



LLUVIAS



CENEPRED

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

ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIONES EN LA CUENCA CAMANÁ

- AREQUIPA -

JULIO 2026



ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIONES EN LA CUENCA CAMANÁ

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 2026.

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

Correo electrónico: info@cenepred.gob.pe

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

CENEPRED:

Gral. Carlos Manuel Yáñez Lazo

Jefe del CENEPRED

Cnrl. (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:

Geóg. Leane Arias Rojas

Especialista en Análisis Territorial

Ing. Eber Risco Sence

Consultor

Con la participación de:

Ing. Camilo Guillén Medina

Responsable de GRD

Municipalidad Provincial de Castilla

Arq. Carlos Pelinco Santander

Responsable de GRD

Municipalidad Distrital de Majes



INDICE

I.	Introducción	6
II.	Ubicación del área de estudio	7
III.	Información Recopilada	10
3.1	Datos de ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Grande	10
3.2	Caudales	12
3.3	Producto PISCO	13
3.4	Modelo digital de elevaciones	13
3.5	Datos de sensoramiento remoto	16
3.6	Datos de dimensión social y económica	17
IV.	Análisis de susceptibilidad a inundaciones en la cuenca del río Camaná	18
4.1	Factor desencadenante	18
4.2	Factores condicionantes	18
4.3	Proceso metodológico	20
4.3.1	Modelo RRI	21
4.3.2	Modelamiento predictivo de susceptibilidad de inundaciones con Random Forest 25	
4.3.3	Integración del modelo RRI con modelo predictivo Random Forest	30
4.3.4	Verificación mediante el análisis de imágenes radar (SENTINEL-1 – SAR) previo y posterior a un evento de inundación	33
4.3.5	Verificación in situ de puntos críticos de inundación	36
4.3.6	Mapa de susceptibilidad a inundaciones	40
V.	Análisis de elementos expuestos	40
VI.	Determinación del escenario de riesgo	43
VII.	Recomendaciones	50
VIII.	Bibliografía	51



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las provincias de Arequipa y la unidad hidrográfica del río Camaná.....	7
Figura 2. Ubicación de los puntos de ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Camaná.	11
Figura 3. Ubicación de las estaciones hidrométrica y caudales para evento extremo del 2025	12
Figura 4. Datos espaciales. a) Precipitación producto PISCO, b) Estaciones virtuales para el modelamiento con RRI.	13
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.	15
Figura 6. Imágenes SENTINEL 1 SAR con polarización VV y SENTINEL 2-A para la cuenca Río Camaná. 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.	17
Figura 7. Capas de información georreferenciadas de elementos del territorio	18
Figura 8. Diagrama de flujo para el modelamiento de susceptibilidad a inundaciones.	21
Figura 9. Diagrama esquemático del modelo de lluvia-escorrentía-inundación (RRI).....	23
Figura 10. Parámetros iniciales para el modelo RRI en la cuenca del río Camaná	23
Figura 11. Resultados del modelo RRI en la cuenca del río Camaná. Huella de inundación para el evento del 2025.	24
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.	26
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).	27
Figura 14. Importancia relativa de los factores de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Camaná.	28
Figura 15. Resultados del modelo RF. Susceptibilidad a ocurrencia de inundaciones.	29
Figura 16. Área bajo la curva para los datos de calibración y validación del modelo RF.	30
Figura 17. Flujo de proceso para obtener el Modelo Compuesto para la cuenca Río Camaná.	31
Figura 18. Resultados del modelo RRI+RF de susceptibilidad a inundación en la cuenca río Camaná. La susceptibilidad de ocurrencia a inundación se muestra clasificado desde muy bajo a muy alto. .	33
Figura 19. Área de inundación obtenido con imágenes Sentine-1 SAR para El Niño Costero 2017.	36
Figura 20. Ubicación de los puntos verificados en campo en las provincias de Caylloma y Castilla, en el ámbito de la cuenca del río Camaná.	37
Figura 21. Mapa de susceptibilidad a inundaciones en el ámbito de la cuenca del río Camaná	40
Figura 22. Flujograma del proceso de elaboración del escenario de riesgo por inundación	43
Figura 23. Mapa de riesgo de elementos expuestos en el ámbito de la cuenca del río Camaná	48



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Provincias de Arequipa: Nivel de riesgo según distritos.	8
Tabla 2: Registros de inundaciones en la cuenca río Camaná.	10
Tabla 3: Estaciones hidrométricas.	12
Tabla 4: Clasificación de los valores de susceptibilidad para la cuenca río Camaná.	32
Tabla 5: Clasificación de ocurrencias de inundación de acuerdo a los resultados del modelo de susceptibilidad RRI+RF para la cuenca río Camaná.	32
Tabla 6. Población y vivienda expuesta a zonas susceptibles a inundación.	41
Tabla 7: Área agrícola.	41
Tabla 8. Establecimientos de salud expuesta a zonas susceptibles a inundación.	42
Tabla 9. Instituciones educativas expuesta a zonas susceptibles a inundación.	42
Tabla 10: Red vial en la cuenca del río Camaná.	42
Tabla 11: Provincias: Centros poblados según el nivel de riesgo por inundaciones.	44
Tabla 12: Población y viviendas según el nivel de riesgo por inundaciones.	44
Tabla 13: Superficie agrícola según el nivel de riesgo por inundaciones.	45
Tabla 14: Establecimientos de salud según el nivel de riesgo por inundaciones.	45
Tabla 15: Instituciones educativas según el nivel de riesgo por inundaciones.	46
Tabla 16: Red vial de transporte según el nivel de riesgo por inundaciones.	47



I. Introducción

Las inundaciones son desastres que generan diversas repercusiones socioeconómicas (Bui et al., 2018), que provocan varias consecuencias, como erosión, deslizamientos de tierra y sumideros (Arabameri, Rezaei, Cerdà, Conoscenti, & Kalantari, 2019). Por lo cual, se requiere monitorear las inundaciones utilizando técnicas avanzadas y desarrollar modelos precisos de riesgo de inundaciones (Samanta, Pal, & Palsamanta, 2018). Los deslizamientos de tierra pueden ocurrir como consecuencia de períodos prolongados de fuertes lluvias en las laderas empinadas de las montañas (Joshi & Kumar, 2006), generando en las zonas de baja o nula pendiente las inundaciones, usualmente en las zonas agrícolas y áreas urbanas. La susceptibilidad al peligro a menudo se relaciona con las condiciones climáticas, las características de la cuenca y los procedimientos dentro de los cauces montañosos (Wagner, 2007). Estos desastres tienen el potencial de matar a muchas personas y dañar seriamente la infraestructura, la vivienda y el transporte (Nguyen, Pham, Bui, Bui, & Nguyen, 2021). 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).

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).

Existe la urgente necesidad de contar con herramientas que den soporte al su monitoreo y previsión de inundaciones; sin embargo, la implementación de un sistema de alerta frente a inundaciones se encuentra limitada por la baja densidad de estaciones hidrométricas a lo largo del territorio nacional. En ese contexto, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), viene desarrollando herramientas que



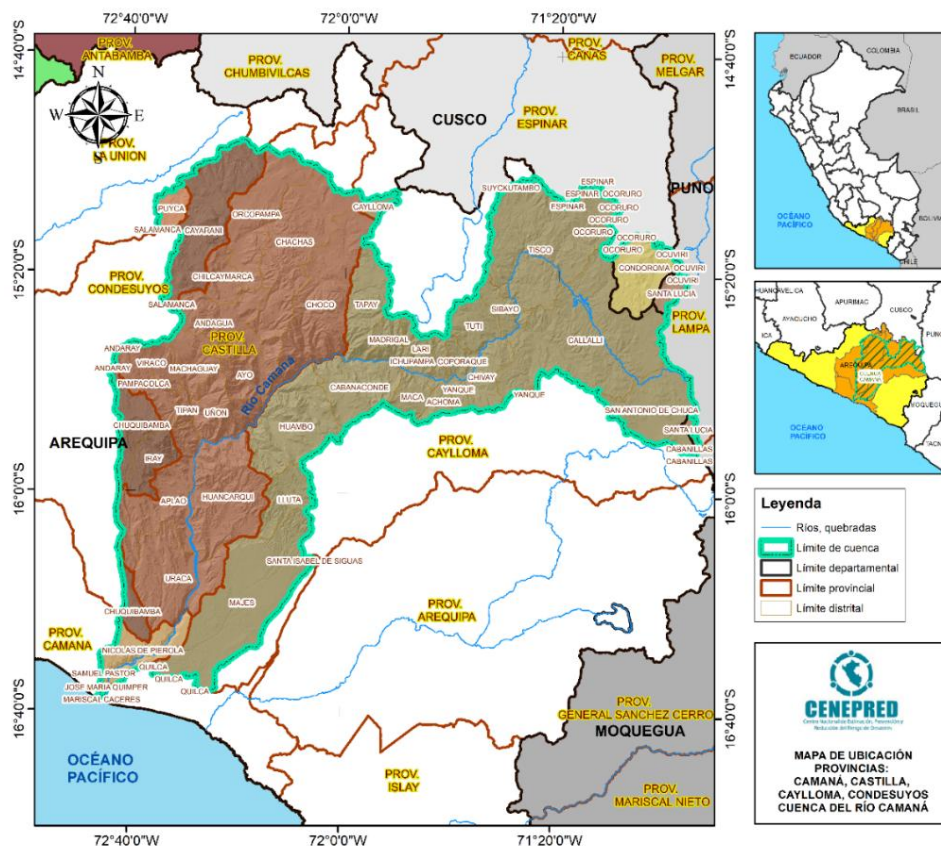
permiten identificar zonas potenciales de inundación (Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales del Senamhi: SONICS, uso de modelo hidrológico a nivel de cuenca Rainfall-Runoff-Inundation - RRI), basado en el desarrollo de modelos hidrológicos y la aplicación de técnicas de regionalización hidrológica que permitan simular caudales sobre la extensa red hídrica nacional, evaluar la hidrología de cuencas con escasa información, y dar soporte a la gestión de peligros hidrológicos (SENAMHI, 2021).

Para tal fin, se utilizará la información existente de instituciones del estado como SENAMHI, ANA, IGP, MINAM, MINAGRI, INDECI, e INEI, etc. Estos datos e información permitirán el análisis y zonificación de la susceptibilidad o peligro por inundaciones para los escenarios de riesgo por inundaciones, como también el análisis de elementos expuestos a inundaciones en la cuenca Río Camaná.

II. Ubicación del área de estudio

La cuenca río Camaná forma parte de la vertiente del Pacífico, y abarca las provincias de Camaná, Castilla, Caylloma, Condesuyos, La Unión (Arequipa), Espinar (Cusco), Lampa (Puno), como se aprecia en la figura 1.

Figura 1. Ubicación de las provincias de Arequipa y la unidad hidrográfica del río Camaná





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 inundaciones¹

Tabla 1. Provincias de Arequipa: Nivel de riesgo según distritos.

Departamento	Provincia	Ubigeo	Distrito	Nivel de riesgo
Arequipa	Camaná	040202	José María Quimper	Alto
		040204	Mariscal Cáceres	Alto
		040205	Nicolas De Piérola	Alto
		040208	Samuel Pastor	Alto
	Castilla	040402	Andagua	-
		040401	Aplao	Alto
		040403	Ayo	-
		040404	Chachas	-
		040405	Chilcaymarca	-
		040406	Choco	-
		040407	Huancarqui	-
		040408	Machaguay	-
		040409	Orcopampa	-
		040410	Pampacolca	-
		040411	Tipan	-
		040412	Uñon	-
		040413	Uracá	Alto
		040414	Viraco	-
	Caylloma	040502	Achoma	-
		040503	Cabanaconde	-
		040504	Callalli	-
		040505	Caylloma	-
		040501	Chivay	-
		040506	Coporaque	-
		040507	Huambo	-
		040509	Ichupampa	-
		040510	Lari	-
		040511	Lluta	-
		040512	Maca	-
		040513	Madrigal	-
		040520	Majes	Alto
		040514	San Antonio De Chuca	-
		040515	Sibayo	-
	Condesuyos	040516	Tapay	-
		040517	Tisco	-
		040518	Tuti	-
		040519	Yanque	Alto
		040603	Cayarani	Alto
	Condesuyos	040601	Chuquibamba	-
		040605	Iray	-

¹ Escenario de riesgo por inundaciones y movimientos en masa en el marco del plan multisectorial 2025 – 2027, disponible en <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//17791>



	La Unión	040806	Puyca	-
Cusco*	Espinar	080802	Condoroma	-
Puno**	Lampa	0210709	Santa Lucía	-

Fuente: CENEPRED, 2024.

Nota: Los departamentos de Cusco y Puno** fueron considerados para el análisis a nivel cuenca de la susceptibilidad ante inundaciones.*

La cuenca del río Camaná nace en las cumbres andinas (bajo el nombre de Colca), convirtiéndose en río Majes y finalmente Camaná antes de desembocar en el Pacífico. El río cambia de nombre conforme desciende:

- a) Río Colca: En la cuenca alta y media, donde forma el famoso Cañón del Colca.
- b) Río Majes: Al unirse con el río Capiza y otros afluentes.
- c) Río Camaná: En el tramo final, cerca de la costa y la ciudad de Camaná.

El ámbito de la cuenca del río Camaná-Majes-Colca está comprendido principalmente en el departamento de Arequipa, aunque también incluye un pequeño sector del Sur del departamento de Cusco y Oeste de Puno. Está ubicada en la parte occidental de la Cordillera de Los Andes, y consecuentemente pertenece a la vertiente del Océano Pacífico. El río Colca junto con el río Molloco y otros afluentes menores forman el río Majes que desemboca en el Océano Pacífico con el nombre de Camaná. Sus principales tributarios son: Por la margen derecha: Antasalla, Blanquillo, Negrillo, Condoroma, Maqueruyo, Chalhuanca, Molloco, Andahua, Capiza, Río Camaná y Puluvinas. Por la margen Izquierda: Callalli-Llapa, Hualca Hualca y Huambo.

Las partes más altas de la cuenca se desarrollan en el sector occidental de la cordillera de Los Andes, donde se ubican obras de regulación y trasvase que sirven al Proyecto Majes Siguan, y al Sistema Chili Regulado. En la parte alta de la cuenca, se desarrolla pastizales, que son el soporte de una economía basada en la explotación de los camélidos sudamericanos. En las partes media alta y baja se ubican los valles interandinos y pampas costaneras, en donde se desarrolla gran parte de la agricultura. El cauce principal nace con el nombre de río Colca, en la parte media toma el nombre de Majes para desembocar en el Océano Pacífico con el nombre de Camaná.



La cuenca del río Camaná tiene un área de 17,153.76 km², considerada una de las mayores cuencas de la vertiente del Pacífico en Perú, de los cuales 12,937 km² están situados por encima de la 2.500 m s. n. m. y corresponden a la cuenca húmeda.

- Agricultura: Sus aguas son vitales para irrigar valles intensamente cultivados (como el valle de Majes y Camaná) y alimentan la represa de Condoroma para el proyecto de irrigación Majes-Siguas.
- Minería y Energía: En la cuenca alta se desarrollan actividades mineras de extracción de plata, oro y cobre. También es un área clave para el monitoreo de la calidad del agua por parte de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- Turismo: Alberga destinos emblemáticos como el Cañón del Colca y las playas de Camaná.

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 de la Cuenca Camaná.

III. Información Recopilada

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

Los datos sobre la ocurrencia de inundaciones provienen de las fuentes como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET (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 se presentan con la siguiente distribución, luego de un proceso de depuración para eliminar registros duplicados:

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

Departamento	Provincia	Fuente				Total
		ANA	INDECI	INGEMMET	CENEPRED	
Arequipa	Camaná	60	9	3		72



ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA CAMANÁ

Castilla	82	39	15	6	142
Caylloma	26	12	2		40
Condesuyos	3	1			4
Total	171	61	20	6	258

Nota: Puntos críticos (ANA). Zonas críticas (INGEMMET). Emergencias (INDECI). Visita de Campo (CENEPRED).

De acuerdo con la tabla 2, la provincia de Castilla tiene un total 142 registros de inundaciones, de los cuales 39 son emergencias a consecuencia de la ocurrencia de inundaciones y 15 corresponden a zonas críticas, siendo la provincia con mayor registro 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, y verificación en campo, siempre que estuvieran asociados específicamente al evento de inundación.

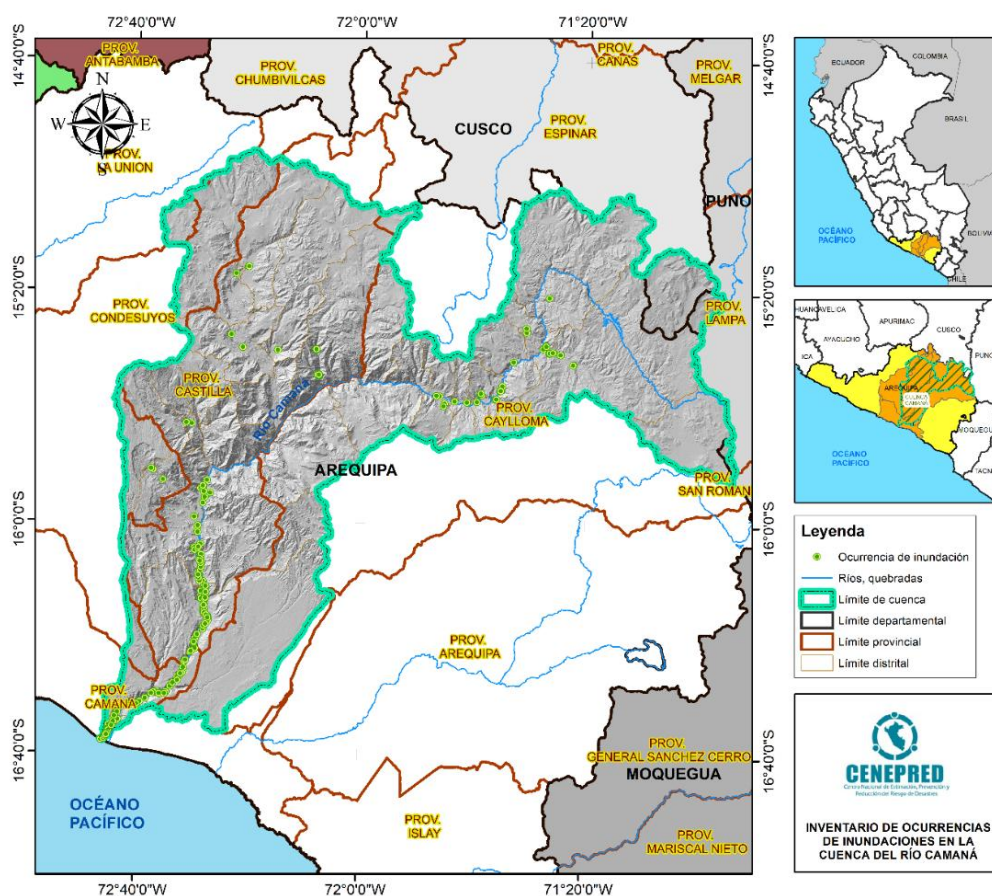


Figura 2: Ubicación de los puntos de ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Camaná.



La Figura 2 muestra la ubicación espacial de los registros de ocurrencias de inundaciones (Tabla 2) en la cuenca del río Camaná, se aprecia que están representadas mayoritariamente por las zonas de valles 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 Huatiapa, se seleccionó el periodo de un evento extraordinario presentado en la cuenca (año húmedo del 2025, donde ocurrieron inundaciones en la cuenca del río Camaná). La estación es administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La estación Huatiapa en el distrito de Aplao, provincia Castilla. El detalle de las estaciones se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Estaciones hidrométricas.

Vertiente	Estación	Latitud	Longitud	Cuenca	Fuente
Pacífico	Huatiapa	16°0'29.03" S	72°29'0.77" W	Camaná	SENAMHI

Fuente: (SENAMHI, 2026)

La Figura 3 muestra la ubicación espacial de la estación hidrométrica, y los caudales para el periodo de evento extremo del 2025, expresados en m³/s.

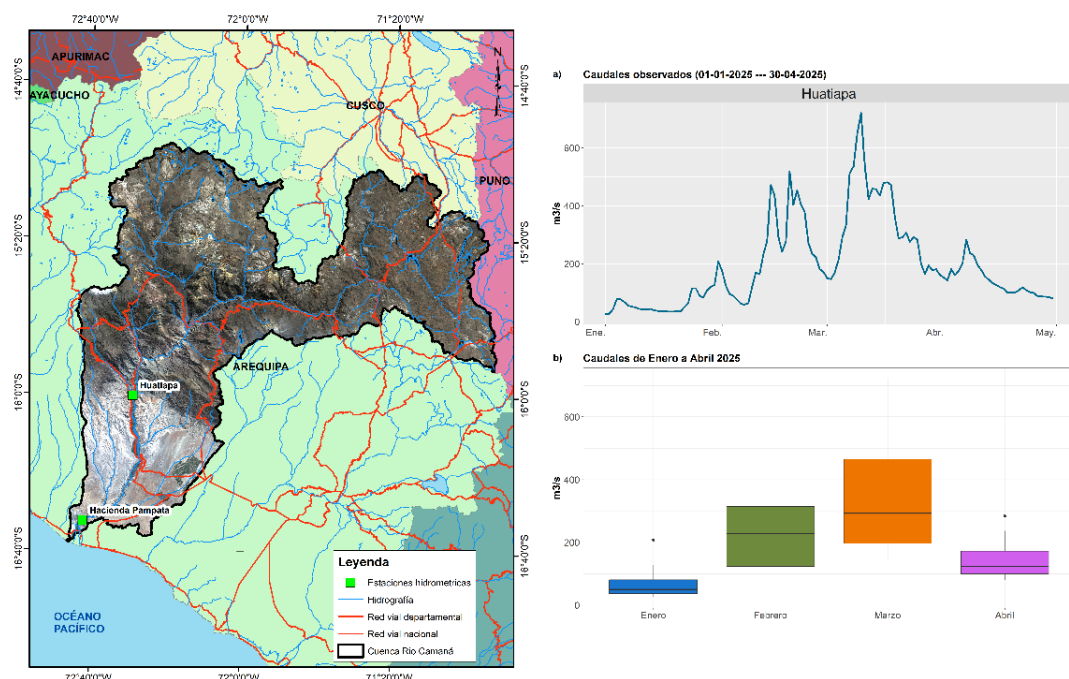


Figura 3: Ubicación de las estaciones hidrométrica y caudales para evento extremo del 2025



3.3 Producto PISCO

El conjunto de datos hidrometeorológicos PISCO tiene cobertura en todo territorio peruano incluyendo cuencas transfronterizas. Contiene subproductos grillados de precipitación (), temperatura del aire (TA) y evapotranspiración potencial (PET); con una resolución espacial de 01° (~ 10 km) y temporal de un día. Los productos PISCO P, TA, PET están disponibles para el periodo de 1981 al 2026 (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>

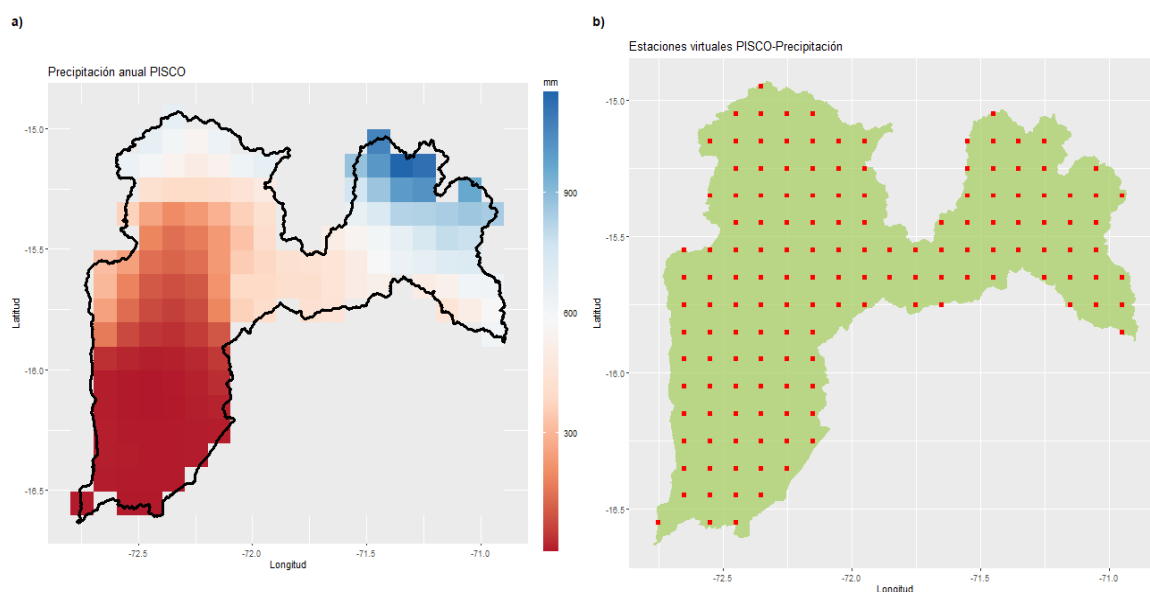


Figura 4. Datos espaciales. a) Precipitación producto PISCO, b) Estaciones virtuales para el modelamiento con RRI.

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 90m 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



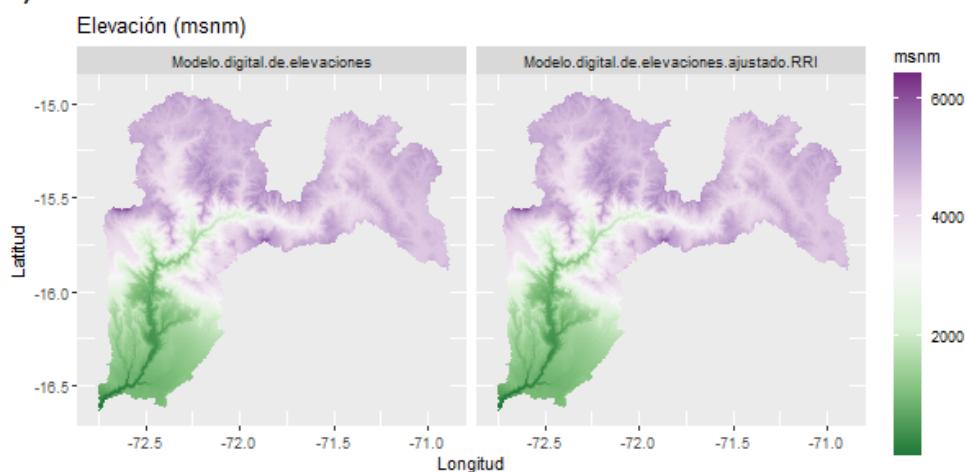
procesada para rellenar vacíos de datos y facilitar su uso (Jarvis, Reuter, Nelson, & Guevara, 2008). El DEM se utilizará para la implementación del modelamiento de inundación con RRI, el cual requiere principalmente los datos de elevaciones, sus derivados como dirección y acumulación de flujo de la cuenca.

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

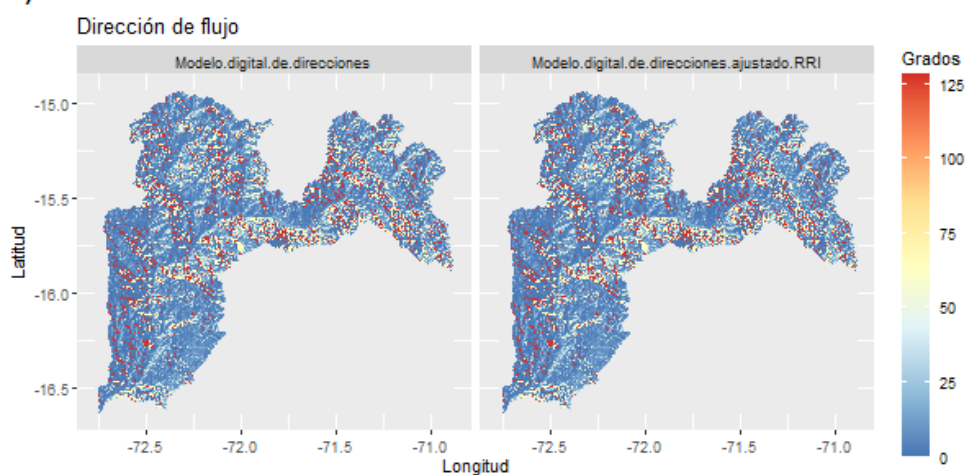
- a) Basado en la dirección del flujo, *demAdjust2* identifica las celdas aguas arriba (es decir, celdas sin entrada de flujo).
- b) Entre las celdas aguas arriba detectadas, se determina el orden de búsqueda según la longitud total de los trayectos de flujo desde cada celda aguas arriba hasta su celda 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.
 - *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.



a)



b)



c)

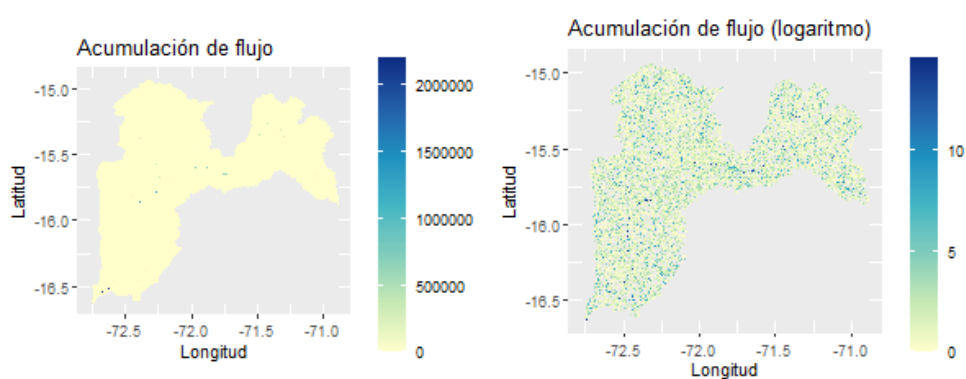


Figura 5: Datos topográficos para el modelo RRI. a) Modelo digital de elevación original y corregido, b) Dirección de flujo original y corregido, c) Acumulación de flujo normal y logaritmo.



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.

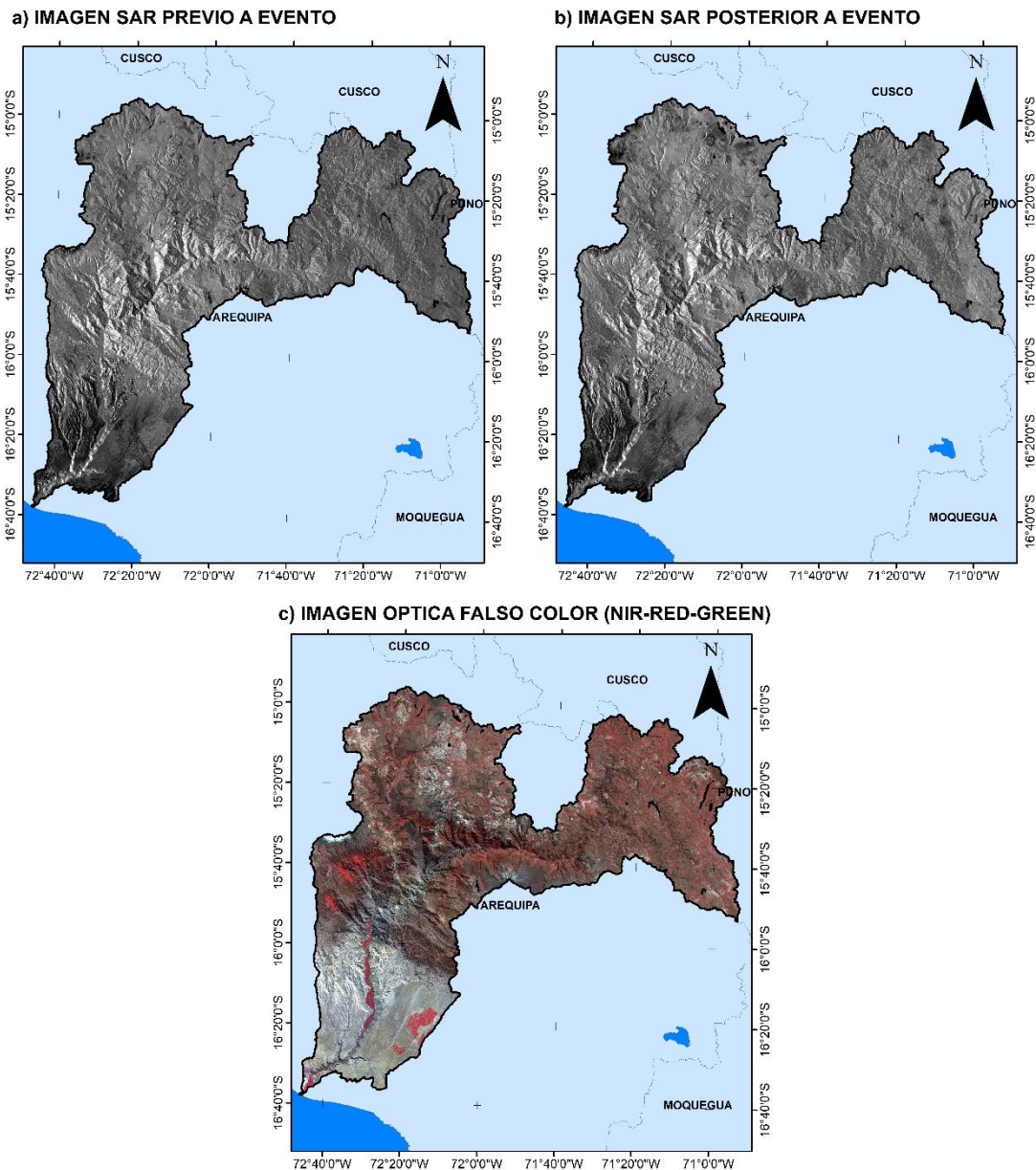


Figura 6: Imágenes SENTINEL 1 SAR con polarización VV y SENTINEL 2-A para la cuenca Río Camaná. a) Mosaico de imágenes previo a una inundación, b) Mosaico de imágenes posterior a una inundación, c) Mosaico de imagen óptica con falso color para resaltar la vegetación.

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.

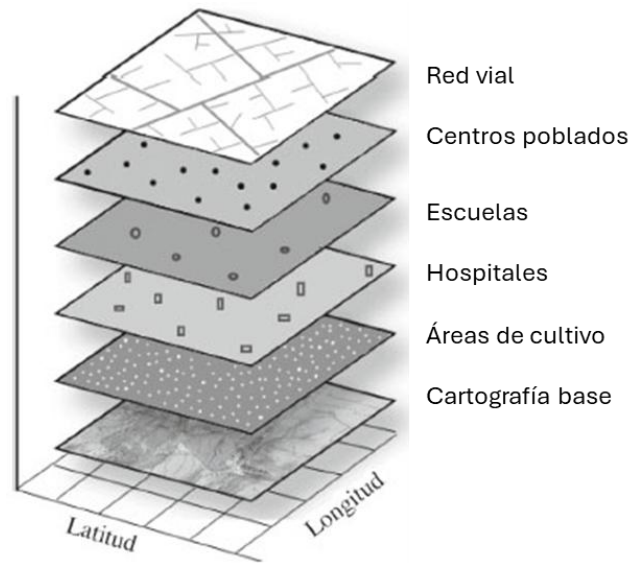


Figura 7. Capas de información georreferenciadas de elementos del territorio

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

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 para el evento extremo.

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 (1981-2025).

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 (1981-2025). 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 β , 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 90 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 Camaná.

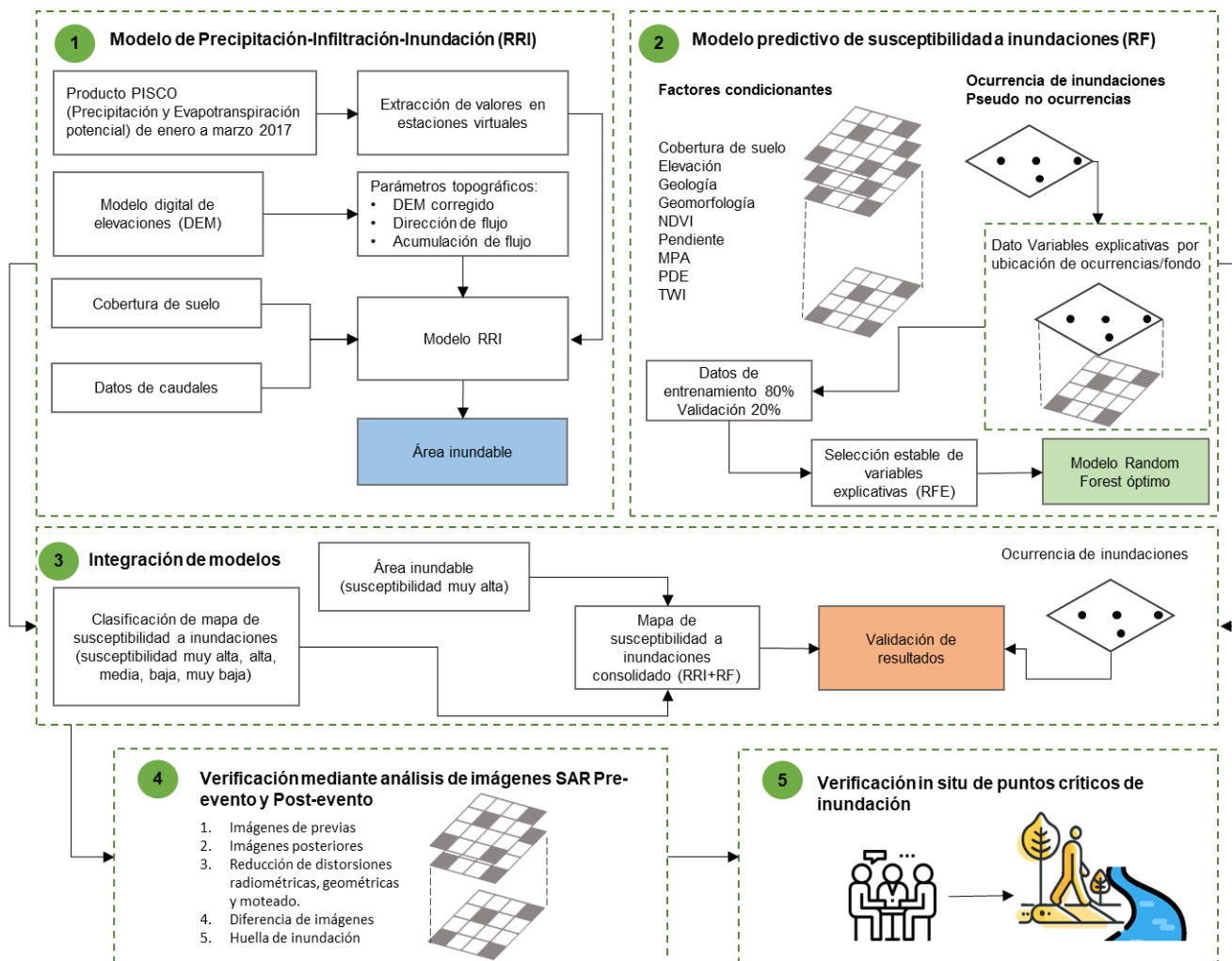


Figura 8: Diagrama de flujo para el modelamiento de susceptibilidad a inundaciones.

4.3.1 Modelo RRI

El modelo RRI es un modelo bidimensional (2-D) capaz de simular simultáneamente el escurrimiento lluvia-esorrentía 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. 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 9 muestra los parámetros iniciales para la ejecución del modelo RRI para la cuenca del río Camaná, 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 90m mediante el vecino más cercano para uniformizar con la resolución de salida del modelo RF.

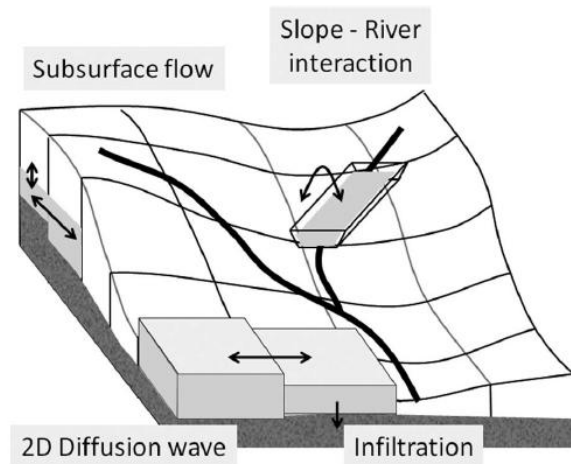


Figura 9: Diagrama esquemático del modelo de lluvia-escorrentía-inundación (RRI).
Fuente: (Takahiro Sayama, Ozawa, Kawakami, Nabesaka, & Fukami, 2012)

```
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 0.0d0 0.0d0 0.0d0 # kv
26 0.0d0 0.1101d 0.273d # Sf
27
28 0.0d0 0.0d0 0.0d0 # ka
29 0.0d0 0.0d0 0.0d0 # gammam
30 8.0d0 8.0d0 8.0d0 # beta
31
32 0.0d0 0.0d0 0.0d0 # 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 0.0d0 0.0d0 0.0d0 # 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 0.0d0       # height_param
44 20          # height limit param
```

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



Los resultados obtenidos del modelo RRI en base a la precipitación de enero a abril para el evento extremo del 2025 en la cuenca del río Camaná se muestran en la Figura 11. Los resultados obtenidos muestran la zona de inundación en la parte media de la cuenca, en las zonas que representan zonas de valle altoandinos, en la cual se desarrolla agricultura. El modelo RRI ha permitido definir el área de inundación para el evento extraordinario del 2025, pero estos resultados serán complementados con el modelo de susceptibilidad obtenido mediante Random Forest.

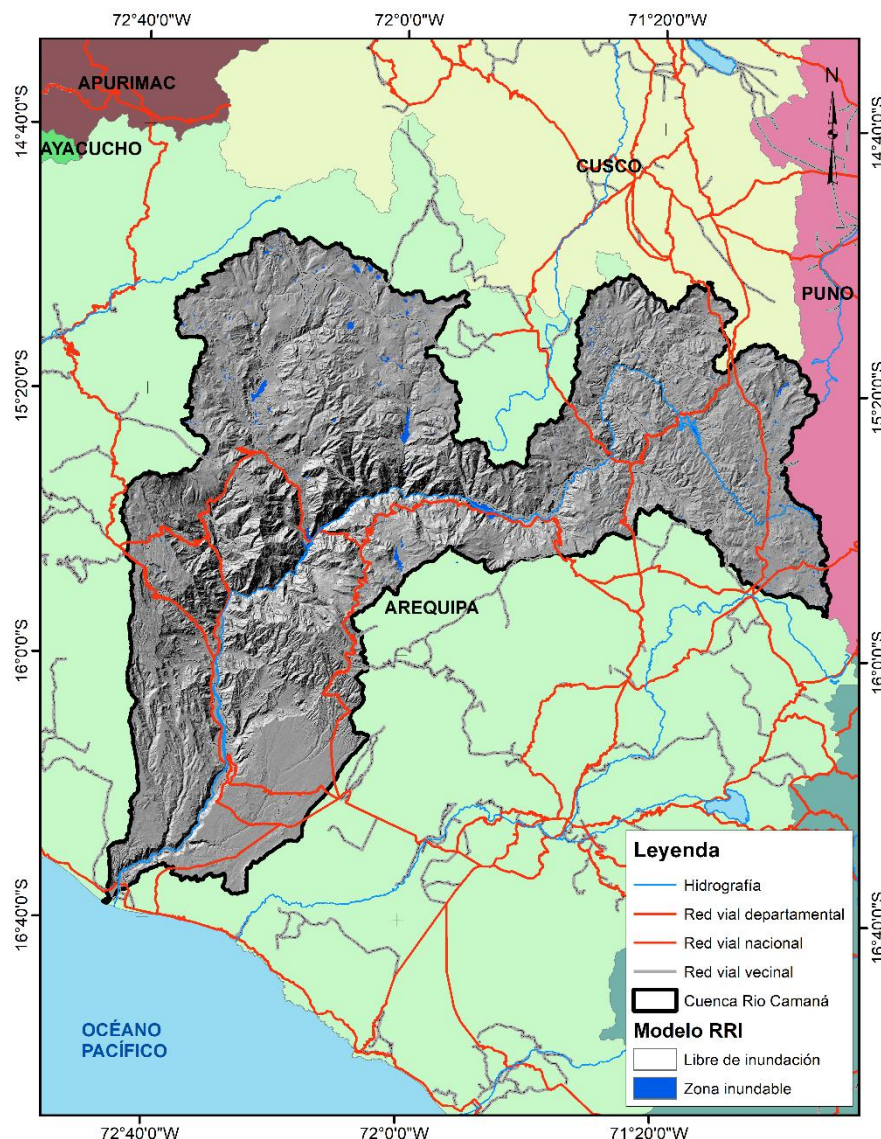


Figura 11. Resultados del modelo RRI en la cuenca del río Camaná. Huella de inundación para el evento del 2025.



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. 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.

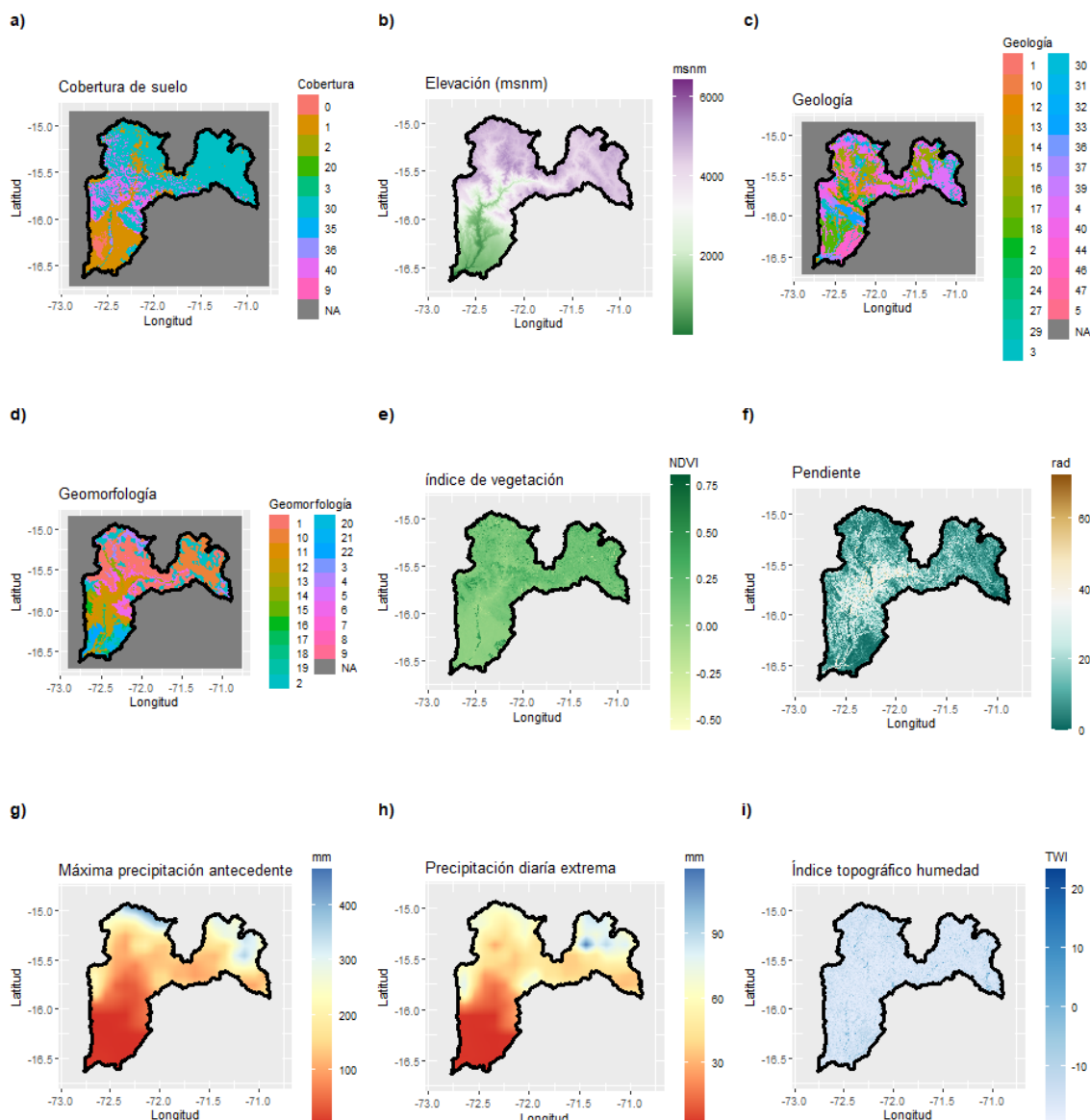


Figura 12. Predictores de inundaciones: a) cobertura de suelo, b) Elevación, c) Geología, d) Geomorfología, e) Índice de vegetación de diferencia normalizada, f) Pendiente, g) Máxima precipitación antecedente, h) Precipitación diaria extrema, i) Índice topográfico de humedad.

Para el modelo RF, se cuenta con 258 registros de ocurrencias de inundaciones (Tabla 2) y se han utilizado 09 predictores (Figura 12). Se generaron 500 datos de pseudo-no ocurrencias de manera aleatoria, excluyendo las ubicaciones de los datos de



ocurrencia, estos servirán como datos de fondo para el modelo RF. Entre datos de ocurrencia (258) y datos de fondo (500) se tendrían 758 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% (606) y para los datos de prueba el 20% (152).

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

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.

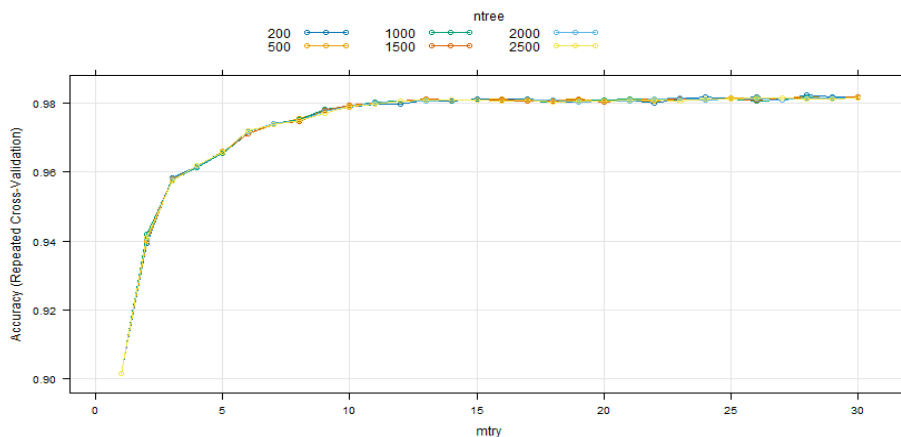


Figura 13. Precisión del modelo en función de los parámetros que se utilizaron en el modelo de RF (*mtry* y *ntree* son dos parámetros importantes del modelo de RF).

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*, teniendo un valor óptimo con 29, el valor de *ntree* no muestra una variación significativa, los mejores parámetros fueron utilizados para el modelo RF (*mtry* 29, *ntree* 200).

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 Altitud (31.30%), Geología (27.70%), Geomorfología (14.20%) y Cobertura vegetal (8.50%) 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 4.70% y 2.70% 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 Camaná, debido a sus condiciones topográficas y climáticas.

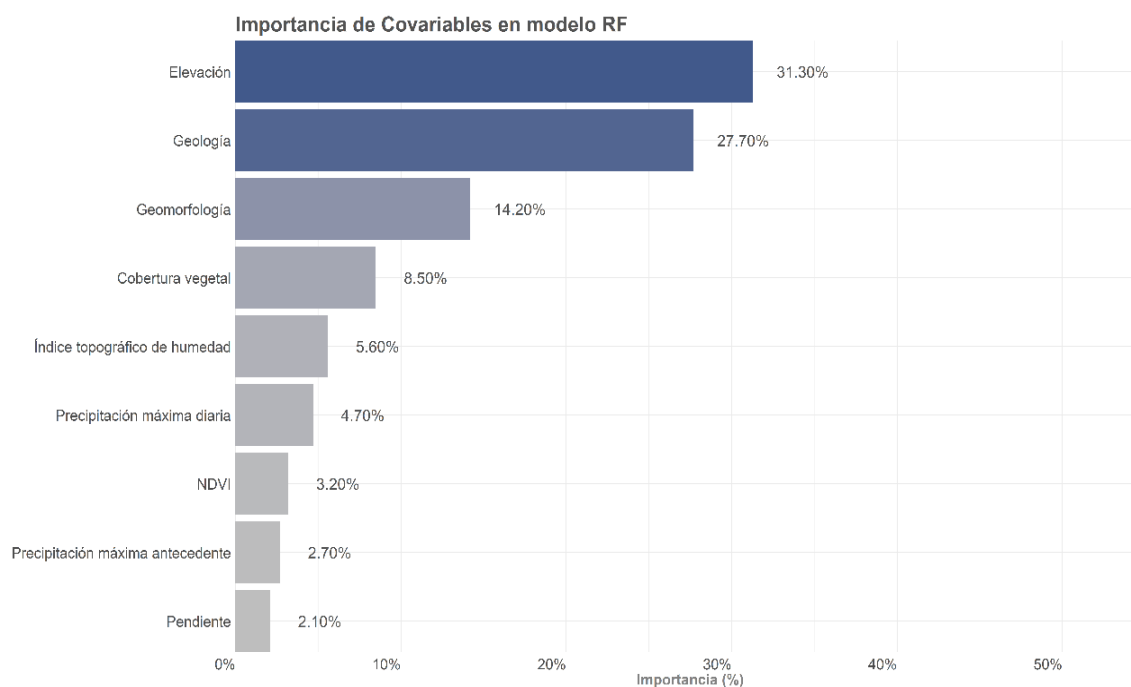


Figura 14: Importancia relativa de los factores de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones en la cuenca del río Camaná.

Los resultados obtenidos del modelo de clasificación con Random Forest en base al inventario de ocurrencia de inundaciones (a una resolución espacial de 90m), 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 0.9991, el cual es cercano a 1, con lo cual el modelo tendría una performance muy alta

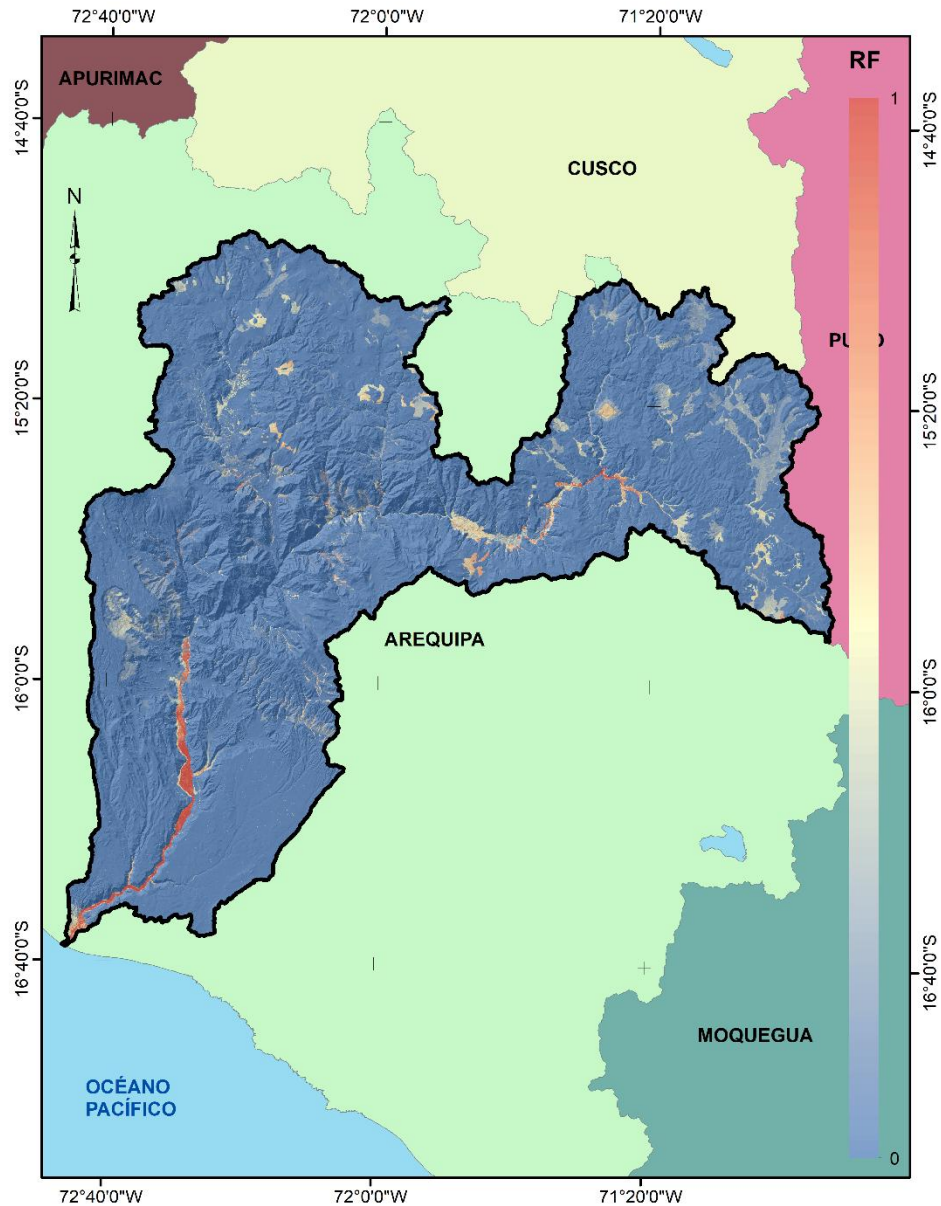


Figura 15. Resultados del modelo RF. Susceptibilidad a ocurrencia de inundaciones.

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.

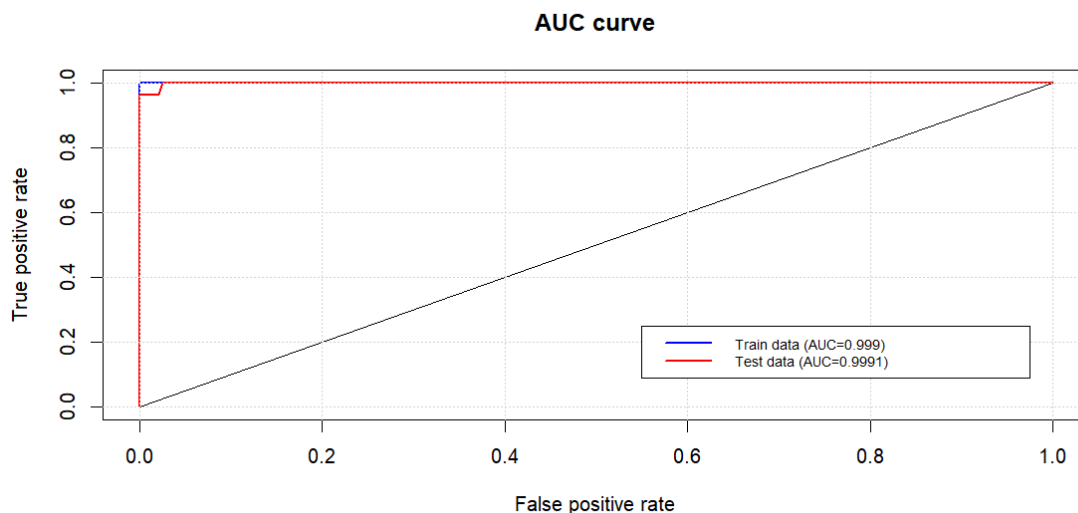


Figura 16. Área bajo la curva para los datos de calibración y validación del modelo RF.

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 Camaná.

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 Camaná.

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



- Se realizó la suma de los mapas binarios RRI (valores 0 y 1) con el mapa RF (valores entre 0 y 1).
- El mapa resultante varía entre 0 y 2.
- 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.
- Visita de campo para la verificación de puntos críticos.
- Reuniones técnicas con instituciones involucradas en la evaluación de riesgo de desastres por inundación para la recepción de sugerencias para mejoras al modelo.

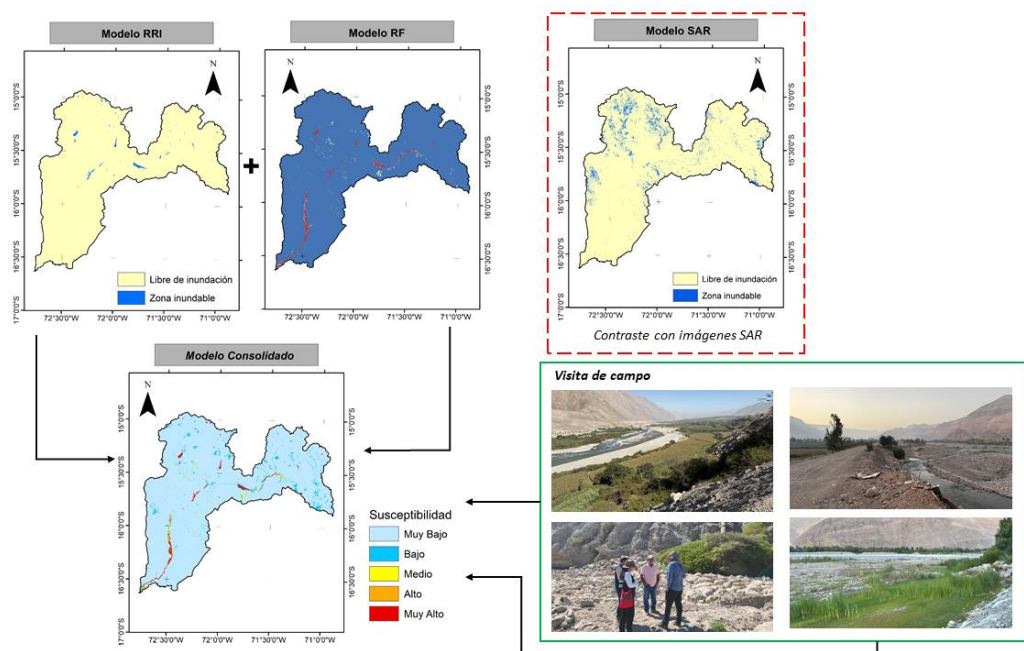


Figura 17. Flujo de proceso para obtener el Modelo Compuesto para la cuenca Río Camaná.

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 Camaná.

Susceptibilidad	Clasificación	Porcentaje de área	Área (km ²)
0-0.4	Muy bajo	95.26%	16339.23
0.4-0.6	Bajo	2.76%	472.58
0.6-0.75	Medio	0.58%	98.74
0.75-0.9	Alto	0.43%	73.75
0.9-1.0	Muy alto	0.98%	168.47

La Tabla 4. 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 88.81% de las ocurrencias de inundaciones en la cuenca. Se aprecia que el modelo en la clasificación muy alta captura el 80.23% 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 Camaná.

El modelo desarrollado RRI+RF ha permitido zonificar en cuanto a susceptibilidad o probabilidad de ocurrencia a inundaciones en la cuenca del río Camaná. 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.

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

Susceptibilidad	Ocurrencias	Porcentaje
Muy baja	3	1.16%
Baja	3	1.16%
Media	13	5.04%
Alta	32	12.40%
Muy alta (modelo RRI)	207	80.23%



De acuerdo a los registros de ocurrencias y la visita de campo se puede apreciar que, durante los periodos de fuertes lluvias, la cuenca del río Camaná presenta afectaciones por inundaciones en la parte baja y media de la cuenca, y en la parte alta presenta activaciones de quebradas.

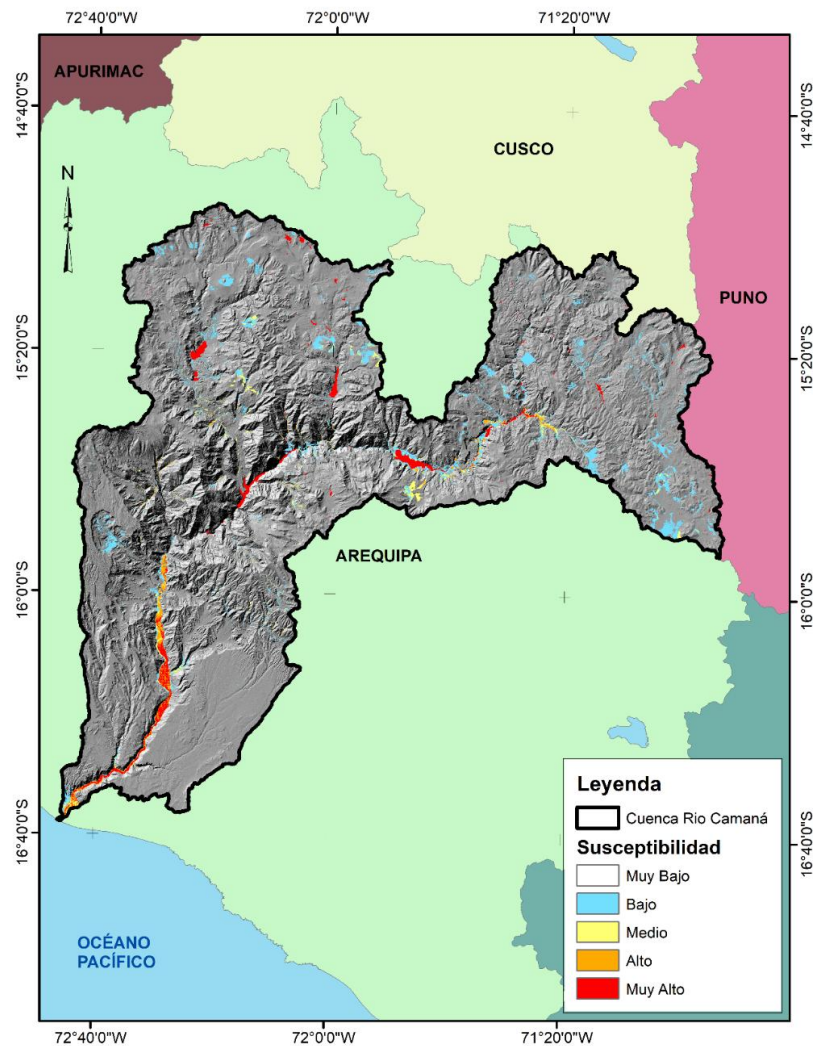


Figura 18. Resultados del modelo RRI+RF de susceptibilidad a inundación en la cuenca río Camaná. La susceptibilidad de ocurrencia a inundación se muestra clasificado desde muy bajo a muy alto.

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).

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

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 (σ^0) 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 19.

La Figura 19 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, en la parte media y alta de la cuenca, donde se presentan valles interandinos.

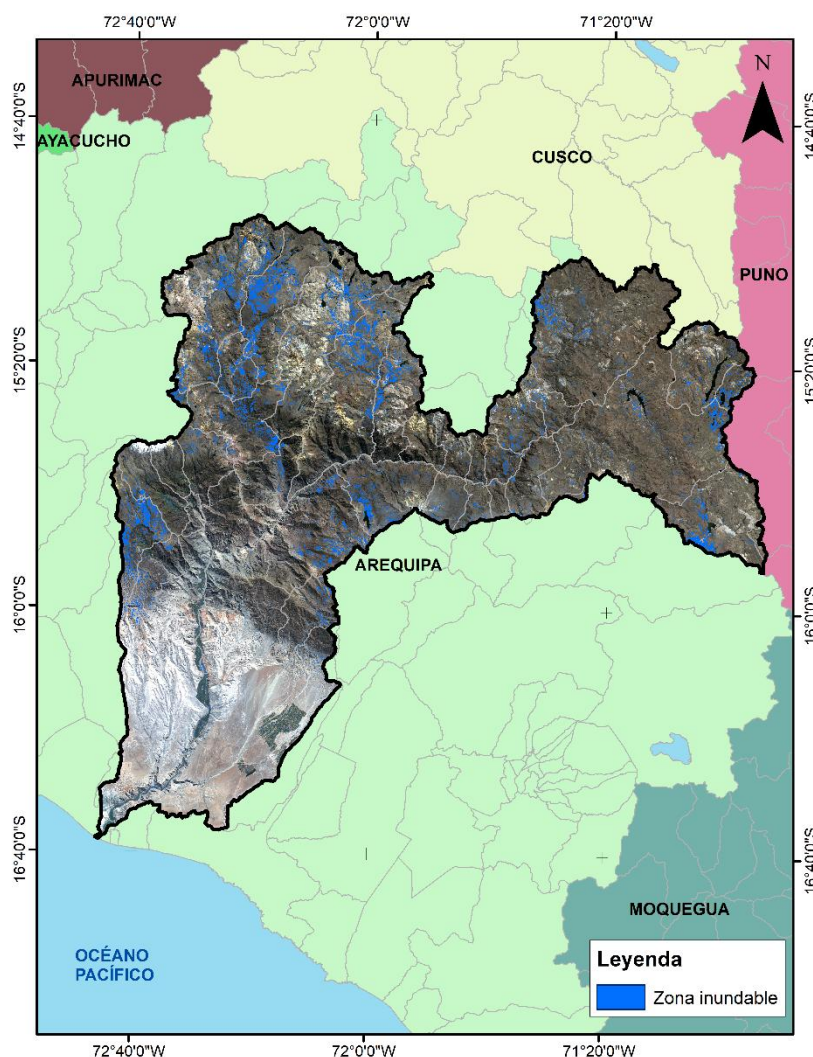


Figura 19: Área de inundación obtenido con imágenes Sentine-1 SAR para El Niño Costero 2017.

4.3.5 Verificación in situ de puntos críticos de inundación

Se realizó los trabajos de verificación en campo en compañía de autoridades locales desde los días 02 al 04 de junio de 2026 en las provincias de Castilla (Aplao) y Caylloma (Majes) del departamento de Arequipa.

La figura 20 muestra la ubicación espacial de los puntos visitados en campo por CENEPRED y las autoridades locales. Los puntos visitados coinciden con los resultados del modelo en susceptibilidad alta y muy alta de ocurrencia de inundaciones.

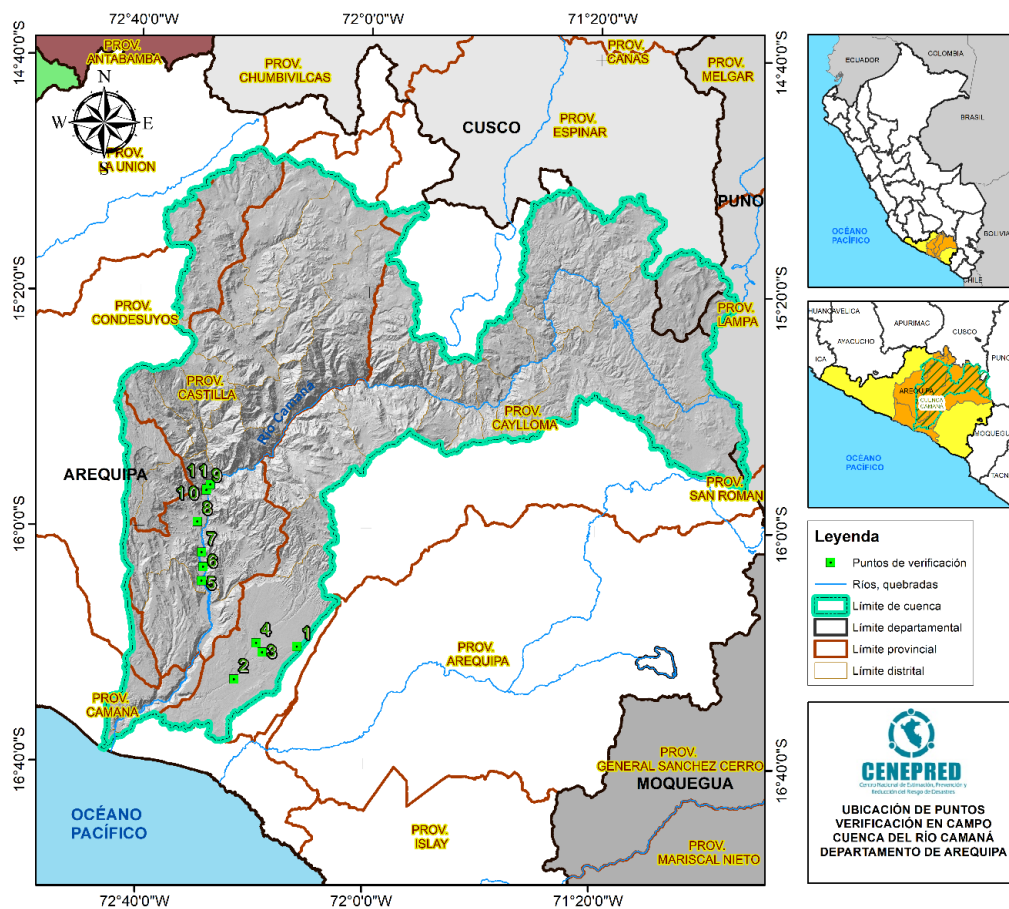


Figura 20. Ubicación de los puntos verificados en campo en las provincias de Caylloma y Castilla, en el ámbito de la cuenca del río Camaná.

A continuación, se muestran las ubicaciones y descripción de los puntos visitados durante la visita de campo en junio del 2026.

ID	Este	Norte	Elevación
1	799367.7	8191629.6	1439.0
Distrito		Provincia	Departamento
Majes		Caylloma	Arequipa
Descripción			
Quebrada que sirve para la limpieza de los vasos del sistema de riego existente en el valle, solo contiene agua en ese contexto			





ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA CAMANÁ

ID	Este	Norte	Elevación	
3	788477.2	8189848.2	1223.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Majes		Caylloma	Arequipa	
Descripción				
Zona que presenta filtraciones, existe sistema de riego por goteo, no existen cursos de agua naturales				
ID	Este	Norte	Elevación	
4	786633.2	8192801.3	1215.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Majes		Caylloma	Arequipa	
Descripción				
Quebrada Auspicio, existe presencia de vegetación en extrema sequía				
ID	Este	Norte	Elevación	
5	769486.1	8212224.0	513.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Aplao		Castilla	Arequipa	
Descripción				
Sector denominado Querulpa, presenta trabajos de limpieza y descolmatación del río, zona de inundación, con afectación a áreas agrícolas				
ID	Este	Norte	Elevación	
6	769989.7	8216691.5	558.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Aplao		Castilla	Arequipa	
Descripción				
Sector El Monte, de áreas agrícolas que se ven afectadas por las inundaciones				



ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA CAMANÁ

ID	Este	Norte	Elevación	
7	769551.5	8221170.8	611.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Aplao		Castilla	Arequipa	
Descripción				
Sector El Monte, de áreas agrícolas que se ven afectadas por las inundaciones				
ID	Este	Norte	Elevación	
8	768239.3	8230794.4	803.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Aplao		Castilla	Arequipa	
Descripción				
Área inundable debido a activación de quebrada, afectación a infraestructura hidráulica				
ID	Este	Norte	Elevación	
9	770206.7	8237465.1	858.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Aplao		Castilla	Arequipa	
Descripción				
Área inundable debido a activación de quebrada				
ID	Este	Norte	Elevación	
10	771017.8	8240669.2	847.0	
Distrito		Provincia	Departamento	
Aplao		Castilla	Arequipa	
Descripción				
Áreas agrícolas inundables				



4.3.6 Mapa de susceptibilidad a inundaciones

La Figura 21 muestra el mapa de susceptibilidad a inundaciones en el ámbito de la cuenca del río Camaná, con una clasificación de cinco niveles: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo

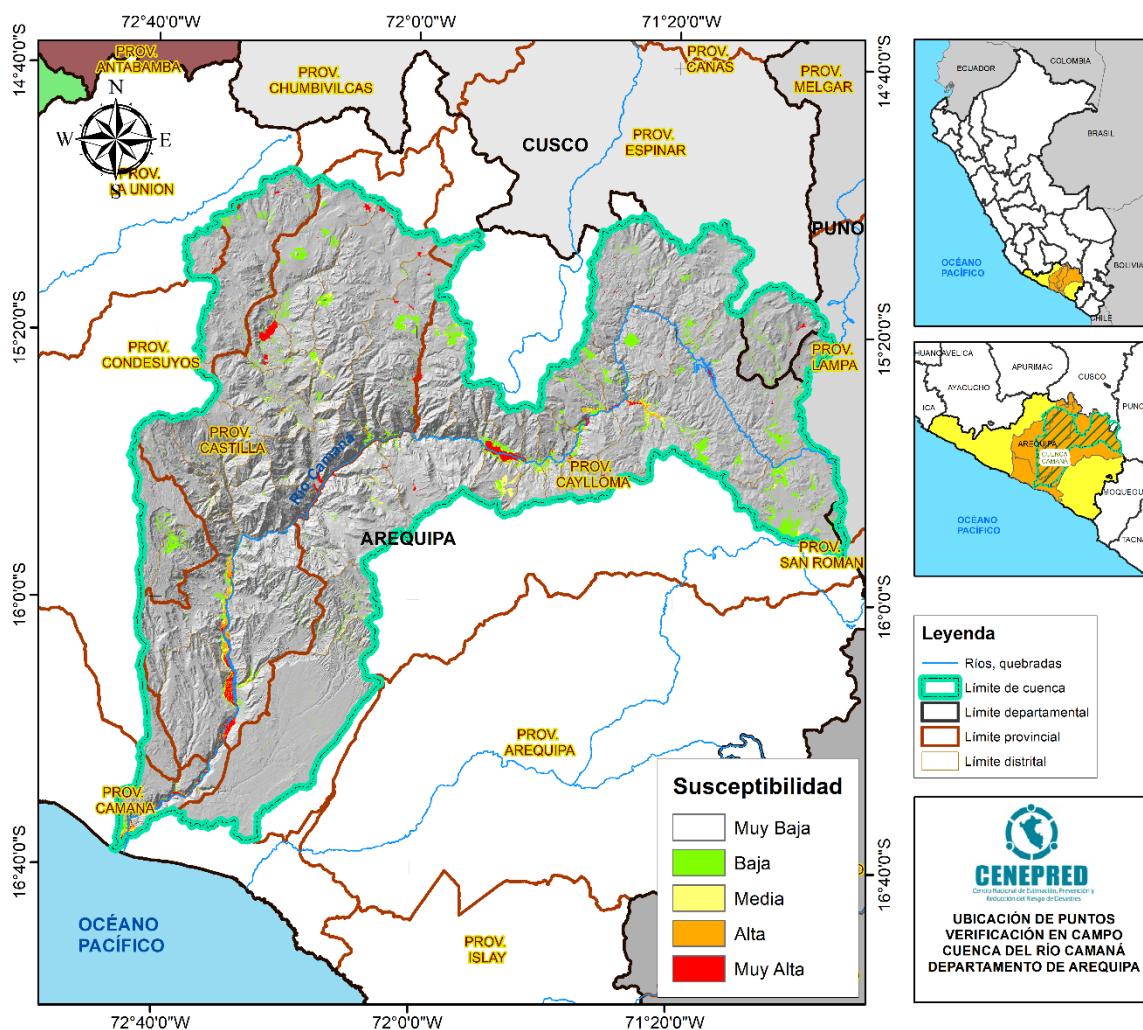


Figura 21. Mapa de susceptibilidad a inundaciones en el ámbito de la cuenca del río Camaná

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.

Departamento	Provincia	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
Arequipa	Camana	25	11,082	3,468	6,209	1,405	3,169	2,093	135	217	724
	Castilla	343	33,331	10,277	18,104	4,950	9,065	3,136	4,936	179	814
	Caylloma	942	72,285	23,452	41,191	7,642	16,642	11,782	3,563	1,136	161
	Condesuyos	57	4,896	1,412	2,687	797	1,257	369	824	19	45
Cusco	Espinar	80	787	242	453	92	155	17	134	4	0
Puno	Lampa	5	143	42	80	21	27	0	27	0	0
Total		1,452	122,524	38,893	68,724	14,907	30,315	17,397	9,619	1,555	1,744

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 2025. Censos Nacionales 2017.

Áreas agrícolas

Representa a la cartografía del catastro de las parcelas rurales sobre las cuales se realiza actividad agrícola. Información recopilada de ministerio de agricultura, municipalidades, gobiernos regionales.

Tabla 7: Área agrícola

Departamento	Provincia	Hectáreas Agrícolas (HAS)
Arequipa	Camaná	2,517.4
	Castilla	21,699.2
	Caylloma	25,181.2
	Condesuyos	2,430.3
Cusco	Espinar	20.3
Total		51,848.4

Fuente: MIDAGRI, 2024

Establecimientos de salud

Representada por la cartografía de los centros de salud, recopilada del Ministerio de Salud (MINSA 2025).



Tabla 8. Establecimientos de salud expuesta a zonas susceptibles a inundación.

Departamento	Provincia	Centros de salud
Arequipa	Camaná	5
	Castilla	39
	Caylloma	25
	Condesuyos	2
Cusco	Espinar	1

Fuente: MINSA 2025

Instituciones educativas

Representada por la cartografía de las instituciones educativas, recopilada del Ministerio de Educación (MINEDU 2025).

Tabla 9. Instituciones educativas expuesta a zonas susceptibles a inundación

Departamento	Provincia	Instituciones educativas				
		Total	Inicial	Primaria	Secundaria	Técnico Productiva
Arequipa	Camaná	15	8	6	1	
	Castilla	148	58	78	11	1
	Caylloma	129	52	56	16	5
	Condesuyos	26	10	13	2	1
Cusco	Espinar	6	1	4	1	
Puno	Lampa	2		2		
Total		326	129	159	31	7

Fuente: MINEDU 2025

Red vial

Representa a la cartografía de las carreteras. Información recopilada ministerio de transporte y comunicaciones, municipalidades, gobiernos regionales.

Tabla 10: Red vial en la cuenca del río Camaná

Departamento	Provincia	Red vial (Km)			
		Nacional	Departamental	Vecinal	Total
Arequipa	Camaná	7.3	1.3	45.3	53.9
	Castilla		299.9	721.5	1,021.5
	Caylloma	199.5	349.9	1,201.7	1,751.1
	Condesuyos		63.7	151.7	215.3
Cusco	Espinar	28.9		87.4	116.3
Puno	Lampa	3.5		4.8	8.3
Total		239.1	714.8	2,212.4	3,166.4

Fuente: MTC 2024



VI. Determinación del escenario de riesgo

Consiste en el proceso de análisis espacial entre las áreas susceptibles a inundación y los medios de vida e infraestructura existente en la cuenca, para lo cual se deberá realizar 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 Camaná.
- Sistematizar la cartografía de los elementos expuestos (agricultura, centros poblados, vías, instituciones educativas, entre otros.) identificados en el área de estudio (cuenca del río Camaná, departamento de Arequipa).
- 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 Camaná.

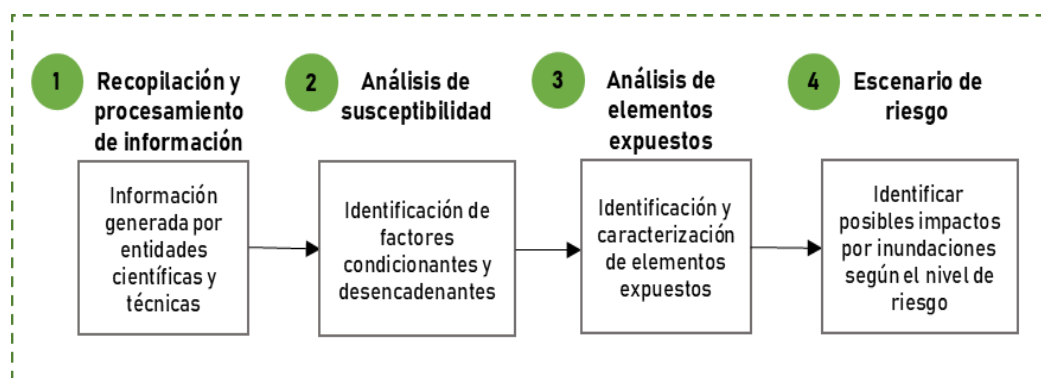


Figura 22: Flujograma del proceso de elaboración del escenario de riesgo por inundación

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

De acuerdo con la Tabla 11, existen 113 centros poblado de la provincia de Castilla en riesgo por inundaciones, pero en diferentes niveles, de los cuales 35 centros poblados se encuentran expuestos a riesgo muy alto y 23 centros poblados en riesgo alto. Asimismo, 14 centros poblados tienen un nivel de riesgo medio y 41 un nivel de riesgo bajo, siendo la provincia con mayor riesgo ante inundaciones (riesgo alto y muy alto).



ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA CAMANÁ

Tabla 11: Provincias: Centros poblados según el nivel de riesgo por inundaciones

Departamento	Provincia	Centros poblados				
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Total
Arequipa	Camana	11	5	2	7	25
	Castilla	35	23	14	41	113
	Caylloma	13	12	10	907	942
	Condesuyos				57	57
Cusco	Espinar				80	80
Puno	Lampa				5	5
Total		59	40	26	1,097	1,222

Fuente: Elaborado por CENEPRED con datos de INEI 2025.

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

Departamento	Provincia	Centros poblados	Riesgo Muy Alto								
			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
Arequipa	Camana	11	4,616	1,416	2,651	549	1,353	842	53	98	360
	Castilla	35	8,178	2,490	4,448	1,240	2,109	1415	430	72	192
	Caylloma	13	8,756	2,778	4,707	1,271	2,149	626	1479	12	32
Total		59	21,550	6,684	11,806	3,060	5,611	2,883	1,962	182	584
Departamento	Provincia	Centros poblados	Riesgo Alto								
			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
Arequipa	Camana	5	19	2	11	6	4	2	0	1	1
	Castilla	23	1,803	385	997	421	467	183	222	11	51
	Caylloma	12	2,762	797	1,500	465	515	143	359	12	1
Total		40	4,584	1,184	2,508	892	986	328	581	24	53
Departamento	Provincia	Centros poblados	Riesgo Medio								
			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
Arequipa	Camana	2	8	2	3	3	1	1	0	0	0
	Castilla	14	2,913	832	1,591	490	893	361	366	17	149
	Caylloma	10	38	7	20	11	9	0	8	1	0
Total		26	2,959	841	1,614	504	903	362	374	18	149
Departamento	Provincia	Centros poblados	Riesgo Bajo								
			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
Arequipa	Camana	7	6,439	2,048	3,544	847	1,811	1248	82	118	363
	Castilla	271	20,437	6,570	11,068	2,799	5,596	1177	3918	79	422
	Caylloma	907	60,729	19,870	34,964	5,895	13,969	11013	1717	1111	128
	Condesuyos	57	4,896	1,412	2,687	797	1,257	369	824	19	45
Cusco	Espinar	80	787	242	453	92	155	17	134	4	0
Puno	Lampa	5	143	42	80	21	27	0	27	0	0
Total		1,327	93,431	30,184	52,796	10,451	22,815	13,824	6,702	1,331	958

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

Fuente: Elaborado por CENEPRED con datos de INEI 2025.



La Tabla 12 muestra la cantidad de población y viviendas según su nivel de riesgo por inundaciones. Este escenario muestra que un total de 21,550 personas y 5,611 viviendas se encuentran en riesgo muy alto frente a la ocurrencia de inundaciones comprendido en 59 centros poblados. En este mismo escenario se estima un total de 4,584 de personas y 986 viviendas en riesgo alto, ubicadas en 40 centros poblados.

La Tabla 13 muestra la cantidad de superficie agrícola en hectáreas según su nivel de riesgo frente a inundaciones. Este escenario estima que 7,004 hectáreas se encuentran en un nivel de riesgo muy alto y 4,461 hectáreas con riesgo alto.

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

Departamento	Provincia	Superficie agrícola (Hectáreas)				
		Total	Riesgo Muy alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Arequipa	Camana	2,517	1,269.0	722.5	384.5	141.4
	Castilla	21,699	3,806.4	3,176.7	826.3	13,889.8
	Caylloma	25,181	1,927.4	561.5	764.6	21,927.7
	Condesuyos	2,430	1.1	0.3	2.0	2,426.8
Cusco	Espinar					20.3
Total		51,828	7,004	4,461	1,977	38,406

Fuente: Elaborado por CENEPRED con datos de MIDAGRI, 2024

La Tabla 14 muestra los establecimientos de salud según el nivel de riesgo por inundaciones. De un total de 72 establecimientos de salud, en riesgo muy alto se encuentran 13 y en riesgo alto 7.

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

Departamento	Provincia	Establecimiento de Salud				
		Total	Riesgo Muy alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Arequipa	Camana	5	2	2		1
	Castilla	39	7	3	2	27
	Caylloma	25	4	2	2	17
	Condesuyo	2				2
Cusco	Espinar	1				1
Total		72	13	7	4	48

Fuente : Elaborado por CENEPRED con datos de MINSA, 2025



ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA CAMANÁ

La Tabla 15 muestra que un total de 39 instituciones educativas se encuentra en nivel de riesgo muy alto a inundaciones, mientras 26 se encuentran en riesgo alto.

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

Departamento	Provincia	Instituciones educativas					
		Nivel educativo	Total	Riesgo Muy alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Arequipa	Camaná	Inicial	8	2	2		4
		Primaria	6	1	1		4
		Secundaria	1				1
		Técnico Productiva	0				
	Subtotal		15	3	3	0	9
	Castilla	Inicial	58	6	6	4	42
		Primaria	78	8	4	7	59
		Secundaria	11	4	4		3
		Técnico Productiva	1	1			
	Subtotal		148	19	14	11	104
	Caylloma	Inicial	52	8	3	1	40
		Primaria	56	4	4	3	45
		Secundaria	16	3	2		11
		Técnico Productiva	5	2			3
	Subtotal		129	17	9	4	99
	Condesuyos	Inicial	10				10
		Primaria	13				13
		Secundaria	2				2
		Técnico Productiva	1				1
	Subtotal		26	0	0	0	26
Cusco	Espinar	Inicial	1				1
		Primaria	4				4
		Secundaria	1				1
		Técnico Productiva	0				
	Subtotal		6	0	0	0	6
Puno	Lampa	Inicial	0				
		Primaria	1				1
		Secundaria	0				
		Técnico Productiva	0				
	Subtotal		1	0	0	0	1
Total			325	39	26	15	245

Fuente: Elaborado por CENEPRED con datos de MINEDU, 2025

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 108.7 km de la red vial se encuentra en riesgo muy alto y 72.3 km en riesgo alto.



ESTUDIO DE ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA CAMANÁ

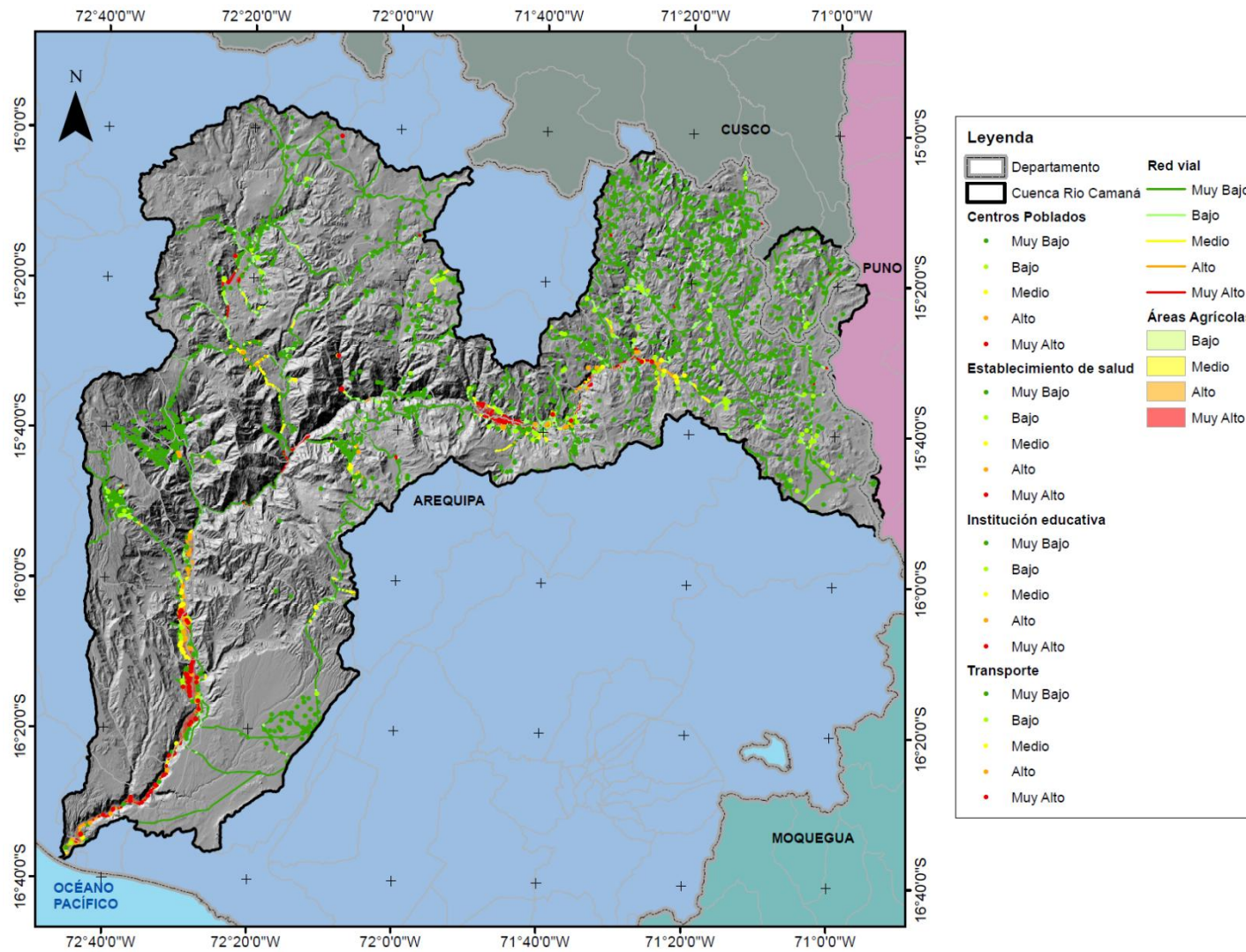
Tabla 16: Red vial de transporte según el nivel de riesgo por inundaciones

Departamento	Provincia	Red vial (Km)					
		Jerarquía	Total	Riesgo Muy alto	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Arequipa	Camaná	Nacional	7.2	0.9	2.4	1.1	2.7
		Departamental	1.3				1.3
		Vecinal	45.3	12.2	18.8	4.7	9.6
	Subtotal		53.8	13.1	21.2	5.9	13.6
	Castilla	Nacional	0.0				
		Departamental	299.9	12.7	11.1	21.2	254.9
		Vecinal	721.5	28.9	19.2	15.0	658.4
	Subtotal		1021.4	41.6	30.3	36.2	913.3
	Caylloma	Nacional	199.4	0.0	3.2	4.3	191.9
		Departamental	349.9	13.3	4.1	9.2	323.2
		Vecinal	1200.7	40.5	13.4	25.6	1121.2
	Subtotal		1750.0	53.8	20.6	39.1	1636.4
	Condesuyos	Nacional	0.0				
		Departamental	63.6		0.1	0.2	63.3
		Vecinal	151.6	0.1		0.1	151.4
	Subtotal		215.2	0.1	0.1	0.4	214.7
Cusco	Espinar	Nacional	28.8				28.8
		Departamental	0.0				
		Vecinal	87.1	0.1			87.1
	Subtotal		115.9	0.1	0.0	0.0	115.9
Puno	Lampa	Nacional	3.5				3.5
		Departamental	0.0				
		Vecinal	4.8				4.8
	Subtotal		8.2	0.0	0.0	0.0	8.2
Total			3164.5	108.7	72.3	81.5	2902.0

Fuente: Elaborado por CENEPRED con datos de MTC, 2024.

Conforme al Mapa resultante (Figura 23) se puede visualizar 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, y en base a ello priorizar sectores críticos según el nivel de riesgo determinado por cada elemento.

Figura 23. Mapa de riesgo de elementos expuestos en el ámbito de la cuenca del río Camaná





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 Camaná.
- 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 92.6% de las ocurrencias de inundaciones en la cuenca entre los niveles de susceptibilidad alta y muy alta. La clasificación muy alta captura el 80.23 % de los registros, lo cual define la huella de inundación para un evento extraordinario. En ese sentido, el modelo propuesto RRI+RF tiene una alta capacidad para identificar las zonas susceptibles a inundaciones en la cuenca del río Camaná.
- El resultado del escenario de riesgo presenta los posibles impactos que pueden presentarse ante la ocurrencia de inundaciones dentro la cuenca del río Camaná, en el ámbito de la región Arequipa, según el nivel de riesgo obtenido. Se estima que un total de 21,550 personas y 5,611 viviendas se encuentran en riesgo muy alto frente a la ocurrencia de inundaciones comprendido en 59 centros poblados. En este mismo escenario se estima un total de 4,584 de personas y 986 viviendas en riesgo alto, ubicadas en 40 centros poblados.
- En cuanto a la superficie agrícola se estima que 7, 004 hectáreas se encuentran en un nivel de riesgo muy alto y 4, 461 hectáreas con riesgo alto.
- En cuanto a los establecimientos de salud, de un total de 72 establecimientos de salud, en riesgo muy alto se encuentran 13 y en riesgo alto 7.
- En cuanto a las instituciones educativas, 39 se encuentra en nivel de riesgo muy alto a inundaciones, mientras 26 se encuentran en riesgo alto.



VII. Recomendaciones

Se recomienda al Gobierno Regional de Arequipa a través de su unidad de gestión prospectiva del riesgo de desastres y en coordinación con las Municipalidades Provincial de Castilla, así como a la Municipalidad Distrital de Majes, entre otras jurisdicciones identificadas en el presente estudio 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 y medidas estructurales para reducir los posibles impactos frente a inundaciones en periodos con eventos extremos.
- Difundir el presente escenario de riesgo a las entidades vinculadas a la gestión del riesgo frente a inundaciones, principalmente a las gerencias, subgerencias y oficinas del Gobierno Regional de Arequipa, así como de los gobiernos locales identificados con nivel de riesgo alto y Muy alto, Autoridad Local de Agua y Dirección Zonal del SENAMHI, para las acciones de coordinación y planificación en marco de las funciones del Grupo de Trabajo para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Formular o actualizar el respectivo Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres – PPRRD, considerando el presente estudio en la fase de elaboración del diagnóstico.

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 al presente estudio (**Ver Anexo 1- Excel**).



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

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

Dirección: Av. Del Parque Norte. N° 829 - 833. San Isidro, Lima - Perú

Horario: de atención: 08:30 a.m. a 05:30 p.m.