y a mi abuelito Marcial, de un carácter estricto y respetable a quien pude conocer hasta los 8 años y que ahora desde el cielo me manda su bendición. A todos mis detractores y enemigos, quienes me juzgaban fijándose en mis fracasos y derrotas, demostrando que no hay barreras para alcanzar los objetivos.

#### SIN DARSE POR VENCIDO!

## Byron Humberto Latacunga Vega

VI

## SIGLAS Y ABREVIATURAS

FAO	Organización para la Alimentación y Agricultura
GADPR	Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial
GFW	Global Forest Watch
LIDAR	Detección y localización de imágenes por láser
MAAE	Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
PNUMA	Programa de las Naciones Unidad por el Medio Ambiente
RADAR	Detección de Radio y Rango
RAISG	Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada
SAR	Radar de Apertura Sintética
SIG	Sistema de Información Geográfica
SLAR	Radar de Mirada Lateral

# ÍNDICE

REVI	SIÓN DEL TRIBUNAL	I
DECL	ARACIÓN EXPRESA DE LA AUTORÍA	II
AUTC	DRÍA DE LA INVESTIGACIÓN	III
AGRA	ADECIMIENTO	IV
DEDI	CATORIA	V
SIGL	AS Y ABREVIATURAS	VII
ÍNDIO	CE	VIII
RESU	[MEN	XII
ABST	RACT	XIII
INTR	ODUCCIÓN	1
PLAN	TEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
JUST	IFICACIÓN	3
OBJE	TIVOS	5
Objeti	ivo General	5
Objeti	ivos Específicos	5
CAPÍ	TULO I: MARCO TEÓRICO	6
1.1.	El panorama ambiental: Antecedentes	6
1.2.	La deforestación	6
1.2.	1. Área forestal amazónica	7
1.3.	La teledetección como herramienta de investigación	7
1.3.	1. Tipos de sensores remotos	8
1.4.	Sensor Radio Detection And Ranging (RADAR)	9
1.4.	1. Parámetros del radar	9
1.4.	2. Clasificación de los sensores radar	12

1.5.	El radar de apertura sintética	12
1.	5.1. Características geométricas y radiométricas de las imágenes SAR	13
CAP	ITULO II: METODOLOGÍA	15
2.1.	Identificación del área de estudio	15
2.2.	Insumos	15
2.3.	Obtención de imágenes	15
2.4.	Preprocesamiento de imágenes	16
2.5.	Detección automática de deforestación con polarización VH	17
2.6.	Aplicación de algoritmos para detección de cambios	18
2.7.	Evaluación de la precisión de las áreas de deforestación estimadas	20
2.8.	Cálculo de tasa de deforestación	22
CAP	ITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
3.1.	Definición del esquema de trabajo	23
3.2.	Detección automática de deforestación con imágenes promedio de polar	ización
VH_		23
3.3.	Análisis de deforestación por aplicación de algoritmo de Canty para de	tección de
camb	bios	29
CAP	ÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
4.1.	Conclusiones	36
4.2.	Recomendaciones	37
REF	ERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANE	XOS	43

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura Nº 1: Ángulo de incidencia 1	1
Figura N° 2: Imagen SAR S-1A VV del 12 de febrero de 2015 1	3
Figura N° 3: Características geométricas de una imagen SAR 14	4
Figura Nº 4: Esquema desarrollado para el preprocesamiento de las imágenes SAR 1	7
Figura N° 5: Aplicación de los algoritmos y su integración en una máscara 1	8
Figura Nº 6: Desarrollo del algoritmo de detección de cambios en el portal Google Colab- 1	9
Figura Nº 7: Cadena de procesos aplicada a nuestro trabajo de investigación 2	3
Figura N° 8: Índice de deforestación registrada por periodo de estudio 2	8
Figura Nº 9: Índice de deforestación registrada por periodo de estudio según la metodología	
de Canty (2020) 3-	4

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla Nº 1: Tipos de polarizaciones en antenas SAR
Tabla Nº 2: Disposición de polarizaciones en antenas SAR
Tabla Nº 3: Materiales y herramientas para el desarrollo del trabajo de investigación15
Tabla Nº 4: Identificación de las imágenes SAR del portal ASF Vertex
Tabla Nº 5: Identificación de las imágenes PlanetScope       16
Tabla Nº 6: Áreas detectadas por medio de la detección automática con la polarización VH24
Tabla Nº 7: Detección de posible deforestación dentro de la zona de bosque
Tabla Nº 8: Cálculo de tamaño de muestra para cada periodo de estudio
Tabla Nº 9: Validación de los resultados obtenidos
Tabla Nº 10: Comparación de tasas de deforestación reportadas por distintas fuentes
Tabla Nº 11: Resultados obtenidos por el algoritmo de Detección de Cambios elaborado por
Canty (2020)

Tabla Nº 12: Análisis estadístico realizado por el algoritmo de Detección de Cambios	31
Tabla Nº 13: Cálculo de tamaño de muestra para cada periodo	33
Tabla Nº 14: Validación de los resultados obtenidos usando algoritmo de Canty (2020)	33
Tabla Nº 15: Comparación de tasas reportadas por distintas fuentes	35

#### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de deforestación en el bosque tropical amazónico con el uso de imágenes SAR, tomando como punto de partida la gran problemática relacionada a la pérdida de cobertura de bosque a causa de actividades antrópicas como la expansión de la frontera agrícola, ganadera o la explotación de la madera. Las imágenes SAR poseen características muy útiles al momento de detectar cambios en un área, por ello se estableció una cadena de preprocesamiento y manejo de datos que nos permita obtener zonas deforestadas y calcular tasas de pérdida de bosque desde el año 2016 hasta el año 2020. Se aplicaron dos metodologías distintas: la primera desarrollada por Vargas et al. (2019) con detección automática de deforestación utilizando la polarización VH de manera anual; y la segunda a través de un algoritmo de detección de cambios desarrollado por Canty (2020) en el portal Google Colab de forma bianual. Cada metodología sometida a validación arrojó resultados de precisión positivos, siendo el algoritmo de Canty (2020) la metodología que mejor detecta los cambios por deforestación a través del manejo de dos polarizaciones (VH-VV). En cuanto al análisis de deforestación, se reportan tasas de alrededor de -0,85%; no obstante los resultados obtenidos son ligeramente inferiores a los calculados con datos de la autoridad ambiental (tasa de -1,09% en el periodo 2016-2018). Las dos metodologías indican el gran potencial de las imágenes SAR en la detección de deforestación en bosques tropicales.

Palabras clave: algoritmo, bosque, cambio, deforestación, SAR, Sentinel-1, tasa

#### ABSTRACT

The research's aims is to analyze deforestation in the Amazonian tropical forest by using SAR images, taking as a starting point the significant problem related to forest cover loss due to anthropic activities such as the expansion of the agricultural, livestock or logging frontier. SAR images have advantageous characteristics when detecting changes in an area; therefore, a chain of pre-processing and data management was established to obtain deforested sites and calculate forest loss rates from 2016 to 2020. Two different methodologies were applied: the first developed by Vargas et al. (2019) with automatic deforestation detection using VH polarization on an annual basis; and the second through a change detection algorithm developed by Canty (2020) on Google Colab portal every two years. Each methodology subjected to validation yielded positive precision results, with Canty's algorithm (2020) being the methodology that best detects changes due to deforestation by managing two polarizations (VH-VV). Regarding the deforestation analysis, rates of around -0.85% were reported. However, the results obtained are slightly lower than those calculated with data from the environmental authority (-1.09% for the 2016-2018 period). Both methodologies indicate the great potential of SAR images in detecting deforestation in tropical forests.

Keywords: algorithm, forest, change, deforestation, SAR, Sentinel-1, rate

Reviewed by: Danilo Yépez Oviedo English professor UNACH 0601574692

XIII

## **INTRODUCCIÓN**

El 7% de la cobertura vegetal terrestre corresponde a bosques tropicales, lo que corresponde a que el planeta cuente con alrededor de 1.000 millones de hectáreas de este tipo de bosques, los cuales se encuentran distribuidos en Latinoamérica, África y el sureste asiático; en Latinoamérica estos bosques se sitúan en la región Amazónica alcanzando una extensión de aproximadamente 53 millones de hectáreas (D'Acunha, 2015).

En los últimos años los bosques de la Amazonía han sufrido pérdidas debido a factores como el crecimiento demográfico, expansión de las zonas agrícolas y ganaderas y explotación de recursos, esta pérdida de bosques o también conocida como deforestación se ha estimado que ha alcanzado alrededor del 17%, y aunque se considera que en los últimos años estas prácticas han disminuido su avance, sigue en proceso, y algunos estudios estiman que la deforestación a alcanzado el 20% o hasta un 60% de los bosques en esta región (Sanhueza, 2013).

En el contexto nacional, el Ecuador ha registrado una de las tasas más altas de deforestación a nivel latinoamericano, viéndose como el área más afectada los bosques tropicales de la región amazónica con una pérdida forestal de 957,40 ha entre los años 2010 y 2015 (Borja et al, 2017)

Entre las causas de la deforestación en la amazonia se encuentran la transformación de bosques en campos de cultivo o prados para la ganadería, la tala selectiva o los monocultivos de especies arbóreas exóticas, todas estas actividades se realizan con un fin comercial, en el cual no se considera las consecuencias de la sobre explotación del recurso y las problemáticas que se generaran a futuro en este ecosistema (Henao et al, 2012)

Es debido a estas alteraciones que se generan problemáticas como el cambio climático y calentamiento global; problemáticas que hacen necesario tener un conocimiento claro de la cantidad de recurso perdido y el aún existente, con el fin de determinar el daño causado y la factibilidad de su conservación y recuperación.

La finalidad del presente trabajo es determinar las tasas de deforestación del bosque tropical amazónico ubicado en la Comuna San Jacinto del Pindo mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales de tipo SAR, obteniendo datos estadísticos y cartográficos que evidencien deforestación.

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis de la tasa de deforestación toma relevancia en el tema del "Desarrollo Sostenible" por ser uno de los problemas que provoca una afectación directa e indirecta de los recursos a nivel global y local como el agua, el suelo y la biodiversidad. La mayor parte de la reserva forestal se encuentra en las zonas tropicales (un 44% aproximadamente) (Keenan et al., 2015), de las cuales se reportan tasas globales de pérdida estimadas en 6,4 millones de ha/año entre el periodo 2010-2015 (Pedraza et al., 2018).

La selva amazónica ocupa la mayor parte de la reserva forestal mundial, con responsabilidad dividida entre nueve naciones sudamericanas (Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Guyana, Perú, Surinam y Venezuela) con una tasa de deforestación aproximada de 2,18 millones de ha/año; en un contexto nacional el Ecuador ha perdido un aproximado de 12.120 de 96.073 km<sup>2</sup> registrados desde el año 2000 en la investigación de Borja et al. (2017). El área más afectada ha sido la región amazónica ecuatoriana con una pérdida forestal de 957,40 ha en el último quinquenio entre los años 2010-2015 (Borja et al., 2017), y por ello es necesario el seguimiento en los cambios que presente el bosque amazónico, aprovechando los avances tecnológicos que poseemos en la actualidad.

Las imágenes SAR son una herramienta muy útil en la determinación de cambios en sectores con presencia de interferencias atmosféricas como alta nubosidad, en base a proyectos impulsados por instituciones como la FAO y la NASA (Flores et al., 2019), ya que la efectividad de la banda C (Sentinel-1) y L (ALOS-PALSAR) en aplicaciones referentes a la detección de zonas deforestadas, indicadores de cambios forestales en tiempo casi real y la estratificación forestal ha sido comprobada a través de distintas tesis y trabajos a nivel científico desarrollados en zonas tropicales (Meyer, 2019).

El área de trabajo se ubica en la parroquia San Jacinto en la Provincia de Pastaza, en los límites de la microcuenca del río Puyo, con una temperatura media entre 17,9 y 22,6 °C y una pluviosidad entre 1.251 y 4.746mm, compuesto por un bosque siempre verde montano bajo (Reyes et al., 2018).

## **JUSTIFICACIÓN**

Las imágenes SAR comprenden una serie de características que resultan ser idóneas para aspectos relacionados a la teledetección, además de ser una herramienta tecnológica presente en el desarrollo de proyectos con carácter estratégico, pero requiere una gran destreza para el manejo de los datos que se puedan obtener de estos (Meyer, 2019). Su aplicación en el campo ambiental será muy relevante, ya que se desarrollan diversos proyectos en favor de la protección de los recursos naturales para una correcta toma de decisiones (Koch, 2013).

La Amazonía posee una gran cantidad de recursos del que dependen países subdesarrollados como el Ecuador, pero debe existir un control en su aprovechamiento si no queremos que se reduzcan y se produzca una alteración en el equilibrio ecológico de esta área (Miranda, 2018).

La comuna de San Jacinto, ubicada en la microcuenca del Río Puyo, se ha visto afectada por actividades como apertura de vías, sobreexplotación de material pétreo, la ganadería, la expansión de su frontera agrícola y descargas contaminantes en cuerpos de agua, y aseguraban su sustento en la venta de madera años atrás, y en esta comunidad:

Los pobladores afirman vivir en una situación precaria e insostenible, es evidente la escasez de recursos de flora y fauna en la zona, puesto que indican que las actividades de explotación y venta de madera persiste hasta la actualidad..., solo una comunidad (Campo Alegre) es la que ha emprendido en el programa de reforestación del Gobierno Nacional con las especies de

laurel, cedro, ahuano, canelo, entre otros, dentro del Programa estatal Socio Bosque (Reyes et al., 2018).

Tomando en cuenta las características que presenta el bosque amazónico y analizando los distintos estudios relacionados con deforestación donde se involucró el uso de imágenes SAR con gran éxito en la detección, vemos necesario el desarrollo de esta investigación con el fin de ser una fuente de información para futuros trabajos de teledetección enfocados a la identificación de zonas deforestadas.

## **OBJETIVOS**

## **Objetivo General**

Cuantificar las tasas de deforestación del bosque tropical amazónico mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales de tipo SAR.

## **Objetivos Específicos**

- Desarrollar un flujo de procesamiento aplicado a imágenes SAR para la determinación de zonas deforestadas.
- Realizar la validación de la metodología propuesta en el área de estudio.
- Evaluar la precisión de los resultados obtenidos por la metodología propuesta para la determinación de la deforestación.
- Comparar los resultados obtenidos en la investigación con los datos de la Autoridad ambiental competente.

## **CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO**

## 1.1.El panorama ambiental: Antecedentes

El mundo desde 1972 (inicio de la Revolución Ambiental) ha tomado como principal objetivo el estudio del cambio climático y los distintos fenómenos vinculados a este problema global. Se generan distintos espacios de diálogo alrededor de esta problemática que han permitido la articulación de instrumentos normativos internacionales y herramientas para la prevención de la contaminación y la protección del ambiente (Isaacs & Ramírez, 2011). Actualmente ha tomado mucha relevancia el área forestal, el cual es reconocido por la Conferencia de Estocolmo (1972) como un ecosistema complejo y con gran capacidad de perpetuación de sí mismo; esta perpetuación ha sido seriamente afectada por factores antrópicos como la expansión de la frontera agrícola, el crecimiento demográfico y la alta demanda de recursos forestales, por lo que se propone el establecimiento de una Planificación de la Gestión Forestal en las políticas territoriales, esto según el PNUMA (2002), para asegurar la permanecía de los bosques (Quijano & Morales, 2016).

La presencia de bosques y árboles es indispensable para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que lo establecen como sustento económico de poblaciones rurales, pueblos indígenas y pequeños agricultores, además de proveer servicios ambientales de regulación y aprovechamiento del territorio y forman parte del ciclo hidrológico, regulando caudales, purificando y filtrando agua y fortificando el suelo para evitar su erosión (FAO, 2018).

#### 1.2.La deforestación

La deforestación es un proceso de pérdida de la cobertura forestal existente debido a actividades antrópicas, en especial en países donde los niveles de desarrollo se miden por las hectáreas de recursos que poseen (Aragón, 2013). Algunas acciones que provienen de los seres humanos y provocan este fenómeno son el aumento de la población, la demanda de alimentos, el cambio de uso de suelo, la degradación de la tierra, la erosión del suelo, la baja calidad de agua y consecuencias de carácter social por la explotación de recursos forestales maderables, los cuales aportan alimentos, ingresos y diversidad nutricional a una de cada cinco personas en el mundo, principalmente de zonas rurales y vulnerables (FAO, 2018).

## 1.2.1. Área forestal amazónica

Los bosques son uno de los recursos más importantes y de los cuales dependen varias naciones y la Amazonía es un ejemplo representativo de aquello, ya que su extensa área boscosa es denominada como el principal pulmón del planeta, y los recursos que posee en sus 7,78 millones de km<sup>2</sup> se distribuyen entre Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Guyana, Perú, Surinam y Venezuela, según la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) (Borja et al, 2017).

Su inmensa biodiversidad ha sido objeto de diversos estudios llevados a cabo por distintas organizaciones (gobiernos, instituciones universitarias, centros de investigación y conocimiento y organismos no gubernamentales) en distintos campos, enfatizando en el aspecto ambiental, llevando a cabo un monitoreo en los cambios sufridos por la deforestación (su principal problemática), a través de distintas herramientas metodológicas, incluyendo estudios geoespaciales por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Joshi et al., 2015).

#### 1.3.La teledetección como herramienta de investigación

La teledetección tuvo origen a partir de los años 1950 en Estados Unidos tras lanzar el primer cohete hacia el espacio exterior, este fue equipado por una cámara fotográficas, las primeras imágenes obtenidas de la tierra no eran de alta claridad, con el tiempo esta técnica tuvo su evolución a través de proyectos y programas desarrollados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) para el estudio de la superficie terrestre, como el programa LANDSAT con la generación de imágenes ópticas El resultado de estos programas son imágenes captadas desde un sensor ubicado en un satélite, el cual envía datos a una unidad receptora que los compila y los transforma. Acorde a los criterios establecidos por la misión, se obtiene una imagen visible y lista para usar en el análisis de datos (Choez, 2018).

#### 1.3.1. Tipos de sensores remotos

Los sensores remotos reciben y transforman la información de una magnitud a otra, de preferencia señales eléctricas capaces de cuantificar y manipular. Descrito de forma general los sensores remotos pueden supervisar procesos, señalar errores, recoger los estados y transmitir esta información a los demás componentes del proceso y funcionar con o sin contacto físico (Peguero, 2012).

Los sensores remotos generalmente son utilizados para la observación del globo terrestre y se pueden clasificar de diversas formas, y en función de la fuente emisora de energía podemos tener (Peguero, 2012):

- Sensor pasivo: registra la energía reflejada o emitida por los objetos en la superficie terrestre, tomando la energía del sol como fuente de radiación electromagnética natural; por ejemplo: cámara fotográfica, sensores electroópticos de barrido mecánico y electrónico, y sensores de microondas.
- Sensor activo: genera energía para emitir ondas electromagnéticas en dirección al objeto, para detectar y registrar la energía reflejada por tal objeto, generando autónomamente la radiación medida tras ser reflejada; por ejemplo: Sensores RADAR o LIDAR.

Los sensores remotos pueden tener diversas clasificaciones de acuerdo con criterios como el tipo de banda espectral que operan, la información que pueden registrar o el tipo de tecnología que usan para realizar tal acción. (Peguero, 2012)

#### **1.4.Sensor Radio Detection And Ranging (RADAR)**

El radar es un sensor activo, el cual emite ondas electromagnéticas que ayudan en la medición de distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos móviles y estáticos que se reflejan en la superficie terrestre (Rodríguez et al, 2015). La apariencia que tengan las imágenes resultantes de este sensor dependerá de ciertas variables como:

- Variables geométricas: Geometría del terreno a analizar, rugosidad y contenido de humedad.
- Variables del sensor: Características del radar, geometría sensor-objetivo y dirección de transmisión.

La teledetección de radar utiliza un sensor a bordo de una plataforma, que viaja a lo largo de una trayectoria, transmitiendo pulsos hacia la superficie terrestre, que se refleja y vuelven al sensor como una señal que es almacenada en un dispositivo (Karszenbaum & Barrazza, 2015).

Según lo menciona Rodríguez et al. (2015) el radar tiene una baja probabilidad de interferencia por elementos atmosféricos, así que "es posible calcular qué fracción de la energía de la onda es retrodispersada desde la superficie de la tierra, lo cual permite obtener imágenes de ecos que proporcionan una representación de la rugosidad de ésta". En cuanto a esta última parte podría resultar un inconveniente el uso de estas imágenes en sitios con formaciones geográficas muy pronunciadas (montañas y pendientes) por problemas geométricos y radiométricos que conllevan una mala visualización de datos en un software, incluso con el uso de algoritmos de corrección disponibles (Koch, 2013).

## 1.4.1. Parámetros del radar

 Longitud de onda: El radar se basa en la emisión de una onda electromagnética en un rango de longitudes de onda que pueden variar desde centímetros hasta centenares de metros, la cual se origina en la antena del sensor, viaja hasta la superficie de la tierra e interactúa con las cubiertas en ella, formando longitudes de onda más pequeñas que se recogerán en la antena radar como "ecos electromagnéticos" un tiempo después de la emisión de la onda original (Rodríguez et al., 2015). La antena del sensor que recibe estas ondas tiene un funcionamiento basado en movimientos oscilantes a una frecuencia f, que desencadena una serie de campos magnéticos formando una corriente y generando una onda electromagnética emitida por la antena, la cual se propagará a la velocidad de la luz c. La longitud de onda recorrida  $\lambda$  resultará de las oscilaciones que la antena tenga con respecto a la velocidad de propagación de estas ondas; llevada a relación matemática tenemos la Ecuación 1 (Rodríguez et al., 2015):

$$\lambda^* f = c \tag{1}$$

Las antenas de radar pueden captar desde los 3 MHz hasta los 30 GHz (igual que en radio, al hablar de radar es muy frecuente citar la frecuencia, en lugar de la longitud de onda) (Rodríguez et al., 2015).

Polarización: Relacionado a la dirección de las ondas electromagnéticas, donde la orientación de un vector corresponde a la orientación del campo eléctrico sin variaciones al paso del tiempo. En una antena RADAR pueden generarse dos tipos de polarizaciones: horizontal (H) y vertical (V). Pueden existir distintas combinaciones formadas por distintas misiones enfocadas en la generación de imágenes SAR (Tabla N° 1) que influyen en la proyección de características como la topografía, el relieve, la cubierta vegetal en la imagen. El producto final puede estar compuesto desde una polarización (simple) hasta las cuatro polarizaciones adjuntadas (cuádruple) dependiendo de la necesidad y el tipo de estudio a desarrollar por parte del usuario (Tabla N° 2) (Karszenbaum & Barrazza, 2015).

Polarización	Transmisión	Recepción	Misiones
HH	Horizontal	Horizontal	RADARSAT
HV	Horizontal	Vertical	ENVISAT,
VH	Vertical	Horizontal	Sentinel-1
VV	Vertical	Vertical	ERS, ESA
			~

 Tabla Nº 1: Tipos de polarizaciones en antenas SAR

Adaptado de: Rodríguez et al. (2015)

Nivel		Polarizaciones			
	Simple	HH, VV, HV, VH (por separado)			
	Dual	HH-HV, VV-VH, HH-VV			
	Cuádruple	HH, VV, HV, VH (en una sola imagen)			
Т	Tabla N° 2: Disposición de polarizaciones en antenas SAR				

Fuente: Karszenbaum & Barrazza (2014)

Ángulo de incidencia: Referente al ángulo formado entre la dirección de iluminación de la antena receptora de RADAR y la generada en la superficie del terreno, que puede cambiar con respecto a la altura en la que se ubique el RADAR sobre la superficie terrestre y conlleva a una variación de la geometría de una imagen de punto a punto. Cuando el terreno tiene variaciones que el RADAR puede iluminar de forma distinta influyendo en la brillantez en ciertas zonas de la imagen, se habla de un ángulo de incidencia local (Figura N° 1) (ARSET, 2016; Podest, 2017).



Figura Nº 1: Ángulo de incidencia

Fuente: Meyer (2019)

#### 1.4.2. Clasificación de los sensores radar

Existen dos tipos de sensores RADAR conocidos (Meyer, 2019):

- Side Looking Airborne Radar (SLAR) o Radar de Apertura Real: se inventó en 1974, pero en la actualidad su utilidad es restringida.
- Synthetic Aperture Radar (SAR) o Radar de Apertura Sintética: surgió después del anterior, debido a la necesidad de conseguir una mayor resolución espacial sin aumentar el tamaño de la antena del radar.

## 1.5.El radar de apertura sintética

El SAR es una herramienta basada en la recepción de señales constantes emitidas por una antena en un mismo punto a lo largo de un recorrido o trayectoria, con una longitud de onda que puede ir desde 0,75 cm hasta los 30 cm según la banda a usarse (K: 0,75–2,5 cm, X: 2,5–3,75 cm, C: 3,75–7,5 cm y L: 15 cm–30 cm), en donde se captan las diferentes pulsaciones y se integran para formar una imagen de gran calidad, ya que a menor tamaño del radar se obtendrá una mejor resolución espacial (Rodríguez et al., 2015). En la obtención de las imágenes la antena forma regiones de resolución: la resolución acimutal  $R_a$  (por efecto de la emisión-recepción de ondas según la trayectoria y longitud del sensor al objeto, efecto Doppler) y la resolución de distancia  $R_d$  (definida por el alcance o longitud de recorrido de las ondas). La resolución acimutal en una imagen SAR viene dada por la Ecuación 2.

$$\boldsymbol{R_a} = \frac{l}{2} \tag{2}$$

Donde *l* es la longitud de la antena. En las imágenes SAR es muy común la aparición de ruido (*speckle*) en la imagen, tal y como lo muestra la Figura N° 2, que puede ser corregido dividiendo la imagen en fragmentos con elementos independientes a analizar, mismas que se unen para promediar y formar una imagen con menos ruido.



Figura Nº 2: Imagen SAR S-1A VV del 12 de febrero de 2015.
Zona con relieve considerable sin preprocesamiento. Distorsión entre la parte urbana de la ciudad del Puyo y la parte de vegetación que rodea la zona.

## Fuente: ESA (2019)

Debido a la obtención de imágenes de alta resolución, éstas son muy utilizadas en campos como la gestión de riesgos (daños por incendios) y la detección de cambios en la superficie terrestre (deforestación, zonas de cultivo, zonas glaciales) (Donezar et al., 2017; Joshi et al., 2015).

1.5.1. Características geométricas y radiométricas de las imágenes SAR

Con respecto a las propiedades geométricas implícitas en una imagen SAR se puede mencionar su propensión a errores en la toma de datos por parte del satélite debido a zonas montañosas que presente la superficie, además de su rugosidad (Figura N° 2); esto también dependerá de la dirección en la que el satélite capte la irradiación (ascendente/descendente) (Rodríguez et al., 2015). Este tipo de inconvenientes pueden provocar tres distorsiones: acortamiento (*foreshortening*), superposición (*layover*) y sombra (*shadow*) (Figura N° 3).



Figura Nº 3: Características geométricas de una imagen SAR

## Fuente: Meyer (2019)

Las características radiométricas se relacionan con el efecto de moteado (o *speckle*) presente al momento de la toma de imágenes debido a la interferencia entre las ondas reflejadas por elementos implícitos en una zona de muestra (Filipponi, 2019) y aparece en toda imagen cuya resolución es relativamente pequeña, generalmente de 10m x 10m (Figura N° 2) (Meyer, 2019); suele dificultarse en zonas con relieve considerable, ya que desde un satélite:

Cuando la onda incide sobre el terreno, dentro de un pixel, los distintos puntos en ese pixel (de decenas de metros por decenas de metros) se hallarán a diferentes alturas, muy diferentes comparadas con la longitud de la onda de radar..., esta variación tan aleatoria, debida a diferencias pequeñas de altura dentro de un mismo pixel es lo que origina el *speckle* (Rodríguez et al., 2015).

Esta desventaja puede ser reducida por medio de filtros desarrollados para este fin, o por medio de un procesamiento multilooking.

## CAPITULO II: METODOLOGÍA

La metodología para el estudio multitemporal a realizarse con imágenes Sentinel-1 (SAR) desde el año 2016 hasta el año 2020, se detalla a continuación.

### 2.1. Identificación del área de estudio

El sector elegido para el presente estudio se ubica en la comunidad de San Jacinto dentro de la microcuenca del Río Puyo, ubicado en la Provincia de Pastaza-Ecuador; la comunidad se encuentra en un rango de altura de 400 a 1000 msnm (GADPR Tarqui, 2019), con área aproximada de 15.000 hectáreas y con una vegetación de tipo Bosque siempre verde montano bajo (Reyes et al., 2018), que será el ecosistema a ser evaluado.

#### 2.2.Insumos

Los insumos utilizados en el presente trabajo son netamente digitales provenientes de fuentes de información secundaria. Se utilizaron 13 imágenes de tipo SAR, el software SNAP (ESA, 2019) para preprocesamiento, clasificación, así como Scripts del portal Google Colab. Los detalles de los insumos utilizados se describen en la Tabla N° 3.

Insumos	Descripción
Equipos electrónicos	Laptop Dell Inspiron 5567
	SNAP Desktop
Software	Team Viewer
	Google Colab
	13 imágenes SAR (órbita ascendente/descendente)
Productos digitales	6 imágenes PlanetScope con resolución espacial 4 m
	1 shapefile de Cobertura y Uso de la Tierra

Tabla Nº 3: Materiales y herramientas para el desarrollo del trabajo de investigación

#### Fuente: Autores

## 2.3.Obtención de imágenes

Para nuestra investigación se descargaron un total de 13 imágenes SAR de orbita ascendente y descendente con doble polarización VH-VV, del portal ASF Data Search Vertex. El rango

temporal fue desde el año 2016 hasta el año 2020, en cada año se seleccionaron imágenes de los meses febrero, junio y octubre, a excepción del 2020 (Tabla N° 4).

AÑO	MES	DÍA	ORIGEN	TIPO	TRACK	FRAME	ÓRBITA	POLARIZACIÓN
	FEB	7	S1-A	GRD	142	597	Descendente	VH-VV
2016	MAY	11	S1-A	GRD	120	1171	Ascendente	VH-VV
	OCT	8	S1-B	GRD	120	1172	Ascendente	VH-VV
	FEB	5	S1-B	GRD	120	1172	Ascendente	VH-VV
2017	JUN	7	S1-B	GRD	142	596	Descendente	VH-VV
	OCT	29	S1-B	GRD	142	595	Descendente	VH-VV
	FEB	14	S1-B	GRD	142	596	Descendente	VH-VV
2018	JUN	14	S1-B	GRD	142	596	Descendente	VH-VV
	OCT	12	S1-B	GRD	142	596	Descendente	VH-VV
	FEB	9	S1-B	GRD	142	596	Descendente	VH-VV
2019	JUN	9	S1-B	GRD	142	596	Descendente	VH-VV
	OCT	7	S1-B	GRD	142	596	Descendente	VH-VV
2020	FEB	10	S1-B	GRD	142	595	Descendente	VH-VV
	T			,	1 1	C + D	11 140	

Tabla Nº 4: Identificación de las imágenes SAR del portal ASF Vertex.

### Fuente: Autores

Para fines de validación de los resultados obtenidos se descargaron seis mosaicos de imágenes PlanetScope del portal Planet de alta resolución (4x4 metros), pertenecientes a los años 2015, 2018 y 2019 (Tabla N° 5).

Imagen PlanetScope	Fecha de registro
L15-0580E-1014N Dic15.tif	$I_{\rm M}$ Dia 2015 (A mayo Nº 1)
L15-0580E-1015N Dic15.tif	Jui-Dic 2013 (Anexo N 1)
L15-0580E-1014N Jun18.tif	End Jun 2018 (Anova $N^{0}$ 2)
L15-0580E-1015N Jun18.tif	Ene-Jun 2018 (Anexo N 2)
L15-0580E-1014N Dic19.tif	Let $\mathbf{D}_{i}$ 2010 (A serve $\mathbf{N}_{i}^{0}$ 2)
L15-0580E-1015N Dic19.tif	$Jui-Dic 2019 (Anexo N^2 3)$

 Tabla N° 5: Identificación de las imágenes PlanetScope

## Fuente: Autores

## 2.4. Preprocesamiento de imágenes

Dada la complejidad que representan los datos de las imágenes SAR y la geometría que se proyecta en ellos (distorsiones radiométricas provocadas por sombras y corrupción de datos) (Meyer, 2019), se aplicó un flujo de preprocesamiento basado en recomendaciones de investigaciones anteriores realizadas por SERCO Italia SPA (2018), Filipponi (2019), Kellndorfer (2019) y ESA (2019).

Todas las imágenes SAR (independiente de su órbita) fueron preprocesadas con la ayuda del componente S-1 Toolbox instalado en el programa SNAP. Se inicia con el ingreso de los archivos a su interfaz y el reconocimiento inicial de los datos referentes a las imágenes de cada fecha. Posterior a ello, se escoge una sección de ellas correspondiente al espacio de trabajo establecido (área de San Jacinto), para luego proceder a la construcción de un diagrama de procesos con la función GraphBuilder. En el diagrama se establece una corrección de órbita acorde a la geolocalización del producto, una corrección radiométrica (S-1 Thermal Noise Removal; GRD Border Noise; Calibrate; Terrain Flattening) y una corrección geométrica u ortorrectificación (Range-Doppler Terrain Correction: DEM SRTM 1Sec HGT 10m).



Figura Nº 4: Esquema desarrollado para el preprocesamiento de las imágenes SAR

#### Fuente: Autores

#### 2.5. Detección automática de deforestación con polarización VH

Para la identificación de áreas con posible pérdida de cobertura forestal se estableció un análisis multitemporal a través del cálculo de medias para cada año con el uso de imágenes de polarización VH, basándonos en la metodología aplicada por Vargas et al. (2019). El primer paso de esta metodología consiste en la aplicación de un filtro Gamma-Map utilizando un kernel de 7 \* 7 celdas. Para minimizar la variación multitemporal de la retrodispersión producida por

las áreas de bosque, Vargas et al. (2019) sugieren realizar un promedio anual de las imágenes SAR, este promedio fue realizado para las imágenes de los años 2016, 2017, 2018, 2019. Para la detección de deforestación dos algoritmos fueron aplicados (Ecuación 3) para su integración resultante en una imagen raster; los pixeles resultantes pertenecen a una detección preliminar de deforestación. Siguiendo la metodología propuesta se realiza la eliminación de pixeles con una superficie menor a 1 ha (Vargas et al., 2019).

$$[(\text{mean}_1 - \text{mean}_2) > 1,5] \text{ AND } [(\text{mean}_1 / \text{mean}_2) < 0,9]$$
 (3)

mean<sub>1</sub>: Promedio de la retrodispersión en el periodo inicial

mean2: Promedio de la retrodispersión en el periodo final

Las respectivas ecuaciones aplicadas para cada período fueron ingresadas en el software SNAP a través de la función Mask Manager (Figura N° 5)

Mask Manager					
۲	Name	Туре	Colour	Tra	Description
	dif-1617	Maths		0	(Gamma0_VH_db-Gamma0_VH_db_slv1_05Feb2017)>1.5
	div-1617	Maths		0	(Gamma0_VH_db/Gamma0_VH_db_slv1_05Feb2017)<0.9
	dif-1718	Maths		0.5	(Gamma0_VH_db_slv1_05Feb2017-Gamma0_VH_db_slv3_14Feb2018)>1.5
	div-1718	Maths		0.5	(Gamma0_VH_db_slv1_05Feb2017/Gamma0_VH_db_slv3_14Feb2018)<0.9
	dif-1819	Maths		0.5	(Gamma0_VH_db_slv3_14Feb2018-Gamma0_VH_db_slv5_09Feb2019)>1.5
	div-1819	Maths		0.5	(Gamma0_VH_db_slv3_14Feb2018/Gamma0_VH_db_slv5_09Feb2019)<0.9
	def-1617	Maths		0	'dif-1617' and 'div-1617'
	def-1718	Maths		0	'dif-1718' and 'div-1718'
	def-1819	Maths		0	'dif-1819' and 'div-1819'

Figura Nº 5: Aplicación de los algoritmos y su integración en una máscara

### Fuente: Autores

## 2.6. Aplicación de algoritmos para detección de cambios

Los algoritmos utilizados en la metodología Vargas et al. (2019) suelen tener cierto grado de arbitrariedad ya que poseen cierto grado de empirismo, es así que a fin de compararlo con una metodología alternativa, se aplicó un algoritmo de detección de cambios desarrollado por Canty (2020) y disponible en el portal de desarrolladores Google Colab, y está basado en el principio

de Bivariate Change Detection, extrayendo imágenes de doble polarización directamente del portal Google Earth Engine (Figura N° 6).



Figura N° 6: Desarrollo del algoritmo de detección de cambios en el portal Google Colab Fuente: Canty (2020)

Esta metodología combina un proceso polarimétrico con de la aplicación de un Likelihood Ratio Test (construcción de una matriz de covarianza) y una comprobación de hipótesis a través de una distribución estadística (Teorema de Wilks) (Canty, 2020) que ayudará a reforzar la detección de pixeles de cambio verdadero.

En resumen, la secuencia de procesos propuesta por Canty (2020) contiene los siguientes pasos:

- a) Aplicación del Likelihood Test Statistic;
- b) Construcción de la matriz de covarianza para cada imagen;
- c) Aplicación del Likelihood Ratio Test;
- d) Comprobación de la hipótesis por el Teorema de Wilks;
- e) Cálculo del p-valor a partir de la comprobación de la hipótesis.

Para detalles de este proceso se puede acceder a la siguiente web: https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/detecting-changes-insentinel-1-imagery-pt-2

### 2.7. Evaluación de la precisión de las áreas de deforestación estimadas

Para la evaluación de la precisión de un mapa es necesario compararlo con datos de mayor calidad, estos pueden ser derivados de visitas de campo o de otras fuentes como el caso de imágenes satelitales ópticas de mejor resolución espacial en donde se pueda discriminar visualmente de mejor manera el tipo de cobertura de la tierra. En el presente trabajo esas fuentes de información fueron las imágenes PlanetScope (Tabla N° 5).

Según Finegold et al. (2016), la comparación da como resultado medidas de precisión y estimaciones de área ajustadas para cada categoría de mapa. Este proceso se divide en cuatro componentes principales: (i) un mapa, (ii) el diseño de muestreo (iii) el diseño de respuesta y (iv) el análisis.

El mapa sometido a evaluación será el resultante de la combinación de las áreas de bosque identificadas para la comunidad de San Jacinto en el año 2015 (Cisneros et al., 2019) a partir del procesamiento de imágenes RapidEye (resolución espacial: 5 m) en conjunto con las nuevas áreas de deforestación identificadas sobre las imágenes SAR Sentinel-1 de la presente metodología (Anexo N° 5).

Por otra parte, el diseño de muestreo especifica cómo seleccionar un subconjunto del mapa para el que se recopilarán datos de referencia. Esto es necesario porque generalmente no es práctico recopilar datos de referencia para toda la región de estudio (área del mapa) (Finegold et al. 2016). Es así que se realizó un muestreo aleatorio estratificado, el cálculo de tamaño de muestra para los estratos de cambio y no cambio se lo realizó en base a lo propuesto por Cochran (1977), y el número de muestras fue distribuido equitativamente para cada estrato. El protocolo de diseño de respuesta proporciona pautas para recopilar los datos de referencia, en este caso fue un poco sencillo ya que se tiene una zona de bosque claramente definida, y las alteraciones o zonas de deforestación se presentan como zonas de suelo desnudo en las imágenes Planet, solo en ese caso y bajo interpretación visual se determinó como áreas de deforestación.

El cuarto paso es el protocolo de análisis incluye todos los pasos que conducen a la decisión de si el mapa y los datos de referencia están de acuerdo para el subconjunto de datos muestreados. El protocolo de análisis especifica cómo traducir la información contenida en la comparación de mapas y datos de referencia en estimaciones de precisión, y cómo cuantificar la incertidumbre asociada con ellos (Finegold et al. 2016). La mayoría de los cálculos se basan en la matriz de errores (también llamada comúnmente matriz de confusión), que contrasta el mapa y la clasificación de referencia (Finegold et al. 2016).

Según Finegold et al. (2016), la matriz de error es una tabulación cruzada de las etiquetas de clase asignadas por mapa y datos de referencia. Se deriva como una matriz  $q \ge q \ge q$  número de clases evaluadas. Los elementos muestran el número de puntos de datos que representan una clase de mapa *i* y una clase de referencia *j* ( $n_{ij}$ ). Por lo general, las clases de mapas se representan en filas y las clases de referencia en columnas. La diagonal de la matriz contiene los puntos de datos clasificados correctamente, mientras que las celdas fuera de la diagonal muestran errores de comisión y omisión. El error de comisión es la medida complementaria de la precisión del usuario, que se calcula restando el 100% de la precisión del usuario para cada clase. El error de comisión, calculado para cada una de las clases de mapa represente esa categoría en los datos de referencia. El error de omisión es la medida complementaria de la precisión del productor, calculada restando el 100% de la precisión del productor para cada clase. El error de omisión, calculado para cada una de las clases de mapas, es la medida complementaria de la precisión del productor, calculada restando el 100% de la precisión del productor para cada clase. El error de omisión, calculado para cada una de las clases de mapas,

es la probabilidad de que la unidad espacial clasificada en una categoría determinada en los datos de referencia represente esa categoría en los datos del mapa.

Las medidas de precisión se derivan de la matriz de errores. La precisión general es la proporción de área clasificada correctamente y, por lo tanto, se refiere a la probabilidad de que una ubicación seleccionada al azar en el mapa se clasifique correctamente ( $PG = \sum_{j=1}^{q} p_{jj}$ ).

## 2.8.Cálculo de tasa de deforestación

Se analizó la reducción de la cobertura forestal y se calcularon las respectivas tasas de deforestación para cada periodo de tiempo definido en cada metodología. Se aplicó la fórmula propuesta empleada por la FAO (1995) y que ha sido adoptada por la autoridad ambiental (MAE, 2012) en sus estudios relacionados al análisis de deforestación (Ecuación 4).

$$q = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{1/(t_2 - t_1)}$$
 (4)

Donde:

q: Tasa porcentual de deforestación
A<sub>1</sub>: Área de cobertura forestal inicial (ha)
A<sub>2</sub>: Área de cobertura forestal final (ha)
t<sub>1</sub>: Año de registro de cobertura forestal inicial

t<sub>2</sub>: Año de registro de cobertura forestal final

#### **CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 3.1. Definición del esquema de trabajo

Previo a la utilización de las imágenes SAR para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se revisaron las características que poseían las imágenes adquiridas en el portal ASF Vertex y se las contrarrestó con las características físicas de nuestra zona de estudio (Comuna de San Jacinto) para establecer una cadena de procesos a seguir para lograr los objetivos planteados. De acuerdo con los criterios antes descritos, se ha inclinado inicialmente por un preprocesamiento con calibración Gamma0 con el fin de reducir en un gran porcentaje la pérdida de información por sobreposición de una clase sobre otra (*foreshortening*) y sombras a causa del relieve (*shadow*) (Meyer, 2019), y la adopción de dos procesamientos de información para hacer un contraste en el manejo de la información SAR (Figura N° 7).



Figura Nº 7: Cadena de procesos aplicada a nuestro trabajo de investigación.

## Fuente: Autores

#### 3.2. Detección automática de deforestación con imágenes promedio de polarización VH

Con la aplicación de esta metodología se encontraron pixeles de cambio dentro del área de bosque perteneciente al área de estudio de San Jacinto de Pindo (Tabla N° 6). Luego se eliminaron los polígonos menores a 1 ha así como aquellos que estuvieron fuera del área de bosque; se obtuvieron las imágenes que se muestran a continuación en la Tabla N° 7.



Tabla Nº 6: Áreas detectadas por medio de la detección automática con la polarización VH

Fuente: Autores



Tabla Nº 7: Detección de posible deforestación dentro de la zona de bosque

## Fuente: Autores

Para la evaluación de la precisión de los mapas resultantes, se estimó el tamaño de muestra utilizando la fórmula definida por Cochran (1977), para lo cual se calcula el área en pixeles de cada estrato (Cambio/No Cambio), y la respectiva proporción ocupada por cada estrato. Para la precisión esperada por el usuario ( $U_i$ ) se usó un valor de 0,75 para cada estrato lo que resulta en una desviación estándar ( $S_i$ ) calculada de 0,43, con estos datos y utilizando un valor de error estándar objetivo (*SE*) de 0.05 se obtuvo en general para todos los períodos a ser evaluados un

tamaño de muestra de 75 puntos. Esta homogeneidad en el tamaño de la muestra se explica por los cambios mínimos detectados en cada período, lo que hace variar sutilmente las proporciones de área a ser evaluadas (Tabla N° 8).

Periodo 2016-2017	Cambio	No Cambio	Total
Área en pixeles	212	6 196463	198589
Wi (Proporción de estrato)	0,0	1 0,99	1,00
Ui (Precisión esperada)	0,7	5 0,75	
Si (Desviación estándar)	0,4	3 0,43	
Wi*Si	0,00	5 0,43	0,43
	SE error estándar ob	jetivo	0,05
	Total número de mu	estras	75
	Distribución por estr	ato	
Equivalente	3	8 37	75,00
Proporcional		1 74	75,00

Periodo 2017-2018	Cambio		No Cambio	Total
Área en pixeles		2498	194829	197327
Wi (Proporción de estrato)		0,01	0,99	1,00
Ui (Precisión esperada)		0,75	0,75	
Si (Desviación estándar)		0,43	0,43	
Wi*Si		0,005	0,43	0,43
	SE error estánd	ar obje	etivo	0,05
	Total número d	e mues	tras	75
	Distribución po	r estrat	<i>to</i>	
Equivalente	•	38	37	75,00
Proporcional		1	74	75,00

Periodo 2018-2019	Cambio	No Cambio	Total
Área en pixeles	2525	193091	195616
Wi (Proporción de estrato)	0,01	0,99	1,00
Ui (Precisión esperada)	0,75	0,75	
Si (Desviación estandar)	0,43	0,43	
Wi*Si	0,006	0,43	0,43
	0,05		
	75		

Distr	ibución por estrato		
Equivalente	38	37	75,00
Proporcional	1	74	75,00

Tabla Nº 8: Cálculo de tamaño de muestra para cada periodo de estudio

### Fuente: Autores

Los resultados de la validación nos indican que el mapa de cambios del período 2018-2019 presentó la más alta precisión general en el periodo 2018-2019 con un 80%, mientras que la precisión general para los periodos 2016-2017 y 2017-2018 fue levemente menor con un 76%. El error de omisión para la clase Cambio (entendida como deforestación), que se lo debe interpretar como el porcentaje de aquellas áreas que han sido omitidas o sub-detectadas como deforestación, ha sido más alto con un 28,95% para el período 2016-2017, mientras que para el período 2018-2019 se reduce aproximadamente a la mitad alrededor de 16%. En contraposición, los errores de comisión, es decir aquellos que indican áreas de cambio (deforestación) en donde no ha existido, son más altos para el período 2017-2018 con un 25%, mientras que para el período 2016-2017 se presentan los más bajos con un 20.59% (Tabla N° 9).

	Deforestación 2016-2017	Deforestación 2017-2018	Deforestación 2018-2019
Aciertos (A)	27	30	32
<b>Total real (TR)</b>	34	40	41
<b>Total proyectado (TP)</b>	38	38	38
Precisión del productor (PP)			
(A/TP)	71,05%	78,95%	84,21%
Error de omisión (100-PP)	28,95%	21,05%	15,79%
Precisión del usuario (PU)			
(A/TR)	79,41%	75,00%	78,05%
Error de comisión (1-PU)	20,59%	25,00%	21,95%
Precisión general PG	76,00%	76,00%	80,00%

Tabla Nº 9: Validación de los resultados obtenidos

## Fuente: Autores

En el análisis de las tasas de deforestación se observó que desde el año 2015 la zona de bosque ha ido aumentando de forma moderada (menor del 1%) para cada período de estudio. Sin

embargo, esto también indica una tendencia a la deforestación relativamente constante dentro del período 2016-2019 y aproximadamente alrededor de 66,61 ha (Figura N° 8).



Figura Nº 8: Índice de deforestación registrada por periodo de estudio

#### Fuente: Autores

Si comparamos los datos obtenidos en la presente investigación con los datos de deforestación bruta reportados en el periodo 2016-2018 por el Ministerio del Ambiente (MAAE, 2020) y aplicando la misma fórmula de cálculo de la deforestación, se puede apreciar que la presente metodología la subestima con una diferencia de alrededor 0,25% (Tabla No 10). Con respecto a su comparación con los datos proporcionados por el portal GFW (World Resources Institute, 2020), las tasas obtenidas a través de esta metodología se asemejan más en los valores porcentuales, pero con una tendencia en dirección contraria (Tabla N° 10).

Periodo	Tasas - Investigación	Tasa 2016- 2018 MAE	Diferencia Investigación-MAE	Tasas – Portal GFW	Diferencia Investigación -GFW
2016- 2017	-0,82%		-0,27	-0,95%	-0,13
2017- 2018	-0,83%	-1,09%	-0,26	-0,77%	+0,6
2018- 2019	-0,89%		-0,20	-0,86%	+0.3

Tabla Nº 10: Comparación de tasas de deforestación reportadas por distintas fuentes

### Fuente: Autores

## 3.3.Análisis de deforestación por aplicación de algoritmo de Canty para detección de

## cambios

El algoritmo desarrollado por Canty (2020) realiza el proceso de detección de cambios utilizando una distribución estadística que analiza cada pixel para clasificar el cambio según su intensidad. En este caso se utilizaron los datos preprocesados en la nube (Google Earth Engine) de las imágenes Sentinel-1 y realizando un análisis polarimétrico inicial a través de líneas de código. La detección de cambios se realizó de forma bianual partiendo desde el año 2016 y utilizando el mes de febrero en cada año. Se obtuvieron tres imágenes (Tabla N° 11) que clasifican el cambio en positivo (alto), negativo (bajo) o indefinido acorde a la reflectividad que presente el pixel bajo el Orden de Loewner. (Nielsen et al., 2020).







Canty (2020)

## Fuente: Autores

Este algoritmo refuerza su detección con datos provenientes de un análisis de distribución chi cuadrado y el cálculo del p-valor (Tabla N° 12).





Tabla Nº 12: Análisis estadístico realizado por el algoritmo de Detección de Cambios

#### Fuente: Canty (2020)

De acuerdo con el análisis a través de la distribución chi cuadrado con dos grados de libertad (establecido por defecto en el algoritmo), se confirma la hipótesis de cambio (H<sub>1</sub>) y rechaza la hipótesis de no cambio (H<sub>0</sub>), y con el cálculo de los p-valores se establece que en el periodo 2016-2020 existió un cambio considerable entre las imágenes correspondientes a febrero, y en los dos periodos restantes existe una uniformidad de cambio. Según Canty (2020) lo describe en su algoritmo, si tenemos una gran cantidad de p-valores pequeños hacia la izquierda de la gráfica indican un cambio genuino; de acuerdo a esta afirmación, podemos justificar el tamaño de los pixeles detectados en los mapas de la Tabla N° 11, ya que existe el cambio pero con el algoritmo se reflejan pixeles que representen un 95% de confianza para afirmar esa hipótesis.

Se realizó la validación de estos nuevos mapas resultantes siguiendo la metodología propuesta. Al calcular el tamaño de muestra de los polígonos para su posterior validación con la metodología propuesta por Finegold et al. (2016), se obtuvieron resultados similares para cada periodo y se optó por una distribución equitativa de los puntos de muestreo para cada estrato al igual que en la anterior validación.

Periodo 2016-2018	Cambio	No Cambio	Total
Área en pixeles	3600	194828	198428
Wi (Proporción de estrato)	0,02	0,98	1,00
Ui (Precisión esperada)	0,75	0,75	
Si (Desviación estandar)	0,43	0,43	
Wi*Si	0,008	0,43	0,43
	SE error estándar objetivo		0,05
	Total número de muestras		75
	Distribución por estrato		
Equivalente	38	37	75,00
Proporcional	1	74	75,00

Periodo 2016-2020	Cambio	No Cambio	Total
Área en pixeles	5325	193264	198589
Wi (Proporción de estrato)	0,03	0,97	1,00
Ui (Precisión esperada)	0,75	0,75	
Si (Desviación estandar)	0,43	0,43	
Wi*Si	0,012	0,42	0,43
	SE error estándar objetivo		0,05
	Total número de muestras		75
	Distribución por estrato		
Equivalente	38	37	75,00
Proporcional	2	73	75,00

Periodo 2018-2020	Cambio	No Cambio	Total
Área en pixeles	3921	191494	195415
Wi (Proporción de estrato)	0,02	0,98	1,00
Ui (Precisión esperada)	0,75	0,75	
Si (Desviación estandar)	0,43	0,43	
Wi*Si	0,009	0,42	0,43
	SE error estandar objetivo		0,05
	Total número de muestras		75

Distribución por estrato											
Equivalente								38		37	75,00
Proporcional								2		73	75,00
	1 10 10	0/1	1	1		~	1		1	• 1	

 Tabla Nº 13: Cálculo de tamaño de muestra para cada periodo

Fuente: Finegold et al. (2016)

Los resultados de la validación nos indican que el mapa de cambios del período 2016-2018 presentó la más alta precisión general 86,7%, mientras que la precisión general para el período 2018-2020 fue levemente menor con un 84%, en este análisis también se utilizó una detección de cambios para el período completo es decir 2016-2020 que fue para el que se obtuvo la menor precisión general de 73,33%. El error de omisión para la clase Cambio que es el porcentaje de aquellas áreas que han sido omitidas o subdetectadas como deforestación, ha sido más alto con un 28,95% para el período 2016-2020, mientras que para el período 2018-2020 presenta el valor más bajo de alrededor de 13%. Por otro lado, los errores de comisión, es decir aquellos que indican áreas de cambio (deforestación) en donde no ha existido, son más altos para el período 2016-2020 con un 25%, mientras que para el período 2016-2018 se presentan los más bajos con un valor alrededor de 9 % (Tabla N° 14).

	Cambio 2016 - 2018	Cambio 2016 - 2020	Cambio 2018 - 2020
Aciertos (A)	31	27	33
<b>Total real (TR)</b>	34	36	40
<b>Total proyectado (TP)</b>	38	38	38
Precisión del productor (PP) (A/TP)	81,58%	71,05%	86,84%
Error de omisión (100-PP)	18,42%	28,95%	13,16%
Precisión del usuario (PU) (A/TR)	91,18%	75,00%	82,50%
Error de comisión (100-PU)	8,82%	25,00%	17,50%
Precisión general PG	86,67%	73,33%	84,00%

Tabla Nº 14: Validación de los resultados obtenidos usando algoritmo de Canty (2020)

Fuente: Autores

En el análisis de las tasas de deforestación se observó que desde el año 2016 la zona de bosque ha ido decreciendo de forma moderada (menor del 1%) para cada período de estudio. Sin embargo, al evaluar el cambio de todo el período 2016-2020 se presenta una disminución en la tasa de deforestación, sin embargo, contraponiendo con los resultados de validación el período 2016-2020 es el que presenta la mayor proporción de error. Los resultados de esta metodología indican también una tendencia a la deforestación relativamente constante dentro del período 2016-2020, indicando una pérdida aproximada de alrededor de 48,22 ha (Figura N° 9).



Figura Nº 9: Índice de deforestación registrada por periodo de estudio según la metodología

de Canty (2020)

#### Fuente: Autores

Se comparó los datos obtenidos de tasas de deforestación utilizando la metodología de Canty (2020) con los datos de deforestación bruta reportados en el periodo 2016-2018 por el Ministerio del Ambiente (MAAE, 2020). Se aprecia que la presente metodología la subestima con una diferencia de alrededor 0,23% (Tabla No 15). Con respecto a su comparación con los

datos proporcionados por el portal GFW (World Resources Institute, 2020), las tasas obtenidas a través de esta metodología se asemejan más en los valores porcentuales, pero con una tendencia en dirección contraria (Tabla No 15).

Periodo	Tasas - Investigación	Tasa 2016- 2018 MAE	Diferencia Investigación-MAE	Tasas – Portal GFW	Diferencia Investigación -GFW
2016- 2018	-0,83%		-0,26	-0,95%	-0,12
2018- 2020	-0,86%	-1,09%	-0,23	-0,77%	+0,9
2016- 2020	-0,61%		-0,48	-0,86%	-0.25

Tabla Nº 15: Comparación de tasas reportadas por distintas fuentes

Fuente: Autores

#### **CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 4.1.Conclusiones

En la presente investigación se aplicaron distintos procedimientos para la detección de zonas deforestadas únicamente con el uso de imágenes Sentinel-1, comenzando por la búsqueda de un preprocesamiento que nos ayude a reducir las distorsiones que presentan las imágenes SAR al momento de su adquisición, optando por el uso de una retrodispersión gamma0.

Para el área de estudio se aplicaron dos metodologías para la detección de deforestación, la desarrollada por Vargas et al. (2019) y el algoritmo para detección de cambios desarrollado por Canty (2020).

Al someter los resultados a validación con igual cantidad de muestras (75 puntos de control), las dos metodologías utilizadas presentaron resultados aceptables. Para la primera metodología Vargas et al. (2019) las precisiones generales fueron de 76 %, 76% y 80% para los períodos 2016-2017, 2017-2018 y 2018-2019, respectivamente. Para la segunda metodología (Canty, 2020) las precisiones generales fueron de 86,7%, 73,3% y 84% para los períodos 2016-2018, 2018-2020 y 2016-2020, respectivamente. Una de las posibles razones para que el algoritmo de detección de cambios de Canty (2020) presente una mejor precisión al identificar zonas de cambio dentro de la zona de bosque es el manejo de los datos con el uso de dos polarizaciones (VH-VV), sin embargo esta es una afirmación que necesita ser investigada más a detalle.

En cuanto al análisis de deforestación en la zona de estudio (Comuna de San Jacinto), presenta tasas muy bajas de pérdida de bosque (-0,82%, -0,83% y -0,89% en la primera metodología para los periodos 2016-2017, 2017-2018 y 2018-2019, respectivamente; -0,83%, -0,86% y - 0,61% en la segunda metodología para los periodos 2016-2018, 2016-2020 y 2018-2020, respectivamente). Estas tasas resultan relativamente inferiores a las estimadas con los datos del MAAE que para el período 2016-2018 fue de -1,09% (la tasa que presentó mayor alejamiento

fue la reportada en la segunda metodología para el periodo 2016-2020, con -0,48%) y al compararlas con los reportes del portal GlobalForestWatch (World Resources Institute, 2020) presentan un alejamiento menor a 0,15%, a excepción del periodo 2016-2020 en la segunda metodología, con -0,25%. A priori, se podría decir que las metodologías que han utilizado datos SAR han subestimado la deforestación de la zona, sin embargo es necesario realizar una investigación más profunda para determinar que otros factores pueden haber influido es esta diferencia.

## 4.2. Recomendaciones

Para mejorar la exactitud de los resultados que se quieran obtener, existen distintas herramientas destinadas para el manejo de imágenes SAR tanto por software (Gamma, ERDAS, Orfeo Toolbox, QGis) como por programación en cuadernos virtuales (Jupyter Notebook, Python, PolsarPro), además de aumentar la cantidad de imágenes que posean características similares en orientación, polarización, resolución azimutal y resolución de distancia.

Es imperiosa la necesidad de establecer más estudios de esta índole en esta zona y presentarlos a las autoridades competentes de manera que se formules políticas para la regulación de las actividades de extracción de madera, así como las orientadas al impulso de proyectos de manejo sustentable de bosques.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ARSET. (2016). *Introducción a Radar*. National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Borja, M. O., Aragón, J., & Josse, C. (2017). Bosques de la Región Amazónica Ecuatoriana:
  ¿Qué nos dicen las cifras de deforestación de los últimos 15 años? XVI Conferencia *Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica-CONFIBSIG*, 63–76.
  https://bit.ly/2P7ysMo
- Canty, M. (2020). *Detecting Changes in Sentinel-1 Imagery (Part 2)*. The Earth Engine Community Authors. https://developers.google.com/earthengine/tutorials/community/detecting-changes-in-sentinel-1-imagery-pt-2#a ratio image
- Choez, I. (2018). Análisis de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo en el área de influencia del canal azúcar-Río Verde mediante teledetección [Universidad de Guayaquil]. https://bit.ly/3cNMlrn
- Cisneros, C., Robles, M., & Torres, B. (2019). Dinámicas espacio temporales de cambio de uso del suelo en comunidades indígenas del centro de la Amazonía Ecuatoriana. *I Congreso Internacional Paisajes Forestales y Sustentabilidad*.

Cochran, W. G. (1977). Sampling Techniques. John Wiley & Sons.

- D'Acunha, M. (2015). Estudio de la dinámica de la degradación de hojarasca en bosque tropical amazónico utilizando marcadores químicos de descomposición [Pontificia Universidad Católica del Perú]. https://doi.org/http://hdl.handle.net/20.500.12404/6220
- Donezar, U., Larrañaga, A., Tamés, A., Sánchez, C., Albizua, L., Ciriza, R., & del Barrio, F. (2017). Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS. *Revista de Teledeteccion*, 2017, 49–58. https://doi.org/10.4995/raet.2017.8896
  ESA. (2019). *SNAP Desktop*. https://step.esa.int/main/download/snap-download/

FAO. (1995). Forest Resources Assessment 1990: Global Synthesis. En FAO forestry Paper.

- FAO. (2018). El estado de los bosques del mundo Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. En *Food and Agriculture Organization (FAO)*.
  http://www.fao.org/publications/es
- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. Proceedings, 18(1), 11. https://doi.org/10.3390/ecrs-3-06201
- Finegold, Y., Ortmann, A., Lindquist, E., D'Annunzio, R., & Sandker, M. (2016). Map accuracy assessment and area estimation: a practical guide. En *National Forest Monitoring and Assessment Working Paper* (Vol. 46). Food and Alimentation Organization (FAO). http://www.fao.org/3/a-i5601e.pdf
- Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., & Cherrington, E. (2019). THE SAR HANDBOOK
  Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. En A.
  Flores, K. Herndon, R. Thapa, & E. Cherrington (Eds.), *SERVIR Global* (1a ed.).
  https://doi.org/10.25966/nr2c-s697
- GADPR Tarqui. (2019). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Tarqui 2014-2019. 1–266.
- Henao, L., Pacheco, N., Argüello, S., Moreno, M., & Stevenson, P. (2012). Patrones de diversidad de epífitas en bosques de tierras bajas y subandinos. *Colombia Forestal*. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a02
- Isaacs, P. J., & Ramírez, H. M. (2011). Evaluación de deforestación con base en imagenes satelitales, composición y configuración del paisaje en la cuenca alta y media del río Cravo Sur. Análisis Geográficos, 1, 177.
- Joshi, N., Mitchard, E. T. A., Woo, N., Torres, J., Moll-Rocek, J., Ehammer, A., Collins, M., Jepsen, M. R., & Fensholt, R. (2015). Mapping dynamics of deforestation and forest degradation in tropical forests using radar satellite data. *Environmental Research Letters*,

10. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034014

- Karszenbaum, H., & Barrazza, V. (2015). Introducción a la Teledetección Cuantitativa. *Teledetección Cuantitativa*.
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E.
  (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources
  Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20.
  https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014
- Kellndorfer, J. (2019). Chapter 3: Using SAR Data for Mapping Deforestation and Forest Degradation. En A. Flores, K. Herndon, R. Thapa, & E. Cherrington (Eds.), *THE SAR HANDBOOK: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation* (1a ed., pp. 65–172). https://doi.org/. 10.25966/68c9-gw82
- Koch, B. (2013). La teledetección como apoyo a los inventarios forestales nacionales EFN.
   Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales, 18.
   https://bit.ly/3r5WggZ
- MAAE. (2020). Deforestación periodo 2016-2018. En *Guia Interactiva Ministerio del Ambiente y Agua*. http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/
- MAE. (2012). Línea base de deforestación del Ecuador Continental.
- Meyer, F. (2019). Chapter 2: Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. En A. Flores, K. Herndon, R. Thapa, & E. Cherrington (Eds.), *THE SAR HANDBOOK: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation* (1a ed., pp. 21–64). https://doi.org/10.25966/ez4f-mg98
- Miranda, R. (2018). Desarrollo y cambio climático. Una mirada desde América Latina. *Revista del CESLA*, 19. https://bit.ly/3c5oT9X

Nielsen, A. A., Skriver, H., & Conradsen, K. (2020). The Loewner Order and Direction of

Detected Change in Sentinel-1 and Radarsat-2 Data. *IEEE Geoscience and Remote* Sensing Letters. https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2918636

- Pedraza, C., Clerici, N., Forero, C. F., Melo, A., Navarrete, D., Lizcano, D., Zuluaga, A. F., Delgado, J., & Galindo, G. (2018). Zero deforestation agreement assessment at farm level in Colombia using ALOS PALSAR. *Remote Sensing*, 10(9), 1–18. https://doi.org/10.3390/rs10091464
- Peguero, C. (2012). Sensores remotos y aplicaciones en teledetección geodesia y gestión de recursos naturales y patrimonio natural. *Proyecto SAMBA (INPROHUELVA)*, 307. https://bit.ly/2Nxtloe
- Podest, E. (2017). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR). En *NASA*.
- Quijano, A. C., & Morales, Y. L. (2016). Modelo regresivo para la estimación de biomasa aérea forestal a partir de datos de parcelas permanentes y datos Radar SAR ALOS
  PALSAR en el Parque Natural Bataclán, Cali. *Revista UD y la Geomática*, 11, 66–72.
- Reyes, M. V., López, C., & Ortega, Á. (2018). Aprovechamiento de recursos naturales y culturales con fines turísticos. Caso de estudio: comuna San Jacinto del Pindo, en la provincia de Pastaza (Ecuador). *IV CONGRETUR – "El impacto del turismo en el desarrollo del Ecuador"*, 6(1), 39–49.
- Rodríguez, D., Sanchez, N., Dominguez, J. A., & Marta, C. S. (2015). *Cuestiones de Teledetección* (UNED (ed.)). Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Sanhueza, E. (2013). El futuro incierto del bosque amazónico ¿muerte o resiliencia? Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América, 38, 397–399. https://www.redalyc.org/pdf/339/33928571001.pdf
- SERCO Italia SPA. (2018). Deforestation monitoring using Sentinel-1 Case Study: Paraguay, 2018. *The RUS Copernicus: Research and User Support*, 1–29. https://rus-

copernicus.eu/portal/the-rus-library/learn-by-yourself/

- Vargas, C., Itoh, T., Tsuji, S., Koide, T., Hirose, K., & Okonogi, H. (2019). Automatic deforestation detection methodology using Sentinel-1. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2(November 2016), 6590–6593. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898609
- World Resources Institute. (2020). *Pérdida de Cobertura Arbórea*. GlobalForestWatch. https://bit.ly/2PEHl0g

# ANEXOS



Anexo Nº 1: Imágenes PlanetScope-Dic2015



Anexo Nº 2: Imágenes PlanetScope-Jun2018



Anexo Nº 3: Imágenes PlanetScope-Dic2019



Anexo Nº 4: Mapa de ubicación – Comuna San Jacinto



Anexo N° 5: Cobertura inicial de bosque (año 2015)



Anexo Nº 6: Puntos de control – Primera metodología (Periodo 2016-2017)



Anexo Nº 7: Puntos de control – Primera metodología (Periodo 2017-2018)



Anexo Nº 8: Puntos de control – Primera metodología (Periodo 2018-2019)



Anexo Nº 9: Puntos de control – Segunda metodología (Periodo 2016-2018)



Anexo Nº 10: Puntos de control – Segunda metodología (Periodo 2016-2020)



Anexo Nº 11: Puntos de control – Segunda metodología (Periodo 2018-2020)

		Refe	rencia		_			
	2016-2017	Cambio	No Cambio	Total real				
Мара	Cambio	27	7	34	Precisión	0,76	Error	0,24
	No Cambio	11	30	41	Precisión del productor	0,71	RSME	0,43
	Total proyectado	38	37	75	Precisión del usuario	0,79		

		Referencia			_			
	2017-2018	Cambio	No Cambio	Total real				
Мара	Cambio	30	10	40	Precisión	0,76	Error	0,24
	No Cambio	8	27	35	Precisión del productor	0,79	RSME	0,11
	Total proyectado	38	37	75	Precisión del usuario	0,75		

		Refe	rencia		_			
	2018-2019	Cambio	No Cambio	Total real				
Мара	Cambio	32	9	41	Precisión	0,80	Error	0,20
	No Cambio	6	28	34	Precisión del productor	0,84	RSME	0,24
	Total proyectado	38	37	75	Precisión del usuario	0,78		

Anexo Nº 12: Construcción de matrices de confusión – Primera metodología

Periodo	Área (m <sup>2</sup> )	Área (ha)	q	Deforestación (ha)
2015	79234862	7923,49		
2016-2017	78585453	7858,55	-0,82%	64,94
2017-2018	77931990	7793,20	-0,83%	65,35
2018-2019	77236632	7723,66	-0,89%	69,54

Anexo N° 13: Cálculo de tasas de deforestación para cada periodo – Primera metodología



Anexo Nº 14: Bosque final con zonas deforestadas eliminadas (Periodo 2016-2017) -

Primera metodología



Anexo Nº 15: Bosque final con zonas deforestadas eliminadas (Periodo 2017-2018) – Primera metodología



Anexo Nº 16: Bosque final con zonas deforestadas eliminadas (Periodo 2018-2019) -

Primera metodología

		Refe	rencia		_			
	2016-2018	Cambio	No Cambio	Total real				
Мара	Cambio	31	3	31	Precisión	0,87	Error	0,13
	No Cambio	7	34	7	Precisión del productor	0,82	RSME	0,43
	<b>Total proyectado</b>	38	37	38	Precisión del usuario	0,91		

		Refe	rencia		_			
	2016-2020	Cambio	No Cambio	Total real				
Мара	Cambio	27	9	36	Precisión	0,73	Error	0,27
	No Cambio	11	28	39	Precisión del productor	0,71	RSME	0,11
	Total proyectado	38	37	75	Precisión del usuario	0,75		

		Referencia						
	2018-2020	Cambio	No Cambio	Total real				
Мара	Cambio	33	7	40	Precisión	0,80	Error	0,16
	No Cambio	5	30	35	Precisión del productor	0,84	RSME	0,11
	Total proyectado	38	37	75	Precisión del usuario	0,78		

Anexo Nº 17: Construcción de matrices de confusión – Segunda metodología

Periodo	Área (m <sup>2</sup> )	Área (ha)	q	Deforestación (ha)
2015	79234862	7923,49		
2016-2018	77931400	7793,14	-0,83%	65,17
2018-2020	76597746	7659,77	-0,86%	66,68
2016-2020	77305733	7730,57	-0,61%	48,23

Anexo Nº 18: Cálculo de tasas de deforestación para cada periodo – Segunda metodología



Anexo Nº 19: Bosque final con zonas deforestadas eliminadas (Periodo 2016-2018) -

Segunda metodología



Anexo Nº 20: Bosque final con zonas deforestadas eliminadas (Periodo 2016-2020) –

Segunda metodología



Anexo Nº 21: Bosque final con zonas deforestadas eliminadas (Periodo 2018-2020) – Segunda metodología