



LLUVIAS



**CENEPRED**

Centro Nacional de Estimación, Prevención y  
Reducción del Riesgo de Desastres

**ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIONES  
EN LA PROVINCIA DE LUCANAS  
DEPARTAMENTO DE AYACUCHO**

**JULIO 2025**



**ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIONES EN LA PROVINCIA DE LUCANAS.  
DEPARTAMENTO DE AYACUCHO.**

Elaborado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED).

Dirección de Gestión de Procesos. Subdirección de Gestión de la Información. CENEPRED, Julio 2025.

Av. Del Parque Norte N° 829 - 833. San Isidro - Lima – Perú

Correo electrónico: [info@cenepred.gob.pe](mailto:info@cenepred.gob.pe)

Página web: <https://www.gob.pe/cenepred>

**CENEPRED:**

Gral. (r) Rolando Gustavo Capucho Cárdenas  
Jefe del CENEPRED

Crnl. (r) Walter Martin Becerra Noblecilla  
Director de la Dirección de Gestión de Procesos

Ing. Alfredo Zambrano Gonzáles  
Subdirector de Gestión de la Información

Elaborado por:

Ing. Karina Obregón Acevedo  
Especialista de la Subdirección de Gestión de la Información

Ing. Eber Risco Sence  
Consultor

Con la participación de:

Municipalidad Provincial de Lucanas



## INDICE

I.	Introducción.....	6
II.	Ubicación del área de estudio.....	7
III.	Información Recopilada .....	8
3.1	Datos de ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Grande .....	8
3.2	Caudales.....	10
3.3	Producto PISCO.....	11
3.4	Modelo digital de elevaciones .....	12
3.5	Datos de sensoramiento remoto.....	14
3.6	Datos de dimensión social y económica.....	16
IV.	Análisis de susceptibilidad a inundaciones en la cuenca del río Grande .....	16
4.1	Factor desencadenante.....	16
4.2	Factores condicionantes .....	17
4.3	Proceso metodológico .....	18
4.3.1	Modelo RRI .....	19
4.3.2	Modelamiento predictivo de susceptibilidad de inundaciones con Random Forest	23
4.3.3	Integración del modelo RRI con modelo predictivo Random Forest.....	29
4.3.4	Verificación mediante el análisis de imágenes radar (SENTINEL-1 – SAR) previo y posterior a un evento de inundación .....	32
4.3.5	Verificación in situ de puntos críticos de inundación .....	36
4.3.6	Mapa de susceptibilidad a inundaciones.....	38
V.	Análisis de elementos expuestos.....	39
VI.	Determinación del escenario de riesgo.....	42
VII.	Recomendaciones.....	49
VIII.	Bibliografía.....	50



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la provincia de Lucanas y la unidad hidrográfica del río Grande. ....	7
Figura 2: Ubicación de las ocurrencias de inundaciones en la cuenca del río Grande.....	9
Figura 3: Ubicación de estación hidrométrica Llauta y caudales para el periodo enero-marzo 2017 .....	10
Figura 4. Datos espaciales. a) Precipitación producto PISCO, b) Estaciones virtuales para el modelamiento con RRI. ....	11
Figura 5. Datos topográficos para el modelo RRI. a) Modelo digital de elevación original y corregido, b) Dirección de flujo original y corregido, c) Acumulación de flujo normal y logaritmo.....	13
Figura 6: Imágenes SENTINEL 1 SAR con polarización VV y SENTINEL 2-A para la cuenca Río Grande. a) Mosaico de imágenes previo a una inundación, b) Mosaico de imágenes posterior a una inundación, c) Mosaico de imagen óptica con falso color para resaltar la vegetación. ....	15
Figura 7. Capas de información georreferenciadas de elementos del territorio .....	16
Figura 8: Diagrama de flujo para el modelamiento de susceptibilidad a inundaciones.....	19
Figura 9: Diagrama esquemático del modelo de lluvia-escorrentía-inundación (RRI). ....	21
Figura 10. Parámetros iniciales para el modelo RRI en la cuenca del río Grande .....	21
Figura 11. Resultados del modelo RRI en la cuenca del río Grande. Huella de inundación para el evento del 2017. ....	22
Figura 12. Predictores de inundaciones: a) cobertura de suelo, b) Elevación, c) Geología, d) Geomorfología, e) Índice de vegetación de diferencia normalizada, f) Pendiente, g) Máxima precipitación antecedentes, h) Precipitación diaria extrema, i) Índice topográfico de humedad.....	24
Figura 13. Precisión del modelo en función de los parámetros que se utilizaron en el modelo de RF (mtry y ntree son dos parámetros importantes del modelo de RF). ....	25
Figura 14: Importancia relativa de los factores de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Grande. ....	26
Figura 15. Resultados del modelo RF. Susceptibilidad a ocurrencia de inundaciones.....	27
Figura 16. Área bajo la curva para los datos de calibración y validación del modelo RF. ...	28
Figura 17. Mapa geológico y zona de inundación de acuerdo a modelo RF. ....	28
Figura 18. Flujo de proceso para obtener el Modelo Compuesto para la cuenca Río Grande.....	30
Figura 19. Resultados del modelo RRI+RF de susceptibilidad a inundación en la cuenca río Grande. La susceptibilidad de ocurrencia a inundación se muestra clasificado desde muy bajo a muy alto. ....	31
Figura 20: Área de inundación obtenido con imágenes Sentine-1 SAR para El Niño Costero 2017. ....	35
Figura 21. Comparativa entre pixeles clasificados como inundación con el modelo RRI+RF .....	35
Figura 22. Ubicación de los puntos verificados en campo en la provincia de Lucanas, en el ámbito de la cuenca del río Grande.....	36
Figura 23. Mapa de susceptibilidad a inundaciones de la provincia de LUCANAS, en el ámbito de la cuenca del río Grande.....	38
Figura 24. Flujograma del proceso de elaboración del escenario de riesgo por inundación. ....	42



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Provincia de Lucanas: Nivel de riesgo según distritos. ....	8
Tabla 2: Registros de inundaciones en la cuenca río Grande. ....	9
Tabla 3: Estaciones hidrométricas. Fuente: (SENAMHI, 2021) .....	10
Tabla 4: Clasificación de los valores de susceptibilidad para la cuenca río Grande. ....	30
Tabla 5: Clasificación de ocurrencias de inundación de acuerdo a los resultados del modelo de susceptibilidad RRI+RF para la cuenca río Grande.....	32
Tabla 6. Población y vivienda expuesta a zonas susceptibles a inundación. ....	39
Tabla 7. Establecimientos de salud expuesta a zonas susceptibles a inundación. ....	40
Tabla 8. Instituciones educativas expuesta a zonas susceptibles a inundación .....	40
Tabla 9.Red vial expuesta a zonas susceptibles a inundación .....	41
Tabla 10.Bocatomas expuestos a zonas susceptibles a inundación.....	41
Tabla 11. Provincia de Lucanas: Centros poblados según el nivel de riesgo por inundaciones.....	43
Tabla 12. Provincia de Lucanas: Población y viviendas según el nivel de riesgo por inundaciones.....	44
Tabla 13. Provincia de Lucanas: Superficie agrícola según el nivel de riesgo por inundaciones.....	45
Tabla 14. Provincia de Lucanas: Establecimientos de salud según el nivel de riesgo por inundaciones.....	45
Tabla 15. Provincia de Lucanas: Instituciones educativas según el nivel de riesgo por inundaciones.....	46
Tabla 16. Provincia de Lucanas: Red vial según el nivel de riesgo por inundaciones .....	47
Tabla 17. Provincia de Lucanas: Infraestructura hídrica según el nivel de riesgo por inundaciones.....	47



## I. Introducción

Las inundaciones son desastres que generan diversas repercusiones socioeconómicas (Bui et al., 2018) , incluyendo efectos como erosión, deslizamientos de tierra y la formación de sumideros (Arabameri, Rezaei, Cerdà, Conoscenti, & Kalantari, 2019). Por ello, resulta fundamental monitorear estos eventos mediante técnicas avanzadas y desarrollar modelos precisos de riesgo de inundaciones (Samanta, Pal, & Palsamanta, 2018). Estos eventos pueden ocurrir como consecuencia de períodos prolongados de fuertes lluvias y suelen generarse en zonas de baja o nula pendiente, usualmente en las zonas agrícolas y urbanas. La susceptibilidad a este peligro a menudo se relaciona con las condiciones climáticas, las características de la cuenca y los procedimientos dentro de los cauces montañosos (Wagner, 2007). La gravedad de estos sucesos está determinada por varios elementos, incluida la intensidad de las lluvias, la geografía diversa, las propiedades topográficas, el cambio climático, las actividades humanas, el grado de desarrollo socioeconómico y las condiciones de drenaje de una región específica (Alam et al., 2018). Además, tienen el potencial de generar afectación a muchas personas y dañar seriamente la infraestructura, la vivienda y el transporte (Nguyen, Pham, Bui, Bui, & Nguyen, 2021).

En el Perú, la ocurrencia de El Niño en los años 82 -83, 97-98, 2017 y 2023, provocaron severos impactos socioeconómicos, principalmente en la zona costera, donde genera precipitaciones extremas, y en la sierra, donde suele generar sequías. En el 2017, el Niño Costero desencadenó lluvias torrenciales entre diciembre de 2016 y mayo de 2017, lo que ocasionó huaicos, inundaciones, deslizamientos y derrumbes que afectaron a más de 1, 78 millones de personas, principalmente en las regiones de Piura, La Libertad, Lambayeque, Ica y Loreto. Asimismo, se registraron daños cerca de 413 mil viviendas, 996 establecimientos de salud y 3 188 instituciones educativas (INDECI, 2017). Pérdidas similares se registraron en 1982-1983 (USD 1 000 millones) y en 1997-1998 (USD 3 500 millones) (CAF, 2000).

Es evidente la urgente necesidad de contar con herramientas que respalden el monitoreo y la previsión de inundaciones; sin embargo, la estimación del riesgo de inundaciones enfrenta limitaciones debido a la baja densidad de estaciones hidrométricas en el territorio nacional. En ese sentido, el presente estudio plantea una metodología con un enfoque de cuenca para identificar los niveles de riesgo ante inundaciones en la provincia de Lucanas (Ayacucho), en el ámbito geográfico de la cuenca del río Grande, con el propósito de brindar a los profesionales de los gobiernos locales del ámbito provincial, y del Gobierno Regional de Ayacucho, un instrumento técnico para la priorización de sus intervenciones.



Para tal fin, se utiliza la información proveniente de entidades del Estado como SENAMHI, ANA, IGP, MINAGRI, INDECI, CENEPRED, INEI, entre otras. Estos datos e información permitirán el análisis y zonificación de la susceptibilidad a inundaciones, así como el análisis de elementos expuestos, para la elaboración del escenario de riesgo en la provincia de Lucanas.

## II. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Lucanas (departamento de Ayacucho, al sur del Perú), en el ámbito de la cuenca del río Grande, la cual forma parte de la vertiente del Pacífico (Figura 1).

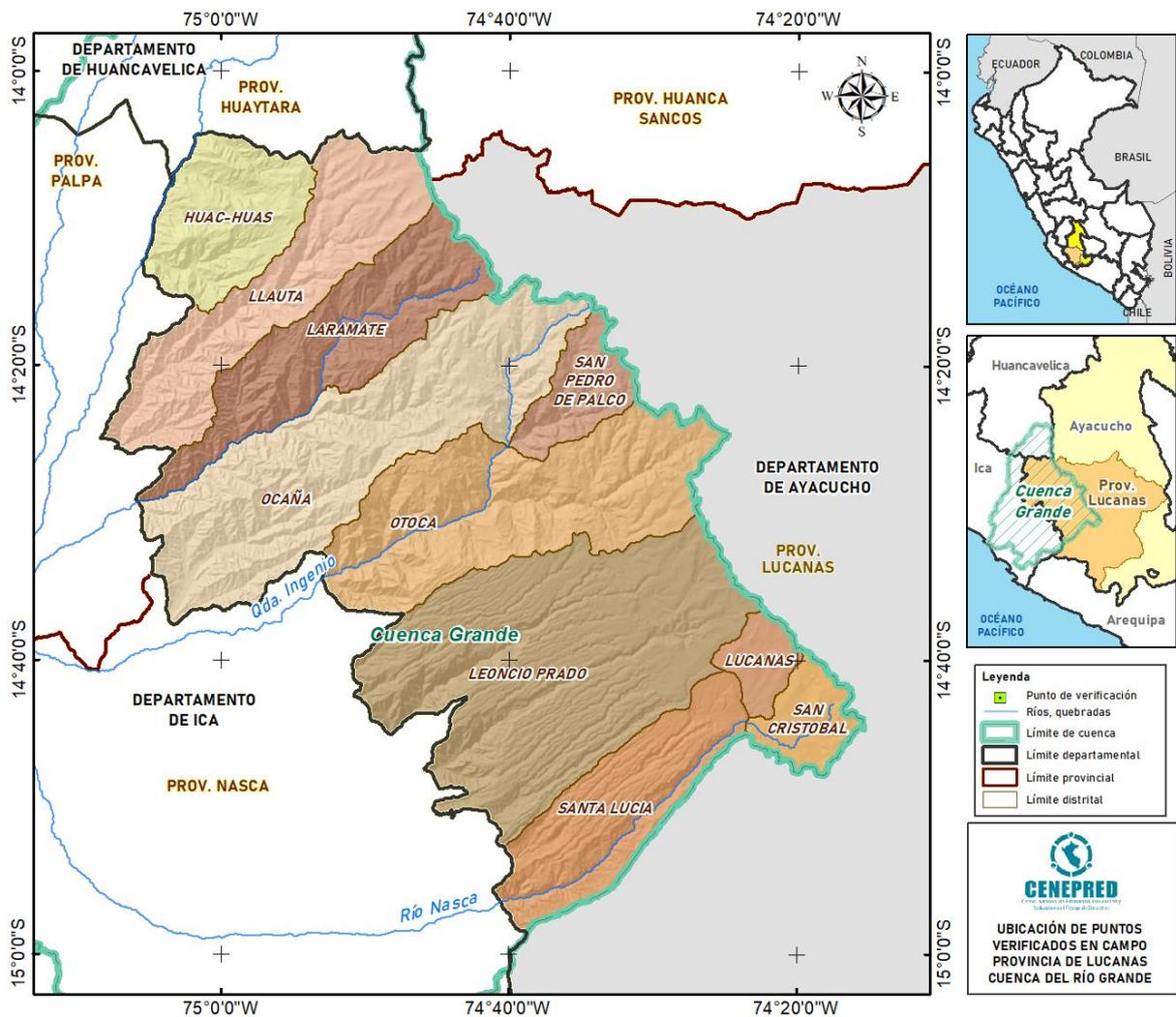


Figura 1. Ubicación de la provincia de Lucanas y la unidad hidrográfica del río Grande.



El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), seleccionó el área de estudio basado en el resultado del escenario de riesgo por inundación a nivel nacional, realizado en el marco del Plan Multisectorial 2025-2027, el cual identifica distritos con niveles de riesgo entre alto y muy alto ante la ocurrencia de inundaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Provincia de Lucanas: Nivel de riesgo según distritos.

Departamento	Provincia	Ubigeo	Distrito	Nivel de riesgo
Ayacucho	Lucanas	050607	Huac-Huas	Alto
		050608	Laramate	Alto
		050609	Leoncio Pradc	Alto
		050611	Lucanas	Alto
		050612	Ocaña	Alto
		050621	Santa Lucia	Alto

Fuente: CENEPRED, 2024.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA 2017), reconoce a la cuenca (unidad hidrográfica) como una unidad territorial fundamental para la planificación hídrica y de los riesgos asociados. En este marco, y considerando que los cursos de agua responden a las leyes de la gravedad y la topografía, y no necesariamente a los ámbitos de administración pública, se adoptó un enfoque de cuenca para la identificación de áreas inundables; por tal motivo, el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones se desarrolló en el contexto territorial de toda la unidad hidrográfica del río Grande.

### III. Información Recopilada

#### 3.1 Datos de ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Grande

Existen 413 datos sobre la ocurrencia de inundaciones, los cuales provienen de diversas fuentes como la Autoridad Nacional del Agua - ANA, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET y el Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI, y son compilados en el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (SIGRID), bajo la responsabilidad del CENEPRED. Estos datos, luego de un proceso de depuración para eliminar registros duplicados ascienden a un total de 229 puntos con probabilidad de ocurrencia de inundaciones. El criterio de selección de las ocurrencias fue mediante la descripción de los registros, seleccionándose aquellos relacionados con emergencias, zonas críticas y puntos críticos, siempre que estuvieran asociados específicamente al evento de inundación.



## ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

Tabla 2: Registros de inundaciones en la cuenca río Grande.

Departamento	Provincia	Fuente			
		ANA	INDECI	INGEMMET	Total
Ayacucho	Lucanas		22	1	23
Huancavelica	Huaytara	4	6	1	11
Ica	Nasca	229	20	3	252
	Palpa	110	14	3	127
Total		343	62	8	413

Nota: Puntos críticos (ANA). Zonas críticas (INGEMMET). Emergencias (INDECI).

De acuerdo con la Tabla 2, la provincia de Lucanas tiene un total 23 registros de inundaciones, de los cuales 22 son emergencias a consecuencia de la ocurrencia de inundaciones y solo uno corresponde a una zona crítica.

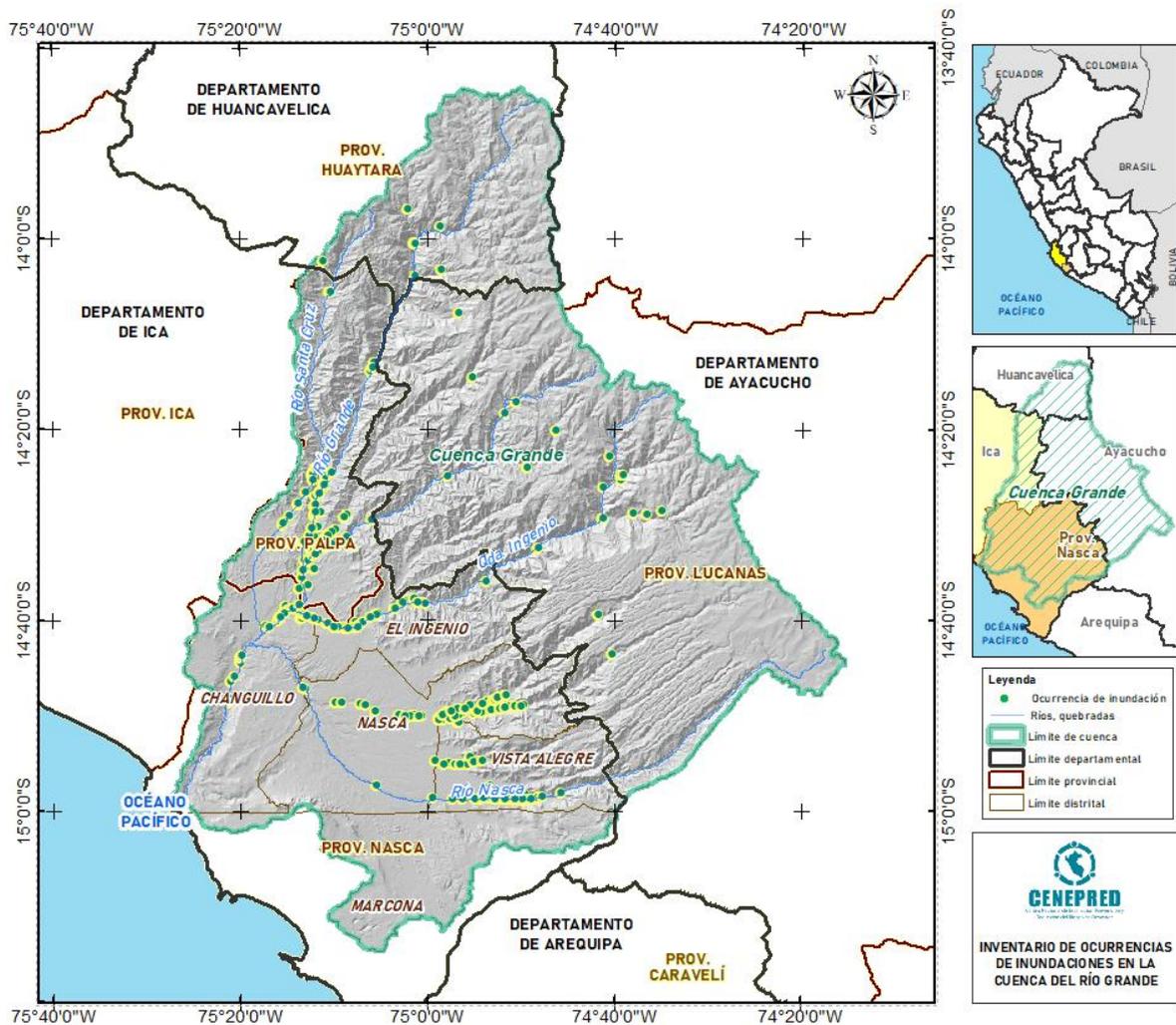


Figura 2: Ubicación de las ocurrencias de inundaciones en la cuenca del río Grande.



La Figura 2 muestra la ubicación espacial de los registros de ocurrencias de inundaciones (Tabla 2) en la cuenca del río Grande, se aprecia que están representadas mayoritariamente por las zonas de valle inundables en la parte baja de la cuenca, de activación de quebradas en la parte media-alta de la cuenca.

### 3.2 Caudales

Se seleccionaron las series de tiempo de caudales diarios observados en la estación hidrométrica Llauta (disponibilidad de datos: 2015-2022), se seleccionó el periodo de enero a marzo del 2017, debido a la disponibilidad de los datos en la estación que en dicho año ocurrió el evento extremo del Niño Costero. La estación es administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en el distrito de Llauta, provincia Lucanas, departamento Ayacucho. El detalle de la estación Llauta se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Estaciones hidrométricas. Fuente: (SENAMHI, 2021)

Vertiente	Estación	Latitud	Longitud	Cuenca	Fuente
Pacífico	Llauta	14°14'72" S	74°55'31.75" W	Grande	SENAMHI

La Figura 3 muestra la ubicación espacial de la estación hidrométrica Llauta, y los caudales para el periodo de enero a marzo del 2017, expresados en m<sup>3</sup>/s. Los datos utilizados se encuentran disponibles en el enlace Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/1YuK2vNIY6Tg8Nj05QDFpbmTb72FM8GLn?hl=es-419>

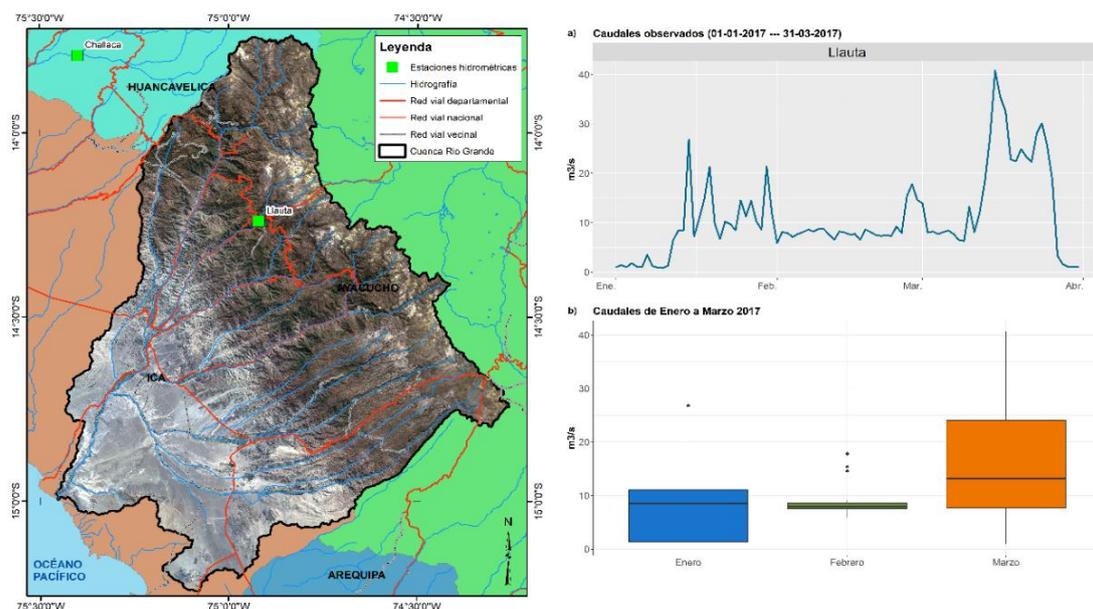


Figura 3: Ubicación de estación hidrométrica Llauta y caudales para el periodo enero-marzo 2017



### 3.3 Producto PISCO

El conjunto de datos hidrometeorológicos PISCO tiene cobertura en todo territorio peruano incluyendo cuencas transfronterizas. Contiene subproductos grillados de precipitación (P), temperatura del aire (TA) y evapotranspiración potencial (PET); con una resolución espacial de  $0.1^\circ$  (~ 10 km) y temporal de un día. Los productos PISCO P, TA, PET están disponibles para el periodo de 1981 al 2025 (versión 2.1). PISCOP (Aybar et al., 2020) se genera mediante el uso de métodos geoestadísticos y determinísticos que incluyen tres fuentes de precipitación: (a) el conjunto de datos de pluviómetros nacionales con control de calidad, (b) climatologías de precipitación combinadas con indicadores de radar, y (c) el Climate Hazards Group Infrared Precipitation (CHIRP). El conjunto de datos de PISCO está disponible en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO>.

La Figura 4 representa los datos espaciales de precipitación del producto PISCO (a) y las estaciones virtuales para el modelamiento con RRI (b). Los datos de las estaciones (enero – marzo 2017) utilizados para el modelo RRI se encuentran disponibles en:

<https://drive.google.com/drive/folders/1YuK2vNIY6Tg8Nj05QDFpbmTb72FM8GLn?hl=es-419>

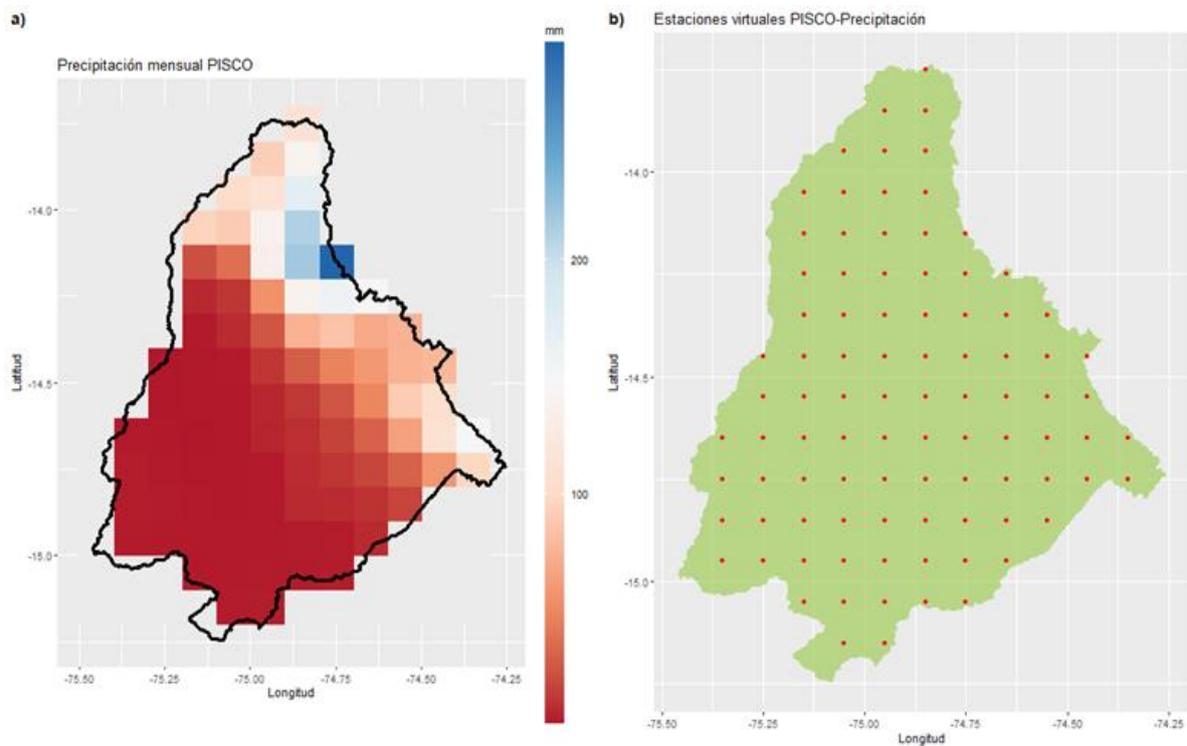


Figura 4. Datos espaciales. a) Precipitación producto PISCO, b) Estaciones virtuales para el modelamiento con RRI.



### 3.4 Modelo digital de elevaciones

Se ha utilizado el conjunto de datos de elevación digital de la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Este producto SRTM V3 (SRTM Plus) es proporcionado por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA con resoluciones espaciales de (90m para el modelo RRI y de 30m para el modelo RF). Se produjo originalmente para proporcionar datos de elevación consistentes y de alta calidad a escala casi global. Esta versión de los datos de elevación digital SRTM ha sido procesada para rellenar vacíos de datos y facilitar su uso (Jarvis, Reuter, Nelson, & Guevara, 2008). El DEM se utilizará para la implementación del modelamiento de inundación con RRI, el cual requiere principalmente los datos de elevaciones, sus derivados como dirección y acumulación de flujo de la cuenca.

La Figura 5 muestra los datos del modelo digital de elevaciones de la cuenca del río Grande, del producto SRTM, y el modelo digital de elevaciones corregido mediante el programa *demAdjust2* del modelo RRI, cuyo algoritmo es el siguiente:

- a) Basado en la dirección del flujo, *demAdjust2* identifica las celdas aguas arriba (es decir, celdas sin entrada de flujo).
- b) Entre las celdas aguas arriba detectadas, se determina el orden de búsqueda según la longitud total de los trayectos de flujo desde cada celda aguas arriba hasta su celda más aguas abajo.
- c) Siguiendo el orden establecido, *demAdjust2* ajusta las elevaciones según los siguientes procedimientos:
  - Elevación negativa: Se establece en cero.
  - Elevación (Lifting): Si una celda individual tiene una elevación extremadamente baja (probablemente debido a un error de ruido) en comparación con sus celdas aguas arriba y aguas abajo, la elevación de la celda se reemplaza por la misma elevación de la celda aguas arriba. El parámetro lift se usa como umbral para detectar caídas bruscas, y su valor predeterminado es 500 m.
  - Corte (Carving): Si la elevación aumenta repentinamente en la dirección del flujo, la elevación de la celda se reemplaza por la misma elevación de la celda aguas arriba. El parámetro carve se utiliza como umbral para detectar aumentos bruscos, y su valor predeterminado es 5 m.

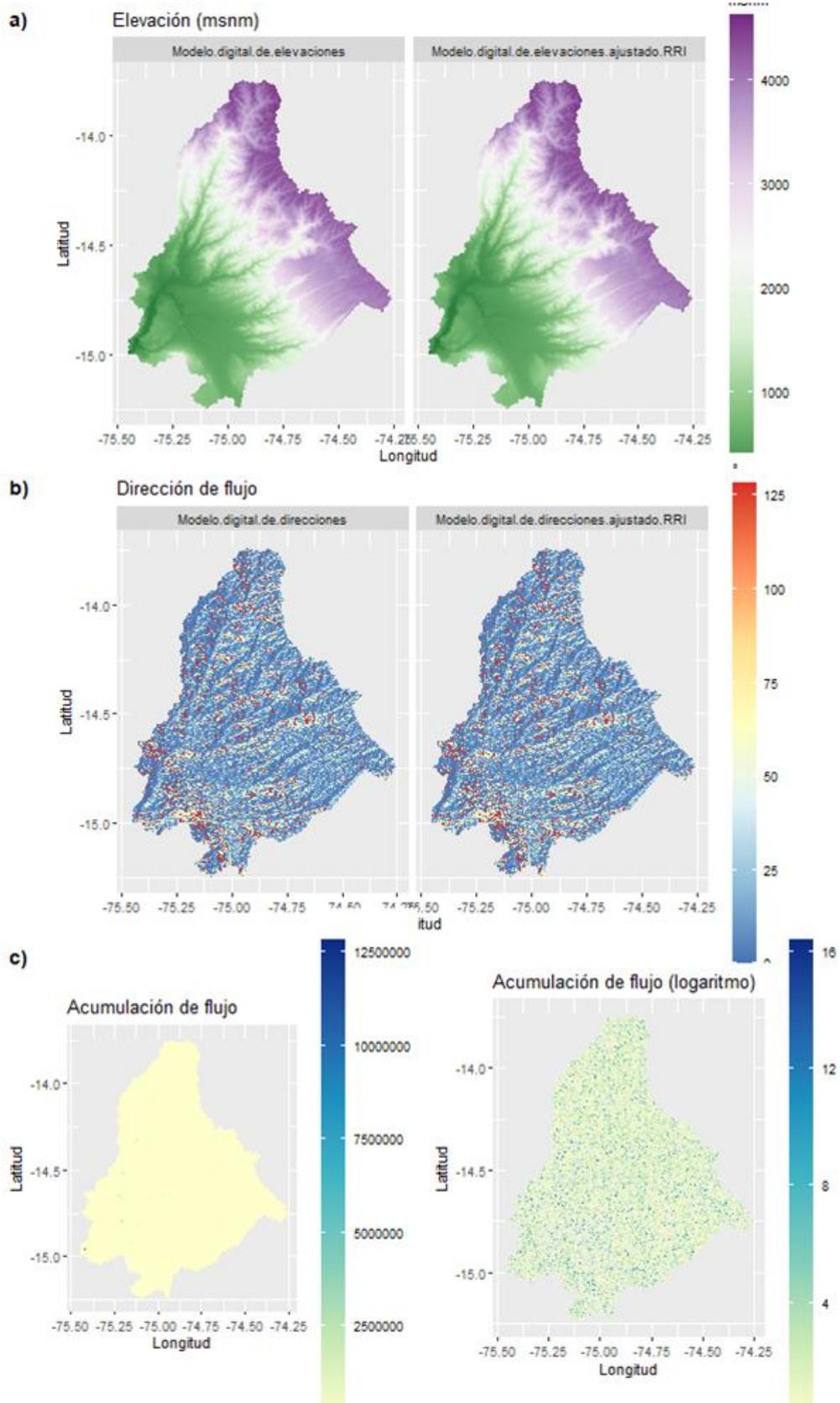


Figura 5. Datos topográficos para el modelo RRI. a) Modelo digital de elevación original y corregido, b) Dirección de flujo original y corregido, c) Acumulación de flujo normal y logaritmo.



- Lifting y Carving combinados: Buscando desde el punto más aguas arriba, se identifica una celda cuya elevación aguas abajo es mayor que la de dicha celda (punto L). Luego, buscando desde el punto L hacia aguas abajo, se encuentra una celda cuya elevación aguas abajo es menor que la de esa celda (punto H). El punto L se eleva y el punto H se recorta utilizando el parámetro increment, cuyo valor predeterminado es 0.01 m.

El programa *demAdjust2* ejecuta repetidamente cada uno de los procedimientos mencionados anteriormente para cada trayecto de flujo desde todas las celdas aguas arriba detectadas, hasta que se eliminan todas las pendientes negativas. Cabe señalar que este procedimiento no modifica la dirección del flujo.

### 3.5 Datos de sensoramiento remoto

Referido a los datos de sensoramiento remoto de teledetección radar (SENTINEL 1) para la zona de estudio representada por la cuenca hidrográficas de Río Grande.

La misión Sentinel-1 proporciona datos de un instrumento SAR (Radar de Apertura Sintética) en banda C de doble polarización con 5,405 GHz (banda C). Cada escena tiene una de tres resoluciones (10, 25 o 40 metros), cuatro combinaciones de bandas (según la polarización de la escena) y tres modos de instrumento. Cada escena contiene uno o dos de cuatro posibles bandas de polarización, dependiendo de la configuración del instrumento. Las combinaciones posibles son: "Banda única VV", "Banda única HH", "Banda dual VV+VH" y "Banda dual HH+HV":

- VV: copolarización simple, transmisión vertical/recepción vertical.
- HH: copolarización simple, transmisión horizontal/recepción horizontal.
- VV + VH: doble banda de polarización cruzada, transmisión vertical/recepción horizontal.
- HH + HV: doble banda de polarización cruzada, transmisión horizontal/recepción vertical.

Cada escena también incluye una banda adicional denominada "ángulo", que contiene en cada punto el ángulo de incidencia aproximado desde el elipsoide, en grados.



De acuerdo a la disponibilidad de los datos se descargó la polarización VV, de polarización única, transmisión vertical/recepción vertical, con resolución de 10 m.

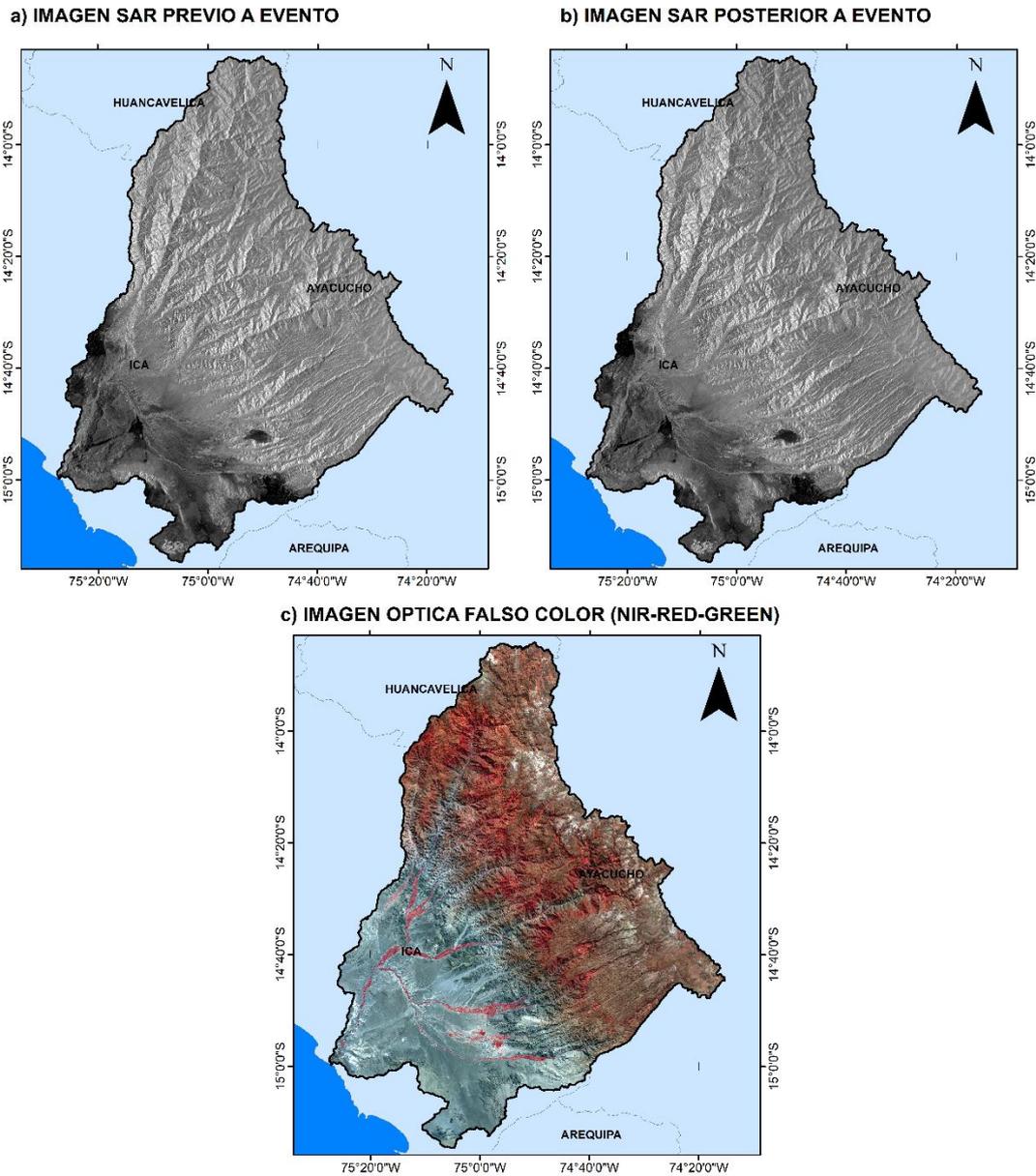


Figura 6: Imágenes SENTINEL 1 SAR con polarización VV y SENTINEL 2-A para la cuenca Ríu Grande. a) Mosaico de imágenes previo a una inundación, b) Mosaico de imágenes posterior a una inundación, c) Mosaico de imagen óptica con falso color para resaltar la vegetación.



### 3.6 Datos de dimensión social y económica

Consiste en la identificación de elementos físicos ubicados en el área de estudio tales como población, medios de vida e infraestructura, las cuales deben estar representados como capas información georreferenciadas para el análisis de exposición frente a inundaciones.

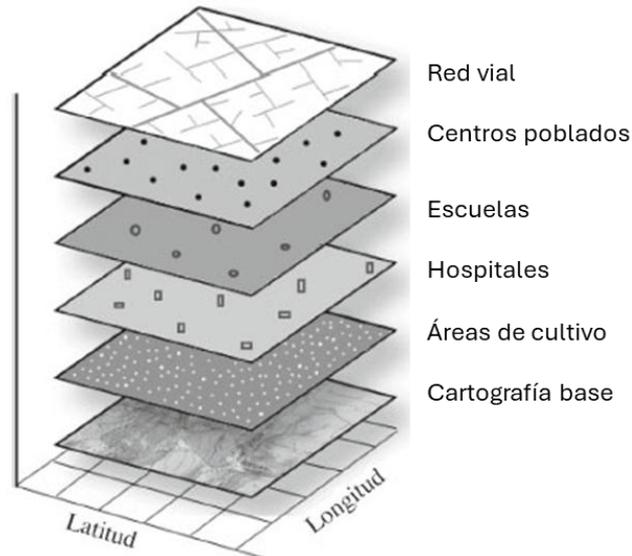


Figura 7. Capas de información georreferenciadas de elementos del territorio

## IV. Análisis de susceptibilidad a inundaciones en la cuenca del río Grande

La susceptibilidad se refiere al grado de predisposición de un determinado ámbito geográfico a la ocurrencia de un evento, determinada por la interacción de los factores condicionantes y desencadenantes asociados al fenómeno.

### 4.1 Factor desencadenante

#### a) Modelo de Precipitación-Infiltración-Inundación (RRI)

Para el modelo RRI el factor desencadenante está representado por:

Precipitación diaria: obtenido a partir del producto PISCO - precipitación diaria como para el evento extremo del niño costero (enero-marzo 2017).

#### b) Modelo Random Forest (RF)

Para el modelo RRI el factor desencadenante está representado por:

Precipitación diaria extrema: obtenido a partir del producto PISCO - precipitación diaria como el máximo extremo diario (1981-2020).



## 4.2 Factores condicionantes

### a) Modelo RRI

Para el modelo RRI los factores condicionantes están representados por:

- **Elevación:** representado como el modelo digital de elevaciones, obtenido de la SRTM de 90m.
- **Dirección de Flujo:** obtenido a partir del modelo digital de elevaciones mediante las herramientas de los sistemas de información geográfica.
- **Acumulación de flujo:** obtenido a partir del modelo digital de elevaciones mediante las herramientas de los sistemas de información geográfica.
- **Cobertura de suelo:** obtenido del producto MCD12Q1.006 MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m, disponible en el catálogo de datos del GEE, re - muestreado a 90m.

### b) Modelo RF

Para el modelo RF los factores condicionantes están representados por:

#### b.1) Factores de terreno:

- **Elevación:** obtenido del catálogo de datos de la plataforma Google Earth Engine (GEE): modelo digital de elevaciones de la NASA SRTM a una resolución espacial de 30 m.
- **Pendiente:** obtenido como la primera derivada del modelo digital de elevaciones a la resolución espacial de 30 m.
- **Geomorfología:** elaborado por INGENMET a una escala de 1/250 00, en la cual presente 54 unidades geomorfológicas en el territorio peruano, disponible desde: <https://geoservidor.minam.gob.pe/>.

#### b.2) Factores meteorológicos:

Lluvia antecedente (ventana de 08 días, noviembre-abril): obtenido a partir del producto PISCO - precipitación diaria como la sumatoria de precipitación diaria de los últimos ocho días, considerando solo los meses de noviembre a abril (1981-2020). Este factor de lluvia acumulada representa las condiciones de humedad del suelo.



### b.3) Factores hidrológicos:

El **índice de humedad topográfica** (TWI) combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y la pendiente de la misma, y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos y está definido como (Sørensen, Zinko, & Seibert, 2006):

$$TWI = \ln \left[ \frac{A}{\tan(\beta)} \right]$$

A es el área local drenada para un punto de cálculo, y  $\beta$ , es la pendiente direccional de la celda de interés (y de las 8 vecinas en el caso de utilizar un algoritmo D8). Fue generado en base al modelo digital de elevaciones SRTM a una resolución de 30 m.

### b.4) Factores de cobertura y de suelo:

- **Índice de vegetación de diferencia normalizada** (NDVI): obtenido del producto MOD13A2.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 1km de resolución espacial, disponible en el catálogo de datos del GEE.
- **Cobertura de suelo** (MODIS): obtenido del producto MCD12Q1.006 MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m, disponible en el catálogo de datos del GEE.
- **Geología**: obtenido de INGEMMET a una escala de 1/100,000, disponible desde: <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin>

## 4.3 Proceso metodológico

La elaboración del mapa de susceptibilidad a inundaciones considera cinco pasos principales:

- Modelamiento de Precipitación-Infiltración-Inundación (RRI)
- Modelamiento predictivo de susceptibilidad de inundaciones con Random Forest, a partir del inventario y de los factores condicionantes
- Integración del modelo RRI con modelo predictivo Random Forest (RF)
- Verificación de resultados mediante el análisis de imágenes radar (SENTINEL 1 – SAR) anteriores y posteriores a un evento de inundación
- Verificación de resultados mediante la visita de campo de puntos críticos representativos definidos en coordinación con los gobiernos locales involucrados.



La Figura 8 muestra el flujo del procedimiento para la elaboración del mapa de susceptibilidad a inundaciones en el ámbito de la cuenca del río Grande.

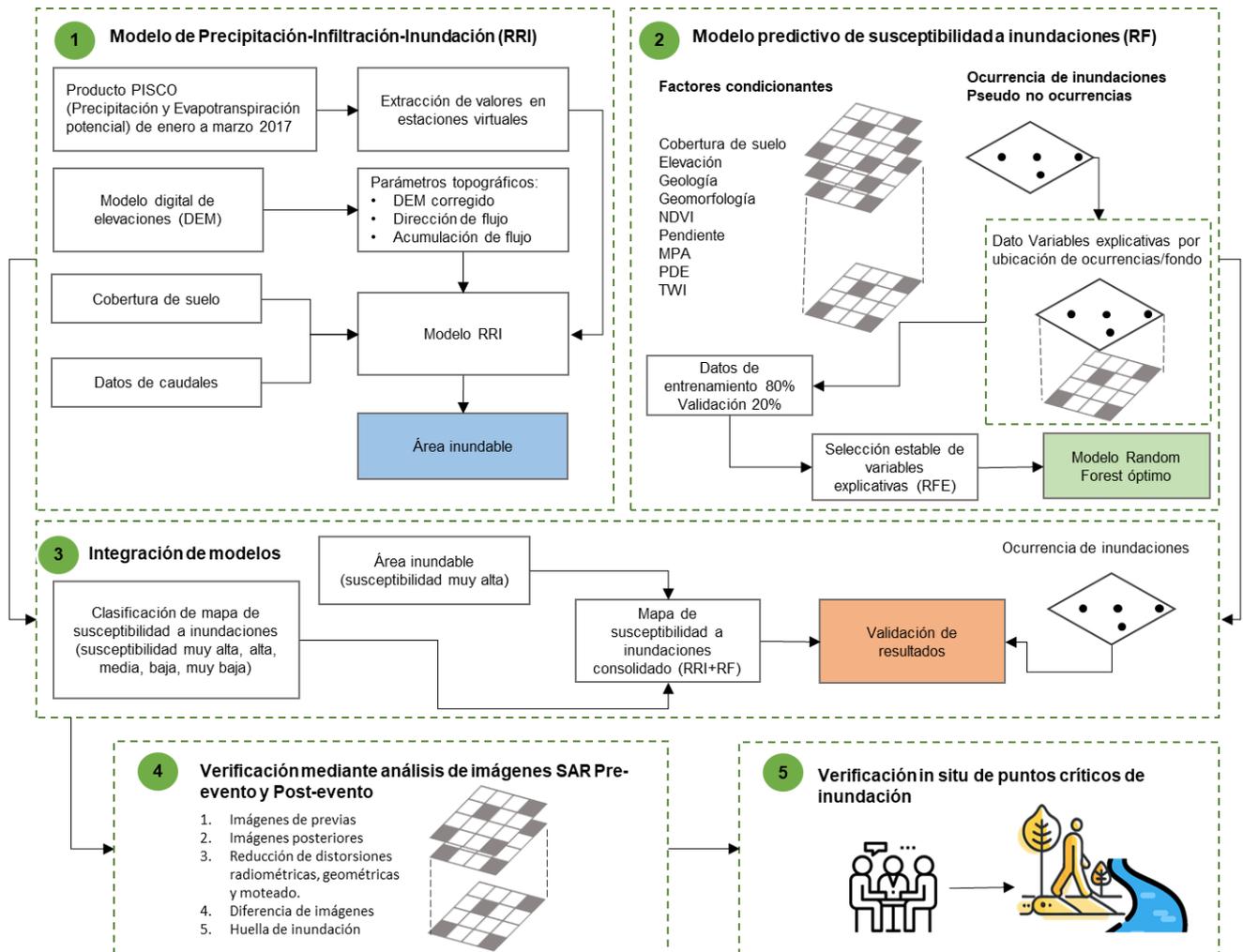


Figura 8: Diagrama de flujo para el modelamiento de susceptibilidad a inundaciones.

#### 4.3.1 Modelo RRI

El modelo RRI es un modelo bidimensional (2-D) capaz de simular simultáneamente el escurrimiento lluvia-escorrentía y la inundación (T. Sayama, Tatebe, Iwami, & Tanaka, 2015). El modelo trata el suelo y los canales fluviales de forma separada. En una celda de cuadrícula donde se encuentra un canal fluvial, el modelo asume que tanto el suelo como el río están ubicados dentro de la misma celda. El canal se discretiza como una sola línea a lo largo de la línea central de la celda de cuadrícula de la pendiente subyacente. El flujo en las celdas de cuadrícula terrestres se calcula utilizando un modelo de onda difusiva bidimensional (2-D), mientras que el flujo en el canal se calcula con un modelo de onda difusiva unidimensional (1-D).



Todas las celdas pueden recibir lluvia y contribuir al escurrimiento que fluye a través de otras celdas terrestres y canales fluviales. Al mismo tiempo, estas celdas están sujetas a inundaciones por múltiples causas: desbordamiento de los canales fluviales, expansión del agua de inundación desde las celdas terrestres circundantes, acumulación de lluvia local o cualquier combinación de las tres. Por lo tanto, el modelo RRI no distingue estructuralmente entre los procesos de lluvia-escorrentía y los de inundación; en cambio, resuelve el flujo del agua de manera hidrodinámica. En cuanto a su aplicación a una cuenca fluvial completa con entrada de precipitación, el modelo es similar a los modelos distribuidos basados en celdas para el escurrimiento lluvia-escorrentía. Mientras que los modelos típicos de lluvia-escorrentía fijan las direcciones del flujo en cada celda de cuadrícula basándose en la topografía de la superficie, el modelo RRI cambia dinámicamente las direcciones del flujo. En este sentido, el modelo RRI se asemeja a los modelos de inundación bidimensionales (2-D). No obstante, a diferencia de muchos otros modelos de inundación, la aplicación del modelo RRI no se limita a planicies de inundación (Figura 9).

Es aplicable a toda una cuenca fluvial. Simula las interacciones de flujo entre el suelo y los canales fluviales teniendo en cuenta los diques, de modo que el modelo RRI no requiere especificar un punto de desbordamiento ni su caudal, que normalmente se exigen como condiciones de frontera al usar modelos de inundación. Otra característica del modelo RRI es la aceptación de la lluvia y la evapotranspiración potencial como entrada del modelo. Estima la evapotranspiración real basándose en las condiciones de humedad del suelo y simula los procesos de flujo superficial y subterráneo, incluyendo la inundación. La aplicación de una ecuación integrada para los flujos superficiales y subterráneos, resuelto numéricamente mediante un algoritmo Runge–Kutta de paso de tiempo adaptativo (Cash & Karp, 1990), permite que el modelo RRI realice cálculos rápidos y estables, incluso en cuencas fluviales grandes con áreas montañosas y llanuras.

La Figura 10 muestra los parámetros iniciales para la ejecución del modelo RRI para la cuenca del río Grande, la cual fue simulada a una resolución espacial de  $\approx 90\text{m}$  por la extensión de la cuenca y capacidad computacional, luego fue re-muestreado a  $30\text{m}$  mediante el vecino más cercano para uniformizar con la resolución de salida del modelo RF.

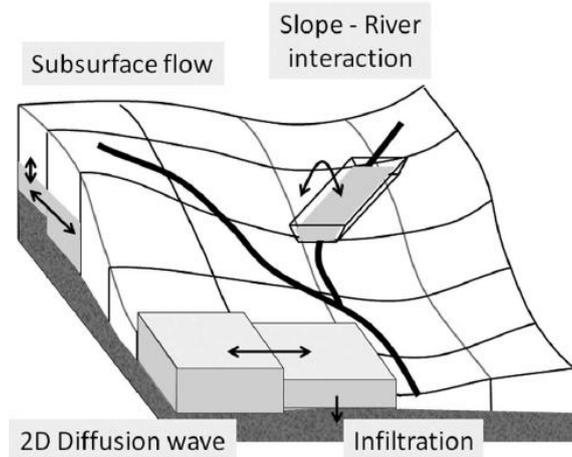


Figura 9: Diagrama esquemático del modelo de lluvia-escorrentía-inundación (RRI).  
Fuente: (Takahiro Sayama, Ozawa, Kawakami, Nabesaka, & Fukami, 2012)

```
3 ./rain/rain.dat
4 ./topo/adem.txt
5 ./topo/acc.txt
6 ./topo/adir.txt
7
8 0 # utm(1) or latlon(0)
9 1 # 4-direction (0), 8-direction(1)
10 360 # lasth [hour]
11 600 # dt [sec]
12 60 # dt_riv [sec]
13 90 # outnum [-]
14 -75.63770d0 # xllcorner_rain
15 -15.31430d0 # yllcorner_rain
16 0.00081d0 0.00081d0 # cellsize_rain
17
18 0.03d0 # ns_river
19 3 # num_of_landuse
20 1 1 1 # diffusion(1) or kinematic(0)
21 0.03d0 0.08d0 0.2d0 # ns_slope
22 1.0d0 0.7d0 1.2d0 # soildepth
23 0.24 0.34 0.40 # gammaa
24
25 0.d0 0.d0 0.d0 # kv
26 0.d0 0.1101d 0.273d # sf
27
28 0.d0 0.d0 0.d0 # ka
29 0.d0 0.d0 0.d0 # gammam
30 8.0d0 8.0d0 8.0d0 # beta
31
32 0.d0 0.d0 0.d0 # ksg (m/s) -- set zero for no bedrock gw
33 0.037d0 0.037d0 0.037d0 # gammag (-)
34 5.7d-5 5.7d-5 5.7d-5 # kg0 (m/s)
35 0.1d0 0.1d0 0.1d0 # fg (-)
36 0.d0 0.d0 0.d0 # rgl
37
38 100 # riv_thresh
39 5.0d0 # width_param_c
40 0.35d0 # width_param_s
41 0.95d0 # depth_param_c
42 0.20d0 # depth_param_s
43 0.d0 # height_param
44 20 # height limit param
```

Figura 10. Parámetros iniciales para el modelo RRI en la cuenca del río Grande



### Resultados del Modelo RRI:

Los resultados obtenidos del modelo RRI en base a la precipitación de enero a marzo para el evento del 2017 en la cuenca del río Grande se muestran en la Figura 11. Estos muestran la zona de inundación en la parte baja de la cuenca, que representa la zona de valle de la cuenca, en la cual se desarrolla agricultura. El modelo RRI ha permitido definir el área de inundación para un evento extraordinario, pero estos resultados serán complementados con el modelo de susceptibilidad obtenido mediante Random Forest.

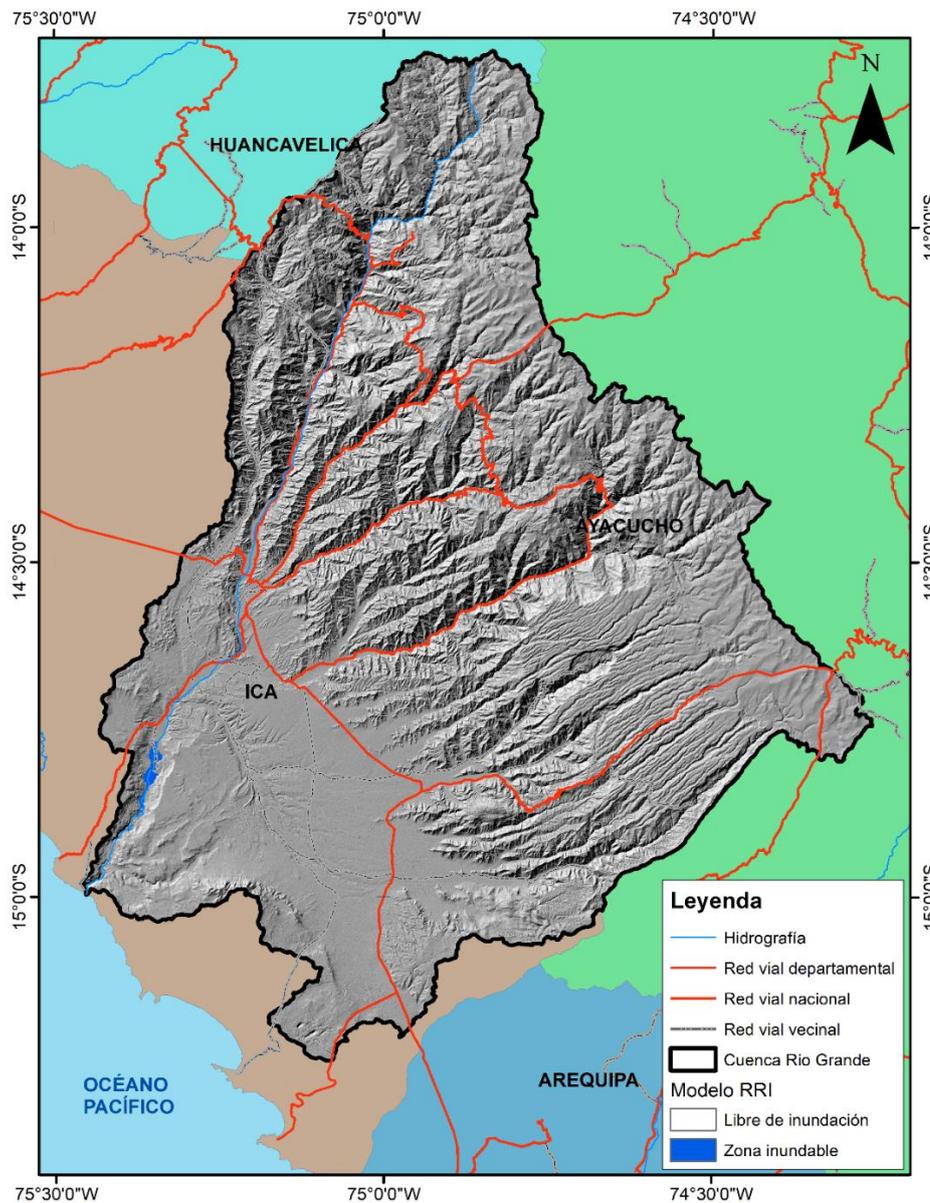


Figura 11. Resultados del modelo RRI en la cuenca del río Grande. Huella de inundación para el evento del 2017.



#### 4.3.2 Modelamiento predictivo de susceptibilidad de inundaciones con Random Forest

El método Random Forest (RF) es una técnica de aprendizaje por ensamble que crea múltiples árboles de decisión para analizar la relación entre las inundaciones y los factores condicionantes, tanto para regresión como para clasificación (Rifath, Muktadir, Hasan, & Islam, 2024).

En RF, se selecciona aleatoriamente un subconjunto de datos y de parámetros predictivos para entrenar cada árbol. Esto ayuda a reducir el sesgo de entrenamiento y mejora el rendimiento en conjuntos de datos ambiguos. Formalmente, para cada árbol en el bosque, se toma una muestra  $S_b$  de tamaño  $n$  con reemplazo de los datos de entrenamiento  $S$ . A partir de esta muestra  $S_b$ , se construye un árbol de decisión  $T_b$ . Durante la construcción del árbol, en cada nodo, se selecciona un subconjunto aleatorio de  $m$  predictores del total de  $M$  predictores, y se elige la mejor división entre estos  $m$ . Este proceso puede expresarse como:

$$S_b \subseteq S, T_b = \text{Tree}(S_b, \{m \subseteq M\})$$

Cada árbol realiza una predicción, y el resultado final se basa en la votación mayoritaria de todos los árboles en el caso de clasificación, o en el promedio de las predicciones de todos los árboles en el caso de regresión. Para clasificación, la votación mayoritaria se expresa como:

$$\hat{y} = \text{mode}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_B)$$

Donde  $\hat{y}_1$  es la clase predicha por el  $i$ -ésimo árbol, y  $B$  es el número total de árboles en el bosque.

Para regresión, la predicción final es el promedio de todas las predicciones de los árboles individuales:

$$\hat{y} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \hat{y}_i$$

Donde  $\hat{y}_1$  es el valor predicho por el  $i$ -ésimo árbol. Random Forest se utiliza a menudo como un punto de referencia para los modelos de sensibilidad a inundaciones.

En cuanto al proceso de RF, una estructura elemental de árbol de decisión comienza con una muestra de entrada (variable) y se ramifica según criterios preestablecidos. Si se cumplen los criterios ('sí'), el árbol de decisión avanza por la ruta definida; si no se cumplen ('no'), sigue una ruta alternativa. Este proceso iterativo continúa hasta que el árbol de decisión llega a un nodo terminal, determinando el resultado final.



## ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

Como predictores para la caracterización de las inundaciones se han seleccionado los factores condicionantes y el factor desencadenante, tal como se muestra en la Figura 12.

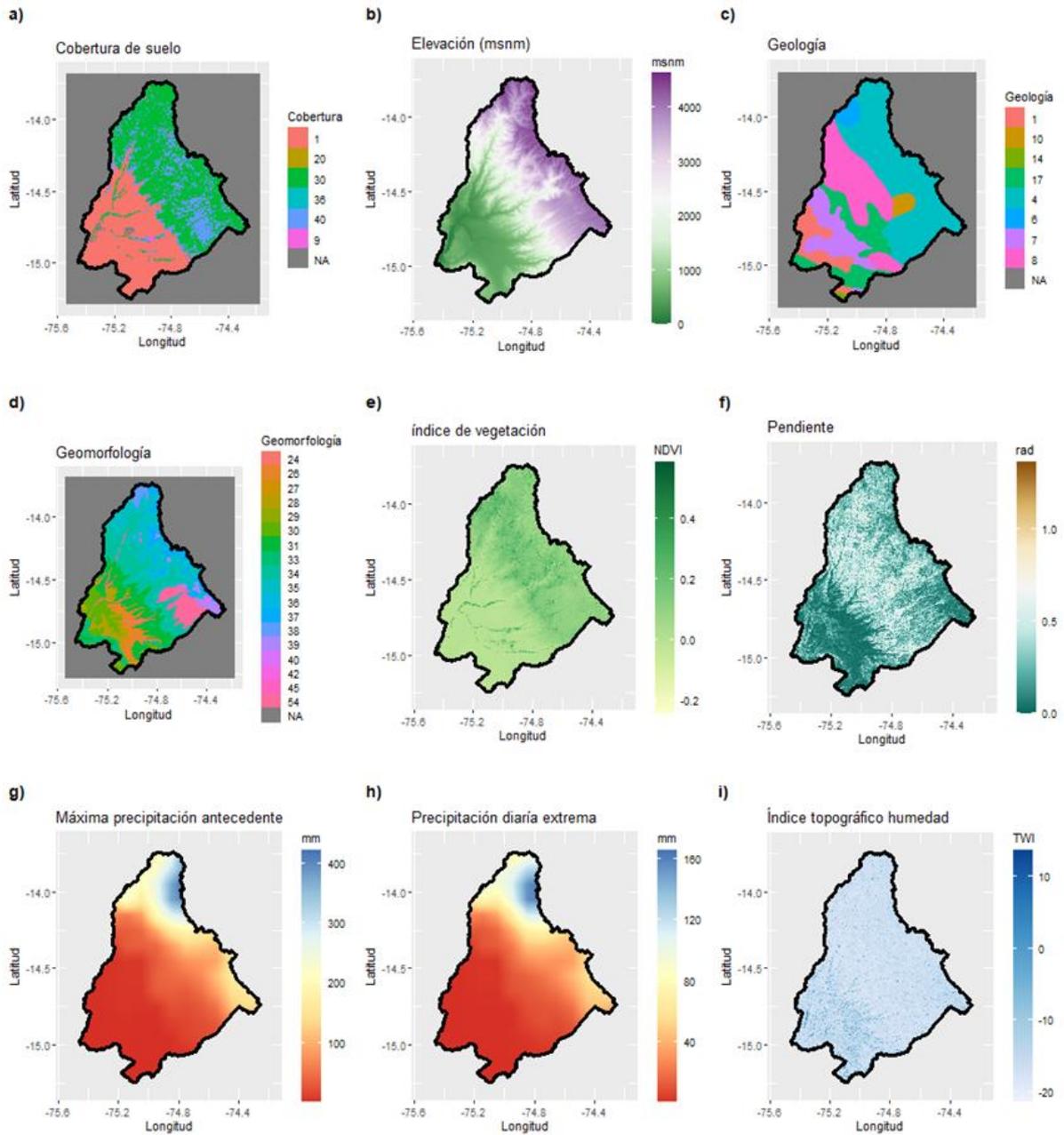


Figura 12. Predictores de inundaciones: a) cobertura de suelo, b) Elevación, c) Geología, d) Geomorfología, e) Índice de vegetación de diferencia normalizada, f) Pendiente, g) Máxima precipitación antecedentes, h) Precipitación diaria extrema, i) Índice topográfico de humedad.



Para el modelo RF, se cuenta con 413 registros de ocurrencias de inundaciones (Tabla 2) y se han utilizado 09 predictores (Figura 12). Se generaron 285 datos de pseudo-no ocurrencias de manera aleatoria (proporcional al 70% de datos existentes), excluyendo las ubicaciones de los datos de ocurrencia, estos servirán como datos de fondo para el modelo RF. Entre datos de ocurrencia (413) y datos de fondo (300) se tendrían 698 registros. La partición de los datos se realizó mediante muestreo aleatorio sin reemplazo, la cual es una técnica de muestreo probabilístico donde se extrae una muestra de una población de forma aleatoria, pero una vez que una unidad es seleccionada, no se vuelve a incluir en el grupo de unidades disponibles para la siguiente selección. Teniendo para los datos de entrenamiento el 80% (558) y para los datos de prueba el 20% (140).

El modelo de clasificación RF fue simulado en R, mediante la librería Random Forest, disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/index.html>

### Sensibilidad de parámetros e importancia de factores en el modelo RF

El entrenamiento y la validación de modelos son fundamentales para la aplicación exitosa de modelos de RF, *mtry* y *ntree* son los dos parámetros más importantes que afectan significativamente la precisión del modelo. Por tanto, la validación cruzada se basó en el modelo de RF con 09 predictores para analizar la sensibilidad de los dos parámetros.

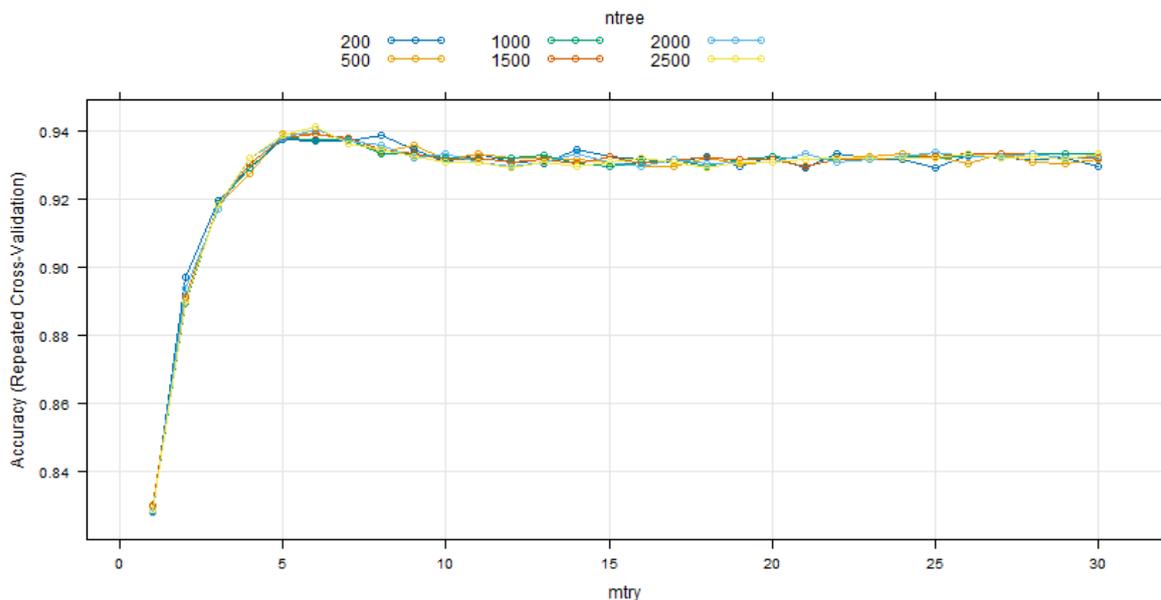


Figura 13. Precisión del modelo en función de los parámetros que se utilizaron en el modelo de RF (*mtry* y *ntree* son dos parámetros importantes del modelo de RF).



La Figura 13 muestra la verificación del mtry y ntree óptimos comparando la precisión del modelo con los datos de entrenamiento (80 % de los datos). La precisión aumenta con la cantidad de mtry, teniéndose un valor óptimo con 6, el valor de ntree no muestra una variación significativa, los mejores parámetros fueron utilizados para el modelo RF (mtry 6, ntree 2500).

El modelo RF puede medir la importancia de una característica e incorporarla a los resultados finales. El modelo puede evaluar la contribución relativa de cada factor permutando los valores de cada característica en cada observación en el conjunto de datos y midiendo cuánto peor se vuelve el error medio cuadrático (MSE) después de la permutación. La Figura 14 muestra las contribuciones relativas de cada variable de entrada a la susceptibilidad a las inundaciones, mostrando que los predictores Geología (48.52%), Geomorfología (17.94%), NDVI (9.95%) y elevación (6.61%) se presentan como las variables más importantes para la predicción del modelo RF. Se aprecia que los factores relacionados a las precipitaciones precipitación diaria extrema (PDE) y Máxima precipitación antecedente (MPA) aportan menos al modelo de predicción RF con 3.11% y 4.01% respectivamente. Las precipitaciones representan los desencadenantes de las inundaciones, sin embargo, estas no ocurren usualmente en la misma zona de precipitaciones, si no aguas abajo en la cuenca del río Grande, debido a sus condiciones topográficas y climáticas.

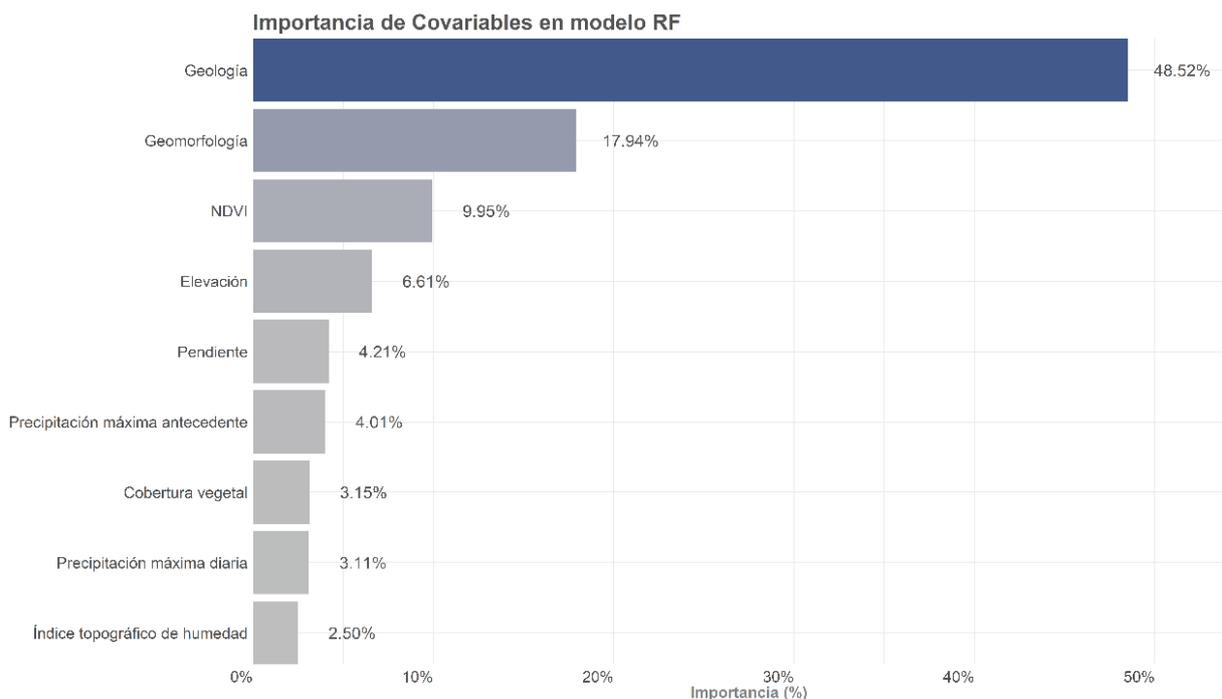


Figura 14: Importancia relativa de los factores de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Grande.



### Resultados del Modelo RF

Los resultados obtenidos del modelo de clasificación con Random Forest en base al inventario de ocurrencia de inundaciones (a una resolución espacial de 100m), y variables predictoras se muestran en la Figura 15. Los resultados fueron evaluados de acuerdo a área bajo la curva AUC, se aprecia una buena eficiencia para los datos de validación (ocurrencias que no fueron tomadas en cuenta para la implementación del modelo), teniendo un AUC de 0.9928, el cual es cercano a 1, con lo cual el modelo tendría una performance muy alta

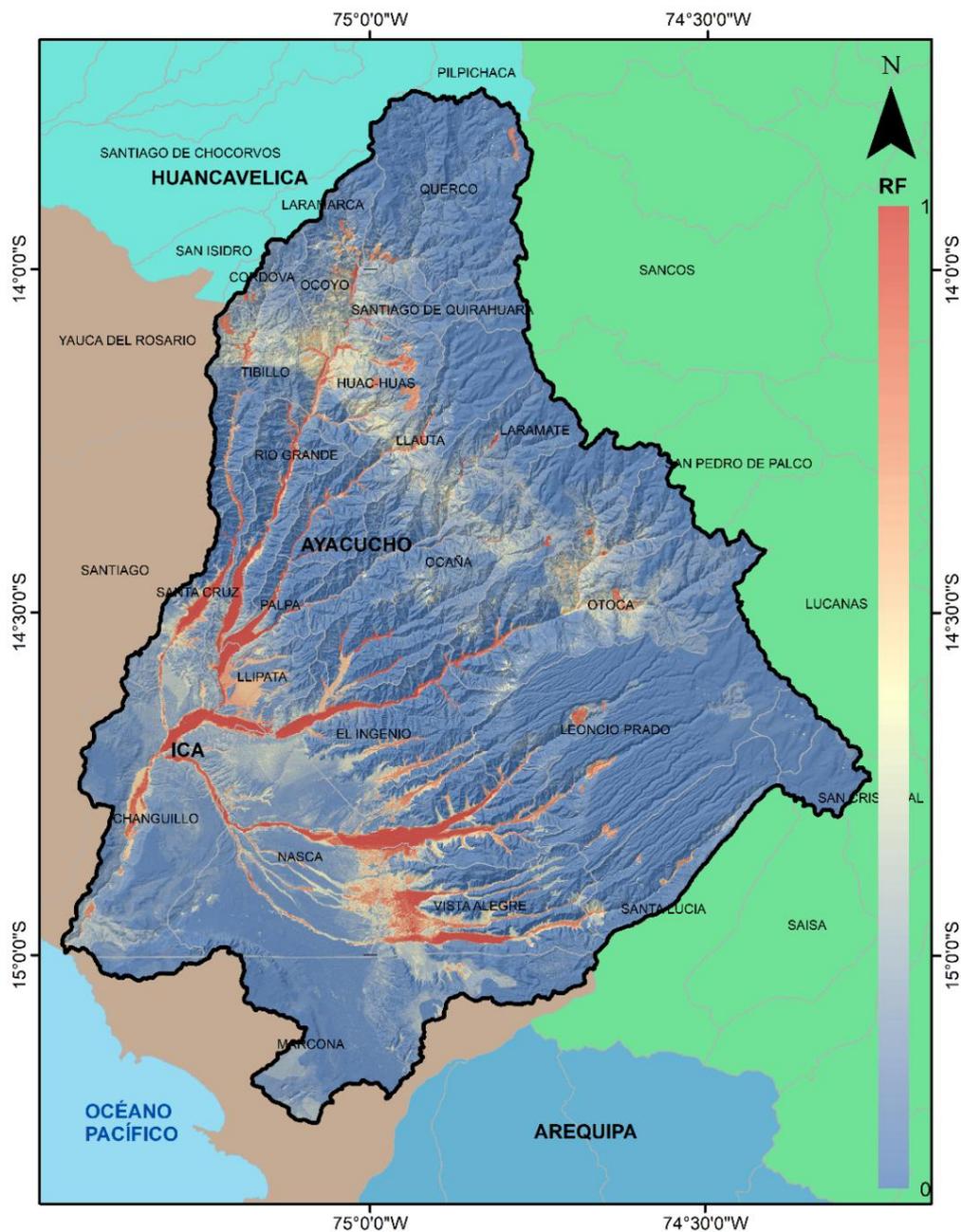


Figura 15. Resultados del modelo RF. Susceptibilidad a ocurrencia de inundaciones.



En la Figura 16 se muestra los resultados del modelo de predicción de susceptibilidad usando RF, las tonalidades en rojo muestran las áreas más susceptibles a ser afectadas por las inundaciones (probabilidad cercana a 1), mientras las tonalidades en azul muestran las zonas que no serían afectadas o poco afectadas (probabilidad cercana a 0). Se aprecia que las áreas más propensas a afectación están representadas por las zonas de valles en la parte media y baja de la cuenca, representado por los depósitos aluviales y fluviales (Figura 17).

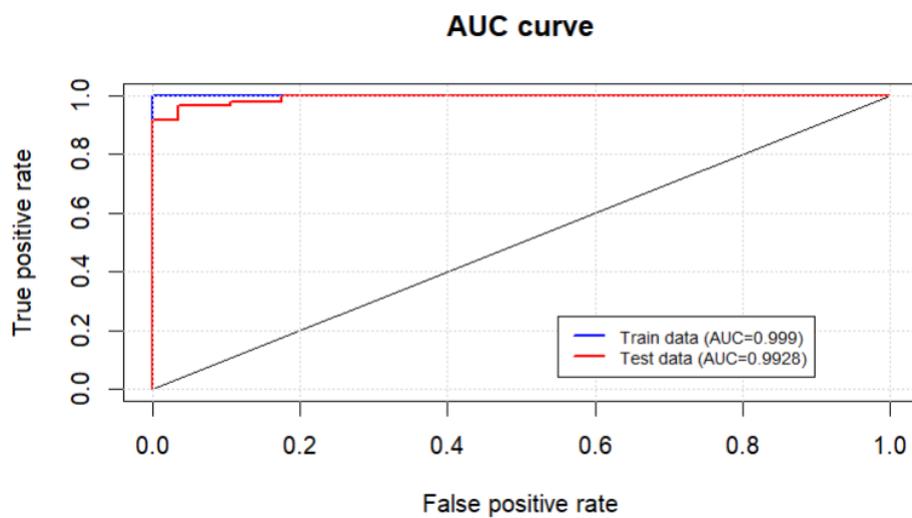


Figura 16. Área bajo la curva para los datos de calibración y validación del modelo RF.

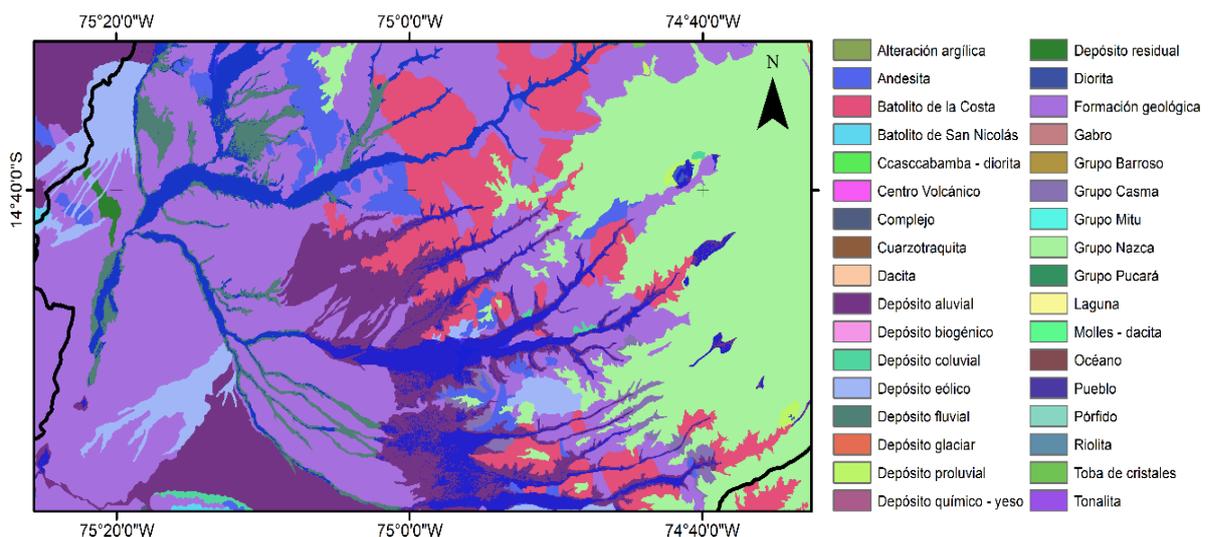


Figura 17. Mapa geológico y zona de inundación de acuerdo a modelo RF.



### 4.3.3 Integración del modelo RRI con modelo predictivo Random Forest

Para la integración de los modelos generados se procederá clasificando el resultado de huella de inundación de modelo RRI como susceptibilidad muy alta a ocurrencia de inundaciones. Luego la clasificación se realizará de acuerdo a la distribución de los valores de susceptibilidad dentro de la cuenca de estudio, teniendo en cuenta las ocurrencias de inundaciones, clasificando en muy alta, alta, media, baja, muy baja.

El modelo integrado, complementará la huella de inundación obtenida con el modelo RRI con la capacidad predictiva de técnicas de aprendizaje automático como RF, que permitirá zonificar en cuanto a susceptibilidad o probabilidad de ocurrencia a inundaciones en la cuenca del río Grande.

Se evaluaron las mejoras al modelo o alternativas al modelo integrado RRI+RF, en tal sentido se incorporó el análisis de las imágenes SAR y los trabajos de campo. Esta mejora ha permitido la validación de los resultados y evaluación de escenarios de riesgo por inundación en la cuenca Río Grande.

#### **Modelo compuesto**

Para la fusión de los modelos generados se procedió de la siguiente manera:

- a) Se realizó la suma de los mapas binarios RRI (valores 0 y 1) con el mapa RF (valores entre 0 y 1).
- b) El mapa resultante varía entre 0 y 2.
- c) Luego se clasifica: Valores mayores a 0.9 se clasifica como Muy Alto, los valores entre 0.75-0.9 se clasifica como Alto, los valores entre 0.6-0.75 se clasifica como Medio, los valores entre 0.4-0.6 se clasifica como Bajo, los valores menores se clasifican como Muy Bajo.
- d) Visita de campo para la verificación de puntos críticos.
- e) Reuniones técnicas con instituciones involucradas en la evaluación de riesgo de desastres por inundación para la recepción de sugerencias para mejoras al modelo.

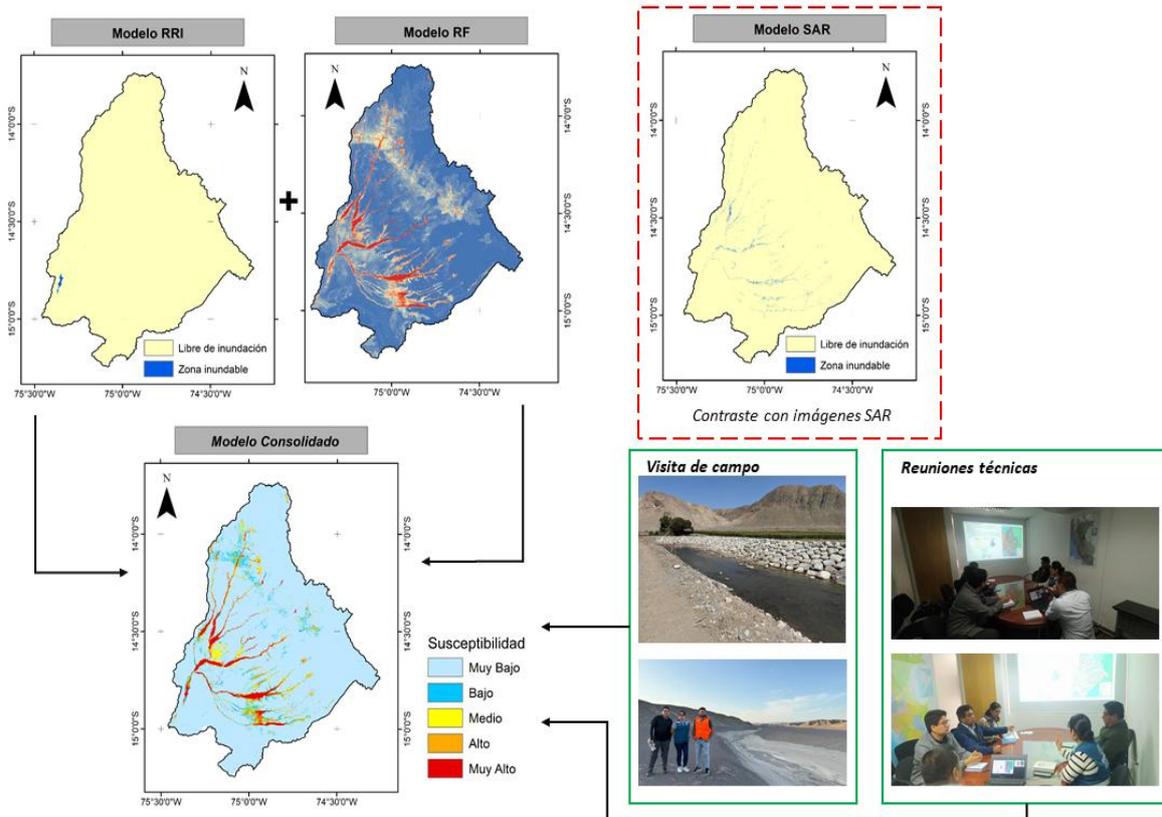


Figura 18. Flujo de proceso para obtener el Modelo Compuesto para la cuenca Río Grande.

La clasificación se realizó de acuerdo a la distribución de los valores de susceptibilidad dentro de la cuenca de estudio, teniendo en cuenta las ocurrencias de inundaciones, se ha tomado el valor de 0.75 como punto de corte, donde los que se encuentran por encima de dicho valor representan susceptibilidad alta y muy alta (zona de inundación obtenido por el modelo RRI + Susceptibilidad RF), para la susceptibilidad media fue de 0.6-0.75, para la susceptibilidad bajo fue de 0.4-0.6, finalmente muy bajo 0-0.4 (Tabla 4).

Tabla 4: Clasificación de los valores de susceptibilidad para la cuenca río Grande.

Susceptibilidad	Clasificación	Porcentaje de área	Área (km <sup>2</sup> )
0-0.4	Muy bajo	89.08%	9,782.87
0.4-0.6	Bajo	3.27%	358.60
0.6-0.75	Medio	2.62%	287.21
0.75-0.9	Alto	2.09%	229.11
0.9-1.0	Muy alto	2.95%	323.89



## ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

El modelo desarrollado RRI+RF ha permitido zonificar en cuanto a susceptibilidad o probabilidad de ocurrencia a inundaciones en la cuenca del río Grande, tal como se muestra en la Figura 19. Este mapa de susceptibilidad representa una herramienta de gestión para la priorización de zonas potencialmente inundable, en las cuales se puedan realizar los estudios más detallados (modelos hidráulicos, topografía a detalle, entre otros) referentes a la temática de inundaciones, ya que debido a la extensión de la cuenca y complejidad de la misma se hace necesario zonificar e identificar las zonas que deberían ser evaluadas a mayor detalle y en las cuales se debe realizar la gestión de riesgo de desastres a inundaciones a una escala más local.

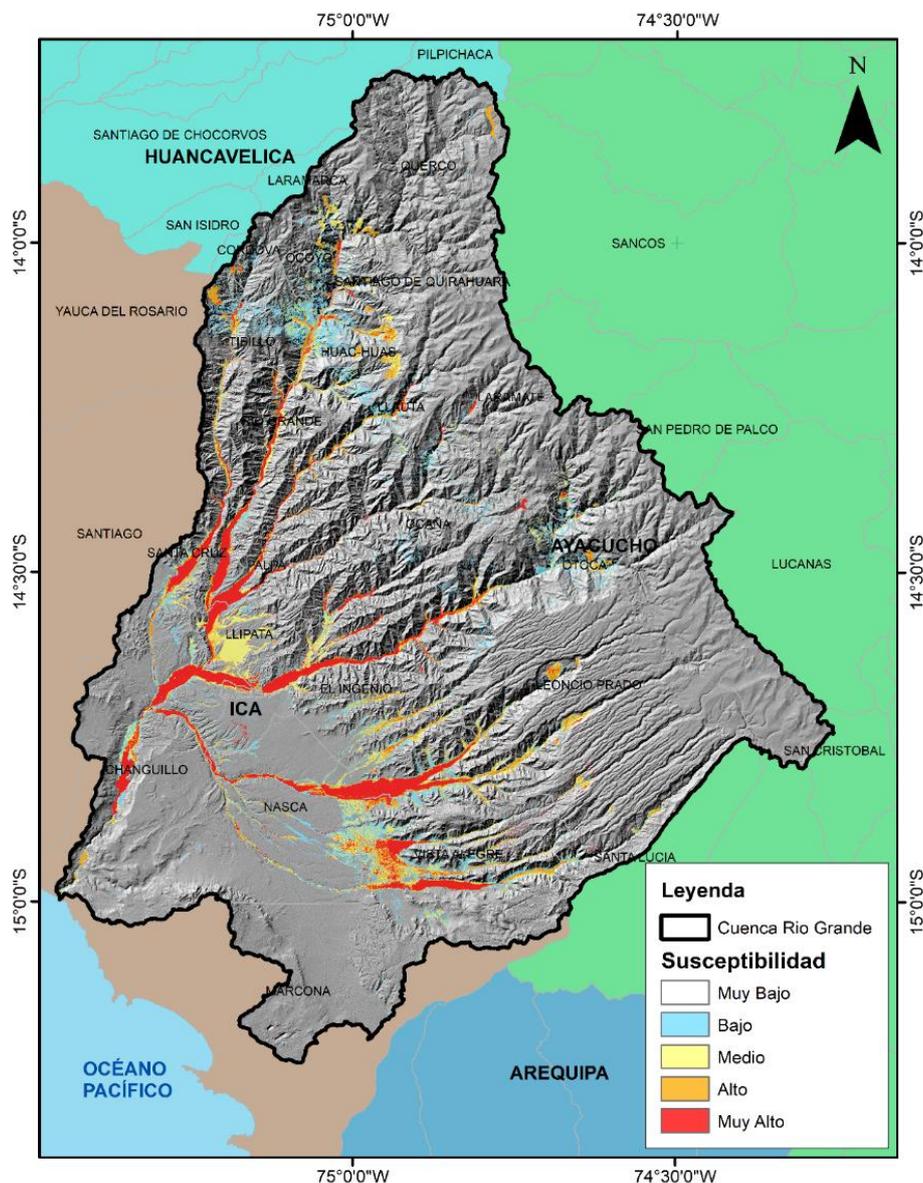


Figura 19. Resultados del modelo RRI+RF de susceptibilidad a inundación en la cuenca río Grande. La susceptibilidad de ocurrencia a inundación se muestra clasificado desde muy bajo a muy alto.



La Tabla 5 muestra la cantidad de ocurrencias por cada clase del modelo compuesto RRI+RF, en la cual se aprecia que entre la susceptibilidad alta y muy alta el modelo ha identificado el 93.7% de las ocurrencias de inundaciones en la cuenca. Se aprecia que el modelo en la clasificación muy alta captura el 85.5 % de los registros, lo cual define la huella de inundación para un evento extraordinario seleccionado, el modelo complementa la susceptibilidad en base al modelo RF de acuerdo a las ocurrencias como registros de inundaciones, emergencias registradas, identificados como puntos críticos de riesgo de inundación. Teniendo así el modelo propuesto RRI+RF una alta capacidad para identificar las zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca del río Grande.

Tabla 5: Clasificación de ocurrencias de inundación de acuerdo a los resultados del modelo de susceptibilidad RRI+RF para la cuenca río Grande

Susceptibilidad	Ocurrencias	Porcentaje
Muy baja	9	2.2%
Baja	5	1.2%
Media	12	2.9%
Alta	34	8.2%
Muy alta (modelo RRI)	353	85.5%

De acuerdo a los registros de ocurrencias y observaciones realizadas durante la visita de campo, se puede apreciar que, en los periodos de fuertes lluvias, la cuenca del río Grande presenta con alta y muy susceptibilidad a inundaciones en su zona baja. En la zona media-alta, estas condiciones suelen estar asociadas principalmente a la activación de quebradas.

#### 4.3.4 Verificación mediante el análisis de imágenes radar (SENTINEL-1 – SAR) previo y posterior a un evento de inundación

Para analizar las áreas de afectación de peligros de inundaciones se utilizaron datos de sensoramiento remoto, a través de un catálogo de imágenes Synthetic Aperture Radar (SAR) disponibles de la constelación Copernicus. Sentinel-1 es uno de los mejores para sistemas SAR. Se ha considerado el método de umbral y el procesamiento multitemporal de las imágenes SAR Sentinel-1.

Se requieren dos conjuntos de imágenes satelitales para detectar la inundación y estimar su extensión. Un conjunto consiste en la imagen adquirida antes del evento y el otro comprende las imágenes adquiridas durante/posterior a la ocurrencia del evento de inundación. La imagen previa generalmente se usa como referencia. Éstas imágenes se pueden usar para buscar y mapear las áreas inundadas (Anusha & Bharathi, 2019).



Las imágenes SAR comprenden un sistema de percepción remota que no depende de la energía electromagnética del sol o de las propiedades térmicas de la tierra. Los datos satelitales de microondas (SAR) son la herramienta preferida para el mapeo de inundaciones desde el espacio debido a su capacidad de capturar las imágenes tanto de día y de noche, independientemente de las condiciones climáticas.

El procedimiento metodológico consta de las siguientes etapas:

- Pre-procesamiento: Las imágenes SAR se degradan por el ruido moteado (speckle noise). La eliminación del “speckle noise” se realiza utilizando un filtro mediano de tamaño de ventana 3x3. Luego, la rectificación geométrica de las imágenes se realiza de imagen a imagen.
- Estimación de la mancha de inundación: a partir de la imagen previa a la inundación, la máscara de agua se genera aplicando la técnica de digitalización. El umbral (Rahman & Thakur, 2018) es la técnica aplicada en las imágenes durante la inundación para discriminar los cuerpos de agua y las áreas no acuáticas de la imagen SAR.
- Pos-procesamiento: el mapeo de inundaciones se realiza superponiendo la capa inundada en el mapa a nivel de pixel para el evento analizado (Niño del año 2017, ciclón Yaku 2023 y año normal 2020).

Para el análisis de las imágenes Sentinel-1 SAR, se seleccionaron las imágenes entre el 19 y 26 de enero como condiciones previas a la inundación, las imágenes entre el 12 y 19 de febrero como condiciones posteriores a la inundación, ya que entre el 27 de enero y 11 de febrero se registraron las fuertes precipitaciones en el territorio peruano debido al niño costero. Los datos fueron descargados desde la plataforma de Google Earth Engine, disponibles: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S1\\_GRD?hl=es-419](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD?hl=es-419)

Se puede elegir entre las polarizaciones ‘VH’ y ‘VV’ para realizar el análisis. Se recomienda ampliamente el uso de ‘VH’ para la cartografía de inundaciones, ya que es más sensible a los cambios en la superficie terrestre, mientras que ‘VV’ es más susceptible a estructuras verticales y puede ser útil para delimitar cuerpos de agua abiertos respecto a la superficie terrestre (por ejemplo, detección de la línea de costa o un gran cuerpo de agua que se formó tras un evento de inundación).



Al realizar la detección de cambios, es necesario seleccionar la misma dirección de pasada para las imágenes que se van a comparar, con el fin de evitar señales falsas positivas causadas por diferencias en el ángulo de visión. Se puede elegir entre las direcciones de pasada 'DESCENDENTE' y 'ASCENDENTE', dependiendo del área de estudio y disponibilidad de los datos.

La información de las imágenes Sentinel-1 Nivel 1 Ground Range Detected (GRD) en Google Earth Engine ya ha pasado por los siguientes pasos de preprocesamiento:

- Apply-orbit-file (actualiza los metadatos de la órbita)
- Eliminación de ruido en los bordes (ARD border noise removal) – elimina ruido de baja intensidad y datos no válidos en los bordes de la escena
- Eliminación de ruido térmico (Thermal noise removal) – elimina ruido aditivo en las sub-bandas
- Calibración radiométrica – calcula la intensidad de retrodispersión utilizando parámetros de calibración del sensor
- Corrección del terreno (terrain-correction) – ortorrectificación
- Conversión del coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^{\circ}$ ) a decibelios (dB)

Para la detección de cambios, se aplica el enfoque en el que el mosaico posterior a la inundación se divide por el mosaico anterior a la inundación (esto se realizó con el álgebra de mapas en los sistemas de información geográfica), lo que da como resultado una capa ráster que muestra el grado de cambio por píxel. Los valores altos (píxeles en azul) indican un cambio significativo, mientras que los valores bajos (píxeles transparentes) indican poco cambio en la Figura 20.

La Figura 20 muestra las áreas inundadas (tonos azules) de acuerdo al análisis de imágenes de satélite para el evento del niño costero del 217, los resultados muestran que las zonas afectadas son los valles agrícolas en la parte baja de la cuenca, principalmente los distritos de Vista Alegre, Nazca, Llipata, Changillo dentro de la provincia de Nazca. En la parte media alta de la cuenca se aprecian a los distritos Leoncio Prado, Huac-Huas dentro de la provincia Lucanas.



## ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

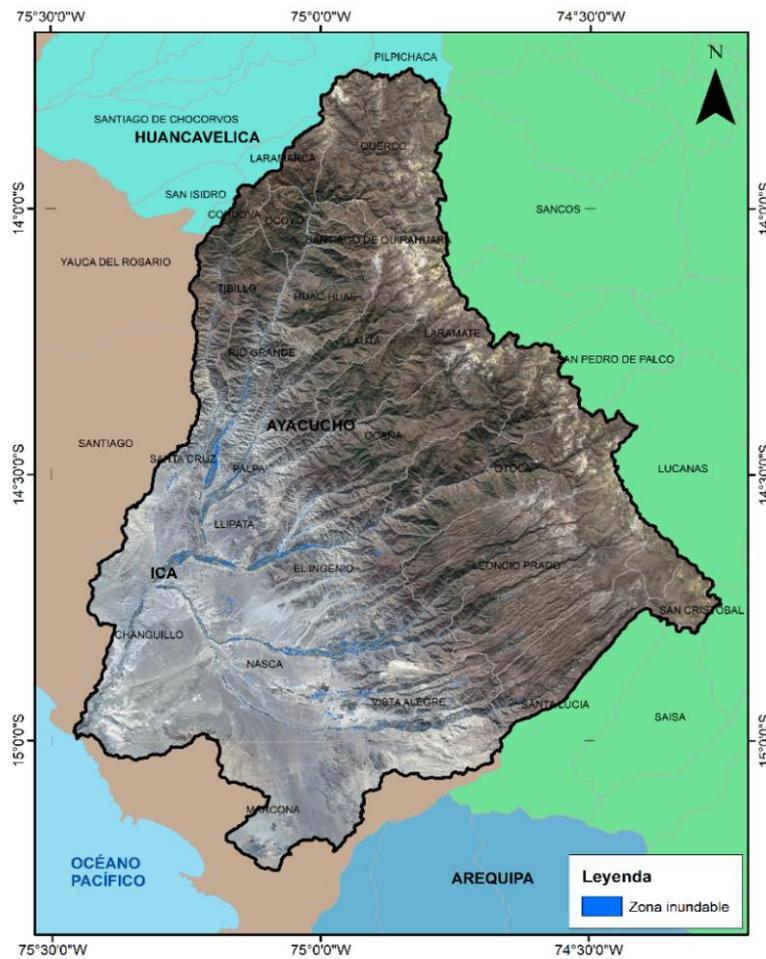


Figura 20: Área de inundación obtenido con imágenes Sentinel-1 SAR para El Niño Costero 2017.

Se realizó la comparativa del resultado del análisis de las imágenes SAR con el modelo consolidado RRI+RF. Los pixeles clasificados como inundación de acuerdo a la susceptibilidad en el modelo compuesto se aprecian en la Figura 21.

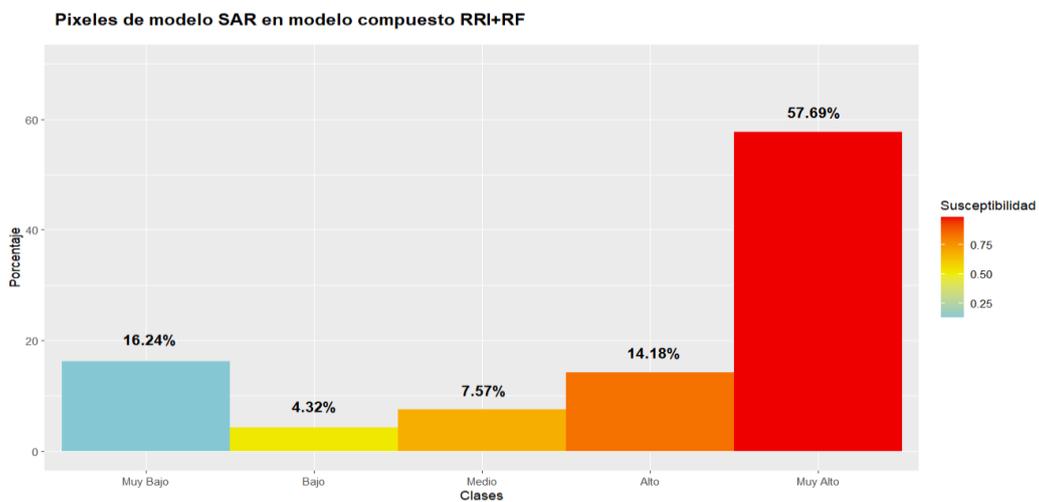


Figura 21. Comparativa entre pixeles clasificados como inundación con el modelo RRI+RF



Los resultados muestran que el 72% de los pixeles se clasifican como susceptibilidad alta y muy alta. Lo cual representa una cantidad considerable de similitud con los resultados obtenidos en modelo consolidado, esto ha permitido la evaluación del modelo desarrollado con datos de sensoramiento remoto, además de los trabajos de verificación en la visita de campo.

#### 4.3.5 Verificación in situ de puntos críticos de inundación

Se realizó los trabajos de verificación en campo con el acompañamiento del equipo técnico de la Municipalidad Provincial de Lucanas durante el 16 de mayo del 2025. La Figura 22 muestra la ubicación espacial de los puntos visitados en campo. Los puntos visitados coinciden con los resultados del modelo, en los niveles de susceptibilidad alta y muy alta a la ocurrencia de inundaciones.

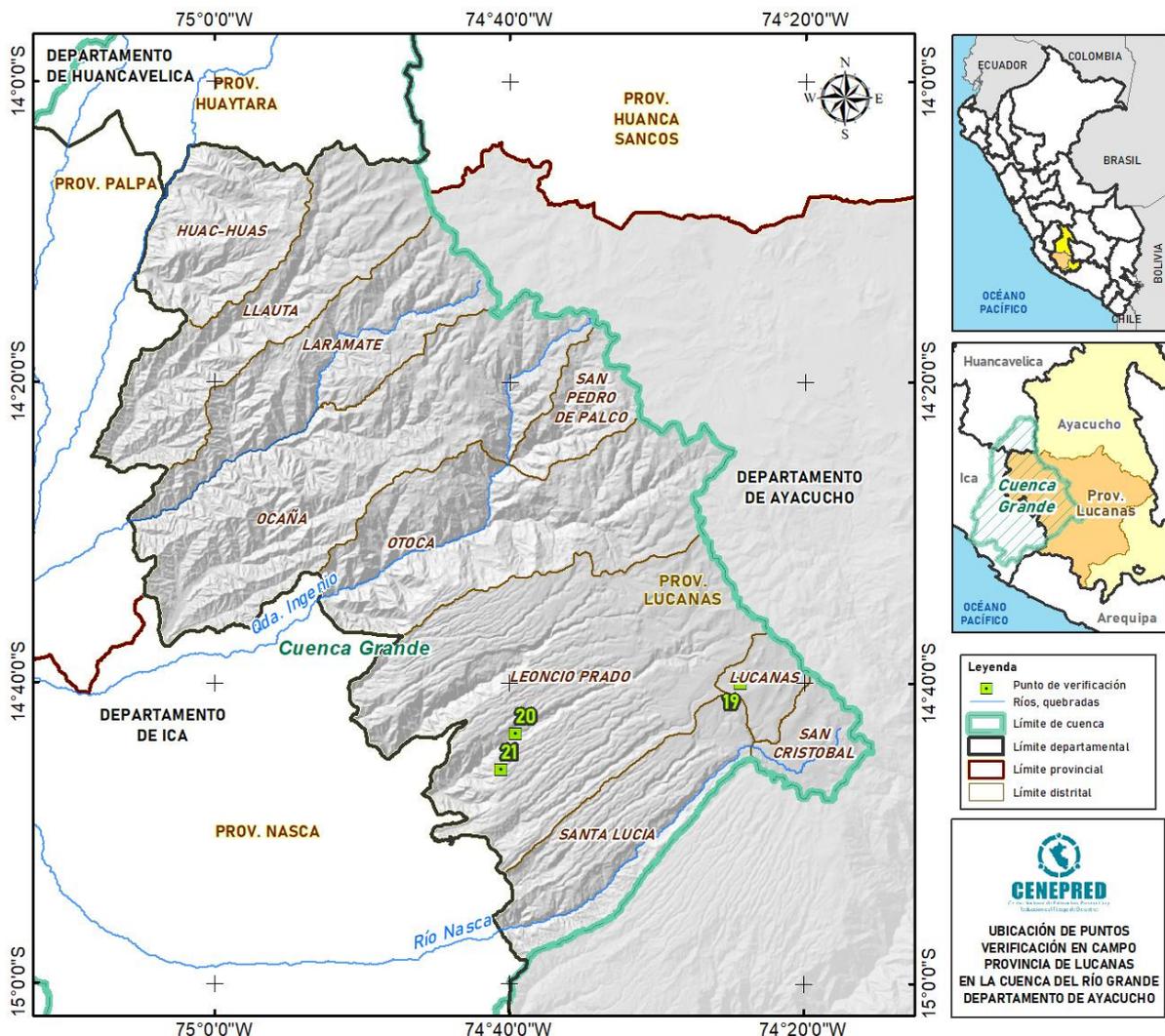


Figura 22. Ubicación de los puntos verificados en campo en la provincia de Lucanas, en el ámbito de la cuenca del río Grande



A continuación, se muestra los puntos verificados en campo en la provincia de Lucanas.



ID	Este	Norte	Elevación	Fecha
19	564029.4	8378325.7	3945.0	16/05/2025
Distrito		Provincia		Departamento
Lucanas		Lucanas		Ayacucho
Descripción				
Reserva Natural Pampas Galeras: Área inundable por desborde de río. Clasificado como susceptibilidad muy alta en el modelo				



ID	Este	Norte	Elevación	Fecha
20	536583.8	8372156.6	2662.0	16/05/2025
Distrito		Provincia		Departamento
Leoncio Prado		Lucanas		Ayacucho
Descripción				
Activación de quebradas con material rocoso con afectación a valle agrícola. Clasificado como susceptibilidad alta en el modelo				



ID	Este	Norte	Elevación	Fecha
21	534838.4	8367766.7	2691.0	16/05/2025
Distrito		Provincia		Departamento
Leoncio Prado		Lucanas		Ayacucho
Descripción				
Activación de quebradas con material rocoso con afectación al valle agrícola. Clasificado como susceptibilidad alta en el modelo				



### 4.3.6 Mapa de susceptibilidad a inundaciones

La Figura 23 muestra el mapa de susceptibilidad a inundaciones de la provincia de Lucanas, en el ámbito de la cuenca del río Grande, con una clasificación de cinco niveles: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

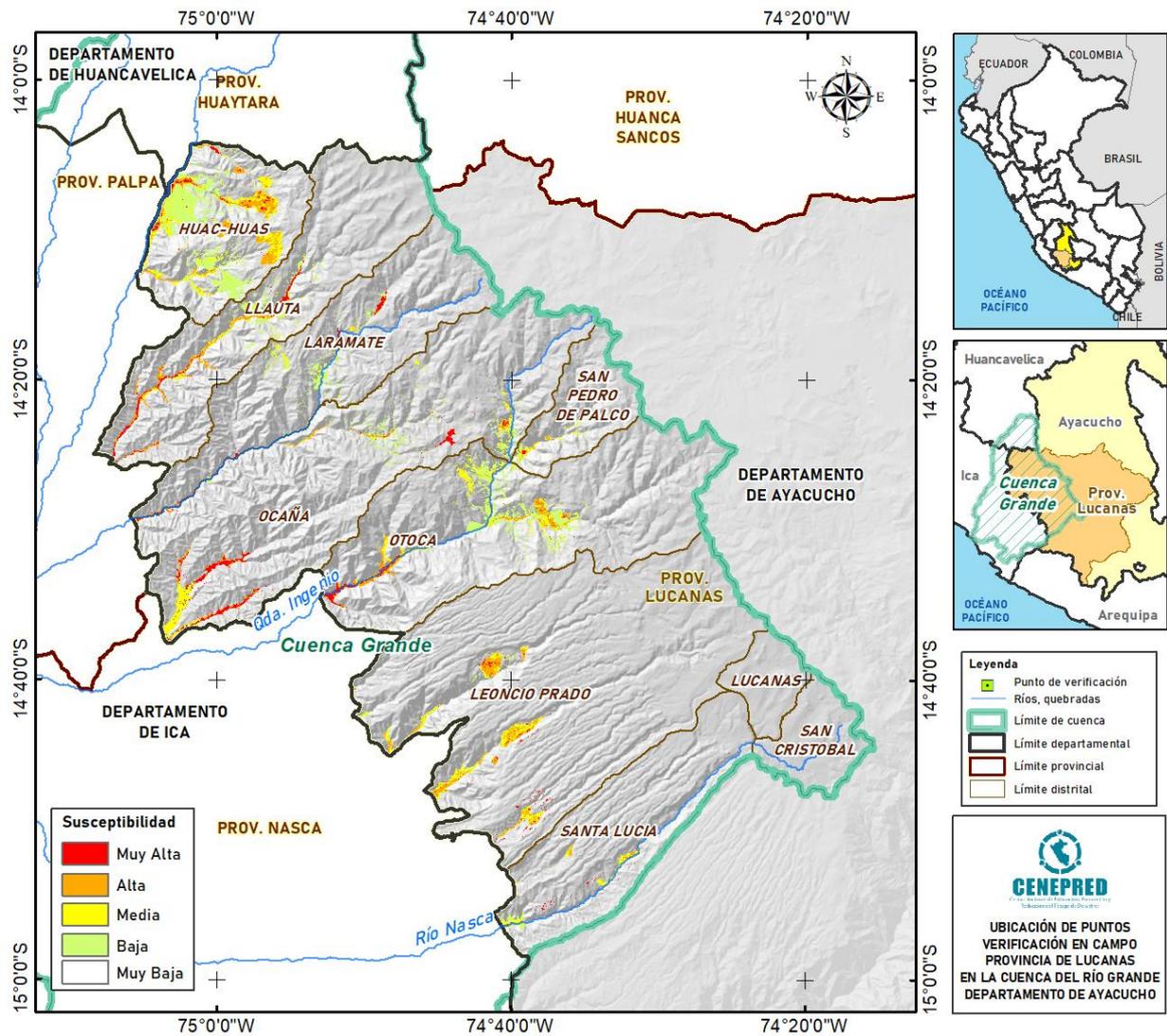


Figura 23. Mapa de susceptibilidad a inundaciones de la provincia de LUCANAS, en el ámbito de la cuenca del río Grande



## V. Análisis de elementos expuestos

Consiste en la identificación de la información cartográfica de población, medios de vida e infraestructura dentro de las áreas susceptibles a inundación de la cuenca de estudio, como:

### Centros poblados

Representada por la cartografía de los centros poblados, recopilada del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI 2018). Esta información brinda información sobre las características de población y vivienda del área de estudio (Tabla 6).

Tabla 6. Población y vivienda expuesta a zonas susceptibles a inundación.

Distritos	Centros poblados	Población				Viviendas				
		Total	0 a 17 años	18 a 59 años	60 años a más	Total	Ladrillo o bloque de cemento	Adobe	Madera pared	Material precario
Huac-Huas	49	1 302	341	687	274	489	4	406	12	67
Laramate	12	855	269	399	187	293	12	269	0	12
Leoncio Prado	30	702	159	339	204	274		251		23
Llauta	18	426	96	200	130	164	6	144	0	14
Ocaña	15	990	260	504	226	328	5	303	1	19
Otoca	39	1303	405	697	201	416	28	307	9	72
San Pedro De Palco	8	245	71	113	61	94	3	86	1	4
Santa Lucia	3	164	45	71	48	63	0	59	0	4
<b>Total</b>	<b>174</b>	<b>5 987</b>	<b>1 646</b>	<b>3 010</b>	<b>1 331</b>	<b>2 121</b>	<b>58</b>	<b>1 825</b>	<b>23</b>	<b>215</b>

Nota: El material precario comprende muros de quincha, triplay/calamina/estera, piedra con barro, piedra o sillar con cal o cemento, tapia, otros

Fuente: INEI 2018. Censos Nacionales 2017.

### Áreas agrícolas

Representada por la cartografía de la superficie dedicada a la actividad agrícola, recopilada del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI 2024). En las zonas susceptibles a inundaciones identificadas en el área de estudio se calculó 6 829,4 hectáreas de superficie agrícola.

### Establecimientos de salud

Representada por la cartografía de los centros de salud, recopilada del Ministerio de Salud (MINSa 2025). De acuerdo al análisis geoespacial, existen 17 establecimientos de salud expuestos a inundaciones, los cuales presentan diferentes categorías que indican su nivel de complejidad, y con diferentes capacidades y servicios ofrecidos. La asignación de estas categorías es establecida por el Registro Nacional de Instituciones



Prestadoras de Servicios de Salud (RENIPRESS). Las categorías del tipo I-1 y I-2 corresponden a los puestos de salud de primer nivel de atención, y las categorías del tipo I-3 y I-4 a centros de salud y centros médicos del primer nivel de atención.<sup>1</sup>

Tabla 7. Establecimientos de salud expuesta a zonas susceptibles a inundación.

Distrito	Establecimientos de salud			
	I-1	I-2	I-3	Total
Huac-Huas	3		1	4
Laramate			1	1
Leoncio Prado	3			3
Llauta		1		1
Ocaña	1		1	2
Otoca	2		1	3
San Pedro De Palco		1		1
Santa Lucia	2			2
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>17</b>

Fuente: MINSA 2025

### Instituciones educativas

Representada por la cartografía de las instituciones educativas, recopilada del Ministerio de Educación (MINEDU 2024). Existe un total de 81 instituciones educativas expuestas a inundaciones, de las cuales el 25% son de nivel inicial y el 46% de nivel primaria.

Tabla 8. Instituciones educativas expuesta a zonas susceptibles a inundación

Distrito	Instituciones educativas				
	Total	Inicial	Primaria	Secundaria	Técnico Productiva
Huac-Huas	18	5	9	3	1
Laramate	4	1	1	1	1
Leoncio Prado	11	3	4	3	1
Llauta	10	2	6	1	1
Ocaña	10	3	3	2	2
Otoca	18	4	9	4	1
San Pedro De Palco	6	1	3	1	1
Santa Lucia	4	1	2	1	
<b>Total</b>	<b>81</b>	<b>20</b>	<b>37</b>	<b>16</b>	<b>8</b>

Fuente: MINEDU 2024

<sup>1</sup> Resolución Ministerial N° 546-2011/MINSA, del 13/07/2025.



### Red vial

Representada por la cartografía de las redes viales nacional, departamental y vecinal, recopilada Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC 2020). El análisis muestra que existe 228.8 Km. ubicados en zonas susceptibles a inundaciones, de los cuales el 12.5% corresponden a la red vial nacional y el 51% a la red vial departamental.

Tabla 9.Red vial expuesta a zonas susceptibles a inundación

Distrito	Red vial (Km)			
	Nacional	Departamental	Vecinal	Total
Huac-Huas		38.6	2.	40.6
Laramate		8.6	7.	15.5
Leoncio Prado	.1		26.5	26.5
Llauta	28.6	10.3	8.	47.
Ocaña		21.1	5.6	26.6
Otoca		31.8	25.8	57.6
San Pedro de Palco		6.3	3.1	9.3
Santa Lucia			5.6	5.6
<b>Total</b>	<b>28.7</b>	<b>116.7</b>	<b>83.5</b>	<b>228.8</b>

Fuente: MTC 2020

### Infraestructura hídrica

Representada por la cartografía de bocatomas, recopilada de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2017). De acuerdo al análisis realizado, existe diez (10) bocatomas ubicadas en áreas susceptibles a inundación, ocho (8) ubicadas en el distrito de Leoncio Prado y dos (2) en el distrito de Llauta (Tabla 10).

Tabla 10.Bocatomas expuestos a zonas susceptibles a inundación

Distrito	Bocatomas
Leoncio Prado	8
LLauta	2
<b>Total</b>	<b>10</b>

Fuente: ANA 2017



## VI. Determinación del escenario de riesgo

El escenario de riesgo ante inundaciones en la provincia de Lucanas, comprendida en el ámbito geográfico de cuenca del río Grande, consiste en el proceso de análisis espacial entre las áreas susceptibles a inundación y los elementos expuestos existente en la cuenca, para lo cual se realizaron previamente las siguientes actividades:

- Recopilación de información generada por las entidades científicas y técnicas relacionadas al peligro de inundación
- Identificar las áreas de inundación a partir de la elaboración del mapa de susceptibilidad aplicando la metodología descrita anteriormente (modelo compuesto RRI+RF) para eventos extraordinarios en la cuenca del río Grande.
- Sistematizar la cartografía de los elementos expuestos (agricultura, infraestructura, centros poblados, vías, instituciones educativas, entre otros.) identificados en el área de estudio (provincia de Lucanas).
- Realizar el análisis espacial de superposición de capas en el área de estudio entre las áreas susceptibles a inundación por cada nivel obtenido y los elementos expuestos identificados.
- Descripción del escenario de riesgo por inundación en la provincia de Lucanas dentro del ámbito geográfico de la cuenca del río Grande.

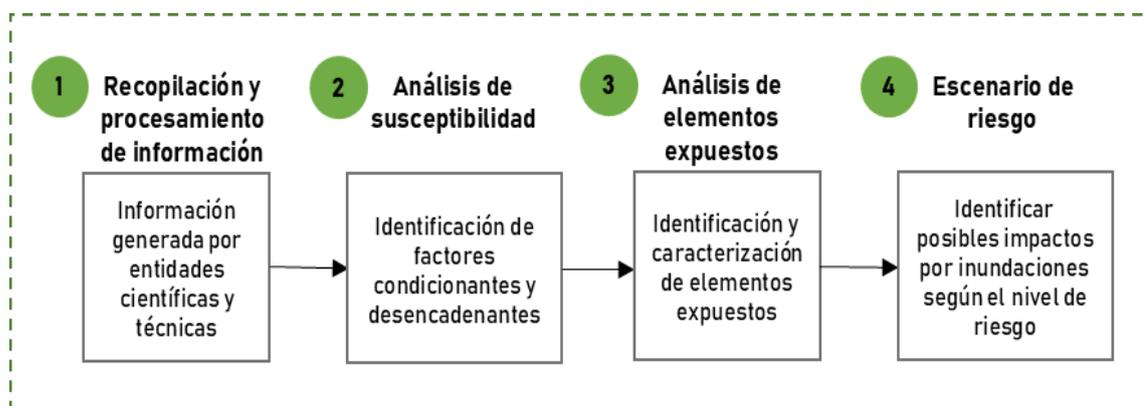


Figura 24. Flujograma del proceso de elaboración del escenario de riesgo por inundación.



El resultado de este proceso de análisis espacial se describe a continuación:

De acuerdo con Tabla 11, existen 174 centros poblados de la provincia de Lucanas en riesgo por inundaciones, pero en diferentes niveles, de los cuales 27 centros poblados se encuentran expuestos a riesgo muy alto y 71 centros poblados en riesgo alto. Asimismo, 44 centros poblados tienen un nivel de riesgo medio y 32 un nivel de riesgo bajo.

Tabla 11. Provincia de Lucanas: Centros poblados según el nivel de riesgo por inundaciones

Distritos	Centros poblados				
	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Total
Huac-Huas	7	20	15	7	49
Laramate	5	1	4	2	12
Leoncio Prado	2	21	5	2	30
Llauta	4	9	4	1	18
Ocaña	3	3	5	4	15
Otoca	6	15	6	12	39
San Pedro De Palco			4	4	8
Santa Lucía		2	1		3
<b>Total</b>	<b>27</b>	<b>71</b>	<b>44</b>	<b>32</b>	<b>174</b>

Fuente: INEI 2018. Censos Nacionales 2017.

La Tabla 12 muestra la cantidad de población y viviendas según su nivel de riesgo por inundaciones. Este escenario muestra que un total de 1 343 personas y 497 viviendas se encuentran en riesgo muy alto frente a la ocurrencia de inundaciones comprendido en 27 centros poblados. En este mismo escenario se estima un total de 1 534 de personas y 581 viviendas en riesgo alto, ubicadas en 71 centros poblados.



ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN  
EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

Tabla 12. Provincia de Lucanas: Población y viviendas según el nivel de riesgo por inundaciones

Distritos	Riesgo Muy Alto									
	Centros poblados	Población				Viviendas				
		Total	0 a 17 años	18 a 59 años	60 años a más	Total	Ladrillo o bloque de cemento	Adobe	Madera-pared	Material precario
Huac-Huas	7	635	140	376	119	226	2	196	3	25
Laramate	5	48	12	20	16	22		17		5
Leoncio Prado	2	13	3	6	4	8		7		1
Llauta	4	214	50	98	66	75	6	68		1
Ocaña	3	227	70	104	53	95	1	84	1	9
Otoca	6	206	65	107	34	71	3	42	1	25
<b>Total</b>	<b>27</b>	<b>1 343</b>	<b>340</b>	<b>711</b>	<b>292</b>	<b>497</b>	<b>12</b>	<b>414</b>	<b>5</b>	<b>66</b>

Distritos	Riesgo Alto									
	Centros poblados	Población				Viviendas				
		Total	0 a 17 años	18 a 59 años	60 años a más	Total	Ladrillo o bloque de cemento	Adobe	Madera-pared	Material precario
Huac-Huas	20	352	112	157	83	128	1	112		15
Laramate	1	9	1	3	5	4		3		1
Leoncio Prado	21	659	149	322	188	252		231		21
Llauta	9	70	9	37	24	30		21		9
Ocaña	3	12		5	7	9		6		3
Otoca	15	276	92	122	62	100	2	82		16
Santa Lucia	2	156	45	66	45	58		55		3
<b>Total</b>	<b>71</b>	<b>1 534</b>	<b>408</b>	<b>712</b>	<b>414</b>	<b>581</b>	<b>3</b>	<b>510</b>		<b>68</b>

Distritos	Riesgo Medio									
	Centros poblados	Población				Viviendas				
		Total	0 a 17 años	18 a 59 años	60 años a más	Total	Ladrillo o bloque de cemento	Adobe	Madera-pared	Material precario
Huac-Huas	15	190	41	99	50	86	1	52	9	24
Laramate	4	9	3	1	5	5		1		4
Leoncio Prado	5	27	7	11	9	12		12		
Llauta	4	114	29	50	35	49		46		3
Ocaña	5	721	180	386	155	211	4	201		6
Otoca	6	29	3	16	10	14	1	5	1	7
San Pedro De Palco	4	200	62	96	42	79	3	72	1	3
Santa Lucia	1	8		5	3	5		4		1
<b>Total</b>	<b>44</b>	<b>1 298</b>	<b>325</b>	<b>664</b>	<b>309</b>	<b>461</b>	<b>9</b>	<b>393</b>	<b>11</b>	<b>48</b>

Distritos	Riesgo Bajo									
	Centros poblados	Población				Viviendas				
		Total	0 a 17 años	18 a 59 años	60 años a más	Total	Ladrillo o bloque de cemento	Adobe	Madera-pared	Material precario
Huac-Huas	7	125	48	55	22	49		46		3
Laramate	2	789	253	375	161	262	12	248		2
Leoncio Prado	2	3			3	2		1		1
Llauta	1	28	8	15	5	10		9		1
Ocaña	4	30	10	9	11	13		12		1
Otoca	12	792	245	452	95	231	22	178	7	24
San Pedro De Palco	4	45	9	17	19	15		14		1
<b>Total</b>	<b>32</b>	<b>1 812</b>	<b>573</b>	<b>923</b>	<b>316</b>	<b>582</b>	<b>34</b>	<b>508</b>	<b>7</b>	<b>33</b>

Material precario: Adobe, quincha, triplay, calamina, estera, piedra con barro, piedra o sillar con cal o cemento, tapia.

Fuente: INEI 2018. Censos Nacionales 2017.



## ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

La Tabla 13 muestra la cantidad de superficie agrícola en hectáreas según su nivel de riesgo frente a inundaciones. Este escenario estima que un total de 6 829.5 hectáreas de áreas agrícolas se encuentran en riesgo, de los cuales 1 047,6 hectáreas se encuentran en un nivel de riesgo muy alto y 2 491,7 hectáreas con riesgo alto.

Tabla 13. Provincia de Lucanas: Superficie agrícola según el nivel de riesgo por inundaciones

Distritos	Superficie agrícola (Hectáreas)				
	Total del distrito	Riesgo Muy alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Huac-Huas	1 726.4	259.0	712.1	598.2	157.0
Laramate	558.6	159.2	43.2	138.0	218.2
Leoncio Prado	1 294.5	78.8	702.7	333.2	179.8
Llauta	759.8	198.5	261.7	109.8	189.9
Ocaña	745.5	121.1	182.4	231.4	210.7
Otoca	1 286.3	205.4	448.	232.3	400.6
San Pedro De Palco	238.8	15.7	52.5	102.2	68.4
Santa Lucia	219.5	10.0	89.2	87.3	33.1
<b>Total</b>	<b>6 829.5</b>	<b>1 047.6</b>	<b>2 491.7</b>	<b>1 832.5</b>	<b>1 457.7</b>

Fuente: MIDAGRI 2024.

La Tabla 14 muestra los establecimientos de salud según el nivel de riesgo por inundaciones. De un total de 20 establecimientos de salud en riesgo, 17 de ellos se encuentran en un nivel muy alto.

Tabla 14. Provincia de Lucanas: Establecimientos de salud según el nivel de riesgo por inundaciones.

Distrito	Establecimientos de salud					
	Categoría	Total	Riesgo Muy Alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Huac-Huas	I-1	3		1	2	
	I-3	1		1		
Laramate	I-3	1				1
Leoncio Prado	I-1	3		3		
Llauta	I-2	1		1		
Ocaña	I-1	1	1			
	I-3	1				1
Otoca	I-1	2	1	1		
	I-3	1				1
San Pedro De Palco	I-2	1		1		
Santa Lucia	I-1	2		2		
<b>Total</b>		<b>17</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Fuente: MINSA 2025.



## ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

La Tabla 15 muestra un total de 81 instituciones educativas en riesgo por inundaciones, de los cuales el 17% (14) se encuentran en riesgo muy alto y el 46% en riesgo alto.

Tabla 15. Provincia de Lucanas: Instituciones educativas según el nivel de riesgo por inundaciones.

Distrito	Instituciones educativas					
	Nivel educativo	Total	Riesgo Muy Alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Huac-Huas	Inicial	5	1	2	2	
	Primaria	9	2	5	1	1
	Secundaria	3		3		
	Técnico Productiva	1		1		
<b>Subtotal</b>		<b>18</b>	<b>3</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
Laramate	Inicial	1	1			
	Primaria	1				1
	Secundaria	1				1
	Técnico Productiva	1				1
<b>Subtotal</b>		<b>4</b>	<b>1</b>			<b>3</b>
Leoncio Prado	Inicial	3		3		
	Primaria	4		4		
	Secundaria	3		3		
	Técnico Productiva	1		1		
<b>Subtotal</b>		<b>11</b>		<b>11</b>		
Llauta	Inicial	2	1			1
	Primaria	6	1	1	2	2
	Secundaria	1	1			
	Técnico Productiva	1	1			
<b>Subtotal</b>		<b>10</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Ocaña	Inicial	3	1	1	1	
	Primaria	3		1	1	1
	Secundaria	2		1	1	
	Técnico Productiva	2	1		1	
<b>Subtotal</b>		<b>10</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
Otocha	Inicial	4		2	1	1
	Primaria	9	2	2		5
	Secundaria	4	1	1	1	1
	Técnico Productiva	1				1
<b>Subtotal</b>		<b>18</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>8</b>
San Pedro de Palco	Inicial	1			1	
	Primaria	3	1	1		1
	Secundaria	1		1		
	Técnico Productiva	1			1	
<b>Subtotal</b>		<b>6</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Santa Lucia	Inicial	1		1		
	Primaria	2		2		
	Secundaria	1		1		
<b>Subtotal</b>		<b>4</b>		<b>4</b>		
<b>Total</b>		<b>81</b>	<b>14</b>	<b>37</b>	<b>13</b>	<b>17</b>

Fuente: MINEDU 2024.



ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN  
EN LA PROVINCIA DE LUCANAS

La Tabla 16 muestra en su conjunto la red de vías que se encuentran en riesgo por inundaciones, según el nivel de riesgo. En general, el análisis muestra que el 16% (36.1 Km) de la red vial se encuentra en riesgo muy alto y el 36% (83.2 Km) en riesgo alto.

Tabla 16. Provincia de Lucanas: Red vial según el nivel de riesgo por inundaciones

Distrito	Red vial (Km)					
	Jeraquía	Total	Riesgo Muy alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Huac-Huas	Departamental	38.6	4.4	23.4	7.3	3.5
	Vecinal	2.	.1	1.2	.6	.1
<b>Subtotal</b>		<b>40.6</b>	<b>4.5</b>	<b>24.6</b>	<b>7.9</b>	<b>3.5</b>
Laramate	Departamental	8.6	2.9	4.2	.4	1.1
	Vecinal	7.	1.2	.9	.8	4.1
<b>Subtotal</b>		<b>15.5</b>	<b>4.1</b>	<b>5.1</b>	<b>1.1</b>	<b>5.2</b>
Leoncio Prado	Nacional	.1	.1			
	Vecinal	26.5	.8	13.1	10.8	1.8
<b>Subtotal</b>		<b>26.5</b>	<b>.9</b>	<b>13.1</b>	<b>10.8</b>	<b>1.8</b>
Llauta	Nacional	28.6	8.5	12.2	4.7	3.2
	Departamental	10.3	.1	.2	1.1	9.
	Vecinal	8.	2.5	2.4	.5	2.6
<b>Subtotal</b>		<b>47.</b>	<b>11.1</b>	<b>14.8</b>	<b>6.3</b>	<b>14.8</b>
Ocaña	Departamental	21.1	3.3	6.4	3.3	8.1
	Vecinal	5.6	2.2	.7	.8	1.9
<b>Subtotal</b>		<b>26.6</b>	<b>5.5</b>	<b>7.1</b>	<b>4.1</b>	<b>10.</b>
Otocha	Departamental	31.8	6.9	9.2	5.1	10.6
	Vecinal	25.8	1.6	6.1	4.5	13.5
<b>Subtotal</b>		<b>57.6</b>	<b>8.5</b>	<b>15.3</b>	<b>9.7</b>	<b>24.1</b>
San Pedro De Palco	Departamental	6.3	.8	1.1	1.2	3.2
	Vecinal	3.1		.8	.9	1.3
<b>Subtotal</b>		<b>9.3</b>	<b>.8</b>	<b>1.9</b>	<b>2.1</b>	<b>4.5</b>
ta Lucia	Vecinal	5.6	.8	1.3	2.5	1.1
<b>Subtotal</b>		<b>5.6</b>	<b>.8</b>	<b>1.3</b>	<b>2.5</b>	<b>1.1</b>
<b>Total</b>		<b>228.8</b>	<b>36.1</b>	<b>83.2</b>	<b>44.6</b>	<b>65.0</b>

Fuente: MTC 2020.

La Tabla 18 muestra que existen dos (2) bocatomas en riesgo muy alto a inundaciones, y ocho (8) bocatomas en riesgo alto.

Tabla 17. Provincia de Lucanas: Infraestructura hídrica según el nivel de riesgo por inundaciones

Distrito	Infraestructura hídrica					
	Tipo	Total	Riesgo Muy Alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Leoncio Prado	Bocatoma	8	2	6		
LLauta		2		2		
<b>Total</b>		<b>10</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fuente: ANA 2017



## Conclusiones

- La cuenca (unidad hidrográfica) constituye la principal unidad territorial para la planificación hídrica y de los riesgos asociados (ANA 2017). Bajo este criterio, en la elaboración del escenario de riesgo se adoptó un enfoque de cuenca para el análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones, considerando todo el ámbito de la cuenca del río Grande.
- La metodología propuesta para la elaboración del mapa de susceptibilidad, está compuesta por la integración de los resultados de los modelos RRI + RF, así como de la verificación a través del uso de imágenes radar (SAR) y de la visita de campo. El resultado ha identificado el 93.7% de las ocurrencias de inundaciones en la cuenca entre los niveles de susceptibilidad alta y muy alta. La clasificación muy alta captura el 85.5 % de los registros, lo cual define la huella de inundación para un evento extraordinario como El Niño Costero 2017. En ese sentido, el modelo propuesto RRI+RF tiene una alta capacidad para identificar las zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca del río Grande.
- El resultado del escenario de riesgo presenta los posibles impactos que pueden presentarse ante la ocurrencia de inundaciones dentro la cuenca del río Grande, en el ámbito de la provincia de Lucanas, según el nivel de riesgo obtenido. Se estima que 27 centros poblados están en un nivel de riesgo muy alto, que comprenden un total de 1 343 personas y 497 viviendas. Asimismo, un total de 1 047.6 hectáreas de superficie agrícola, 2 establecimientos de salud, 14 instituciones educativas, 36.1 Km. de red vial y 2 bocatomas.

Este mismo escenario de riesgo, se estima que 71 centros poblados se encuentran en riesgo alto, con un total de 1 534 personas y 581 viviendas. Además, estima un total de 2 491.7 hectáreas de superficie agrícola, 10 establecimientos de salud, 37 instituciones educativas, 83.2 Km de red vial, 8 bocatomas.



## VII. Recomendaciones

Se recomienda a la Municipalidad Provincial de Lucanas, en conjunto con sus municipalidades distritales de Huac-Huas, Laramate, Leoncio Prado, Llauta, Lucanas, Ocaña, Otoa, San Cristóbal, San Pedro de Palco y Santa Lucía, lo siguiente:

- Identificar las zonas priorizadas para las intervenciones orientadas a la prevención y reducción del riesgo de desastres frente a las inundaciones, con base en los resultados del presente escenario de riesgos.
- Identificar las zonas donde se necesite realizar estudios de riesgo de mayor detalle que permitan definir acciones estructurales para reducir los posibles impactos frente a inundaciones en eventos extremos.
- Formular o actualizar el respectivo Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, considerando el presente estudio para la fase de elaboración del diagnóstico.
- Difundir el presente escenario de riesgo a las entidades vinculadas a la gestión del riesgo frente a inundaciones, principalmente al Gobierno Regional de Ayacucho y sus Direcciones Regionales, Autoridad Local de Agua y Dirección Zonal del SENAMHI.

Para un mayor detalle de los elementos en riesgo según el nivel obtenido (muy alto, alto, medio y bajo) indicado en el presente estudio, se recomienda consultar la base de datos adjunta.



## VIII. Bibliografía

- Alam, A., Bhat, M. S., Ahmad, H. F., Ahmad, B., Ahmad, S., & Sheikh, A. H. (2018). Flood risk assessment of Srinagar city in Jammu and Kashmir, India. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 6(1), 102–116.
- Anusha, N., & Bharathi, B. (2019). The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, (xxxx), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.01.001>
- Arabameri, A., Rezaei, K., Cerdà, A., Conoscenti, C., & Kalantari, Z. (2019). A comparison of statistical methods and multi-criteria decision making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran. *Science of the Total Environment*, 660, 443–458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.021>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Bui, D. T., Khosravi, K., Li, S., Shahabi, H., Panahi, M., Singh, V. P., ... Bin Ahmad, B. (2018). New hybrids of ANFIS with several optimization algorithms for flood susceptibility modeling. *Water (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/w10091210>
- Cash, J. R., & Karp, A. H. (1990). A Variable Order Runge-Kutta Method for Initial Value Problems with Rapidly Varying Right-Hand Sides. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 16(3), 201–222. <https://doi.org/10.1145/79505.79507>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). *Hole-filled seamless SRTM data V4*. (September 2017). Retrieved from <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Joshi, V., & Kumar, K. (2006). Extreme rainfall events and associated natural hazards in Alaknanda valley, Indian Himalayan region. *Journal of Mountain Science*, 3(3), 228–236. <https://doi.org/10.1007/s11629-006-0228-0>
- Nguyen, V. P., Pham, D. H., Bui, P. D., Bui, N. T., & Nguyen, D. V. A. (2021). Research the Possibility of Using Sea Sand in Roadbed Construction in Vietnam. *International Journal of GEOMATE*, 20(77), 123–131. <https://doi.org/10.21660/2020.77.47890>
- Rahman, M. R., & Thakur, P. K. (2018). Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS: A case study from the Kendrapara District of Orissa State of India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21, S37–S41. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.10.002>
- Rifath, A. R., Muktadir, M. G., Hasan, M., & Islam, M. A. (2024). Flash flood prediction modeling in the hilly regions of Southeastern Bangladesh: A machine learning attempt on present and future climate scenarios. *Environmental Challenges*, 17(August), 101029. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101029>
- Samanta, S., Pal, D. K., & Palsamanta, B. (2018). Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. *Applied Water Science*, 8(2). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0710-1>
- Sayama, T., Tatebe, Y., Iwami, Y., & Tanaka, S. (2015). Hydrologic sensitivity of flood runoff



and inundation: 2011 Thailand floods in the Chao Phraya River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(7), 1617–1630. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1617-2015>

Sayama, Takahiro, Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., & Fukami, K. (2012). Analyse pluie-débit-inondation de la crue de 2010 au Pakistan dans le bassin de la rivière Kaboul. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 298–312. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644245>

SENAMHI. (2021). *Estudio de modelamiento hidrológico a paso diario a nivel nacional para el monitoreo de potenciales inundaciones*.

Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101–112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>

Wagner, K. (2007). Mental models of flash floods and landslides. *Risk Analysis*, 27(3), 671–682. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00916.x>



**CENEPRED**

Centro Nacional de Estimación, Prevención y  
Reducción del Riesgo de Desastres

Av. Del Parque Norte 829 – 833 San Isidro, Lima – Perú