



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



Instituto
Geofísico
del Perú

EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA QUEBRADA EL GALLO

(Distrito de Castilla, Provincia y Región Piura)

Informe Técnico n.º 031-2025/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima-Perú
Octubre, 2025

CRÉDITOS

Miguel Ángel Espichán Mariñas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional del IGP

Juan Carlos Gómez
Director de la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP

Evaluación hidrodinámica de la quebrada El Gallo (distrito de Castilla, provincia y región Piura)
Informe técnico

Julio Martínez
Evelyn Arapa
Gustavo Namay
Keiko Moroccoire
Rodrigo Pamo
Autores

Hernando Tavera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima
Teléfono: +5113172300

Accede libremente al Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) para descargar este informe:
<https://repositorio.igp.gob.pe/>



REGEN

Lima, octubre de 2025

Programa Presupuestal 068
REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS
POR DESASTRES

ESTUDIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Actividad

Desarrollo de estudios para establecer el riesgo a nivel territorial

EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA QUEBRADA EL GALLO

(Distrito de Castilla, Provincia y Región Piura)



Lima, Perú
Octubre de 2025

RESUMEN

Se realizó la caracterización hidrodinámica de la quebrada El Gallo, ubicada en el distrito de Castilla, provincia y región Piura, con la finalidad de delimitar y cartografiar las zonas que podrían ser afectadas por inundaciones generadas por precipitaciones extremas. Haciendo uso de herramientas de simulación numérica, se proponen escenarios de flujos máximos para un periodo de retorno de 100 años, basados en el análisis hidrológico y el modelo digital de terreno (MDT). Los resultados indican que el área inundable abarca aproximadamente 31 hectáreas, con alturas máximas del flujo que superan un metro en los asentamientos humanos Valle La Esperanza, Felipe Cossío, Tácala, Almirante Miguel Grau y Villa Integración. Asimismo, las velocidades máximas del flujo alcanzan valores de hasta 3 m/s, principalmente en los sectores de Valle La Esperanza, Felipe Cossío, Nuevo Horizonte, Tácala y Almirante Miguel Grau. Esta información constituye un insumo técnico-científico de base para la gestión del riesgo de inundaciones en el distrito de Castilla, y contribuye con el planeamiento urbano y la implementación de medidas de mitigación estructurales y no estructurales.

CONTENIDO

- 5** Resumen
- 8** Introducción
- 8** Objetivo
- 9** Zona de estudio
- 11** Metodología
- 12** Topografía
- 12** Adquisición de datos
- 12** Procesamiento de datos
- 13** Información generada
- 17** Análisis hidrodinámico
- 17** Determinación del flujo máximo
- 22** Modelamiento numérico
- 23** Configuración del escenario a simular
- 25** Resultados
- 25** Alturas y velocidades de inundación
- 27** Evaluación del peligro por inundación
- 29** Conclusiones
- 30** Referencias

Foto MVCS



Quebrada El Gallo: trabajos de descolmatación en su cauce.

1. Introducción

En Perú ocurren fenómenos naturales con cierta periodicidad, ya sean de origen geofísico o hidrometeorológico, que afectan la seguridad física de las localidades y sus habitantes. La quebrada El Gallo es un cauce estacional que nace en las zonas altas al nororiente del distrito de Castilla, provincia y región Piura. En condiciones normales, permanece seca, pero frente a lluvias intensas, especialmente durante eventos extremos como El Niño, transita grandes volúmenes de agua hacia el suroeste, inundando las áreas bajas de poca pendiente. Esta quebrada atraviesa varios asentamientos humanos, como Tacalá, Cossío del Pomar, Almirante Miguel Grau, Villa Integración, entre otros, y desemboca en el canal DREN 1308 que forma parte del sistema natural de drenaje pluvial de Piura. Su régimen hídrico es intermitente; precipita en promedio escasos 518 mm anuales; sin embargo, en episodios extraordinarios, las lluvias pueden multiplicarse y desencadenar desbordes que dañan viviendas e infraestructuras viales. Como consecuencia, la quebrada actúa como colectora urbana de escorrentías, pero los escasos sistemas de drenaje hacen que el agua se acumule en zonas críticas, lo que agrava el riesgo de inundación.

Las fuertes precipitaciones asociadas a eventos El Niño han ocasionado históricamente inundaciones en Piura. Según residentes de la zona, durante los años 1983, 1998 y 2017, las lluvias provocaron importantes crecidas en el cauce de la quebrada El Gallo. En la actualidad, la quebrada no cuenta con un canal de salida permanente, forma una cuenca ciega donde se acumulan las aguas de escorrentía; de este modo, cuando el cauce se desborda, inunda directamente zonas habitadas. Se estima que en épocas de lluvia intensa cerca de 800 familias resultan afectadas por las crecidas. Estos antecedentes ponen de manifiesto la alta vulnerabilidad de la población local ante eventos extremos de precipitación.

Este informe técnico-científico responde a la necesidad de conocer con precisión el comportamiento dinámico de la quebrada El Gallo para contribuir con la gestión del riesgo de desastres. A través del modelamiento hidrológico e hidráulico se analizan distintos escenarios de lluvia, con el fin de delimitar las zonas inundables. En términos generales, se pretende identificar los tramos críticos del cauce de la quebrada. Estos resultados técnicos servirán de insumo para el planeamiento territorial municipal y la toma de

decisiones, orientando la implementación de medidas preventivas.

1.1 Objetivo

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar el comportamiento hidrodinámico de la quebrada El Gallo, mediante la simulación numérica de caudales máximos instantáneos asociados a un periodo de retorno de 100 años. Los resultados obtenidos permitirán delimitar las probables zonas inundables y elaborar el mapa de peligros por inundación.

1.2 Zona de estudio

Se localiza en el distrito de Castilla, provincia y región Piura, dentro de las coordenadas UTM: norte 9 424 500–9 428 000 m y este 543 000–545 500 m, que abarcan la quebrada El Gallo y las áreas aledañas a su cauce potencialmente inundables.

La quebrada se origina al noreste de la ciudad de Castilla, aproximadamente a la altura del kilómetro 21 de la antigua Panamericana Sur, y se extiende en dirección noreste-suroeste hasta desembocar al este del aeropuerto de Piura, atravesando sectores urbanos densamente poblados, como A. H. Nuevo Horizonte, A. H. Ampliación Tacalá-Prolongación Felipe Cossío del Pomar, A. H. Sagrado Corazón de Jesús, urbanización Los Almendros, A. H. Almirante Miguel Grau, Asociación Villa Integración y Asociación El Mirador (Figura 1).

La accesibilidad a la zona de estudio se realiza principalmente a través de la avenida Guardia Civil, la cual conecta con los sectores urbanos atravesados por la quebrada El Gallo. Asimismo, se cuenta con vías secundarias y caminos vecinales transitables, los cuales permiten el ingreso para la ejecución de actividades técnicas de campo.

La zona de estudio se encuentra principalmente sobre una llanura aluvial, una superficie plana o ligeramente ondulada con pendientes menores a 10° y elevaciones que oscilan entre 23 m s. n. m. y 48 m s. n. m., conformada por depósitos aluviales y eólicos recientes. Asimismo, se observan colinas de formas redondeadas, con pendientes que superan los 15°, ubicadas principalmente hacia el sureste de la quebrada, las cuales constituyen una transición geomorfológica hacia la llanura aluvial.



Hidrográficamente, la quebrada El Gallo forma parte de la cuenca del río Piura, dentro de la subcuenca Bajo Piura (Figura 2). Presenta una dirección predominante noreste-suroeste, con una longitud aproximada de 2.5 km. A lo largo de su recorrido, la quebrada es alimentada por pequeños afluentes y conserva un cauce natural de pendiente suave, conformado por materiales aluviales compuestos principalmente por arenas y limos poco consolidados, producto de procesos de transporte y sedimentación fluvial.

No obstante, en varios sectores se ha identificado la presencia de residuos sólidos y escombros depositados en el cauce, los cuales alteran su morfología natural. Además, la modificación del cauce también se debe a procesos de encauzamiento artesanal mediante diques de

tierra construidos en los márgenes, así como a la presencia de puentes precarios o tipo badén que interrumpen parcialmente el flujo natural. Estas intervenciones, sumadas a la sedimentación y colmatación del cauce, han reducido su capacidad hidráulica y aumentado el peligro de desbordes durante lluvias intensas.

La quebrada tiene un régimen estacional, sin caudal permanente, que se activa durante las lluvias de verano y, de manera crítica, durante eventos extraordinarios asociados al fenómeno El Niño y el Niño Costero. Esta activación se debe principalmente a la concentración de escorrentías superficiales de las áreas urbanizadas, lo que puede generar caudales súbitos capaces de producir desbordes e inundaciones.

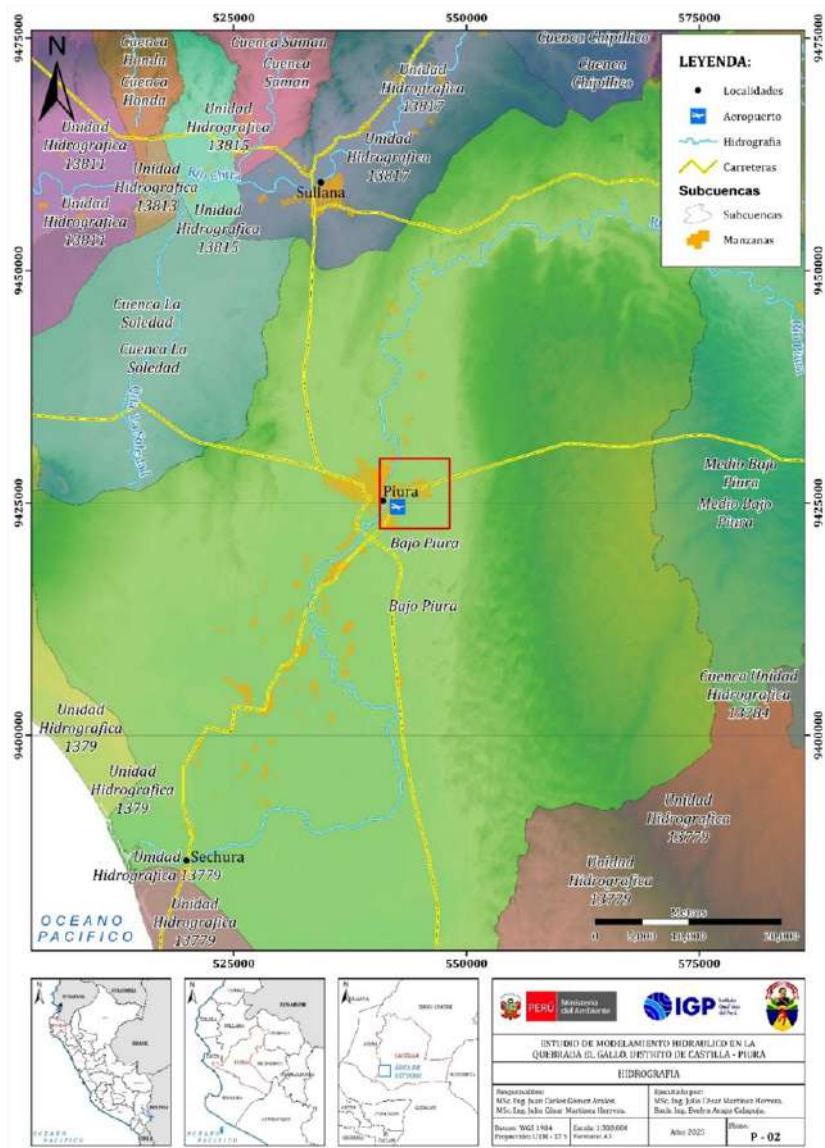


Figura 2. Subcuenca del área de estudio.

2. Metodología

En general, este estudio considera la siguiente metodología:

- Recopilación y procesamiento de información base: Tales como cartografía, registros hidrometeorológicos, catastro de obras hidráulicas y caracterización del suelo en el entorno de la quebrada.
- Levantamiento topográfico: Se aplicaron técnicas de fotogrametría con dron para obtener un modelo digital de terreno (MDT) y una ortofoto, ambas con alta resolución para representar con precisión la morfología del cauce y las áreas colindantes.
- Análisis hidrológico: Se realizó la estimación de caudales máximos instantáneos para un periodo de retorno de 100 años, tomando en cuenta las condiciones hidrológicas y climáticas locales.
- Modelamiento hidráulico bidimensional (2D): Se efectuó la construcción, calibración y validación del modelo de flujo, tomando en cuenta la geometría del cauce y las estructuras de cruce (alcantarillas), así como condiciones de borde y rugosidades características del terreno.
- Elaboración de productos cartográficos: Se generaron mapas de altura y velocidades del flujo, así como de niveles de peligro de inundación para un periodo de retorno de 100 años, los cuales constituyen herramientas clave para la gestión del riesgo.



3. Topografía

3.1 Adquisición de datos

El levantamiento topográfico fue realizado mediante un vuelo fotogramétrico con dron sobre un polígono que cubrió un área de 541 hectáreas, dentro de la cual se incluyó un tramo de 2.5 km de la quebrada El Gallo, considerada como el eje principal del estudio.

Para realizar el levantamiento topográfico se empleó el dron DJI Mavic 3M, en conjunto con un sistema de posicionamiento GNSS diferencial (Base y Rover) (Figura 3), lo que permitió obtener imágenes aéreas de alta resolución con precisión centimétrica. Asimismo, para garantizar una referencia geodésica absoluta y asegurar la precisión espacial del modelo del terreno generado, se utilizó como punto de control principal la estación PIU2052, ubicada aproximadamente a 7 km del área de estudio, tal como se detalla en la Tabla 1 y Figura 4.



Figura 3. A) Dron DJI Mavic 3M. B) Estación GNSS diferencial.

Tabla 1. Coordenadas del punto base.

ID	NORTE	ESTE	COTA
PIU2052	9422217.966	542228.373	38.896



Figura 4. Datos generales del punto de control base PIU2052.

La georreferenciación de las imágenes aéreas adquiridas con el dron se realizó mediante puntos de fotocontrol, los cuales permitieron corregir y ajustar con alta precisión la posición espacial de las imágenes. Se realizaron el marcado y levantamiento de 18 puntos de fotocontrol dentro del área de estudio, los cuales fueron señalizados con aspas de yeso de 2.5 m x 2.5 m. Estos puntos fueron ubicados en zonas despejadas, dentro de un espacio libre mínimo de 5 m x 5 m, evitando la proximidad de objetos que proyectaran sombras o generaran interferencia visual durante la captura aérea. La estación rover registró observaciones en cada punto, con una tasa de muestreo de 5 segundos durante 15 minutos, mientras que la estación base operó de forma continua con un intervalo de registro de 5 segundos y un periodo de observación promedio de 6 horas por día.

3.2 Procesamiento de datos

El procesamiento de información comprende una serie de actividades orientadas a transformar los datos brutos obtenidos en campo en información geoespacial precisa. En esta etapa se incluye el ajuste de coordenadas de los puntos de fotocontrol y el procesamiento fotogramétrico de las imágenes aéreas.

Las coordenadas de los 18 puntos de fotocontrol fueron procesadas y corregidas mediante el software Trimble Business Center (TBC). Este software calcula las coordenadas este, norte y elevación mediante la determinación de líneas de base entre la estación GNSS base, ubicada en PIU2052 (a 7 km del área de estudio), y los puntos GPS temporales registrados en campo.

Durante el procesamiento, el software aplica la corrección del retraso troposférico utilizando el modelo Hopfield (1971) y resuelve las ambigüedades de fase empleando los parámetros orbitales precisos (efemérides IGS), de acuerdo con los estándares establecidos por Trimble Survey Division (2012). Como resultado, se obtuvieron las coordenadas corregidas y la precisión final de la posición, las cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas y precisión horizontal y vertical de los puntos de fotocontrol.

ID	Este (Metros)	Norte (Metros)	Elevación (m s. n. m.)	Prec. H. (Metros)	Prec. V. (Metros)
CT01	543808.06	9425213.13	30.11	0.012	0.02
CT02	544196.80	9425576.29	30.15	0.026	0.046
CT03	544350.73	9425234.34	33.87	0.012	0.02
CT04	544787.69	9425906.16	39.43	0.016	0.022
CT05	544064.11	9426147.52	30.56	0.016	0.022
CT06	544554.10	9426426.73	32.75	0.015	0.038
CT07	544722.92	9426766.06	36.56	0.013	0.038
CT08	544686.39	9427054.03	39.83	0.015	0.025
CT09	545177.24	9426936.21	40.24	0.012	0.016
CT10	545763.03	9427060.72	40.40	0.013	0.025
CT11	544580.97	9427844.94	41.29	0.018	0.028
CT12	544257.64	9427238.29	33.62	0.018	0.028
CT13	544187.13	9426929.09	32.58	0.011	0.025
CT14	544247.44	9425706.39	28.66	0.01	0.014
CT15	544403.74	9425777.32	34.02	0.015	0.031
CT16	544027.99	9425310.67	27.71	0.021	0.057
CT17	544350.08	9426247.51	32.57	0.013	0.029
CT18	544562.10	9425657.92	36.09	0.021	0.033

Las fotografías aéreas fueron procesadas en el software Pix4D Mapper mediante tres etapas principales para la generación del MDT:

- Calibración automática de cámaras, es decir, la búsqueda de puntos en común entre las fotografías. Este proceso permitió generar una nube de 839 633 puntos de enlace.
- Realizar la densificación de la nube de puntos, con la cual se generó una nube densa de 644 890 912 puntos en calidad alta, clasificada en las siguientes categorías: vegetación, edificios y terreno.
- Generación del modelo digital del terreno (MDT) con una resolución espacial de 10 cm/píxel. Este MDT representa la superficie del terreno en coordenadas X, Y, Z, libre de elementos como edificios y vegetación. Asimismo, en esta fase se generó el ortomosaico georreferenciado.

3.3 Información generada

El modelo digital del terreno (MDT) constituye el producto principal del levantamiento fotogramétrico, ya que proporciona una representación precisa de la morfología del cauce de la quebrada El Gallo, siendo información fundamental para la simulación hidrodinámica.

En la Figura 5 se presenta el mapa del modelo digital del terreno (MDT) a escala 1:20 000, donde las tonalidades de la paleta de colores representan las distintas elevaciones del terreno. Estas varían de colores verdes hasta tonos grises, correspondientes a elevaciones entre 23 m s. n. m. y 48 m s. n. m., respectivamente. Las elevaciones más altas (tonos marrones a grises) se localizan en el sector noreste del área de estudio, donde se ubican los asentamientos humanos Valle La Esperanza, Ricardo Palma y Nuevo Horizonte. Las elevaciones intermedias y bajas (tonos

verdes y amarillos) corresponden igualmente a zonas urbanas con diversos asentamientos, observándose una disminución progresiva de la altitud en dirección suroeste. En el caso de la

quebrada El Gallo, esta presenta una cota mínima de 28 m s. n. m. y máxima de 43 m s. n. m., lo que representa un cambio de 15 metros de elevación en un tramo de aproximadamente 2.8 km.

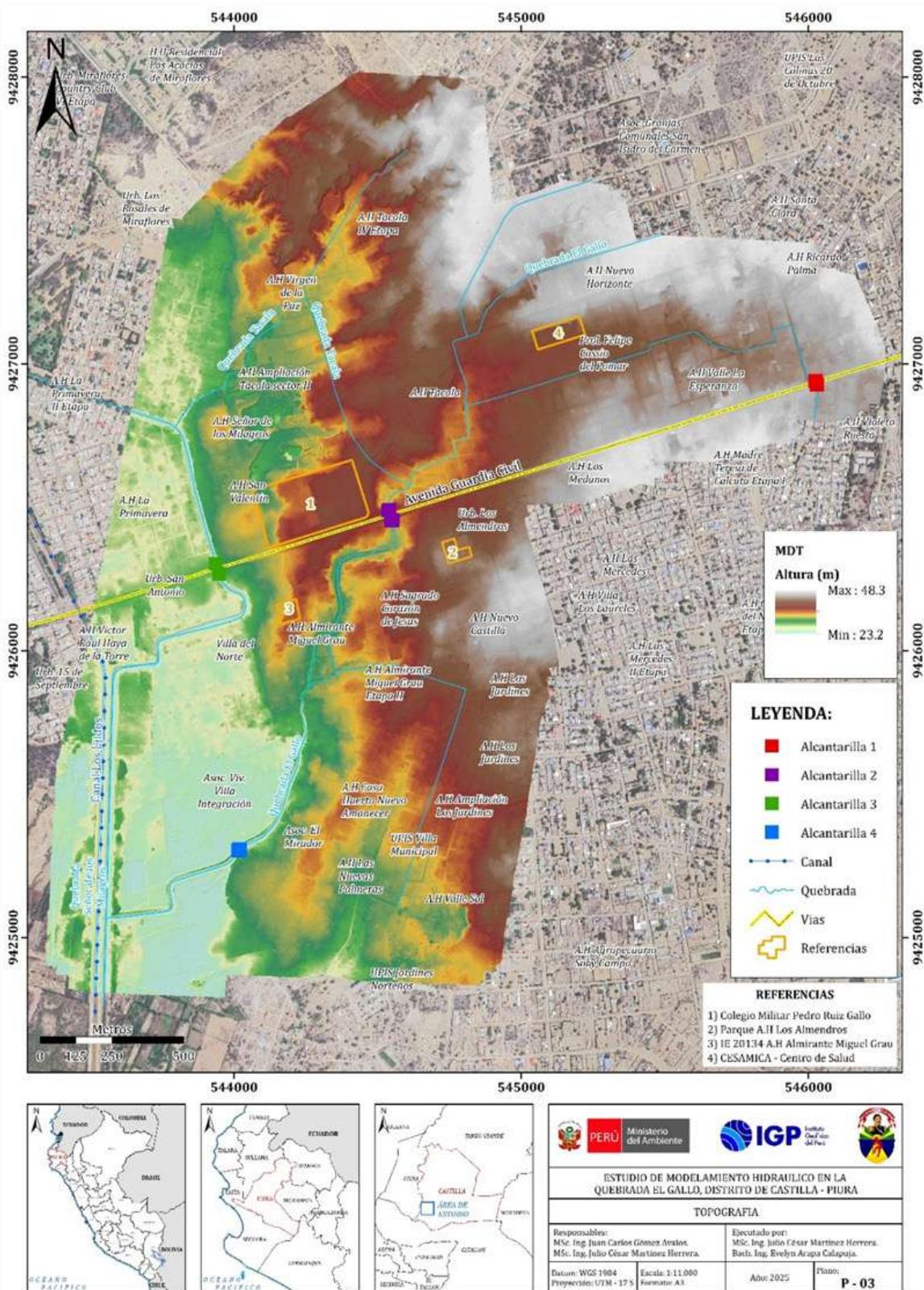


Figura 5. Modelo digital del terreno (MDT).

En la Figura 6 se presenta el mapa de ortomosaico a escala 1:20 000, generado con una resolución espacial de 5 cm/píxel. En el ortomosaico se pueden identificar con claridad calles, viviendas, puentes, árboles, vehículos,

parques y otros elementos con dimensiones a partir de aproximadamente 30 cm. Los distintos tonos observados reflejan la variabilidad de coberturas y objetos presentes en el área de estudio.

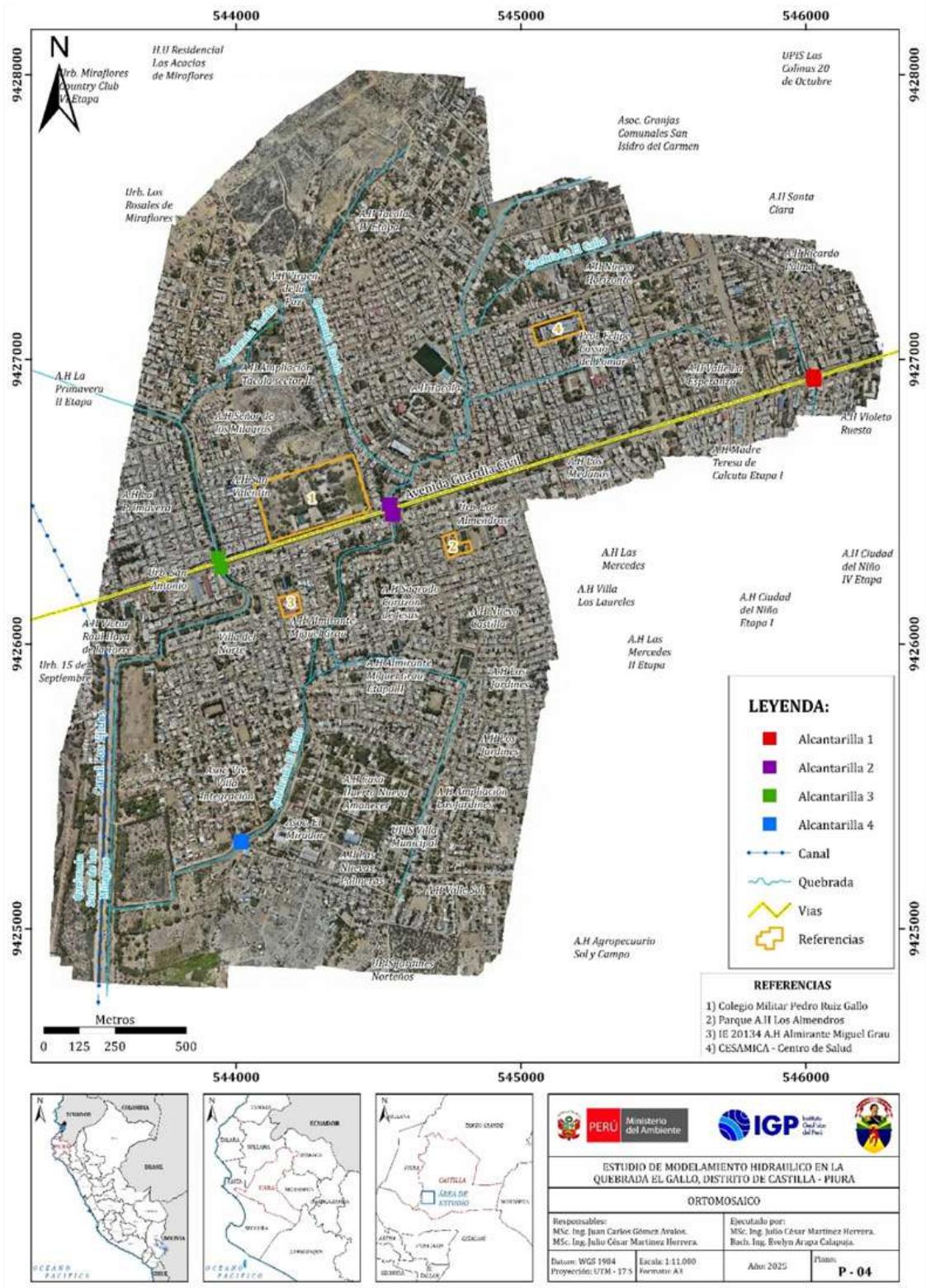


Figura 6. Mapa del ortomosaico.

Con base en el MDT, se elaboró un mapa de curvas de nivel con intervalo de cotas de 0.5 metros (Figura 7). Para garantizar su precisión geométrica, las curvas de nivel fueron

superpuestas sobre el ortomosaico, con el fin de verificar que su trazo coincidiera con la morfología real del terreno.

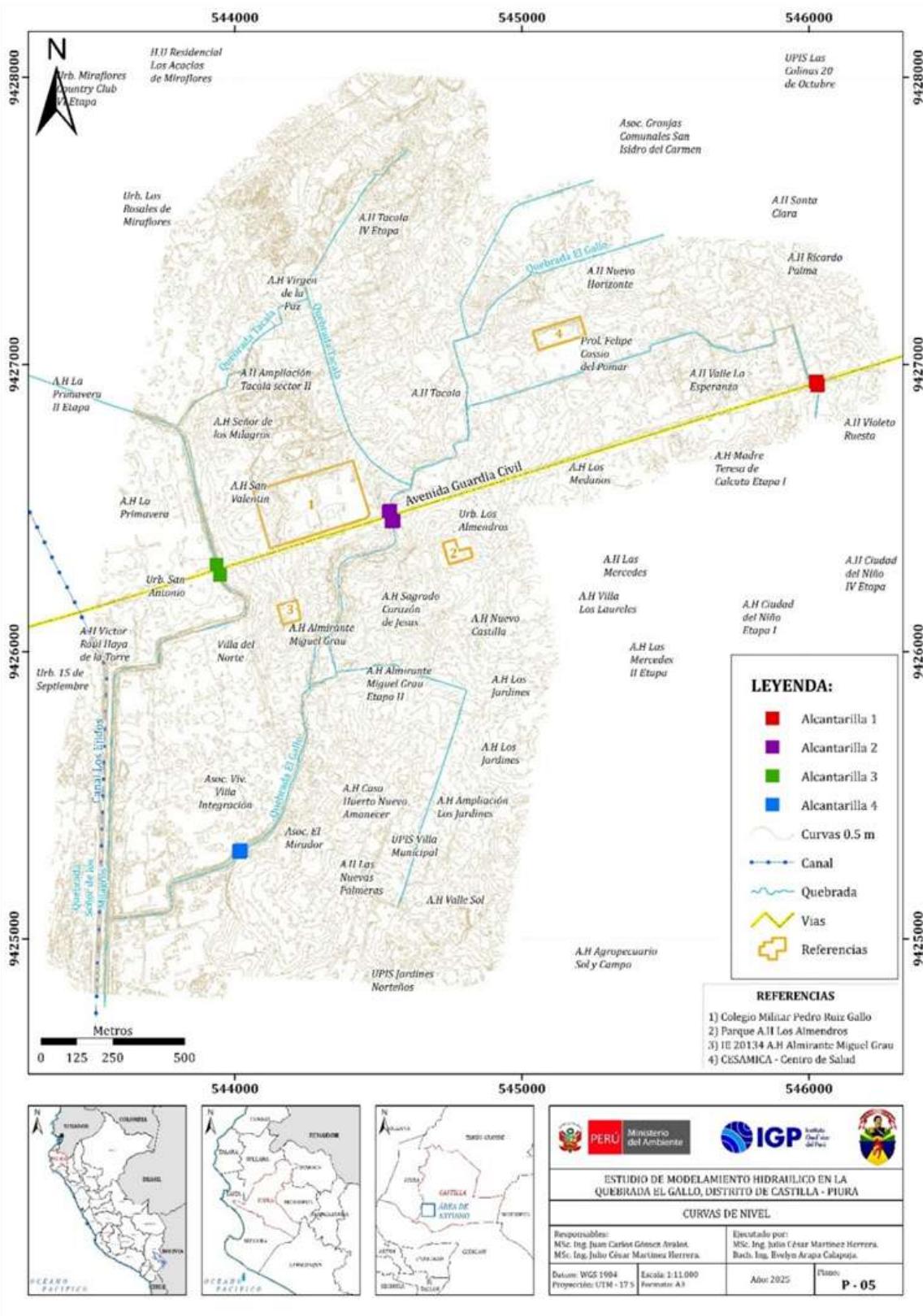


Figura 7. Mapa de curvas de nivel para el área de estudio.

4. Análisis hidrodinámico

Se realizó el análisis hidrodinámico del flujo y su distribución espacial y temporal, mediante la evaluación de las condiciones morfológicas, hidráulicas e hidrológicas de las quebradas. Toda esta información se integra en modelos numéricos que permiten simular escenarios de flujos máximos y obtener zonas probables de inundación, velocidades y alturas (Ramírez & Briones, 2017).

En el presente estudio, el análisis hidrodinámico aplicado a la quebrada El Gallo busca caracterizar las inundaciones desencadenadas por lluvias intensas, originadas tanto por eventos estacionales como por episodios del fenómeno El Niño y del Niño Costero, los cuales provocan precipitaciones anómalas en la costa norte del Perú.

4.1 Determinación del flujo máximo

En la zona de estudio, los fenómenos El Niño y El Niño Costero ocurren de manera periódica, alterando significativamente las condiciones meteorológicas de acuerdo con su intensidad y duración. La Figura 8 muestra la variación temporal de la precipitación mensual acumulada

registrada entre los años 1981 y 2024, y evidencia una marcada variabilidad interanual asociada a la ocurrencia de eventos extremos de lluvia.

Se identifican picos notoriamente elevados en los años 1983, 1998, 2017 y 2023, los cuales corresponden a los eventos del fenómeno El Niño y del Niño Costero que afectaron de manera severa la zona de estudio. Durante dichos años, las precipitaciones mensuales superaron los 900 mm, en contraste con los valores promedio anuales que oscilan entre 50 mm y 150 mm en períodos normales, lo que representa un aumento de hasta 1000 % respecto al promedio histórico (Badillo-Rivera et al., 2025; SENAMHI, 2017).

A partir de estos datos pluviométricos, se procedió a estimar los hidrogramas para un periodo de retorno de 100 años considerando flujos máximos. Para ello, se aplicaron métodos indirectos propuestos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, aprobado mediante el Decreto Supremo n.º 034-2008-MTC; y el Ministerio de Economía y Finanzas en la Guía Metodológica para Proyectos de Protección y/o Control de Inundaciones en Áreas Agrícolas o Urbanas, aprobada por la Dirección General de Programación Multianual del Sector Público; y otras a nivel internacional. Se presenta la siguiente metodología para la estimación de hidrograma para máximas avenidas:

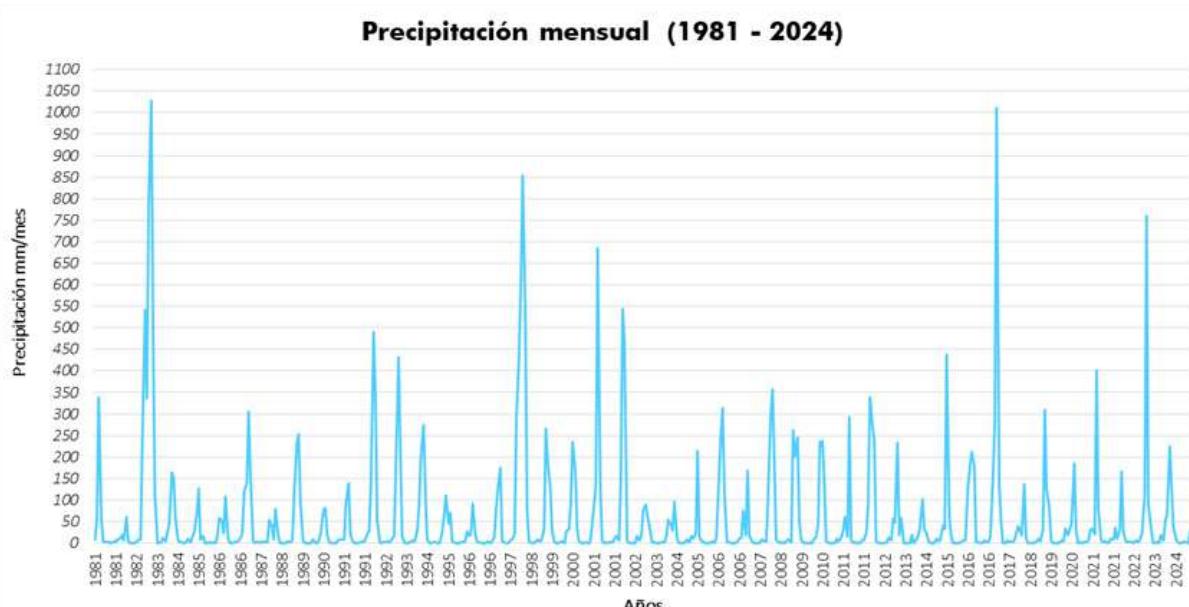


Figura 8. Variabilidad interanual de la precipitación (1981–2024) en la región de Piura. Se destacan los años donde ocurrieron eventos asociados al fenómeno El Niño y al Niño Costero (círculos rojos).

- Como dato básico se utilizaron las precipitaciones máximas en 24 horas correspondientes a los años registrados (serie multianual). Estos valores fueron sometidos a un análisis de frecuencias y validados a través de una prueba de bondad de ajuste, cuyo propósito es verificar que la correlación de la curva generada y los datos reales cumpla con el nivel mínimo de significancia (correlación menor a 0.05) para las distintas distribuciones probabilísticas.
- Determinada la distribución probabilística que más se ajusta al registro de datos, se pronosticó una precipitación (mm) para un determinado periodo de retorno. A partir de la correlación de los valores de precipitación máxima probable y periodo de retorno, se construyen las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia).
- Con esta información se construyen los hietogramas de tormenta, los cuales representan la distribución temporal de la lluvia. Esto se logra haciendo uso del método del Bloque Alterno, al cual se le descuenta el agua infiltrada con el método de Número de Curva del SCS (1972). En el presente estudio, los valores del Número de Curva son extraídos a partir del Mapa Nacional de Curva Número, desarrollado en 2015 por la

Autoridad Nacional del Agua.

- El nuevo hietograma será transformado a un hidrograma a través del modelo del Hidrograma Sintético Unitario del SCS (1972). Este modelo de hidrograma es uno de los más usados, debido a que el hidrograma generado es similar al que puede esperarse en una cuenca real.

La Figura 9 presenta el esquema de la metodología aplicada para el cálculo del hidrograma hidrometeorológico extremo.

La Figura 10 muestra la ubicación de los puntos donde se calcularon los hidrogramas considerados en el presente estudio (Hidrograma 1 y 2). Estos puntos fueron seleccionados estratégicamente dentro del área de la quebrada El Gallo, con el fin de representar las condiciones hidrológicas más críticas del cauce y sus zonas de aporte.

Asimismo, las Tablas 4 y 5 presentan la distribución temporal de los caudales generados para un periodo de retorno de 100 años, correspondientes a los Hidrogramas 1 y 2, respectivamente. Dichos datos fueron empleados para la construcción de los hidrogramas de flujos máximos, los cuales representan la variación del caudal a lo largo del tiempo durante un evento extremo de precipitación.

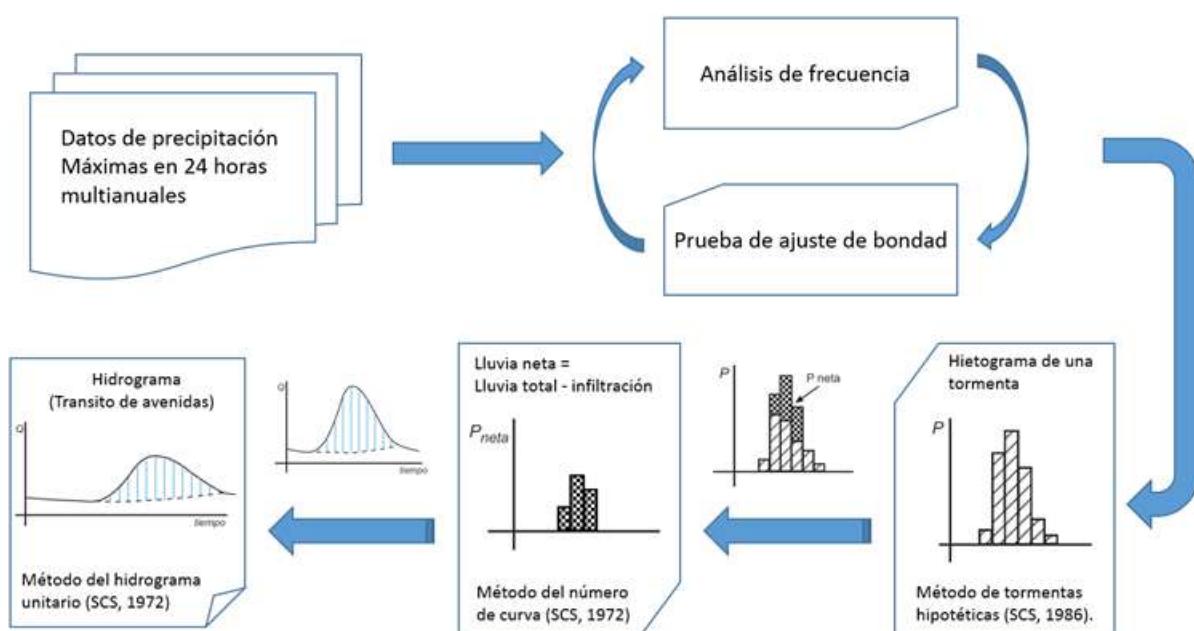


Figura 9. Diagrama de la metodología para el cálculo del hidrograma generado por un evento hidrometeorológico extremo.



Figura 10. Mapa de ubicación de los hidrogramas propuestos.

Tabla 4. Distribución temporal del hidrograma 1 de avenida generado para un periodo de retorno de 100 años.

Tiempo (Segundos)	Q (m^3/s)	13200	6.3906	27600	5.5462	42000	0.3605
0	0	13800	7.7683	28200	4.929	42600	0.322
600	0.0009	14400	9.2061	28800	4.3957	43200	0.2878
1200	0.0035	15000	10.6398	29400	3.9256	43800	0.2573
1800	0.009	15600	12.0065	30000	3.5059	44400	0.23
2400	0.0177	16200	13.2677	30600	3.1328	45000	0.2056
3000	0.0306	16800	14.3903	31200	2.8006	45600	0.1838
3600	0.0487	17400	15.3224	31800	2.5025	46200	0.1641
4200	0.0735	18000	16.0328	32400	2.2332	46800	0.1464
4800	0.1062	18600	16.4945	33000	1.9898	47400	0.1301
5400	0.1475	19200	16.6768	33600	1.7718	48000	0.1149
6000	0.1972	19800	16.5749	34200	1.5789	48600	0.1005
6600	0.2553	20400	16.2046	34800	1.4089	49200	0.0868
7200	0.3232	21000	15.5986	35400	1.2581	49800	0.0737
7800	0.4244	21600	14.8098	36000	1.1231	50400	0.0614
8400	0.5865	22200	13.9015	36600	1.0018	51000	0.0503
9000	0.8358	22800	12.9266	37200	0.8932	51600	0.0405
9600	1.1844	23400	11.9025	37800	0.7964	52200	0.0318
10200	1.6486	24000	10.8605	38400	0.7105	52800	0.0243
10800	2.252	24600	9.8451	39000	0.6341	53400	0.0178
11400	3.0209	25200	8.8692	39600	0.5662	54000	0.0123
12000	3.9774	25800	7.9392	40200	0.5058		
12600	5.1128	26400	7.0654	40800	0.4518		
		27000	6.2612	41400	0.4036		

Tabla 5. Distribución temporal del hidrograma 2 de avenida generado para un periodo de retorno de 100 años.

Tiempo (Segundos)	Q (m^3/s)	5280	0.0161	11040	0.3296	16800	0.0128
0	0	5520	0.0169	11280	0.3273	17040	0.0084
240	0.0003	5760	0.0177	11520	0.3246	17280	0.0054
480	0.0012	6000	0.0187	11760	0.322	17520	0.0035
720	0.003	6240	0.0199	12000	0.3196	17760	0.0022
960	0.005	6480	0.0213	12240	0.3171	18000	0.0013
1200	0.0068	6720	0.0232	12480	0.3149	18240	0.0008
1440	0.0083	6960	0.0258	12720	0.3126	18480	0.0004
1680	0.0092	7200	0.0292	12960	0.3106	18720	0.0001
1920	0.0099	7440	0.0352	13200	0.3088	18960	0
2160	0.0105	7680	0.0499	13440	0.307	19200	0
2400	0.011	7920	0.0875	13680	0.3054	19440	0
2640	0.0113	8160	0.1497	13920	0.3036	19680	0
2880	0.0117	8400	0.2218	14160	0.3019	19920	0
3120	0.0121	8640	0.2777	14400	0.3003	20160	0
3360	0.0124	8880	0.3134	14640	0.2909	20400	0
3600	0.0128	9120	0.3295	14880	0.263	20640	0
3840	0.0131	9360	0.3351	15120	0.2122	20880	0
4080	0.0135	9600	0.3388	15360	0.1555	21120	0
4320	0.014	9840	0.3398	15600	0.1055	21360	0
4560	0.0144	10080	0.3396	15840	0.0682	21600	0
4800	0.0149	10320	0.3374	16080	0.0451		
5040	0.0155	10560	0.3348	16320	0.0299		
		10800	0.3323	16560	0.0196		

Utilizando los datos hidrológicos obtenidos, extraídos y procesados, se generaron los hidrogramas con caudales pico asociados a un periodo de retorno de 100 años, los cuales constituyen insumos fundamentales para la simulación numérica orientada a la evaluación del peligro por inundación.

En la Figura 11 se presenta el Hidrograma 1, con

un caudal máximo de aproximadamente $17 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual evidencia un incremento rápido del flujo seguido de una recesión gradual, característica de una avenida súbita. Por su parte, la Figura 12 muestra el Hidrograma 2, correspondiente a un sector aguas abajo, donde el caudal pico es menor a $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ y la duración del evento es más corta, reflejando la disipación del flujo conforme avanza por el cauce.

Hidrograma 1

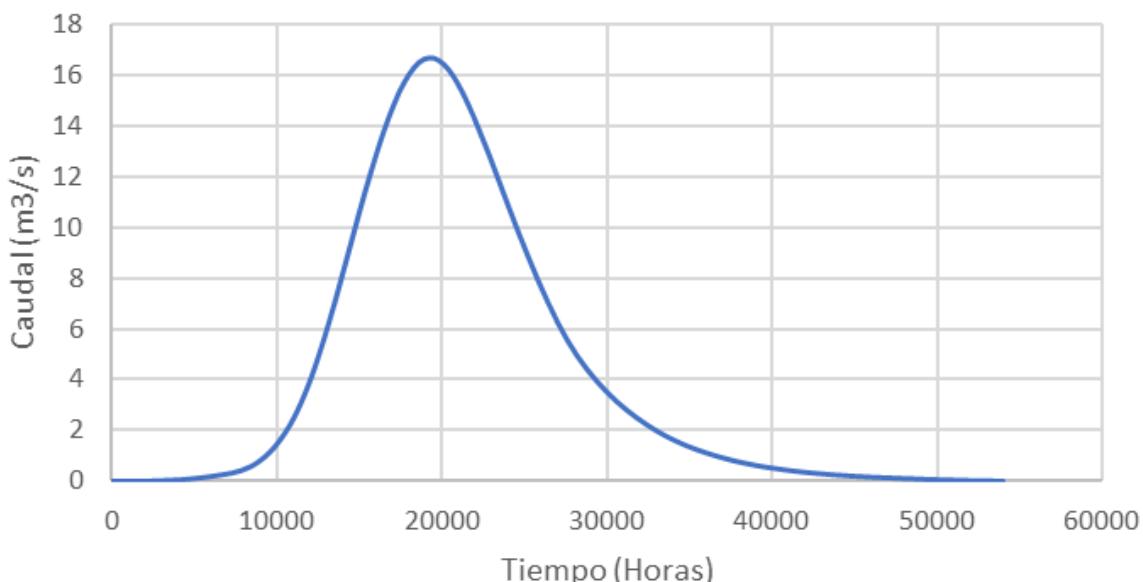


Figura 11. Hidrograma 1 de avenidas para un periodo de retorno de 100 años.

Hidrograma 2

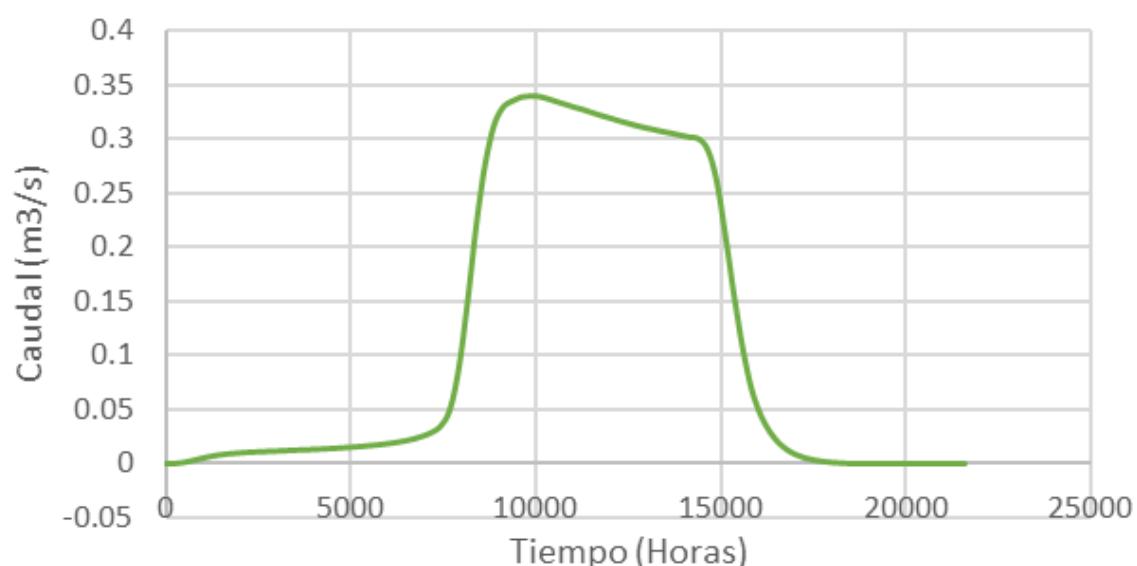


Figura 12. Hidrograma 2 de avenidas para un periodo de retorno de 100 años.

5. Modelamiento numérico

Para la modelización numérica de la inundación fluvial, se empleó el software IBER versión 3.4, desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidad de A Coruña (UDC), en conjunto con el Instituto FLUMEN y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

IBER es un modelo numérico bidimensional para la simulación de flujos turbulentos en lámina libre con régimen variable, ampliamente utilizado en estudios hidromorfológicos de cauces naturales. Además, dispone de módulos complementarios que permiten realizar análisis de inundabilidad, colapso de represas, flujos de marea en estuarios y transporte de sedimentos (Bladé et al., 2014).

En el presente estudio, el modelo se aplicó para simular un escenario probable de inundación en

la quebrada El Gallo, considerando como factor desencadenante las precipitaciones intensas. Para ello, se integraron los hidrogramas de caudales máximos estimados para un periodo de retorno de 100 años, junto con el modelo digital del terreno (MDT) obtenido a partir del levantamiento topográfico.

La Figura 13 muestra de forma esquemática los datos de entrada empleados en el modelo IBER:

- El hidrograma del evento (condición de entrada de caudal).
- La topografía (MDT).
- El factor de fricción (coeficiente de Manning).
- Estructuras hidráulicas identificadas (alcantarillas, puentes, etc.)

A partir de estos insumos, el modelo realiza la simulación hidráulica y genera como resultado los mapas de profundidad, velocidad y extensión de la inundación, utilizados posteriormente para la evaluación del peligro por inundación en la zona de estudio.

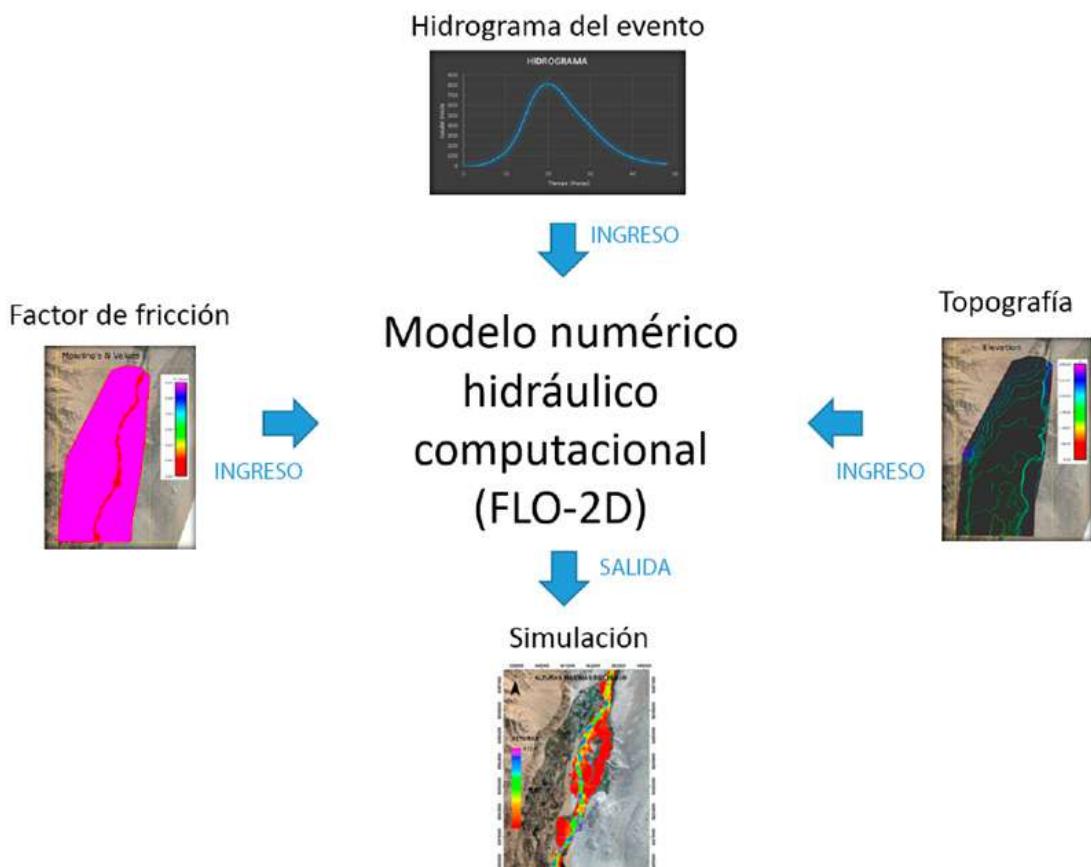


Figura 13. Esquema de ingreso de datos del modelo IBER.

5.1 Configuración del escenario a simular

El escenario de simulación corresponde a una inundación en la quebrada El Gallo, desencadenada por un evento hidrometeorológico extremo, representado mediante el hidrograma de caudales máximos asociado a un periodo de retorno de 100 años (condición de entrada aguas arriba).

Para definir la geometría del cauce de la quebrada, se empleó el modelo digital del terreno (MDT), obtenido a partir del levantamiento fotogramétrico descrito en la Sección 3. Antes de su implementación en el modelo IBER, el MDT debe ser analizado hidráulicamente, es decir, se debe realizar la corrección de errores topográficos menores, como sumideros o discontinuidades superficiales, así como la verificación de la continuidad hidráulica a lo largo del cauce (Figura 14). Finalmente, el MDT será discretizado en una malla computacional para el cálculo numérico.

La malla computacional se construyó como un

grillado regular con tamaño de celda de 1 m, definido en función del detalle topográfico y la necesidad de resolver gradientes de pendiente (Figura 15). En cada nodo de la malla, el modelo resuelve los parámetros hidrodinámicos (tirante, velocidad y caudal unitario), lo que permite representar la distribución espacial y temporal del flujo sobre el terreno.

Otra condición importante para la configuración del escenario hidráulico es el coeficiente de fricción o número de Manning (n), el cual se definió de forma espacialmente variable en función del uso y cobertura del terreno. Esta variabilidad se incorporó en el modelo mediante un mapa de rugosidades que permite asignar valores diferenciados de n a cada tipo de superficie, lecho de la quebrada, áreas colindantes y áreas urbanas.

En síntesis, el MDT y el grillado a 1 m constituyen la base geométrica del modelo, mientras que el hidrograma para un periodo de retorno de 100 años define el desencadenante hidrológico. Esto permite simular con detalle la propagación de la inundación, los tirantes máximos y las velocidades pico en la quebrada El Gallo y su entorno urbano.

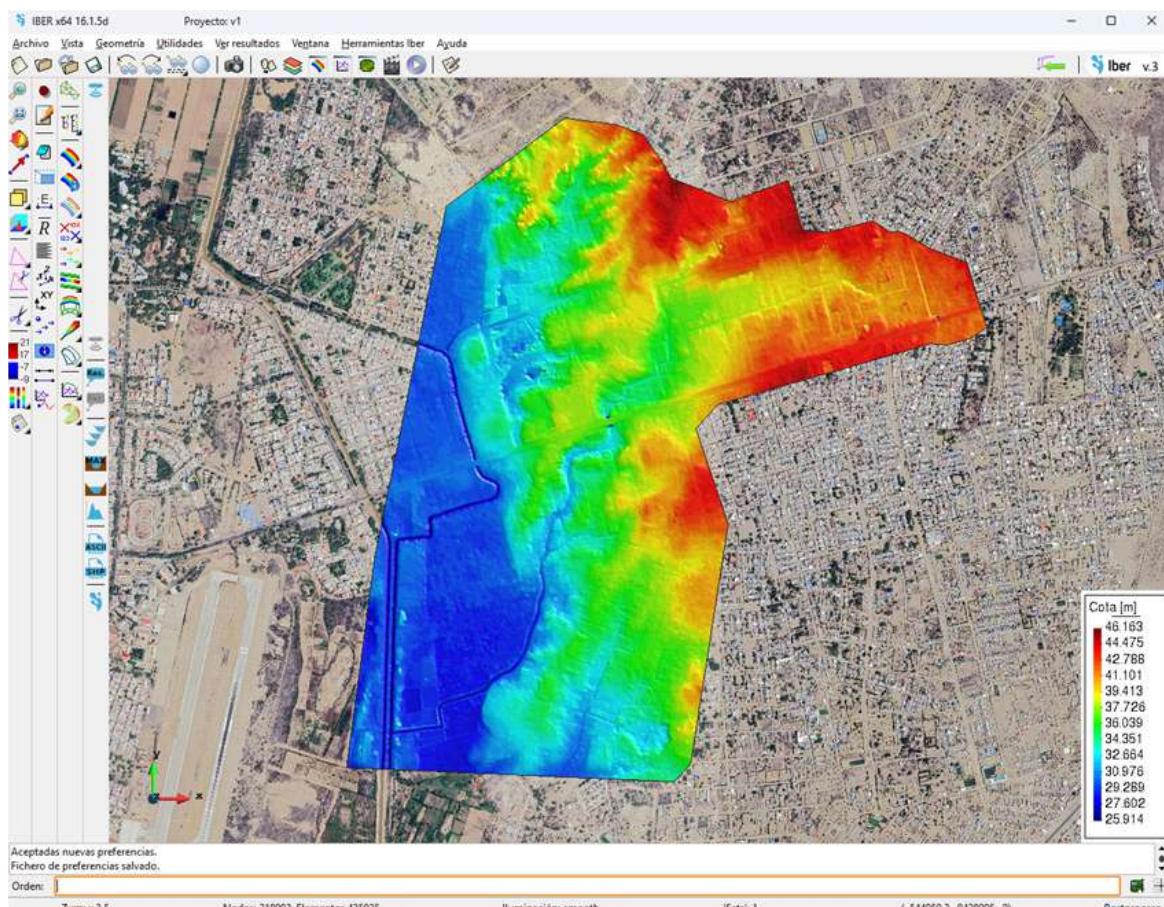


Figura 14. Modelo digital de terreno.

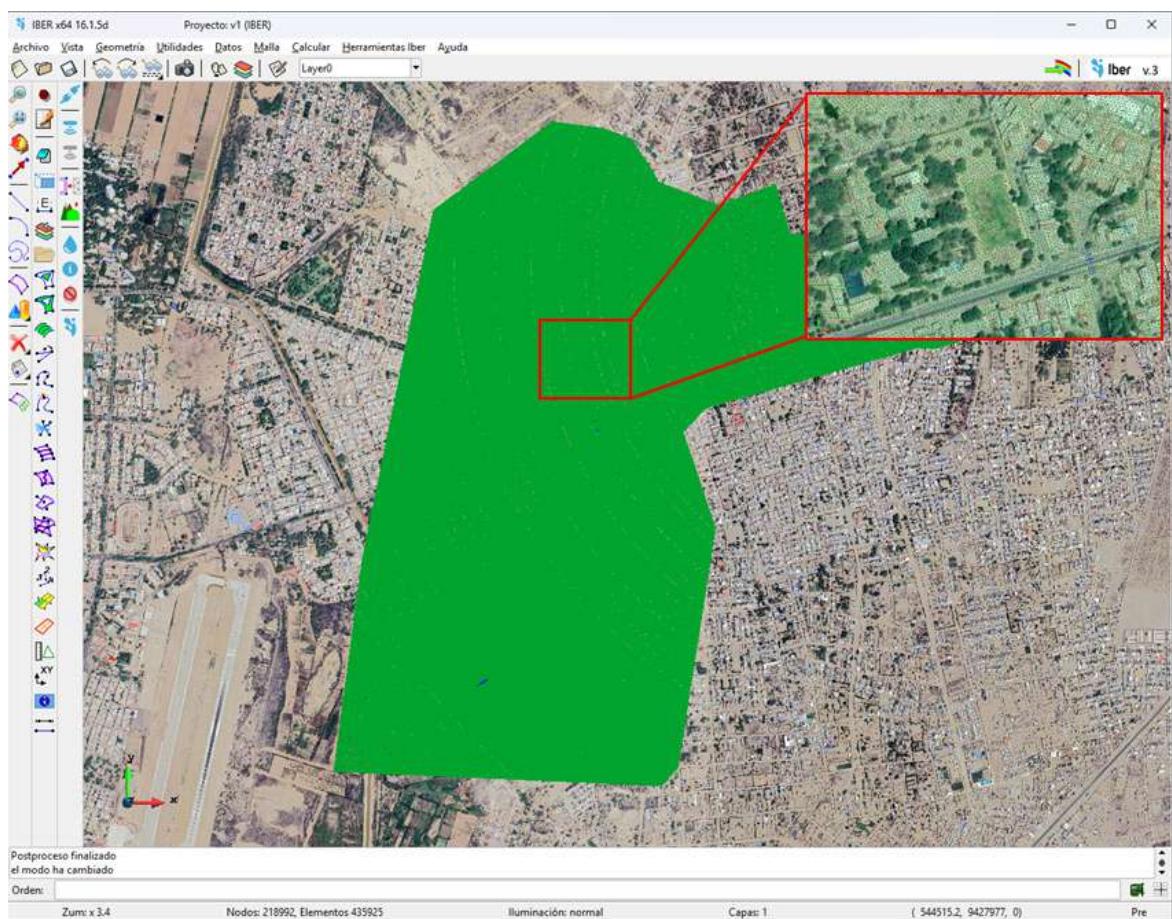


Figura 15. Vista general y ampliada del grillado.

6. Resultados

6.1 Alturas y velocidades de inundación

Los resultados del modelamiento hidráulico muestran las áreas afectadas por el desborde de la quebrada El Gallo, considerando un evento hidrometeorológico extremo con un periodo de retorno de 100 años. La modelación hidráulica empleada permitirá la delimitación de la faja

marginal en función de la profundidad del agua, la velocidad del flujo y la extensión de la lámina de agua.

La Figura 16 muestra las probables alturas del flujo de agua en el área de estudio. Se observa que los asentamientos humanos Valle La Esperanza, Felipe Cossío, Nuevo Horizonte, Tácala y Almirante Miguel Grau serían afectados por alturas de inundación del orden de 1.5 m, 0.8 m, 0.3 m, 1.5 m y 1.3 m, respectivamente. Asimismo, las asociaciones Villa Integración y El Mirador serían afectadas por alturas de inundación del orden de 1.5 m y 0.8 m.

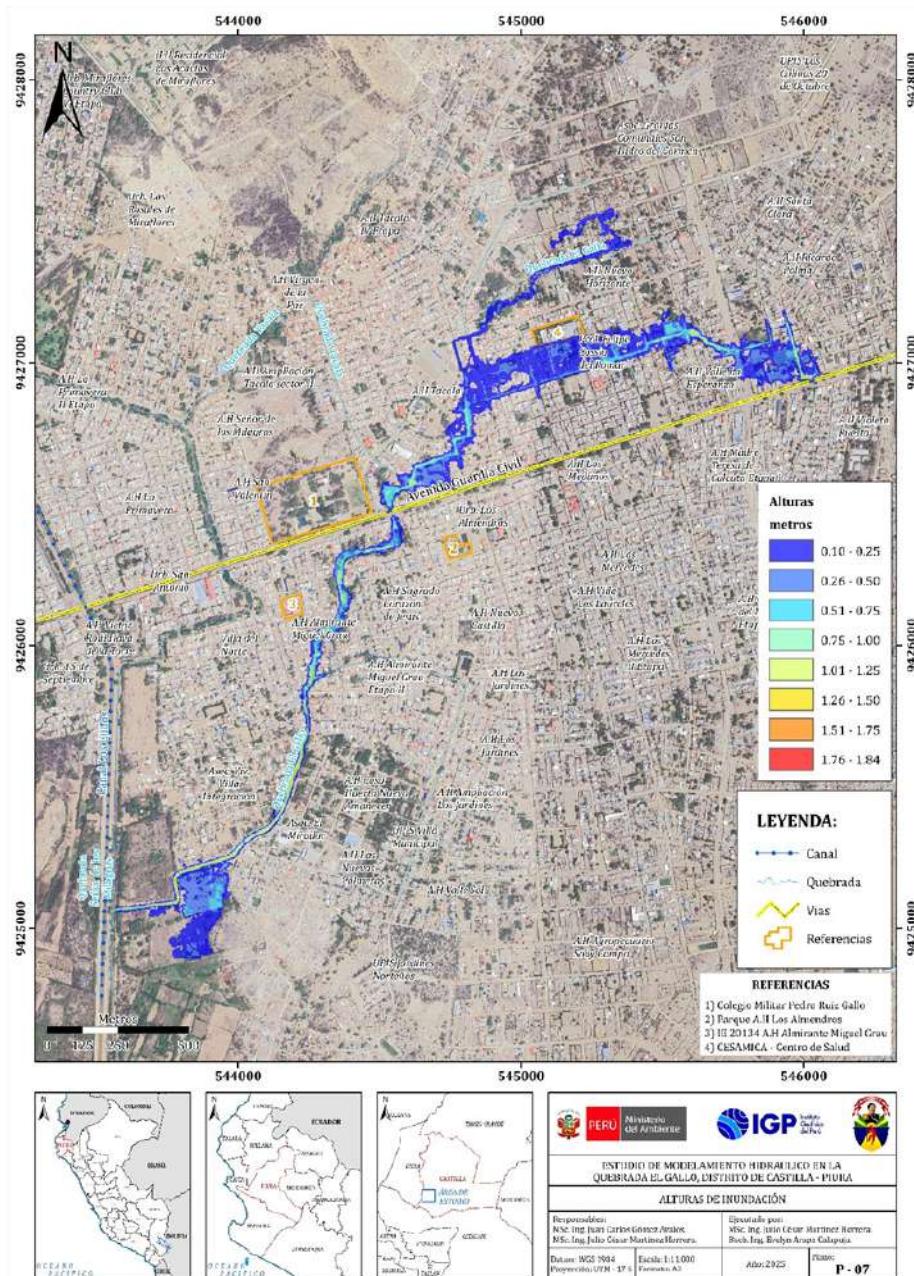


Figura 16. Mapa de altura de inundación para un periodo de retorno de 100 años.



La Figura 17 muestra las probables velocidades del flujo de agua en el área de estudio. Se observa que los asentamientos humanos Valle La Esperanza, Felipe Cossío, Nuevo Horizonte, Tácala y Almirante Miguel Grau serían afectados por velocidades de inundación del orden de 2 m/s a 3 m/s. Asimismo, las asociaciones Villa Integración y El Mirador serían afectadas por velocidades de inundación del orden de 1.5 m/s a 2 m/s.

Los resultados muestran los principales elementos expuestos: viviendas rurales, parcelas agrícolas y tramos de la carretera local. Con esta información se busca orientar a las autoridades y a la población en la gestión del riesgo de desastres, para lo cual se plantean medidas como el reforzamiento de defensas ribereñas, limpieza y descolmatación del cauce de la quebrada y la implementación de sistemas de alerta temprana.

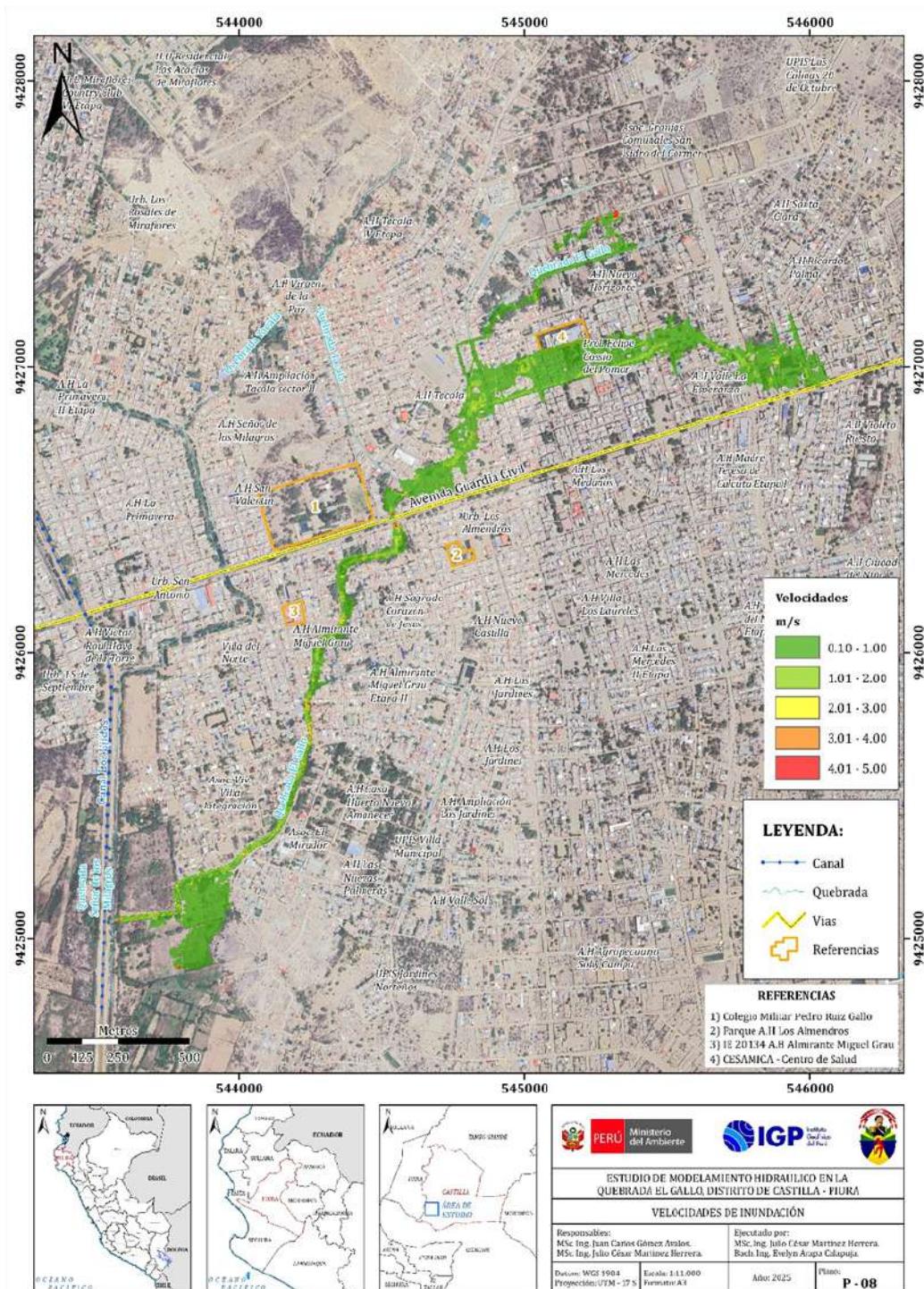


Figura 17. Mapa de velocidad de inundación para un periodo de retorno de 100 años.

6.2 Evaluación del peligro por inundación

Para el presente análisis se considera como peligro al flujo de agua que se desencadena por lluvias extremas (factor desencadenante), el cual genera caudales extremos e inundaciones fluviales. El peligro será cuantificado con base en la altura alcanzada sobre la superficie y a la velocidad del flujo de agua, ambos parámetros dependen de la topografía o morfología del terreno, incluyendo el cauce de la quebrada El Gallo.

Para el escenario descrito, los niveles de peligro por inundación fluvial quedan establecidos en cuatro (4) niveles (Tabla 6):

La descripción de los daños y efectos producidos por los flujos de agua cuantificados en cada uno de los escenarios propuestos en este estudio y los niveles de peligro considerado son los siguientes:

- **Peligro Muy Alto:** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas serían afectadas físicamente fuera y dentro de sus viviendas, incluso algunas podrían perder la vida al ser movilizadas por el flujo de agua. Las viviendas presentarían daños graves, tales como deformaciones de sus paredes, rotura

de vidrios en las ventanas o incluso el colapso total si no reúnen las condiciones estructurales apropiadas para soportar el flujo del agua.

- **Peligro Alto:** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas serían afectadas físicamente fuera de sus viviendas con la posibilidad de perder la vida al ser movilizadas por el flujo de agua. Las viviendas presentarían daños graves, tales como la deformación de algunas paredes si no reúnen las condiciones físicas apropiadas para soportar el flujo del agua.
- **Peligro Medio:** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas podrían ser afectadas físicamente fuera de sus viviendas al ser movilizados por el flujo de agua. Las pérdidas materiales estarían asociadas a objetos que puedan caer dentro y fuera de las viviendas.
- **Peligro Bajo:** En las áreas inundadas por el flujo de agua, las personas no serían afectadas y las pérdidas materiales serían menores.

La Figura 18 muestra el mapa de peligro por inundación fluvial para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 6. Criterios de evaluación de peligro por inundación de flujos de agua.

Nivel	Descripción	Rango
Muy Alto	Flujos de agua con alturas mayores a 1.5 metros que se desplazan a velocidades mayores a 5.0 m/s.	$P \geq 2.25$
Alto	Flujos de agua con alturas de entre 0.5 metros y 1.5 metros que se desplazan a velocidades de entre 2.0 m/s y 5.0 m/s.	$0.45 \geq P < 2.25$
Medio	Flujos de agua con alturas de entre 0.2 metros a 0.5 metros que se desplazan a velocidades de entre 0.5 m/s a 2 m/s.	$0.04 \geq P < 0.45$
Bajo	Flujos de agua con alturas menores a 0.2 metros que se desplazan a velocidades menores a 0.5 m/s.	$P < 0.04$



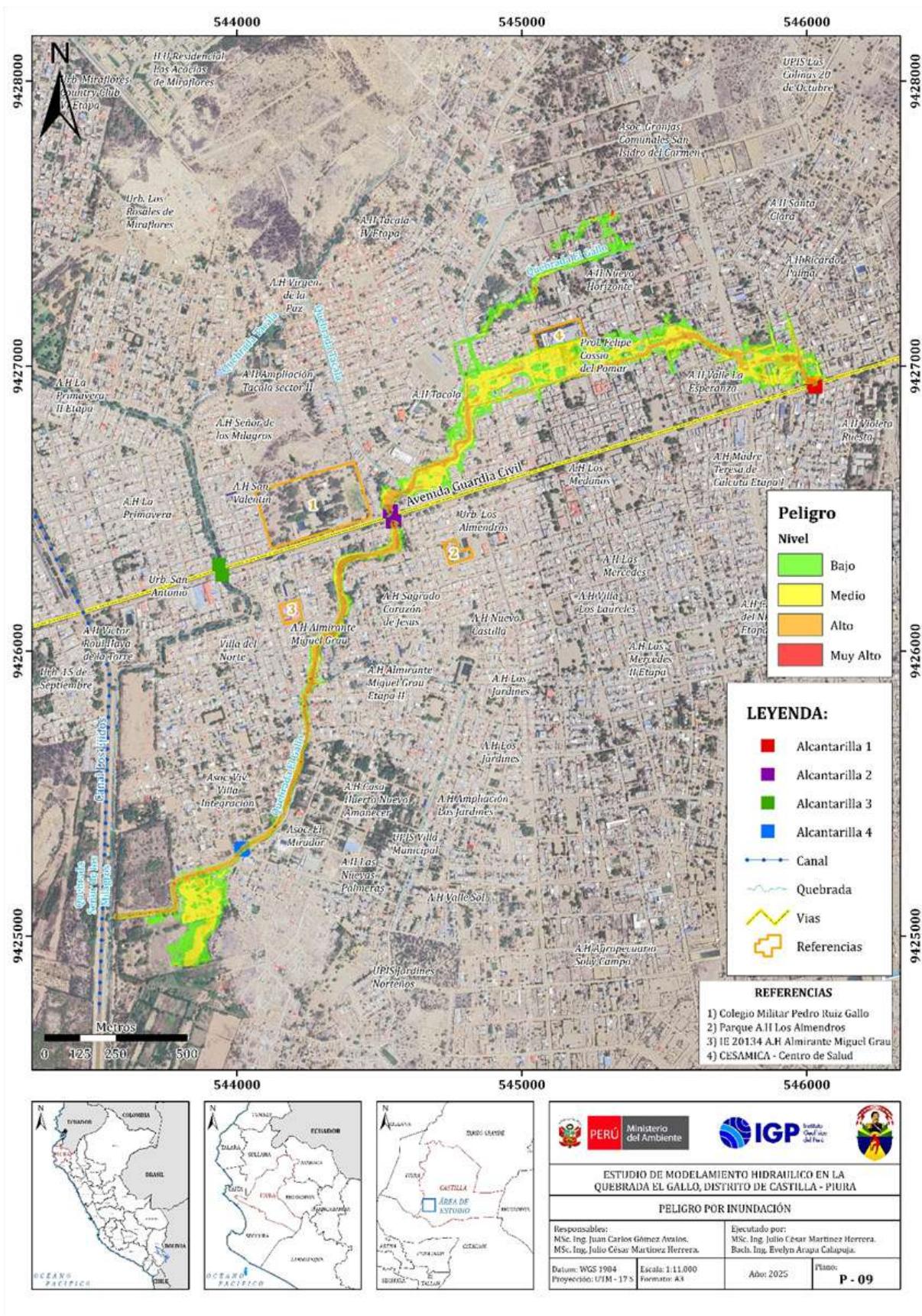


Figura 18. Peligro por inundación fluvial para un periodo de retorno de 100 años.

Conclusiones

- Se realizó el levantamiento topográfico en la quebrada El Gallo, ubicada en el distrito de Castilla, región Piura. El levantamiento se realizó mediante fotogrametría aérea con dron y mediciones GNSS. La información adquirida en campo ha permitido generar un modelo digital del terreno y un ortomosaico de alta resolución espacial (10 cm/pixel y 5 cm/pixel, respectivamente) que pueden ser representados en un mapa de escala 1:300. Asimismo, a partir del modelo digital del terreno fue posible generar un mapa de curvas de nivel a intervalo de 0.5 metros.
- Estos productos tienen una alta resolución espacial, lo cual permite identificar una mayor cantidad de objetos en el área de estudio (montículos de tierra en los márgenes del río, arbustos, entre otros), con lo cual es posible realizar un análisis detallado del terreno.
- Los caudales máximos e hidrogramas de avenidas fueron calculados usando como dato básico la precipitación máxima en 24 horas. Las pérdidas fueron estimadas a partir del uso del método de Curva Número del SCS; los hietogramas, a partir del método del bloque alterno y, finalmente, la conversión de lluvia-escorrentía mediante el uso del Hidrograma Unitario del SCS, método implementado en el software de modelamiento hidrológico HEC-HMS 4.10.
- Los resultados del modelamiento hidráulico, para eventos con periodo de retorno de 100 años, muestran desbordes significativos en la parte baja de la quebrada El Gallo que afectarían zonas urbanas consolidadas del distrito de Castilla.
- Las alturas del flujo de agua en los asentamientos humanos dentro del área de estudio son las siguientes: Valle La Esperanza (1.5 metros), Felipe Cossío (0.75 metros), Nuevo Horizonte (0.25 metros), Tácala (1.5 metros) y Almirante Miguel Grau (1.25 metros). Asimismo, las alturas de inundación en las asociaciones de viviendas son las siguientes: Villa Integración (1.5 metros) y El Mirador (0.75 metros).
- Las velocidades del flujo de agua en el área de estudio son predominantemente del orden de 2 m/s a 3 m/s en los asentamientos humanos Valle La Esperanza, Felipe Cossío, Nuevo Horizonte, Tácala y Almirante Miguel Grau. Asimismo, las asociaciones Villa Integración y El Mirador serían afectadas por velocidades de inundación del orden de 1.5–2 m/s.
- Se identificó que la falta de obras de protección y la ocupación urbana de las zonas cercanas al cauce de la quebrada aumentan considerablemente el nivel de exposición de la población. Esto resalta la necesidad de una gestión integral del territorio con el fin de evitar la expansión urbana en áreas de alto peligro.
- Finalmente, se recomienda que los resultados del modelamiento sean utilizados como insumo para la formulación de medidas estructurales (encauzamientos, diques de protección, reservorios de laminación, etc.) y no estructurales (ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana, educación comunitaria, etc.), con el fin de reducir la vulnerabilidad frente a futuros eventos extremos.



Referencias

- Badillo-Rivera, E., et al. (2025). Flood susceptibility mapping in El Niño phenomenon scenarios in Piura, Peru. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1672107>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Hopfield, H. S. (1971). Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data. *Radio Science*, 6(3), 357–367. <https://doi.org/10.1029/RS006i003p00357>
- Ramírez, I. J., & Briones, F. (2017). Understanding the El Niño Costero of 2017: The definition problem and challenges of climate forecasting and disaster responses. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(4), 489–492. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0151-8>
- SENAMHI. (2017). *El Niño Costero 2017: Condiciones termo-pluviométricas a nivel nacional*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://sigrid.cenepred.gob.pe>
- Trimble Survey Division. (2012, noviembre). *Trimble HD-GNSS processing*. <https://community.trimble.com/docs/DOC-1923>

Información clave para tí

Puedes consultar, descargar y compartir desde el Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) los diferentes **reportes**, **boletines** e **informes** que genera el IGP.

RECUERDA: La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se fundamenta en la investigación científica. El IGP es una entidad líder en la generación de conocimiento científico en el país.



REGEN



