



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Detección y mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR,
usando el método K-Means Clustering para la evaluación de
impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño. Caso:
Cuenca Bajo Piura, Región Piura.**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

Joel Alejandro RODRIGUEZ DE LA CRUZ

Maribel MORENO ARQUE

ASESOR

Dr. Francisco Alejandro ALCÁNTARA BOZA

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Rodríguez, J. & Moreno, M. (2023). *Detección y mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR, usando el método K-Means Clustering para la evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño. Caso: Cuenca Bajo Piura, Región Piura*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Joel Alejandro Rodríguez De La Cruz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73257735
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0003-8835-3985
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Maribel Moreno Arque
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75572541
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0004-0712-5831
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Francisco Alejandro Alcántara Boza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	27074721
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9127-4450
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dante Horacio Loayza Alatrística
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07564905
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Maximo Ayala Gutierrez

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25704431
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Luis Alberto Huaman Amasifuen
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	43322204
Datos de investigación	
Línea de investigación	Ciencias de la tierra y ciencias ambientales
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Piura Cuenca: Bajo Piura Latitud: -5.252490° Longitud: -80.592796°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2020 - diciembre 2022
URL de disciplinas OCDE	Sensores remotos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04 Ciencias de la tierra, Ciencias ambientales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.00



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día jueves 13 de abril del año 2023, siendo las 16:30 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA	Presidente
Ing. MAXIMO AYALA GUTIERREZ	Miembro
Mg. LUIS ALBERTO HUAMAN AMASIFUEN	Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada: « **DETECCIÓN Y MAPEO DE INUNDACIONES MEDIANTE IMÁGENES SAR, USANDO EL MÉTODO K-MEANS CLUSTERING PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS DE DESASTRES OCASIONADOS POR EL FENÓMENO EL NIÑO. CASO: CUENCA BAJO PIURA, REGIÓN PIURA**», Presentada por los Bachilleres **JOEL ALEJANDRO RODRIGUEZ DE LA CRUZ** y **MARIBEL MORENO ARQUE**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a los Bachilleres las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:

DIECISIETE (17), APROBADO SOBRESALIENTE

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don **JOEL ALEJANDRO RODRIGUEZ DE LA CRUZ** y **MARIBEL MORENO ARQUE**

Siendo las *17:45* horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 13 de abril del 2023


Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA
PRESIDENTE


Ing. MAXIMO AYALA GUTIERREZ
MIEMBRO


Mg. LUIS ALBERTO HUAMAN AMASIFUEN
MIEMBRO


DR. FRANCISCO ALEJANDRO ALCANTARA BOZA
ASESOR DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL INGENIERIA GEOGRÁFICA

Dr. Francisco Alejandro Alcántara Boza

OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES

Carla Marivi Ccora Huaman

DOCUMENTO EVALUADO:

Tesis para optar el Grado Académico de INGENIERO GEÓGRAFO titulado: «DETECCIÓN Y MAPEO DE INUNDACIONES MEDIANTE IMÁGENES SAR, USANDO EL MÉTODO K-MEANS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS DE DESASTRES OCASIONADOS POR EL FENÓMENO EL NIÑO. CASO: CUENCA BAJO PIURA, REGIÓN PIURA»

AUTOR DEL DOCUMENTO:

Bach. JOEL ALEJANDRO RODRIGUEZ DE LA CRUZ

FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:

08/09/2022

FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:

08/09/2022

SOFTWARE UTILIZADO

Turnitin

CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecomillados
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

Nueve por ciento (02%)

FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

OBSERVACIONES

Ninguna

CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

08/09/2022

Atentamente,



UNMSM

Firmado digitalmente por
ALCANTARA BOZA Francisco
Alejandro FAU 20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.09.2022 13:10:08 -05:00

Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCANTARA BOZA
DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA(e)

DEDICATORIA

A mi padre: Pedro Joel, por haberme apoyado con base en su sacrificio y esfuerzo a poder conseguir mis estudios universitarios y, por consiguiente, mi bachillerato.

A mis hermanos: Joseph Alexis y Jhosselyn Abigail, a quienes espero motivar y a su vez, verlos culminar su etapa de pregrado bajo esta misma modalidad.

A mi madre: Cirila Mercedes, por su amor incondicional.

A mi abuelo: Francisco Javier, que solo te me adelantaste y pronto nos volveremos a ver.

A mi compañera: Maribel, por su impulso y convencimiento, hacia mi persona, para realizar investigación y juntos lograr culminarla.

A mi centro de trabajo: Insideo, por apoyarme con el curso base y los permisos necesarios para el desarrollo de esta tesis.

Joel Alejandro Rodríguez De La Cruz

DEDICATORIA

Dedico el resultado de este trabajo a mi madre Flora, por su apoyo y motivación constante desde pequeña, la que siempre me ha inculcado valores, la ética, y perseverancia para culminar esta etapa de investigación.

A mi padre Braulio y hermano Johan, por su apoyo incondicional y creer en mí.

A mi compañero Joel, por motivarme a culminar la investigación a pesar de las adversidades que se presentaron en el camino.

Maribel Moreno Arque

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro asesor, el Dr. Francisco Alcántara, por haber aceptado apoyarnos en este trabajo de investigación, así como también por su tiempo empleado en la revisión y corrección. Asimismo, agradecemos a los docentes involucrados desde el plan de tesis: Ing. Julio Gutiérrez (en su memoria), Ing. Máximo Ayala, Ing. Dante Loayza y Mag. Luis Huamán; por impartir sus conocimientos desde la etapa de pregrado hasta la sustentación; a nuestra querida escuela de Ingeniería Geográfica, donde nos desarrollarnos y aprendimos hasta nuestro egreso.

Queremos agradecer también a nuestros compañeros y colegas: Melvin y Danny, por brindarnos la asesoría e información necesaria para la elaboración de la presente investigación, quienes además siempre estuvieron apoyándonos con sus comentarios, preguntas y alientos para su respectiva culminación

En cuanto a la contribución de los conocimientos para la presente investigación queremos agradecer a CEICI por las capacitaciones impartidas sobre imágenes radar y a Luis Campos, quienes fueron guías muy importantes dentro de nuestra travesía.

Finalmente, agradecer a nuestros familiares; amigos: Jhordan, Brian, Angélica y Rodrigo, que se vieron involucrados durante la investigación; a todos los compañeros y colegas que asistieron a la sustentación; y a todas las personas que nos brindaron su apoyo incondicional y consejos.

¡Gracias Totales!

RESUMEN

El fenómeno de El Niño es uno de los principales eventos de origen natural que propicia fuertes lluvias, debido al incremento abrupto de la temperatura superficial del mar, ocasionando inundaciones, específicamente en la zona norte del país, estos peligros generan grandes afectaciones e impactos en los medios sociales y económicos. Razón por la cual, a fin de tener una respuesta oportuna para las acciones reactivas, y posterior a ellas, implementar las etapas de rehabilitación y reconstrucción, esta investigación busca aportar a través de la detección y mapeo de inundaciones mediante el empleo de imágenes SAR, un eficaz monitoreo e identificación de áreas inundadas para acontecimientos futuros en el país.

El área de estudio de la investigación fue la cuenca Bajo Piura, donde se realizó una prospección satelital mediante imágenes SAR Sentinel-1 apoyadas de imágenes ópticas Sentinel-2, estableciéndose dos fechas de análisis para las imágenes SAR: (1) imagen previa al evento, con fecha del día 03/02/2017, debido que a partir de esa fecha se manifestaron las condiciones meteorológicas anómalas, que trajeron como consecuencia el aumento del caudal del río; y (2) durante el evento, con fecha 04/04/2017, debido a que se determinó el máximo impacto de la inundación en la cuenca Bajo Piura. En ambos casos se consideró datos importantes como, dirección de vuelo y polarización, los cuales deben ser compatibles en ambas imágenes para un adecuado análisis. Posterior a las correcciones y procesamiento para ambas imágenes radar, se aplicó el algoritmo de clasificación no supervisado *k-means clustering*, estableciéndose 6 clases, 30 interacciones y 32 000 semillas aleatorias, que funcionó reduciendo la variabilidad de grupos, apreciándose en las estadísticas, los valores establecidos como centroides para las diferentes clases, verificándose que la clase de mayor variación (clase 6, valor=5), obtuvo un valor de centroide de $\sigma^{\circ}(\text{dB}) = 1.508$, el cual reflejó los mayores cambios entre las imágenes SAR analizadas.

Asimismo, mediante la matriz de confusión, se validó la presente clasificación, obteniéndose datos de precisión global de 0,987, datos de confiabilidad resultante al azar de 0,913 e índice Kappa de 0,850 adquiriendo un grado de acuerdo casi perfecto, según la tabla instaurada por Landis y Koch en 1977.

ABSTRACT

The El Niño phenomenon is one of the main events of natural origin that causes heavy rains, due to the abrupt increase of the sea surface temperature, causing floods, specifically in the northern part of the country, these hazards generate great affectations and impacts on social and economic environments. For this reason, to have a timely response for reactive actions, and after them, implement the stages of rehabilitation and reconstruction, this research seeks to contribute through the detection and mapping of floods using SAR images, an effective monitoring and identification of flooded areas for future events in the country.

The research study area was the Bajo Piura basin, where a satellite survey was carried out using Sentinel-1 SAR images supported by Sentinel-2 optical images, establishing two analysis dates for the SAR images: (1) image prior to the event, dated 03/02/2017, due to the fact that from that date the anomalous meteorological conditions were manifested, which brought as a consequence the increase of the river flow; and (2) during the event, dated 04/04/2017, due to the fact that the maximum impact of the flood in the Bajo Piura basin was determined. In both cases, important data such as flight direction and polarization were considered, which must be compatible in both images for an adequate analysis. After the corrections and processing for both radar images, the unsupervised k-means clustering classification algorithm was applied, establishing 6 classes, 30 interactions and 32,000 random seeds, which worked by reducing the variability of groups, appreciating in the statistics, the values established as centroids for the different classes, verifying that the class with the greatest variation (class 6, value=5), obtained a centroid value of $\sigma^{\circ}(\text{dB}) = 1.508$, which reflected the greatest changes between the SAR images analyzed.

Likewise, by means of the confusion matrix, the present classification was validated, obtaining global precision data of 0.987, reliability data resulting at random of 0.913 and Kappa index of 0.850, acquiring a degree of almost perfect agreement, according to the table established by Landis and Koch in 1977.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.2.1 Descripción de la problemática	3
1.2.2 Formulación del problema.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Importancia y alcance.....	5
1.5 Limitaciones	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1 Antecedentes.....	9
2.2 Bases Teóricas	12
2.2.1 Mapeo de inundaciones	12
2.2.2 Algoritmo <i>K-Means Clustering</i>	35
2.2.3 Evaluación de impactos.....	37
2.3 Definición de términos	38
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES	40
3.1 Hipótesis	40
3.1.1 Hipótesis General	40
3.1.2 Hipótesis Específicas.....	40

3.2	Variables.....	40
3.2.1	Variable Independiente.....	40
3.2.2	Variable Dependiente.....	41
3.3	Operacionalización de variables.....	41
CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS		42
4.1	Área de estudio.....	42
4.1.1	Ubicación.....	42
4.1.2	Medio Físico.....	44
4.1.3	Medio Social.....	51
4.1.4	Medio Económico	57
4.2	Diseño de la investigación.....	62
4.2.1	Tipo	62
4.2.2	Nivel.....	63
4.2.3	Enfoque	63
4.2.4	Diseño.....	63
4.3	Población y muestra	64
4.3.1	Población	64
4.3.2	Muestra.....	64
4.4	Procedimiento.....	64
4.4.1	Recolección de la base de datos	66
4.4.2	Procesamiento de las imágenes SAR	72

CAPÍTULO V: RESULTADOS	107
5.1 Detectar y mapear las inundaciones mediante imágenes SAR, usando la técnica <i>k-means clustering</i> para fines de evaluación de impactos de desastres ocasionados por el Fenómeno El Niño, en la cuenca Bajo Piura, región Piura.	107
5.2 Interpretar la dinámica de la inundación mediante el análisis de imágenes SAR para evaluar los impactos de desastres ocasionado por el Fenómeno El Niño.	109
5.3 Aplicar un filtro morfológico para una adecuada determinación de áreas inundadas para evaluar los impactos de desastres ocasionados por el Fenómeno El Niño.....	109
5.4 Identificar la información cartográfica a requerir para la evaluación de los principales impactos del desastre.	110
5.4.1 Medio Social.....	111
5.4.2 Medio Económico	114
5.5 Determinar la eficacia y ventaja del empleo del método <i>k-means clustering</i> para el análisis de inundaciones para futuros eventos del fenómeno el niño y futuras evaluaciones de impactos de desastres.	122
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN	123
6.1 Discusión de resultados	123
6.1.1 Validación de la metodología <i>K-means clustering</i>	123
6.1.2 Comparación de la metodología <i>K-means clustering</i> con otras metodologías	129

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	134
CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES.....	136
CAPÍTULO IX: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Bandas, longitudes de onda y frecuencias de radar.	16
Tabla 2.	Operacionalización de variables.	41
Tabla 3.	Extensión política de cuenca Bajo Piura.....	42
Tabla 4.	Unidades geológicas de la cuenca Bajo Piura.....	45
Tabla 5.	Clasificación de pendientes.....	46
Tabla 6.	Unidades fisiográficas de la cuenca Bajo Piura.	48
Tabla 7.	Unidades de clasificación climática de cuenca Bajo Piura.	50
Tabla 8.	Población del departamento Piura (censo: 2007 – 2017).....	52
Tabla 9.	Tasa de crecimiento promedio anual (censo: 2007 – 2017).....	52
Tabla 10.	Tipo de viviendas (censo: 2007 – 2017).	53
Tabla 11.	Distribución de las instituciones educativas en el área de estudio.....	54
Tabla 12.	Distribución de las instituciones de salud en el área de estudio.	56
Tabla 13.	Unidades correspondientes al uso de suelo en el área de estudio.	58
Tabla 14.	Vías nacionales pertenecientes al área de estudio.....	61
Tabla 15.	Vías departamentales pertenecientes al área de estudio.....	61
Tabla 16.	Vías vecinales pertenecientes al área de estudio.....	62
Tabla 17.	Características de imágenes SAR.	71
Tabla 18.	Instituciones educativas afectadas.	111

Tabla 19.	Centros poblados expuestos a las áreas de inundación mapeadas.	112
Tabla 20.	Uso de suelo expuestas a las áreas de inundación mapeadas.....	115
Tabla 21.	Red vial nacional expuestas a las áreas de inundación mapeadas.	117
Tabla 22.	Red vial vecinal expuestas a las áreas de inundación mapeadas.	119
Tabla 23.	Matriz de confusión.	126
Tabla 24.	Matriz de confusión de la investigación.	127
Tabla 25.	Suma de valores marginales.....	127
Tabla 26.	Grado de acuerdo del Índice Kappa.	128
Tabla 27.	Comparación de métodos de clasificación.....	132
Tabla 28.	Principales parámetros de comparación entre los métodos de clasificación.	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Componentes de la teledetección.	13
Figura 2.	Espectro electromagnético.....	15
Figura 3.	Percepción respecto a la longitud de onda.	16
Figura 4.	Emisión y recepción del pulso emitido por el radar.	17
Figura 5.	Mecanismos de retrodispersión que influyen en la amplitud/intensidad.....	18
Figura 6.	Fase representada por: Función Seno (ϕ) y $T = 2\pi$	19
Figura 7.	Polarización.	20
Figura 8.	Geometría de adquisición de un sistema SAR.	24
Figura 9.	Distorsión del rango inclinado.....	27
Figura 10.	<i>Foreshortening</i>	28
Figura 11.	<i>Layover</i>	29
Figura 12.	<i>Shadowing</i>	29
Figura 13.	Distorsión radiométrica.	30
Figura 14.	Formación del <i>speckle</i>	31
Figura 15.	<i>Speckle</i> presente en la imagen SAR.	31
Figura 16.	Cuadrantes de estudio en el océano Pacífico.....	32
Figura 17.	Distribución de anomalías de la temperatura superficial del mar (°C): Niño Canónico.....	33
Figura 18.	Distribución de anomalías de la temperatura superficial del mar (°C): Niño Modoki.	34
Figura 19.	Ubicación de la cuenca Bajo Piura.....	44
Figura 20.	Formación geológica de la cuenca Bajo Piura.	46

Figura 21.	Pendientes de la cuenca Bajo Piura.	47
Figura 22.	Unidades fisiográficas de cuenca Bajo Piura.	49
Figura 23.	Clasificación climática de la cuenca Bajo Piura.....	50
Figura 24.	Cuenca Bajo Piura.	51
Figura 25.	Centros poblados en la cuenca Bajo Piura.	54
Figura 26.	Instituciones educativas en la cuenca Bajo Piura.	55
Figura 27.	Instituciones de salud en cuenca Bajo Piura.....	57
Figura 28.	Unidades de uso de suelo en cuenca Bajo Piura.....	59
Figura 29.	Vías de acceso en la cuenca Bajo Piura.....	60
Figura 30.	Metodología de la Investigación.	65
Figura 31.	Plataforma <i>Sentintelhub Playground</i>	67
Figura 32.	Pre-Evaluación de imágenes satelitales en la plataforma <i>Sentinelhub</i>	69
Figura 33.	Portal de descarga <i>ASF Data Search</i>	70
Figura 34.	Software SNAP.	72
Figura 35.	Importación de la imagen SAR.	73
Figura 36.	Imagen SAR importadas.....	74
Figura 37.	Visualización de la banda <i>Intensity VH</i>	75
Figura 38.	Presentación de valores y colores de la banda <i>Intensity VH</i> de la imagen SAR.....	76
Figura 39.	Importación de los archivos <i>shapefile</i> del área de estudio.	77
Figura 40.	Visualización de los archivos <i>shapefile</i> en la imagen SAR.	77
Figura 41.	Configuraciones de <i>Land/Sea Mask</i>	78
Figura 42.	Máscara respecto al área de estudio.	78
Figura 43.	Aplicación de archivos de órbitas precisas.....	79

Figura 44.	Comparación de metadatos de la imagen aplicada con orbitas precisas.	79
Figura 45.	Remoción de ruido térmico.	80
Figura 46.	Aplicación de metodología de múltiples franjas.	81
Figura 47.	Diferencia de valores de retrodispersión después de la remoción de ruido térmico.	81
Figura 48.	Aplicación del <i>Multilooking</i>	82
Figura 49.	Escena procesada con el <i>Multilook</i>	83
Figura 50.	Comparación de metadatos con <i>Multilooking</i> aplicado.	83
Figura 51.	Filtro Lee.	84
Figura 52.	Aplicación del Filtro Lee para reducir el <i>speckle</i>	85
Figura 53.	Escena procesada con el Filtro Lee en el margen derecho.	85
Figura 54.	Calibración radiométrica de la imagen SAR.	86
Figura 55.	Conversión de la imagen a valores en decibeles.	87
Figura 56.	Comparación de la imagen calibrada con la imagen calibrada en decibeles.	87
Figura 57.	Comparación de valores de la imagen calibrada con la imagen calibrada en decibeles.	88
Figura 58.	Generación de la máscara de <i>layover</i> y sombras.	89
Figura 59.	Resultado de la máscara de <i>layover</i> y sombras y la simulación del terreno.	89
Figura 60.	Corrección del terreno y normalización radiométrica.	90
Figura 61.	Resultado de la corrección del terreno y normalización radiométrica.	91
Figura 62.	Vector en formato <i>shapefile</i> de la cuenca Bajo Piura.	92
Figura 63.	Imagen SAR correspondiente a la cuenca Bajo Piura.	92
Figura 64.	<i>Create Stack</i>	93
Figura 65.	Configuraciones para el corregistro de las imágenes SAR.	93

Figura 66.	<i>Open RGB.</i>	94
Figura 67.	Visualización RGB.....	94
Figura 68.	Apreciación de zonas inundadas en una vista RGB.	95
Figura 69.	<i>Band Math.</i>	96
Figura 70.	Resultado de la diferencia de bandas en decibeles.	97
Figura 71.	Distribución de valores de la imagen de diferencia.....	97
Figura 72.	Establecimiento de clases por el algoritmo <i>K-Means Clustering</i>	98
Figura 73.	Procedimiento del <i>K-Means Clustering.</i>	99
Figura 74.	Resultado de las 6 clases establecidas por <i>K-Means Clustering</i> dentro de la imagen.	99
Figura 75.	Estadísticas de la clasificación.	100
Figura 76.	Exportar información desde SNAP.	101
Figura 77.	Reclasificación de las clases obtenidas por el algoritmo <i>K-Means Clustering.</i>	102
Figura 78.	Vectorización de la clase de interés.....	102
Figura 79.	Generación del área de influencia del filtro morfológico.....	104
Figura 80.	Área de influencia del filtro morfológico.....	104
Figura 81.	Áreas inundadas preliminares.....	105
Figura 82.	Diferencia de áreas inundadas preliminares y cuerpos de agua.	106
Figura 83.	Áreas inundadas en la cuenca Bajo Piura.....	106
Figura 84.	Zonas críticas de áreas inundadas en la cuenca Bajo Piura.....	107
Figura 85.	Áreas de inundación mapeadas en la cuenca Bajo Piura.....	108
Figura 86.	Comparación de instituciones educativas afectadas.....	111
Figura 87.	Comparación de instituciones educativas afectadas.....	112

Figura 88.	Comparación de centros poblados afectados.....	113
Figura 89.	Centros poblados afectados.....	114
Figura 90.	Unidades de usos de suelos afectados.....	116
Figura 91.	Uso de suelo afectado.....	116
Figura 92.	Comparación de red vial nacional afectada.....	118
Figura 93.	Comparación de red vial vecinal afectada.....	121
Figura 94.	Redes viales afectadas.....	121
Figura 95.	Distribución natural de puntos aleatorios en la imagen óptica e imagen radar.....	125
Figura 96.	Comparación de clasificación de áreas inundadas por tipo de método.....	131

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El fenómeno El Niño es un evento que se viene desarrollando desde épocas pre-incas, según recopilaciones históricas e investigaciones por parte de las instituciones especializadas en este fenómeno, en los últimos cinco siglos en el Perú se han desarrollado por lo menos 120 episodios de El Niño. (Quinn y Neal, 1986; Antúnez, 1987; IMARPE, 1999; INDECI, 2002, citado en SENAMHI, 2014).

En lo que va del presente siglo, entre el periodo de diciembre del año 2016 y mayo del año 2017 se manifestó un evento del fenómeno El Niño, el cual fue denominado como “El Niño Costero”, evento que propició la ocurrencia de fuertes lluvias en la zona norte del país, las cuales fueron generadas a partir del incremento abrupto de la temperatura de la superficie del mar, con temperaturas que llegaron hasta los 28°C en varios puntos de la costa norte del Perú. Este calentamiento costero se habría iniciado por el debilitamiento de los vientos alisios que mantuvieron una retroalimentación positiva hasta el mes de abril debido a la intensificación de la segunda banda de la Zona de Convergencia Intertropical. De acuerdo con lo acontecido, el evento El Niño Costero fue denominado con una categoría de magnitud moderada y con base en los impactos generados por las precipitaciones e inundaciones puede ser considerado como "el tercer fenómeno El Niño más intenso de al menos el último siglo", estableciendo una similitud cercana a El Niño de 1925 (ENFEN, 2017).

En cuanto a El Niño Costero, la región Piura, fue una de las regiones más afectadas, en consecuencia, la presente investigación estableció como área de estudio a la cuenca Bajo Piura,

como muestra para poder detectar y mapear las áreas inundadas desatadas en dicha zona mediante la aplicación de la teledetección por radar en conjunción con el método *K-Means Clustering*, y por consiguiente, evaluar los impactos generados, es así que en el presente documento se describe minuciosamente los pasos desarrollados en esta investigación.

Asimismo, la presente investigación se encuentra compuesta por nueve capítulos. El primer capítulo (I), describe la introducción propiamente dicha del presente estudio; posteriormente se describe la problemática ocasionada debido a las manifestaciones del fenómeno El Niño en el territorio nacional, teniendo énfasis en El Niño Costero del 2017, fenómeno objeto de la presente investigación; además, en el presente capítulo se encuentran desarrollados los objetivos, así como también la importancia, alcance y limitación. Es importante precisar que el presente capítulo nos sirvió como base para establecer los lineamientos del estudio.

El segundo capítulo (II), desarrolla antecedentes de categoría internacional, los cuales presentan metodologías similares a la empleada en la presente investigación y que a su vez apoyaron el desarrollo de esta; adicionalmente se describen las bases teóricas y definición de términos, secciones que brindan los conceptos necesarios para la adecuada captación del estudio.

El tercer capítulo (III), describe propiamente las hipótesis, variables y la operacionalización de las variables planteadas durante la investigación, enfocadas en la detección y mapeo de las inundaciones mediante imágenes SAR, usando el método *K-Means Clustering* para la evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño.

En el cuarto capítulo (IV), se desarrollan las características del área de estudio como la ubicación, descripción del medio físico, social y económico, es importante precisar que la presente investigación tiene como área de estudio la cuenca Bajo Piura, ubicada en la región de Piura. Asimismo, el presente capítulo precisa el tipo, nivel, enfoque y diseño de investigación, así como

también la población y muestra, concluyendo el capítulo se describe minuciosamente el procedimiento llevado a cabo durante el estudio, partiendo con la técnica de recolección de la base de datos, siguiendo con el procesamiento de las imágenes SAR (incluyendo la metodología *K-Means Clustering*) y finalizando con la detección de áreas inundadas.

En el quinto capítulo (V), se presentan los resultados obtenidos en la investigación, basados principalmente en las áreas de inundaciones detectadas, así como las estadísticas de los impactos generados en el medio social y económico. En relación con el capítulo anterior, en el capítulo (VI), se discuten los resultados, donde se sustenta estadísticamente la metodología empleada, asimismo, se compara con otras metodologías.

Finalmente, en los capítulos siete (VII) conclusiones, ocho (VIII) recomendaciones y nueve (IX) referencias bibliográficas, se describe lo correspondientes a cada título del capítulo.

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Descripción de la problemática

Debido a El Niño Costero del 2017, resultaron afectados 13 departamentos y la provincia constitucional del Callao, los cuales fueron declarados en estado de emergencia, tomándose acciones para la gestión reactiva, entre estas se encontraban las operaciones de monitoreo y análisis de información, para su posterior interpretación mediante los Centros de Operaciones de Emergencia en los tres niveles de gobierno; según INDECI (2018), en base a la respuesta al fenómeno El Niño Costero, se obtuvieron experiencias y lecciones aprendidas: (1) la falta de análisis de la información de afectación y su interpretación, y (2) las deficiencias en la integración de los sistemas de comunicación e información a nivel nacional. Las lecciones aprendidas respecto al fenómeno El Niño Costero, permiten tomar mejores decisiones y establecer adecuadas medidas de comunicación a la población.

En caso de ocurrencia de un desastre, como el que genera el fenómeno El Niño, a fin de tener una respuesta oportuna para la rehabilitación y reconstrucción, se requiere contar con información precisa del área afectada por la inundación y la determinación de número de población e infraestructura dañada. Esta investigación busca aportar mediante la aplicación de herramientas y metodologías de teledetección, para la detección y mapeo de inundaciones mediante el empleo de imágenes radar de apertura sintética (SAR); la metodología desarrollada pretende servir de base para un eficaz monitoreo e identificación de áreas inundadas de acontecimientos futuros en el país.

1.2.2 Formulación del problema

1.2.2.1 Problema General

¿De qué manera la detección y mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR, usando el método *K-Means Clustering* permite evaluar el impacto del desastre ocasionado por el fenómeno El Niño, en la cuenca Bajo Piura, región Piura?

1.2.2.2 Problema Específico

- ¿Cómo se definirá la dinámica de la inundación mediante el análisis de imágenes SAR?
- ¿Cómo apoyará la aplicación de un filtro morfológico para una adecuada determinación de áreas de inundación?
- ¿Cuál es la información cartográfica requerida para la evaluación de los principales impactos del desastre?
- ¿Cuál es la eficacia y ventaja del empleo del método *K-Means Clustering* para el análisis de las inundaciones de futuros eventos del fenómeno El Niño?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Detectar y mapear las inundaciones mediante imágenes SAR, usando la técnica *K-Means Clustering* para fines de evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño, en la cuenca Bajo Piura, región Piura.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Interpretar la dinámica de la inundación mediante el análisis de imágenes SAR para evaluar los impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño.
- Aplicar un filtro morfológico para una adecuada determinación de áreas inundadas para evaluar los impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño.
- Identificar la información cartográfica a requerir para la evaluación de los principales impactos del desastre.
- Determinar la eficacia y ventaja del empleo del método *K-Means Clustering* para el análisis de inundaciones de futuros eventos del fenómeno El Niño y futuras evaluaciones de impactos de desastres.

1.4 Importancia y alcance

El desarrollo de la siguiente investigación radica en la importancia de mapear, mediante un rápido procesamiento, la dinámica de la extensión de inundaciones de eventos “El Niño” futuros, debido a que después de ocurrido este tipo de fenómenos, es complejo determinar las áreas de inundación de manera inmediata, lo cual es un tema prioritario a fin de ejecutar las respectivas intervenciones a favor de las familias y estructuras afectadas. Es así como la presente investigación toma de referencia al fenómeno El Niño Costero y su afectación en la cuenca Bajo Piura, debido a que es uno de los más grandes eventos de inundación ocurridos durante el último siglo en el país. Para el

análisis se utilizarán imágenes radar de apertura sintética (SAR), las cuales son adecuadas para evaluar áreas inundadas, debido a alta capacidad de captar imágenes de día o noche y ante casi cualquier condición meteorológica. Asimismo, es importante mencionar que los efectos atmosféricos presentes en la tecnología SAR son mínimos y la capacidad de obtener información a través de las nubes son de gran ventaja en este tipo de eventos.

La detección y mapeo de las áreas inundadas se complementarán con evaluaciones de los principales impactos generados por el desastre en el medio social y económico, los cuales si bien ya han sido estimados en su momento para el presente caso de referencia, pretenden servir como guías rápidas para la estimación de los impactos de inundaciones futuras ocasionadas por el fenómeno El Niño, y en consecuencia contribuirán a una adecuada toma de decisiones en cuanto a medidas reactivas necesarias frente a eventos de esta índole; de este modo se logrará la rápida atención de estas emergencias con la principal finalidad de prevalecer la vida humana.

1.5 Limitaciones

Las limitaciones que se presentaron en esta investigación se desarrollan a continuación:

- El manejo, análisis e interpretación de la información producida por las imágenes SAR es compleja en comparación a la información producida por imágenes ópticas, es decir, se necesita de una capacitación previa para poder desarrollar esta investigación.
- La resolución temporal de 12 días (ofrecida por 1 satélite Sentinel-1), 6 días para la constelación (Sentinel-1A y Sentinel-1B) y 3 días de revisita en el Ecuador, es un factor condicionante en la adquisición de imágenes SAR debido a que, en situaciones desastrosas por el fenómeno El Niño se requiere el monitoreo constante para evaluar los cambios y los impactos de desastres; en la presente investigación se evaluó las áreas inundadas limitadas a las fechas ofrecidas por el satélite.

- La resolución espacial de una imagen SAR del satélite Sentinel-1 está representada por 5 metros en el rango y 20 metros en el azimut, resolución que la Agencia Espacial Europea (ESA) remuestrea a 10 metros a nivel de píxel, sin embargo, mediante el pre-procesamiento esta resolución se vuelve mayor, siendo este factor de resolución espacial un punto en contra ya que no se cuenta con una resolución menor para captar mejor los detalles y por ende mejorar la detección de cuerpos en la imagen.
- Las características de dirección de paso y tipo de polarización de las imágenes SAR representan una limitación, debido a que son importantes a la hora de seleccionar las imágenes con las que se va a trabajar el mapeo de las inundaciones. En esta investigación se requirió 2 imágenes SAR, una durante la etapa de pre inundación y la siguiente durante la etapa de la inundación, para esto se requirió que ambas imágenes tengan la misma dirección de paso, ya sea ascendente o descendente; asimismo, el tipo de polarización se requirió que sean de tipo cruzada “VH”, debido a que esta polarización cruzada nos permite un óptimo mapeo en los cuerpos inundados, si bien existen estudios con polarización “VV”, se ha demostrado que la polarización “VH” ofrece mejores resultados. Es así como los factores mencionados fueron limitantes para la elección de las fechas óptimas requeridas debido a la incompatibilidad de estas características entre imágenes, por lo que se tuvo que hacer un segundo filtro y evaluación, para cumplir con la condición mencionada.
- Los dos filtros aplicados en el procesamiento de la imagen SAR, siendo primero (1) el *multilook*, que se consideró para la reducción de ruido de *speckle* o “sal y pimienta” que presenta la imagen; y el segundo (2) el filtro Lee de tipo adaptativo, que realiza un suavizado, ambos filtros aplicados terminan en sinergia por enriquecer la resolución radiométrica

perjudicando la resolución espacial, siendo un limitante para el mapeo de cuerpos de inundación.

- En áreas de estudio extensas, se presentan grandes variabilidades en cuanto a la retrodispersión producida por diversos cuerpos (reflejadas bajo diferentes tonalidades en la imagen SAR), siendo la característica influyente de esta variabilidad su naturaleza: lisa, rugosa, voluminosa o estructural del cuerpo objetivo. En el caso de los cuerpos de agua, estos se presentan como superficies lisas, comportándose como un espejo para producir una reflexión especular, el cual genera una retrodispersión muy baja; mostrándose con similares valores de retrodispersión como los producidos por áreas de suelos planos y desnudos, esto debido a que la retrodispersión aumenta con la aspereza del suelo, es decir los cuerpos más ásperos, voluminosos y estructurales presentan un valor mayor de retrodispersión (el valor aumenta de manera consecutiva al orden mencionado) en comparación con los cuerpos lisos, por el cual esta característica de las imágenes SAR crea confusión en ciertas áreas de las imágenes. Es importante mencionar que esta limitación en la presente investigación se ve superada frente al análisis de cambios entre las imágenes analizadas y la aplicación de un filtro morfológico.
- La información cartográfica libre es un limitante en cuanto al nivel de detalle al que permite llegar al investigador, en la presente investigación se recurrió a las fuentes oficiales nacionales para poder adquirir la información necesaria para el análisis de impactos, sin embargo, no se pudo profundizar a un nivel de escala local, si no a un nivel de escala regional.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En los últimos años, diversos sensores implementados en los satélites vienen favoreciendo el análisis y la estimación de la precipitación alrededor del mundo, al mismo tiempo ayudan a entender la dinámica de inundaciones y la optimización del tiempo empleado en este análisis. En las siguientes investigaciones realizadas en los últimos años se detalla el avance del uso de imágenes SAR y Algoritmo *K-Means Clustering*:

Ruzza et al. (2019), analizan la dinámica de la inundación que se desarrolló en la provincia Camerines Sur de Filipinas a causa de la presencia de un tifón, este evento tuvo acontecimiento entre diciembre del año 2018 y febrero del año 2019. Para el análisis se emplearon un total de 24 imágenes SAR Sentinel-1 y se desarrollaron 3 métodos de clasificación simple: *Valley Emphasis*, *Otsu method* y *K-Means Clustering*. Los dos primeros se basan en la identificación del umbral, mientras que el tercero se basa en un análisis no supervisado, cabe resaltar que estos métodos se caracterizan porque podrían ser adecuados para el control automático de las inundaciones debido a su fácil aplicación y rápida ejecución, asimismo, estos métodos fueron comparados entre sí, y se pudo apreciar que los tres mostraron un mismo patrón de cobertura de agua en el tiempo, con algunas diferencias en términos de variables de estimación total; el valor mínimo de cobertura de agua se derivó del método *Valley Emphasis*, mientras que el valor máximo se obtuvo del *Otsu method*, finalmente el método *K-Means Clustering* mostró valores de cobertura de agua entre el mínimo y el máximo, es decir entre los dos métodos anteriormente mencionados.

Se destacó que el método basado en umbral como en el caso del *Otsu method* tuvo tendencia a sobreestimar la cobertura de agua en comparación con el método *Valley Emphasis*. Ba Duy (2015),

afirma que el método *Valley Emphasis* supera al *Otsu method* en términos de capacidades de identificación absoluta, asimismo manifiesta que presenta limitaciones en cuanto a la identificación de píxeles de agua mezclada, creando confusión de cuerpos de agua con el ruido de fondo y la dificultad de la elección de un umbral óptimo para áreas de gran extensión. (citado en Ruzza et al, 2019, p. 12). Es así que el método *K-Means Clustering*, en inversa a los métodos mencionados anteriormente, se presenta como un gran potencial en el contexto de clasificación de imágenes, este potencial puede estar relacionado con su capacidad de captar la variabilidad espacial del coeficiente de retrodispersión que representa una base para una auto-adaptación a diferentes condiciones ambientales captadas por las imágenes SAR y en sus mejores resultados en términos de tiempo de cálculo.

Liu et al. (2019), establecen una metodología de detección de cambios en imágenes SAR basada en un filtrado de morfología matemática y el algoritmo *K-Means Clustering*, esta propuesta busca realizar un análisis espacial eficaz reduciendo el ruido del moteado que presentan las imágenes SAR, como también pretende optimizar el tiempo empleado en este análisis; asimismo, esta metodología fue comparada con las metodologías más tradicionales usadas actualmente para la detección de cambios en imágenes SAR. La metodología fue experimentada en tres casos, de los cuales, para la presente investigación destaca la desarrollada para el caso de una inundación ocurrida entre abril de 1999 y mayo de 1999 en Berna, Suiza. En primer lugar, se emplearon dos imágenes SAR para el evento mencionado anteriormente, la primera imagen corresponde a una escena antes de que ocurra el evento y mientras que la segunda escena corresponde al desarrollo del evento, mediante una transformación logarítmica el ruido multiplicativo de ambas imágenes se convirtió en ruido aditivo, posterior a ello se aplicó el filtro morfológico para eliminar el ruido, a raíz de esto se procedió a obtener la imagen de diferencia de ambas escenas, basada en un operador

de razón media y un operador de substracción, finalmente la detección de cambios se obtiene con el algoritmo *K-Means Clustering*.

Los resultados de esta metodología en comparación con los métodos tradicionales como: *DWT-FLICM*, *PCA-K-Means Clustering*, *TV-K-Means Clustering* y *PCAnet*, no solo mostraron una mejora en la detección de cambios, sino que también una mejora en el tiempo de ejecución, siendo el método propuesto el más bajo dentro de su grupo de comparación, 687 veces menos que el tiempo requerido por el método *PCAnet*; asimismo, los valores de Clasificación Porcentual Correcta (PPC, por sus siglas en inglés) y el coeficiente Kappa fueron los más altos dentro de su grupo, siendo estos 99,70 y 0,878 correspondientemente.

Razafipahatelo et al. (2015), establecen una detección automática de inundaciones mediante un enfoque basado en el algoritmo *Kernel K-Means*, el cual emplea el núcleo para estimar la distancia entre objetos y grupos. El área de estudio se localiza en el suroeste de Madagascar (Toliary), donde el 22 de febrero de 2013 el huracán Hurana generó fuertes inundaciones. Esta metodología empleó dos imágenes SAR, una primera imagen en época seca (antes del evento) y una segunda imagen durante el desarrollo del huracán; en primer lugar, se utilizó un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) como información previa para detectar la alta probabilidad de inundaciones, posterior a ello establece la separación de píxeles secos y húmedos mediante el algoritmo *Kernel K-Means*. Finalmente, para aislar los píxeles inundados del agua permanente, se aplica una agrupación no lineal con una imagen de proporción logarítmica en las características del espacio.

Dado que no se contaron con datos de observación directa, no se pudo realizar una matriz de confusión para esta metodología, sin embargo, esta fue comparada con los procedimientos manuales para la época desarrollada, arrojando resultados factibles, a diferencia de las 844,74 ha

detectadas bajo un procedimiento manual, esta metodología detecto 807,63 hectáreas, obteniendo un valor cercano el cual el justificado de acuerdo a la facilidad de su empleo, el poco tiempo de ejecución y sin contar con datos de observación directa, lo cual es ventajoso para un rápido accionar frente a un evento de esa naturaleza.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Mapeo de inundaciones

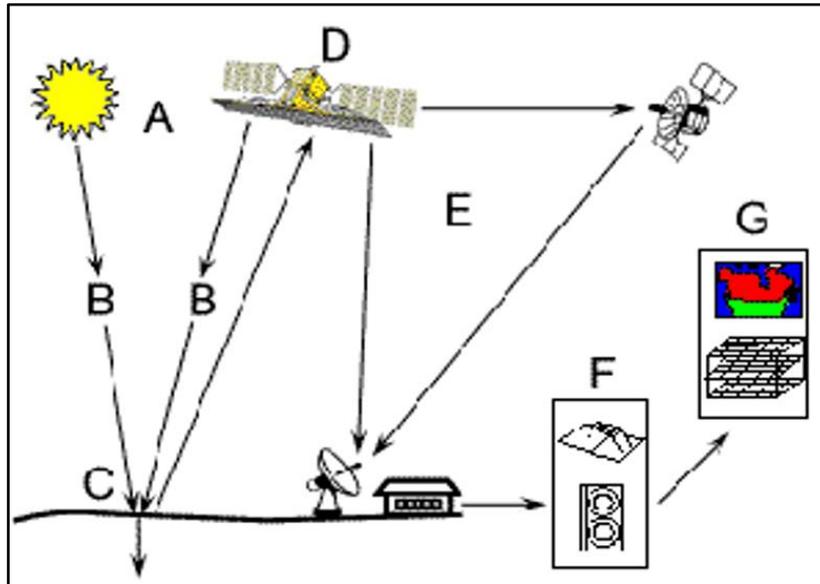
La variable cuenta con dimensiones e indicadores que buscan definir y comprender la detección y mapeo de inundaciones con imágenes radar de apertura sintética (SAR), para lo siguiente se necesitará comprender los conceptos básicos de la teledetección, tipos de sensores, los componentes, funcionamiento y características de las imágenes radar de apertura sintética (SAR), imágenes Sentinel-1, Fenómeno El Niño, Fenómeno El Niño Costero y el concepto propiamente de inundaciones, que son detallados a continuación:

2.2.1.1 Teledetección

La teledetección es la técnica en la cual se adquiere la información de la superficie terrestre, el proceso implica la interacción entre el sensor y el objeto de interés, asimismo, existen dos tipos de sensores: pasivos (energía externa) y activos (energía propia).

De acuerdo con Chuvieco (2008), “Existen tres formas de adquirir la información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión. La primera forma mencionada, siendo la más importante de la teledetección, se deriva de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta”. A continuación, en la **Figura 1** se muestran los principales componentes dentro de la teledetección:

Figura 1. Componentes de la teledetección.



Fuente: Government of Canada (2015)

De acuerdo con la **Figura 1** los principales componentes están representados por: **(A) Fuente de energía o iluminación**, es la fuente de energía que ilumina o proporciona la energía electromagnética al objetivo; **(B) La radiación y la atmósfera**, la energía electromagnética interactúa con la atmósfera a medida que viaja hacia el objetivo, la misma interacción se vuelve a producir a medida que la energía viaja desde el objetivo al sensor; **(C) Interacción con el objetivo**, la energía llega al objetivo a través de la atmósfera, interactuando con el objetivo de acuerdo a las propiedades del objetivo y de la radiación; **(D) Registro de energía por el sensor**, la energía emitida por el objetivo, es recolectada por un sensor, en el cual registra la radiación; **(E) Transmisión, recepción y procesamiento**, la energía captada por el sensor debe transmitirse a una estación de recepción y procesamiento, para que los datos sean procesados en una imagen; **(F) Interpretación y análisis**, la imagen procesada es interpretada, para la extracción de información sobre el objetivo y **(G) Aplicación**, el elemento final es la aplicación de la información que se ha podido extraer de las imágenes.

2.2.1.1.1 Tipos de sensores en teledetección

Existen varias maneras de clasificar a los sensores remotos, una de las más habituales considera el procedimiento para recibir la energía procedente de las distintas cubiertas (Belmonte y Caamaño, 2009). En base a ello, se establecen en: **(1) Sensores pasivos**, son los sensores que captan la energía procedente del medio externo, siendo los más conocidos aquellos que captan la energía reflejada por la radiación solar y **(2) Sensores activos**, son sensores con capacidad de radiar su propia energía, siendo los más flexibles, debido a que no dependen de las condiciones exteriores.

2.2.1.2 Imágenes radar de apertura sintética (SAR)

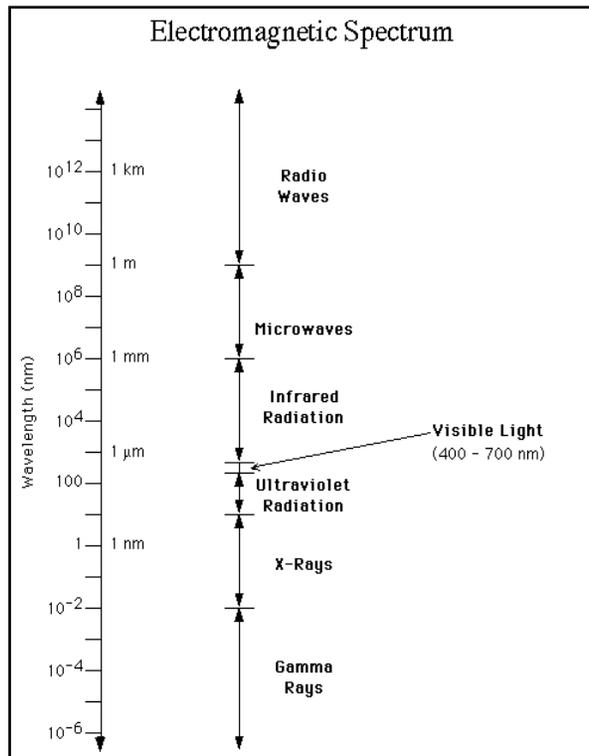
2.2.1.2.1 RADAR – Radio Detection and Ranging

El radar (término derivado del acrónimo inglés: *radio detection and ranging*), en un principio se refiere al método, sistema o técnica, incluyendo a los equipos empleados, que usan la radiación electromagnética transmitida, reflejada y temporizada para detectar, localizar y/o rastrear objetos, medir la altitud y adquirir una imagen del terreno (ESA, 2007). El Centro Canadiense de Percepción Remota (CCRS) define este término como: radiómetro de microondas (activo), comprendido entre el rango de 1 mm – 1 m respecto a la dimensión de sus longitudes de onda (λ). Actualmente, es de conocimiento que existen radiómetros pasivos de microondas, así como también que el rango de longitud de onda en el que operan estos sensores varía de acuerdo con su objetivo.

La ubicación las longitudes de ondas correspondientes al sistema radar dentro del espectro electromagnético se pueden apreciar en la **Figura 2**. De acuerdo con Chuvieco (2002), “Las principales virtudes de esta región del espectro, es que, es independiente de la iluminación solar y de las condiciones atmosféricas porque trabaja a longitudes de onda muy superiores al tamaño habitual de las gotas de agua (0,1 mm), y permite recoger información de zonas con cubierta

frecuente de nubes, como son las zonas tropicales o polares” (citado en Mayorga T, 2013 p. 38). Es importante resaltar frente a fuertes tormentas de lluvia se debe tener en consideración la banda con la que opera el sensor radar para obtener resultados óptimos, lo último mencionado se detallará en la sección correspondiente a las bandas de radar.

Figura 2. Espectro electromagnético.



Fuente: ESA (2007)

2.2.1.2.2 *Bandas, longitudes de onda y frecuencia de radar*

En los sistemas radar se distinguen una serie de bandas, las cuales se encuentran representadas por letras, cada banda se encuentra comprendida entre un determinado intervalo de longitudes onda (λ), así como también en un determinado intervalo de frecuencia (f) (Mayorga T, 2013), como se mencionó previamente las características correspondientes a las bandas radar determinaran su aplicación, a continuación, se presenta las principales bandas empleadas en radar en la **Tabla 1**.

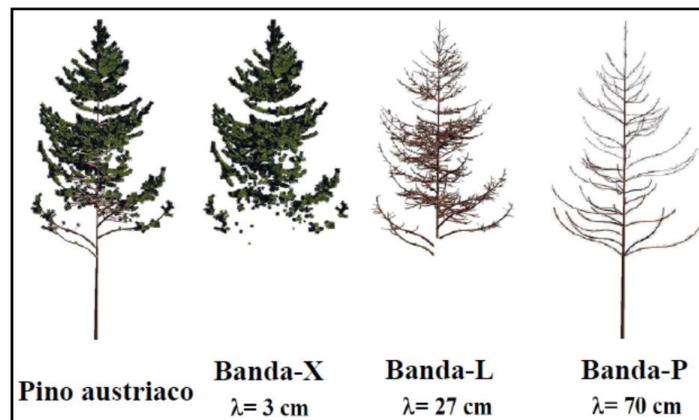
Tabla 1. Bandas, longitudes de onda y frecuencias de radar.

Bandas	Longitud de onda (λ) (cm)	Frecuencia (f) (GHz)	Sensor	Aplicación
Ka	0,8 - 1,1	26,5 - 40	Uso militar	Radares de alta resolución
K	1,1 - 1,7	18 - 26,5		
Ku	1,7 - 2,4	12,5 - 18		Glaciología (mapeo de cobertura de nieve)
X	2,4 - 3,8	8 - 12,5	TerraSAR-X-1, TanDEM-X, COSMO-SkyMed, PAZ SAR	Agricultura y oceanografía
C	3,8 - 7,5	4 - 8	ERS-1/2 SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, RISAT-1, SENTINEL-1	
S	7,5 - 15	2 - 4	Almaz-1	Silvicultura (sensibilidad a la vegetación ligera)
L	15 - 30	1 - 2	JERS-1 SAR, SEASAT, ALOS PALSAR, SAOCOM, NISAR	Agricultura, bosques y humedad del suelo
P	30 - 100	0,3 - 1	AIRSAR de JPL/NASA	Humedad del suelo y biomasa (alta penetración)

Fuente: CCRS (2001), Chuvieco (2002), SARMAP (2008), ARSET (2018)

La longitud de onda es el factor principal para estimar la penetración de la señal con respecto a los objetivos, por ejemplo, mientras más larga es la longitud de onda es mayor su capacidad de penetración con respecto a la vegetación o el suelo (ARSET, 2018) (ver **Figura 3**). En base a este criterio, frente a fuertes tormentas de lluvia se debe escoger una banda que pueda penetrar este acontecimiento meteorológico.

Figura 3. Percepción respecto a la longitud de onda.



Fuente: Thuyle Toan, presentado en ARSET (2018)

2.2.1.2.3 *Sistemas radar*

De acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), los sensores de radar generalmente se dividen en dos grupos según sus modos de operación. Los sensores activos son aquellos que proporcionan su propia iluminación y, por lo tanto, contienen un transmisor y un receptor, mientras que los sensores pasivos son simplemente receptores que miden la radiación que emana de la escena bajo observación.

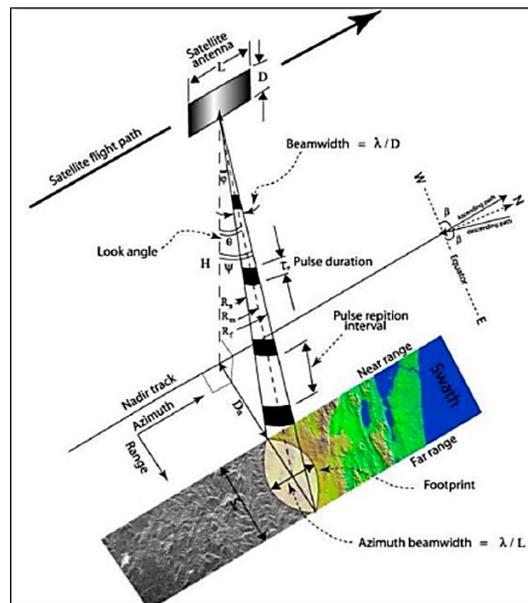
Sistemas activos: sistemas de imágenes de radar, dispersómetros y altímetros.

Sistemas pasivos: radiómetros de microondas.

2.2.1.2.4 *Sistemas de imágenes de radar*

La presente investigación se desarrollará en base a los sistemas de imágenes de radar, por lo que a partir de la presente sección se profundizará sobre estos sensores. La ESA indica que el principio básico de este tipo de radares es la transmisión y recepción de pulsos, la cual se da a la velocidad de la luz, esta acción se encuentra ilustrada en la **Figura 4**.

Figura 4. Emisión y recepción del pulso emitido por el radar.



Fuente: ESA (2007)

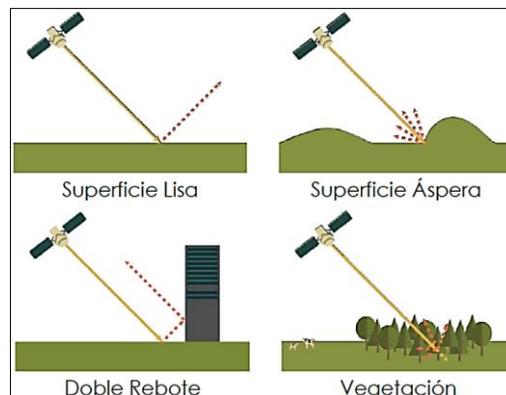
Es así como mediante esta emisión de pulsos cortos (microsegundos) de alta energía y se pueden registrar ecos de retorno, los cuales nos proporcionan información sobre: Amplitud/Intensidad, Fase, Intervalo de tiempo entre la emisión del pulso y el retorno del objeto, Polarización y Frecuencia Doppler.

Es importante resaltar que la misma antena empleada se usa a menudo tanto para la transmisión y recepción. A continuación, se detalla la información obtenida por los sistemas de imágenes de radar:

Amplitud/Intensidad

Uno de los componentes principales generados en el empleo del radar, es la amplitud/intensidad, que se traduce en la medición de la magnitud con la que el eco es reflejado (retrodispersión) a partir de la transmisión del pulso de este (ESA, 2007). Este componente constituye la formación de la imagen SAR, y se encuentra influenciado principalmente por la rugosidad, estructura, ángulo de incidencia, polarización, longitud de onda, composición química del terreno, así como también sus propiedades dieléctricas; es por ello que relieves muy accidentados, zonas rugosas y las áreas urbanas muestran grandes valores de amplitud/intensidad, mientras que zonas llanas y lisas muestran valores bajos en amplitud/intensidad (Hermosilla, 2016) (ver **Figura 5**).

Figura 5. Mecanismos de retrodispersión que influyen en la amplitud/intensidad.



Fuente: ARSET (2018)

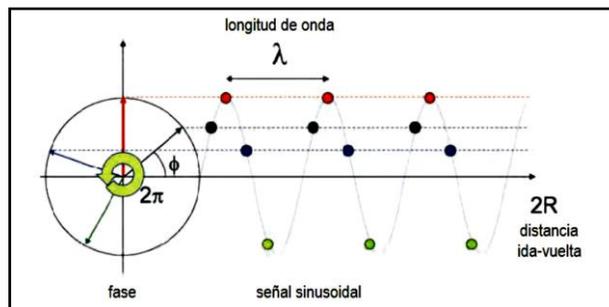
Fase

El componente fase nos permite conocer las diferencias del relieve, puesto que se expresa en función de la distancia existente entre el sensor y el objetivo, es decir, nos permite obtener en un momento específico, la posición de un punto dentro del ciclo desarrollado por la onda (ESA, 2007). De acuerdo con Hermosilla (2016), menciona que “Las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz, por lo que es legítimo afirmar que las ondas emitidas por el radar se encuentran compuestas por partículas (debido a la naturaleza dual de la luz) que describen un movimiento sinusoidal, en donde cada vez que la partícula recorre una distancia igual a la longitud de la onda λ , se dice que recorrió un ciclo igual a 2π ”. Con base en lo mencionado, se representa a la fase (ϕ) mediante la siguiente ecuación:

$$\phi = -\frac{2R}{\lambda} 2\pi = -\frac{4R\pi}{\lambda}$$

Asimismo, se presenta la siguiente figura con la finalidad de comprender la ecuación presentada.

Figura 6. Fase representada por: Función Seno (ϕ) y $T = 2\pi$.



Fuente: ESA (2007)

Intervalo de tiempo entre la emisión del pulso y el retorno del objeto

Los pulsos emitidos se desarrollan en un transcurso fijo de tiempo, al cual se denomina: “tiempo de repetición del pulso (PRT)”. Estos pulsos iluminan el área de interés en la superficie terrestre

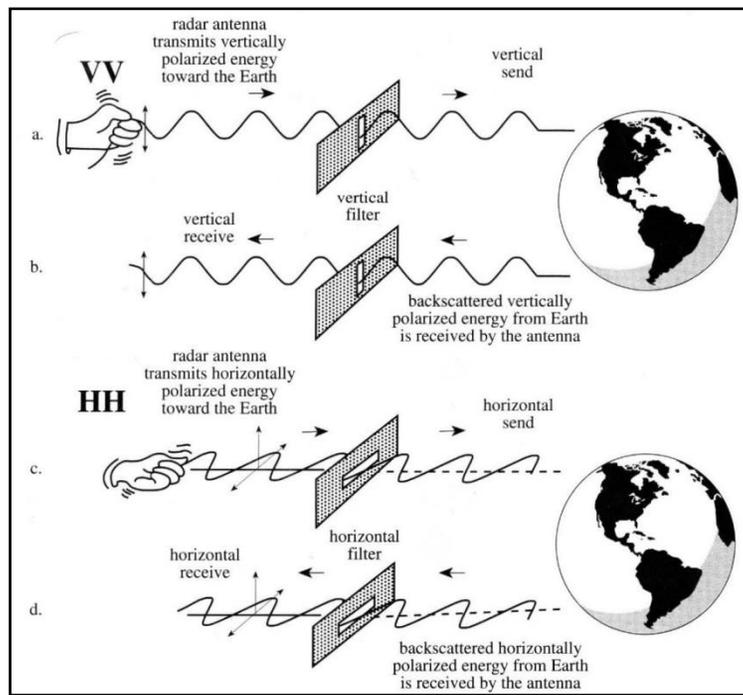
(pisada de antena), posterior a ello los ecos regresan desde los objetivos (elementos) presentes en la pisada de antena (Panozzo M, 2013).

Es a partir de la captura de estos ecos que se puede calcular la posición exacta de cada objetivo, esto es posible debido al tiempo de retardo con el que es recepcionado el eco en el sensor, es decir, mediante el intervalo de tiempo empleado entre la transmisión del pulso y su regreso, se puede identificar con precisión la ubicación del objetivo retrodispersador dentro de la superficie (Soumekh, 2005, citado en Panozzo M, 2013 p. 6).

Polarización

El componente polarización es referido según la FAO (1990) como “La orientación de la onda en el plano a lo largo del cual viaja, asimismo, los sistemas de radar algunas veces producen ondas con una polarización simple usualmente vertical u horizontal con respecto a la superficie” (ver **Figura 7**) (citado en Mayorga T, 2013 p. 40).

Figura 7. Polarización.



Fuente: ARSET (2018).

En base a lo mencionado por Skolnik (1990): “La polarización permite tener una medida de la simetría de un objetivo. En principio, un radar puede medir la rugosidad de la superficie de un objetivo y determinar algo sobre sus propiedades dieléctricas” (citado en Mayorga T, 2013 p. 40). Asimismo, la polarización toma en cuenta diversos factores tal y como lo mencionan en el CCRS (2001) “En la polarización se toma en cuenta la orientación, fase relativa y periodicidad de los campos eléctricos y magnéticos de las ondas. Las antenas de los sistemas de radar están configuradas para transmitir y recibir radiación electromagnética ya sea horizontal o verticalmente” (citado en Mayorga T, 2013 p. 40).

Finalmente, la polarización se divide en dos tipos, tal y como lo define Chuvieco (2002) “1) polarización similar: la energía transmitida es polarizada en la misma dirección que la recibida (HH, VV) y 2) polarización cruzada: cuando varía la polarización entre la señal emitida y la recibida (HV o VH). La dirección con la que la señal está polarizada influye en el haz de retorno porque el eco del radar es selectivo a la dirección de propagación” (citado en Mayorga T, 2013 p. 40). Además, en cuanto a la polarización, es importante mencionar lo establecido por SARMAP (2008), ya que indica que “el retorno de polarización cruzada HV o VH es débil y se lo asocia con diferentes reflexiones debido a la rugosidad de la superficie” (citado en Mayorga T, 2013 p. 41).

Frecuencia Doppler

Se denomina tiempo de integración al intervalo de tiempo durante el cual la antena del radar ilumina un objetivo, en dicho intervalo las ondas radar regresan al sensor con un cambio de frecuencia generado por el conocido “efecto Doppler”. Este efecto consiste en la transformación de la frecuencia de las ondas, ocasionado debido al movimiento relativo del sensor con respecto a su objetivo, en base a ello, esta nueva frecuencia receptionada por la antena es denominada

Frecuencia Doppler. Asimismo, la Frecuencia Doppler es positiva cuando el sensor se aproxima, mientras que es negativa cuando este se aleja (Panozzo M, 2013).

2.2.1.2.5 Tipo de radares de imágenes

Los dos tipos de radares de imágenes más utilizados son: *Real Aperture Radar (RAR)* y *Synthetic Aperture Radar (SAR)*.

El RAR a menudo se denomina SLAR (término derivado del acrónimo inglés *Side Looking Airborne Radar*). Asimismo, RAR y SAR son sistemas de aspecto lateral con una dirección de iluminación generalmente perpendicular a la línea de vuelo. La diferencia radica en la resolución a lo largo de la ruta, o la dirección del azimut. Los RAR tienen una resolución acimutal determinada por el ancho del haz de la antena, por lo que es proporcional a la distancia entre el radar y el objetivo (rango inclinado).

El radar de apertura sintética (SAR) utiliza el procesamiento de señal para sintetizar una apertura que es cientos de veces más larga que la antena real al operar en una secuencia de señales grabadas en la memoria del sistema. Estos sistemas tienen una resolución azimutal (resolución a lo largo de la pista) que es independiente de la distancia entre la antena y el objetivo.

La resolución de azimut nominal para un SAR es la mitad del tamaño real de la antena, aunque se puede seleccionar una resolución mayor para que se puedan mejorar otros aspectos de la calidad de la imagen. Generalmente, dependiendo del procesamiento, las resoluciones alcanzadas son del orden de 1-2 metros para radares aerotransportados y de 5-50 metros para radares espaciales.

2.2.1.2.6 SAR – Synthetic Aperture Radar

Cummin y Wong (2005) definen SAR como “Un sistema de radar que ilumina un área de la superficie terrestre mediante la transmisión de pulsos electromagnéticos en el rango de las microondas. Estos pulsos son reflejados desde el área iluminada y recibidos por la antena del SAR.

La transmisión de los pulsos se realiza apuntando el rayo de la antena aproximadamente en dirección perpendicular a la del vector de velocidad del satélite” (citado en Panozzo, 2013, p. 5).

Respecto a las características físicas de este sistema, Nievinski (2004) menciona que “La radiación utilizada por este tipo de radares es coherente, es decir, se constituye de componentes con la misma longitud de onda, mismo plano de vibración (polarización) y diferencia de fase constante” (citado en Hermosilla D, 2016 p. 12).

En cuanto a su etimología Zozaya (2015) indica que “El nombre –Radar de Apertura Sintética– lo recibe debido a que, durante su vuelo a una velocidad constante sobre la superficie terrestre, el SAR se encuentra continuamente almacenando los parámetros de los ecos que son recibidos cada vez desde una posición distinta. Se dice que la suma coherente de estos ecos permite sintetizar en forma virtual la apertura de una antena más grande a la real” (citado en Hermosilla D, 2016 p. 12).

Finalmente, SARMAP (2008) destaca que “El SAR tiene ventajas únicas sobre sensores ópticos, debido que es independiente de la iluminación solar, penetra nubes, y en cierta medida pocos centímetros de superficies como suelo, vegetación, nieve, dependiendo de la frecuencia a la que operan. No obstante, en imágenes de radar se debe considerar la complejidad en el procesamiento de los datos y las dificultades en su interpretación” (citado en Mayorga, 2013, p. 47).

2.2.1.2.7 *Funcionamiento de un SAR*

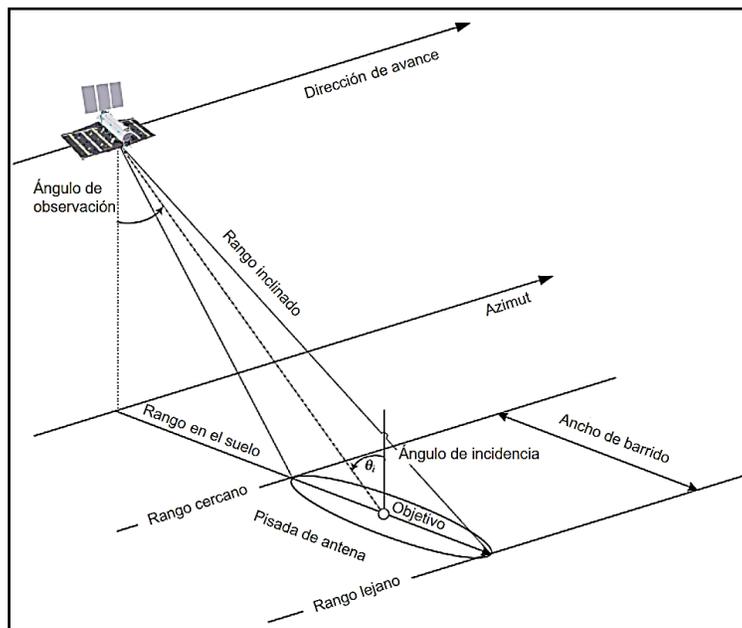
Hermosilla (2016), establece que “El funcionamiento de un SAR se constituye básicamente la siguiente secuencia: 1) La antena emite un pulso de energía (microondas) hacia el suelo; 2) una vez que el pulso toca el suelo es esparcido en todas las direcciones; 3) parte de este pulso retorna en dirección de la antena receptora del radar, proceso conocido como retrodispersión (*backscattering* en inglés); 4) este pulso recibido es captado en función de su

amplitud, fase, polarización y tiempo de retorno; 5) finalmente, estos parámetros son posteriormente procesados en conjunto, para formar una imagen de la superficie capturada.”

2.2.1.2.8 Geometría de adquisición de un SAR

De acuerdo con el punto anterior, la **Figura 8** muestra la geometría de los sistemas SAR, en los cuales se puede apreciar los parámetros considerados al momento de la adquisición y los cuales serán detallados a continuación en base a lo descrito por Panozzo (2013).

Figura 8. Geometría de adquisición de un sistema SAR.



Fuente: Panozzo (2013).

La **Figura 8** muestra los parámetros de la adquisición, dónde: **(1) Azimut**, es la dirección de avance del satélite; **(2) Rango inclinado**, es la dirección de observación del sensor respecto al objetivo, y es este parámetro es el que determina la distancia existente entre ambos actores; **(3) Rango en el suelo**, es el rango inclinado proyectado en la superficie terrestre. El rango en el suelo se genera dividiendo el rango inclinado con el seno del ángulo de incidencia local θ_i ; **(4) Ángulo de incidencia**, es el ángulo formado entre la normal de la superficie y la dirección de mirada del radar,

asimismo, influye en la intensidad de la imagen SAR; (5) **Rango cercano**, se refiere a la distancia más cercana a la que se encuentran los objetivos iluminados respecto al sensor; (6) **Rango lejano**, se refiere a la distancia más lejana a la que se encuentran los objetivos iluminados respecto al sensor y (7) **Ancho de barrido**, se refiere a la porción de superficie terrestre que es abarcada por la señal del sensor y esta porción es representada en la imagen SAR, asimismo este ancho de barrido se encuentra delimitado por el rango cercano y el rango lejano.

2.2.1.2.9 Imagen SAR

Según Torres (2011), “Una imagen del tipo SAR puede ser considerada como un mosaico, esto es, como una matriz compuesta de filas y columnas de pequeños elementos o píxeles. Cada píxel se corresponde con una pequeña área de la superficie observada y está asociado a un número complejo que describe una amplitud y una fase a la vez (a diferencia de *RAR*, en donde la imagen es generada sólo a partir de la amplitud de cada eco recibido)” (citado en Hermosilla D, 2016 p. 21). Asimismo, Hermosilla (2016) destaca que “Estos parámetros entregan información acerca del campo de microondas retrodispersadas de cada uno de los puntos dispersores, que pueden tratarse de rocas, vegetación, construcciones, etc. En la imagen SAR las columnas se corresponden con la dirección en rango y las filas con la dirección en azimut”. Además, es importante resaltar que los parámetros del radar más importantes a considerar dentro de un estudio con imágenes SAR son: longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia; mientras que los parámetros superficiales más influyentes en la imagen son: estructura y propiedades dieléctricas.

2.2.1.2.10 Resolución espacial de una imagen SAR

La resolución espacial de una imagen SAR se cuenta expresada en dos dimensiones: (1) resolución basada en la dirección del rango (inclinado y en el suelo) y (2) resolución basada en la dirección del azimut.

Resolución en el rango

Hace referencia a la capacidad que posee el sensor para poder diferenciar sobre los objetos que se encuentran compartiendo la misma dirección, pero diferente ubicación. La resolución en el rango se encuentra determinada por el ancho del pulso emitido (longitud) y por las dimensiones y naturaleza de los objetos. Es importante mencionar que los sistemas SAR emiten pulsos modulados linealmente en frecuencia denominados “pulsos *chirps*” que logran mejorar la resolución en el rango ya que estos interfieren directamente aumentando el ancho de banda (Hermosilla D, 2016). Con base en lo mencionado, se puede definir en primer lugar que la resolución presente en el rango inclinado (ρ_{ri}) está representada por la siguiente ecuación:

$$\rho_{ri} = \frac{c}{2B}$$

Dónde:

- c : es la velocidad de la luz.
- B : es la longitud de la banda empleada en la modulación de frecuencia.

La resolución del rango en el suelo (ρ_{rs}) se obtiene proyectando el rango inclinado sobre la superficie terrestre, esto se traduce dividiendo el rango inclinado (ρ_{ri}) con el seno del ángulo de incidencia ($\text{sen}\theta_i$), ecuación que se muestra a continuación:

$$\rho_{rs} = \frac{\rho_{ri}}{\text{sen}\theta_i}$$

Resolución en el azimut

Debido a la característica de los SAR de poder simular una longitud sintética de su antena, la resolución en el azimut (ρ_{az}) se encuentra determinada únicamente por la longitud real de la antena (L_a) y expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{az} = \frac{L_a}{2}$$

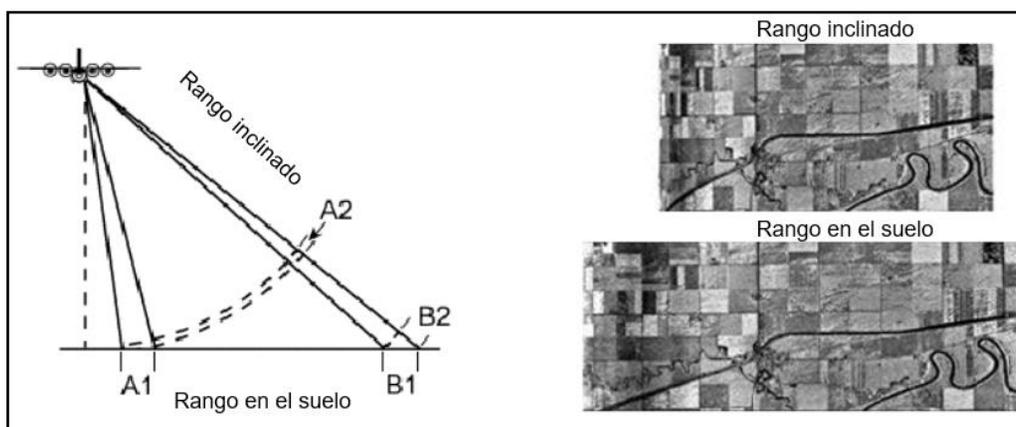
2.2.1.2.11 *Distorsiones geométricas, radiométricas y speckle presentes en las imágenes SAR*

El sistema radar presenta ciertas distorsiones sobre la información extraída al igual que ocurre en todos los sistemas de teledetección, pero en este caso en particular, al poseer una naturaleza de adquisición lateral, el radar genera ciertas alteraciones geométricas, asimismo, por la tecnología empleada en su sistema y, en conjunción, con su interacción con el medio, presenta también ciertas distorsiones radiométricas y un efecto peculiar de moteado (*speckle*). Las distorsiones mencionadas anteriormente se detallan a continuación:

Distorsión geométrica en el rango inclinado

Esta distorsión se genera porque el radar mide las distancias en el rango inclinado en lugar de medirlas directamente de forma horizontal a lo largo del suelo. Esto genera como resultado una imagen que varía de acuerdo con su cercanía o lejanía del objetivo con respecto al sensor. Para entender mejor lo descrito, nos remitiremos a la **Figura 9**.

Figura 9. Distorsión del rango inclinado.



Fuente: CCRS (2015).

Como se puede apreciar en la **Figura 9**, los objetivos A1 y B1 tienen las mismas dimensiones en el suelo, sin embargo, sus dimensiones aparentes A2 y B2 en el rango inclinado son diferentes, por

consiguiente, esto genera que los objetivos se muestren comprimidos en el rango cercano con respecto al rango lejano. Esta distorsión es corregida mediante ecuaciones trigonométricas.

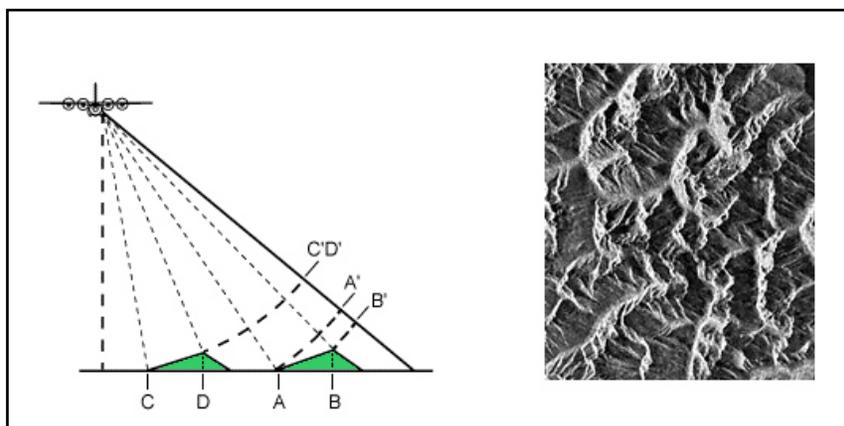
Distorsión geométrica por el relieve

El radar presenta ciertas distorsiones geométricas por el desplazamiento del relieve, este caso es similar al que sucede cuando capturamos información a partir de cámaras y/o escáneres. Como se mencionó al principio de esta sección, al ser de naturaleza de adquisición lateral y por la condición del relieve (generalmente estructuras de pendientes pronunciadas, p.e: montañas), se presentan distorsiones geométricas denominadas *foreshortening*, *layover* y *shadowing*, las cuales se detallan a continuación:

Acortamiento de pendiente (*Foreshortening*)

Esta distorsión ocurre cuando se presentan estructuras moderadamente empinadas, donde la pendiente delantera es acortada y la pendiente trasera es alargada. Este efecto puede ser corregido mediante el uso de un modelo de elevación digital de alta resolución (DEM). La representación de esta distorsión se muestra en la **Figura 10**.

Figura 10. *Foreshortening*.

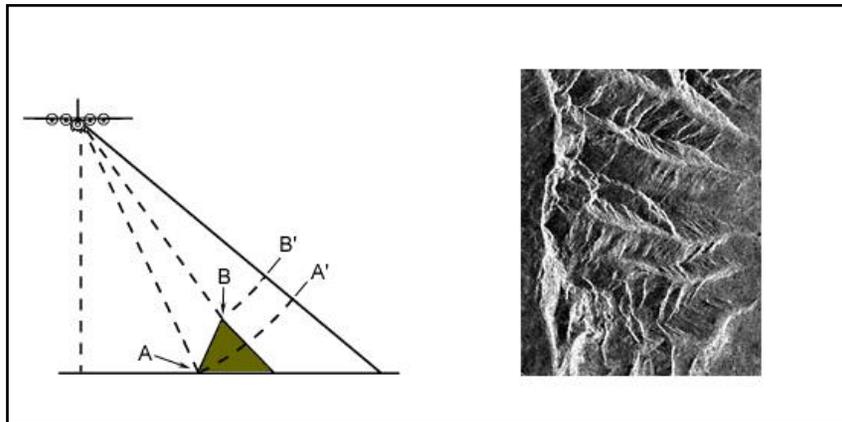


Fuente: CCRS (2015).

Inversión de relieve (*Layover*)

Esta distorsión ocurre cuando se presentan estructuras fuertemente empinadas, donde el retorno de la parte superior de esta estructura tendrá un retorno de mayor rapidez en comparación con su base, generando una inversión en el relieve para el radar. Este efecto no puede ser corregido. La representación de esta distorsión se muestra en la **Figura 11**.

Figura 11. *Layover*.

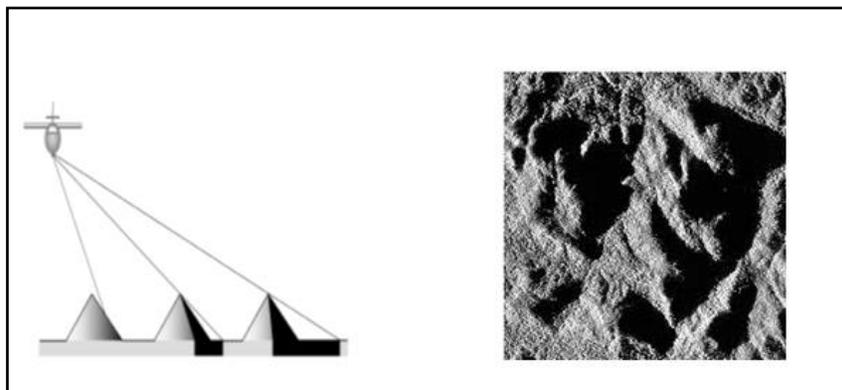


Fuente: CCRS (2015).

Sombras (*Shadowing*)

La sombra del radar se produce cuando la señal del radar no puede iluminar la superficie del suelo. Este efecto no puede ser corregido. La representación de esta distorsión se muestra en la **Figura 12**.

Figura 12. *Shadowing*.

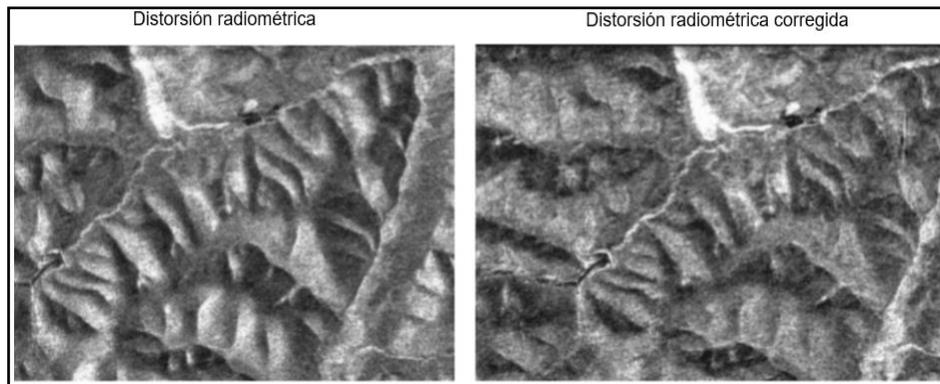


Fuente: CCRS (2015).

Distorsión radiométrica

La distorsión radiométrica está basada principalmente en el patrón de la antena radar, ya que cuando el radar transmite su señal, de acuerdo con este patrón la energía está concentrada en la parte central del área en iluminación, mientras que en las partes aledañas se presenta menos energía. Esto se ve reflejado en la imagen, generando áreas más brillantes en el centro de esta. Este efecto se puede corregir conociendo el patrón de la antena. La representación de esta distorsión y su corrección se muestra en la **Figura 13**.

Figura 13. Distorsión radiométrica.



Fuente: ARSET (2018).

Speckle

El *Speckle* de una imagen SAR es un ruido granular comúnmente llamado efecto “sal y pimienta” que existe de forma inherente, asimismo, disminuye la calidad de estas. Este efecto se representa mediante la siguiente ecuación:

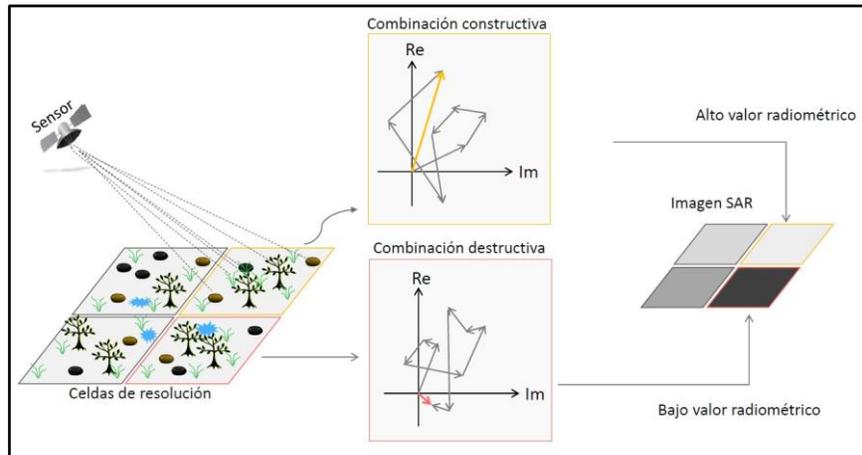
$$Ic = R * v$$

Dónde:

- *Ic*: Es la intensidad medida por el sensor.
- *R*: Valor de intensidad a ser estimado.
- *v*: *Speckle*

Este efecto se produce debido a la gran dispersión de la señal radar en la superficie, señal que forma combinaciones constructivas y destructivas en su retorno al sensor (**ver Figura 14**).

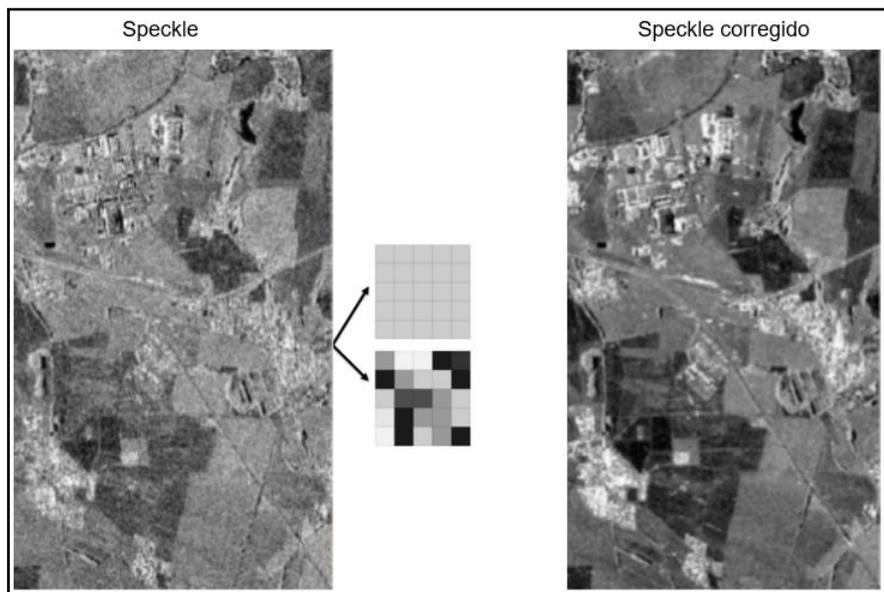
Figura 14. Formación del *speckle*.



Fuente: CEICI (2019).

Este ruido presente en todas las imágenes SAR generan dificultad en su interpretación, sin embargo, este efecto se puede corregir mediante la aplicación de *looks* y filtros, pero estos reducen la resolución y calidad de la imagen (**ver Figura 15**).

Figura 15. *Speckle* presente en la imagen SAR.



Fuente: CCRS (2015).

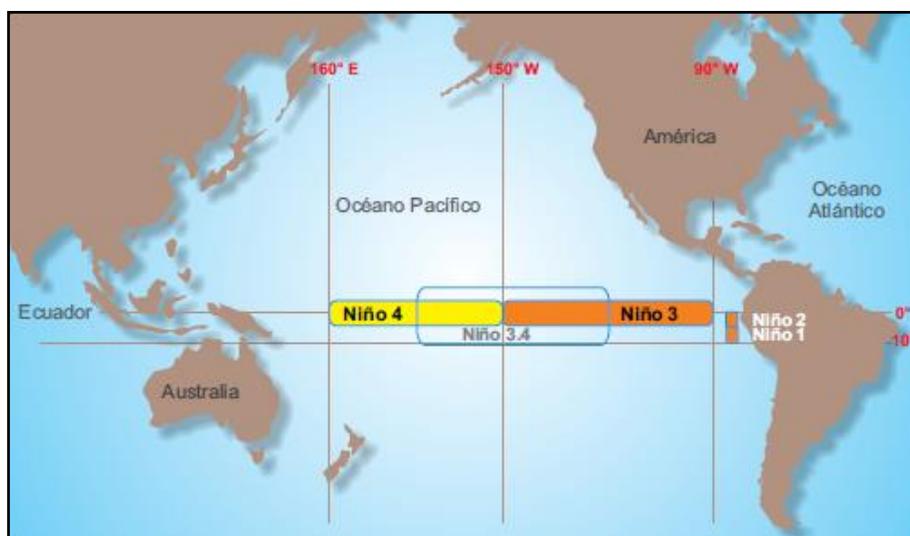
2.2.1.3 Imágenes Sentinel-1

La presente investigación hará uso de imágenes SAR de la misión Sentinel-1, la cual comprende una constelación de dos satélites (Sentinel 1-A y Sentinel 1-B) de órbita polar operando en banda C, las dimensiones de los píxeles para el modo de adquisición *Interferometric Wide swath* (IW), modo a emplear en la presente investigación, son de 5 metros en el rango y 20 metros en el azimut, y su dimensión de ancho de franja es de 250 kilómetros. Asimismo, las formas de adquisición de estas imágenes pueden ser de forma ascendente o descendente.

2.2.1.4 Fenómeno El Niño

Es un tipo de fenómeno de origen natural, se origina debido a la interacción la atmósfera y el océano, exactamente en la región tropical del océano Pacífico. Los científicos en estos últimos años sectorizaron en 4 cuadrantes la línea ecuatorial, para identificar la variación de la temperatura superficial del océano Pacífico, dándole mayor importancia de investigación a los cuadrantes Niño 3 y Niño 3,4 para determinar la formación del fenómeno. (SENAMHI, 2014). Para una mejor comprensión de lo descrito se presenta la **Figura 16**.

Figura 16. Cuadrantes de estudio en el océano Pacífico.

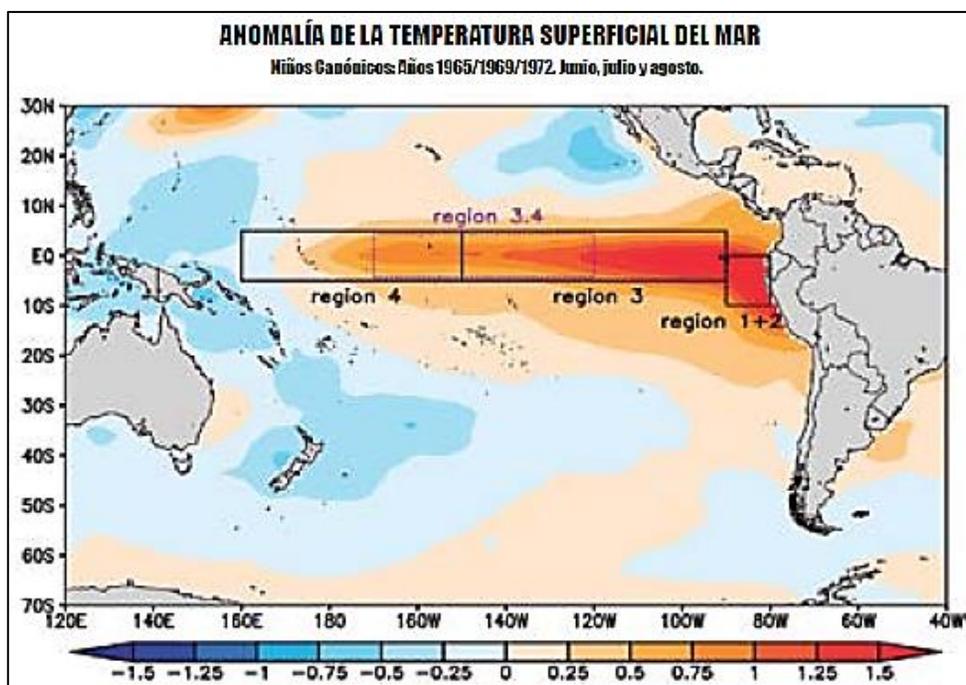


Fuente: NOAA y SENAMHI (2014)

2.2.1.4.1 Niño Canónico

Se le conoce como “Niño Canónico”, en función de su desarrollo temporal, es decir, cuando la temperatura superficial del mar se inicia en la costa peruana durante el otoño y se extiende hacia el oeste, con un calentamiento máximo en el central-oriental durante el verano siguiente. (Rasmusson y Carpenter, 1982; citado en SENAMHI, 2014). (Ver Figura 17)

Figura 17. Distribución de anomalías de la temperatura superficial del mar (°C): Niño Canónico.

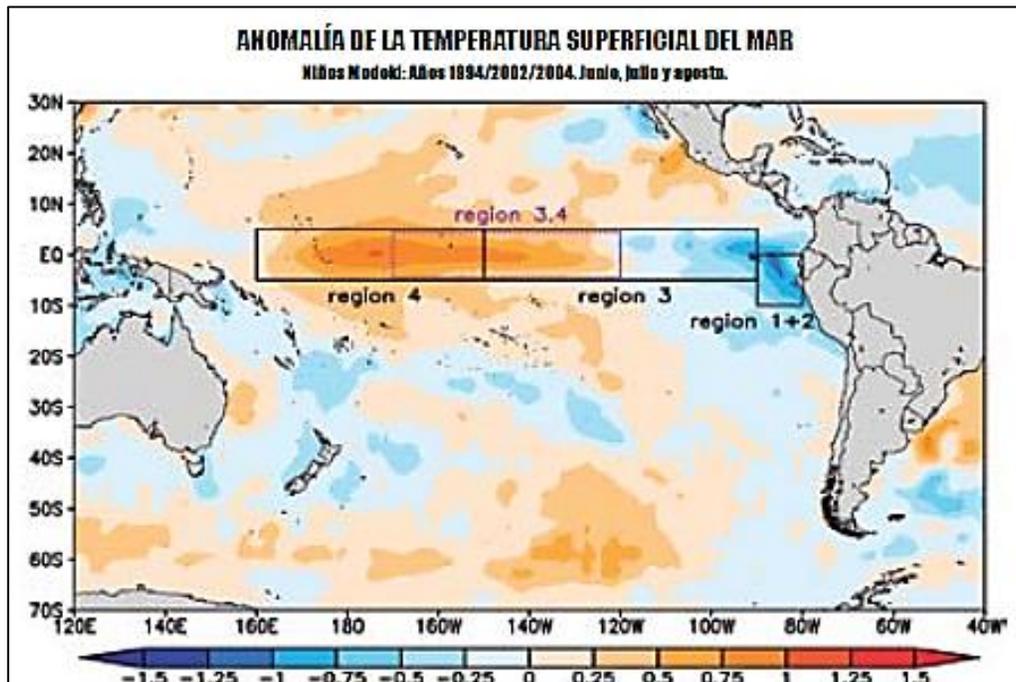


Fuente: NOAA y SENAMHI (2014)

2.2.1.4.2 Niño Modoki

Se le conoce como “Niño Modoki”, debido al poco efecto en la temperatura del océano, las masas de aire y las lluvias. En dicha anomalía se evidencia que la temperatura superficial del mar en la zona del Pacífico central no se une con las del Pacífico oriental. (SENAMHI, 2014). (ver Figura 18)

Figura 18. Distribución de anomalías de la temperatura superficial del mar (°C): Niño Modoki.



Fuente: NOAA y SENAMHI (2014)

2.2.1.5 El Niño Costero 2017

El fenómeno El Niño Costero se desarrolla en Ecuador y la costa norte del Perú, presentándose aguas cálidas de manera permanente durante varios meses en el océano Pacífico, además de poder asociarse con lluvias muy fuertes durante el verano, generando impactos en los ecosistemas. En eventos extraordinarios las aguas cálidas se pueden extender hacia la zona de costa central y sur del Perú. (IMARPE, s.f).

La comisión del estudio nacional del fenómeno El Niño (2017) informó lo siguiente: “En enero del 2017 la temperatura de la superficie del mar se incrementó abruptamente, contra los pronósticos del ENFEN y de los modelos climáticos internacionales, hasta alcanzar valores por encima de 26°C en varios puntos de la costa norte, mientras que en el Pacífico Ecuatorial Central aún ocurría la transición de La Niña a neutral. Esto activó la segunda banda de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en forma temprana e intensa frente a la costa de Perú, lo cual propició la

ocurrencia de lluvias muy fuertes en la zona norte. Además, las condiciones atmosféricas tipo La Niña en el Pacífico Central y el ingreso de humedad del norte propiciaron lluvias fuertes en los Andes occidentales. El calentamiento costero se habría iniciado por el debilitamiento de los vientos alisios del sur en enero, mientras que la intensificación de la segunda banda de la ZCIT al sur de Ecuador activó un mecanismo de retroalimentación positivo que mantuvo los alisios del sur débiles en la banda ecuatorial y las temperaturas elevadas frente a la costa norte hasta el mes de abril. Luego, por la reducción estacional de la radiación solar las temperaturas se redujeron y se desactivó la banda secundaria de la ZCIT, iniciándose la rápida declinación del evento.”

2.2.1.6 Inundaciones

Las inundaciones son peligros generados por fenómenos de origen hidrometeorológicos y oceanográficos, en la que masas de agua cubren determinadas superficies de manera inusual, mayormente son desencadenados a consecuencia de las lluvias intensas. Las inundaciones son clasificados por su origen en: (1) inundación fluvial, causadas por el desbordamiento de agua de los ríos, debido al aumento del caudal más allá del cauce; y (2) inundación pluvial, producidas en áreas bajas o de menor pendiente, debido a la poca permeabilidad del suelo.

2.2.2 Algoritmo K-Means Clustering

Es importante mencionar que la definición presentada en esta sección se encuentra enfocada en la clasificación y procesamiento de imágenes. Con base en lo mencionado, por el grado de ingeniería informática del software de la Universidad de Oviedo (2014) se establece el siguiente concepto: “*K-Means Clustering* es un algoritmo de clasificación no supervisada (clusterización) que agrupa objetos en **K** grupos basándose en sus características (el agrupamiento se realiza minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o *cluster*, se suele usar la distancia cuadrática).”

Asimismo, en la asignatura de computación numérica, se definen los pasos de este algoritmo de la siguiente manera: “**1) Inicialización:** una vez escogido el número de grupos (**K**), se establecen **K** centroides en el espacio de los datos (por ejemplo, escogiéndolos aleatoriamente); **2) asignación objetos a los centroides:** cada objeto de los datos es asignado a su centroide más cercano. **3) actualización centroides:** se actualiza la posición del centroide de cada grupo tomando como nuevo centroide la posición del promedio de los objetos pertenecientes a dicho grupo. Finalmente, se repiten los pasos 2 y 3 hasta que los centroides no se mueven, o se mueven por debajo de una distancia umbral en cada paso.”

En cuanto a la expresión matemática de este algoritmo, se presenta la siguiente ecuación:

$$[1] \quad \min_{\mathbf{S}} E(\boldsymbol{\mu}_i) = \min_{\mathbf{S}} \sum_{i=1}^k \sum_{\mathbf{x}_j \in S_i} \|\mathbf{x}_j - \boldsymbol{\mu}_i\|^2$$

La ecuación fue desarrollada por el laboratorio de la Universidad de Oviedo (2014) indicando lo siguiente: “Los objetos se representan con vectores reales de **D** dimensiones (x_1, x_2, \dots, x_n) y el algoritmo *K-Means Clustering* construye **K** grupos donde se minimiza la suma de distancias de los objetos, dentro de cada grupo $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$, a su centroide. En la ecuación [1], **S** es el conjunto de datos cuyos elementos son los objetos x_j representados por vectores, donde cada uno de sus elementos representa una característica o atributo. En base a ello tendremos **K** grupos o *clusters* con su correspondiente centroide μ_i ”. De la primera ecuación [1] y en concordancia con el paso 3 de este algoritmo (mencionado previamente), se establece la segunda ecuación [2]:

$$[2] \quad \frac{\partial E}{\partial \boldsymbol{\mu}_i} = 0 \implies \boldsymbol{\mu}_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{\mathbf{x}_j \in S_i^{(t)}} \mathbf{x}_j$$

Donde se detalla lo siguiente “En cada actualización de los centroides, desde el punto de vista matemático, imponemos la condición necesaria de extremo a la función $E(\mu_i)$, que para la función

cuadrática [1] sea la función [2] y en consecuencia se toma el promedio de los elementos de cada grupo como nuevo centroide.”

Finalmente, se concluye que la ventaja de la aplicación de este algoritmo radica en su sencillez y rapidez, siendo vital el establecimiento del valor **K**, que dará inicio al surgimiento de los centroides, los cuales son influyentes en el resultado final de este, es decir, en primera instancia no concurre al mínimo global sino más bien a un mínimo local.

2.2.3 Evaluación de impactos

La evaluación de impactos identifica y dimensiona la información para conocer estadísticamente los impactos generados después de un evento catastrófico, convirtiéndose en un medio para informar la estimación de pérdidas del riesgo de desastres, para así determinar los costos que orientan el diseño de las intervenciones sectoriales para lograr la recuperación. (CEPAL, 2014).

El procedimiento desarrollado en la presente investigación se encuentra vinculado al proceso de respuesta, señalado en el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, asimismo, consideraremos como herramienta de apoyo el manual de Evaluación de Daños y Necesidades - EDAN PERÚ, el cual es el mecanismo de recolección (in situ) de datos cualitativos y cuantitativos, de ubicación, expansión, gravedad del impacto de un evento y condición, según el impacto.

2.2.3.1 Desastre

Es considerado el conjunto de daños y pérdidas, a consecuencia de un impacto ocasionado por un peligro o amenaza, siendo esta de origen natural o antrópica, el cual trae como consecuencia la alteración de diversos aspectos sociales, en la que se supera la capacidad de respuesta para atender el impacto. (D.S. N°048-2011-PCM, 2011).

Los desastres son generados por 2 factores que contribuyen al impacto: 1) los fenómenos o peligros naturales, que desencadenan daños y pérdidas, y 2) la vulnerabilidad de la población. (CEPAL, 2014).

2.3 Definición de términos

- **Backscattering.** Es la retrodispersión que genera un objetivo o cuerpo, generándose un retorno directamente hacia la antena del radar; el dato de retrodispersión depende de los factores del ángulo de incidencia y la frecuencia, representando el promedio del área reflectiva del radar por unidad de área.
- **Polarización cruzada.** Es aquella señal que se compone de diferentes polarizaciones, pudiendo ser VH: transmitida verticalmente, recibida horizontalmente o HV: transmitida horizontalmente, recibida verticalmente, estas polarizaciones pueden ser utilizadas para determinar las propiedades físicas del objeto observado. Para el estudio de inundaciones se sugiere trabajar con estos tipos de polarizaciones, debido a que el *backscattering* de los cuerpos de agua abiertos se reflejan mediante una intensidad más oscura (valores mínimos).
- **Metadata.** Son los metadatos originales de la imagen, en el cual se observa datos importantes como: fecha de adquisición, modo de adquisición, estado de polarización, banda, dirección de paso y dirección de mirada entre los más importantes. Los datos mencionados son utilizados por los softwares para el procesamiento respectivo de la imagen SAR.
- **Sistema de referencia cartográfico.** Es un recurso matemático que se utiliza para determinar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre, en el caso del área de estudio se trabajará con WGS-84.

- **Mapeo.** Acción de localizar y representar gráficamente la distribución relativa de las partes de un todo, en la presente investigación se refiere a la representación geográfica de la superficie terrestre.
- **Detección.** Captación o percepción de una cosa o un fenómeno.

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis General*

La detección y mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR, usando la técnica *K-Means Clustering* permitirá una adecuada evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño, debido a la ventaja y capacidad que poseen las imágenes SAR en cuanto a la determinación de áreas inundadas, en la cuenca Bajo Piura, región Piura.

3.1.2 *Hipótesis Específicas*

- La dinámica de la inundación con base en las imágenes SAR se definen en dos etapas: pre-inundación e inundación.
- La aplicación de un filtro morfológico nos ayuda de manera eficiente a delimitar las áreas de inundación.
- La información cartográfica base, correspondiente al ámbito social y económico estimarán los principales impactos para la evaluación del desastre.
- El empleo del método *K-Means Clustering* es eficaz en la clasificación de cuerpos de agua y no agua, asimismo, es ventajosa debido a su sencilla aplicación y rápida ejecución, lo cual permite ser empleada en eventos futuros del fenómeno El Niño.

3.2 Variables

3.2.1 *Variable Independiente*

- Método *K-Means Clustering*

3.2.2 Variable Dependiente

- Mapeo de inundaciones
- Evaluación de impactos

3.3 Operacionalización de variables

La operacionalización de la variable se encuentra constituida por una serie de procedimientos para realizar la medición de las variables dependiente e independiente, nuestro estudio se encuentra considerando 2 variables dependientes y 1 variable independiente que guardan relación para validar las mediciones mediante los indicadores, los cuales se presentan a continuación en la

Tabla 2.

Tabla 2. Operacionalización de variables.

Tipo de Variable	Variable	Dimensión	Indicadores
Variable Independiente	Método <i>K-Means Clustering</i> (clasificación no supervisada)	Algoritmo <i>K-Means Clustering</i>	Grupos de clases identificadas
Variable Dependiente	Mapeo de inundaciones	Imágenes radar de apertura sintética (SAR)	Sistema de imágenes radar
			Resolución espacial
			Distorsión geométrica por el relieve
			Distorsión radiométrica
			Moteado (<i>speckle</i>)
	Evaluación de impactos	Procesamiento de imágenes SAR	<i>Multilook</i>
			Filtro Lee
			Calibración radiométrica
			Corrección geométrica del terreno
			Centro Poblado
Evaluación de impactos	Medio Social	Educación	
		Salud	
		Uso de suelo	
	Medio Económico	Vías de acceso	

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

En la presente sección se desarrolla la descripción general de la cuenca Bajo Piura como área de estudio de la presente investigación, considerando su ubicación geográfica, los medios físicos fundamentales como: geología, pendiente, fisiografía, suelos, clima e hidrografía; la descripción del medio social, y posteriormente la descripción del medio económico pertenecientes y circundantes al área de estudio.

4.1.1 Ubicación

La cuenca Bajo Piura se sitúa en el norte del territorio nacional, encontrándose incluida (como unidad hidrográfica) dentro de la cuenca mayor Piura perteneciente a la vertiente hidrográfica del Pacífico, cuenta con un área de 4 746,67 km² y un perímetro de 391,53 km. Asimismo, limita con la cuenca chira (norte), cuenca Cascajal (sur), cuenca Chamaya (este) y el océano Pacífico (oeste). El área denominada “cuenca Bajo Piura”, políticamente involucra a 5 provincias del departamento de Piura, siendo estas las provincias de Piura, Morropón, Paita, Sullana y Sechura; provincias que a su vez comprenden un total 21 distritos (**Tabla 3**).

Tabla 3. Extensión política de cuenca Bajo Piura.

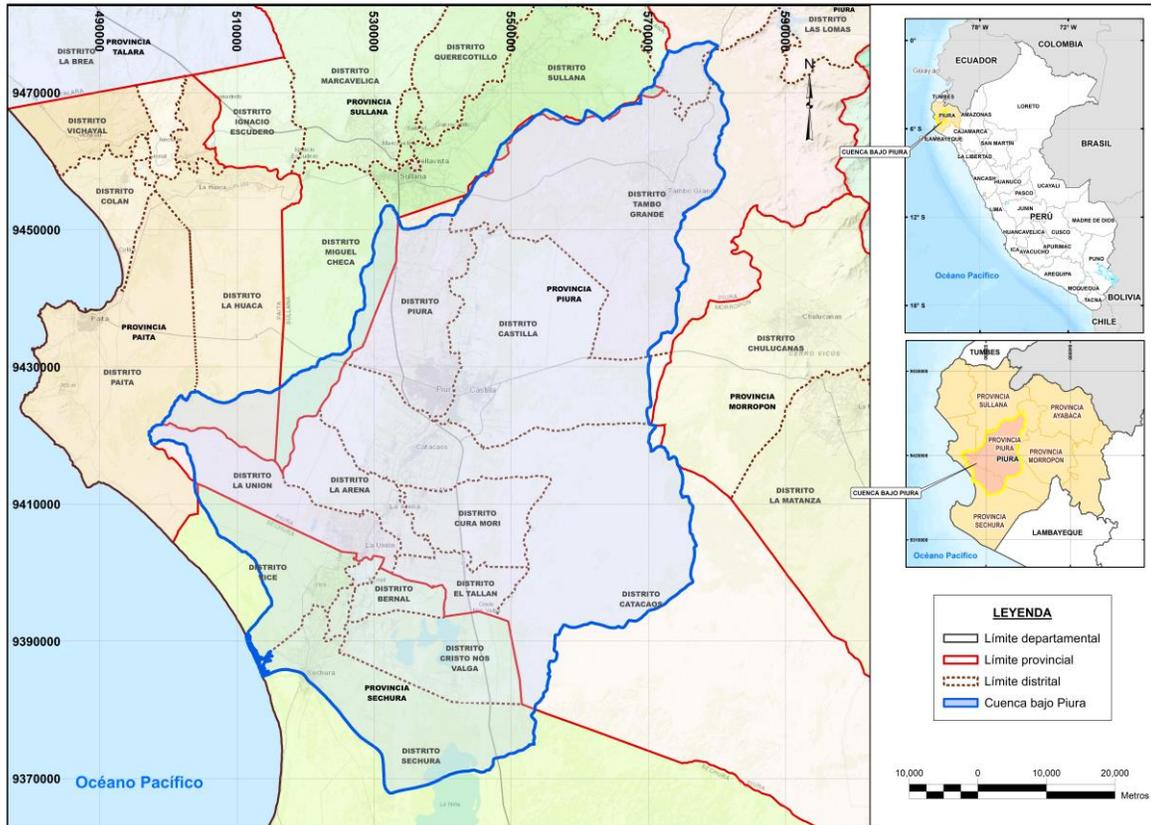
Departamento	Provincia	Distrito
Piura	Piura	Piura
		Castilla
		Catacaos
		Cura Mori
		El Tallan
		La Arena
		La Unión
		Las Lomas

Departamento	Provincia	Distrito
		Tambo Grande
	Morropón	Chulucanas
	Paita	Paita
		La Huaca
	Sullana	Sullana
		Lancones
		Miguel Checa
	Sechura	Sechura
		Bellavista de la Unión
		Bernal
		Cristo Nos Valga
		Vice
		Rinconada Llicuar

Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Las coordenadas centrales UTM del área de estudio, las cuales se encuentran situadas en la zona 17S del sistema WGS 84, son las siguientes: 9 419 411,70 N y 545 123,70 E. Finalmente, la representación espacial de lo descrito se puede apreciar en la **Figura 19**.

Figura 19. Ubicación de la cuenca Bajo Piura.



4.1.2 Medio Físico

4.1.2.1 Geología

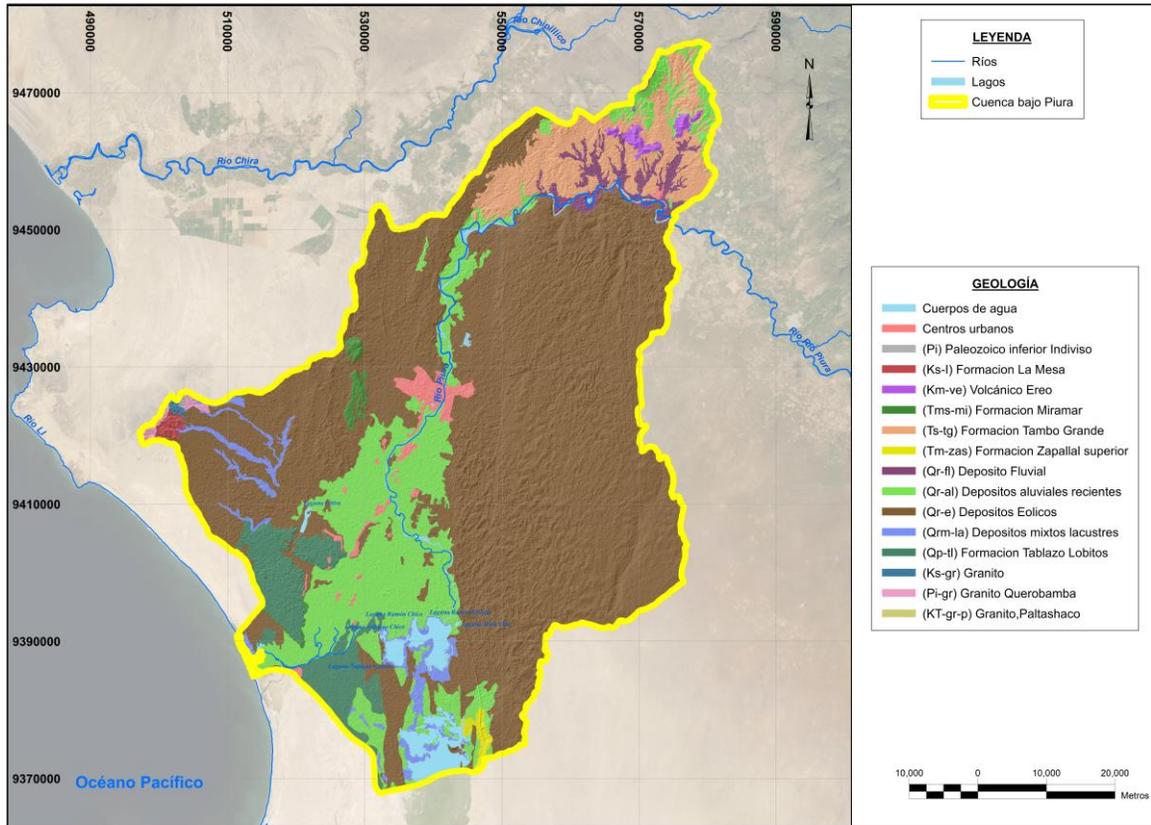
En la presente sección se detallan las características regionales de las unidades geológicas comprendidas en la cuenca Bajo Piura, obtenidas de los boletines del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), así como también, de la cartografía geológica de la Zonificación Económica y Ecológica (ZEE) de la región Piura; en la **Tabla 4** se detalla las unidades geológicas del área de estudio. Asimismo, la **Figura 20** presenta espacialmente estas unidades.

Tabla 4. Unidades geológicas de la cuenca Bajo Piura.

Era	Unidades Geológicas	Descripción	Simbología
Paleozoico	Paleozoico Inferior Indiviso	Rocas sedimentarias de naturaleza pelítica-psamítica depositadas en cuencas del Paleozoico inferior.	Pi
Mesozoico	Formación La Mesa	Caliza nodulosa oscura que se alteran a colores rojos púrpuro; los fósiles están conformados por bivalvos.	Ks-l
	Volcánico Ereó	Lavas andesíticas porfíricas, brechas piroclásticas con textura vacuolar y lavas almohadilladas que se intercalan con tonalitas gris oscuro que conforman estratos gruesos.	Km-ve
Cenozoico	Formación Miramar	Unidad se caracteriza por el predominio de areniscas grises poco compactas a semiconsolidada con abundante óxido de hierro.	Tms-mi
	Formación Tambo Grande	Gruesos estratos de areniscas color blanco grisáceas, niveles de lodolitas, areniscas tobáceas y gonglomerados heterolíticos	Ts-tg
	Formación Zapallal Superior	Areniscas huecas de almejas, zona mineralizada cero, Diatomita Inca, zona mineralizada Minerva, Diatomita Quechua y Diatomita estéril.	Tm-zas
Cuaternario	Depósito Fluvial	Arenas, gravas, limos, arcillas y conglomerados que ocupan el fondo de los valles, terrazas y llanuras de inundación reciente de los ríos.	Qr-fl
	Depósitos Aluviales Recientes	Conglomerados (rodados de cuarcitas, rocas volcánicas, rocas intrusivas y fragmentos de cuarzo metamórfico), arenas limos y arcillas semiconsolidados.	Qr-al
	Depósitos Eólicos	Dunas con desplazamiento, dunas gigantes y también en mantos delgados de arena suelta.	Qr-e
	Depósitos mixtos lacustres	Antiguas llanuras inundables que han sido colmatadas por material eólico; por lo cual en las partes más profundas se encuentran arcillas y lodos, en las superficies son costras de arena con caliche y sales.	Qrm-la
	Formación Tablazo Lobitos	Conglomerádico poco consolidado, compuesto por rodados heterolíticos subangulosos y formas faunísticas no fosilizadas bien conservadas con matriz bioclástica o areniscosa.	Qp-tl
Roca Intrusiva	Granito	Roca ígnea intrusiva de grano grueso compuesta por cuarzo, feldespato y micas.	Ks-gr
	Granito Querobamba	Conformado por granitos que afloran en el cerro Tunal.	Pi-gr
	Granito Paltashaco	Roca de textura granular porfírica constituido por cuarzo, ortosa, plagioclasas y biotita con epidota y, en las zonas de mayor humedad se altera a suelos arcillosos con granos de cuarzo colores crema amarillento y, en las zonas secas es afectado por una disgregación granular cuarzo-feldespática friable y de aspecto terroso que se aprecia en los cortes naturales y/o caminos de la sierra.	KT-gr-p
Otros	Cuerpos de agua		
	Centros Urbanos		

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Figura 20. Formación geológica de la cuenca Bajo Piura.



4.1.2.2 Pendiente

La determinación de la pendiente del suelo se adquirió del modelo digital de elevación ASTER GDEM (Aster Global Digital Elevation Model) proporcionado por el MINAM a través del siguiente enlace: https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspx , a partir de este se establecieron rangos de acuerdo al reglamento vigente de “Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (D.S. 017-2009-AG)”, el cual indica que las pendientes se deben agrupar en 7 rangos, estos rangos son presentados en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Clasificación de pendientes.

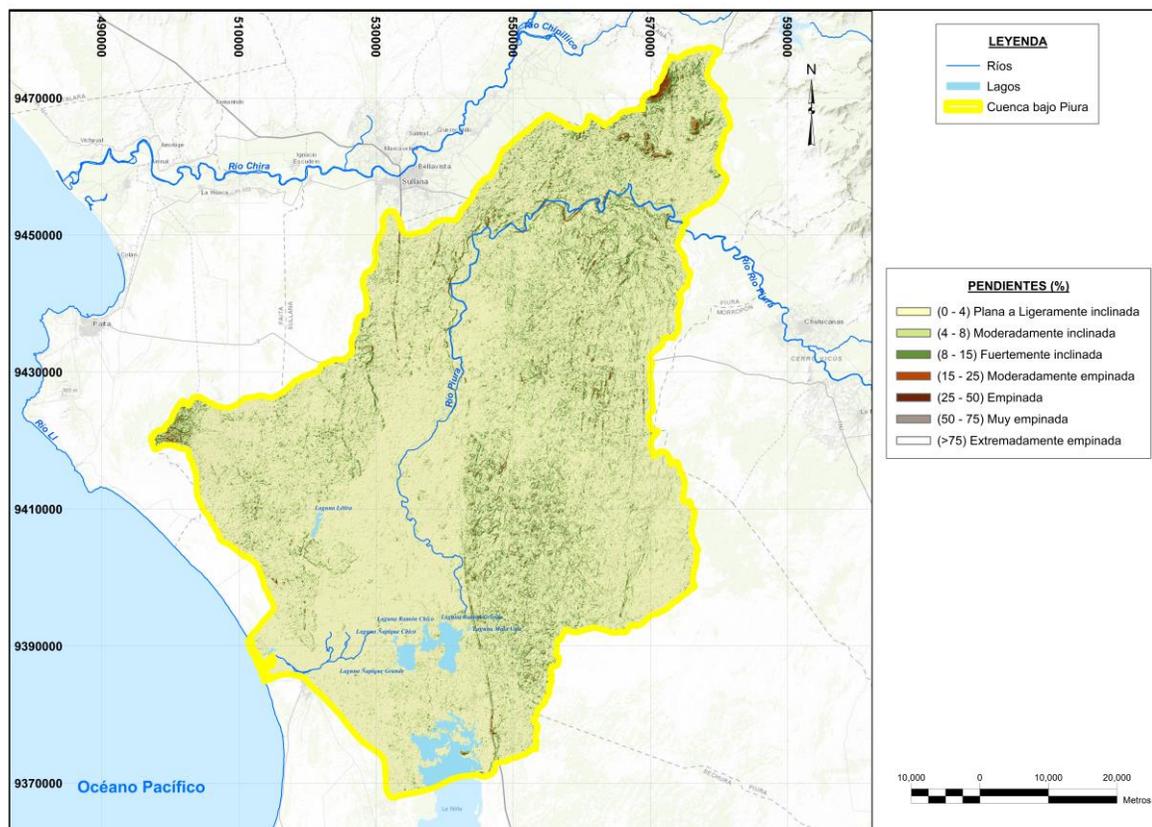
Clase	Rango (%)	Descripción
A	0 - 4	Plana a Ligeramente inclinada
B	4 - 8	Moderadamente inclinada

Clase	Rango (%)	Descripción
C	8 - 15	Fuertemente inclinada
D	15 - 25	Moderadamente empinada
E	25 - 50	Empinada
F	50 - 75	Muy empinada
G	>75	Extremadamente empinada

Fuente: D.S. 017-2009-AG.

Así como también se presentan de manera visual las pendientes del área de estudio en la **Figura 21**.

Figura 21. Pendientes de la cuenca Bajo Piura.



4.1.2.3 Fisiografía

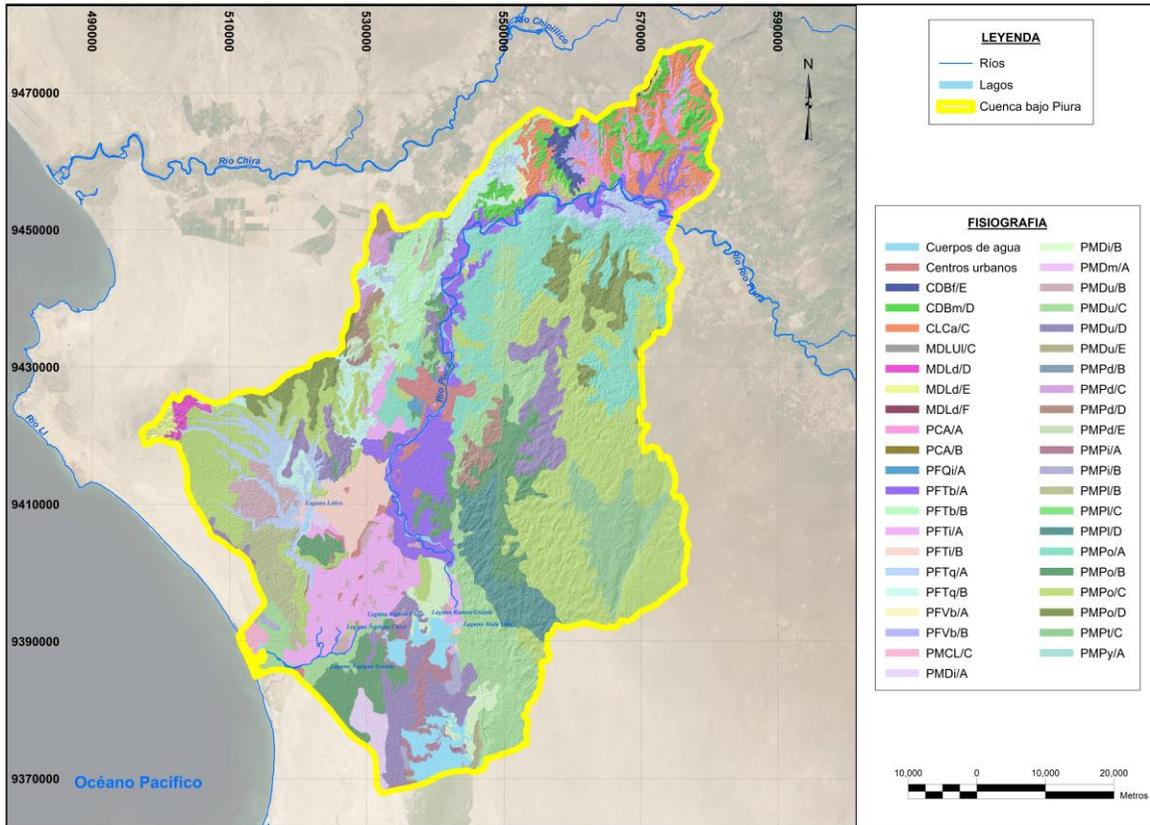
En el área de estudio se identificaron 3 grandes paisajes: Planicies, Colinas y Montañas, que se encuentran bien diferenciados por su relieve, sus procesos de formación y litología. Estos grandes paisajes se encuentran subdivididos en paisajes, subpaisajes y elementos del paisaje, los cuales se presentan en la **Tabla 6** y en la **Figura 22**.

Tabla 6. Unidades fisiográficas de la cuenca Bajo Piura.

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Gran Paisaje	Paisaje	Subpaisaje	Elementos del Paisaje	Símbolo	
Planicie	Aluvial - Marino	Terraza de Inundación	Depresiones planas a ligeramente inclinada	PMDi/A	
			Depresiones moderadamente inclinadas	PMDi/B	
	Coluvio - Aluvial	Abanico		Abanico Aluvial plana a ligeramente inclinada	PCA/A
				Abanico Aluvial moderadamente inclinada	PCA/B
		Llanura amplia de deyección		Llanura disectada moderadamente inclinada	PMPd/B
				Llanura disectada fuertemente inclinada	PMPd/C
				Llanura disectada moderadamente empinadas	PMPd/D
				Llanura disectada empinada	PMPd/E
				Llanura Inundable plana a ligeramente inclinada	PMPi/A
				Llanura Inundable moderadamente inclinada	PMPi/B
				Llanura ondulada plana a ligeramente inclinada	PMPo/A
				Llanura ondulada moderadamente inclinada	PMPo/B
				Llanura ondulada fuertemente inclinada	PMPo/C
				Llanura ondulada moderadamente empinadas	PMPo/D
	Eólico	Depósitos eólicos (Dunas y Barcanas)		Depósitos eólicos, moderadamente inclinados	PMDu/B
				Depósitos eólicos, fuertemente inclinados	PMDu/C
				Depósitos eólicos, moderadamente empinados	PMDu/D
				Depósitos eólicos, empinados	PMDu/E
	Fluvial	Valle Amplio (Terrazas)		Valle irrigado, plano a ligeramente inclinada	PFTb/A
				Valle irrigado, moderadamente inclinada	PFTb/B
				Valle inundable, plano a ligeramente inclinada	PFTi/A
				Valle inundable, moderadamente inclinada	PFTi/B
		Valle estrecho (Quebrada)		Fondo de Quebrada Estacional, plana a ligeramente inclinada	PFTq/A
				Fondo de Quebrada Estacional, moderadamente inclinada	PFTq/B
				Quebrada Inundable, plana a ligeramente inclinada	PFQi/A
				Vallecito costero	PFVb/A
	Marino	Playa		Sistema de Interfase Marina (Manglar)	PMDm/A
				Cordón Litoral fuertemente inclinada	PMCL/C
		Terraza Lobitos		Playas Recientes plana a ligeramente inclinada	PMPy/A
				Tablazo Lobitos moderadamente inclinada	PMPI/B
				Tablazo Lobitos fuertemente inclinada	PMPI/C
				Tablazo Lobitos moderadamente empinadas	PMPI/D
	Terraza Talara		Tablazo Talara fuertemente inclinada	PMPt/C	
Colinoso	Colinas Costeras	Laderas de Colinas bajas	Laderas de Colinas empinadas	CDBf/E	
	Lomadas Costeras	Lomadas de cima amplia	Laderas de Colinas moderadamente empinadas	CDBm/D	
Montañoso	Montañas Denuclacionales subhúmedas	Laderas de Montañas Semicálidas a Templadas	Cimas de Lomadas fuertemente inclinadas	CLCa/C	
	Montañas Costeras	Laderas de Montañas cálidas	Laderas de Montaña costera moderadamente empinadas	MDLd/D	
			Laderas de Montaña costera empinadas	MDLd/E	
			Laderas de Montaña costera muy empinadas	MDLd/F	

Figura 22. Unidades fisiográficas de cuenca Bajo Piura.



4.1.2.4 Climatología

De acuerdo con el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (2013), el área de estudio por encontrarse al sur de la línea ecuatorial debería ser del tipo tropical, es decir, cálido, húmedo, boscoso y de alta precipitación pluvial; sin embargo, la presencia de la cordillera andina y las corrientes marina de Humboldt y del Niño, le dan una característica diferente, haciéndolo subártico tropical, cálido y húmedo, con bajos mantos de nubosidad y fina precipitación pluvial o garúa en invierno”.

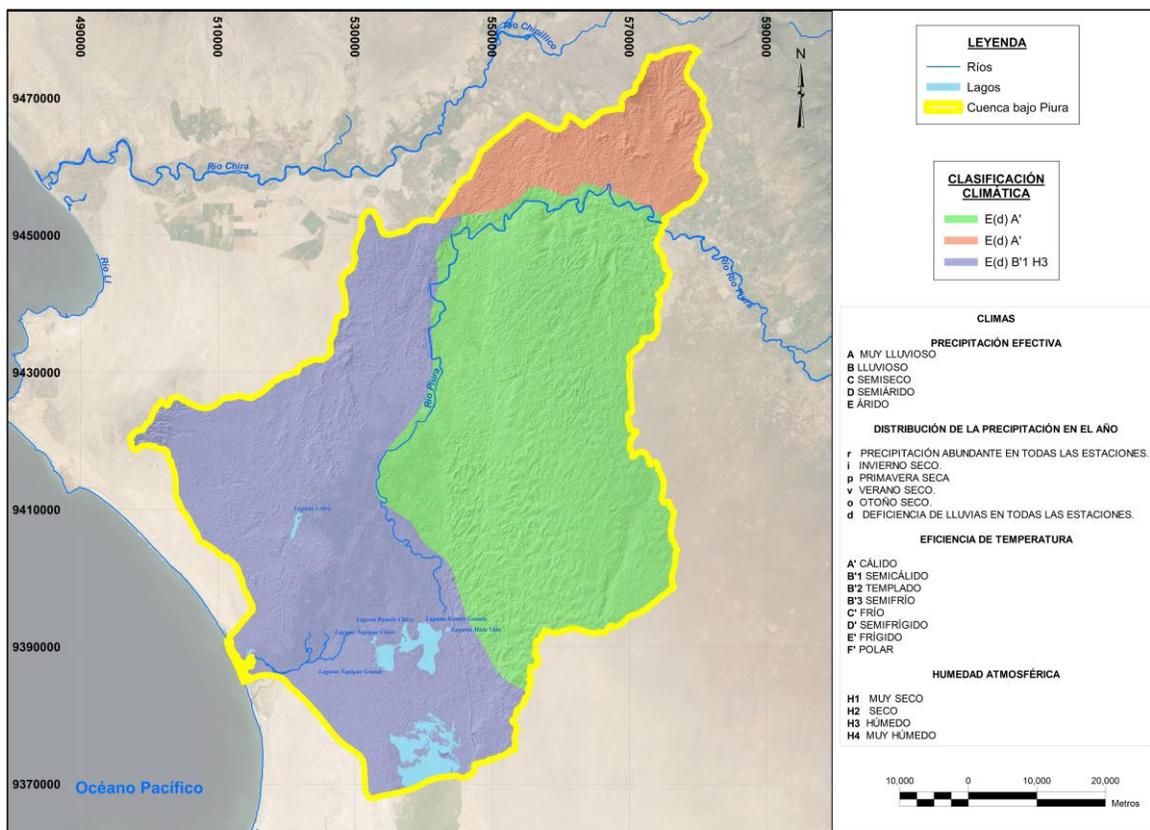
Asimismo, nuestra zona de estudio de acuerdo con el “Mapa de clasificación climática estimado por el método de Thornthwaite (SENAMHI, 2010)”, se encuentra comprendida entre los siguientes climas (ver **Tabla 7 y Figura 23**):

Tabla 7. Unidades de clasificación climática de cuenca Bajo Piura.

Climas	Descripción
E(d) A' H3	Árido, deficiencia de lluvias en todas las estaciones, cálido, húmedo.
E(d) A' H2	Árido, deficiencia de lluvias en todas las estaciones, cálido, seco.
E(d) B'1 H3	Árido, deficiencia de lluvias en todas las estaciones, semicálido, húmedo.

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Figura 23. Clasificación climática de la cuenca Bajo Piura.



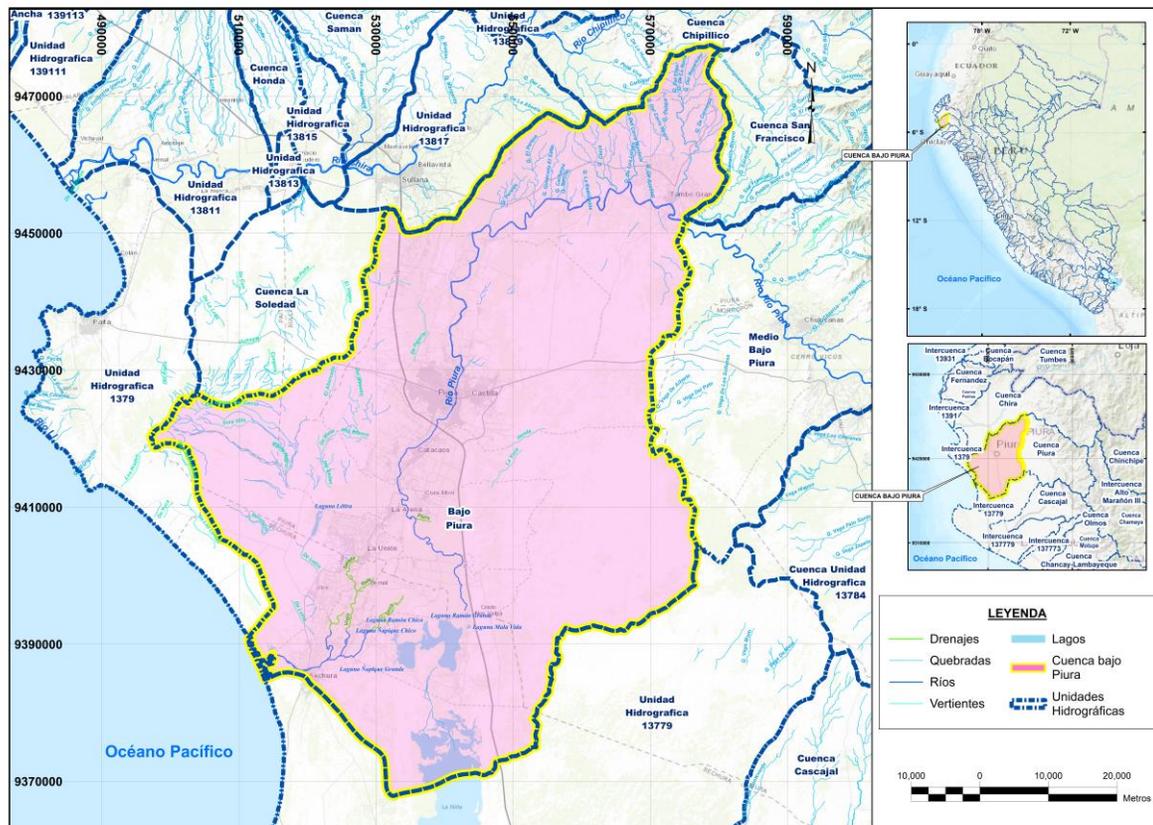
4.1.2.5 Hidrografía

De acuerdo con MIDAGRI (2015), la cuenca Bajo Piura pertenece a la cuenca hidrográfica del río Piura. El río Piura nace a 3 600 m.s.n.m., en la divisoria de la cuenca del río Huancabamba, donde inicia su recorrido, teniendo una dirección de sur a norte, con curvatura desde la quebrada San

Francisco hasta la caída de Curumuy, luego en dirección suroeste llega hasta la desembocadura con el océano Pacífico, a través del estuario de Virrilá.

La ubicación hidrográfica de la cuenca Bajo Piura se muestra en la **Figura 24**.

Figura 24. Cuenca Bajo Piura.



4.1.3 Medio Social

El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), ejecutó los “Censos Nacionales 2017: de XII Población, VII Vivienda y III Comunidades Indígenas”, obteniéndose información actualizada sobre distribución y composición de la población, así como las características respectivas de los hogares de la población urbana y rural de la región de Piura. Estos resultados son comparados con los del censo previo realizado en el 2007 y los resultados se muestran continuación:

4.1.3.1 Población

En la **Tabla 8** se muestran los resultados obtenidos para la población de la región Piura donde se puede observar claramente un aumento en la población urbana y una disminución en la rural.

Tabla 8. Población del departamento Piura (censo: 2007 – 2017).

Año	Total	Población		Variación Intercensal		Tasa de crecimiento promedio anual	
		Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
2007	1 676 315	1 223 611	452 704				
				248 222	-67 728	1,9	-1,6
2017	1 856 809	1 471 833	384 976				

Fuente: INEI - Censos Nacionales de XII Población, VII Vivienda y III Comunidades Indígenas 2017.

En cuanto a la distribución de la población en las provincias de la región Piura, la provincia de Piura sigue siendo la más poblada de la región, los resultados se muestran en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Tasa de crecimiento promedio anual (censo: 2007 – 2017).

Provincia	2007		2017		Variación intercensal 2007-2017		Tasa de crecimiento promedio anual
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%	
Total	1 676 315	100,0	1 856 809	100,0	180 494	10,8	1,0
Piura	665 991	39,7	799 321	43,0	133 330	20,0	1,8
Ayabaca	138 403	8,3	119 287	6,4	-19 116	-13,8	-1,5
Huancabamba	124 298	7,4	111 501	6,0	-12 797	-10,3	-1,1
Morropón	159 693	9,5	162 027	8,7	2 334	1,5	0,1
Paíta	108 535	6,5	129 892	7,0	21 357	19,7	1,8
Sullana	287 680	17,2	311 454	16,8	23 774	8,3	0,8
Talara	129 396	7,7	144 150	7,8	14 754	11,4	1,1
Sechura	62 319	3,7	79 177	4,3	16 858	27,1	2,4

Fuente: INEI - Censos Nacionales de XII Población, VII Vivienda y III Comunidades Indígenas 2017.

4.1.3.2 Vivienda

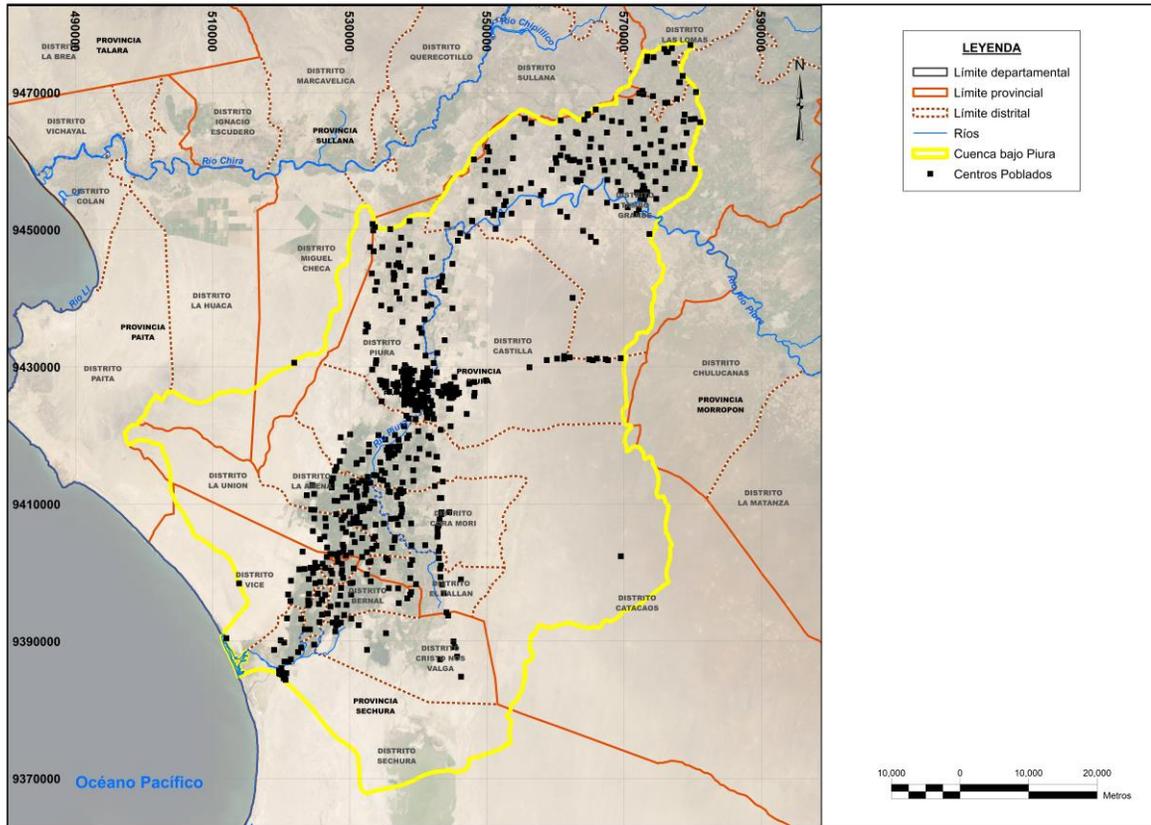
En la **Tabla 10** se muestran los resultados obtenidos para las viviendas presentes en la región Piura, tanto en el aspecto urbano como rural se pudo apreciar un incremento anual en las casas independientes.

Tabla 10. Tipo de viviendas (censo: 2007 – 2017).

Área urbana y rural/tipo de vivienda	2007		2017		Variación intercensal 2007-2017		Incremento anual	Tasa de crecimiento promedio anual
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%		
Urbana	394 241	100,0	433 801	100,0	142 526	48,9	14 253	4,1
Casa independiente	281 279	96,6	419 685	96,7	138 406	49,2	13 841	4,1
Departamento en edificio	3 663	1,3	7 317	1,7	3 654	99,8	365	7,2
Vivienda en quinta	621	0,2	513	0,1	-108	-17,4	-11	-1,9
Vivienda en casa de vecindad	689	0,2	591	0,1	-98	-14,2	-10	-1,5
Vivienda improvisada	4 739	1,6	5 461	1,3	722	15,2	72	1,4
Local no destinado para habitación humana	233	0,1	234	0,1	1	0,4	0	0,0
Otro tipo	51	0,0	-	-	-51	-100,0	-5	-100,0
Rural	117 144	100,0	124 301	100,0	7 157	6,1	716	0,6
Casa independiente	112 962	96,5	122 573	98,7	9 611	8,5	961	0,8
Vivienda en quinta	17	0,0	10	0,0	-7	-41,2	-1	-5,2
Vivienda en casa de vecindad	3	0,0	9	0,0	6	200,0	1	11,6
Chozas o cabañas	4 098	3,5	1 650	1,3	-2 448	-59,7	-245	-8,7
Vivienda improvisada	16	0,0	12	0,0	-4	-25,0	0	-2,8
Local no destinado para habitación humana	40	0,0	47	0,0	7	17,5	1	1,6
Otro tipo	8	0,0	-	-	-8	-100,0	-1	-100,0

Fuente: INEI - Censos Nacionales de XII Población, VII Vivienda y III Comunidades Indígenas 2017.

Figura 25. Centros poblados en la cuenca Bajo Piura.



4.1.3.3 Educación

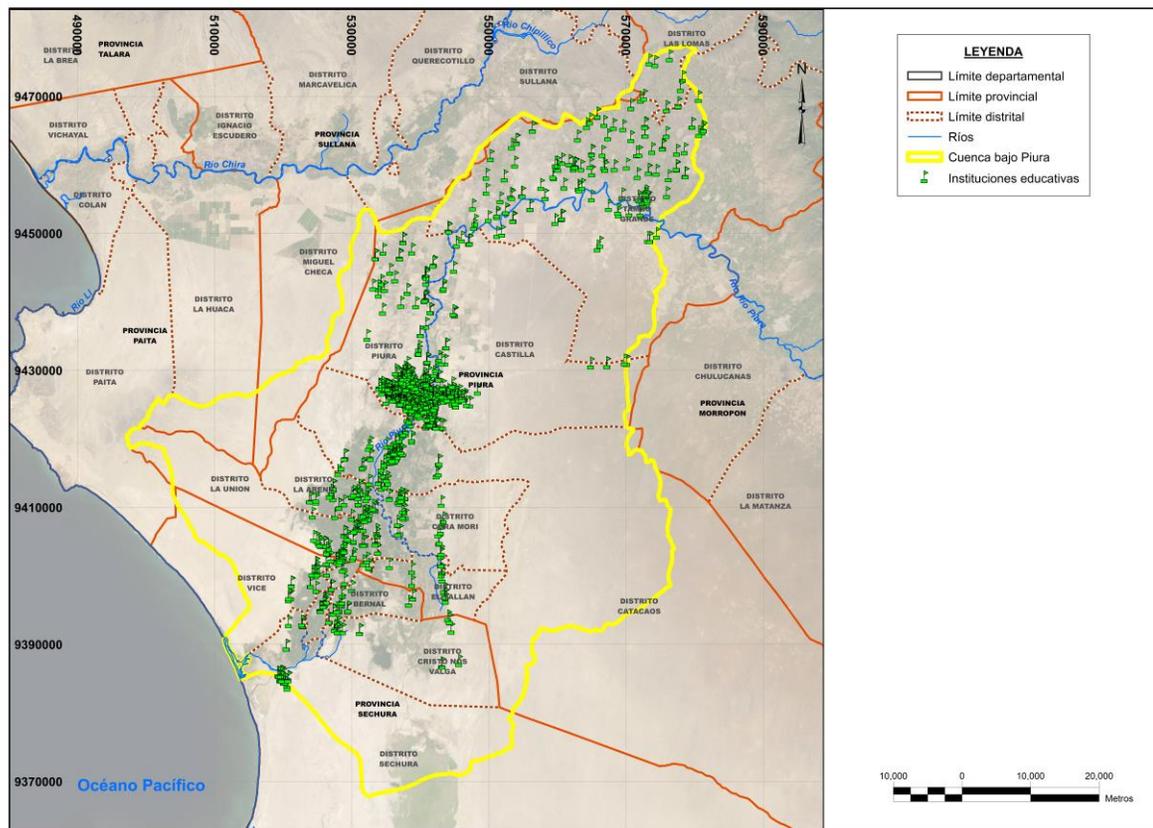
Los servicios educativos que se distribuyen espacialmente en el área de estudio son un total de 1 209 instituciones, entre estas se encuentran los tipos de educación: básica regular, alternativa y especial; superior no universitario y técnico productivo. En el tipo de gestión: pública y privada, la distribución de estos servicios se muestra en la **Tabla 11** y **Figura 26**.

Tabla 11. Distribución de las instituciones educativas en el área de estudio.

Provincia	Distrito	IIEE
Piura	Castilla	194
Piura	Catacaos	88
Piura	Cura Mori	31
Piura	El Tallan	19
Piura	La Arena	57

Provincia	Distrito	IIEE
Piura	La Unión	53
Piura	Las Lomas	10
Piura	Piura	506
Piura	Tambo Grande	147
Sechura	Bellavista De La Unión	6
Sechura	Bernal	20
Sechura	Cristo Nos Valga	14
Sechura	Rinconada Llicuar	10
Sechura	Sechura	31
Sechura	Vice	22
Sullana	Sullana	1
Total		1209

Figura 26. Instituciones educativas en la cuenca Bajo Piura.



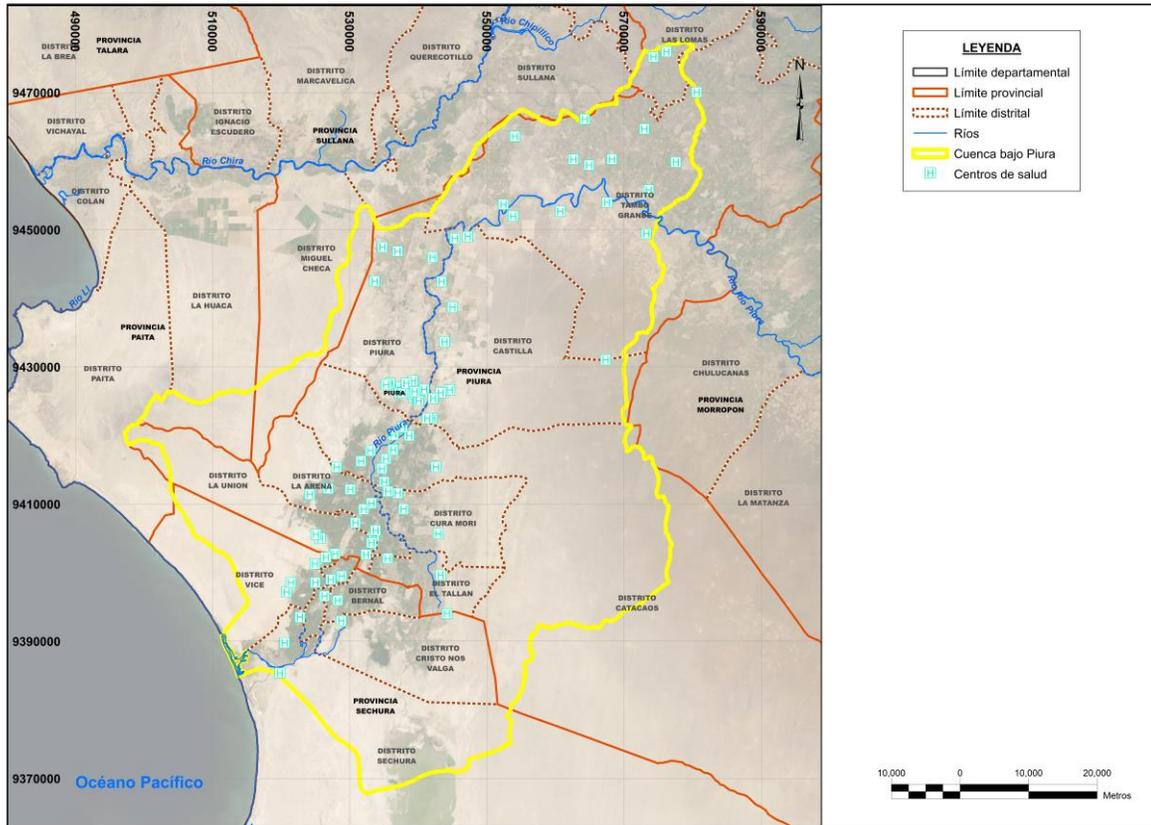
4.1.3.4 Salud

Los servicios de salud ubicados en el área de estudio son un total de 98; entre los cuales tendremos diferenciados por el nivel de categorías de establecimientos: **categoría I-1**, Puesto de salud, posta de salud o consultorio con profesionales de salud no médicos; **categoría I-2**, Puesto de salud o posta de salud (con médico); **categoría I-3** corresponde a los centros de salud, centros médicos, centros especializados y policlínicos, los resultados se muestran en la **Tabla 12 y Figura 27**.

Tabla 12. Distribución de las instituciones de salud en el área de estudio.

Provincia	Distrito	I-1	I-2	I-3	I-4	II-2	SAMU	Total IISS
Piura	Castilla	4	2	4	1		4	15
Piura	Catacaos	3	8	1	1			13
Piura	Cura Mori	1	2	1				4
Piura	El Tallan		2					2
Piura	La Arena	4	3	1				8
Piura	La Unión	3	1		1			5
Piura	Las Lomas	4						4
Piura	Piura		3	5	5	1		14
Piura	Tambo Grande	8	5	1	1			15
Sechura	Bellavista De La Unión		1	1				2
Sechura	Bernal				1			1
Sechura	Cristo Nos Valga	1	1					2
Sechura	Rinconada Llicuar		1					1
Sechura	Sechura	2		2	1			5
Sechura	Vice	2	2	1				5
Sullana	Sullana		2					2
Total		32	33	17	11	1	4	98

Figura 27. Instituciones de salud en cuenca Bajo Piura.



4.1.4 Medio Económico

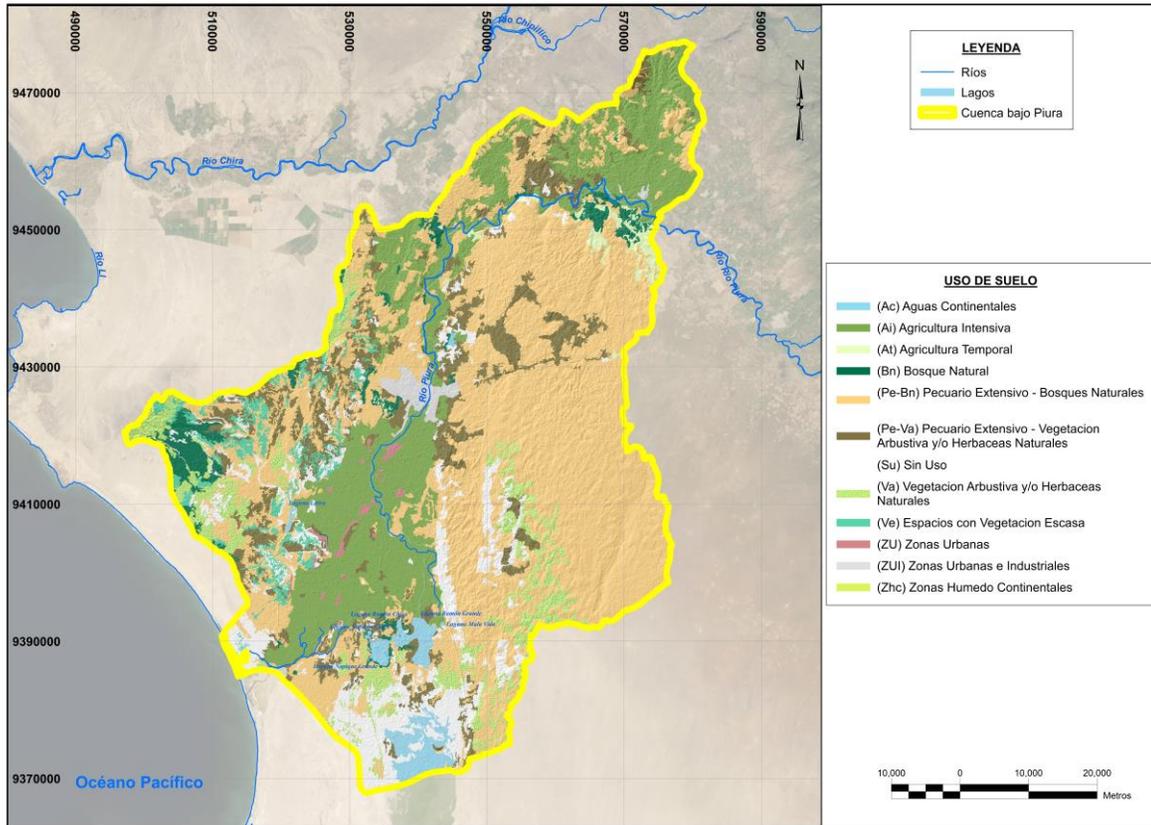
4.1.4.1 Uso de suelo

El estudio del uso de suelo permite identificar y cartografiar las actividades socioeconómicas desarrolladas en un ámbito de estudio, en la cual la información es referente a actividades agrícolas, pecuarias, forestales, mineras, áreas naturales, áreas sin uso, y otras. En la **Tabla 13** y **Figura 28**, se presentan las unidades correspondientes al uso de suelo en nuestra zona de interés, clasificados desde la cartografía de la Zonificación Económica y Ecológica de la región Piura, los cuales son mencionados a continuación:

Tabla 13. Unidades correspondientes al uso de suelo en el área de estudio.

Tipo	Unidad	Símbolo	Ha	Porcentaje (%)
Zonas agrícolas y pecuarias	Agricultura Intensiva	Ai	98 460,74	20,74
	Agricultura Temporal	At	4 829,21	1,02
	Pecuario Extensivo - Bosques Naturales	Pe-Bn	219 364,76	46,21
	Pecuario Extensivo - Vegetación Arbustiva y/o Herbáceas Naturales	Pe-Va	46 945,59	9,89
Zonas forestales, Vegetación Natural y espacios abiertos	Bosque Natural	Bn	13 170,78	2,77
	Espacios con Vegetación Escasa	Ve	12 161,42	2,56
	Sin Uso	Su	41 157,81	8,67
	Vegetación Arbustiva y/o Herbáceas Naturales	Va	27 268,13	5,74
Zonas Urbanas e Industriales	Zonas Urbanas	ZU	1 911,62	0,4
	Zonas Urbanas e Industriales	ZUI	4 479,02	0,94
Zonas húmedas	Zonas Húmedo Continentales	Zhc	2 590,43	0,55
Superficies de Agua	Aguas Continentales	Ac	2 327,63	0,49

Figura 28. Unidades de uso de suelo en cuenca Bajo Piura.

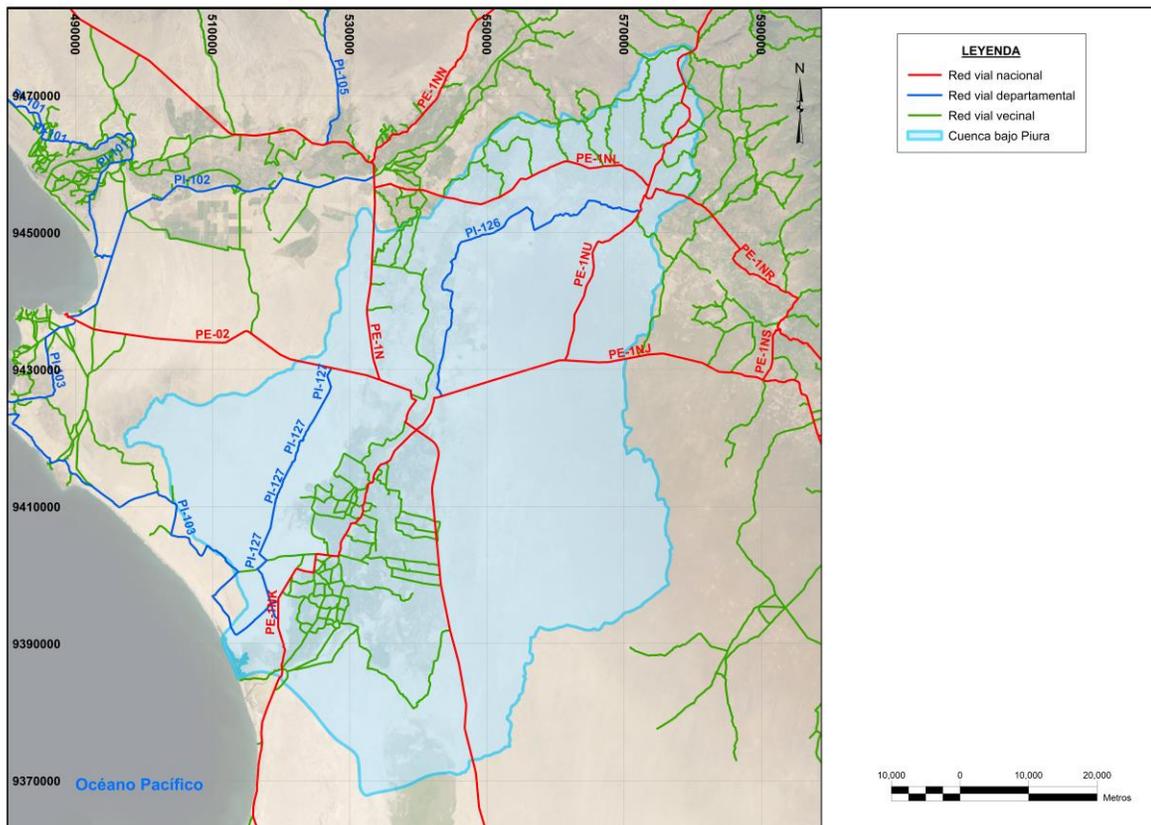


Es importante mencionar que la unidad “Pecuario Extensivo – Bosque Naturales” tal y como se puede apreciar en la **Tabla 13**, es la unidad de mayor emplazamiento sobre el área de estudio, en la cual se puede observar la presencia de bosques, que en ocasiones son quemados con fines ganaderos, donde prima principalmente el ganado vacuno, seguido por el ganado caprino. Asimismo, la unidad “Agricultura Intensiva” es la segunda unidad de mayor extensión en el área, dónde el cultivo predominante es el arroz, seguido por el maíz y el plátano. De acuerdo con José Otivo (2010) en la región Piura la población económicamente activa que se dedica a la actividad agropecuaria y actividades extractivas de los bosques puede llegar a representar un 30 % de su totalidad.

4.1.4.2 Vías de acceso

Las vías de acceso del área de estudio fueron consideradas en base al sistema nacional de carreteras (SINAC) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones; en la que se analizó la jerarquización vial agrupadas en 3 tipos de redes viales: nacional, departamental y vecinal. (Ver **Figura 29**)

Figura 29. Vías de acceso en la cuenca Bajo Piura.



Red vial nacional

Las vías nacionales son las carreteras conformadas por ejes de tipo longitudinal y transversal de interés nacional, siendo estas bases receptoras de la vías departamentales y vías vecinales o rurales; las carreteras de tipo nacional que se encuentran dentro del área de estudio son 7, mencionadas a continuación en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Vías nacionales pertenecientes al área de estudio.

N°	Ruta	Trayectoria
1	PE-02	Emp. PE-1N (Dv. Paita) - Paita
2	PE-1N	I.V. Santa Anita - I.V. Huacho - Chimbote - Ov. La Marina (PE-10 A) - Ov. El Milagro - Paiján - Mocupe - Reque - Chiclayo - Lambayeque - Pte. Grau - Pte. Sullana Dv. Talara - Máncora - Zorritos - Tumbes - Pte. Internacional de La Paz (fr. Ecuador).
3	PE-1NJ	Emp. PE-1N (Dv. Mochumí) - Mochumí - Illimo - Pte. La Leche - Pte. Salas - Pte. Anchovira - Pte. Chicoma - Pte. Motupe - Motupe - Dv. Jaén (PE-04 B) - Pte. Olmos – Olmos - Pte. Cascajal - Insculas - Pte. Insculas - Las Animas - Dv. Huancabamba (PE-0)
4	PE-1NK	Emp. PE-1N (Dv. Catacaos) - Catacaos - Pte. Independencia - Pte. Independencia - La Arena - Vice - Sechura - Pte. Virrila - Emp. PE-04 (Dv. Bayovar)
5	PE-1NL	Emp. PE-1N (Dv. Pte. Macará) - Dv. Tambo Grande - Pte. Las Lomas - Las Lomas - Dv. Suyo - Pte. Suyo - Dv. Surpampa (PE-1N M) - Dv. La Tina (PE-1N M) - Pte. Macará (frontera con Ecuador)
6	PE-1NR	Emp. PE-1N L (Dv. Tambogrande) - Tambogrande - Platillos - Paccha - Chulucanas - Morropon - Paltashaco - Chalaco - Pacaipampa - Emp. PE-3N (Curilcas)
7	PE-1NU	Emp. PE-1N J (El Veintiuno) - La Loma - Emp. PI-107 (Tambo Grande).

Red vial departamental

Las vías departamentales son conocidas también como vías regionales, estas son carreteras delimitadas por el ámbito de un gobierno regional, que se encuentra articulando la red vial nacional y la red vial vecinal, las carreteras de tipo departamental que se encuentran dentro del área de estudio son 3, mencionadas a continuación en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Vías departamentales pertenecientes al área de estudio.

N°	Ruta	Trayectoria
1	PI-103	Emp. PE-02 (Dv. Paita) - La Islilla - La Tortuga - La Casita - San Pablo - San Pedro - Emp. PE-1N K (Dv. Sechura).
2	PI-126	Emp. PE-1N (Piura) - Sta. Ana - Tambo Grande
3	PI-127	Emp. PE-02 (Dv. Piura) - Emp. PE-1N K (Dv. Vice).

Red vial vecinal

Las vías vecinales o rurales se encuentran delimitadas al ámbito local, que se encuentran articulando capitales provinciales con capitales distritales, con centros poblados o con las redes

nacionales y departamentales o regional; las vías vecinales dentro del área de estudio son 89, mencionadas a continuación en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Vías vecinales pertenecientes al área de estudio.

Rutas Vecinales							
PI-609	PI-762	PI-992	PI-1016	PI-1028	PI-1040	PI-1052	PI-1064
PI-610	PI-763	PI-993	PI-1017	PI-1029	PI-1041	PI-1053	PI-1065
PI-611	PI-764	PI-1000	PI-1018	PI-1030	PI-1042	PI-1054	PI-1066
PI-612	PI-765	PI-1007	PI-1019	PI-1031	PI-1043	PI-1055	PI-1067
PI-613	PI-766	PI-1008	PI-1020	PI-1032	PI-1044	PI-1056	PI-1068
PI-614	PI-980	PI-1009	PI-1021	PI-1033	PI-1045	PI-1057	
PI-615	PI-984	PI-1010	PI-1022	PI-1034	PI-1046	PI-1058	
PI-616	PI-985	PI-1011	PI-1023	PI-1035	PI-1047	PI-1059	
PI-617	PI-986	PI-1012	PI-1024	PI-1036	PI-1048	PI-1060	
PI-618	PI-987	PI-1013	PI-1025	PI-1037	PI-1049	PI-1061	
PI-619	PI-990	PI-1014	PI-1026	PI-1038	PI-1050	PI-1062	
PI-620	PI-991	PI-1015	PI-1027	PI-1039	PI-1051	PI-1063	

4.2 Diseño de la investigación

La presente investigación se encuentra categorizada de la siguiente manera: tipo básica, nivel de carácter descriptivo, enfoque cuantitativo, y bajo un diseño no experimental correlacional (Ñaupas, Valdivia, Palacios y Romero, 2018). A continuación, se describe detalladamente lo mencionado:

4.2.1 Tipo

La presente investigación corresponde al tipo básica, debido a que el presente estudio pretende mejorar la comprensión de las teorías científicas, buscando ampliar la información y comprensión al objeto de estudio, siendo la base para una investigación tecnológica.

4.2.2 Nivel

El nivel de investigación del presente estudio es de carácter descriptivo. Se considera descriptivo porque está basado en la recopilación y manejo de datos relacionados con las inundaciones, que tienen como finalidad validar o no validar, las hipótesis planteadas en la presente investigación.

4.2.3 Enfoque

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, puesto que se caracteriza por cartografiar las áreas inundadas, las cuales serán medidas y posteriormente serán cuantificados los impactos ocasionados sobre los medios sociales y económicos. Además, se realizarán los respectivos análisis estadísticos de los datos mencionados anteriormente, como también se realizará el análisis de la efectividad del método *K-Means Clustering*, el cual servirá como sustento para nuestras hipótesis.

4.2.4 Diseño

El presente estudio se desarrollará bajo un diseño no experimental, específicamente bajo el diseño de una investigación correlacional. Este diseño se caracteriza cuando se quiere establecer el grado de correlación o de asociación entre una variable (X) y otra variable (Z). La representación simbólica del diseño mencionado es el siguiente:

$$\begin{array}{ccc} & & O_x \\ & & | \\ M & & r \\ & & | \\ & & O_z \end{array}$$

Donde:

M = Grupo o muestra.

r = Coeficiente de correlación entre las dos variables.

$O_x - O_y$ = Medición de la variable dependiente X y Z respectivamente.

4.3 Población y Muestra

4.3.1 Población

La población es considerada al conjunto de elementos o sujetos, que cuentan con características semejantes y medibles, las cuales son requeridas para la investigación. (Ñaupas, Valdivia, Palacios y Romero, 2018).

En base a lo mencionado, en la presente investigación la población está considerada por el conjunto de cuencas hidrográficas donde se hayan manifestado eventos de inundación ocasionados por el fenómeno El Niño, cuencas que a su vez cuenten con información espacial y satelital (como imágenes SAR), para realizar un adecuado análisis en el aspecto socioeconómico.

4.3.2 Muestra

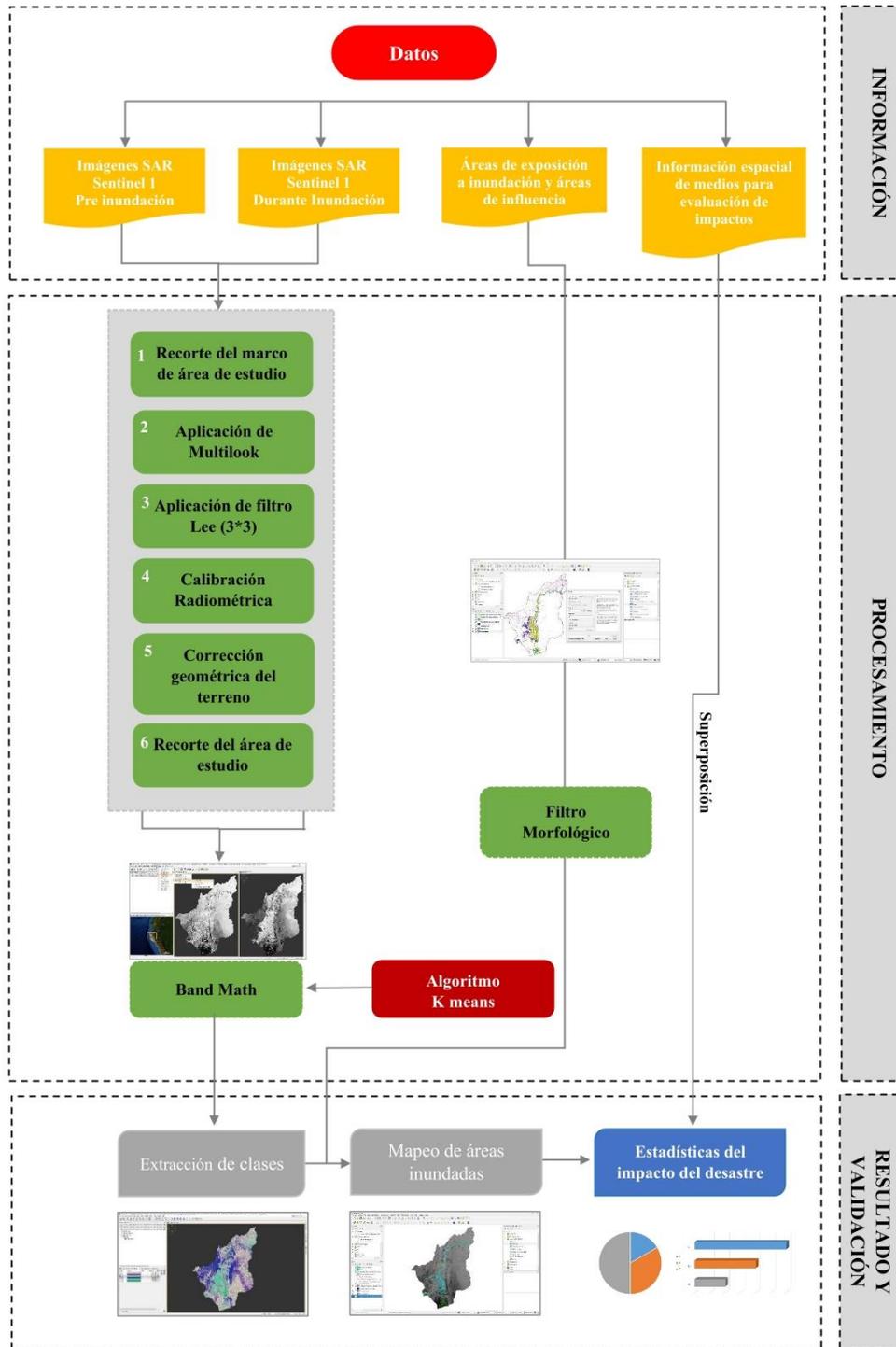
Es la consideración de un subgrupo de población, la cual reúne las características de un universo, por lo que se podría generalizar los resultados. (Ñaupas, Valdivia, Palacios y Romero, 2018).

La muestra de la investigación es la cuenca bajo Piura, de tipo No Probabilística.

4.4 Procedimiento

Los datos e instrumentos utilizados en esta investigación, son procesados mediante la metodología propuesta, la información espacial fue obtenida de plataformas de libre acceso, las cuales nos brindan imágenes satelitales de tipo óptico y radar; además de la información vectorial recopilada de la ZEE del departamento de Piura, obtenida de la plataforma digital del Ministerio de Ambiente, además de la información vectorial de instituciones de salud, instituciones educativas, centros poblados y vías de acceso, descargadas de las plataformas digitales de las instituciones competentes. El objetivo de esta metodología es mapear las áreas inundadas generadas por el fenómeno de El Niño, mediante el método *K-Means Clustering* para generar la estadística del impacto del desastre. (ver **Figura 30**)

Figura 30. Metodología de la Investigación.

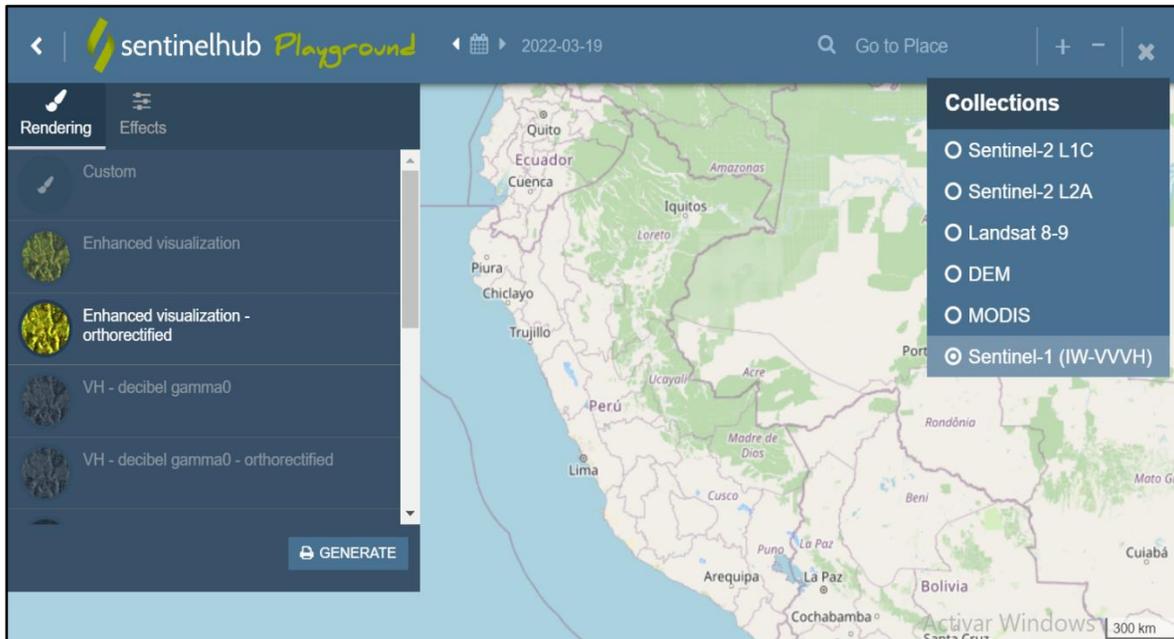


4.4.1 Recolección de la base de datos

Para la recopilación de imágenes satelitales, se procedió a realizar una pre-evaluación de las imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2 disponibles, comprendidas entre las etapas que competen al evento del fenómeno de El Niño Costero, es decir, se realizó una evaluación antes, durante y después del evento. En este procedimiento asistió a apreciar de manera simple y rápida las fechas en que las imágenes satelitales mostraban mayores impactos de inundaciones; además se confirmó la ventaja de las imágenes SAR (Sentinel-1) sobre las imágenes ópticas (Sentinel-2), debido a la capacidad de penetrar las nubes de la primera mencionada; es importante aclarar que esta pre-evaluación fue complementada con los datos meteorológicos ofrecidos por el SENAMHI, para seleccionar las imágenes satelitales en las fechas óptimas para una adecuada evaluación.

Para complementar la pre-evaluación, también se recurrió a la plataforma *Sentinelhub Playground*, la cual se puede acceder mediante el siguiente enlace: <http://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/> (ver **Figura 31**), plataforma que muestra a manera de visor toda la gama disponible de imágenes Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat 8-9, Modis y Modelos de elevación digital (Mapzen y Copernicus).

Figura 31. Plataforma *Sentinelhub Playground*.

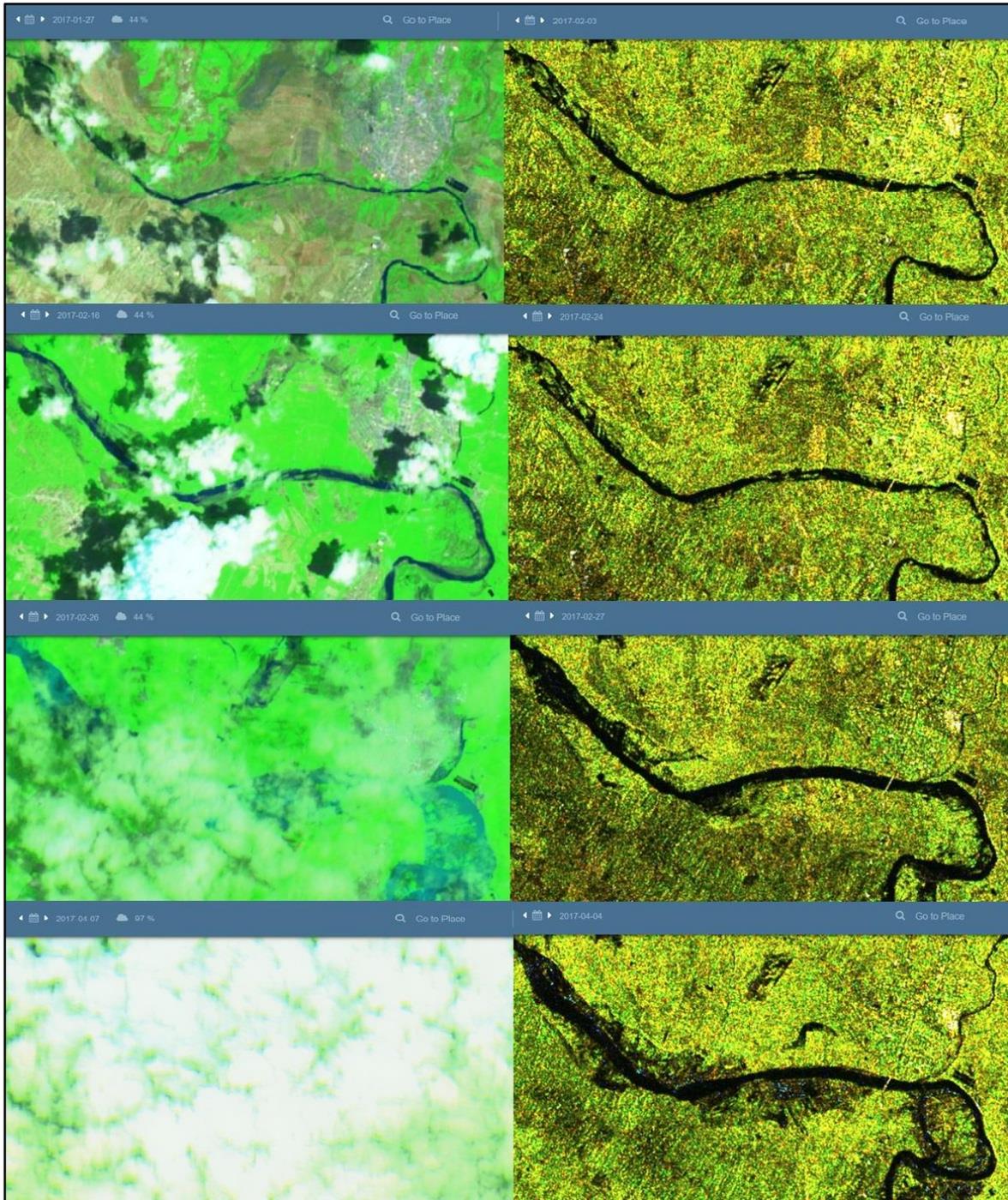


Fuente: *Sentinelhub Playground*

Las imágenes satelitales fueron evaluadas, considerándose el cauce del río bajo condiciones normales hasta el día 03/02/2017, es a partir de esta fecha que se empiezan a manifestar las condiciones meteorológicas anómalas que trajeron consigo el aumento del caudal del río, generando inundaciones en la cuenca Bajo Piura; es así que el día 26/02/2017 se pudo observar la primera pulsación de inundación en una imagen óptica, esta imagen presentaba condiciones meteorológicas no favorables, condiciones que no permitían observar adecuadamente la magnitud del evento; sin embargo para el día 27/02/2017 se puede presenciar adecuadamente el panorama de inundación mediante una imagen radar, es así que mediante esta observación del acontecimiento de inundaciones a través las imágenes satelitales brindadas por la plataforma *Sentinelhub Playground* se pudo determinar que el máximo impacto de la inundación se desarrolló el día 04/04/2017.

Asimismo, para poder representar de forma ilustrativa esta pre-evaluación de la dinámica de inundaciones en la cuenca Bajo Piura, se opta por mostrar en la **Figura 32**, una de las zonas más representativas en cuanto al ancho del cauce del río Piura a lo largo de la cuenca Bajo Piura, dicha zona se encuentra situada entre los poblados de Tambogrande y Locuto, es así que en el margen izquierdo de la **Figura 32** se presenta el río Piura captado a través de imágenes satelitales ópticas Sentinel-2 procesadas a un nivel 1C y con una combinación de bandas Red: B12, Green: B8A y Blue: B4; combinación que permite distinguir de manera simple los cuerpos de agua, mientras que en el margen derecho se muestran imágenes SAR Sentinel-1, debidamente ortorrectificadas en una visualización mejorada, para una mejor distinción de cuerpos de agua. En ambos márgenes de las imágenes satelitales se puede apreciar la dinámica de la inundación, desde su época seca en la parte superior, hasta el desarrollo del máximo impacto de la inundación en el margen inferior; además, la fecha de captación de cada imagen se puede apreciar en la esquina superior izquierda de cada imagen satelital.

Figura 32. Pre-evaluación de imágenes satelitales en la plataforma *Sentinelhub*.



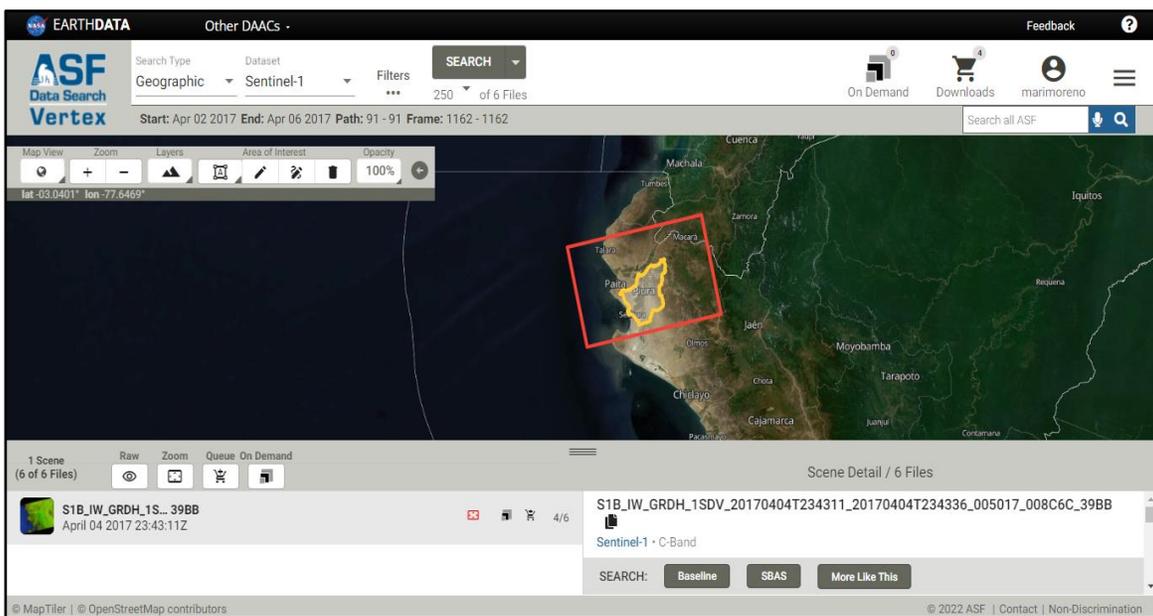
Fuente: *Sentinelhub Playground*.

De acuerdo con el análisis realizado a través de la dinámica de inundación, se consideró suficiente establecer dos fechas para poder evaluar los impactos ocasionados por el fenómeno El Niño, siendo estas fechas: antes del evento y durante del evento.

4.4.1.1 Imágenes SAR

Las imágenes SAR, se adquirieron a través de la plataforma de libre acceso *Alaska Satellite Facility*, a la cual se puede acceder mediante el siguiente enlace: <https://search.asf.alaska.edu>. En dicha plataforma se aplicaron los datos correspondientes en lo que respecta al tipo de imagen satelital, la importación del área de estudio y el rango de las fechas de interés; es así como nuestra área de estudio se encuentra compuesta por solo una escena de las imágenes satelitales Sentinel-1, tal y como se puede apreciar en la **Figura 33**. La plataforma nos brinda las imágenes satelitales en 2 formatos: **GRD**, imagen que se encuentra en el rango del suelo, el cual solo posee amplitud; y **SLC**, imagen que posee amplitud y fase, siendo una imagen más compleja, así como el procesamiento de esta; para la investigación se trabajó con imágenes en formato GRD.

Figura 33. Portal de descarga *ASF Data Search*.



Fuente: Alaska Satellite Facility.

Asimismo, las imágenes SAR presentan características que son muy importantes de considerar al momento de realizar estudios, ya que debe existir compatibilidad entre estas, fundamentalmente deben presentar compatibilidad en: polarización (a trabajar), dirección de vuelo y ángulo de incidencia. A pesar de ser ambas imágenes del mismo satélite, es importante realizar la revisión de estas características ya que estas presentan variaciones entre sí, entre las principales características de las imágenes empleadas destacan las presentadas en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Características de imágenes SAR.

Nombre Archivo	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170203T234311_20170203T234336004142_0072B4_3921	S1B_IW_GRDH_1SDV_20170404T234311_20170404T234336_005017_008C6C_39BB
Fecha y hora	03/02/2017 – 23:43:11 horas	04/04/2017 - 23:43:11 horas
Modo de adquisición	IW	IW
Polarización	VV+VH	VV+VH
Bandas	C	C
Dirección de vuelo	Ascendente	Ascendente
Tipo de producto	GRD	
Número de <i>looks</i> usados en el azimut	1	1
Número de <i>looks</i> usados en el rango	5	5
Resolución del píxel en el azimut y el rango	10	10
Ángulo de incidencia cercano	30.63986954149771	30.63401699066162
Ángulo de incidencia lejano	45.92195659266213	45.91870307922363
Tiempo de generación de la escena	00:00:24.999373	00:00:24.998154

4.4.1.2 Información del medio físico, social y económico

La información vectorial del área de estudio fue obtenida de la ZEE de Piura, descargada del geoservidor del Ministerio de Ambiente, la cual se encuentra a una escala de 1: 100 000, así como también la información de instituciones educativas y centros poblados que fueron descargadas del geoservidor del Ministerio de Educación - SIGMED, la información de instituciones de salud

obtenidos de la plataforma GeoPeru, siendo la plataforma digital de datos georreferenciados que integra la información de fuentes oficiales del estado y la información vectorial de vías de acceso, obtenidas de la página de Ministerio de Transportes y Comunicaciones en la que se encuentra disponible la descarga de datos en archivos *shapefile*.

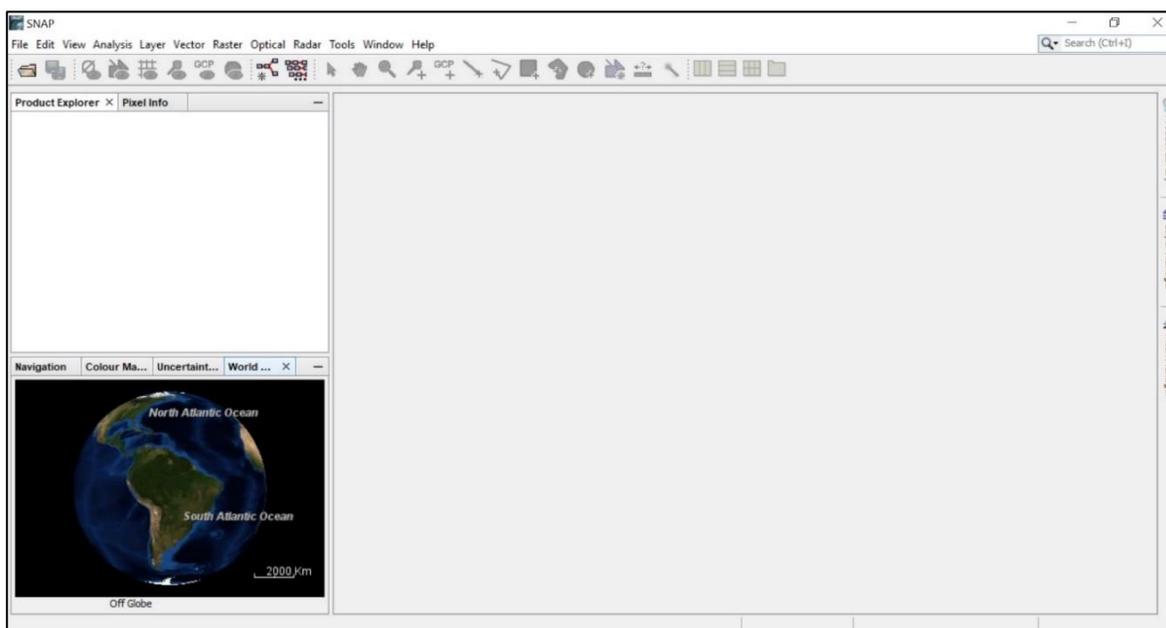
4.4.2 *Procesamiento de las imágenes SAR*

4.4.2.1 Software de procesamiento

El software de procesamiento en esta investigación es SNAP – *Sentinel Application Platform* de la ESA, es un programa de código abierto que permite: lectura, pre-procesamiento, análisis y visualización de imágenes de tipo SAR, el cual es compatible con las misiones ESA SAR: ERS 1 & 2, Envisat ASAR, Sentinel-1 y otras misiones; así como también permite el procesado y análisis de otras imágenes multibanda de Sentinel-2, Sentinel-3, Envisat, Landsat, MODIS o SPOT. El interfaz del software se muestra en la **Figura 34** y este se obtiene mediante el siguiente enlace:

<http://step.esa.int/main/download/>

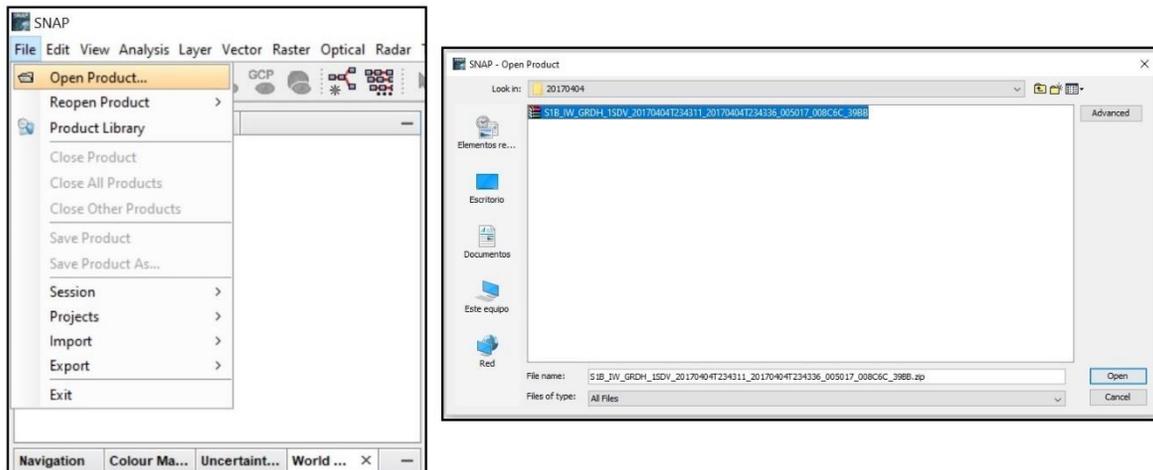
Figura 34. Software SNAP.



4.4.2.2 Importación de datos

El primer paso del pre-procesamiento fue la importación de las imágenes descargadas, empezamos pre-procesando la imagen SAR con fecha 04/04/2017 que refleja el evento de la inundación. En el caso de las imágenes SAR, el archivo descargado se encuentra en un formato comprimido de extensión ZIP y contiene la información de dicha imagen, la peculiaridad que nos ofrece el software SNAP, es la incorporación directa de este archivo, sin la necesidad de descomprimirlo (ver **Figura 35**).

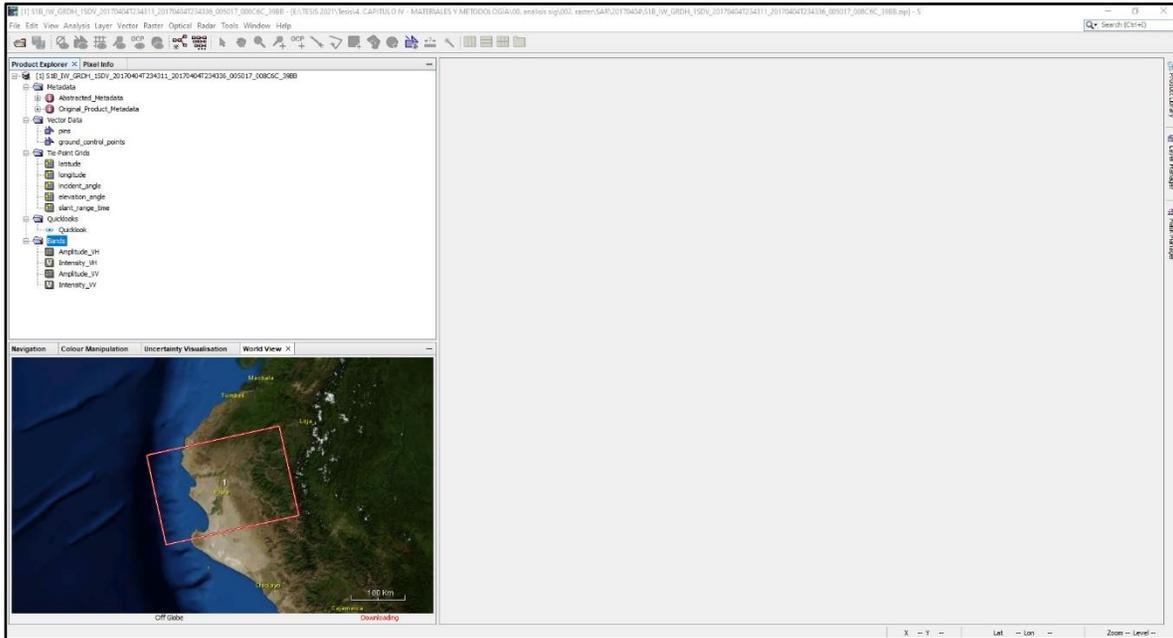
Figura 35. Importación de la imagen SAR.



Posteriormente realizada la importación del archivo de interés, este se pudo observar en la tabla de contenidos *Product Explorer*. La información proporcionada por una imagen SAR en formato GRD en el software SNAP es la siguiente: Metada, *Tie-Point Girds*, *Quicklooks* y *Bands*. Asimismo, se puede observar una carpeta *Vector Data*, pero esta no cuenta con información procedente de la imagen, sino más bien refleja un espacio para poder trabajar con archivos vectoriales en la plataforma del software. Finalmente, el software nos generó una vista aparentemente georreferenciada de la ubicación de los productos importados en la ventana *World*

View, sin embargo, lo que nos está mostrando en realidad es una orientación invertida, orientación en la cual la imagen fue adquirida (ver **Figura 36**).

Figura 36. Imagen SAR importadas.



En la exploración del producto se puede apreciar que las bandas de la imagen nos muestran su Amplitud e Intensidad, asimismo presentan polarización simple VV y cruzada VH. Es importante mencionar que el valor del píxel reflejado en las bandas corresponde a la potencia de la retrodispersión, asimismo, estas bandas son el resultado del procesamiento de las partes real (I) e imaginaria (Q) que ofrecen las imágenes radar en su nivel SLC. Las bandas mencionadas se encuentran representadas mediante la siguiente ecuación:

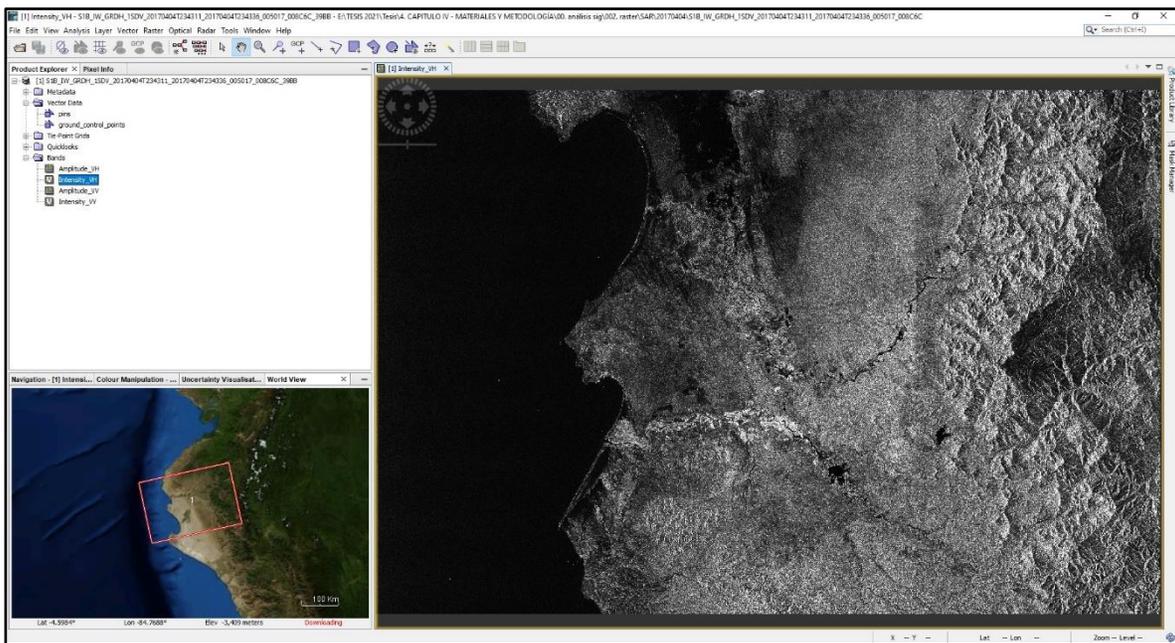
- Intensidad: $I^2 + Q^2$
- Amplitud: $(I^2 + Q^2)^{0,5}$

4.4.2.3 Generación de máscara

El siguiente paso, correspondió a realizar el corte de la imagen con respecto a nuestra área de estudio, que corresponde a la cuenca Bajo Piura, para ello hacemos una visualización de la banda

de intensidad de polarización cruzada “*Intensity VH*”, la cual se utilizará en la presente investigación para el mapeo de inundaciones, debido que esta banda al ser de polarización cruzada, refleja valores débiles para cuerpos lisos y pocos rugosos lo que la hace óptima para la detección de cuerpos de agua abierto (ver **Figura 37**).

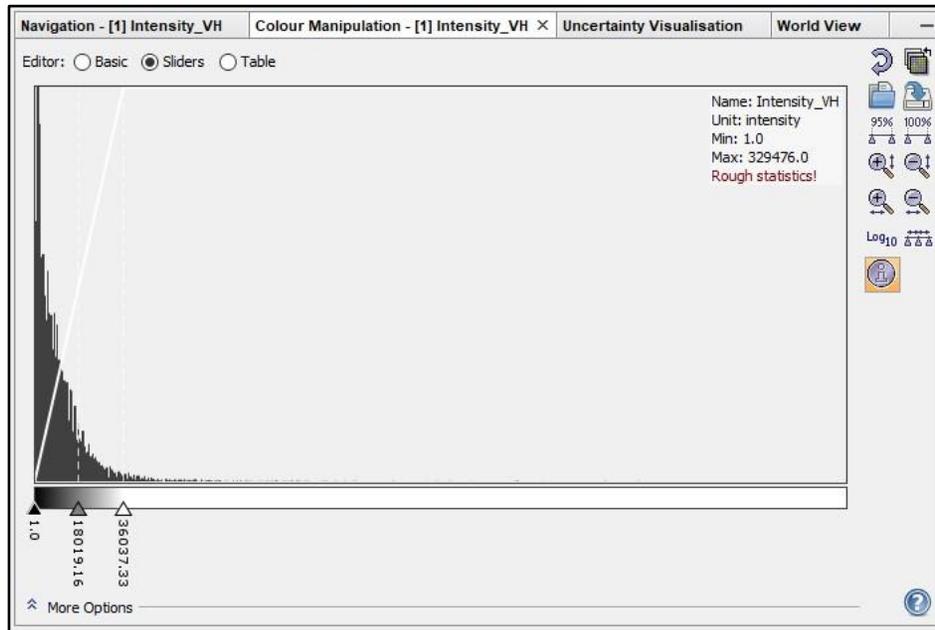
Figura 37. Visualización de la banda *Intensity VH*.



En la imagen radar se puede apreciar tonalidades que van desde un aspecto oscuro (negro) a un aspecto brillante (blanco), esta tonalidad depende de la potencia de retrodispersión del objeto o superficie, mientras más potencia de retrodispersión tenga el objeto se verá más brillante en la imagen, asimismo, la dependencia de la potencia de retrodispersión se encuentra detallada en la sección de Amplitud/Intensidad de la presente investigación. También, se puede apreciar en esta visualización la presencia del *speckle*. En cuanto a los valores de la banda de Intensidad estos van desde un mínimo de: 1 hasta un máximo de: 329 476, donde la paleta de colores va desde un color

negro para el valor más bajo hasta un color blanco para el valor más alto, a continuación, se presenta la variación de estos valores y tonalidades en la **Figura 38**.

Figura 38. Presentación de valores y colores de la banda *Intensity* VH de la imagen SAR.



Después de la visualización de la banda, se procedió a la importación del archivo *shapefile* de la cuenca Bajo Piura, además de un marco de 4 km del área de estudio (ver **Figura 39**). Es importante mencionar que se optó por desarrollar un marco respecto al área de estudio para ser conservadores debido a las distorsiones geométricas que posee la imagen SAR, asimismo, se puede observar en la **Figura 40** que los archivos *shapefile* adaptan la forma invertida de la imagen SAR.

Figura 39. Importación de los archivos *shapefile* del área de estudio.

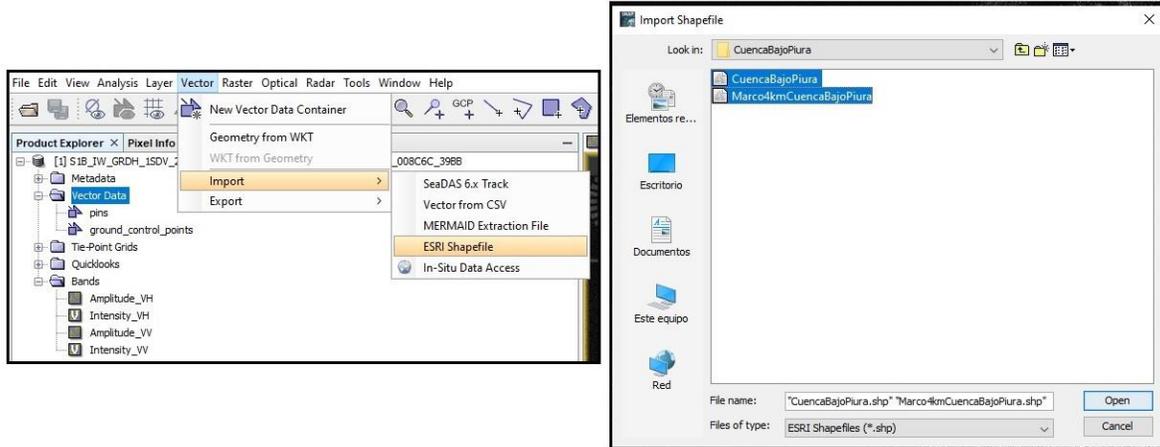
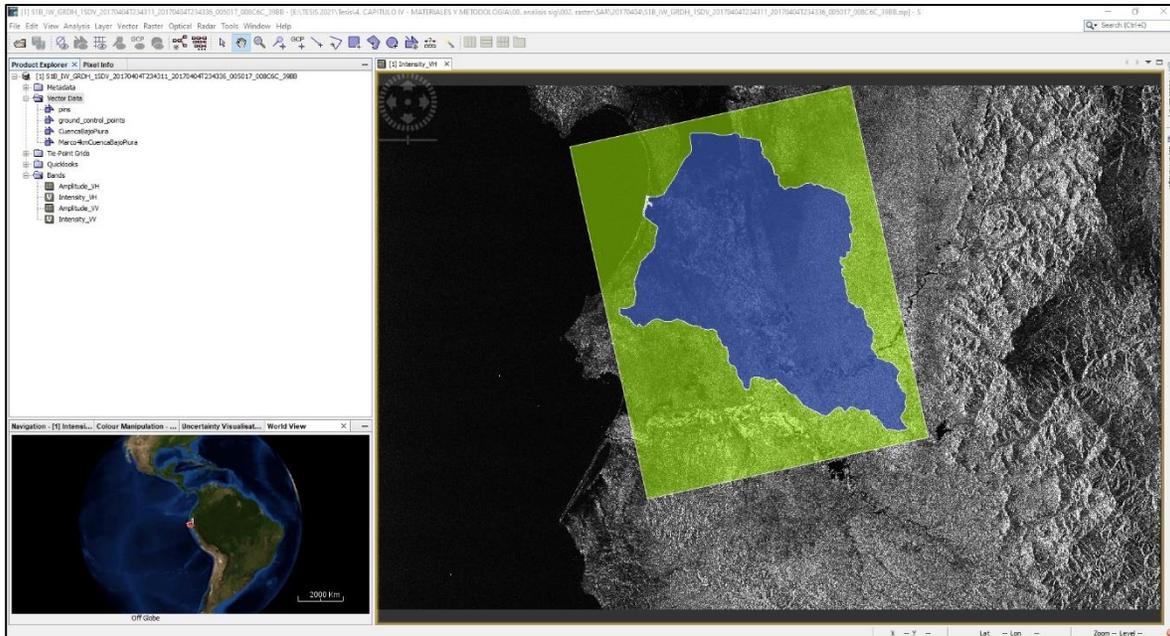


Figura 40. Visualización de los archivos *shapefile* en la imagen SAR.



Posterior a la importación del archivo *shapefile* del área de estudio y el marco respectivo, se realizó la máscara correspondiente a esta zona mediante el uso de la herramienta *Land/Sea Mask*, en la cual se seleccionó el marco para realizar la máscara; asimismo, se seleccionó la banda “*Intensity VH*” para que se ejecute la operación sobre esta (ver **Figura 41 y 42**)

Figura 41. Configuraciones de *Land/Sea Mask*.

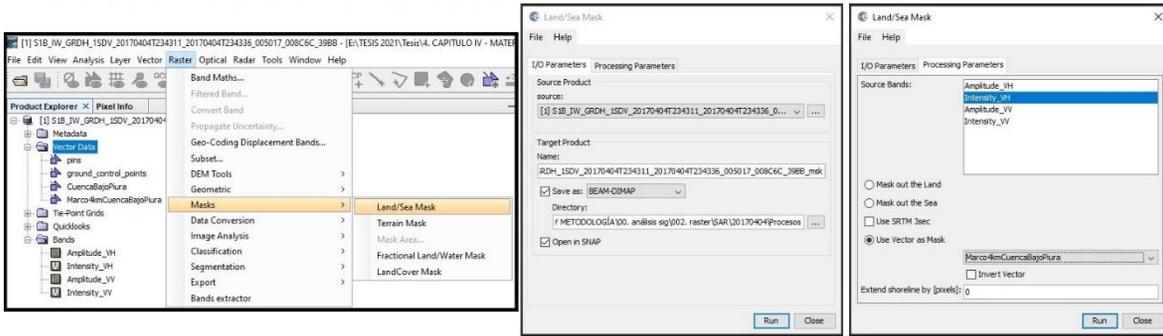
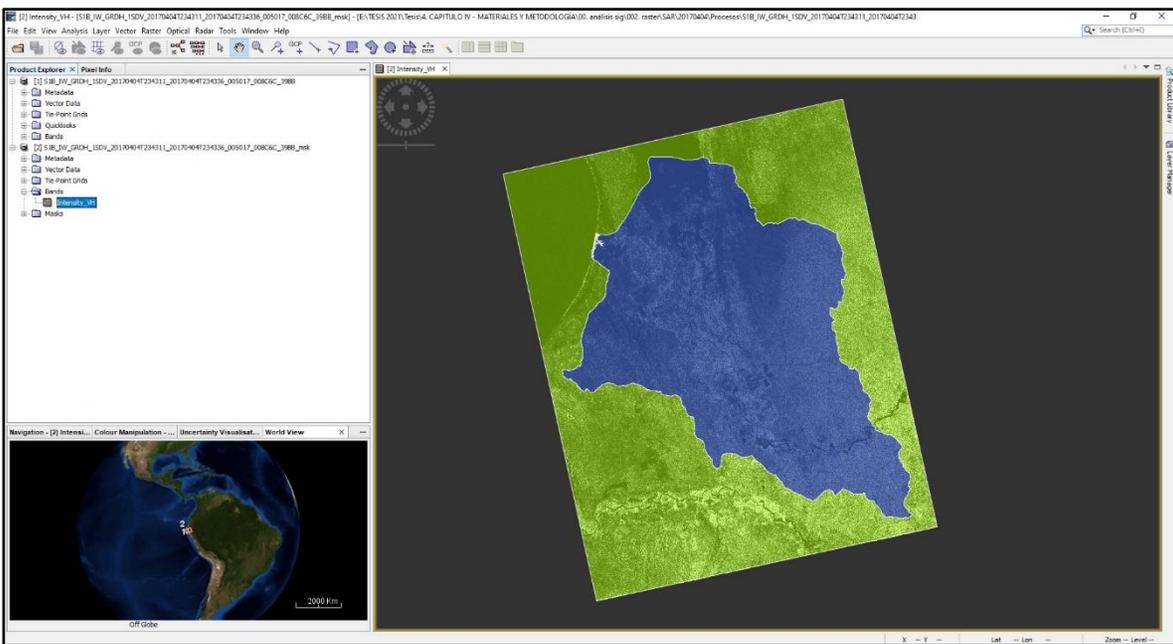


Figura 42. Máscara respecto al área de estudio.



4.4.2.4 Aplicación de archivos de orbitas precisas

La corrección de orbitas de la imagen SAR, consiste en actualizar los metadatos de órbita mediante un archivo de órbita preciso que ofrece a forma de autodescarga el software SNAP (ver **Figura 43** y **44**)

Figura 43. Aplicación de archivos de órbitas precisas.

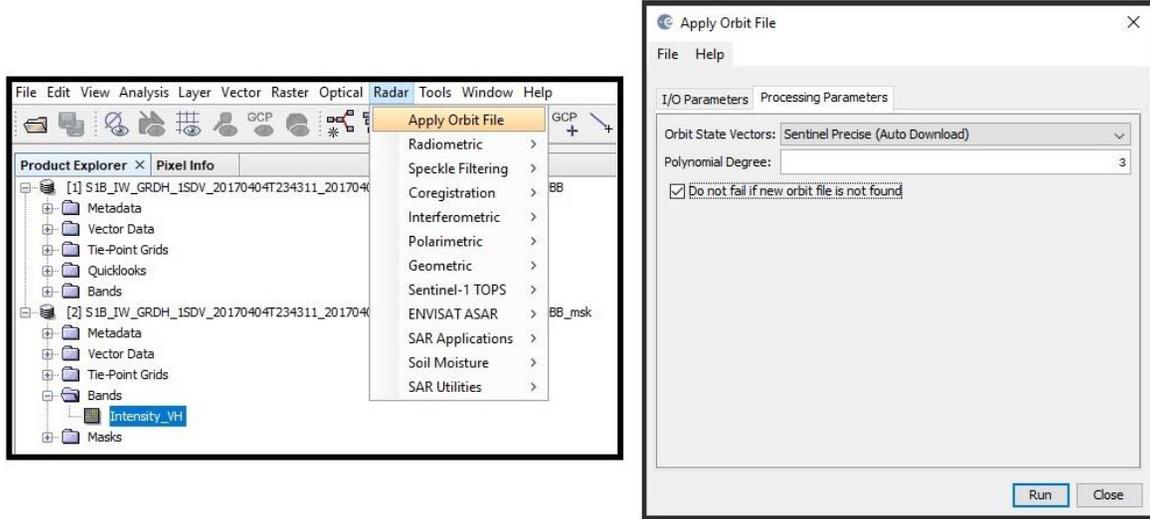


Figura 44. Comparación de metadatos de la imagen aplicada con orbitas precisas.

Name	Value	Type	Unit	Description
[2] Orbit_State_Vectors				
orbit_vector1				
time	04-APR-2017 23:42:03.341358	uint32		
x_pos	735555.789844	float64		
y_pos	-6913481.828519	float64		
z_pos	-1329318.416504	float64		
x_vel	-1437.957892	float64		
y_vel	-1547.911169	float64		
z_vel	7294.885133	float64		
orbit_vector2				
time	04-APR-2017 23:42:13.341358	uint32		
x_pos	721124.205128	float64		
y_pos	-6928563.051386	float64		
z_pos	-1256295.956937	float64		
x_vel	-1448.312858	float64		
y_vel	-1468.301998	float64		
z_vel	7309.469604	float64		
orbit_vector3				
orbit_vector4				
orbit_vector5				
orbit_vector6				
orbit_vector7				
orbit_vector8				
orbit_vector9				
orbit_vector10				
orbit_vector11				
orbit_vector12				
orbit_vector13				
orbit_vector14				
orbit_vector15				
orbit_vector16				
orbit_vector17				
[3] Orbit_State_Vectors				
orbit_vector1				
time	04-APR-2017 23:43:01.844763	uint32		
x_pos	649727.5388732208	float64		
y_pos	-6990372.591135558	float64		
z_pos	-900251.748619901	float64		
x_vel	-1494.568984672107	float64		
y_vel	-1079.735138389644	float64		
z_vel	7368.492183787734	float64		
orbit_vector2				
time	04-APR-2017 23:43:02.844763	uint32		
x_pos	648232.5277198441	float64		
y_pos	-6991448.301378917	float64		
z_pos	-892882.7498485167	float64		
x_vel	-1495.452754287916	float64		
y_vel	-1071.686162005839	float64		
z_vel	7369.503915274101	float64		
orbit_vector3				
orbit_vector4				
orbit_vector5				
orbit_vector6				
orbit_vector7				
orbit_vector8				
orbit_vector9				
orbit_vector10				
orbit_vector11				
orbit_vector12				
orbit_vector13				
orbit_vector14				
orbit_vector15				
orbit_vector16				
orbit_vector17				
orbit_vector18				
orbit_vector19				
orbit_vector20				
orbit_vector21				
orbit_vector22				
orbit_vector23				
orbit_vector24				
orbit_vector25				
orbit_vector26				

4.4.2.5 Remoción de ruido térmico

Posterior a la aplicación de corrección de orbitas, se procede a ejecutar la eliminación del ruido térmico de la imagen, dicha problemática se genera por la agitación térmica de los portadores de carga; esta corrección elimina el ruido aditivo entre las sub-franjas, reduciendo las discontinuidades que se podrían presentar en escenas que se adquieren a través una metodología de múltiples franjas. Asimismo, los valores de retrodispersión se ven modificados por esta remoción (ver **Figura 45, 46 y 47**)

Figura 45. Remoción de ruido térmico.

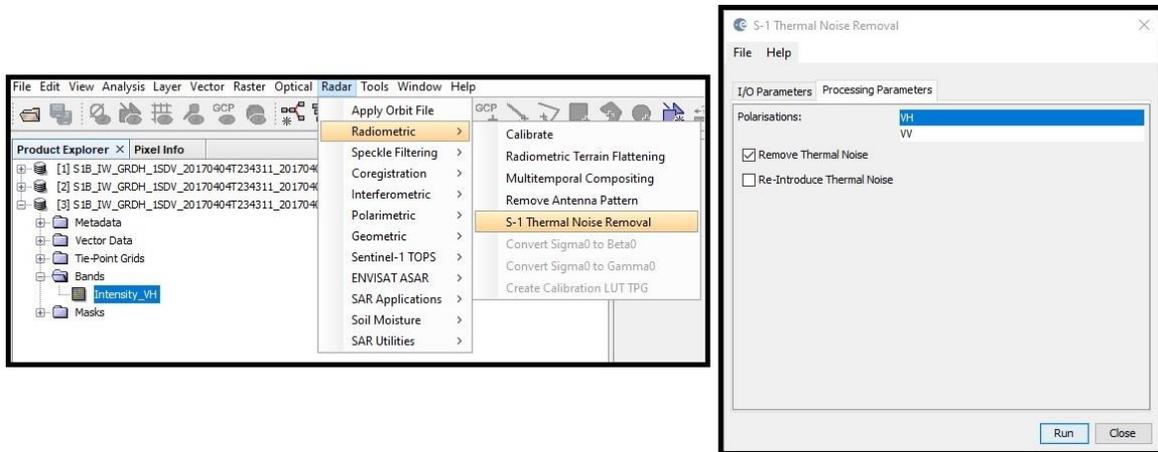


Figura 46. Aplicación de metodología de múltiples franjas.

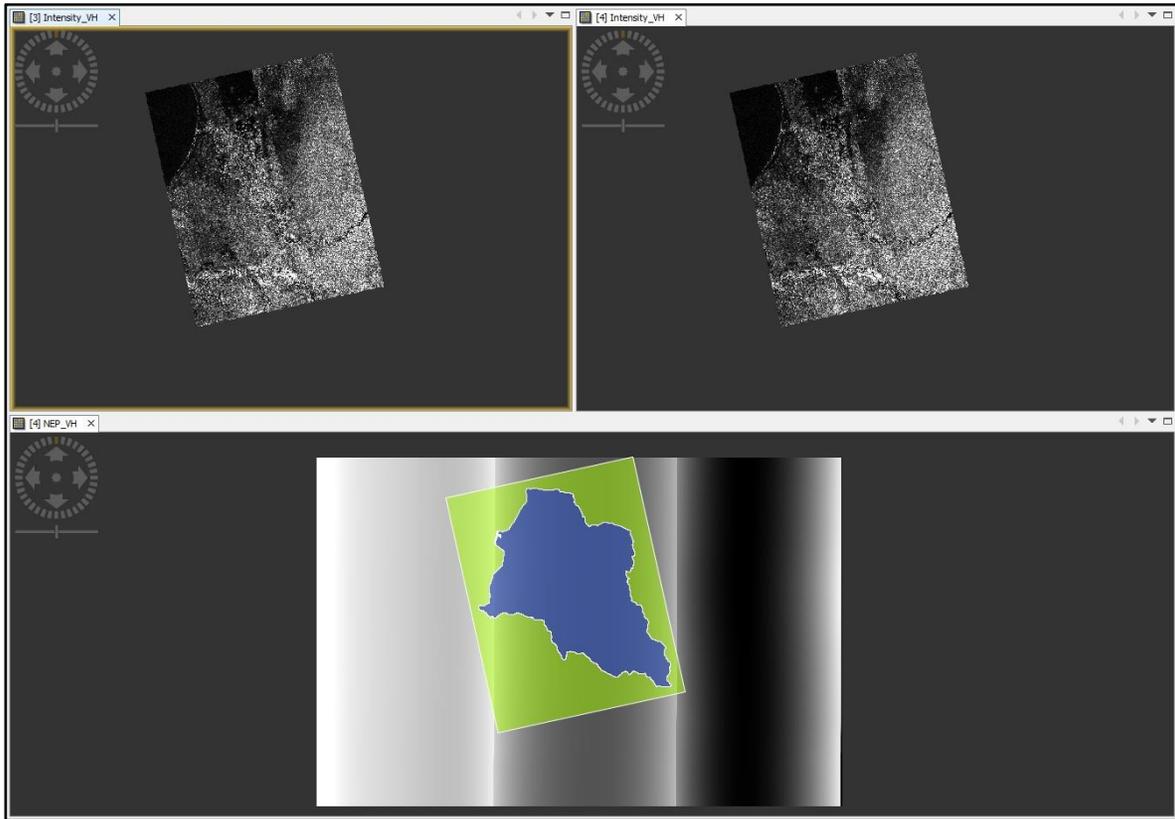
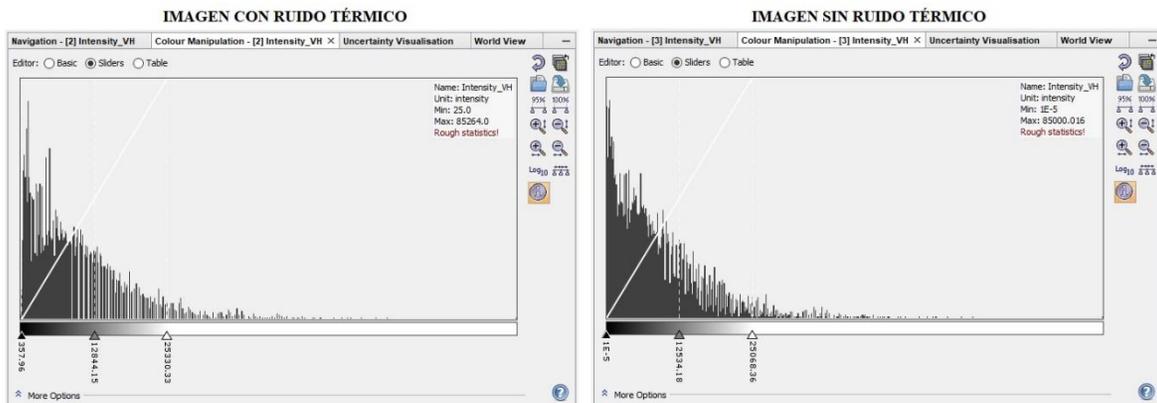


Figura 47. Diferencia de valores de retrodispersión después de la remoción de ruido térmico.



4.4.2.6 Multilooking

La técnica *Multilook* es empleada para disminuir el ruido denominado *speckle* conocido también como efecto “sal y pimienta” presente en la imagen SAR; la técnica consiste en agrupar celdas lineales adyacentes en el rango y azimut, para producir celdas un poco más cuadradas, los valores de estas nuevas celdas se calculan a través del promedio de estas en la dirección deseada (azimut o rango). En la presente investigación se aplicó un *look* con un valor de 2, esta técnica llevará la resolución inicial de la imagen de 10 metros a 20 metros (ver **Figura 48**). Asimismo, en la **Figura 49**, se presenta la escena con la técnica aplicada en el margen derecho, donde se puede apreciar el ruido se ha disminuido ligeramente, así como también el cambio en la resolución se puede visualizar en la tabla de metadatos (Ver **Figura 50**).

Figura 48. Aplicación del *Multilooking*.

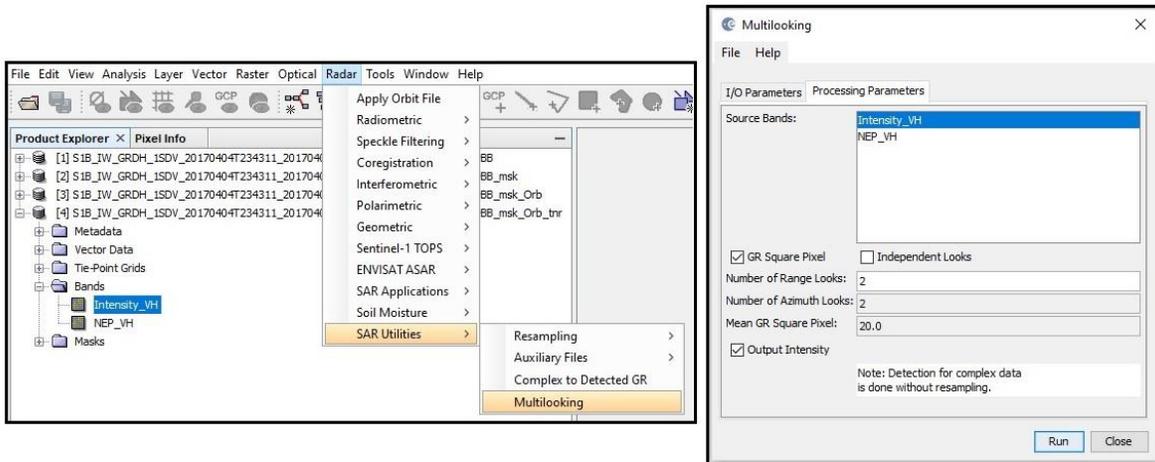


Figura 49. Escena procesada con el *Multilook*.

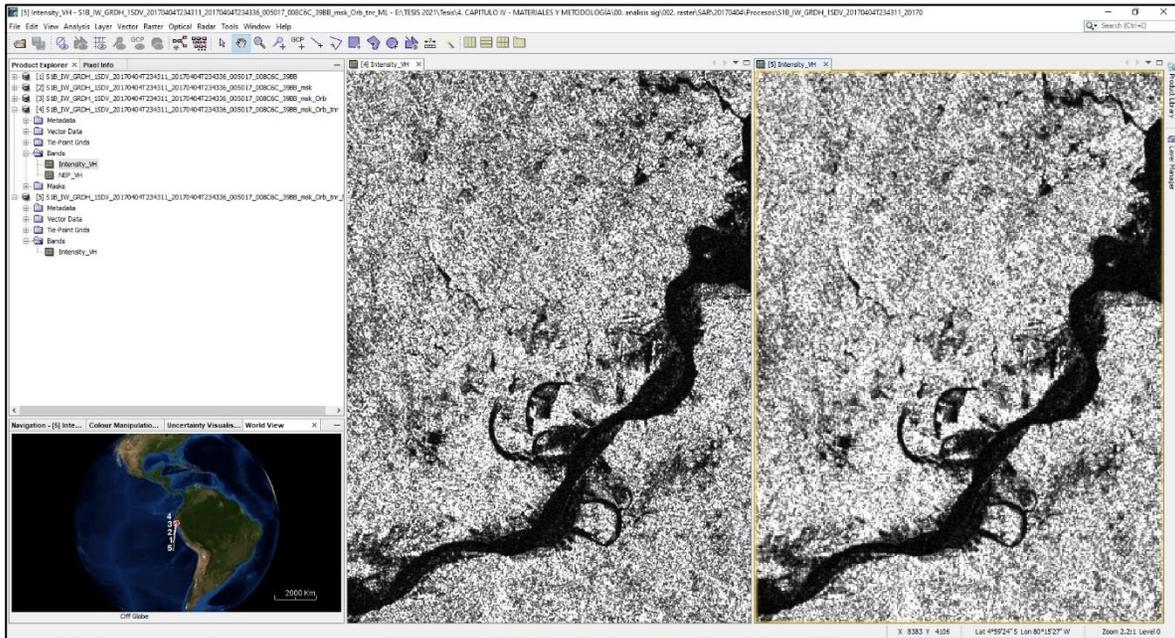


Figura 50. Comparación de metadatos con *Multilooking* aplicado.

Name	Value	Type	Unit	Description
azimuth_looks	1.0	float6		
range_looks	5.0	float6		
range_spacing	10.0	float6	m	Range sample spacing
azimuth_spacing	10.0	float6	m	Azimuth sample spacing
pulse_repetition_fre	1717.128973878037	float6	Hz	PRF
radar_frequency	5405.000454334349	float6	MHz	Radar frequency
line_time_interval	0.00148418653838943	float6	s	
total_size	1632	uint32	MB	Total product size
num_output_lines	16844	uint32	lines	Raster height
num_samples_per_li	25356	uint32	sam	Raster width

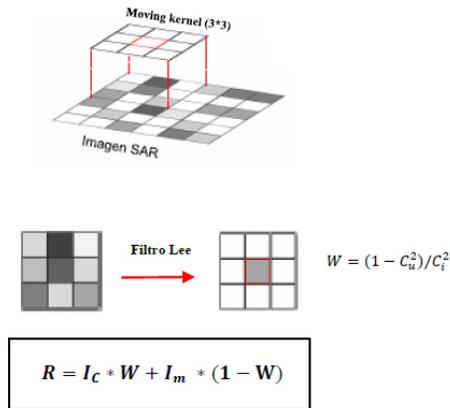
Name	Value	Type	Unit	Description
azimuth_looks	2.0	float6		
range_looks	10.0	float6		
range_spacing	20.0	float6	m	Range sample spacing
azimuth_spacing	20.0	float6	m	Azimuth sample spacing
pulse_repetition_fre	1717.128973878037	float6	Hz	PRF
radar_frequency	5405.000454334349	float6	MHz	Radar frequency
line_time_interval	0.002968373009935...	float6	s	
total_size	1632	uint32	MB	Total product size
num_output_lines	8422	uint32	lines	Raster height
num_samples_per_li	12678	uint32	sam	Raster width

4.4.2.7 Filtrado de *Speckle*

El filtrado *Speckle* se considera de tipo adaptativo, ya que busca preservar la información de los bordes, mejorando la legibilidad de las imágenes SAR, brindándole una apariencia suavizada; para la investigación se consideró el filtro Lee, el cual preserva la información específicamente de los contornos, líneas y puntos, así como también algunos píxeles de tonalidades brillantes (altos valores de retrodispersión), es así que este tipo de filtro realiza una combinación lineal de la intensidad observada y el valor de intensidad promedio local dentro de la ventana local fija.

El funcionamiento del filtro Lee está representado a través de la siguiente ilustración y ecuación mostrada en la **Figura 51**.

Figura 51. Filtro Lee.



Donde:

W → Función de ponderación

C_u → Coeficiente de variación de ruido $\sqrt{(1/ENL)}$

C_l → Coeficiente de variación de la imagen σ/I_m

I_c → Pixel central de la ventana de filtrado

I_m → Intensidad media dentro de la ventana de filtro

σ → Desviación estándar de la intensidad dentro del filtro

ENL → Número equivalente de looks

Fuente: CIECI (2019).

Donde, en la ecuación el valor de “R” refleja una suma ponderada del valor del píxel central observado el promedio, y “W” representa el coeficiente de ponderación, el cual es una función de la heterogeneidad objetivo local medida con el coeficiente de variación.

Es así como el filtro Lee fue aplicado usando una ventana móvil de 3*3, esta distribución estadística local deriva de los pixeles vecinos para estimar el valor del píxel de interés, suprimiendo así el ruido *speckle* en las imágenes consideradas para la investigación (ver **Figura 52 y 53**).

Figura 52. Aplicación del Filtro Lee para reducir el *speckle*.

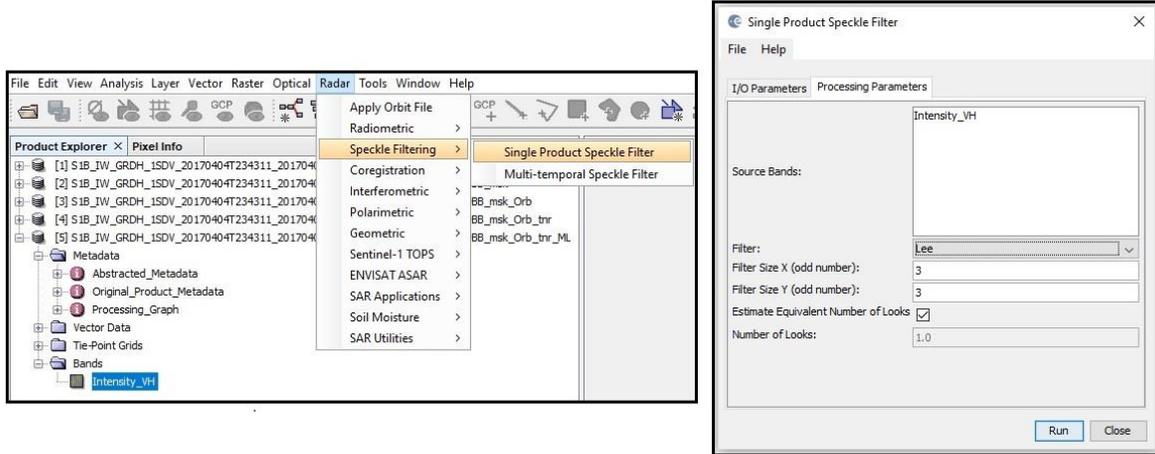
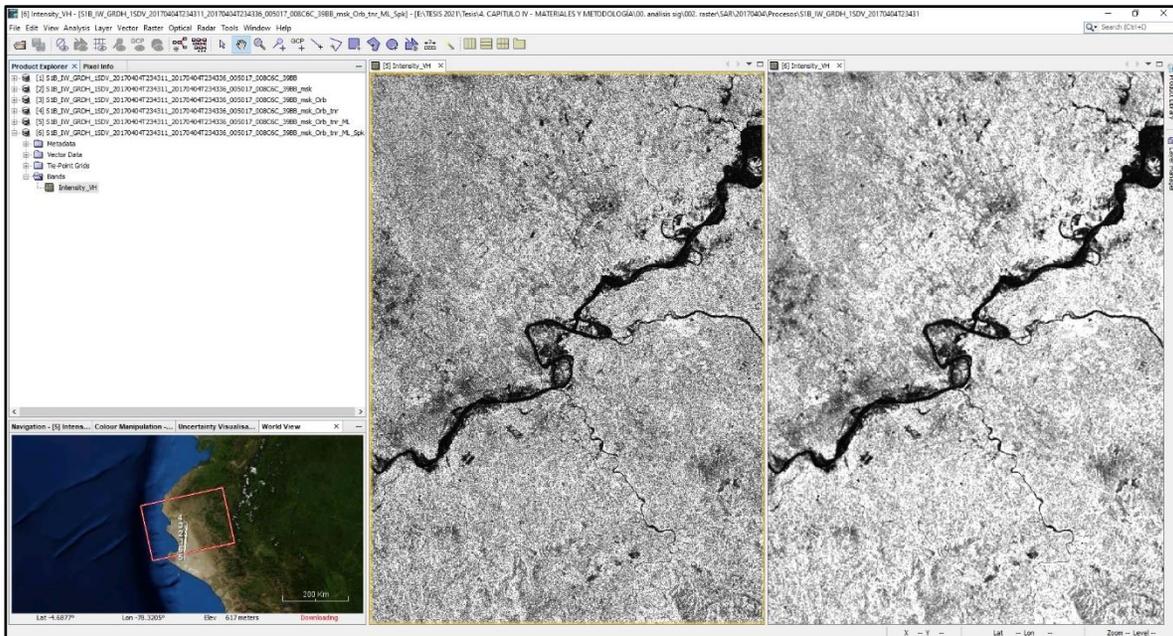


Figura 53. Escena procesada con el Filtro Lee en el margen derecho.

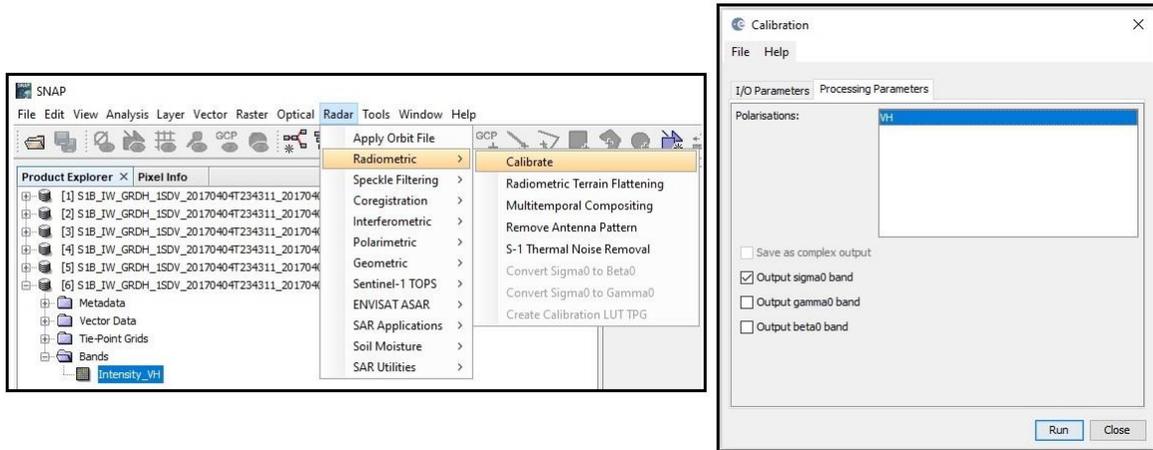


4.4.2.8 Calibración radiométrica

Posterior a la aplicación del filtro para reducir el *speckle*, se ejecuta la calibración radiométrica, que tiene como objetivo relacionar los valores de los píxeles con el coeficiente *backscattering* de la escena, esta calibración calcula los valores de intensidad de la retrodispersión basado en los

parámetros de los metadatos de la imagen GRD. Los pasos de la calibración radiométrica se muestran en la **Figura 54**.

Figura 54. Calibración radiométrica de la imagen SAR.



A continuación de la calibración radiométrica, la imagen SAR es transformada para hacer uso cuantitativo de los datos, esta transformación se genera migrando los valores de intensidad de retrodispersión (σ°) a valores en decibeles (dB), este cálculo está representado mediante una escala logarítmica a través de la siguiente ecuación:

$$\sigma^\circ(\text{dB}) = \log_{10}(\sigma^\circ)$$

Es importante mencionar que tanto la calibración y como la transformación de valores de intensidad son importantes para poder hacer comparaciones de imágenes SAR provenientes de distintos sensores, asimismo, para poder realizar una comparación entre imágenes SAR del mismo sensor adquiridas en diferentes fechas. La transformación de la imagen con valores de intensidad a decibeles se muestra en la **Figura 55**, asimismo, en las **Figuras 56 y 57** se muestra la comparación de la imagen y los valores de estas respectivamente.

Figura 55. Conversión de la imagen a valores en decibeles.

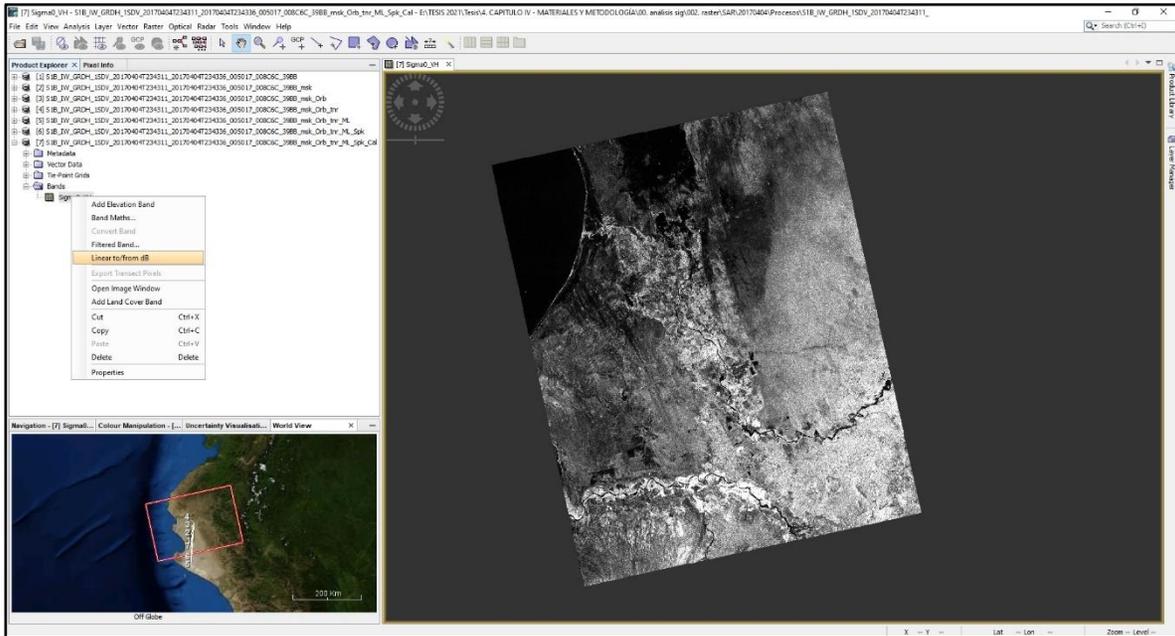


Figura 56. Comparación de la imagen calibrada con la imagen calibrada en decibeles.

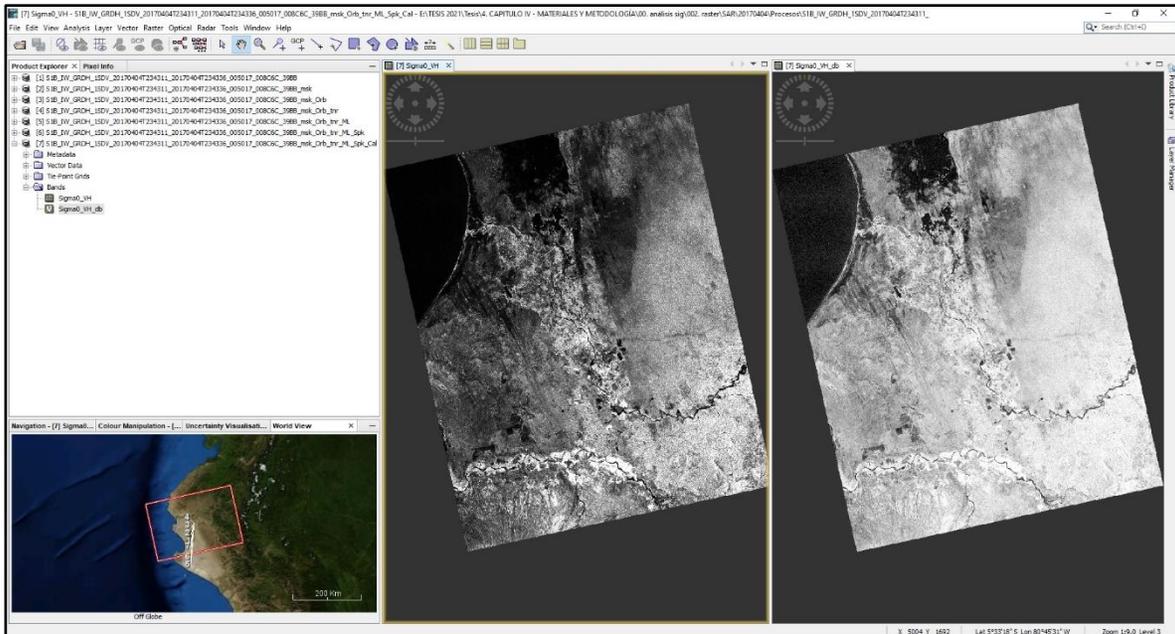
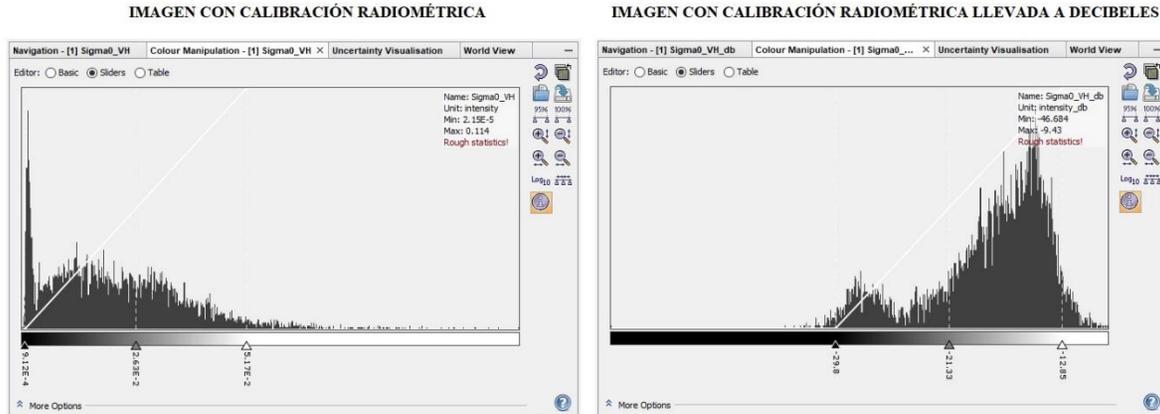


Figura 57. Comparación de valores de la imagen calibrada con la imagen calibrada en decibeles.



4.4.2.9 Generación de máscaras *layover* y sombras

La generación de las máscaras para la detección *layover* y sombras, son derivados a partir de un DEM, el cual el software descarga automáticamente, en este caso se usó el DEM SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) con 3 segundos de arco generado por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*); este proceso es útil para proporcionar información sobre regiones con existencia de sombras y *layover* para poder ser corregidas, en el caso de nuestra área de estudio esta no muestra un relieve accidentado por lo que no se registraron mayores inconvenientes. En la **Figura 58** se muestra el procedimiento para la elaboración de estas máscaras, mientras que en la **Figura 59** se muestra el resultado obtenido a través de esta, asimismo se puede apreciar la simulación del relieve para la banda de intensidad.

Figura 58. Generación de la máscara de *layover* y sombras.

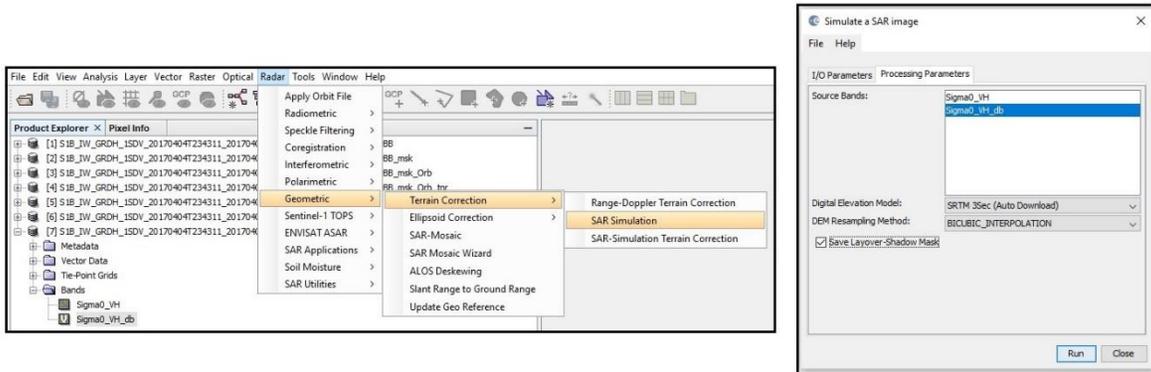
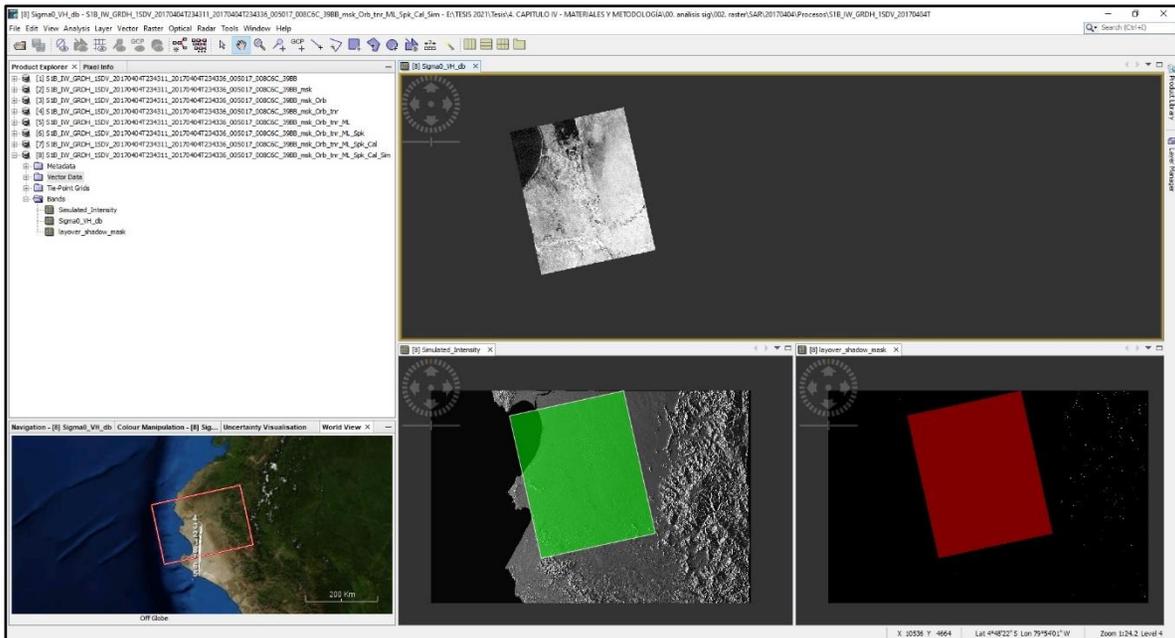


Figura 59. Resultado de la máscara de *layover* y sombras y la simulación del terreno.



4.4.2.10 Geocodificación y normalización radiométrica

Finalmente, para culminar la fase de pre-procesamiento se realiza la geocodificación, conocida también como corrección del terreno u ortorrectificación, y consiguiente se realiza también la normalización radiométrica; el procesamiento de geocodificación nos permite realizar la conversión del rango inclinado o rango de suelo (imagen SAR GRD), a una proyección del sistema de referencia cartográfico del área de estudio mediante la aplicación del método de enfoque de

rango *Doppler*, en este caso, el área de estudio de la investigación se llevó a su sistema de referencia correspondiente a la proyección WGS 84/UTM Zona 17S. Asimismo, mediante el empleo del DEM se nos permite realizar una corrección de la radiometría, principalmente en las pendientes de la imagen SAR, a través de los valores de retrodispersión del modelo elipsoidal (σ°_E), es así que la normalización radiométrica (σ°_{NORM}) se puede expresar a través de la siguiente formula:

$$\sigma^{\circ}_{NORM} = \sigma^{\circ}_E \frac{\text{sen } \theta_l}{\text{sen } \theta_E}$$

Dónde:

- θ_l : Ángulo de incidencia local en el terreno.
- θ_E : Ángulo de incidencia elipsoidal.

Es así que los procedimientos para la geocodificación y normalización radiométrica se muestran en la **Figura 60** y el resultado de este se muestra en la **Figura 61**.

Figura 60. Corrección del terreno y normalización radiométrica.

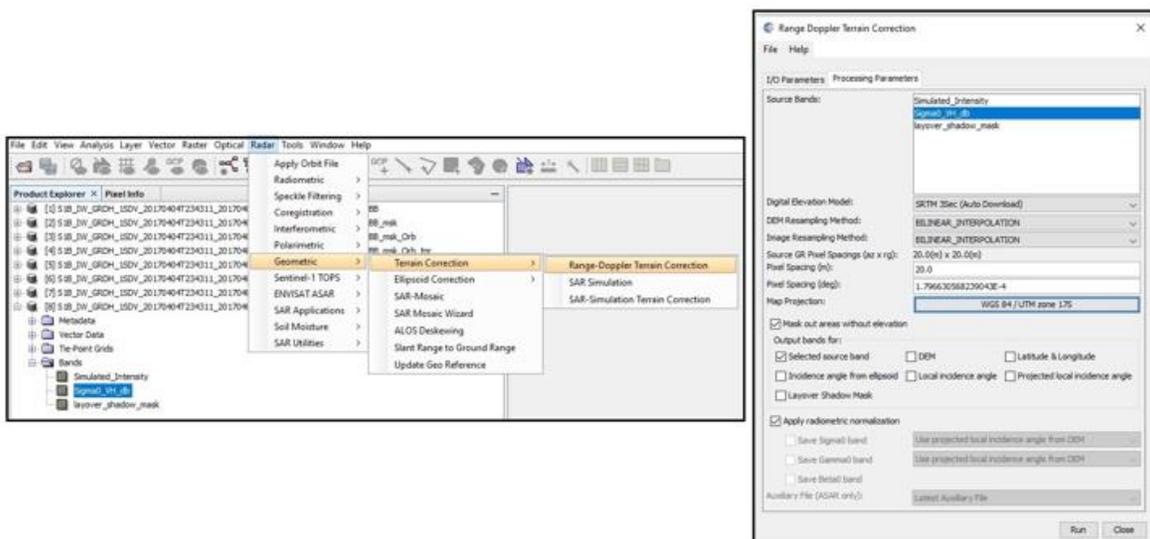
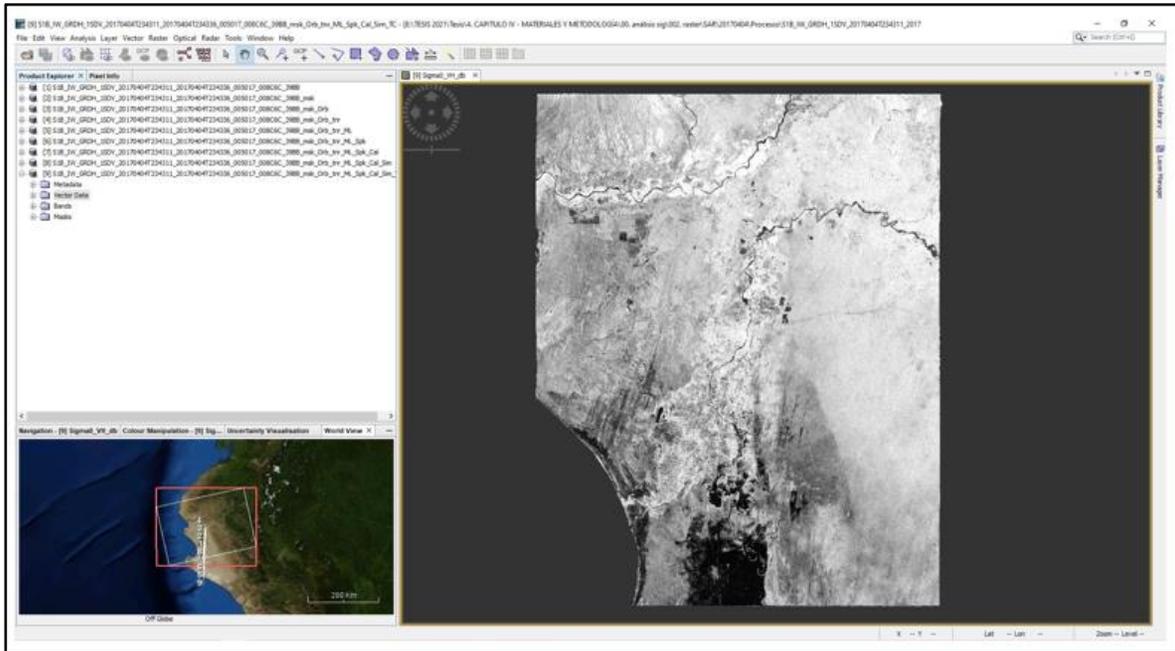


Figura 61. Resultado de la corrección del terreno y normalización radiométrica.



4.4.2.11 Mascara del área de estudio

Si bien concluimos con la fase de pre-procesamiento de las imágenes SAR, como se mencionó en un principio se estimó por conservación un marco de 4 km respecto al área de estudio, en este caso, al haber realizado todos los procesos correspondientes para realizar un adecuado análisis de la imagen SAR se procedió a realizar la máscara correspondiente al área de estudio en sí, mediante el uso de la herramienta *Land/Sea Mask*, seleccionando el vector de la cuenca Bajo Piura para ejecutar el proceso de extracción; obteniéndose así la imagen SAR correspondiente al área de estudio. (ver **Figura 62** y **Figura 63**)

Figura 62. Vector en formato *shapefile* de la cuenca Bajo Piura.

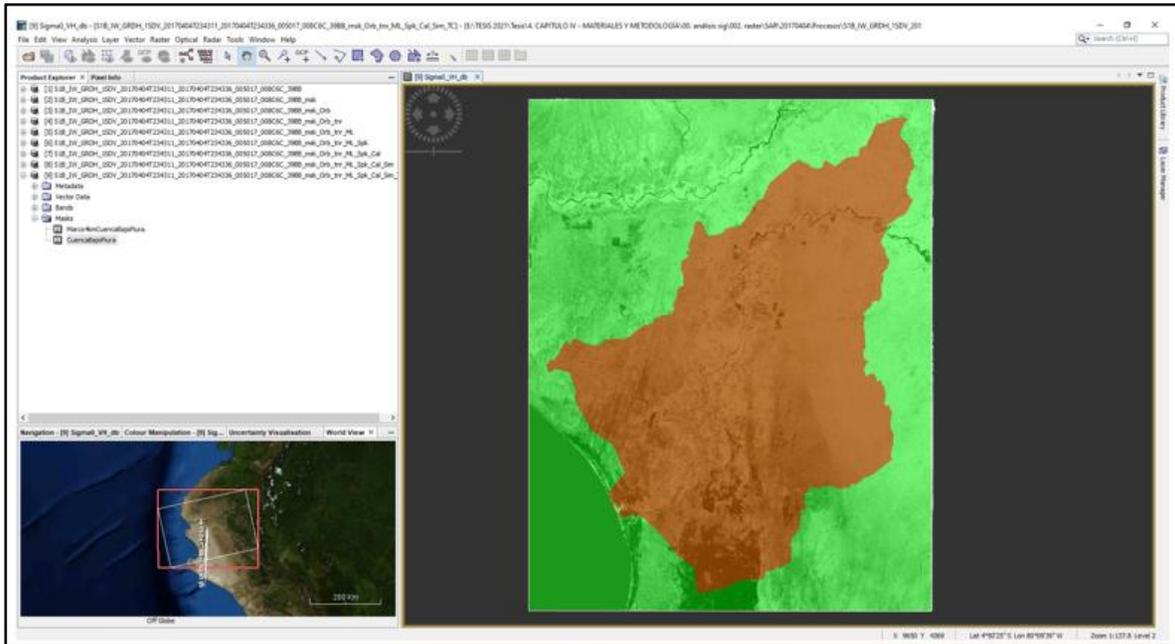
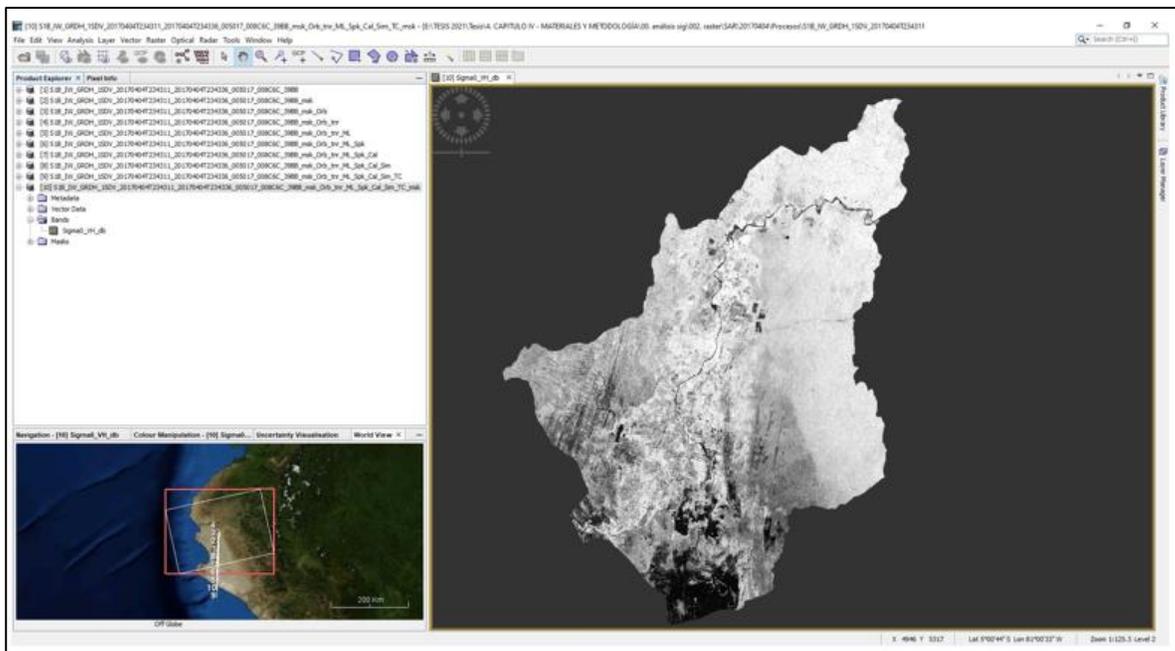


Figura 63. Imagen SAR correspondiente a la cuenca Bajo Piura.



4.4.2.12 Stack

Habiendo realizado el pre-procesamiento correspondiente de las imágenes SAR, para las fechas de la pre-inundación (03/02/2017) y la fecha del mayor desarrollo del evento de inundación

(04/04/2017), se procede a realizar un corregistro de ambas imágenes para mantenerlas en un solo archivo y poder realizar el análisis entre estas. Esta compilación se realizó mediante la herramienta *Create Stack* (ver Figura 64 y 65).

Figura 64. Create Stack.

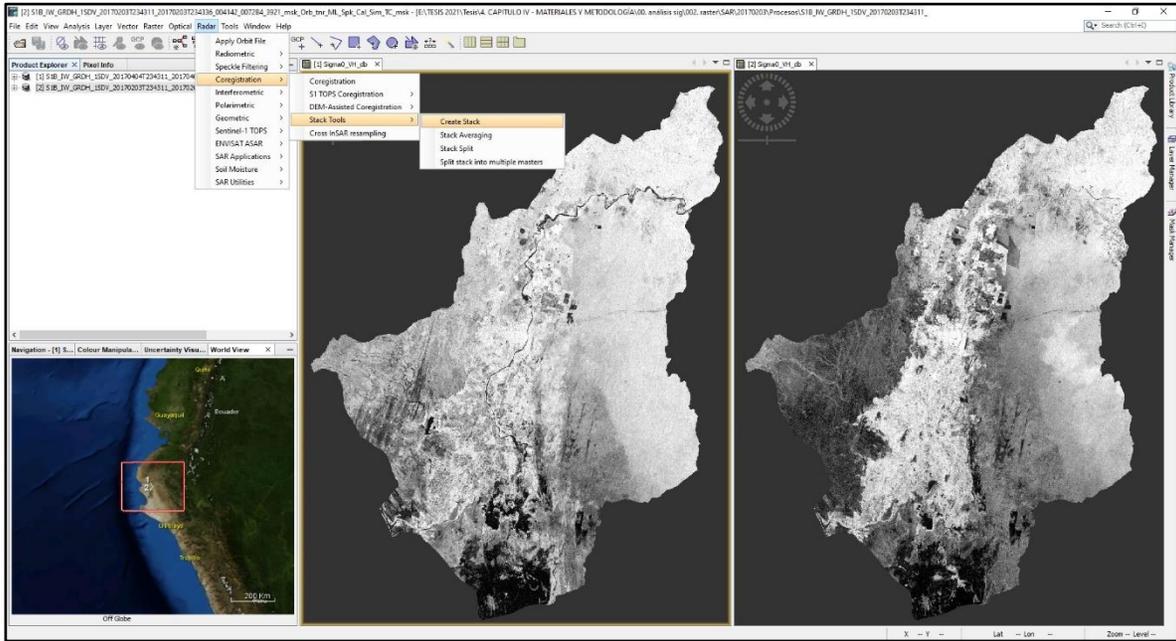
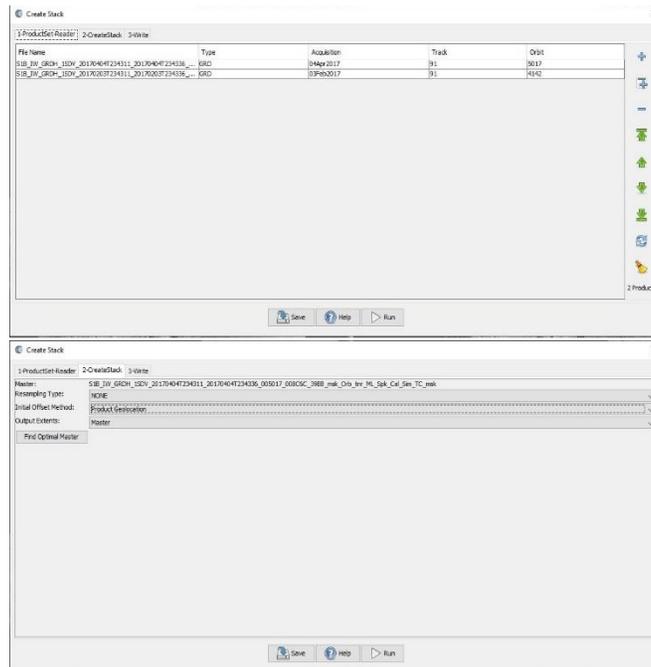


Figura 65. Configuraciones para el corregistro de las imágenes SAR.



4.4.2.13 Visualización RGB

Posterior a la creación del archivo compilado, se procede a realizar una visualización de esta imagen en RGB, para esto se organizaron las bandas en el siguiente orden: R: 03/02/2017, G: 04/04/2017 y B: 03/02/2017 (ver **Figura 66** y **67**).

Figura 66. *Open RGB.*

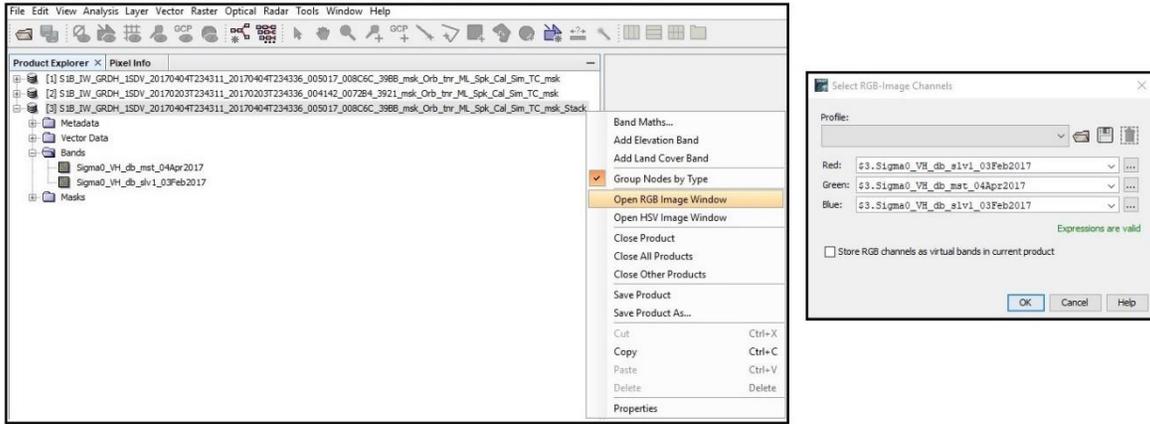
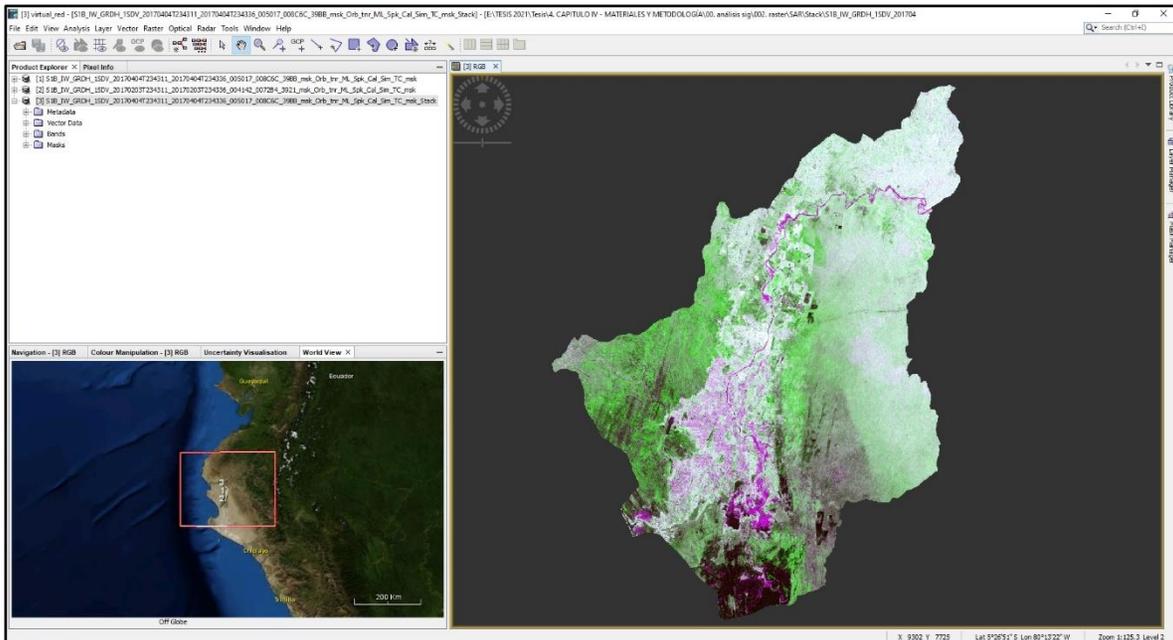


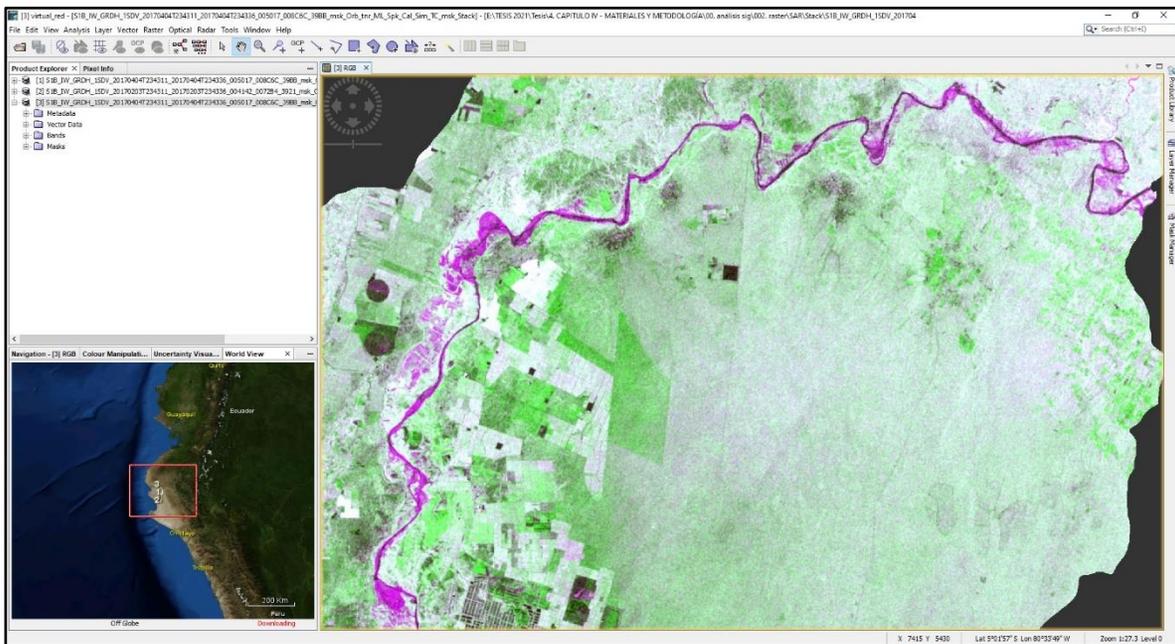
Figura 67. *Visualización RGB.*



La visualización de las imágenes RGB en SAR, nos ayudan a tener una idea de los cambios de intensidad en decibeles registrados en cada fecha, en el caso de la presente investigación en lo que

respecta a las inundaciones de cuerpos de agua abierto, los valores en decibeles de las zonas inundadas en la imagen donde ocurre el evento presentan un nivel menor en lo que respecta a la imagen antes del evento ($\sigma^{\circ}_{04-04-17} < \sigma^{\circ}_{03-02-17}$), por lo tanto, en zonas donde se presentan las inundaciones la intensidad de los decibeles de la imagen del 03/02/2017 son mayores y al encontrarse esta imagen en las bandas R y B, darían como resultado una visualización de tonalidad morada, para poder apreciar mejor lo expresado en el siguiente párrafo se muestra la **Figura 68**.

Figura 68. Apreciación de zonas inundadas en una vista RGB.



4.4.2.14 Band Math

Existe una diferencia en los valores de intensidad en decibeles de las imágenes correspondientes a antes y durante el evento, esta diferencia se pudo apreciar en la composición de la imagen RGB mostrada previamente, si bien esta visualización nos aclara el panorama y nos ayuda a tener en claro visualmente las ubicaciones de estas diferencias, se necesita materializar esta información para posteriormente poder realizar una clasificación en base a estos valores, es por ello que se procedió a realizar un diferencia de bandas a través de la herramienta *Band Math*, donde esta

diferencia está representada a través de la división de la imagen durante el evento (04/04/2017) y la imagen antes del evento (03/02/2017), se realiza la operación de división y no netamente la diferencia debido a que los valores de intensidad de las imágenes se encuentran en decibeles como se mencionó anteriormente, entonces esta diferencia de valores se representa mediante la siguiente ecuación:

Si:

$$\sigma^{\circ}(\text{dB}) = \log_{10}(\sigma^{\circ})$$

Entonces:

$$\triangleq \sigma^{\circ}(\text{dB}) = \log_{10}(\sigma^{\circ}_{04-04-17}) - \log_{10}(\sigma^{\circ}_{03-02-17}) = \log_{10}\left(\frac{\sigma^{\circ}_{04-04-17}}{\sigma^{\circ}_{03-02-17}}\right)$$

Se presenta en la **Figura 69** el procedimiento de la operación, así como en la **Figura 70** presenta la imagen resultante de esta operación.

Figura 69. *Band Math.*

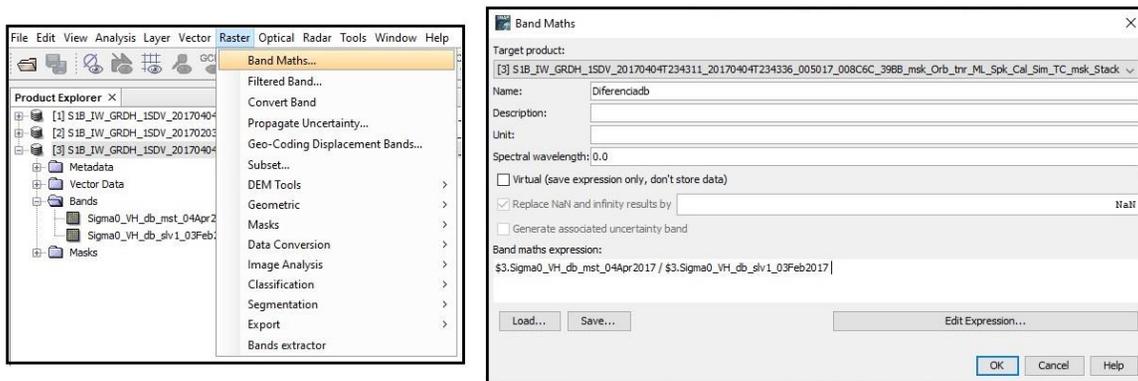
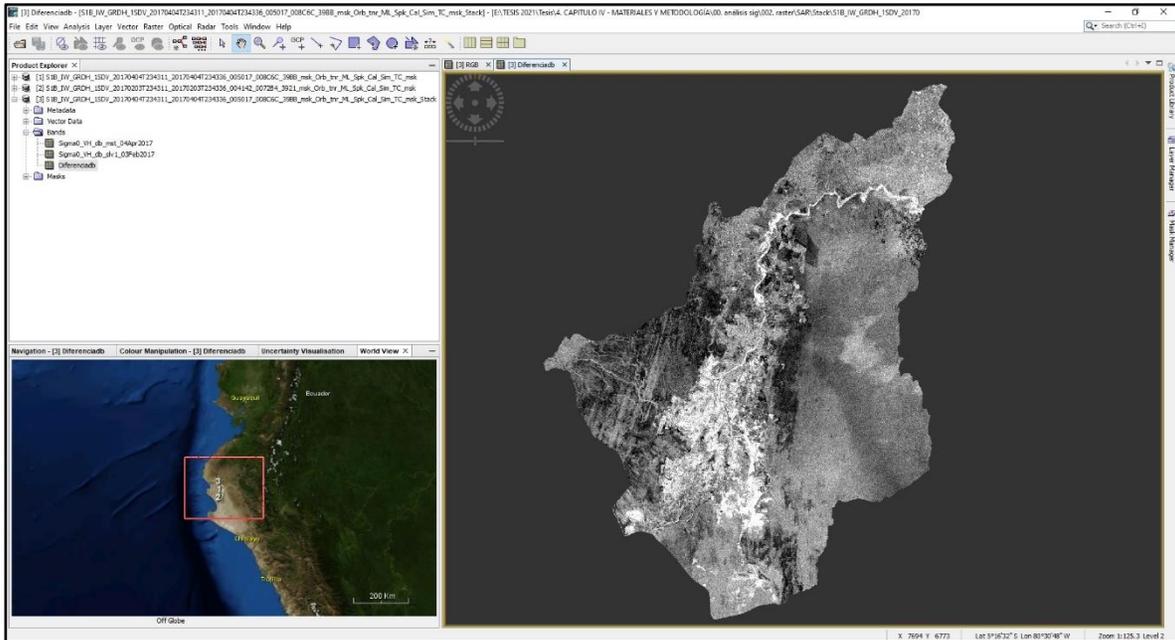


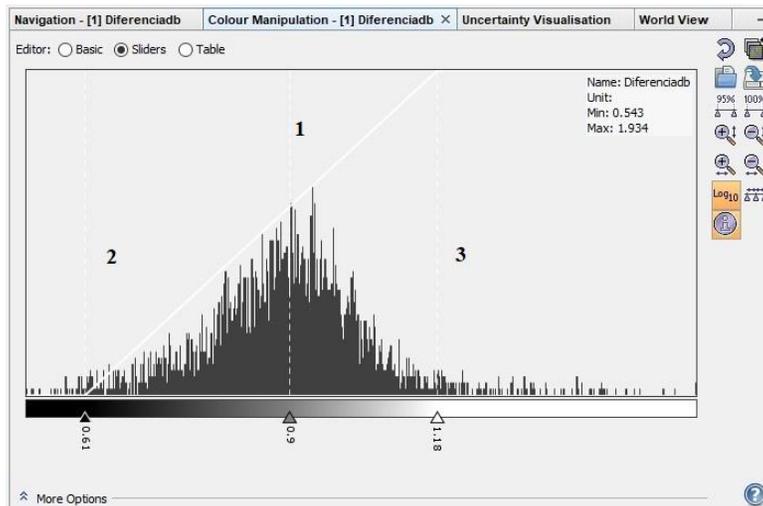
Figura 70. Resultado de la diferencia de bandas en decibelios.



4.4.2.15 K-Means Clustering

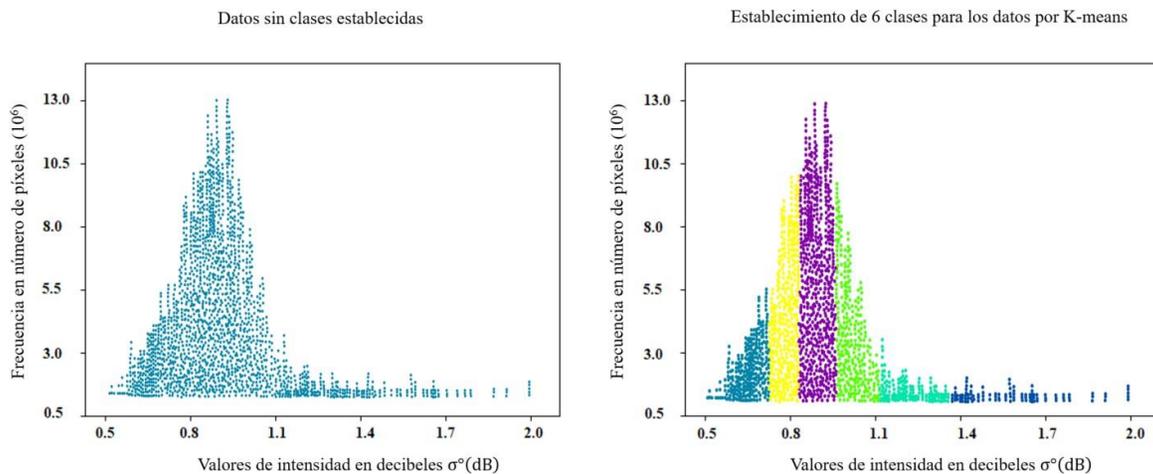
La banda de diferencia entre las imágenes procesadas previamente refleja 3 grandes grupos específicamente: 1) cuerpos en los que no se registró cambios, 2) cuerpos en los que se registró cambios antes del evento y 3) cuerpos en los que se registró cambios después del evento (ver **Figura 71**).

Figura 71. Distribución de valores de la imagen de diferencia.



En áreas pequeñas bastaría con emplear el algoritmo *K-Means Clustering* e indicarle que nos genere 3 clases para identificar los grandes grupos mencionados previamente (tal y como se comprobó en pequeñas áreas de entrenamiento dentro del área de estudio), sin embargo, al ser nuestra área de estudio bastante extensa, con bastante heterogeneidad superficial y con presencia de áreas cambiantes en un periodo corto de tiempo, como lo son las zonas agrícolas, se procedió a emplear el algoritmo de clasificación no supervisada *K-Means Clustering* para 6 clases, es así que los 3 grandes grupos mencionados previamente, estarían subdivididos en 2 clases. La teoría del funcionamiento del algoritmo *K-Means Clustering* se encuentra detallado en la **sección 2.2.2**, a continuación, se muestra una imagen de forma ilustrativa del funcionamiento de este algoritmo en la **Figura 72**.

Figura 72. Establecimiento de clases por el algoritmo *K-Means Clustering*.



Para la presente investigación se estableció un total de 6 clases, 30 interacciones y 32 000 semillas aleatorias. El algoritmo dejó evidencia que funcionó reduciendo la variabilidad entre los grupos, agrupando los píxeles por su similitud a través de la distancia desde los centroides aleatorios asignados. El procedimiento para realizar esta clasificación, su resultado y sus estadísticas se muestran en las **Figura 73, 74 y 75** respectivamente.

Figura 73. Procedimiento del *K-Means Clustering*.

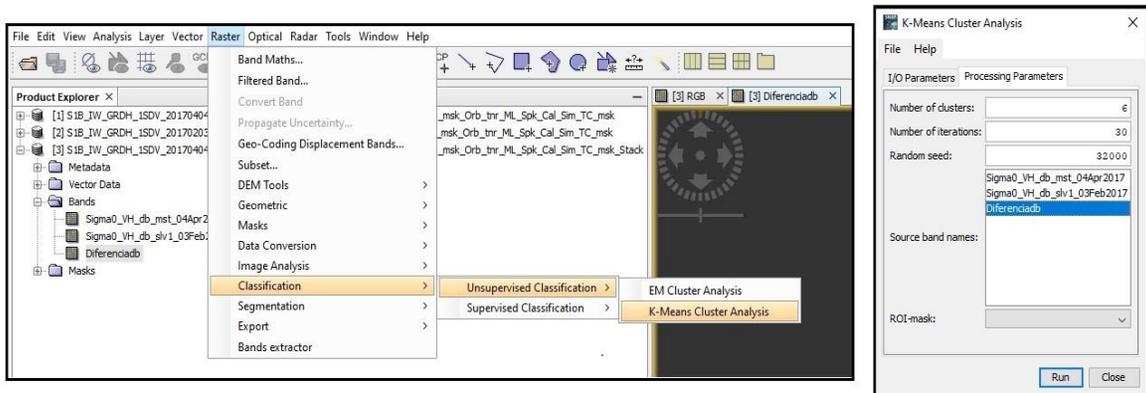


Figura 74. Resultado de las 6 clases establecidas por *K-Means Clustering* dentro de la imagen.

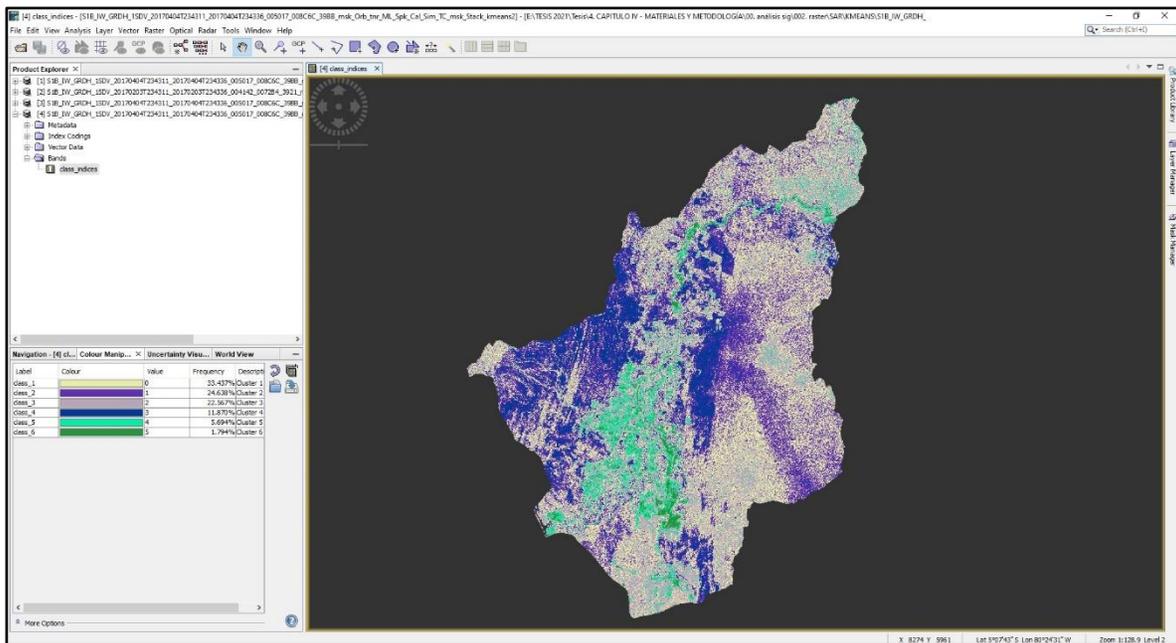
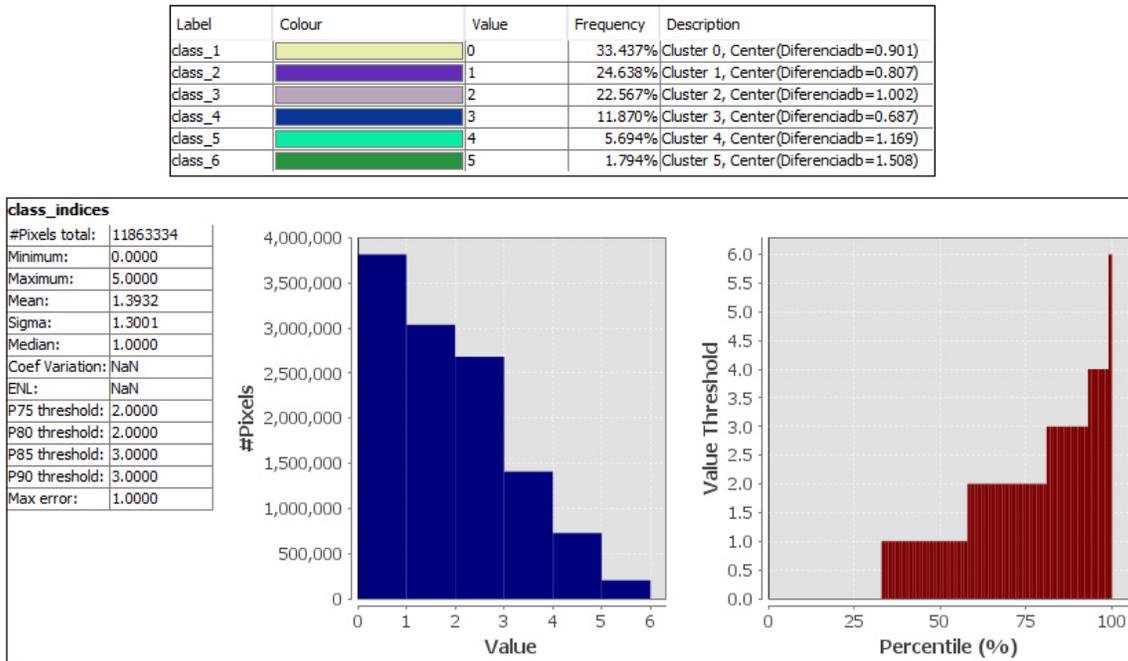


Figura 75. Estadísticas de la clasificación.

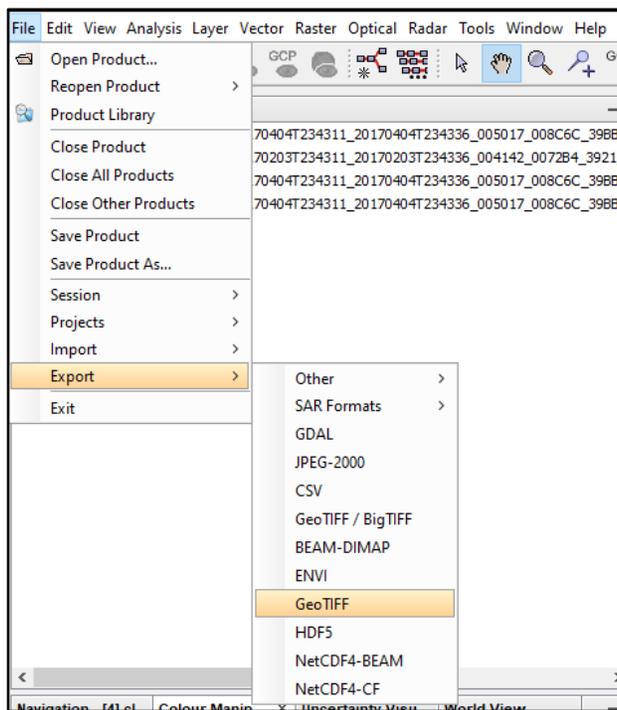


En la **Figura 75** dentro de las estadísticas se pueden apreciar los valores establecidos como centroides para las diferentes clases, en el caso de la clase de mayor variación (clase 6, valor = 5), presenta un centroide con un valor de $\sigma^{\circ}(\text{dB}) = 1.508$, siendo esta clase de nuestro interés, ya que refleja los mayores cambios entre las imágenes SAR analizadas, y es a partir de estos cambios drásticos que se podrán obtener las áreas de inundación de cuerpos abiertos de agua, esto debido a que la señal del radar pierde intensidad en los cuerpos de agua, por ende, antes del evento un cuerpo en condición normal debe tener un valor de intensidad mayor en comparación con un cuerpo de agua inundado con superficies de aguas abiertas. Es importante resaltar que la señal de radar también pierde intensidad en superficies poco rugosas, es decir completamente planas, como es el caso de los campos de cultivo alejados del río, estos al encontrarse desnudos pueden imitar este comportamiento, por lo que se necesita aplicar filtros morfológicos para identificar con precisión áreas netamente inundadas, filtros que veremos más adelante.

4.4.2.16 Extracción de la información

Exportamos la información obtenida en el software SNAP en formato *GeoTIFF* para poder trabajar en el software QGIS, software de sistema de información geográfica de código libre que nos permitió manipular esta información para los fines de la investigación (ver **Figura 76**).

Figura 76. Exportar información desde SNAP.



4.4.2.17 Extracción de áreas con mayores cambios

En primera instancia se importó el archivo ráster que contiene las 6 clases identificadas mediante el algoritmo *K-Means Clustering*, posterior a esta importación se realizó una reclasificación las clases obtenidas, otorgándole el valor de 1 a la clase de mayor cambio (representada por la clase 6, de valor = 5) y el valor de 0 a las restantes (ver **Figura 77**). Posterior a esta reclasificación se vectoriza la información y nos quedamos con la capa de valor 1 (mayor cambio). (Ver **Figura 78**)

Figura 77. Reclasificación de las clases obtenidas por el algoritmo *K-Means Clustering*.

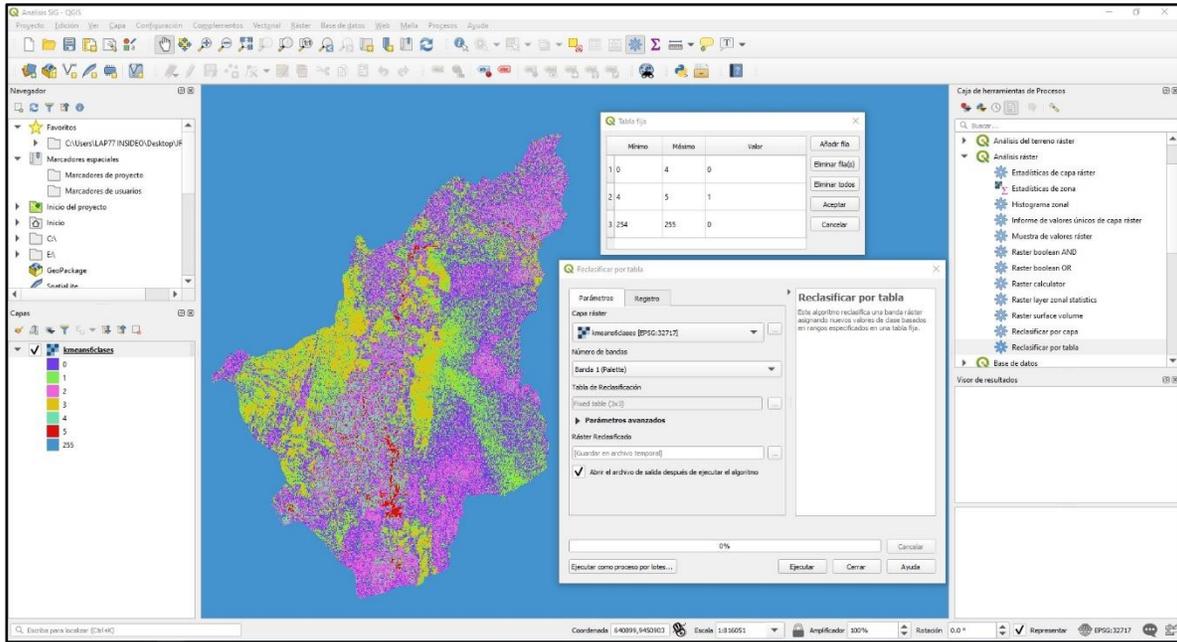
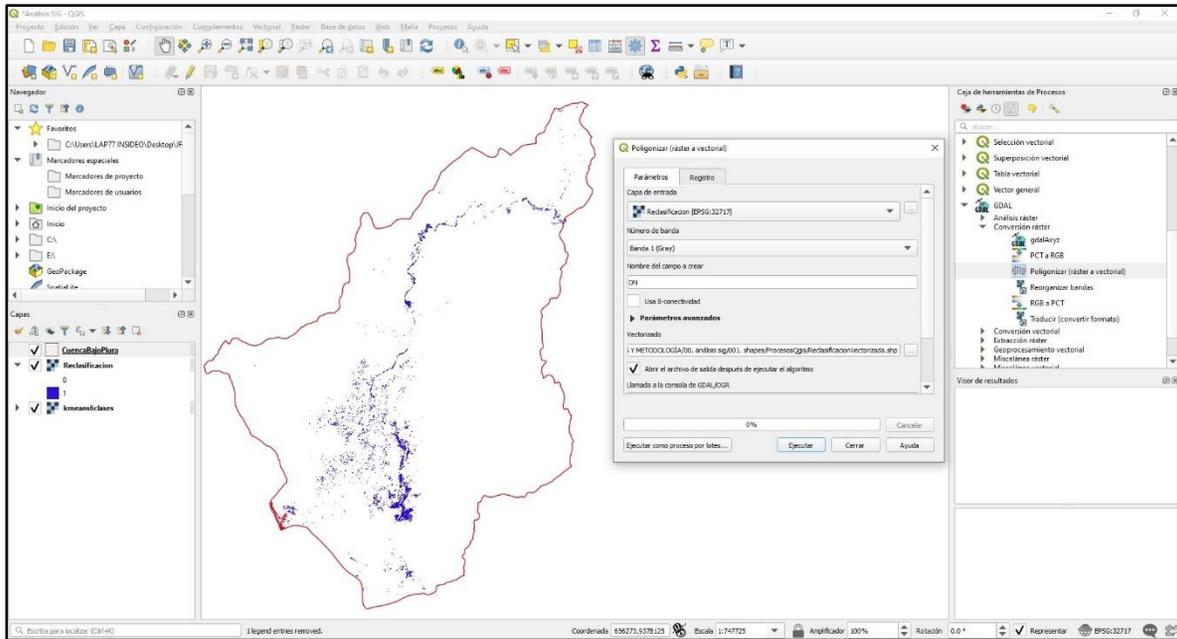


Figura 78. Vectorización de la clase de interés.



4.4.2.18 Filtro Morfológico

El filtro morfológico, es un factor muy importante dentro de la determinación de áreas inundadas, ya que como se mencionó anteriormente, los cuerpos que presentan bajos niveles de intensidad en la imagen SAR pueden ser superficies de agua abierta (espejos de agua) o superficies con poca rugosidad (cuerpos lisos), asimismo, dentro de nuestra área de estudio se presentan superficies agrícolas que al realizar su transición de etapa de cultivo (superficie rugosa) a etapa de no cultivo (superficie lisa) puede entrar en confusión con una superficie de agua abierta, es así que para evitar lo mencionado se elabora un filtro basado en la morfología, es decir, basado en el relieve y las zonas de afectación históricas de las inundaciones. El filtro morfológico de la presente investigación está compuesto específicamente por:

- 1) Áreas de exposición a inundación históricas registradas en Piura con periodos de retorno de hasta 50 años ofrecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). (ver **Figura 79**)
- 2) Áreas de influencia para cuerpos de agua permanentes registrados en la cuenca Bajo Piura (ver **Figura 79**), las cuales a su vez siguen el siguiente criterio: a) 2 km de influencia para ríos, lagos y zonas húmedas continentales y b) 200 metros para quebradas, drenajes y vertientes. Los cuerpos de agua permanentes tienen como fuente el IGN, la ZEE y las Formaciones Vegetales obtenidas del MINAM, los cuales fueron actualizados en base a la imagen radar previa al evento debido a su naturaleza cambiante, como fue el caso del río Piura.

Los dos criterios mencionados están representados por áreas geográficas espaciales, las cuales son unificadas, obteniendo como resultado una única área geográfica espacial la cual es considerada como el “Área de influencia del filtro morfológico” (ver **Figura 80**). Esta área de influencia excluye los cuerpos identificados aparentemente como cuerpos inundados que no se encuentran dentro de ella, al no cumplir con los criterios morfológicos necesarios

Figura 79. Generación del área de influencia del filtro morfológico.

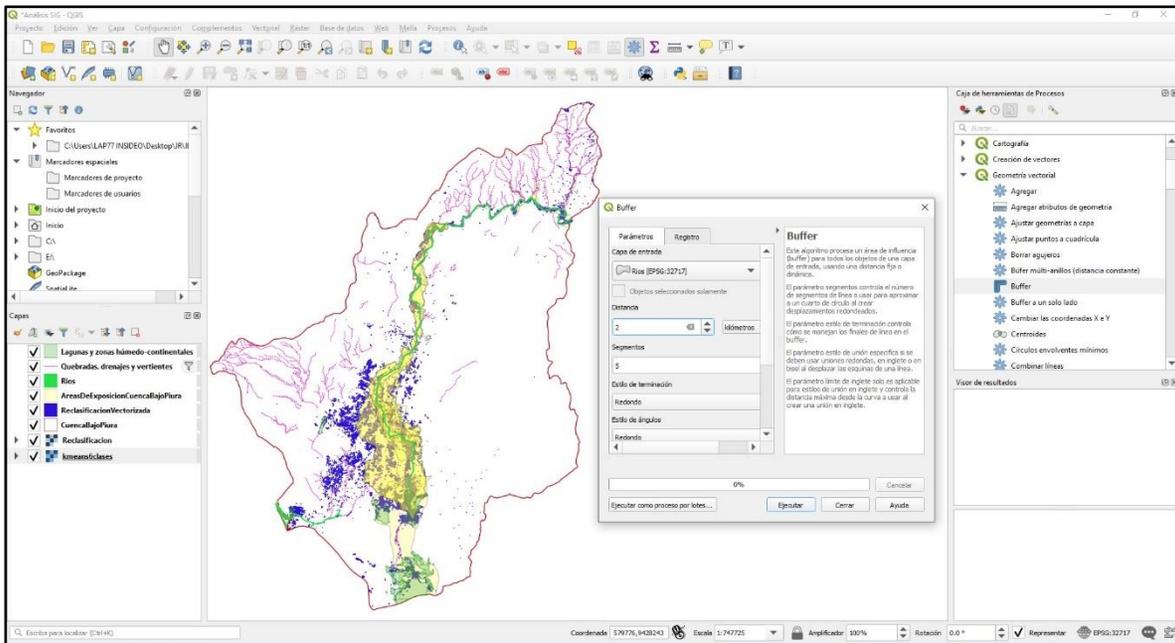
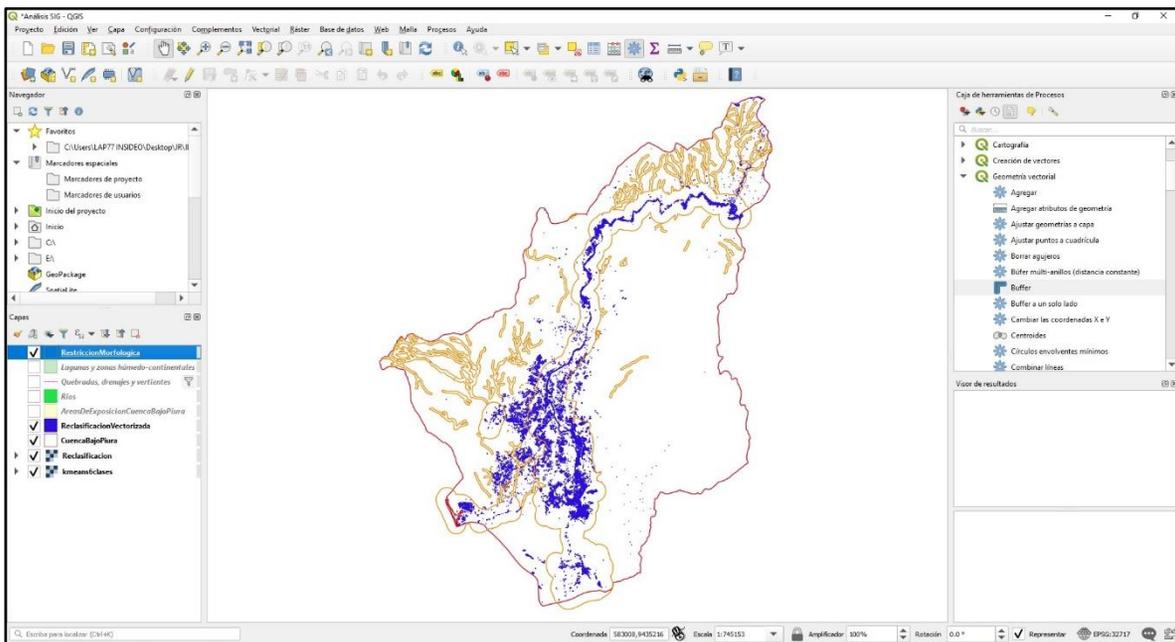
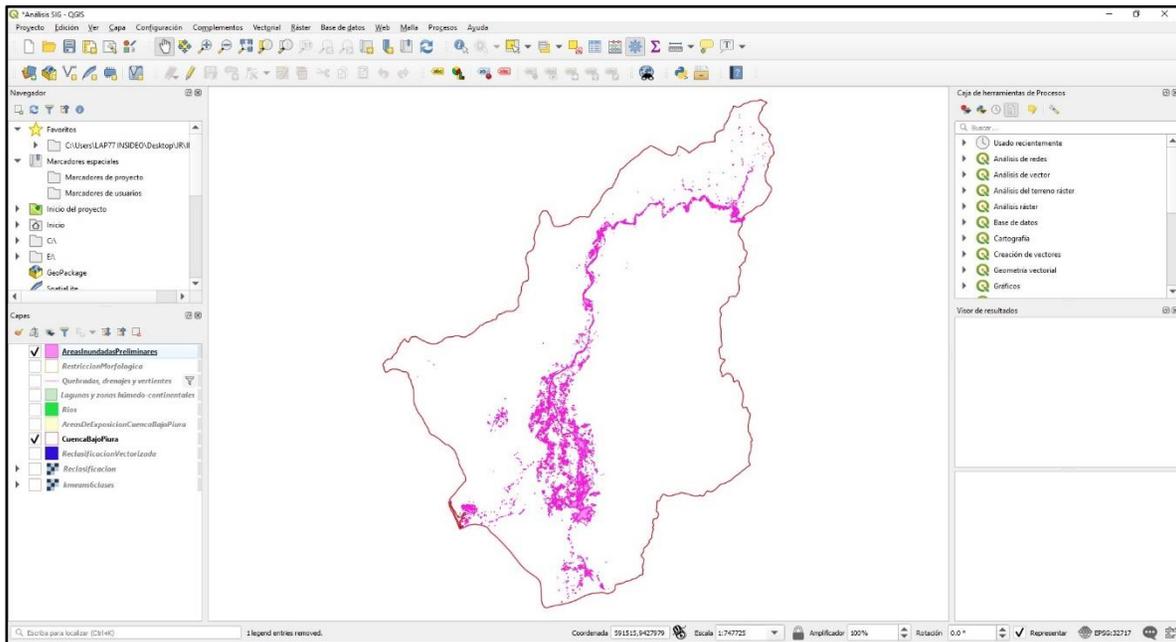


Figura 80. Área de influencia del filtro morfológico.



Finalmente se procedió, a restringir las áreas vectorizadas que se encontraban fuera del área de influencia generada, generando así las áreas inundadas preliminares (ver **Figura 81**).

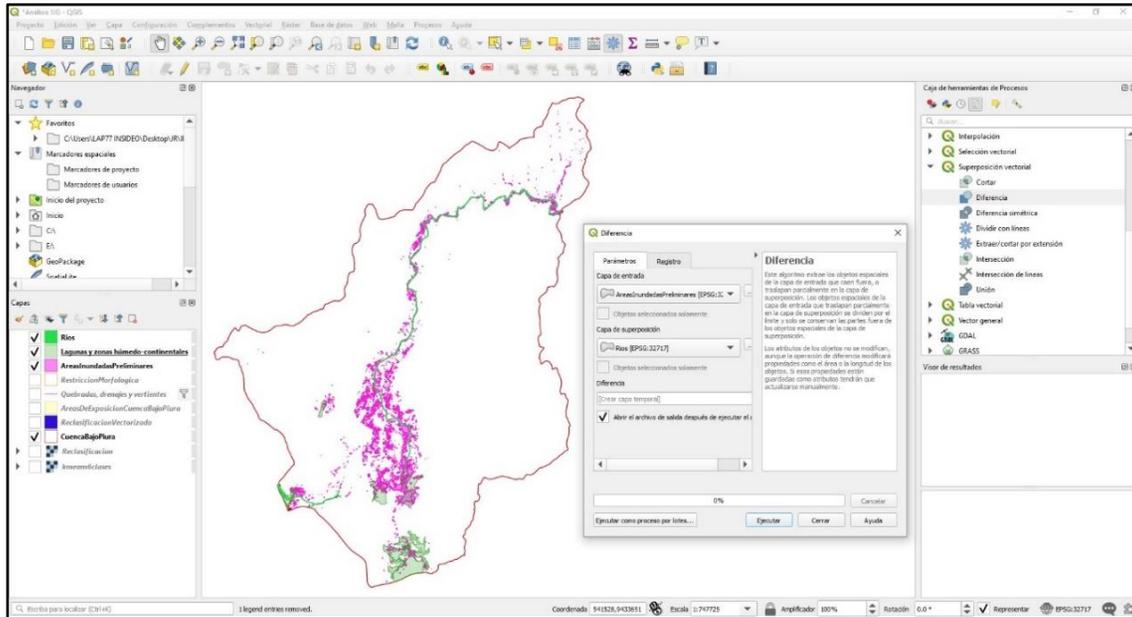
Figura 81. Áreas inundadas preliminares.



4.4.2.19 Filtro de áreas

Es importante mencionar que las áreas inundadas preliminares se encuentran vectorizadas a partir de un archivo ráster, lo que genera que la información se encuentre con una geometría cuadrática propio de los píxeles, los cuales pueden sobre estimar las áreas cercanas a los cuerpos de agua, además, es importante destacar que, en el caso de los cuerpos de agua, como, por ejemplo, las lagunas, son de naturaleza cambiante, sin embargo, estas presentan un área de cobertura registrada en el tiempo. Es por ello que, en base a lo mencionado previamente, se procedió a realizar la diferencia de las áreas inundadas preliminares con los cuerpos de agua de magnitud poligonal (ríos, lagunas y zonas húmedo continentales) identificados en nuestra área de estudio con la finalidad de no sobrestimar áreas inundadas. (ver **Figura 82**).

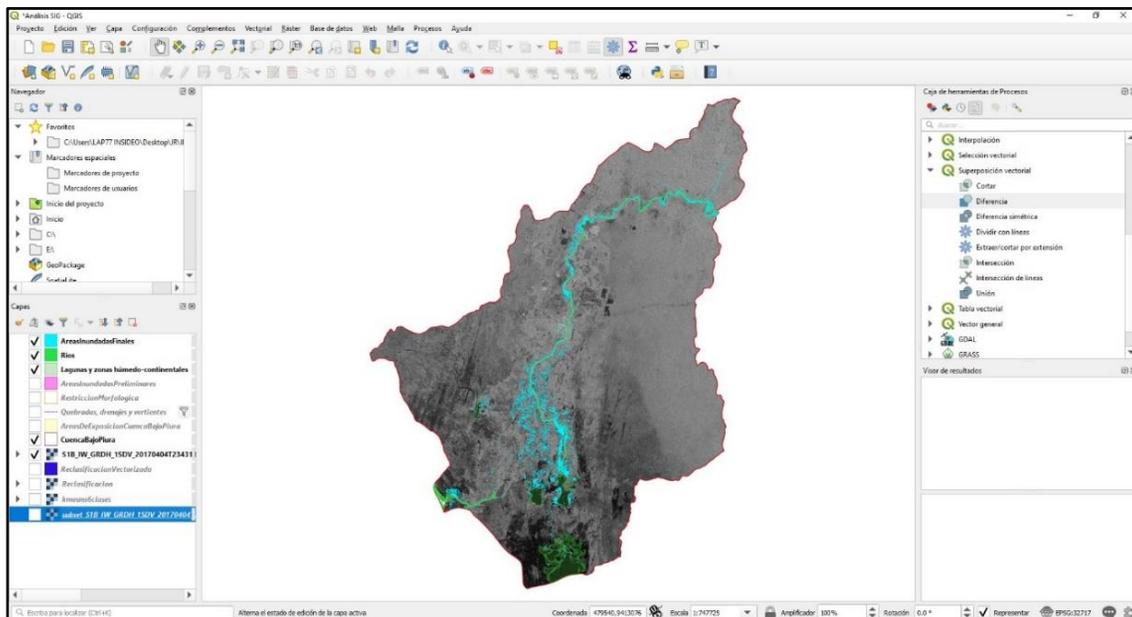
Figura 82. Diferencia de áreas inundadas preliminares y cuerpos de agua.



4.4.2.20 Determinación de áreas inundadas

Los pasos realizados previamente, contribuyen de manera significativa para obtener un resultado confiable y es en base a estos que se presentan las áreas inundadas en la cuenca Bajo Piura obtenidas a partir de imágenes SAR. (ver **Figura 83**)

Figura 83. Áreas inundadas en la cuenca Bajo Piura.

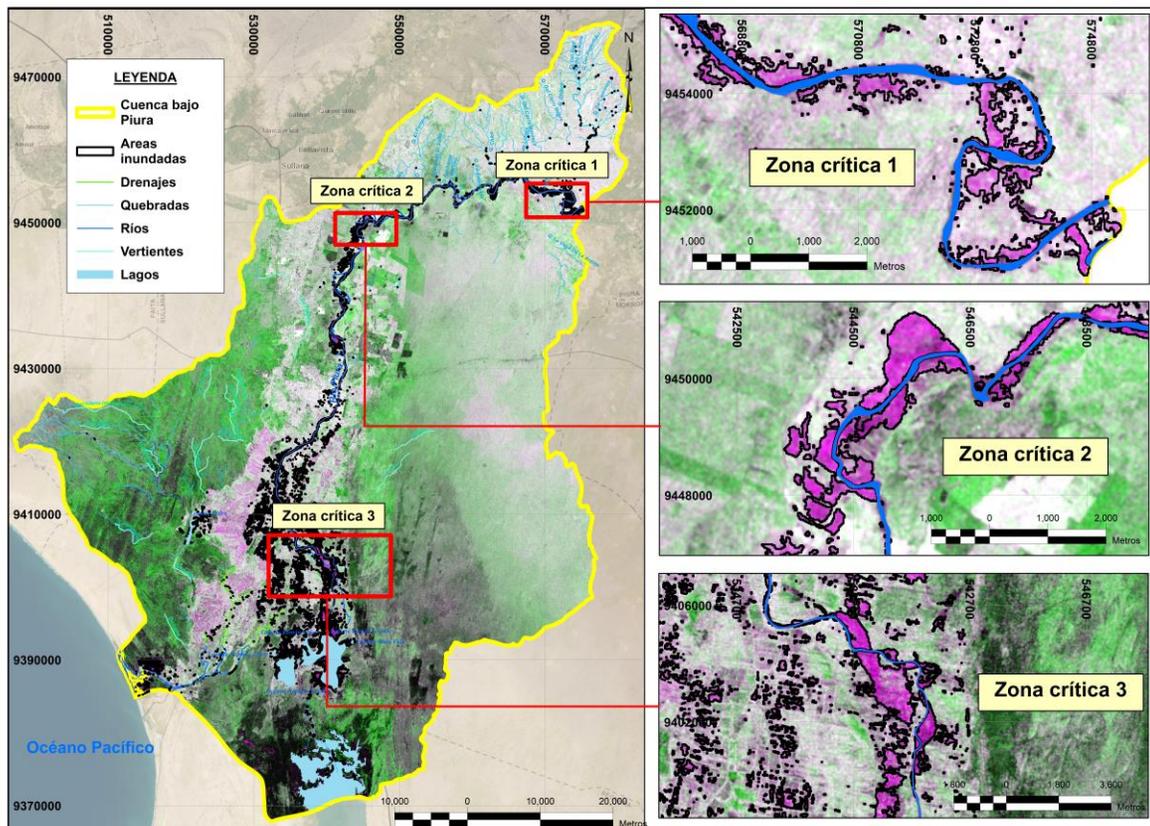


CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1 Detectar y mapear las inundaciones mediante imágenes SAR, usando la técnica *K-Means Clustering* para fines de evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño, en la cuenca Bajo Piura, región Piura.

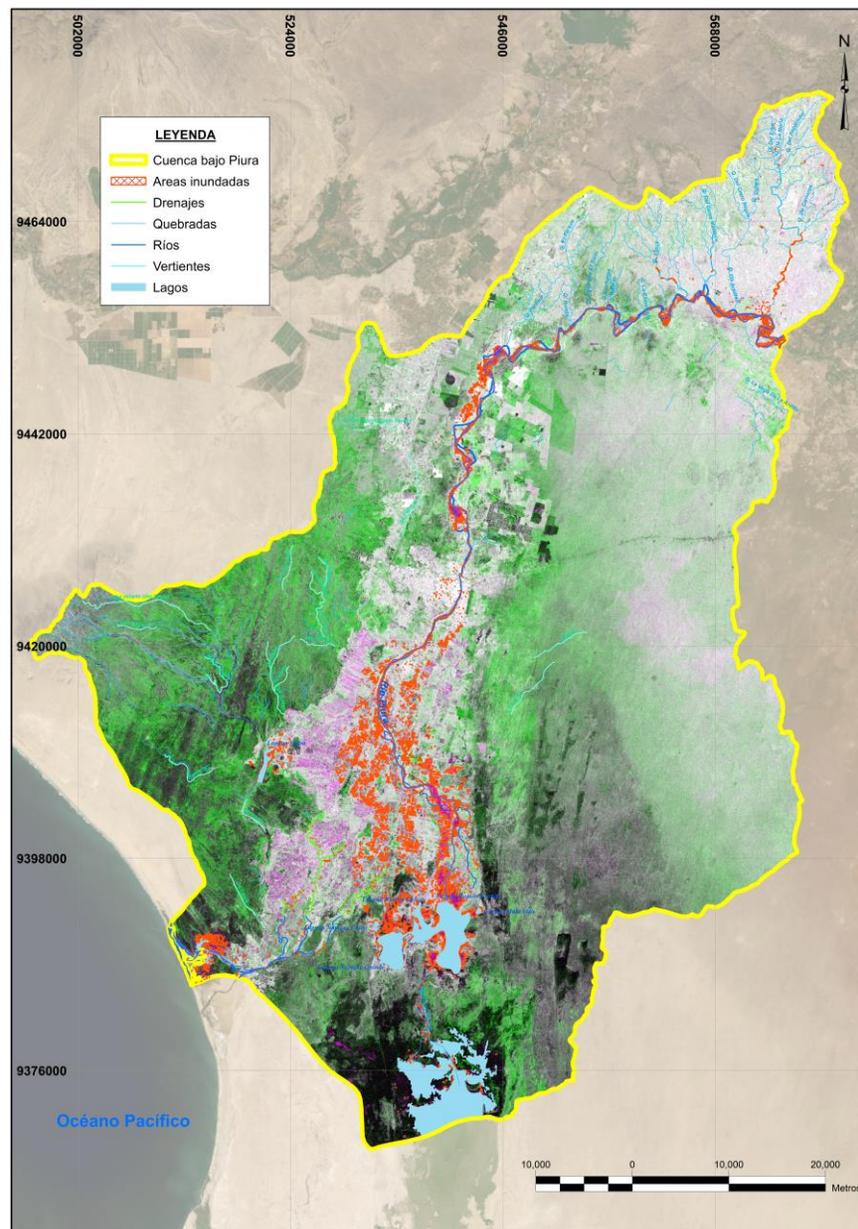
Las áreas inundadas de la cuenca Bajo Piura, detectadas y mapeadas con la imagen SAR RGB para las fechas analizadas presentan una tonalidad morada, que indica la variación de decibeles entre las imágenes, asimismo los polígonos negros que engloban esta tonalidad representan las áreas inundadas. En la **Figura 84** se resaltan 3 zonas críticas inundadas identificadas.

Figura 84. Zonas críticas de áreas inundadas en la cuenca Bajo Piura.



La extensión de las áreas de inundación mapeadas ascendió a un total de 5 402,85 ha, evidenciándose que el mayor impacto ocurrió en el sector agrícola de tipo extensivo y temporal, teniendo como consecuencia un impacto negativo a la economía de la población que se encontraba asentada en las localidades aledañas al río Piura. En la **Figura 85** se presentan en una mejor escala la extensión de la inundación a lo largo de la cuenca Bajo Piura.

Figura 85. Áreas de inundación mapeadas en la cuenca Bajo Piura.



5.2 Interpretar la dinámica de la inundación mediante el análisis de imágenes SAR para evaluar los impactos de desastres ocasionado por el fenómeno El Niño.

La dinámica de la inundación en la cuenca Bajo Piura, por la manifestación del evento El Niño, se interpretó mediante la prospección satelital, tanto en el ámbito óptico y radar, para ello se empleó una imagen previa al evento y otra imagen durante su desarrollo (máxima pulsación), es decir, se simplificó al solo emplear dos imágenes SAR para dos fechas: (1) antes del evento y (2) durante el evento, en la **sección 4.4.1** se detallaron las imágenes empleadas resultado de la prospección, asimismo, el empleo de esta metodología coincide con la desarrollada por Liu et al. (2019) para el caso de inundación en Berna, Suiza.

Es importante mencionar que el empleo de dos imágenes y la detección de cambios entre estas ayudan reduciendo en gran medida el ruido *speckle* que es uno de los principales factores limitantes en los análisis de las imágenes SAR, además fue importante que estas coincidan en la dirección de vuelo (ascendente) y polarización (VV+HH).

5.3 Aplicar un filtro morfológico para una adecuada determinación de áreas inundadas para evaluar los impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño.

Se aplicó un filtro morfológico basado en los antecedentes de inundación registrados dentro de la cuenca Bajo Piura, así como también en base a áreas de influencia generadas a partir de los cuerpos de agua, en ambos casos este tipo de filtros ayudan a reducir posibles confusiones de áreas de inundación producto de la complejidad de las imágenes SAR, obteniendo así áreas de inundación más precisas. La aplicación de este filtro se desarrolló en la **sección 4.4.2.18**.

5.4 Identificar la información cartográfica a requerir para la evaluación de los principales impactos del desastre.

Se identificó que la evaluación de impactos se encuentra vinculada al proceso de respuesta, señalado en el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, considerándose para la investigación la etapa de evaluación rápida del manual de Evaluación de Daños y Necesidades – EDAN PERÚ, este se ejecuta dependiendo de la accesibilidad a la zona de impacto, razón por la cual un apoyo muy esencial serían las imágenes satelitales, a través de los mapeos de la zona de impacto, siendo la imagen radar una de las más eficaces a través del mapeo de áreas inundadas, la cual nos permitirá la evaluación de las posibles afectaciones de elementos del medio social y económico, que se encuentran expuestos directamente a las áreas de inundación. Para la presente investigación se uniformizó la condición a afectados debido a que no se podría discriminar la clasificación por condición (damnificado o afectado). Asimismo, para el análisis eficaz de la zona de impacto se requiere que la información se encuentre completa y actualizada de cada medio a evaluar, para una toma de decisiones adecuada y brindar una respuesta rápida de las autoridades en los tres niveles de gobierno, en base a lo mencionado, para la cartografía de evaluación de impactos se consideró como fuente de información a las plataformas digitales de cada entidad encargada de la recopilación y aprobación de la información vectorial correspondiente, determinándose trabajar con los siguientes medios y elementos afectados recurrentemente:

- Medio Social: Centros poblados, Educación, Salud.
- Medio Económico: Uso de suelo, Vías de acceso.

5.4.1 Medio social

Educación

Los servicios educativos que se encuentran espacialmente en el área de estudio son un total de 1209 instituciones; de los cuales 4 instituciones educativas son consideradas afectadas debido a la exposición directa a las áreas de inundación mapeadas. Las cuales son mencionadas en la **Tabla 18** a continuación:

Tabla 18. Instituciones educativas afectadas.

N°	Código local	Centro educativo	Longitud	Latitud	Centro poblado
1	410667	20457 Cristo El Rey	-80,6446	-5,2023	Piura
2	417107	Jorge Chávez	-80,3455	-4,9279	Andrés Razuri
3	766709	<i>International High School of Computer Enterprise - IICER</i>	-80,62956	-5,19145	Piura
4	413595	Heroica Villa	-80,67139	-5,26137	Catacaos

Figura 86. Comparación de instituciones educativas afectadas.

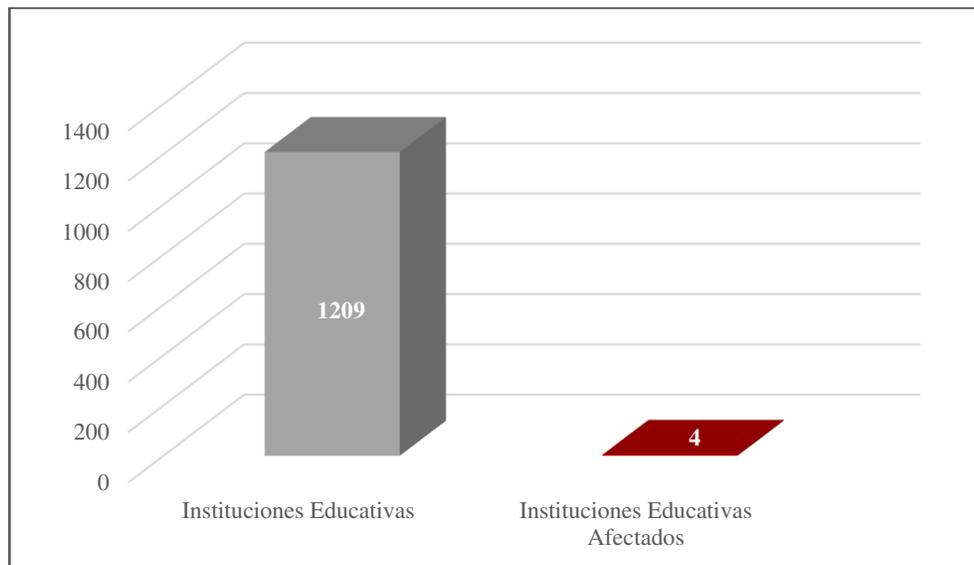
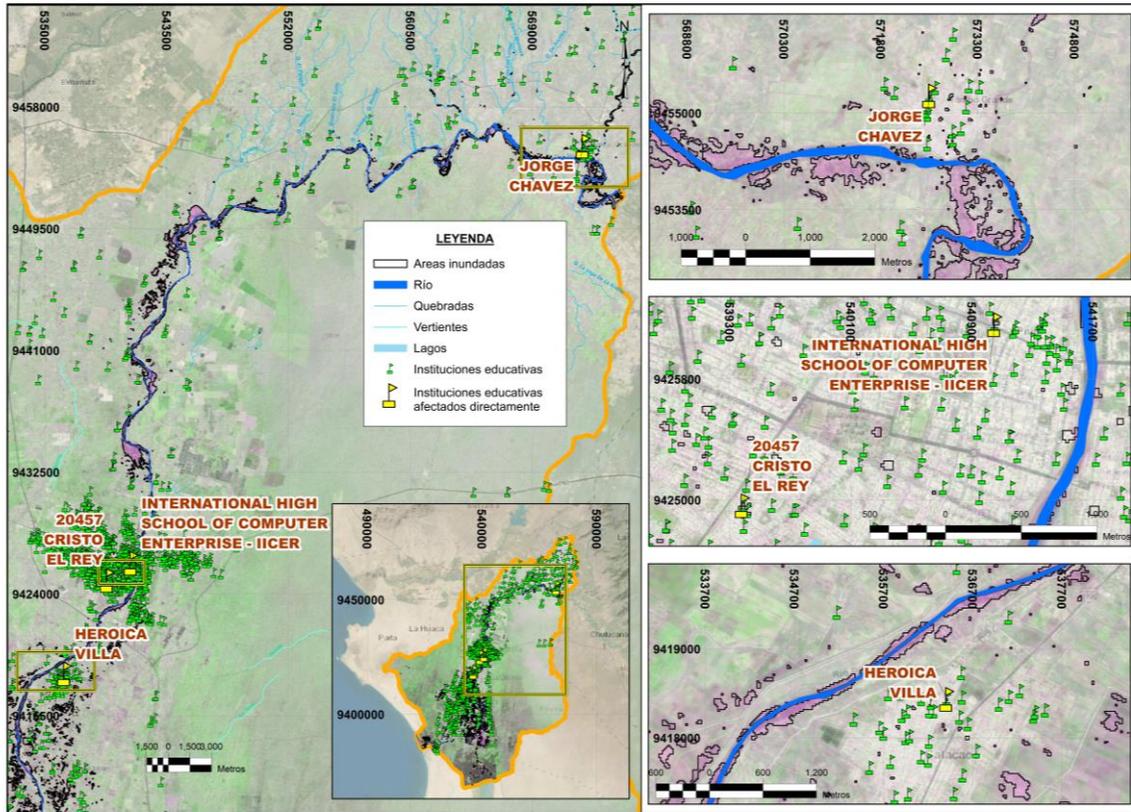


Figura 87. Comparación de instituciones educativas afectadas.



Centros poblados

Se evaluaron los centros poblados que se encuentran espacialmente en el área de estudio, siendo un total de 679; de los cuales 6 centros poblados se encuentran expuestos a las áreas de inundación mapeadas, considerándose afectados debido a la ubicación directa dentro de las áreas de inundación. Los cuales son mencionadas en la **Tabla 19** a continuación:

Tabla 19. Centros poblados expuestos a las áreas de inundación mapeadas.

N°	Centro poblado	Distrito	Provincia	Departamento	Longitud	Latitud
1	Hacienda Mira Garzón	La Unión	Piura	Piura	-80,7226	-5,3880
2	Alto de Chato	Cura Mori	Piura	Piura	-80,6753	-5,3572
3	Hacienda Cruz Verde	La Arena	Piura	Piura	-80,7247	-5,3567

N°	Centro poblado	Distrito	Provincia	Departamento	Longitud	Latitud
4	Los Mores	Cura Mori	Piura	Piura	-80,6481	-5,3921
5	Pan de Azúcar	Cura Mori	Piura	Piura	-80,6299	-5,3919
6	Piedral Antiguo	El Tallan	Piura	Piura	-80,6421	-5,4433

Figura 88. Comparación de centros poblados afectados.

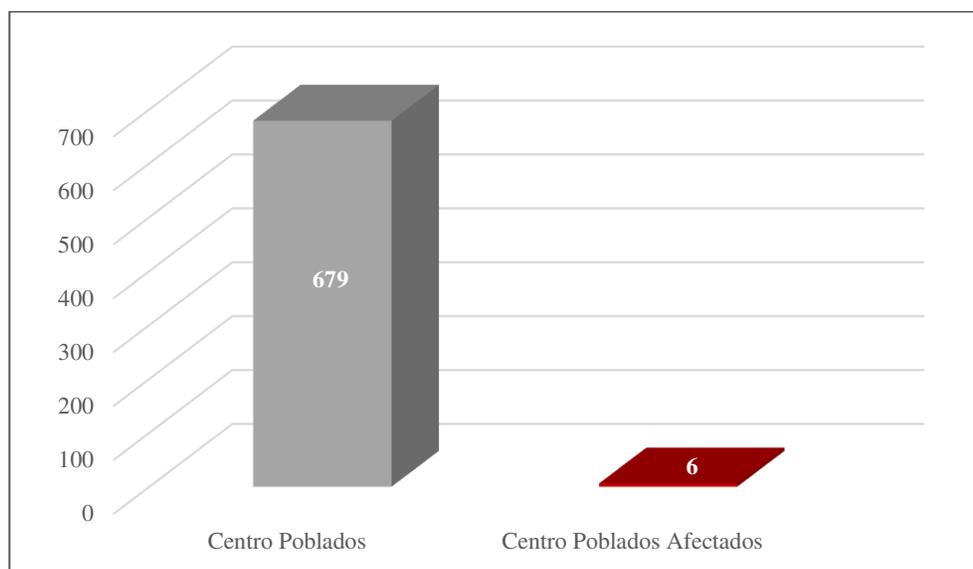
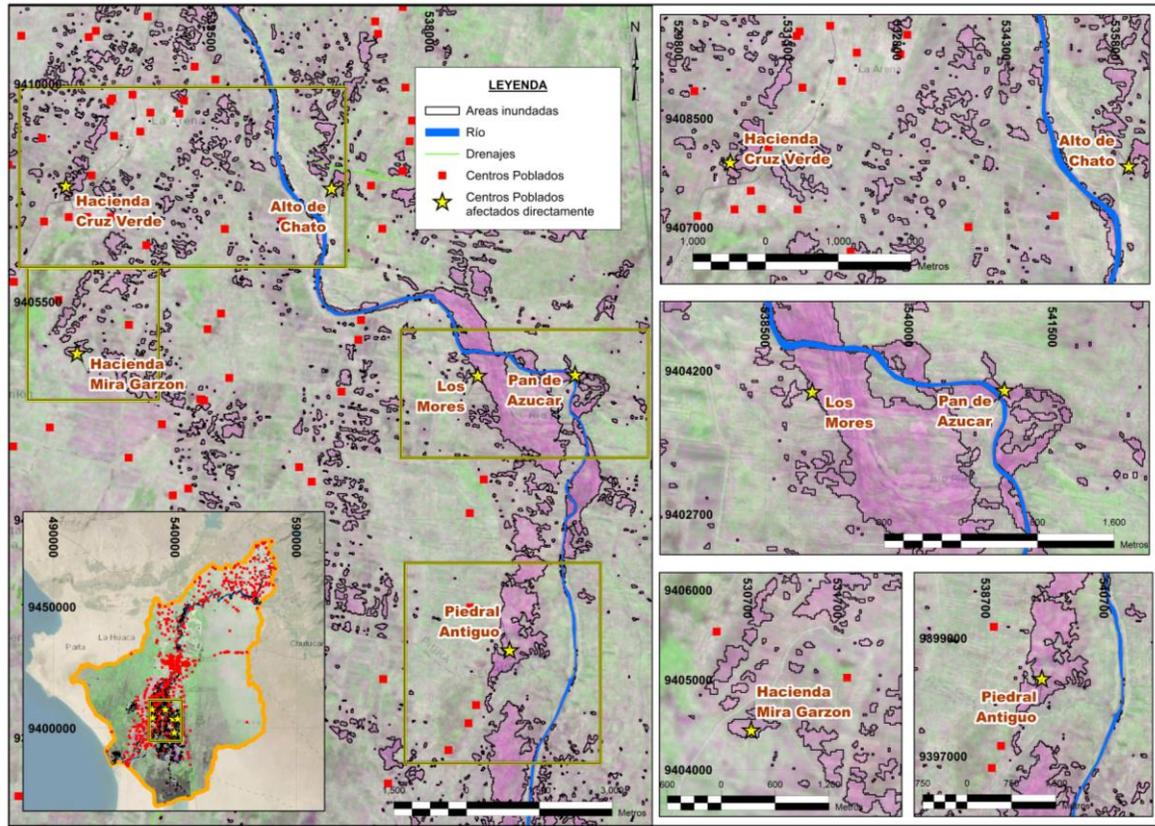


Figura 89. Centros poblados afectados.



Salud

Se evaluaron las instituciones de salud que se encuentran espacialmente en el área de estudio, siendo un total de 98; de los cuales no se encontró la exposición directa de la infraestructura a las áreas de inundación mapeadas.

5.4.2 Medio económico

Uso de suelo

Las áreas de uso de suelo que se encuentran en el área de estudio abarcan un total de 474 667,12 ha; de las cuales 5 402,85 ha se encuentran expuestas directamente a las áreas de inundación mapeadas, teniéndose como áreas afectadas a las siguientes unidades: 73,45 % de agricultura intensiva, 0,54% de agricultura temporal, 2,1% de bosque natural, 0,001% de espacios con

vegetación escasa, 6,7% de pecuario extensivo – bosques naturales, 11,36% de pecuario extensivo – vegetación arbustiva y/o herbáceas naturales, 5,46% sin uso, 0,002% de vegetación arbustiva y/o herbáceas naturales, 0,07% de zonas urbanas, 0,33% de zonas urbanas e industriales. Las cuales son mencionadas en la **Tabla 20** a continuación:

Tabla 20. Uso de suelo expuestas a las áreas de inundación mapeadas.

N°	Uso de Suelo	Áreas inundadas (ha)	Porcentaje (%)	Uso de suelo en el área de estudio (ha)	Porcentaje respecto al uso de suelo en el área de estudio (%)
1	Agricultura Intensiva	3968,6	73,45	98460,74	4,03
2	Agricultura Temporal	29,15	0,54	4829,21	0,60
3	Bosque Natural	113,42	2,1	13170,78	0,86
4	Espacios con Vegetación Escasa	0,05	0,001	12161,42	0,001
5	Pecuario Extensivo - Bosques Naturales	361,7	6,7	219364,76	0,16
6	Pecuario Extensivo - Vegetación Arbustiva y/o Herbáceas Naturales	613,93	11,36	46945,59	1,31
7	Sin Uso	294,83	5,46	41157,81	0,72
8	Vegetación Arbustiva y/o Herbáceas Naturales	0,1	0,002	27268,13	0,001
9	Zonas Urbanas	3,51	0,07	1911,62	0,18
10	Zonas Urbanas e Industriales	17,57	0,33	4479,02	0,39
Total general		5 402,85	100,00	474 667,12	8,26

Figura 90. Unidades de usos de suelos afectados.

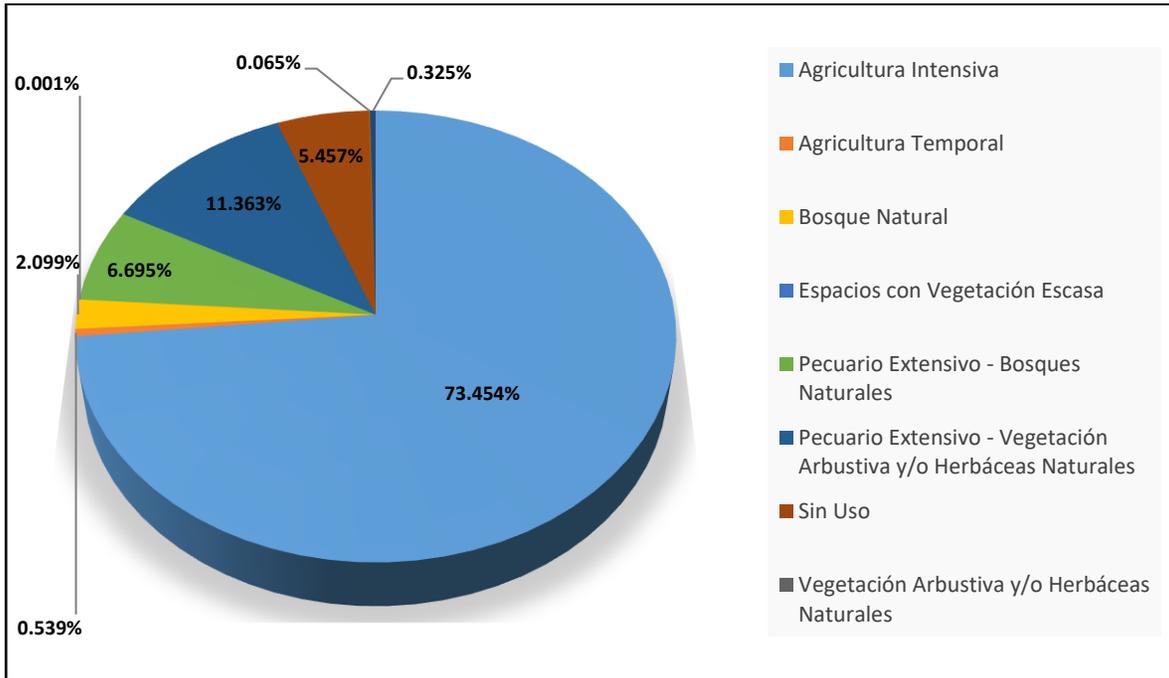
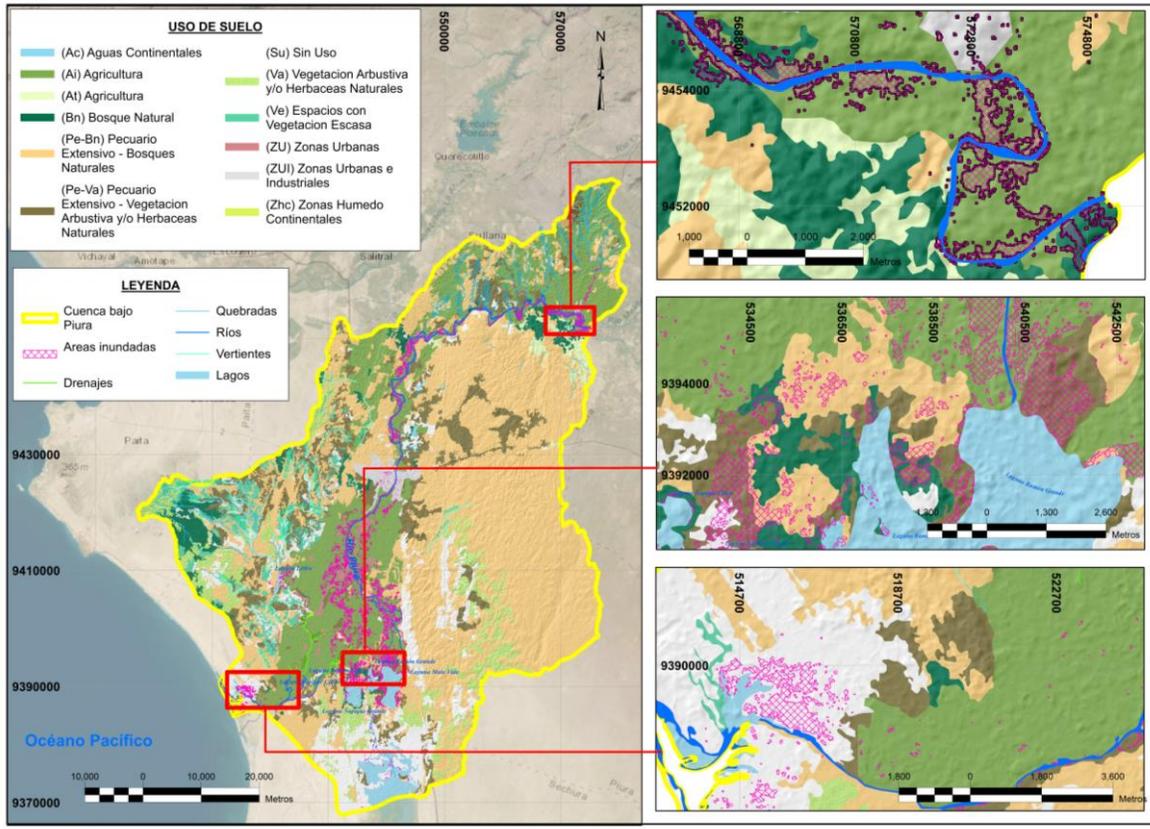


Figura 91. Uso de suelo afectado.



Vías de acceso

Se evaluaron las vías de acceso del área de estudio, en base a la información del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, considerándose los 3 tipos de vías según su jerarquía: red vial nacional, red vial departamental y red vial vecinal.

Red vial nacional

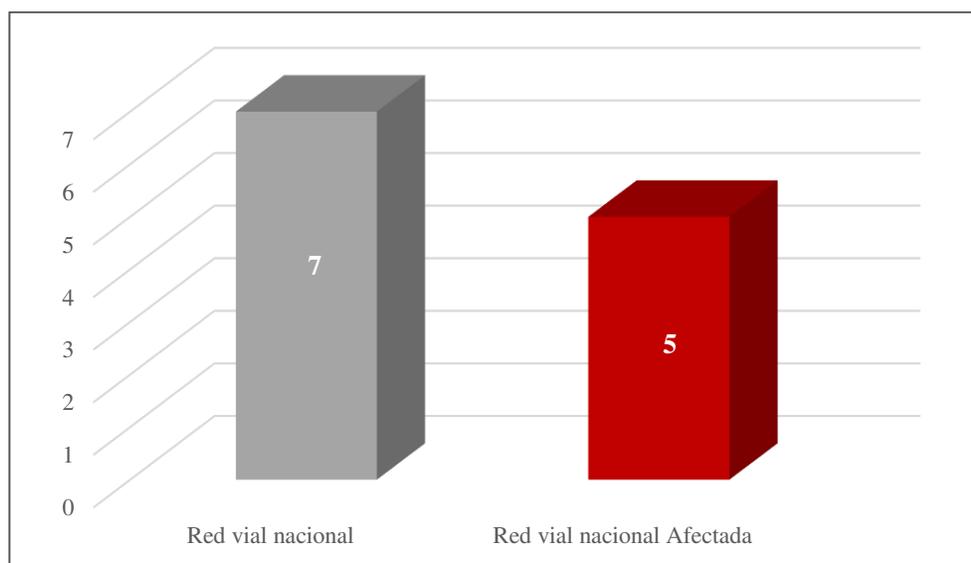
Las vías nacionales que se encuentran en el área de estudio son 7, de los cuales 5 rutas se encuentran expuestas directamente a las áreas mapeadas de inundación, teniendo como rutas afectadas a las siguientes: PE-1N, PE-1NJ, PE-1NK, PE-1NR y PE-1NU.

Tabla 21. Red vial nacional expuestas a las áreas de inundación mapeadas.

N°	Ruta	Trayecto	Ancho	Tipo de Superficie	Estado	Longitud afectada (Km)
1	PE-1N	I.V. Santa Anita - I.V. Huacho - Chimbote - Ov. La Marina (PE-10 A) - Ov. El Milagro - Paiján - Mocupe - Reque - Chiclayo - Lambayeque - Pte. Grau - Pte. Sullana Dv. Talara - Máncora - Zorritos - Tumbes - Pte. Internacional de La Paz (fr. Ecuador).	9,9	Asfaltado	Bueno	0,014
2	PE-1NJ	Emp. PE-1N (Dv. Mochumí) - Mochumí - Illimo - Pte. La Leche - Pte. Salas - Pte. Anchovira - Pte. Chicoma - Pte. Motupe - Motupe - Dv. Jaén (PE-04 B) - Pte. Olmos - Olmos - Pte. Cascajal - Insculas - Pte. Insculas - Las Animas - Dv. Huancabamba (PE-0)	12	Asfaltado	Bueno	0,040
3	PE-1NK	Emp. PE-1N (Dv. Catacaos) - Catacaos - Pte. Independencia - Pte. Independencia - La Arena - Vice - Sechura - Pte. Virrila - Emp. PE-04 (Dv. Bayovar)	7,2	Asfaltado	Bueno	0,022
4	PE-1NK	Emp. PE-1N (Dv. Catacaos) - Catacaos - Pte. Independencia -	7,2	Asfaltado	Bueno	0,014

N°	Ruta	Trayecto	Ancho	Tipo de Superficie	Estado	Longitud afectada (Km)
		Pte. Independencia - La Arena - Vice - Sechura - Pte. Virrila - Emp. PE-04 (Dv. Bayovar)				
5	PE-1NR	Emp. PE-1N L (Dv. Tambogrande) - Tambogrande - Platillos - Paccha - Chulucanas - Morropon - Paltashaco - Chalaco - Pacaipampa - Emp. PE-3N (Curilcas)	0	Asfaltado	Información no disponible	0,022
6	PE-1NU	Emp. PE-1N J (El Veintiuno) - La Loma - Emp. PI-107 (Tambo Grande).	0	Asfaltado	Bueno	0,086
Total general						0,198

Figura 92. Comparación de red vial nacional afectada.



Red vial departamental

Las vías departamentales que se encuentran dentro del área de estudio son 3: PI-103, PI-126 y PI-127, de las cuales no se encontraron exposición directa de rutas a las áreas mapeadas de inundación.

Red vial vecinal

Las vías vecinales que se encuentran dentro del área de estudio son un total de 89, de cuales se evaluaron que 23 rutas se encuentran expuestas directamente a las áreas mapeadas de inundación, teniendo como rutas afectadas a las siguientes, mencionados en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Red vial vecinal expuestas a las áreas de inundación mapeadas.

N°	Ruta	Trayecto	Ancho	Superficie	Estado	Longitud afectada (Km)
1	PI-763	Emp. PE-1N L - Cruceta - Emp. PI-762 (San Isidro).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,046
2	PI-984	Emp. PE-1N (Piura) - Mercedes - La Palma - El Molino - Curumuy.	a 6,00 m	Asfaltado	Bueno	0,022
3	PI-1010	Emp. PI-1011 - Río Viejo - Penal - San Martín de Letira - Emp. PI-1011 (Santa Elena).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,054
4	PI-1011	Emp. PE-1N K - Río Viejo - Santa Elena - Loma Negra.	a 6,00 m	Asfaltado	Malo	0,032
5	PI-1012	Emp. PI-1010 - Emp. PI-1011.	3,50 a 4,50 m	Sin afirmar	Regular	0,041
6	PI-1013	Emp. PE-1N K (Dv. La Arena) - Laguna de Los Prados - Emp. PI-1010.	4,50 a 5,50 m	Trocha	Malo	0,081
7	PI-1014	Emp. PI-1010 - El Peñal - Emp. PI-1013.	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,131
8	PI-1015	Emp. PE-1N K (Dv. La Arena) - Pampa de Los Silva - Emp. PI-1011 (Río Viejo).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,069
9	PI-1020	Emp. PE-1N - La Legua - San Jacinto - Paredones - Mocara - Emp. PE-1N K.	a 6,00 m	Asfaltado	Bueno	0,021
10	PI-1020	Emp. PE-1N - La Legua - San Jacinto - Paredones - Mocara - Emp. PE-1N K.	4,50 a 5,50 m	Trocha	Malo	0,111
11	PI-1021	Emp. PE-1N K - Emp. PI-1023 (Nuevo Pedregal).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,149
12	PI-1023	Emp. PE-1N K - Villa Pedregal - Cucangara - Cura Mori - Chato Grande - Chato Chico - Emp. PE-1N (Nuevo San Pedro).	4,50 a 5,50 m	Sin afirmar	Regular	0,094
13	PI-1026	Emp. PE-1N - (Nuevo San Pedro) - Chato Grande.	4,50 a 5,50 m	Afirmado	Regular	1,096
14	PI-1028	Emp. PE-1N K - Emp. PI-1029 (Alto de Los Mores).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,069

N°	Ruta	Trayecto	Ancho	Superficie	Estado	Longitud afectada (Km)
15	PI-1029	Emp. PE-1N K (La Arena) - Nuevo Alto de los Mores - Sincape.	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,049
16	PI-1030	Emp. PE-1N K (La Arena) - Montegrande - Chatito - La Escolastica - Emp. PI-1034.	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,114
17	PI-1033	Emp. PE-1N K (Dos Altos) - Canizal Grande - Emp. PI-1030.	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,242
18	PI-1035	Emp. PI-1034 (Dv. El Tallan) - Emp. PI-1034 (Dv. Sinchao Chico).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,011
19	PI-1036	Emp. PE-1N (Nuevo Sinchao Chico) - Emp. PI-1035 (Dv. Sinchao Chico).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	1,290
20	PI-1037	Emp. PE-1N (Nuevo Tallan) - Emp. PI-1034 (Dv. Sinchao Chico).	3,50 a 4,50 m	Sin afirmar	Regular	0,721
21	PI-1038	Emp. PE-1N (Nuevo Piedral) - Piedral Antiguo - Emp. PI-1034 (Dv. El Tallan).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,643
22	PI-1048	Emp. PI-1040 (Dv. San Clemente) - La Florida - Dv. Antiguo Vega del Chilco - Antiguo Pozo Oscuro.	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,212
23	PI-1051	Emp. PI-1040 (Bernal-Chancay) - Onza Oro - Cristo Valga - Pte. Nueva Esperanza - Cerritos - Laguna Ñapique - Tres Brazos - Chutuque - Emp. PE-1N (Mala Vida).	3,50 a 4,50 m	Trocha	Malo	0,395
24	PI-1051	Emp. PI-1040 (Bernal-Chancay) - Onza Oro - Cristo Valga - Pte. Nueva Esperanza - Cerritos - Laguna Ñapique - Tres Brazos - Chutuque - Emp. PE-1N (Mala Vida).	a 6,00 m	Afirmado	Malo	0,002
25	PI-1056	Emp. PI-1051 (San Cristo) - Nuevo Chuper - Pte. Chirrirriche - Emp. PE-1058 (Sechura).	3,50 a 4,50 m	Afirmado	Bueno	0,022
Total general						5,718

Figura 93. Comparación de red vial vecinal afectada.

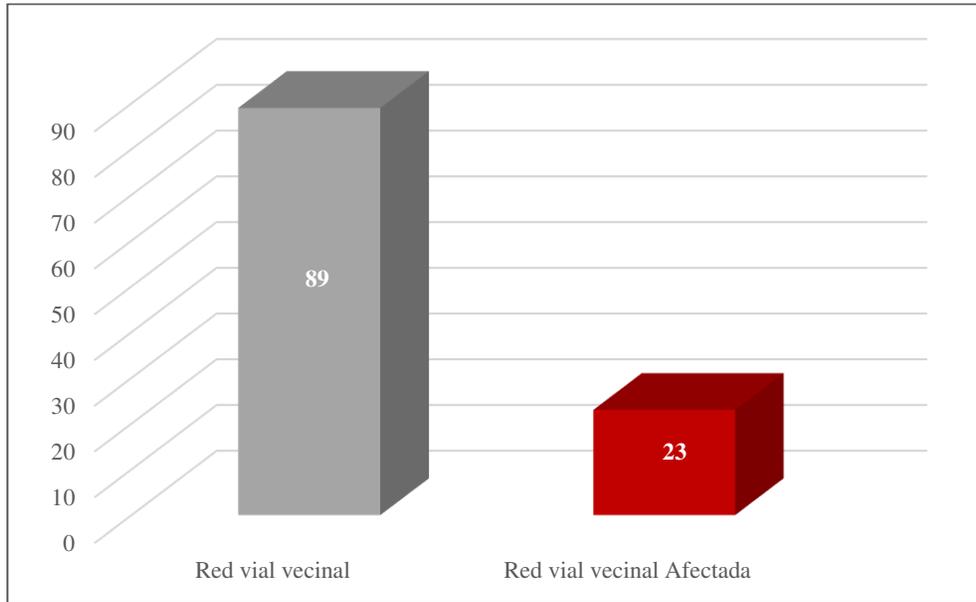
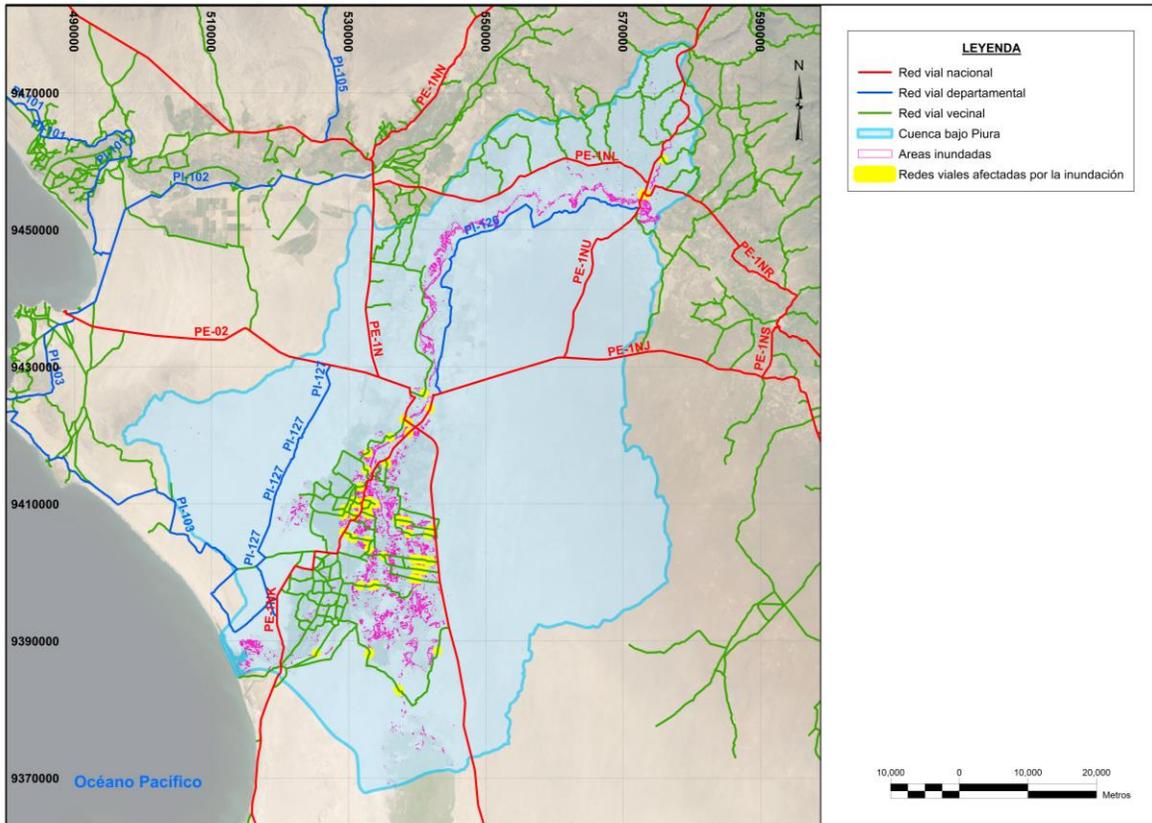


Figura 94. Redes viales afectadas.



5.5 Determinar la eficacia y ventaja del empleo del método *K-Means Clustering* para el análisis de inundaciones para futuros eventos del fenómeno El Niño y futuras evaluaciones de impactos de desastres.

En cuanto a la técnica de clasificación no supervisada K-Means Clustering empleada en la presente investigación, esta ha sido comparada con otros métodos tradicionales y manuales (supervisados), determinando su eficacia y ventaja en cuanto a precisión, sencillez y rápida ejecución, lo mencionado se desarrolla a mayor detalle en la **sección 6.1**.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

6.1 Discusión de resultados

En base a los resultados de las áreas de inundación obtenidas por el método *K-Means Clustering* de la presente investigación, se procede a realizar la validación de la metodología de clasificación a través de una matriz de confusión que nos permitirá extraer diversas estadísticas como el índice de Kappa y precisión global, que servirán de base para la validación de nuestra hipótesis general. Asimismo, se realiza la comparación de esta metodología con otras técnicas de clasificación, es decir, este enfoque permitirá la comparación de los métodos de clasificación supervisada (Umbral y *Random Forest*) y clasificación no supervisada (*K-Means Clustering*), para obtener una percepción más precisa de la capacidad del método planteado para el mapeo de inundaciones.

6.1.1 Validación de la metodología *K-Means Clustering*

Para poder realizar la validación de la metodología, se debe determinar la naturaleza de la muestra a emplear, siendo crucial para establecer un buen procedimiento de validación. A continuación, se detallan las características de la muestra empleada y las estadísticas generadas para la validación de la metodología, además es importante mencionar que esta validación se encuentra basada en lo estipulado por Emilio Chuvieco (1995), en su libro “Fundamentos de teledetección espacial”.

6.1.1.1 Tipo de muestra

El muestreo aleatorio simple fue establecido para la presente investigación, debido a que las clases finales de interés se resumen en dos: áreas inundadas y áreas no inundadas. Es así que esta aleatoriedad, brindará las mismas posibilidades a la muestra de pertenecer a cualquiera de las dos clases mencionadas dentro del área de estudio.

6.1.1.2 Tamaño de muestra

El tamaño de la muestra se estableció a partir de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}$$

Donde:

- **n**: Tamaño de la muestra.
- **N**: Tamaño del universo (población).
- **Z**: Abscisa de la curva normal para un determinado nivel de confianza (coeficiente de confianza).
- **p**: Probabilidad de acierto.
- **e**: Error estimado.

En base a lo establecido, los valores correspondientes para nuestra investigación son los siguientes:

a) **N** = 23 214 240, este valor se estableció a partir de la cantidad de pixeles correspondientes a nuestra área de estudio; b) **Z** = 1,96, este valor se obtiene debido a que se estableció un nivel de confianza de 95 % para la presente investigación; c) **p** = 0,5, este valor se obtiene debido a que se estableció un 50 % de probabilidad de acierto debido a la heterogeneidad de las clases y d) **e** = 0,05, este valor se obtiene debido a que se estableció un 5% de margen de error dispuesto asumir.

Entonces:

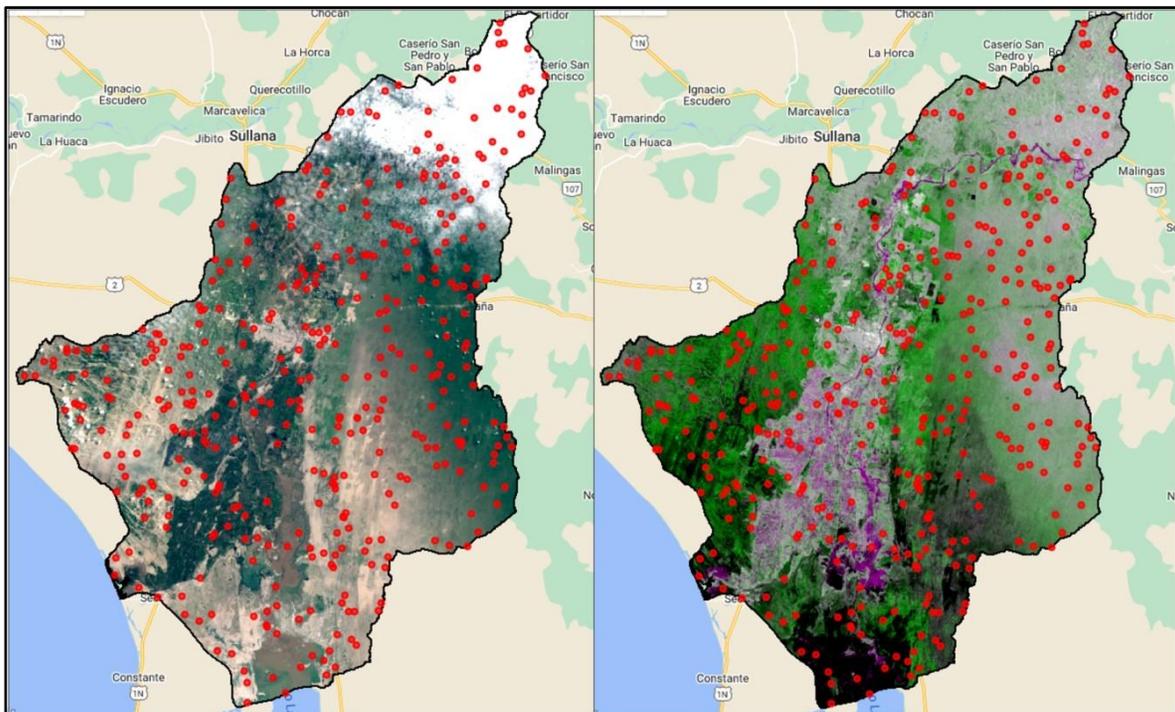
$$n = \frac{23214240 \cdot 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}{(23214240 - 1) \cdot 0,05^2 + 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)}$$
$$n = 384,15$$

Finalmente, el tamaño de la muestra para la investigación corresponde a 384,15, pero por términos estadísticos este se redondea al valor de 385.

La muestra se ve reflejada a través de establecimiento de 385 puntos aleatorios dentro del área de estudio, estos puntos aleatorios servirán como puntos de verdad del terreno (validación de la clasificación radar). Los puntos obtendrán información de la correspondencia a las clases de área inundada o no inundada, a través de un mosaico imágenes satelitales ópticas Sentinel-2 cercanas a la fecha de máximo impulso de inundación de radar que se usó durante la investigación, siendo las fechas de este mosaico óptico: 07-04-2017 y 20-04-2017.

Los puntos aleatorios se establecieron dentro del área de estudio mediante la aplicación de la herramienta: **Vectorial>Herramientas de investigación>Puntos aleatorios en la extensión** dentro del software Qgis, asimismo, las imágenes ópticas presentan una desventaja en cuanto a la presencia de nubosidad (el promedio de nubosidad en el mosaico fue de 42,13%), por lo que se tuvo que permutar los puntos aleatorios que se encontraban sobre nubes que no permitían la visibilidad dentro de la imagen (ver **Figura 95**).

Figura 95. Distribución natural de puntos aleatorios en la imagen óptica e imagen radar.



6.1.1.3 Matriz de confusión

La matriz de confusión está representada por un cuadro bidimensional donde las filas son las clases de verdad en el terreno y las columnas son las clases determinadas por el operador, la diagonal de esta matriz determina los puntos adecuadamente clasificados, denominados como: verdaderos positivos (cuando se analiza una clase en específica, se denomina verdadero negativo a las clases diferentes a esta en la misma diagonal), además, los valores marginales a esta diagonal representan los errores de asignación, en el caso de las columnas se denominan: falsos positivos (valor clasificado como la clase analizada, pero en realidad no corresponde a esta) y en el caso de las filas: falsos negativos (valor no clasificado como la clase analizada, pero en realidad si corresponde a esta), para un mejor entendimiento a modo de ejemplo se presenta una matriz de confusión en la **Tabla 23**, donde se analiza la clase 1.

Tabla 23. Matriz de confusión.

Valores reales	Valores determinados		
	Clases	Clase 0	Clase 1
	Clase 0	Verdadero negativo	Falso positivo
Clase 1	Falso negativo	Verdadero positivo	

La matriz de confusión de la presente investigación se realizó mediante el software SAGA con la aplicación de la herramienta: **Geoprocessing>Imagery>Classification>Confusion Matrix (Polygons/Grid)**, donde los puntos aleatorios con sus clases identificadas (clase 0: cuerpo no inundado y clase 1: cuerpo inundado), fueron representados por geometrías cuadradas de 20 metros por 20 metros, asemejándose a la dimensión de los píxeles, en la imagen radar. Es importante mencionar que los puntos de verdad en el terreno deben tener una dimensión similar al pixel de clasificación a validar y la imagen de validación debe tener una resolución menor o igual a la

clasificación (resolución de imagen Sentinel-2: 10 metros). Es así que la matriz de confusión resultante de esta validación se encuentra presente en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Matriz de confusión de la investigación.

Clases	Clase 0	Clase 1
Clase 0	365	2
Clase 1	3	15

La matriz de confusión desprende diferentes valores estadísticos, que ayudarán a validar la presente clasificación, entre ellas destacan las siguientes:

- **Precisión global**

Establece la relación entre los valores adecuadamente clasificados (valores de la diagonal = Vd) y los valores totales analizados (N= 385).

$$P = \frac{\sum Vd}{N}$$

$$P = \frac{365 + 15}{385}$$

$$P = 0,987013$$

- **Confiabilidad resultante al azar**

Se calcula mediante la sumatoria de los productos de las sumas marginales sobre los valores totales analizados al cuadrado.

Tabla 25. Suma de valores marginales.

Clases	Clase 0	Clase 1	
Clase 0	365	2	367
Clase 1	3	15	18
	368	17	N=385

$$C = \frac{\sum X_{ij}X_{ji}}{N^2}$$

$$C = \frac{367.368 + 18.17}{385^2}$$

$$c = 0,913220$$

- **Índice de Kappa**

El índice de Kappa permite analizar la precisión global y la confiabilidad resultante al azar desarrolladas previamente, este índice se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{P - C}{1 - P}$$

$$K = \frac{0,987013 - 0,913220}{1 - 0,913220}$$

$$k = 0,850346$$

La presente investigación obtiene un valor de índice de Kappa de 0,85, de acuerdo con la **Tabla 26** instaurada por Landis y Koch en 1977, se puede apreciar el grado de acuerdo del índice. La clasificación adquiere un grado de acuerdo casi perfecto, esto significa que la clasificación para detectar cuerpos inundados con el método *K-Means Clustering* es confiable, por lo que damos por válida la hipótesis general de esta investigación: ***“La detección y mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR, usando la técnica K-Means Clustering permitirá una adecuada evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño, debido a la ventaja y capacidad que poseen las imágenes SAR en cuanto a la determinación de áreas inundadas, en la cuenca Bajo Piura, región Piura.”***

Tabla 26. Grado de acuerdo del Índice Kappa.

Kappa (K)	Grado de acuerdo
< 0,00	Sin acuerdo
0,00-0,20	Insignificante
0,21-0,40	Mediano
0,41-0,60	Moderado

Kappa (K)	Grado de acuerdo
0,61-0,80	Sustancial
0,81-1,00	Casi perfecto

Fuente: Landis y Koch (1977)

6.1.2 Comparación de la metodología *K-Means Clustering* con otras metodologías

La comparación de los métodos de clasificación supervisada (*Umbral* y *Random Forest*) y clasificación no supervisada (*K-Means Clustering*), permitirá destacar la capacidad del método planteado para el mapeo de inundaciones. A continuación, se menciona las clasificaciones a comparar.

(1) **El método de umbral**, es considerado una clasificación supervisada, que consiste en examinar la imagen SAR y determinar el valor a partir del cual se puede considerar un cuerpo inundado (en este caso), existen diferentes métodos para llegar a este valor, para fines comparativos nos basamos en la aplicación de la fórmula planteada por Podest et all (2020), en la que:

$$\text{Umbral} = \sigma \cdot 1,5 + \bar{X}$$

Donde:

- σ : Desviación estándar
- \bar{X} : Promedio

Estos valores estadísticos mencionados se pueden obtener mediante la aplicación de la herramienta **Analysis>Statistics** en el software SNAP sobre la imagen de diferencia SAR (imagen base para la clasificación *K-Means Clustering*, **sección 4.4.2.14**), siendo los valores correspondientes para esta imagen:

σ : 0,2041 y \bar{X} : 0,9020

Entonces:

$$\text{Umbral} = 0,2041 \cdot 1,5 + 0,9020$$

$$\text{Umbral} = 1,20815$$

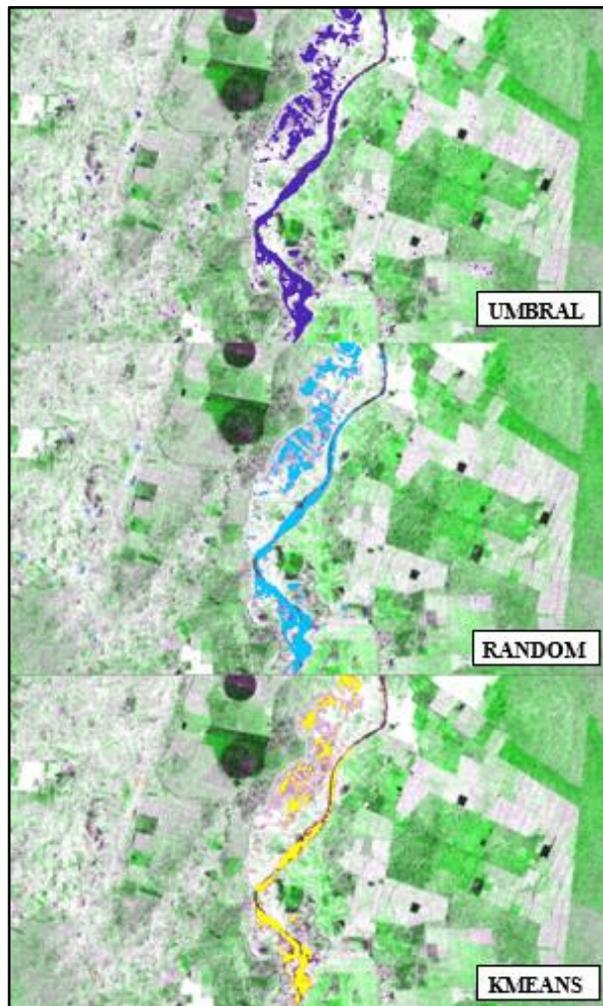
Es así como se obtiene el valor de 1,20815 para el umbral. El valor del umbral es un indicador que se encuentra sujeto a modificación de acuerdo con el criterio y sustento del investigador. Para la presente investigación optamos por usar el valor obtenido mediante la fórmula, es así como posterior a la aplicación del valor de umbral, con la imagen radar base obtenida en el procesamiento, se verificó visualmente la clasificación de las áreas inundadas en el software SNAP. El tiempo empleado para la determinación de áreas inundadas con el método mencionado fue de 20 minutos.

(2) **El método *Random Forest***, es un algoritmo de aprendizaje automático de clasificación supervisada que maneja y entrena un conjunto de datos, contiene variables continuas para el caso de la regresión y variables categóricas para el caso de la clasificación. Para el entrenamiento del algoritmo en nuestra área de estudio, se realizaron 300 polígonos de entrenamiento, siendo 150 polígonos de superficies inundadas y 150 polígonos de superficies no inundadas. El tiempo empleado para la determinación de áreas inundadas con el método mencionado fue de 2 horas 30 minutos.

La comparación de resultados de los tres métodos (*Umbral*, *Random Forest* y *K-Means Clustering*) en términos de extensión de cuerpos de agua inundados detectados se puede apreciar parcialmente en la **Figura 96**, donde se visualiza que el método de umbral con áreas de inundación de color azul, muestra una tendencia a sobreestimar las áreas de inundación; seguido del método *Random Forest* con áreas de inundación de color celeste, que logra una menor sobreestimación y extensión de las áreas inundadas en comparación con la anterior, a diferencia del método *K-Means*

Clustering, el cual muestra sus áreas inundadas de color amarillo, evidenciándose que sin caer en sobreestimación es el método que más se asemeja a los cuerpos inundados, visualizados en la imagen radar obtenido del procesamiento. Es importante mencionar, que la sobreestimación de cuerpos inundados es negativa para una adecuada clasificación ya que la imagen SAR presenta un efecto *speckle*.

Figura 96. Comparación de clasificación de áreas inundadas por tipo de método.



Para la comparación de la precisión, se trabajará la matriz de confusión aplicado a los tres métodos (Umbral, *Random Forest* y *K-Means Clustering*), en la **Tabla 27** verificaremos el índice de Kappa

y precisión global, datos que evidenciará la capacidad de los métodos mencionados y planteados para la investigación.

Tabla 27. Comparación de métodos de clasificación.

Método de Clasificación	Umbral	<i>K-Means Clustering</i>	<i>Random Forest</i>
Índice de Kappa	0,76	0,85	0,87
Precisión Global	0,974	0,987	0,987

De los datos obtenidos a partir la matriz de confusión trabajada para cada método planteado, se puede establecer que el método *K-Means Clustering* se encuentra entre los métodos Umbral y *Random Forest*, en el siguiente orden: **Umbral < K-Means Clustering < Random Forest**, debido a que el valor de índice de Kappa se encuentra en el siguiente orden **0,76 < 0,85 < 0,87** respectivamente y la precisión global en el siguiente orden **0,974 ≤ 0,987 ≤ 0,987** respectivamente, mostrándonos nuevamente la confiabilidad del método planteado en la investigación, además de verificar que los valores del método *K-Means Clustering* de tipo Clasificación No Supervisada, son cercanos a los valores del método *Random Forest* de tipo Clasificación Supervisada.

Es importante destacar que pese a que las estadísticas nos muestran como mejor método al *Random Forest*, sin embargo este método tendió a sobreestimar algunas áreas de inundación, es por ello que el método *K-Means Clustering* al reducir esta sobre estimación (propio del error humano en cuanto a un método supervisado y del efecto *speckle* en la imagen) se establece como una gran metodología potencial frente a otros métodos, asimismo, en cuanto a tiempos **Umbral (20 min) > K-Means Clustering (30 min) > Random Forest (150 min)** el método *K-Means Clustering* es ventajoso, puesto que el método Umbral empleado es básico, y para una mejor definición de este se tendría que profundizar más en el tema, mediante su validación visual y valor adecuado de clasificación lo que demandaría mayor tiempo. En base a lo mencionado se establece a modo de

resumen los principales parámetros de comparación entre los métodos mencionados en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Principales parámetros de comparación entre los métodos de clasificación.

Parámetros	<i>Umbral</i>	<i>K-Means Clustering</i>	<i>Random Forest</i>
Tipo de clasificación	Supervisada	No supervisada	Supervisada
Índice de Kappa	Sustancial	Casi perfecto	Casi perfecto
Requerimiento de operador	Sí	Sí	Sí
Posibilidad de automatización	No	Si	No
Dificultad	Básica	Básica	Media
Tiempo empleado	20 min	30 min	150 min

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

- El Niño Costero propició el desencadenamiento de fuertes precipitaciones que generaron inundaciones en muchas zonas de la costa norte del país, siendo el caso de la cuenca Bajo Piura una de las más impactadas en el territorio nacional; a través de esta investigación se ha podido determinar la ventaja de las imágenes SAR (Sentinel-1), siendo la información espacial más adecuada para detectar y mapear las inundaciones en un pequeño lapso de tiempo. Concluyéndose que el algoritmo de clasificación no supervisado *K-Means Clustering*, resultó determinante y altamente favorable para la obtención de los resultados esperados, por cuanto, entre otras ventajas, funcionó adecuadamente reduciendo la variabilidad a través de la similitud de los datos presentados entre los grupos de clasificación para las 6 clases establecidas, siendo ideal para nuestra área de estudio de gran extensión y de naturaleza superficial muy heterogénea, con presencia de áreas cambiantes (p.e: zonas agrícolas); es así que en conjunción de lo mencionado se obtuvo una extensión de las áreas inundadas de 5 402,85 hectáreas, evidenciándose el mayor impacto en el sector agrícola.
- Se interpretó la dinámica de inundación a través de una pre evaluación de imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2, del antes y durante del evento del fenómeno de El Niño Costero; concluyendo que las fechas óptimas para una adecuada clasificación de la dinámica de la inundación fueron las siguientes imágenes: 1) imagen SAR del día 03/02/2017 (pre-evento), debido que a partir de esa fecha se manifestaron las condiciones meteorológicas anómalas, que trajeron como consecuencia el aumento del caudal del río y 2) imagen SAR del día 04/04/2017, fecha en la que se determinó el máximo impacto de la inundación en la cuenca Bajo Piura.

- Se aplicó el filtro morfológico para una adecuada determinación de áreas inundadas, comprendido por las áreas de exposición a inundación históricas registradas en Piura con periodos de retorno de hasta 50 años ofrecidos por la ANA y por las áreas de influencias para cuerpos de aguas permanentes en la cuenca Bajo Piura, generando así un resultado confiable para la evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño. La propuesta planteada se da debido a la gran extensión del área de estudio, ya que puede presentar confusiones en la clasificación de los cuerpos de agua, es decir al momento de diferenciar los niveles de intensidad de superficies de agua abierta y áreas de poca rugosidad.
- Se identificó la información cartográfica para la evaluación rápida de impactos basándose en los medios sociales y económicos, siendo las más relevantes: centros poblados, instituciones educativas, establecimientos de salud, vías de acceso (carreteras) y uso de suelo. Asimismo, se tomó de guía el manual de evaluación de daños y necesidades (EDAN-PERÚ), determinando que para un adecuado análisis de evaluación rápida se requiere que la información se encuentre actualizada y cartografiada espacialmente en un archivo vectorial, para ser integrados y evaluados óptimamente mediante un sistema de información geográfica.
- Se determinó la eficacia y ventaja del algoritmo *K-Means Clustering* para el análisis de inundaciones (como en el caso presente y especialmente para eventos futuros), radicando en: 1) evitar una parametrización compleja en el campo de la teledetección, 2) evitar una gran demanda de tiempo para la compilación y 3) evitar una larga intervención por parte del operador; asimismo, destaca estadísticamente obteniendo un grado de acuerdo casi perfecto basado en su índice Kappa de 0,85 y sobresaliendo con respecto a los métodos manuales tradicionales como *Random Forest* y Umbral, debido al pequeño tiempo de ejecución empleado (30 minutos, 13 segundos) y la reducción de sobrestimación de cuerpos inundados.

CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES

Concluido el presente trabajo, se considera de suma importancia presentar las recomendaciones de la investigación, así como también los temas no abordados directamente, pero las cuales, si se encuentran ligados a la presente temática:

Recomendaciones sobre el empleo de las imágenes SAR

- Se recomienda realizar una adecuada verificación en cuanto a las características de imágenes SAR, en especial importancia la similitud de datos en las imágenes del antes y durante el evento, contrastando que cuenten con el mismo sensor para poder ejecutar el procesamiento y análisis entre estas, destacando principalmente las características de dirección de vuelo y la polarización.
- Para el análisis de inundaciones se recomienda usar la polarización VH debido a sus ventajas frente a la detección de cuerpos de agua abiertos, tal y como se desarrolló en la presente investigación, sin embargo, cuando se adquiriera una imagen con una polarización diferente a esta polarización cruzada, no debe ser excluyente ya que existen estudios realizados por otros autores, en donde sugieren el uso de imágenes con polarizaciones iguales, dada las necesidades del caso y el estudio.
- La compresión, procesamiento y análisis con respecto a las imágenes SAR puede resultar compleja para nuevos usuarios, sin embargo, la presente investigación detalla las nociones básicas que se deben considerar para el procesamiento de estas, así como también se recomienda seguir ahondando e investigando en el tema, para una mayor comprensión, y poder realizar diferentes tipos de análisis; queda en claro que las imágenes de tipo radar tienen un gran potencial para explotar en diversos campos de investigación.

Recomendaciones sobre el algoritmo *K-Means Clustering*

- El algoritmo *K-Means Clustering* ha mostrado resultados aceptables en la presente investigación, así como también en investigaciones realizadas por diversos autores, sin embargo, en la literatura revisada no se muestra la corroboración de esta clasificación en el terreno ni tampoco la corroboración para métodos manuales supervisados en lo que concierne a inundación, si bien el objetivo del empleo de este algoritmo es obtener resultados rápidos para un eficaz monitoreo e identificación de áreas inundadas para una rápida intervención y atención de la emergencia; se recomienda en eventos futuros las corroboraciones correspondientes en campo, una vez empleado el método propuesto.

Recomendaciones sobre los impactos de desastres

- Se recomienda considerar una base cartográfica actualizada con lo que respecta a los medios sociales y económicos, de preferencia esta base debe ser de escala local para obtener información a mejor detalle, en lo posible brindada por el gobierno local, p.e: catastro urbano y rural, equipamiento urbano, infraestructura de saneamiento actualizado, redes viales, infraestructuras de salud y educación, entre otros, todo ello para realizar un análisis de respuesta rápida más preciso en escenarios de este tipo de eventos, asimismo, se espera que este tipo de información se encuentre más accesible a la comunidad de investigación.
- Considerar a la teledetección como una fuente al procedimiento de monitoreo y evaluación rápida debido a que se encuentra vinculado al proceso de respuesta, señalado en el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, siendo la imagen radar una de las más eficaces a través del mapeo de áreas inundadas, la cual nos permitirá el cálculo de las posibles afectaciones, analizando la situación de un desastre y sus posibles impactos para la toma de decisiones.

- Se recomienda implementar medidas como es el caso de los sistemas de alerta temprana – SAT ante inundaciones, a lo largo de la cuenca Bajo Piura, previamente determinando puntos críticos estratégicos para el monitoreo correspondiente, apoyados mediante la teledetección de imágenes radar.

Para las próximas investigaciones

- Se recomienda a la comunidad científica y estudiantes continuar con las investigaciones en lo que respecta a tecnología SAR, ya que es una herramienta potencial en cuanto a monitoreos de la cobertura terrestre, pudiéndose aplicar en el monitoreo de bosques, monitoreo de cultivos, derrames de petróleo entre otros, todos estos objetos importantes de estudio dentro del territorio nacional.

CAPÍTULO IX: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACHCP, IRAGER, PAEN, López, N. y Gallo, L. (2001). Diagnóstico de la cuenca del río Piura con enfoque de gestión de riesgos y énfasis en los recursos agua, suelo y cobertura vegetal.

AACHCP (2005). Evaluación Local Integrada y Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en la Cuenca del Río Piura.

Anusha, N. y Bharathi, B. (2019). *Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences.

ARSET (2018). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética.

Avendaño P, J., Padilla, J., Vera, J., y Parra, J. (2015). Detección de cambios no supervisada de imágenes SAR para el seguimiento del comportamiento y análisis de inundaciones en Colombia. Revista De Investigaciones Universidad Del Quindío.

Belmonte, I. y Caamaño, S. (2009). Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina. Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina

CCRS. (2015). *Fundamentals of remote sensing*. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/introduction/9363>.

CCRS. (2001). "Programa GlobeSAR: Material educativo para teledetección mediante radares." Canada Centre for Remote Sensing CCRS, Natural Resources Canada.

CCRS, Natural Resources Canada. (2015). *Microwave remote sensing*. Nrcan.gc.ca. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/microwave-remote-sensing/9371>

- CENEPRED (2014). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (2da Versión).
- CEPAL (2014). Manual para la evaluación de desastres.
- CIECI (2019). Teledetección por radar para la detección y mapeo de cambios por deforestación.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial (Segunda). Ediciones Rialp, S.A.
- Chuvieco, E. (2002). La observación de la Tierra desde el Espacio. Teledetección ambiental.
- Cordova, A. (2009). Desarrollo de capacidades para una propuesta de zonificación ecológica económica-ZEE-para el ordenamiento territorial del departamento de Piura.
- D. S. N° 048-2011- PCM. Que aprueba el Reglamento de la Ley N° 29664, que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). Diario Oficial El Peruano (2011).
- ENFEN (2017). Informe Técnico Extraordinario N°001-2017/ENFEN. El Niño Costero2017. Callao.
- European Space Agency (2007). *EnviSat ASAR Product Handbook, Issue 2.2.*
- Grado de Ingeniería Informática del Software, Universidad de Oviedo (2014). El algoritmo K-Means aplicado a clasificación y procesamiento de imágenes. Recuperado de https://www.unioviedo.es/compnum/laboratorios_py/kmeans/kmeans.html
- Ebinne, E., Apeh, O. y Abah, E. (2019). *Satellite-based flood mapping for impact assessments: a case study in Lokoja, Kogi state, Nigeria.* International Journal of Advances in Science Engineering and Technology. Vol -7
- Hermosilla, E. (2016). Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) aplicada al estudio del movimiento en laderas aledañas al volcán Calbuco con ayuda de imágenes Sentinel-1 (tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María Academia de Ciencias Aeronáuticas.

- INDECI (2018). Fortaleciendo la respuesta ante desastres en el Perú: Lecciones aprendidas del Fenómeno El Niño Costero 2017 en el Perú (Primera Edición).
- INEI (2018). Censos Nacionales 2017: XII Población, VII Vivienda y III Comunidades Indígenas, 22 de octubre en el área urbana y del 23 de octubre al 6 de noviembre en el área rural, Piura Resultados Definitivos, Tomo I. Lima, octubre de 2018.
- Instituto del Mar del Perú (s.f). Ministerio de Producción. Definición de El Niño Costero. http://www.imarpe.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=I0175040200000000000000
- Jose Antonio Otivo Barreto (2010). Memoria descriptiva mapa ocupación del territorio y uso actual del suelo - Región Piura, Versión Final. https://geoservidor.minam.gob.pe/wpcontent/uploads/2017/06/Memoria_Descriptiva_Uso_Actual-Piura.pdf
- Instituto del Mar del Perú (s.f). Ministerio de Producción. Información ENFEN. http://www.imarpe.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=I010801050000000000000000
- Landis J, Koch G: *The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics* 1977; 33: 159-74.
- L. Liu, Z. Jia, J. Yang and N. K. Kasabov, "SAR Image Change Detection Based on Mathematical Morphology and the K-Means Clustering Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43970-43978, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908282.
- Mayorga, T. (2013). Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética) (tesis de maestría). Universidad Nacional de Córdoba.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2015). Principales cuencas hidrográficas a nivel nacional. Cuenca e hidrografía del río Piura. <https://www.midagri.gob.pe/portal/54-sector-agrario/cuencas-e-hidrografia/372-principales-cuencas-a-nivel-nacional?start=1>
- Ñaupas, Valdivia, Palacios y Romero (2018). Metodología de la investigación. Cuantitativa – Cualitativa y Redacción de la Tesis (5a Edición). Bogotá, Colombia.

- Panozzo, M. (2013). Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y Validación (tesis de maestría). Universidad Nacional de Córdoba.
- Podest, E., McCullun, A., Torres, J. y McCartney, S. (2020). Mapeo y monitoreo de bosques con datos SAR: Análisis Multi-temporal. Programa de Capacitación de Teledetección Aplicada de la NASA (Applied Remote Sensing Training Program o ARSET).
- Ruzza, G., Guerriero, L., Grelle, G., Guadagno, F. y Revellino, P. (2019). *Multi-Method Tracking of Monsoon Floods Using Sentinel-1 Imagery*. *Water*.
- Razafipahatelo, D. & Rakotoniaina, Solofoarisoa & Rakotondraompiana, Solofo. (2015). *Automatic floods detection with a kernel K-Means approach*. *2014 IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference, IHTC 2014*. 10.1109/IHTC.2014.7147515.
- Sabino, E.; Lavado W. y Aybar C. Estimación de las zonas de vida de Holdridge en el Perú, formato: Artículo científico. Servicio Nacional De Meteorología E Hidrología Del Perú – Senamhi. Dirección de Hidrología -DHI. Diciembre 2019.
- SARMAP, UNESCO BILKO group, European Space Agency (2008). *Synthetic Aperture Radar and SARscape*.
- SENAMHI (2014). El fenómeno El niño en el Perú. Recuperado de http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1o-Final_web.pdf.
- Vilchez, M., Luque, G. y Rosado, M. (2013). Estudio de riesgo geológico en la región Piura. INGEMMET, Boletín N°52, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica.