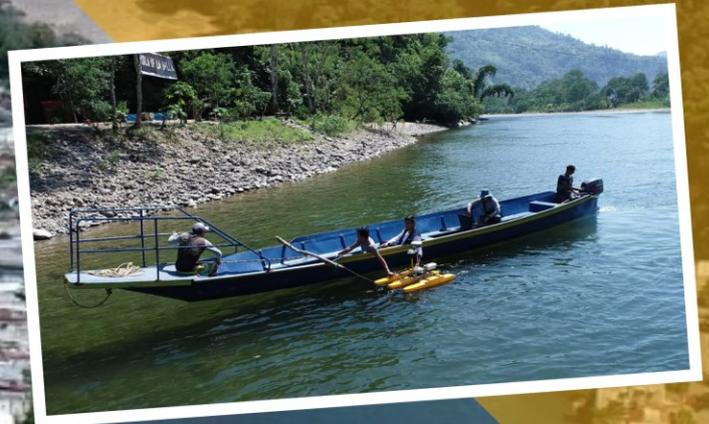




Modelamiento hidráulico de crecidas repentinas para el soporte de Sistemas de Alerta Temprana en el río Huallaga - Tramo Tingo María

Carlos Enrique Millán Arancibia
Alexis Renato Collado Tello
Waldo Sven Lavado Casimiro



Dirección de Hidrología
Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
Diciembre 2024



PERÚ

Ministerio del Ambiente



BICENTENARIO DEL PERÚ
2021 - 2024



— ENANDES —

Modelamiento hidráulico de crecidas repentinas para el soporte de Sistemas de Alerta Temprana en el río Huallaga - Tramo Tingo María



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



— ENANDES —

Modelamiento hidráulico de crecidas repentinas para el soporte de Sistemas de Alerta Temprana en el río Huallaga – Tramo Tingo María

Presidente Ejecutivo

Gabriela Teófila Rosas Benancio

Director de Hidrología

Oscar Gustavo Felipe Obando

Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

Waldo Sven Lavado Casimiro

Autores:

Carlos Enrique Millán Arancibia

Alexis Renato Collado Tello

Waldo Sven Lavado Casimiro

Diseño y Diagramación por:

Alexis Renato Collado Tello

Primera Edición: diciembre de 2024

Depósito Legal N° 2024-12934

Estudio disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3772>

© Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide 785. Jesús María, Lima – Perú. Teléfono (01) 614-1414

www.gob.pe/senamhi

Todos los derechos reservados

Prohibida la reproducción de este estudio por cualquier medio, total o parcialmente sin permiso expreso.

Referencia sugerida:

Millán, C.E., Collado, A.R. y Lavado-Casimiro, W.S. (2024). *Modelamiento hidráulico de crecidas repentinas para el soporte de Sistemas de Alerta Temprana en el río Huallaga – Tramo Tingo María*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/3772>

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 8 |
| 2. OBJETIVOS | 9 |
| 2.1 Objetivo general..... | 9 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 9 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 9 |
| 3.1 Área de estudio | 9 |
| 3.2 Modelo hidrodinámico..... | 10 |
| 3.3 Datos de ingreso..... | 10 |
| 3.3.1 Datos topobatimétricos..... | 11 |
| 3.3.2 Hidrometría..... | 14 |
| 3.3.3 Coeficiente de rugosidad de Manning..... | 19 |
| 3.4 Metodología..... | 21 |
| 3.4.1 Enfoque de modelamiento | 21 |
| 3.4.2 Dominio del modelo y mallado | 22 |
| 3.4.3 Condiciones de borde..... | 22 |
| 3.4.4 Índice de peligrosidad..... | 23 |
| 4. RESULTADOS | 23 |
| 5. CONCLUSIONES | 38 |
| 6. DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN | 38 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |
| 8. ANEXOS | 40 |
| 8.1 Profundidad Máxima de Inundación | 40 |
| 8.2 Velocidad Máxima de Inundación | 46 |
| 8.3 Peligrosidad por Inundación | 52 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 1. | Vista del área de estudio: a) Río Monzón, b) Río Huallaga tramo aguas arriba de la desembocadura; c) Río Huallaga aguas abajo de la desembocadura y ciudad de Tingo María..... | 9 |
| Figura 2. | Ubicación política del ámbito de estudio. | 10 |
| Figura 3. | Comparación de DSM (izquierda) y el TBDEM (derecha)..... | 11 |
| Figura 4. | Metodología planteada para la generación a detalle de un Modelo Digital de Elevación Topobatimétrica (TBDEM)..... | 12 |
| Figura 5. | Modelo digital de elevación topobatimétrica: a) Río Monzón, b) Río Huallaga tramo aguas arriba de la desembocadura; c) Río Huallaga aguas abajo de la desembocadura y ciudad de Tingo María (Parte 01); d) Río Huallaga aguas abajo de la desembocadura y ciudad de Tingo María (Parte 02). | 13 |
| Figura 6. | Ubicación de estaciones hidrométricas. | 14 |
| Figura 7. | Ubicación de secciones transversales..... | 15 |
| Figura 8. | Hidrograma de caudal del río Huallaga (tomado de PHISIS el 02-Nov-2024)..... | 16 |
| Figura 9. | Distribución de probabilidad de no excedencia y ajuste de las siete distribuciones evaluadas para las estaciones Puente Bella (izq.) y Puente Pérez (der.)..... | 17 |
| Figura 10. | Ajuste de curvas a método de momentos y de máxima verosimilitud basado en cadenas de Markov. | 18 |
| Figura 11. | Cobertura de suelo para el ámbito de estudio (DW) (tomado para Abr-Jun de 2024). | 19 |
| Figura 12. | Distribución espacial del coeficiente de rugosidad de Manning..... | 20 |
| Figura 13. | Profundidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta amarillo de PHISIS. | 25 |
| Figura 14. | Profundidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta naranja de PHISIS. | 26 |
| Figura 15. | Profundidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta rojo de PHISIS. | 27 |
| Figura 16. | Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 100 años. .. | 28 |
| Figura 17. | Velocidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta amarillo de PHISIS. | 29 |
| Figura 18. | Velocidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta naranjado de PHISIS. | 30 |
| Figura 19. | Velocidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta rojo de PHISIS. | 31 |
| Figura 20. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 100 años. | 32 |
| Figura 21. | Peligrosidad por inundación asociado al nivel de alerta amarillo de PHISIS..... | 33 |
| Figura 22. | Peligrosidad por inundación asociado al nivel de alerta naranja de PHISIS..... | 34 |
| Figura 23. | Peligrosidad por inundación asociado al nivel de alerta roja de PHISIS. | 35 |
| Figura 24. | Peligrosidad por inundación asociado a un período de retorno de 100 años..... | 36 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 1. | Características de las estaciones hidrométricas..... | 14 |
| Tabla 2. | Caudal (m^3/s) asociado a cada nivel de alerta del sistema PHISIS. | 16 |
| Tabla 3. | Selección de distribución de mejor ajuste estadístico..... | 17 |
| Tabla 4. | Caudal máximo diario asociado a distintos períodos de retorno..... | 18 |
| Tabla 5. | Caudal máximo asociado a diferentes períodos de retorno. | 19 |
| Tabla 6. | Coefficiente de rugosidad de Manning. | 19 |
| Tabla 7. | Clasificación de peligro por inundación para las personas. | 23 |

LISTA DE ANEXOS

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura A-1. | Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 2 años..... | 40 |
| Figura A-2. | Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 5 años..... | 41 |
| Figura A-3. | Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 10 años. | 42 |
| Figura A-4. | Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 25 años. | 43 |
| Figura A-5. | Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 50 años. | 44 |
| Figura A-6. | Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 200 años. .. | 45 |
| Figura A-9. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 2 años. | 46 |
| Figura A-10. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 5 años. | 47 |
| Figura A-11. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 10 años. | 48 |
| Figura A-12. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 25 años. | 49 |
| Figura A-13. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 50 años. | 50 |
| Figura A-14. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 200 años. | 51 |
| Figura A-17. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 2 años. | 52 |
| Figura A-18. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 5 años. | 53 |
| Figura A-19. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 10 años. | 54 |
| Figura A-20. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 25 años. | 55 |
| Figura A-21. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 50 años. | 56 |
| Figura A-22. | Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 200 años. | 57 |

PRESENTACIÓN

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), organismo público adscrito al Ministerio del Ambiente desde 1969, tiene como misión brindar servicios científicos y técnicos en las áreas de meteorología, hidrología, agrometeorología y asuntos ambientales a nivel nacional. Su labor técnico-científica contribuye al desarrollo socioeconómico del país, proporcionando información confiable sobre el comportamiento hidrometeorológico. Esta información es fundamental para que las autoridades de los tres niveles de gobierno, así como la ciudadanía en general, puedan adoptar medidas de prevención oportunas frente a los riesgos asociados.

En el marco de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT) del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), el SENAMHI lidera el Subcomité de Peligros Hidrometeorológicos en coordinación con el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). Esta labor se enfoca en desarrollar herramientas y propuestas que fortalezcan los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) ante los peligros bajo su competencia, fundamentando sus acciones en el conocimiento científico de las amenazas para mitigar sus impactos de manera efectiva.

Desde 2020, el SENAMHI, en colaboración con gobiernos locales y universidades, ha realizado estudios sobre peligros de remoción de masas e inundaciones en quebradas y ríos de las cuencas de Lima. Además, como parte de su línea de investigación, el SENAMHI trabaja en la observación, desarrollo tecnológico, modelamiento y análisis de eventos extremos (meteorológicos, climáticos e hidrológicos) para una gestión integral de riesgos de desastres.

En este marco, la Dirección de Hidrología del SENAMHI presenta el estudio titulado "Modelamiento hidráulico de crecidas repentinas para el soporte de Sistemas de Alerta Temprana en el río Huallaga – Tramo Tingo María", con el objetivo de ofrecer conocimiento técnico sobre el peligro de inundaciones en el río Huallaga, específicamente en el tramo correspondiente a la ciudad de Tingo María, en el departamento de Huánuco. El estudio evalúa escenarios de inundación para diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años) producto de la confluencia de los ríos Huallaga y Monzón aguas arriba de la ciudad de Tingo María, brindando así, una base técnico-científica para fortalecer el monitoreo hidrológico en la estación Tingo María y mejorar la operatividad del Sistema de Alerta Temprana por inundaciones en la región.

Este estudio, forma parte de los resultados del proyecto ENANDES (Mejorando la capacidad adaptativa de las comunidades andinas a través de Servicios Climáticos) implementado en Perú que busca mejorar los servicios climáticos en el Perú con énfasis en la gestión de riesgos de desastres y la relación agua-energía para el tema hidrológico.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son uno de los tipos de catástrofes naturales de mayor frecuencia de ocurrencia tras fuertes lluvias (Simonov, 2017). Se trata de un fenómeno de magnitud global que puede causar devastación generalizada, daños económicos y pérdidas humanas (Banco Mundial, 2011). Desde 1980, se han registrado 4 588 eventos de inundaciones ocurridos en 172 países, con más de 250 000 pérdidas de vidas humanas y daños superiores al billón (\$ 1 trillion) de dólares americanos, correspondiente al 40% de pérdidas a causa de desastres naturales (Marsh McLennan, 2021).

Según el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2023), en el Perú, las inundaciones son el peligro natural que mayor cantidad de damnificados por emergencias ha registrado en el período 2003 – 2022. Mientras que el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2024) alertó el departamento de Huánuco como una de las regiones con mayor exposición a eventos de inundaciones; se estimaron 3 216 y 105 755 pobladores en riesgo muy alto y alto respectivamente, así como 1 531 y 31 948 viviendas en riesgo muy alto y alto respectivamente para el período abril – junio 2024.

Bajo ese contexto, se hace énfasis que aquellos países en desarrollo que carecen de un sistema para la identificación de zonas inundables o que no han implementado medidas de mitigación y/o sistemas de alerta temprana son los más vulnerables a sufrir impactos económicos, ambientales, sociales y de otra índole, ante la ocurrencia de un evento de inundación (IPCC, 2004). Por dicho motivo, con el objetivo de mejorar el estándar de calidad de vida, se hace necesaria la implementación de políticas y medidas para el control de inundaciones (Douben et al., 2006).

El presente estudio tiene por objetivo identificar el peligro por inundación en la ciudad de Tingo María ante el riesgo de desborde del río Huallaga. Para ello, se desarrolla un modelo hidráulico que permita simular y representar la dinámica del flujo en condiciones extremas o de avenidas. Este enfoque busca generar información cualitativa, cuantitativa y espacialmente explícita que permita apoyar la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT), lo cual resulta esencial para la prevención y mitigación de desastres.

En el marco de la gestión de riesgo de desastres, SENAMHI enfoca sus esfuerzos en desarrollar y proporcionar herramientas técnicas y datos específicos que contribuyan a la planificación y toma de decisiones. No solo se busca facilitar la adopción de medidas preventivas y de respuesta ante fenómenos naturales, sino también promover el desarrollo de políticas públicas que prioricen la seguridad de las poblaciones más vulnerables.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Realizar el modelamiento hidráulico bidimensional del río Huallaga, en el tramo Tingo María, como parte de la línea base para la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante inundaciones.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar caudales máximos y análisis de eventos de inundación.
- Realizar el modelamiento hidráulico a lo largo de ~ 9 kilómetros del río Huallaga.
- Validar la correspondencia de los niveles de alerta de PHISIS como umbrales de alerta de inundación.
- Caracterizar la peligrosidad por inundación en el ámbito de la ciudad de Tingo María (Leoncio Prado, Huánuco).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El río Huallaga, perteneciente a la región hidrográfica del Amazonas, nace en las alturas de Cerro de Pasco de las confluencias de los ríos Ticlayan, Pariamarca y Pucurhuay, y es uno de los más importantes del Perú. El tramo de interés de este cauce recorre desde el sur hacia el norte y noreste, desde el departamento de Pasco hasta el de Huánuco, con mayor amplitud en este último.

El área de estudio ocupa una extensión aproximada de 10.8 km² en la región centro-norte del territorio nacional, en las inmediaciones de la desembocadura del del río Monzón, que fluye principalmente de oeste a este, al río Huallaga al suroeste de la ciudad de Tingo María. La vista en perspectiva se observa en la Figura 1.



Figura 1. Vista del área de estudio: a) Río Monzón, b) Río Huallaga tramo aguas arriba de la desembocadura; c) Río Huallaga aguas abajo de la desembocadura y ciudad de Tingo María.

Geográficamente, el área de interés se encuentra localizada entre las latitudes -9.274° y -9.339° , y las longitudes -75.986° y -76.025° , mientras que políticamente, se ubica sobre los distritos de Castillo Grande, Rupa-Rupa y Mariano Damaso Beraun, en la provincia de Leoncio Prado, en el departamento de Huánuco.

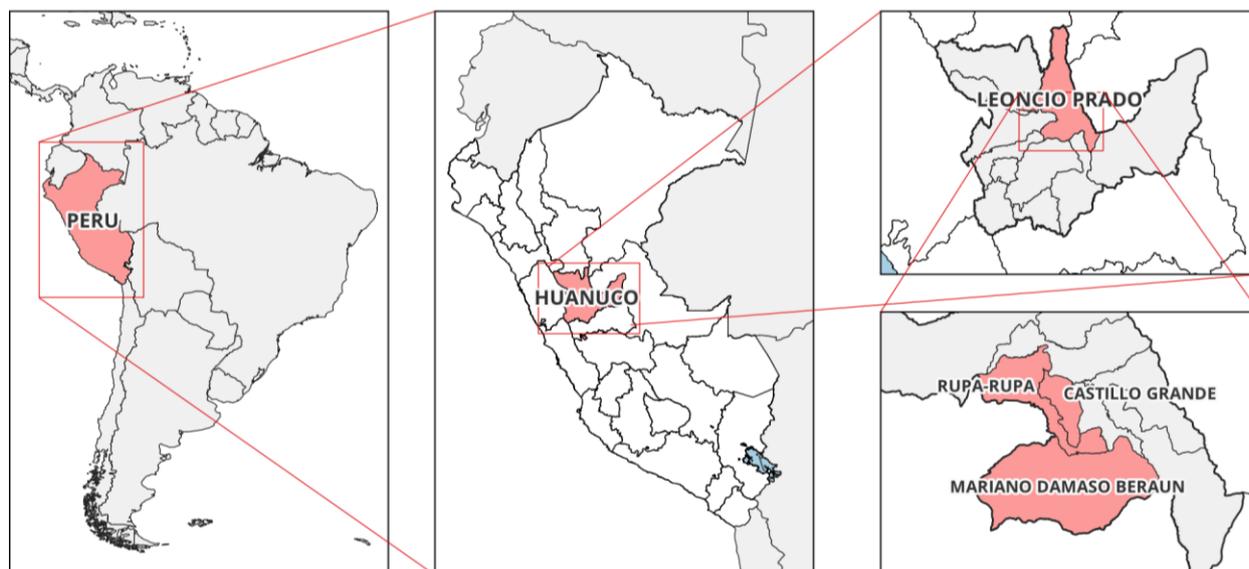


Figura 2. Ubicación política del ámbito de estudio.

3.2 Modelo hidrodinámico

El modelo Hec-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) es un software de modelamiento hidráulico desarrollado por el US Army Corps of Engineers utilizado ampliamente para la simulación de cauces naturales y estructuras hidráulicas, siendo su propósito principal la simulación de niveles de agua y velocidades de flujo en distintos escenarios.

La versatilidad del modelo Hec-RAS radica en su capacidad de implementar modelos en una dimensión (1D) o en dos dimensiones (2D). La modelación 1D se centra en la simulación de flujo a lo largo de un perfil longitudinal, particularmente útil para la adecuada representación de cauces rectos y simples, sin cambios de dirección de flujo significativas (HEC, 2016).

Por otro lado, el modelado 2D es apropiado para la evaluación de flujos complejos, como con cambios de dirección o amplias planicies de inundación. Este enfoque resulta útil para la evaluación sobre fenómenos en áreas extensas y condiciones de interacción entre el flujo superficial y estructuras o el terreno, que producen cambios significativos en la dirección y distribución del flujo. Además, Hec-RAS permite incluir la interacción de estructuras hidráulicas como puentes, vertederos, presas y alcantarillas en el modelo, lo cual amplía sus aplicaciones (HEC, 2023).

3.3 Datos de ingreso

La implementación del modelo Hec-RAS en su formulación bidimensional requiere una variedad de entradas para una adecuada representación de la realidad y la obtención de simulaciones precisas y confiables. Entre estos insumos, se destacan los datos topográficos detallados, como base para la representación de la geometría del terreno, siendo esencial que estos reflejen las características del

área de estudio: el cauce, las planicies de inundación, la infraestructura existente y cualquier otro elemento que influya sobre el desarrollo del flujo.

Por otro lado, el modelo también requiere información hidrológica que describa las condiciones del flujo a la entrada y salida del sistema. En este caso particular, se refiere a caudales máximos asociados a un hidrograma de avenidas.

Finalmente, también es importante la caracterización de la resistencia del flujo a la interacción con distintas superficies, la cual es representada por el coeficiente de rugosidad de Manning. Este parámetro debe ser espacialmente distribuido sobre el dominio del modelo y, por lo general, varía según el tipo de cobertura del suelo.

3.3.1 Datos topobatimétricos

El relieve del área de estudio fue representado por un Modelo Digital de Elevación Topobatimétrica (TBDEM), el cual constituye la representación detallada e integral de la topografía (elevación del terreno) y batimetría (profundidad en cuerpos de agua); este permite la caracterización continua del relieve, para representar tanto las superficies emergidas como regiones ocupadas por cuerpos de agua. En el modelamiento hidráulico, el TBDEM proporciona la base geométrica para la determinación del comportamiento del flujo sobre la superficie en respuesta a eventos hidrológicos. Su importancia radica en que permite simular con precisión la dirección, velocidad y acumulación de los flujos.

Este modelo ha sido obtenido a una resolución espacial de 0.12 m x 0.12 m, a partir de trabajos de fotogrametría y batimetría desarrollados por la Dirección de Hidrología (DHI) del SENAMHI. Además, el TBDEM ha pasado por un proceso de postprocesamiento en gabinete, donde se han corregido errores y ajustado los datos para garantizar la precisión en la simulación hidráulica. Para esto, se desarrolló una metodología para el postprocesamiento e integración de la topografía y batimetría, la misma que se muestra en la Figura 4. Este proceso se llevó a cabo utilizando los softwares Metashape Agisoft Professional y RStudio.

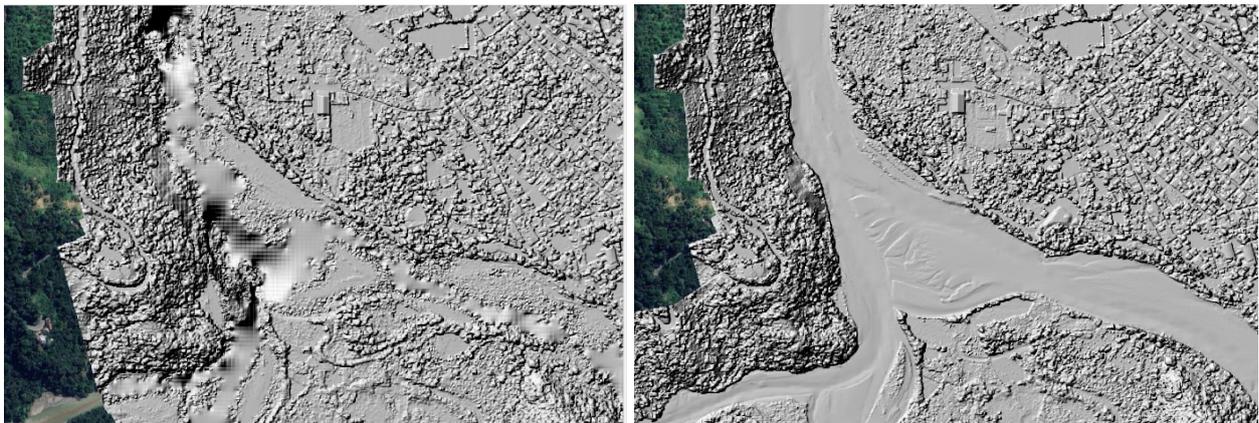


Figura 3. Comparación de DSM (izquierda) y el TBDEM (derecha).

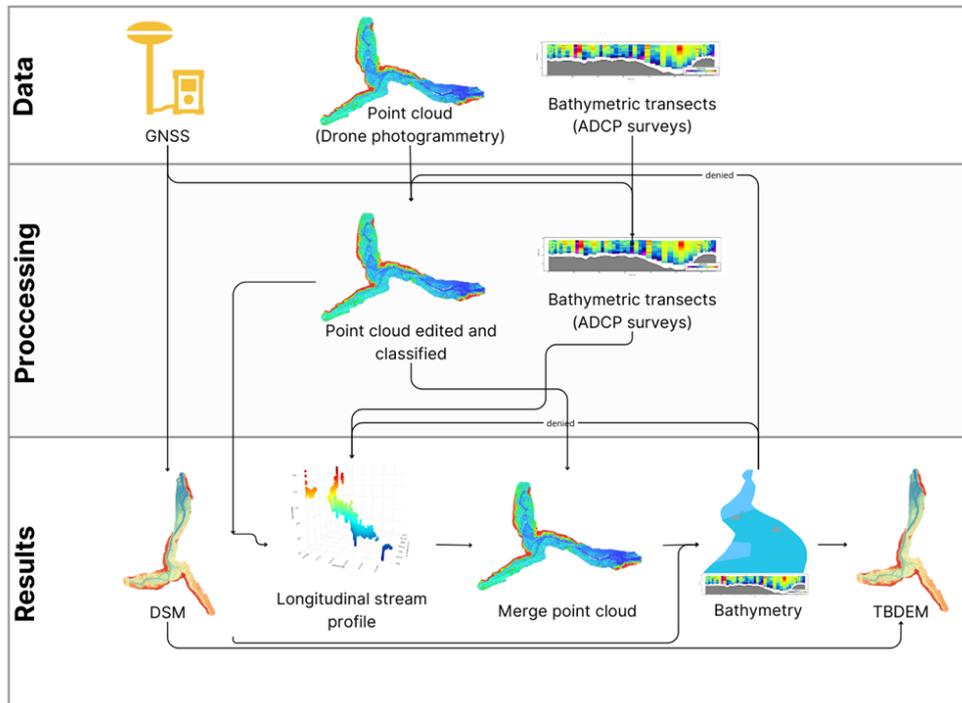
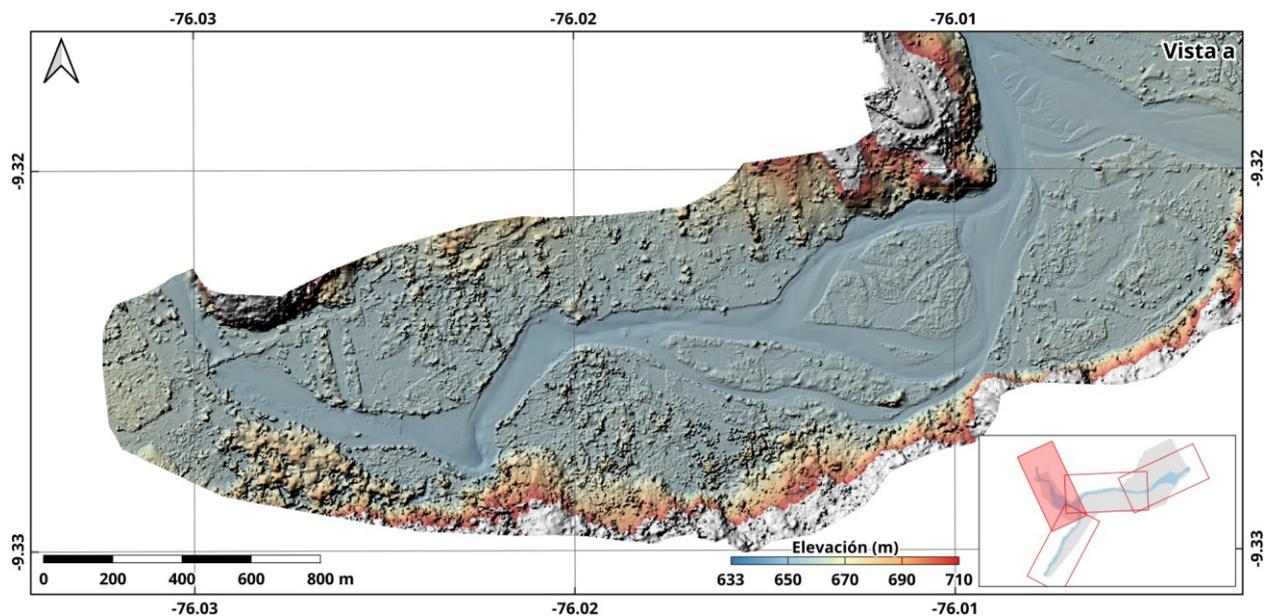


Figura 4. Metodología planteada para la generación a detalle de un Modelo Digital de Elevación Topobatimétrica (TBDEM).

En este contexto, el TBDEM, obtenido no solamente permite evaluar la interacción del flujo con el terreno natural, sino también con la infraestructura existentes, como vías, accesos, viviendas, entre otros. El detalle del DEM se muestra en las vistas de la Figura 5.



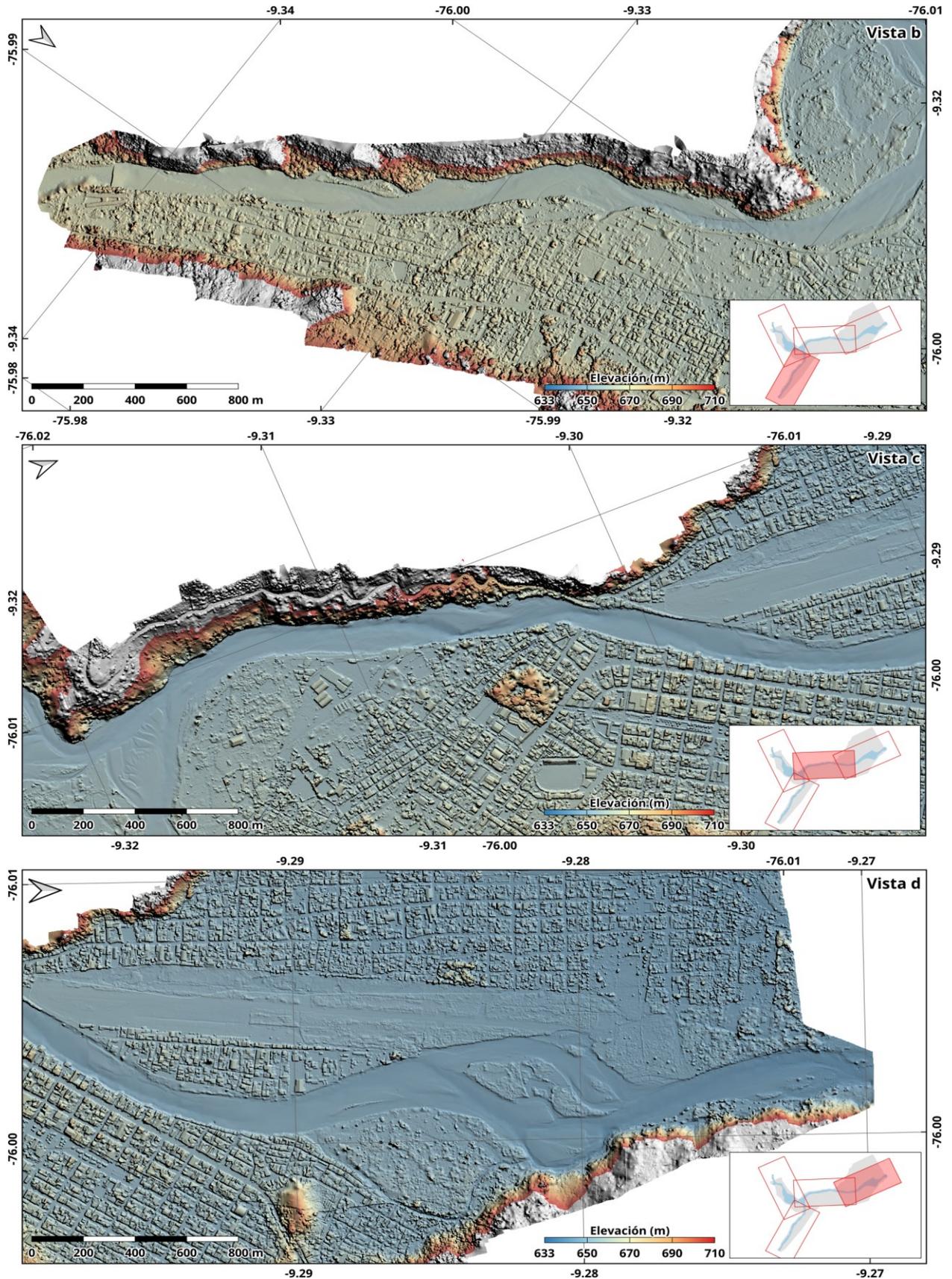


Figura 5. Modelo digital de elevación topobatimétrica: a) Río Monzón, b) Río Huallaga tramo aguas arriba de la desembocadura; c) Río Huallaga aguas abajo de la desembocadura y ciudad de Tingo María (Parte 01); d) Río Huallaga aguas abajo de la desembocadura y ciudad de Tingo María (Parte 02).

3.3.2 Hidrometría

Los datos de hidrometría fueron obtenidos de campañas de aforo y de las estaciones hidrológicas Puente Bella, ubicada sobre el río Monzón, y la estación Puente Pérez, sobre el río Huallaga, cuyas características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las estaciones hidrométricas.

| Estación | Tipo | Long. (°) | Lat. (°) | Altitud (msnm) | Área aportante (km ²) | Pendiente promedio del cauce (%) | Flujo anual promedio (m ³ /s) | Período observado |
|--------------|---------------------------|-----------|----------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|-------------------|
| Puente Bella | Convencional / automática | -76.029 | -9.324 | 2 150 | 2 622.94 | 3.08 | 326.9 | 2014 - 2023 |
| Puente Pérez | Automática | -75.982 | -9.347 | 3 253 | 9 536.92 | 1.58 | 371.5 | 2014 - 2022 |

En la Figura 6 se muestra la disposición de las estaciones hidrométricas en relación con los ríos de interés. La estación Puente Bella, que combina capacidades convencionales y automáticas, se encuentra situada en la margen del río Monzón, cuyo curso se orienta predominantemente de oeste a este. Por otro lado, la estación Puente Pérez, de tipo automática, está ubicada sobre el cauce del río Huallaga, que fluye en dirección suroeste-noreste. Estas ubicaciones responden a la necesidad de capturar datos representativos en puntos clave de los cauces.

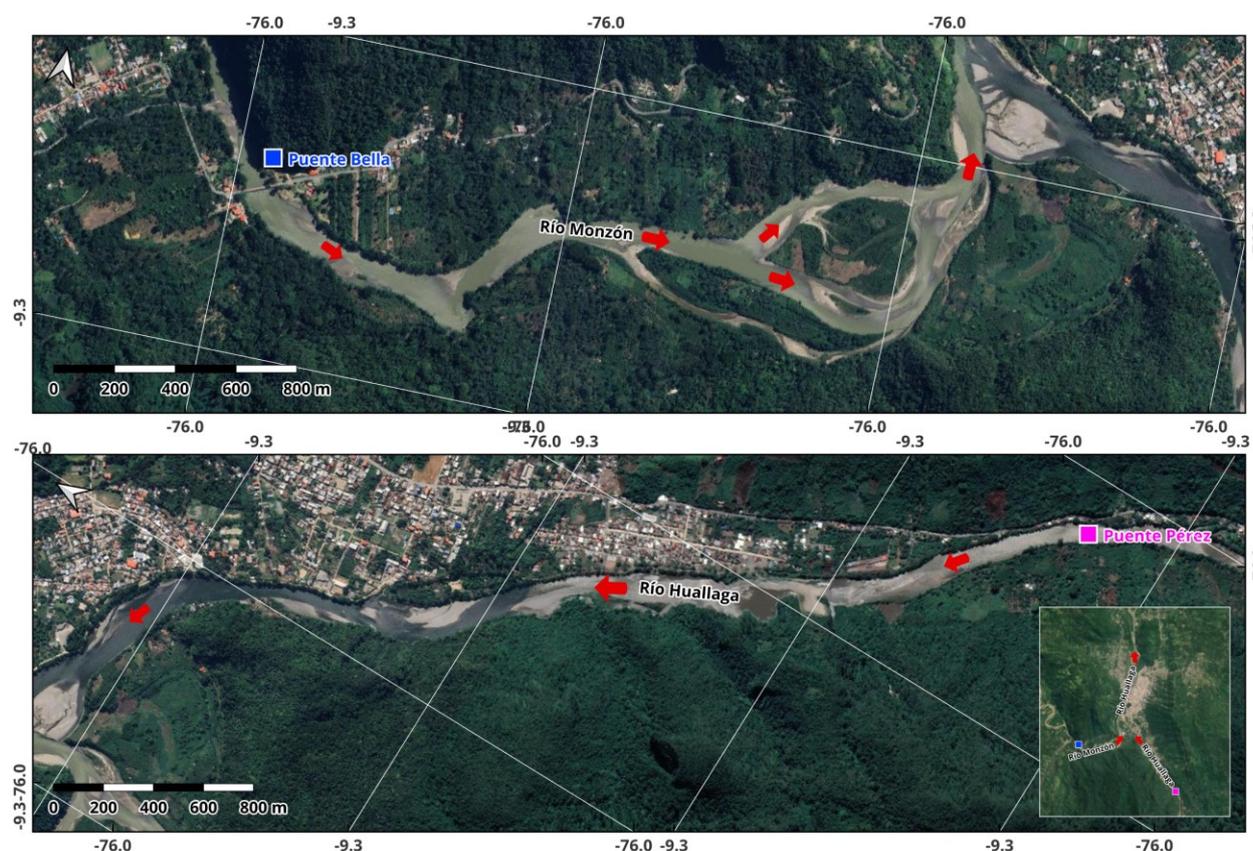


Figura 6. Ubicación de estaciones hidrométricas.

3.3.2.1 Campaña de aforos

Se ha llevado a cabo una campaña de aforos en el tramo de estudio, de la cual se han obtenido parámetros físicos importantes del cauce, tales como el caudal y el tirante y/o velocidad asociados a este. La Dirección de Hidrología (DHI) del SENAMHI fue la responsable de la campaña de aforos. El uso del aforador portátil SonTek RiverSurveyor M9, montado en una embarcación de flotación, permitió la captura precisa de datos de velocidad de agua, caudal y profundidad en secciones transversales específicas, las mismas que se muestran en la Figura 7.



Figura 7. Ubicación de secciones transversales.

Los datos obtenidos resultan importantes para el proceso de calibración del modelo hidrodinámico, pues proporcionan una base empírica para ajustar el modelo a una mejor representación de las condiciones reales de flujo.

3.3.2.2 PHISIS

La Plataforma Hidrológica de Información Sistematizada e Integrada (PHISIS), desarrollada por SENAMHI, pone a disposición general una herramienta que permite informar oportunamente las condiciones hidrológicas de los principales ríos a nivel nacional, permitiendo proveer un monitoreo quasi-real de las condiciones de estos.

PHISIS ofrece tres componentes clave: monitoreo hidrológico, avisos hidrológicos y pronóstico, todos integrados para garantizar la vigilancia y conocimiento detallado de las dinámicas fluviales en el territorio peruano. En cuanto al sistema de alerta, PHISIS emplea un esquema de 3 niveles (amarillo, naranja y rojo), que permiten alertar sobre el estado de las condiciones hidrológicas y la necesidad de tomar medidas preventivas; estos niveles han sido estimados mediante análisis de datos históricos y conocimiento de campo.

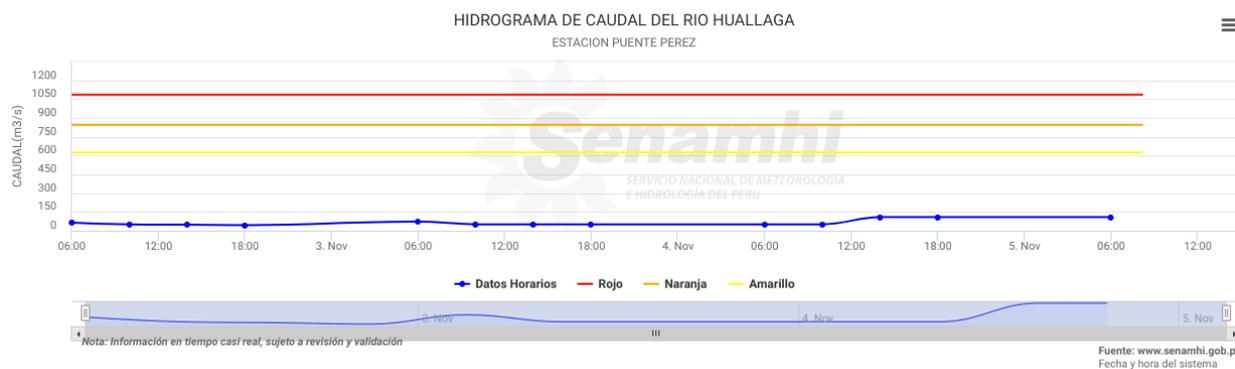


Figura 8. Hidrograma de caudal del río Huallaga (tomado de PHISIS el 02-Nov-2024).

El nivel amarillo sugiere la necesidad de atención dado el incremento de caudal; el nivel naranja señala una situación de riesgo que requiere una pre-alerta y el nivel rojo representa condiciones de emergencia, que probablemente demanden una respuesta inmediata. En la Tabla 2 se muestran los caudales asociados a cada nivel de alerta para las estaciones de monitoreo identificadas sobre el ámbito de estudio.

Tabla 2. Caudal (m³/s) asociado a cada nivel de alerta del sistema PHISIS.

| Nivel de alerta | Estación Puente Bella | Estación Puente Pérez. |
|-----------------|-----------------------|------------------------|
| Amarillo | 557.6 | 624.0 |
| Naranja | 610.6 | 846.0 |
| Rojo | 759.2 | 1086.0 |

La eficacia y precisión de estos niveles de alerta ante la ocurrencia de eventos extremos también se evaluará en el modelamiento hidrodinámico, permitiendo simular los posibles impactos en cada uno de estos y respaldarlos mediante una base técnica. Se debe tener en cuenta que la evaluación contempla la ocurrencia simultánea en cada estación de los caudales asociados a cada nivel de alerta.

3.3.2.3 Caudales máximos

Los registros de caudales diarios para la estimación de caudales máximos y posteriores generación de escenarios de inundación fueron obtenidos de las estaciones Puente Bella y Puente Perez, obtenidas de PHISIS.

Se usaron criterios de selección de modelos estadísticos según los principios de análisis de frecuencia para eventos extremos hidrológicos de Laio et al. (2009). En esta metodología, la selección del modelo se fundamenta en la identificación de la mejor distribución de probabilidad para representar eventos extremos, considerando el óptimo ajuste estadístico entre el modelo teórico y los datos observados; se busca minimizar la pérdida de información.

Los puntajes correspondientes a cada criterio de selección para las distribuciones evaluadas se muestran en la Tabla 3, así como el ajuste gráfico de la función de distribución en la Figura 9.

Tabla 3. Selección de distribución de mejor ajuste estadístico.

| Estación | Criterio | Distribución estadística | | | | | | | Mejor ajuste |
|--------------|----------|--------------------------|------------|--------|---------|----------------------------|----------------|--------------------|--------------|
| | | Normal | log-Normal | Gumbel | Frechet | Valor extremo generalizado | Pearson tipo 3 | log-Pearson tipo 3 | |
| Puente Bella | AIC | 467.12 | 461.54 | 460.98 | 464.03 | 462.95 | 463.10 | 462.97 | Gumbel |
| | AICc | 467.46 | 461.88 | 461.33 | 464.37 | 463.66 | 463.80 | 463.68 | Gumbel |
| | BIC | 470.39 | 464.82 | 464.26 | 467.31 | 467.87 | 468.01 | 467.88 | Gumbel |
| | ADC | 0.50 | 0.13 | 0.10 | 0.29 | 0.14 | 0.16 | 0.15 | Gumbel |
| Puente Pérez | AIC | 489.93 | 488.78 | 489.81 | 501.02 | 490.05 | 490.09 | 490.20 | log-Normal |
| | AICc | 490.27 | 489.12 | 490.16 | 501.37 | 490.76 | 490.80 | 490.91 | log-Normal |
| | BIC | 493.21 | 492.06 | 493.09 | 504.30 | 494.97 | 495.01 | 495.12 | log-Normal |
| | ADC | 0.26 | 0.15 | 0.23 | 1.29 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | log-Normal |

Notas: AIC: Criterio de información de Akaike (*Akaike Information Criterion*).
 AICc: Criterio de información de Akaike corregido (*Akaike Information Criterion corrected*).
 BIC: Criterio de información Bayesiano (*Bayesian Information Criterion*)
 ADC: Criterio de Anderson-Darling (*Anderson-Darling Criterion*).

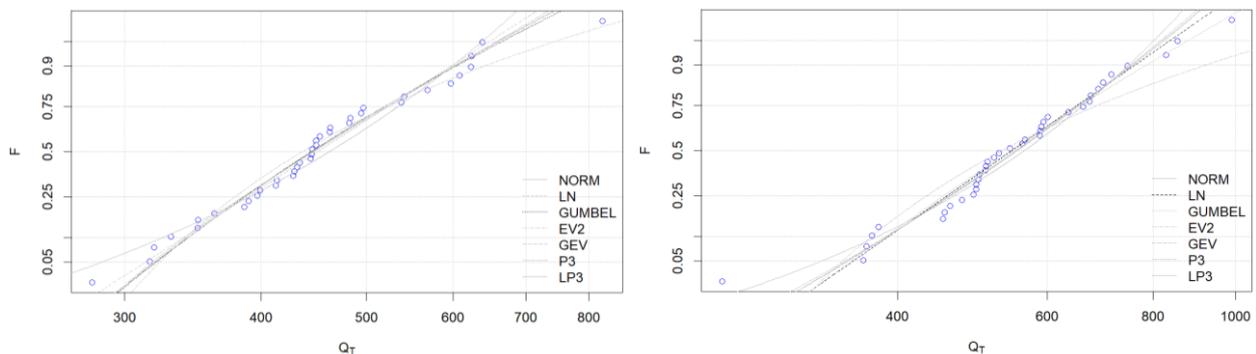


Figura 9. Distribución de probabilidad de no excedencia y ajuste de las siete distribuciones evaluadas para las estaciones Puente Bella (izq.) y Puente Pérez (der.).

A partir de los criterios de evaluación y selección descritos, se seleccionó la distribución Gumbel como la de mejor ajuste para la estación Puente Bella y la distribución Log-Normal para la estación Puente Pérez.

El ajuste de las distribuciones se realizó utilizando los enfoques de máxima verosimilitud (ML), el cual maximiza la probabilidad de los datos observados y así optimiza los parámetros que definen la distribución, y el de momentos (M), que iguala los momentos teóricos y muestrales para la estimación de parámetros. Esto se complementó con un análisis de incertidumbre basado en inferencia bayesiana mediante el método de Montecarlo basado en cadenas de Markov (MCMC – *Markov chain*

Monte Carlo) (Smith & Marshall, 2008); en este análisis se empleó hasta 50 000 iteraciones y 3 cadenas para garantizar la convergencia del algoritmo, generando intervalos de alta confiabilidad, que permiten evaluar la variabilidad en las estimaciones de los parámetros y la curva ajustada. Los resultados para períodos de retorno típicos a partir de los enfoques se muestran en la Tabla 4, mientras que en la Figura 10 se observa el ajuste de las curvas de cada metodología y el intervalo de confianza según MCMC.

Tabla 4. Caudal máximo diario asociado a distintos períodos de retorno.

| Estación | Enfoque | Período de retorno | | | | | | | | | |
|--------------|---------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 75 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
| Puente Bella | M | 912.6 | 1 050.9 | 1 152.8 | 1 289.7 | 1 395.6 | 1 458.4 | 1 503.3 | 1 612.7 | 1 759.1 | 1 870.9 |
| | ML | 913.5 | 1 052.2 | 1 154.4 | 1 291.7 | 1 397.8 | 1 460.8 | 1 505.8 | 1 615.5 | 1 762.2 | 1 874.3 |
| Puente Pérez | M | 1 120.7 | 1 326.2 | 1 462.4 | 1 635.1 | 1 763.5 | 1 838.4 | 1 891.5 | 2 019.4 | 2 188.9 | 2 317.5 |
| | ML | 1 120.7 | 1 322.3 | 1 455.9 | 1 625.0 | 1 750.9 | 1 824.2 | 1 876.1 | 2 001.2 | 2 166.9 | 2 292.5 |

Notas: M: Método de momentos (*Moments*).

ML: Método de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood*).

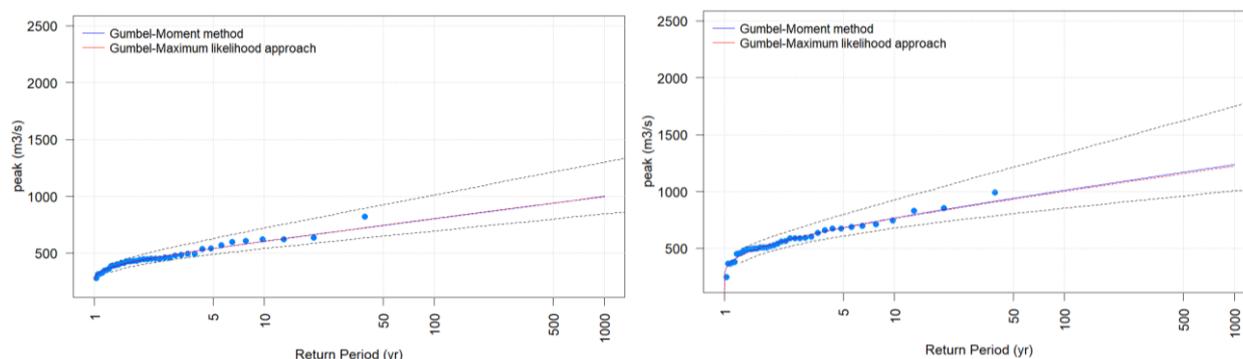


Figura 10. Ajuste de curvas a método de momentos y de máxima verosimilitud basado en cadenas de Markov.

Finalmente, se estimaron los caudales máximos instantáneos a partir de los valores diarios obtenidos de las estaciones hidrométricas. Fuller (1914) desarrolló uno de los primeros estudios en los que se estima la relación entre el caudal máximo instantáneo (IPF – *Instantaneous Peak Flow*) y su correspondiente caudal máximo diario (MDF – *Maximum Daily Flow*). Se trata de una de las ecuaciones más comúnmente usadas para describir esta asociación, formulada de la siguiente manera:

$$Q = Q_{24}(1 + 2A^{-0.3})^2$$

Donde:

- Q : Descarga máxima instantánea (m³/s)
- Q₂₄ : Descarga promedio en 24 horas (m³/s)
- A : Área aportante (km²)

En la Tabla 5 se muestran los caudales máximos obtenidos mediante el método de Fuller para distintos períodos de retorno.

Tabla 5. Caudal máximo asociado a diferentes períodos de retorno.

| Estación | Período de retorno | | | | | | | | | |
|--------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 75 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
| Puente Bella | 1 142.5 | 1 316.1 | 1 443.9 | 1 615.6 | 1 748.3 | 1 827.1 | 1 883.4 | 1 963.4 | 2 020.5 | 2 101.5 |
| Puente Pérez | 1 311.5 | 1 551.9 | 1 711.4 | 1 913.4 | 2 063.8 | 2 151.4 | 2 213.5 | 2 301.0 | 2 363.2 | 2 450.9 |

3.3.3 Coeficiente de rugosidad de Manning

El coeficiente de Manning como parámetro físico permite la caracterización de la resistencia al flujo de las corrientes de agua. Su importancia radica en la caracterización de la rugosidad superficial y con eso, estimar el comportamiento del flujo.

Para su determinación, se realizó una primera aproximación de la cobertura mediante el producto Dynamic World (DW) (Brown et al., 2022). Se trata de un conjunto de datos globales de alta resolución (10 m) que proporciona clasificación de uso y cobertura de suelo basado en algoritmos de aprendizaje automático sobre las imágenes Sentinel-2. En la Figura 11 se observa la cobertura de suelo para el ámbito de estudio según DW para el período Abril – Junio del 2024.

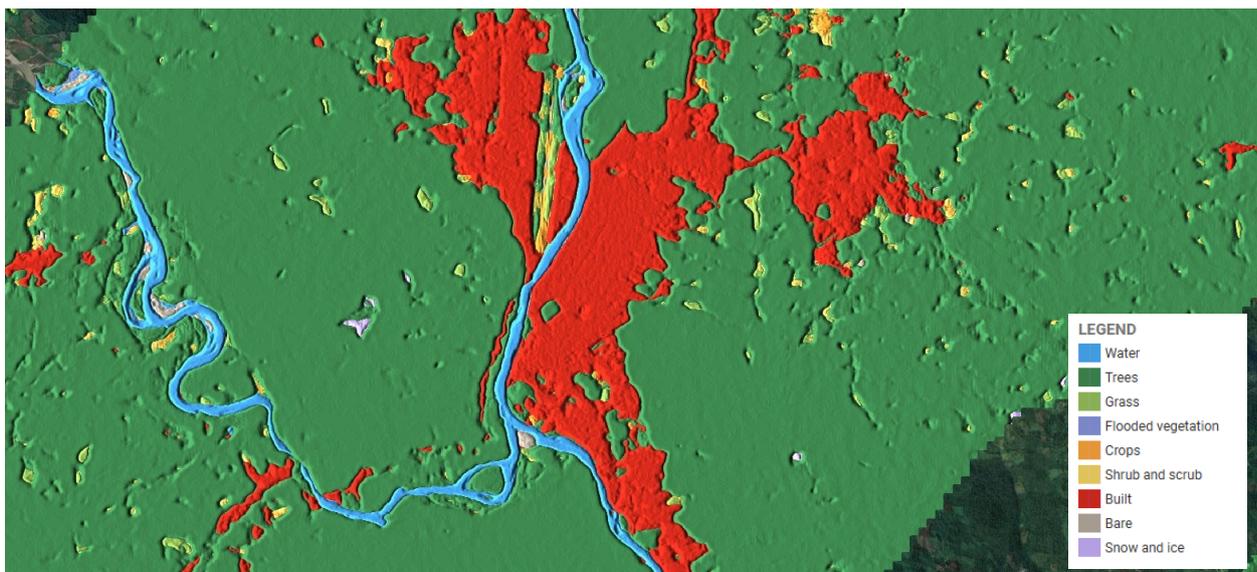


Figura 11. Cobertura de suelo para el ámbito de estudio (DW) (tomado para Abr-Jun de 2024).

Posteriormente, se procedió a la discretización y refinamiento manual mediante reconocimiento de imágenes satelitales, lo que permitió una caracterización más precisa de los coeficientes de rugosidad para diferentes tipos de superficie. En la Tabla 6 se observa la determinación final del coeficiente de rugosidad de Manning para el ámbito de estudio, mientras en la Figura 12 se muestra la distribución espacial del coeficiente.

Tabla 6. Coeficiente de rugosidad de Manning.

| Cobertura del suelo | Coeficiente de Manning (n) |
|---------------------|----------------------------|
| Cauce | 0.016 |
| Grass | 0.035 |

| Cobertura del suelo | Coefficiente de Manning (n) |
|---------------------|-----------------------------|
| Ribera - Clase 1 | 0.007 |
| Ribera - Clase 2 | 0.008 |
| Ribera - Clase 3 | 0.010 |
| Ribera - Clase 4 | 0.042 |
| Vegetación alta | 0.045 |
| Vegetación baja | 0.021 |
| Zona urbana | 0.015 |

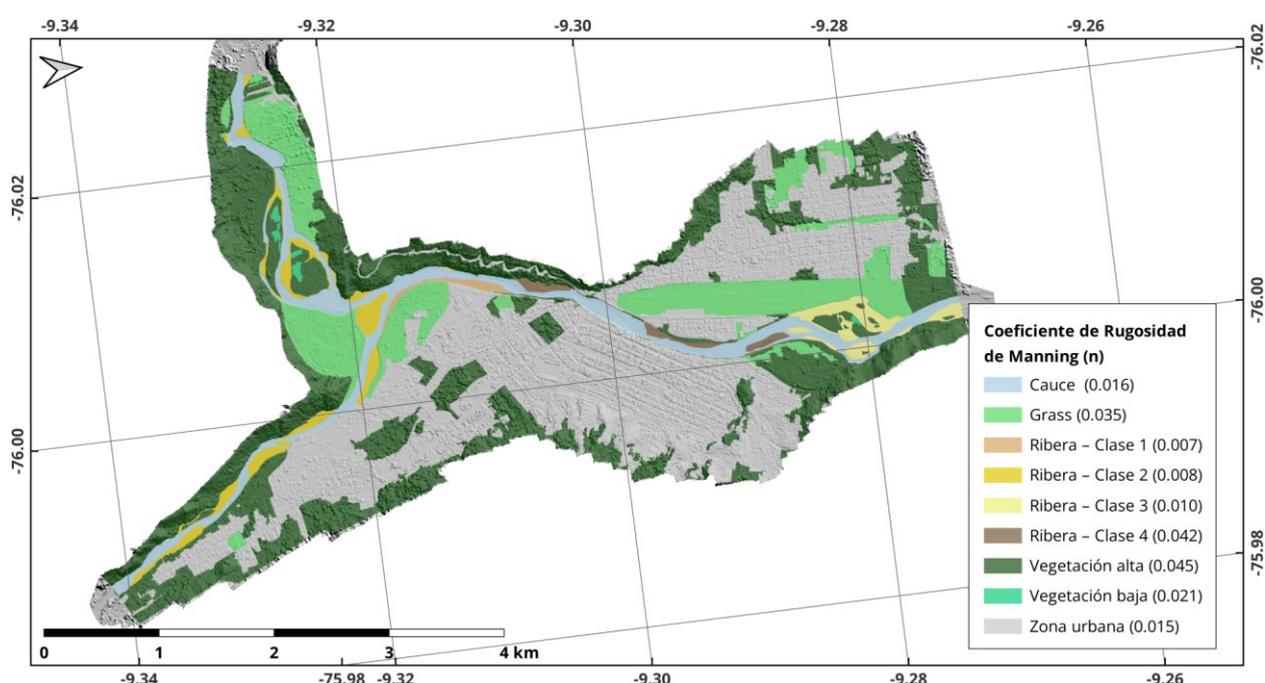


Figura 12. Distribución espacial del coeficiente de rugosidad de Manning.

Los valores finales del coeficiente de rugosidad de Manning son resultado del ajuste iterativo de este como parámetro de calibración del modelo hidráulico, buscando garantizar la consistencia entre los resultados modelados y las observaciones de campo: el procedimiento se basa principalmente en la comparación de los tirantes hidráulicos modelados y los obtenidos mediante ADCP.

El hecho que los valores para ciertos tipos de cobertura hayan sido diferenciados en más de una clase es también consecuencia de los resultados obtenidos durante la calibración hidráulica del modelo. La división en clases refleja la necesidad de ajustar el coeficiente para una mejor representación de condiciones de sitio locales, aún para una misma cobertura, ante la ausencia de datos específicos.

3.4 Metodología

3.4.1 Enfoque de modelamiento

En el presente caso de estudio, la modelación hidrodinámica se implementó bajo un enfoque bidimensional, considerando la necesidad de una representación precisa de la dinámica del flujo. Bajo este enfoque, se resuelven las ecuaciones de Shallow-Water (SWE) (Vreugdenhil, 1994) o de aguas someras, adecuadas para la descripción del movimiento de fluidos poco profundos. El modelo SWE resuelve las ecuaciones de conservación de volumen y momento, además de incluir aceleración temporal y espacial.

$$\text{Conservación de volumen: } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla(hV) = q$$

$$\text{Conservación de momento: } \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -g \cos^2 \varphi \nabla \eta + \frac{1}{h} \nabla(v_t h \nabla V) - \frac{\tau \cos \psi}{\rho_m R \cos \varphi} \frac{V}{|V|}$$

Donde:

- η : Elevación de la superficie del flujo
- t : Tiempo
- h : Profundidad de flujo o calado
- V : Magnitud del vector velocidad
- q : Término de fuente o sumidero
- g : Aceleración gravitacional
- v_t : Viscosidad turbulenta de remolino
- τ : Estrés basal total
- ρ_m : Densidad de la mezcla agua-sólido
- R : Radio hidráulico
- φ : Pendiente de la superficie de flujo
- ψ : Ángulo de inclinación del vector de velocidad

En Hec-RAS, las ecuaciones SWE se pueden resolver bajo el enfoque EM-SWE (*Eulerian Method for SWE*) o el ELM-SWE (*Eulerian-Lagrangian Method for SWE*). En el presente caso, se ha optado por el enfoque ELM-SWE debido a ciertas ventajas específicas dada la configuración morfológica del ámbito, tales como un mejor manejo de modelos de confluencia de cauces, ya que puede resolver de forma más precisa los términos convectivos y advectivos asociados a variaciones de velocidad y caudal ocurridos en la desembocadura de un cauce a otro. Esto resulta particularmente relevante considerando más de un hidrograma de entrada y su confluencia, donde el flujo puede experimentar gradientes pronunciados y cambios rápidos en las condiciones hidráulicas. La combinación de una malla de referencia fija (Euleriana) y el seguimiento de partículas en un marco de referencia móvil (Lagrangiano), se logra una mayor precisión en puntos críticos como este. Sin embargo, la elección del ELM-SWE también implica ciertas desventajas: este enfoque por lo general requiere un mayor costo computacional, dado que la implementación Euleriana-Lagrangiana introduce cálculos adicionales en el dominio del flujo.

3.4.2 Dominio del modelo y mallado

La precisión y relevancia de un modelo hidráulico está intrínsecamente ligada a la adecuada delimitación del dominio de cálculo; este proceso no solo delimita los límites espaciales de análisis, sino también influye en la calidad y utilidad de los resultados. Una delimitación precisa del dominio del modelo hidráulico asegura que este sea relevante y fiable para su empleo en toma de decisiones.

Al establecer los límites, también se decide si habrá zonas o áreas simuladas con mayor detalle y como estas serán representadas, buscando representar las condiciones hidráulicas reales del sistema. En este caso particular, el dominio se configura para abarcar la mayor extensión urbana posible, dado que esta constituye la zona de interés. Esto asegura que se capturen los procesos hidráulicos dadas las condiciones de sitio, considerando la interacción entre el flujo y la infraestructura.

Por otro lado, para optimizar la precisión del modelo, se implementa un mallado adaptativo (Ojha et al., 2021). En este caso, se utiliza una malla base de 10 metros para todo el dominio computacional, sobre el cual se aplica un refinamiento en áreas consideradas críticas: 5 metros en el cauce del río y 2 metros en las zonas urbanas.

Este refinamiento permite capturar con mayor detalle el comportamiento del flujo; la capacidad de ajustar la densidad de la malla en función de las necesidades específicas de cada zona permite optimizar la eficiencia del modelo, asegurando resultados precisos y relevantes sin comprometer la viabilidad operativa del proyecto.

3.4.3 Condiciones de borde

Las condiciones de borde o de frontera son especificaciones dadas en los límites del dominio que establecen la interacción del sistema con su entorno. Para el ámbito de estudio, se establecen 2 tipos de condiciones: de entrada y de salida.

Las condiciones de entrada se definieron aguas arriba de la confluencia del río Monzón y Huallaga, como entrada de flujo independiente en cada río. Se establecieron considerando los caudales máximos asociados a los niveles de alerta de PHISIS o de períodos de retorno seleccionados. Además, en busca de garantizar la estabilidad del modelo, se incorpora una etapa de “calentamiento” previa (warm-up), procedimiento que permite que el modelo alcance un estado inicial de equilibrio antes de la simulación del caudal de interés como tal, minimizando oscilaciones en el cálculo.

Por otro lado, en este caso particular, las condiciones de salida buscan la adecuada representación del flujo más allá de los límites del dominio. Se define la salida principal aguas abajo en el río Huallaga, tras la confluencia con el río Monzón y de la zona urbana. También se incorporan condiciones de salida a lo largo del perímetro de todo el dominio, excepto en las áreas designadas como de entrada de flujo, permitiendo que los desbordes durante un evento de inundación puedan desarrollarse sin quedar “atrapados” en el dominio, evitando así, una representación irrealista, como acumulaciones artificiales.

3.4.4 Índice de peligrosidad

Es un consenso general que el peligro que representan las inundaciones para las personas, así como los vehículos y otros bienes materiales, es una función conjunta de la velocidad y la profundidad del flujo (DEFRA, 2006). Aunque existen otros factores físicos que pueden influir sobre la peligrosidad, junto a la posible presencia de escombros en el flujo, la velocidad y la profundidad pueden ser considerados los factores predominantes. En ese sentido, a partir de estos, la DEFRA (2006) define un índice de fácil aplicación que permite caracterizar el peligro que una inundación representa para las personas:

$$HR = d(V + 0.5) + DF$$

Donde:

- HR : Índice de peligrosidad de inundación (Hazard Rating)
- d : Profundidad de inundación (m)
- V : Velocidad de inundación (m/s)
- DF : Factor de escombros (0, 0.5 o 1 dependiente de la probabilidad de flujo de escombros)

La clasificación de la peligrosidad de inundación es esencial para el mapeo de zonas, gestión de riesgo y desarrollo de medidas preventivas. Definir niveles cualitativos de peligro a partir de valores cuantitativos calculados es fundamental pues permite una comunicación clara y comprensible. Para este fin, se usa la siguiente clasificación del HR, también dada por la DEFRA (2006):

Tabla 7. Clasificación de peligro por inundación para las personas.

| Índice de peligrosidad de inundación (HR) | Clasificación de peligro | Descripción |
|---|--------------------------|---|
| < 0.75 | Bajo | <u>Precaución.</u> Zona inundable con aguas corrientes poco profundas o aguas estancadas profundas. |
| 0.75 – 1.25 | Moderado | <u>Peligroso para algunos.</u> Zona inundada con agua que fluye profunda o rápida. |
| 1.25 – 2.00 | Significativo | <u>Peligroso para la mayoría.</u> Zona inundada con agua profunda que fluye rápidamente. |
| > 2.00 | Extremo | <u>Peligroso para todos.</u> Zona inundada con aguas profundas de corriente muy rápida. |

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados derivados del modelamiento hidráulico bidimensional del río Huallaga en el tramo Tingo María para los niveles de alerta de PHISIS y para un período de retorno de 100 años. Se ha determinado la profundidad y velocidad máxima de flujo, así como la caracterización de la peligrosidad.

El estudio tiene por objetivo no solo verificar los niveles de alerta establecidos por el sistema PHISIS como condiciones previas a la ocurrencia de inundaciones, sino también evaluar la magnitud y

extensión de los eventos asociados a máximas avenidas. Los resultados para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, típicamente estudiados, permiten comprender el patrón hidráulico sobre el área urbana bajo escenarios críticos.

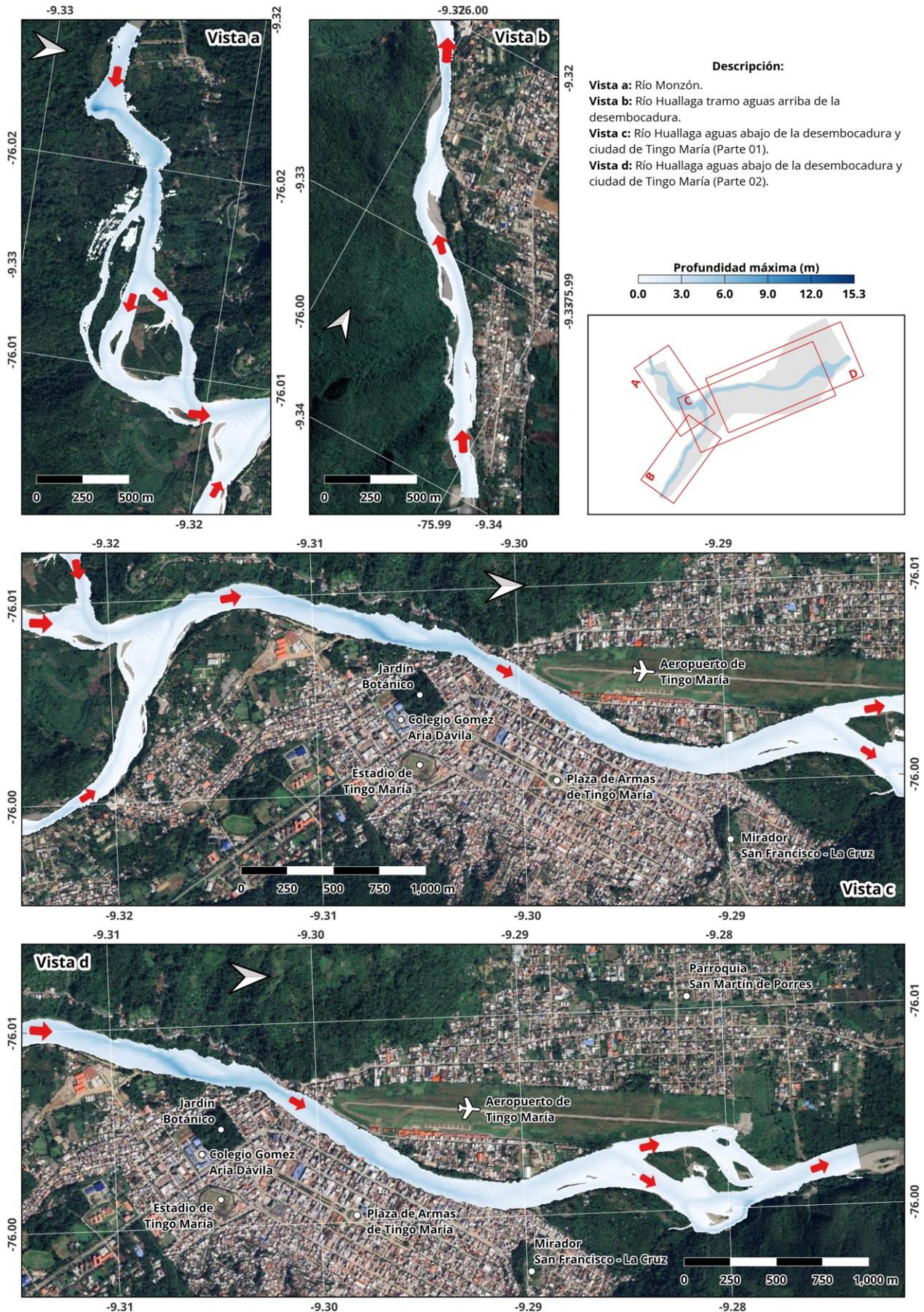


Figura 13. Profundidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta amarillo de PHISIS.

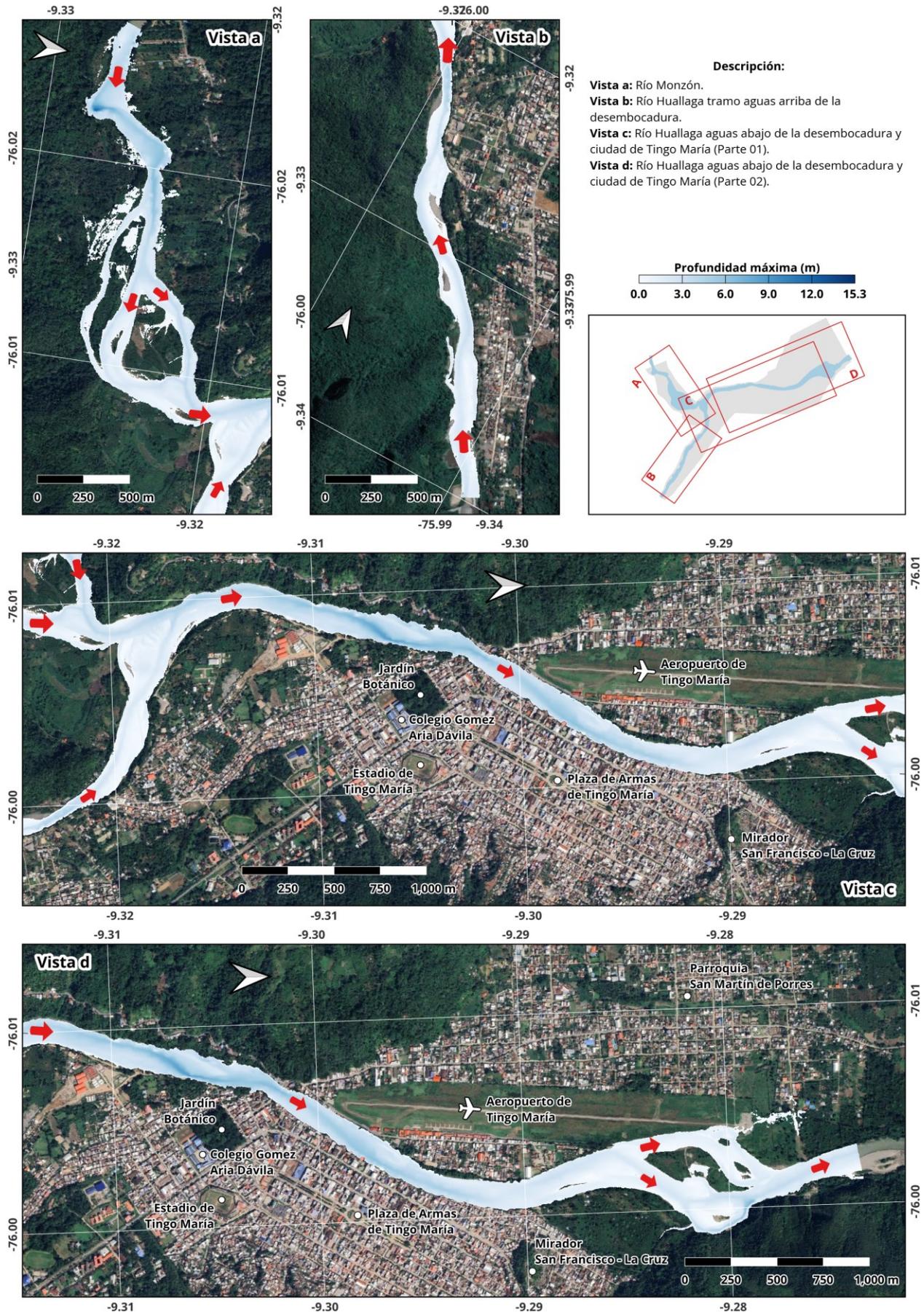


Figura 14. Profundidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta naranja de PHISIS.

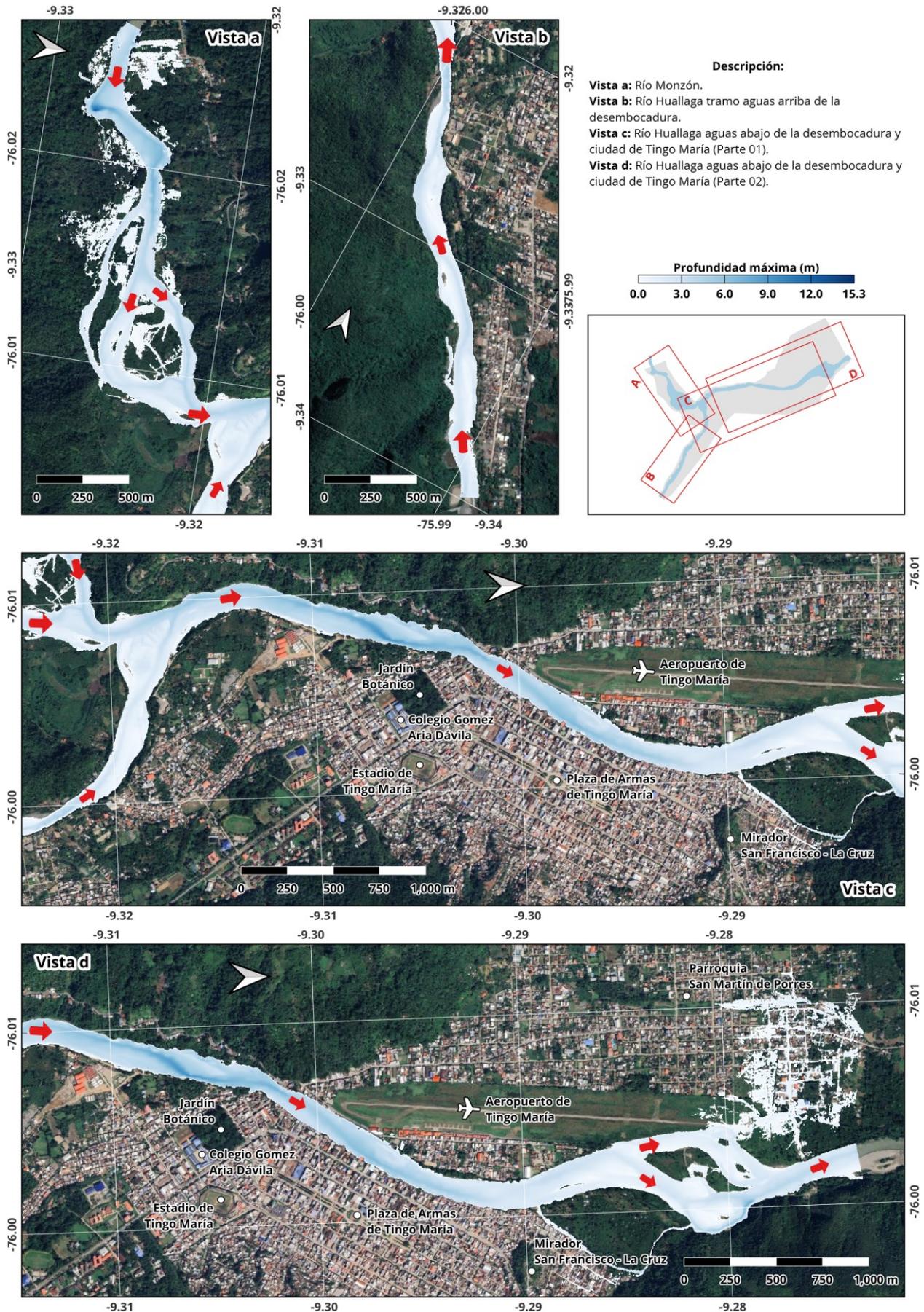


Figura 15. Profundidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta rojo de PHISIS.

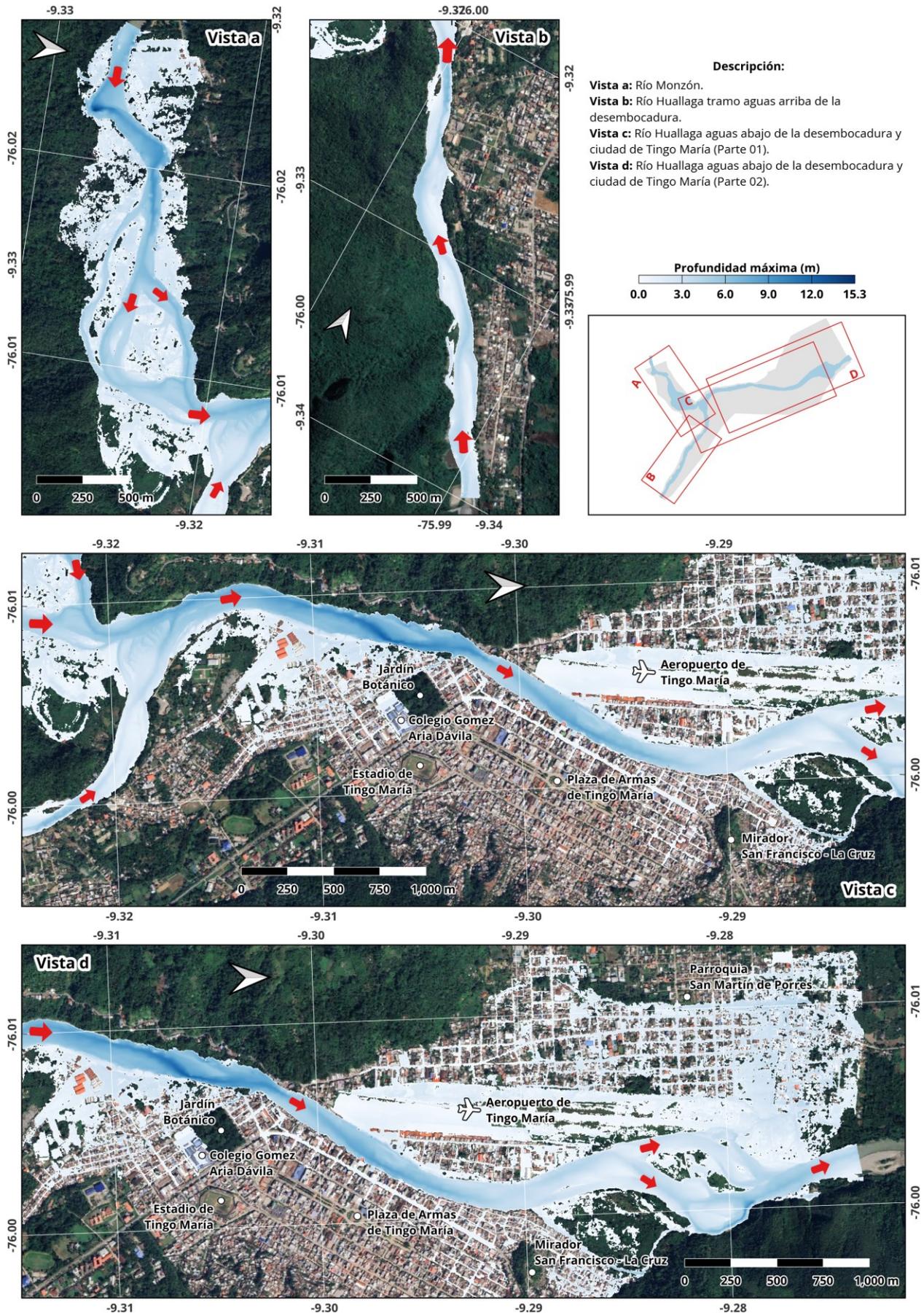


Figura 16. Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 100 años.

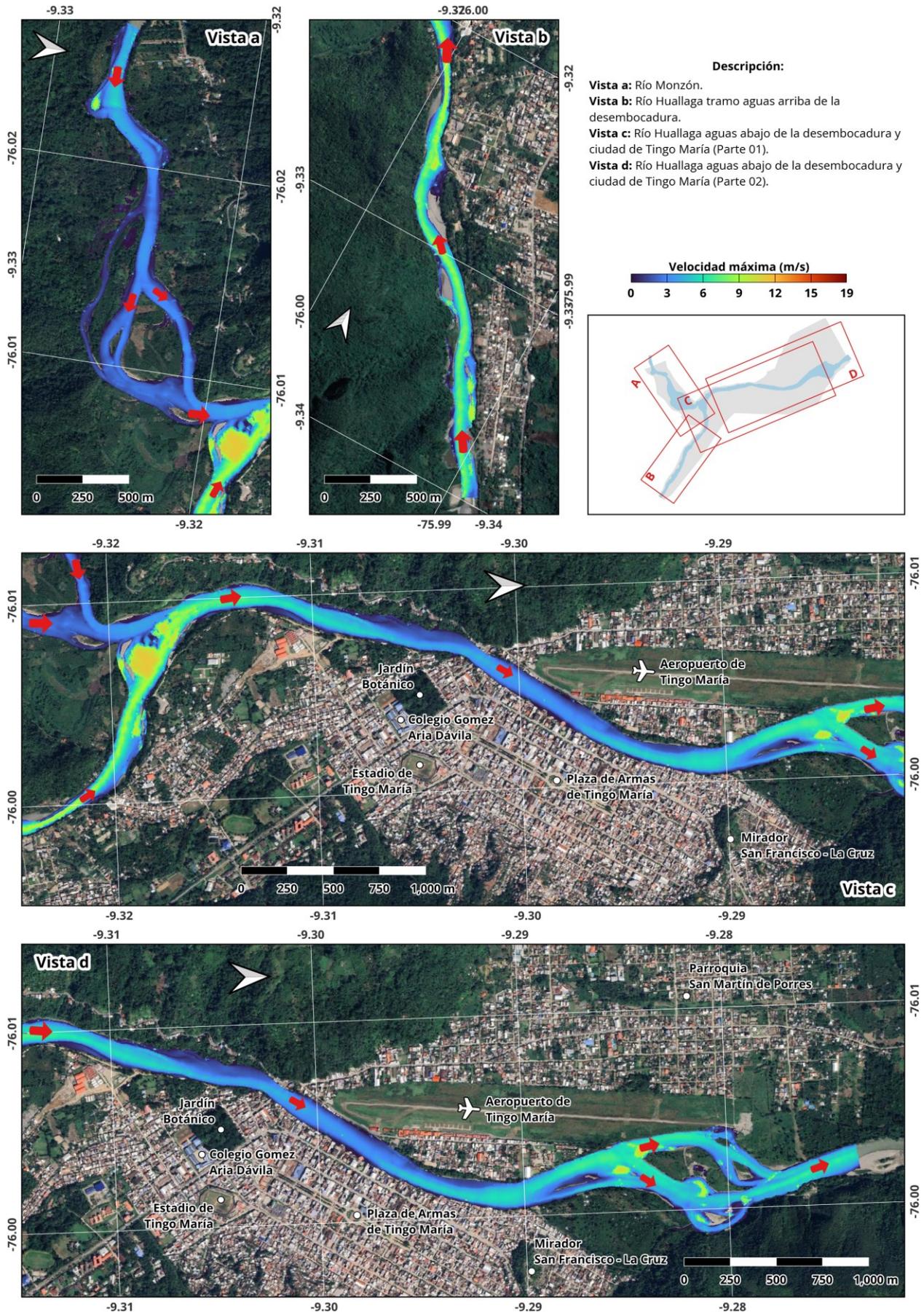


Figura 17. Velocidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta amarillo de PHISIS.

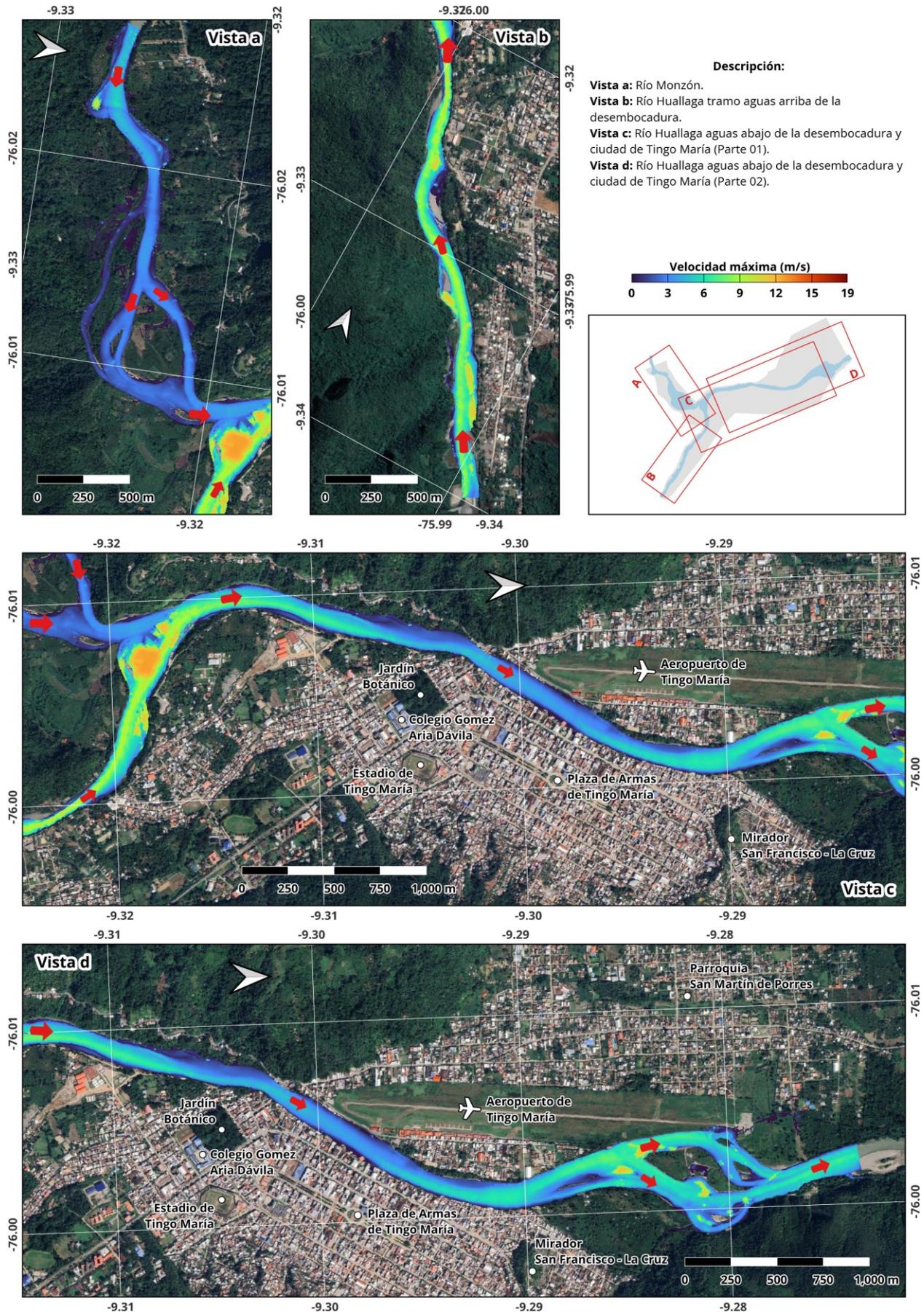


Figura 18. Velocidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta naranja de PHISIS.

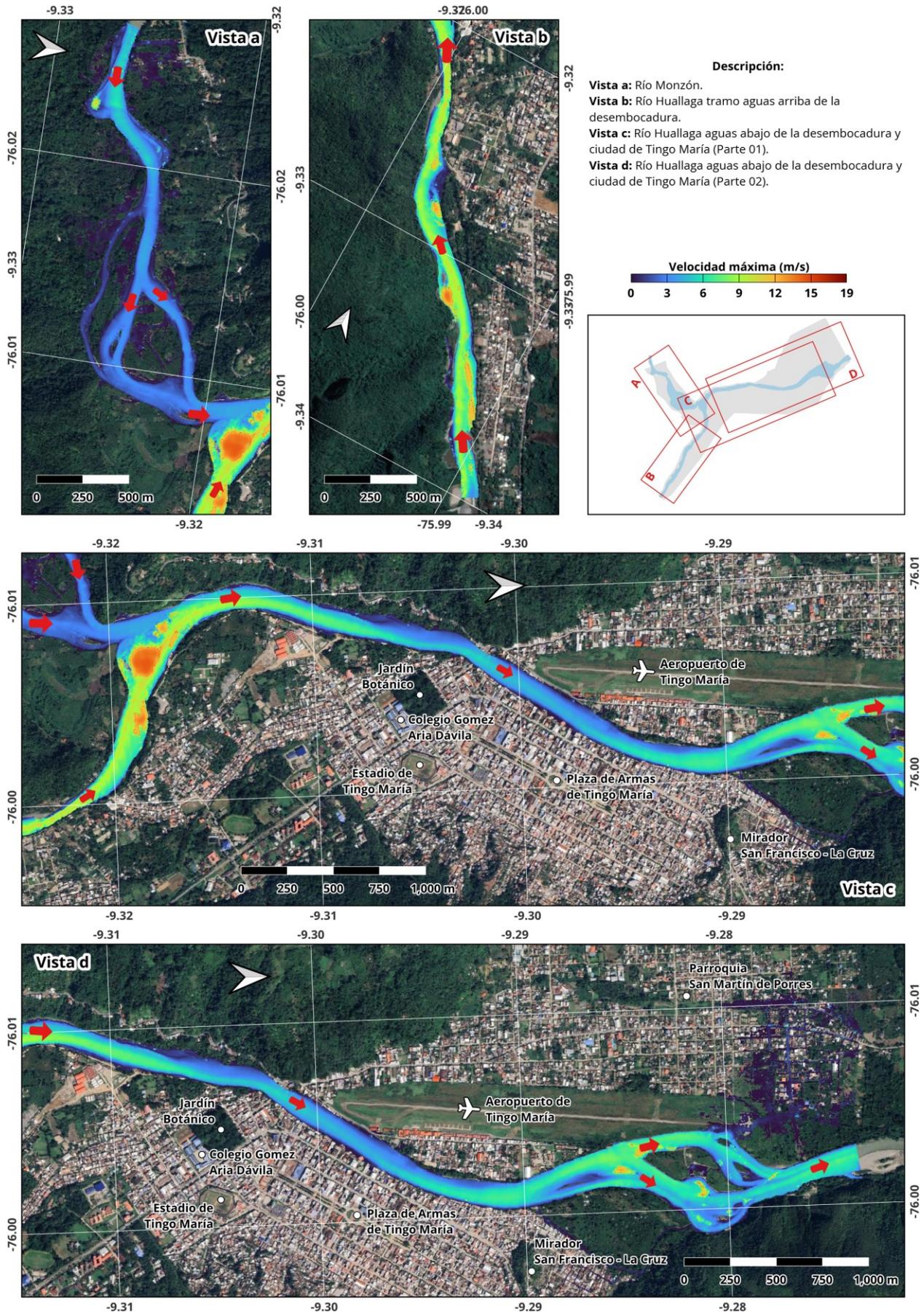


Figura 19. Velocidad máxima de inundación asociada al nivel de alerta rojo de PHISIS.

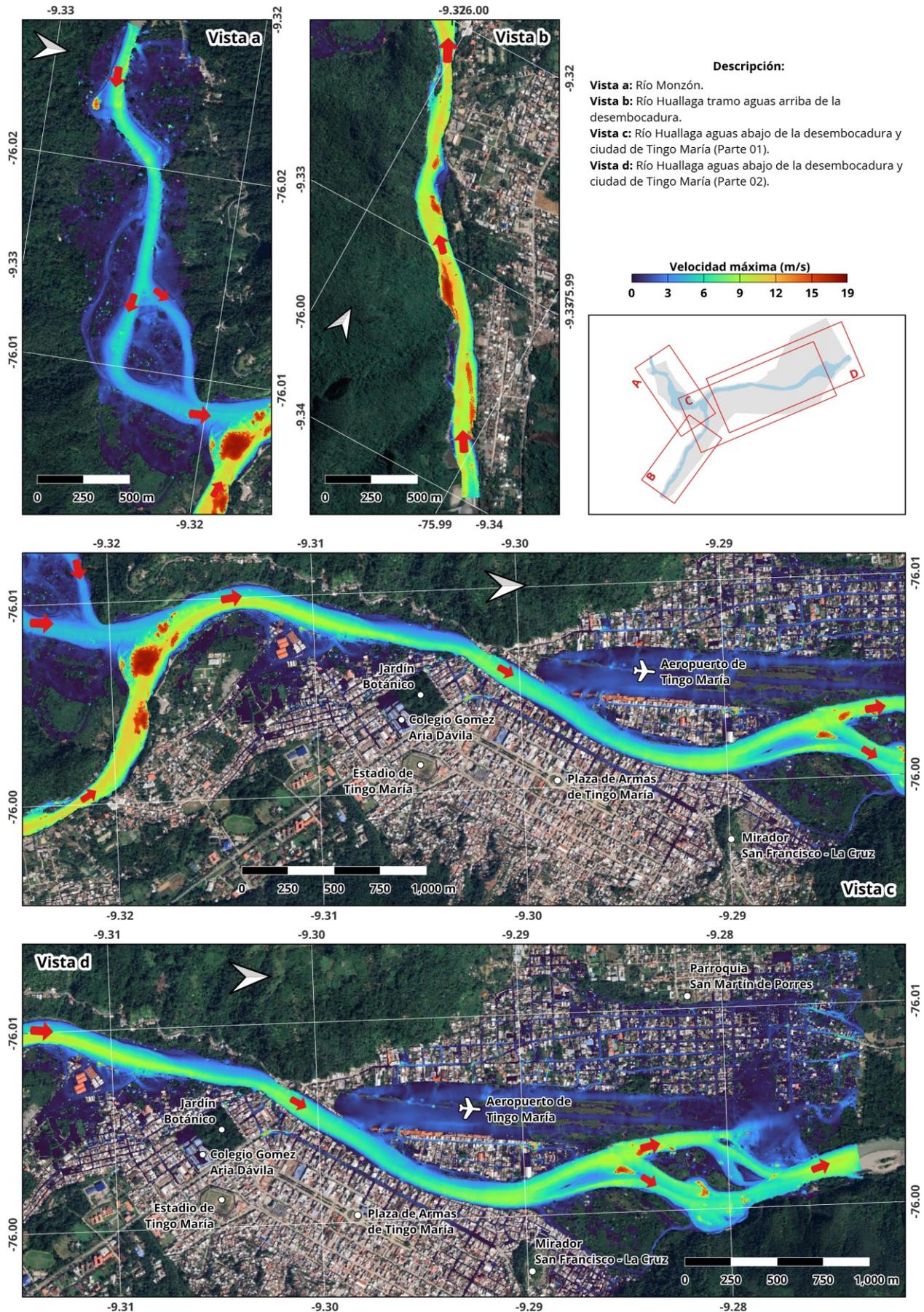


Figura 20. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 100 años.

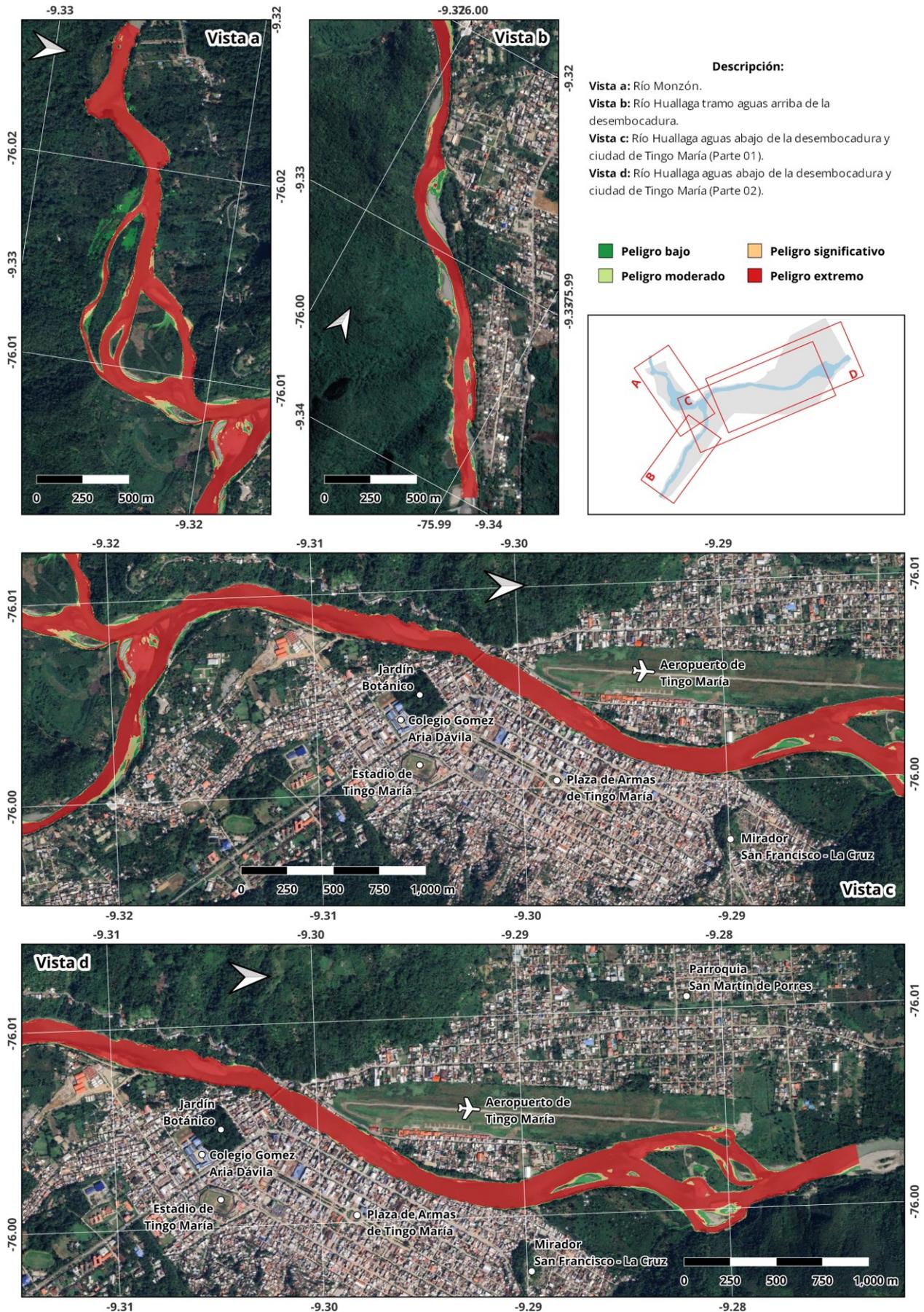


Figura 21. Peligrosidad por inundación asociado al nivel de alerta amarillo de PHISIS.

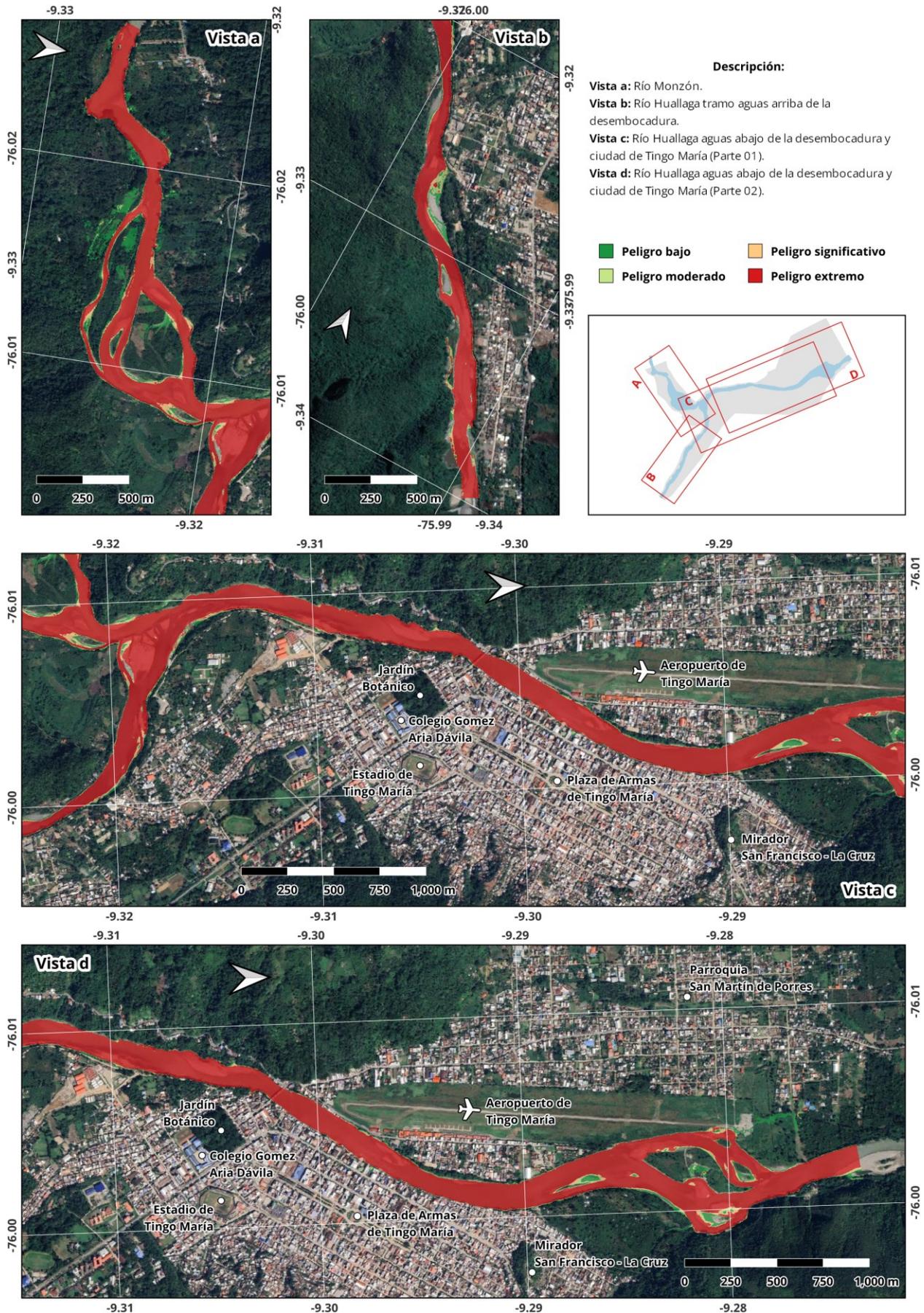


Figura 22. Peligrosidad por inundación asociado al nivel de alerta naranja de PHISIS.

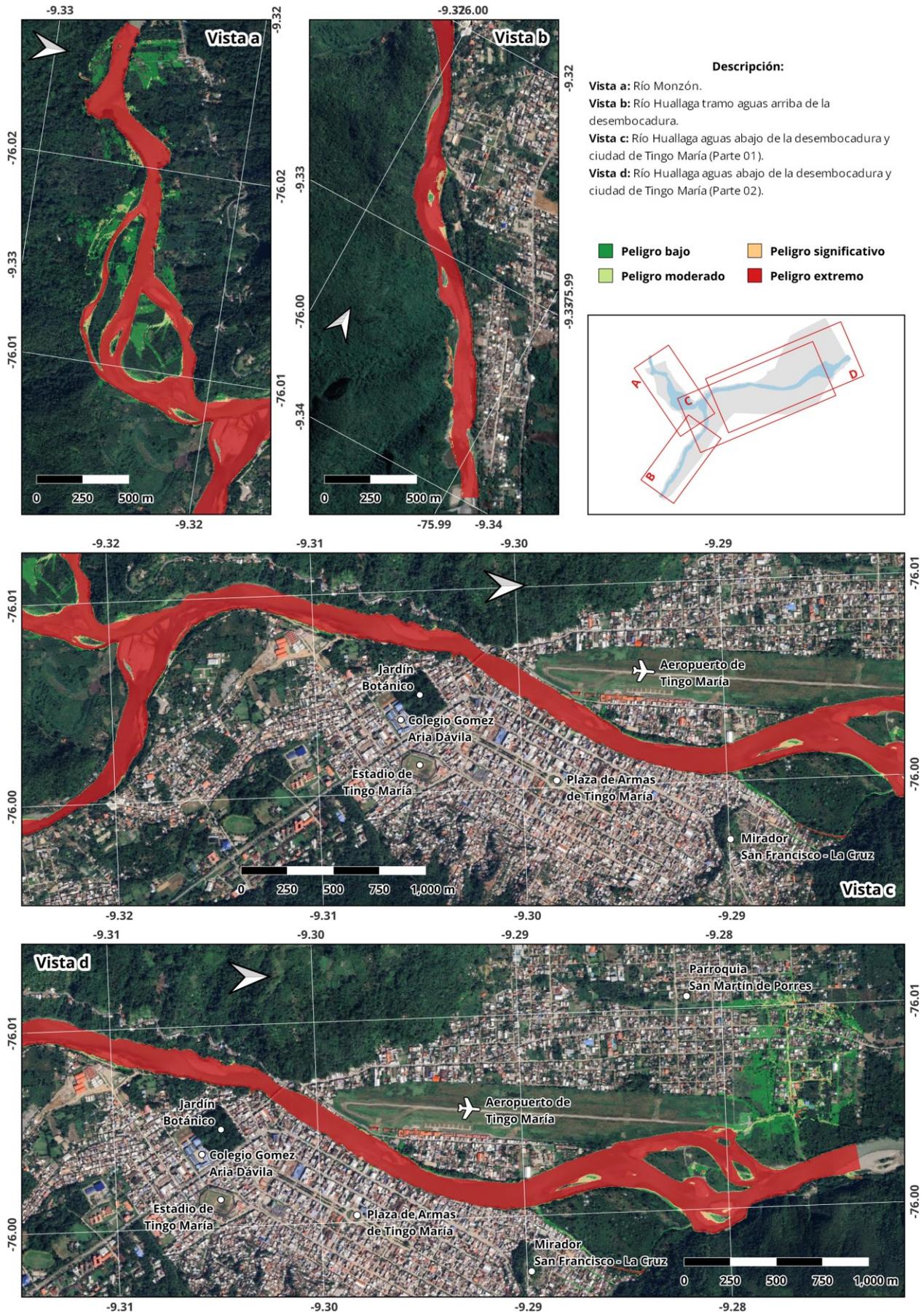


Figura 23. Peligrosidad por inundación asociado al nivel de alerta roja de PHISIS.

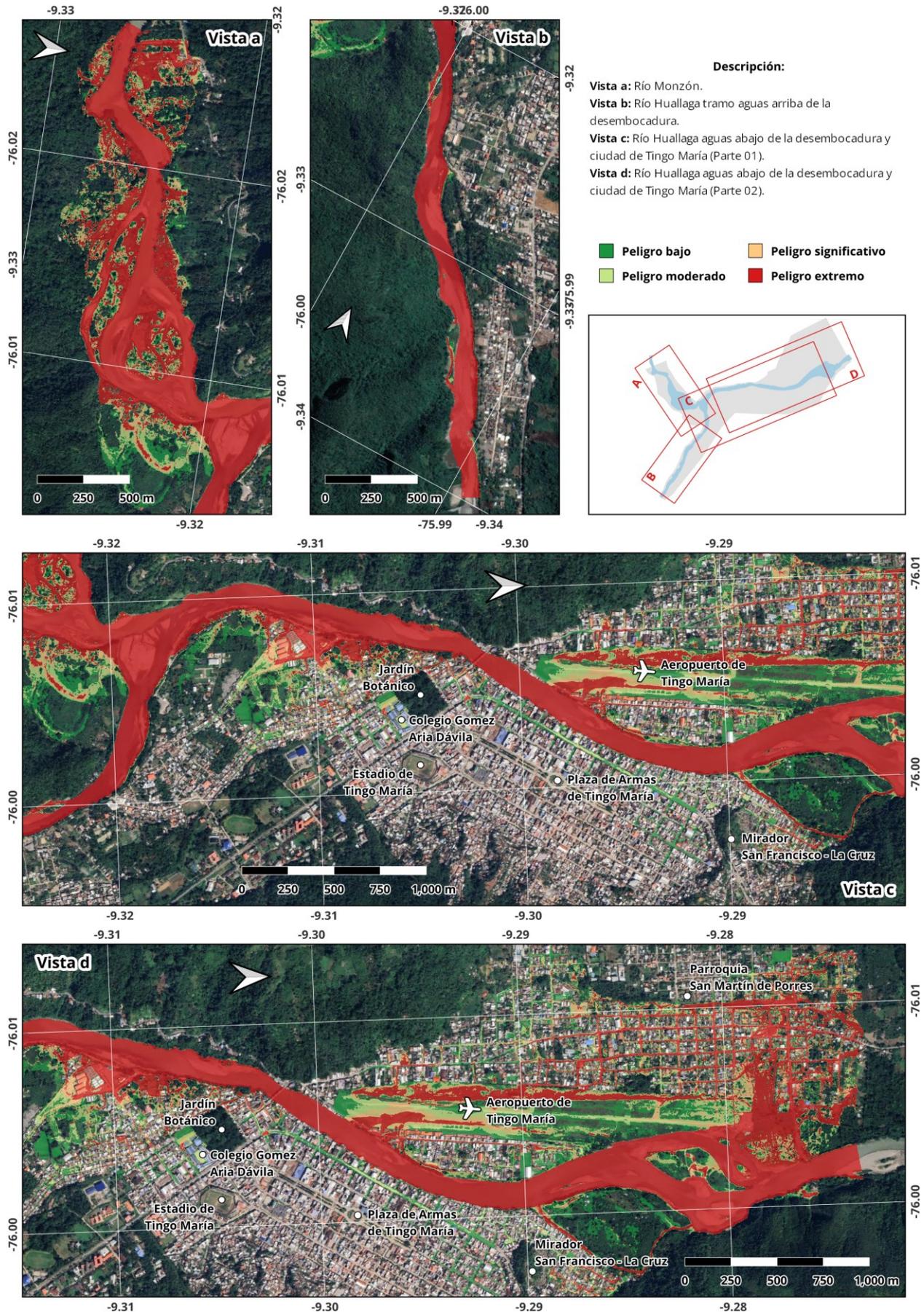


Figura 24. Peligrosidad por inundación asociado a un período de retorno de 100 años.

Los niveles de alerta del sistema PHISIS no generan escenarios de inundación significativos ni peligrosidad considerable en el ámbito de estudio. Sin embargo, el nivel de alerta rojo activa un escenario de inundación, aunque de peligrosidad baja, lo cual, en función del tiempo de arribo promedio estimado de 2 horas, valida la emisión de dicho nivel de alerta. El registro del caudal asociado a este nivel de alerta en las estaciones hidrométricas requiere la implementación de acciones inmediatas y coordinadas por parte de los responsables, con el fin de mitigar potenciales impactos adversos en la población.

Por otro lado, las simulaciones hidrológicas e hidráulicas correspondientes a máximas avenidas asociadas a distintos períodos de retorno, desde 2 hasta 1000 años, han evidenciado que estas sí generan escenarios de inundación en la ciudad de Tingo María. Este resultado pone de manifiesto la alta exposición al peligro por inundación de esta localidad, evidenciando la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo, alerta temprana y la planificación urbana.

Finalmente, se concluye que mientras los niveles de alerta de PHISIS son efectivos para advertir condiciones de peligro, las máximas avenidas constituyen un riesgo latente y significativo que exige atención prioritaria en el contexto de gestión del riesgo de desastres.

5. CONCLUSIONES

- Se ha logrado desarrollar un modelo hidráulico bidimensional del río Huallaga en el tramo Tingo María, resolviendo las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE, *Shallow Water equations*) bajo un enfoque híbrido Euleriano-Lagrangiano. Este enfoque permite capturar de manera más precisas las dinámicas del flujo.
- El modelo hidráulico fue calibrado mediante el ajuste iterativo del coeficiente de Manning utilizando los datos obtenidos en campo a través de mediciones con ADCP, asegurando la mejor representación de las condiciones hidráulicas del río.
- Los niveles de alerta amarillo y naranjas establecidos por el sistema PHISIS no corresponden a escenarios de inundación. Por el contrario, al tratarse de condiciones previas, se confirma su funcionalidad como herramienta preventiva y de gestión.
- Sin embargo, el nivel de alerta roja del sistema PHISIS si genera un evento de inundación, principalmente caracterizado por ser un peligro bajo y un tiempo de arribo hacia la zona urbana de aproximadamente 2 horas. Considerando que este nivel exige una acción inmediata, el monitoreo de los caudales correspondientes al nivel rojo proporciona una ventana operativa importante para la reducción de impactos.
- A partir de los registros de estaciones hidrométricas (Puente Bella y Puente Pérez) se han determinado caudales máximos para distintos períodos de retorno. Para esto, mediante un criterio de selección múltiple, basado en criterios como AIC, AICc, BIC y ADC, se ha determinado la distribución estadística óptima, para luego realizar estimaciones mediante los métodos de máxima verosimilitud y de momentos. Finalmente, mediante la ecuación de Fuller se obtienen los caudales máximos.
- Los resultados del modelamiento indican que todos los caudales máximos asociados a distintos períodos de retorno generan eventos de inundación que afectan a la zona urbana de la ciudad de Tingo María, evidenciando la alta exposición ante eventos extremos.
- Con base al análisis de peligrosidad e identificación de alta exposición de la ciudad de Tingo María a partir de este, se evidencia la necesidad de un Sistema de Alerta Temprana (SAT), el cual permitiría la anticipación y monitoreo de eventos de inundación.

6. DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

En cumplimiento con los principios de transparencia y acceso a la información pública, los resultados del modelamiento hidráulico desarrollado como parte de este estudio están disponibles en el repositorio de acceso abierto Zenodo. Los interesados pueden acceder a los datos mediante el siguiente enlace: <https://zenodo.org/records/14479173>.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banco Mundial (World Bank). (2011). *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Management for the 21st Century*.
- Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V. J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., Schwehr, K., Weisse, M., Stolle, F., Hanson, C., Guinan, O., Moore, R., & Tait, A. M. (2022). *Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping*. Scientific Data, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2024). *Escenarios de riesgo de lluvias para el período Abril – Junio 2024*.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). (2006). *The Flood Risks to People Methodology: Flood Risks to People Phase 2 (FD2321/TR1)*.
- Fuller, W.E. (1914). *Flood flows*. American Society of Civil Engineers Transactions, 77(1), 564-617.
- Hydrologic Engineering Center (HEC). (2016). *HEC-RAS 5.0 User's Manual*.
- Hydrologic Engineering Center (HEC). (2023). *HEC-RAS 2D User's Manual v6.4.1*.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2023). *Compendio Estadístico del INDECI 2023 de la Gestión Reactiva*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2004). *Floods in the IPCC TAR perspective*. Natural Hazards, 31(1).
- Laio, F., Di Baldassarre, G., & Montanari, A. (2009). *Model selection techniques for the frequency analysis of hydrological extremes*. Water Resources Research, 45(7). <https://doi.org/10.1029/2007WR006666>
- Marsh McLennan. (2021). *Sunk costs: The socioeconomic impacts of flooding*. Rethinking Flood Series, Report 1.
- Ojha, V., Fidkowski, K., & Cesnik, C. E. (2021). *Adaptive Mesh Refinement for Fluid-Structure Interaction Simulations*. AIAA SCITECH 2022 Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0731>
- Simonov, Y. (2017). *Latest Tools and Methodologies for Flood Modeling*.
- Smith, T. J., & Marshall, L. A. (2008). *Bayesian methods in hydrologic modeling: A study of recent advancements in Markov chain Monte Carlo techniques*. Water Resources Research, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2007WR006705>
- Vreugdenhil, C. B. (1994). *Numerical Methods for Shallow-Water Flow*. Water Science and Technology Library.

8. ANEXOS

8.1 Profundidad Máxima de Inundación

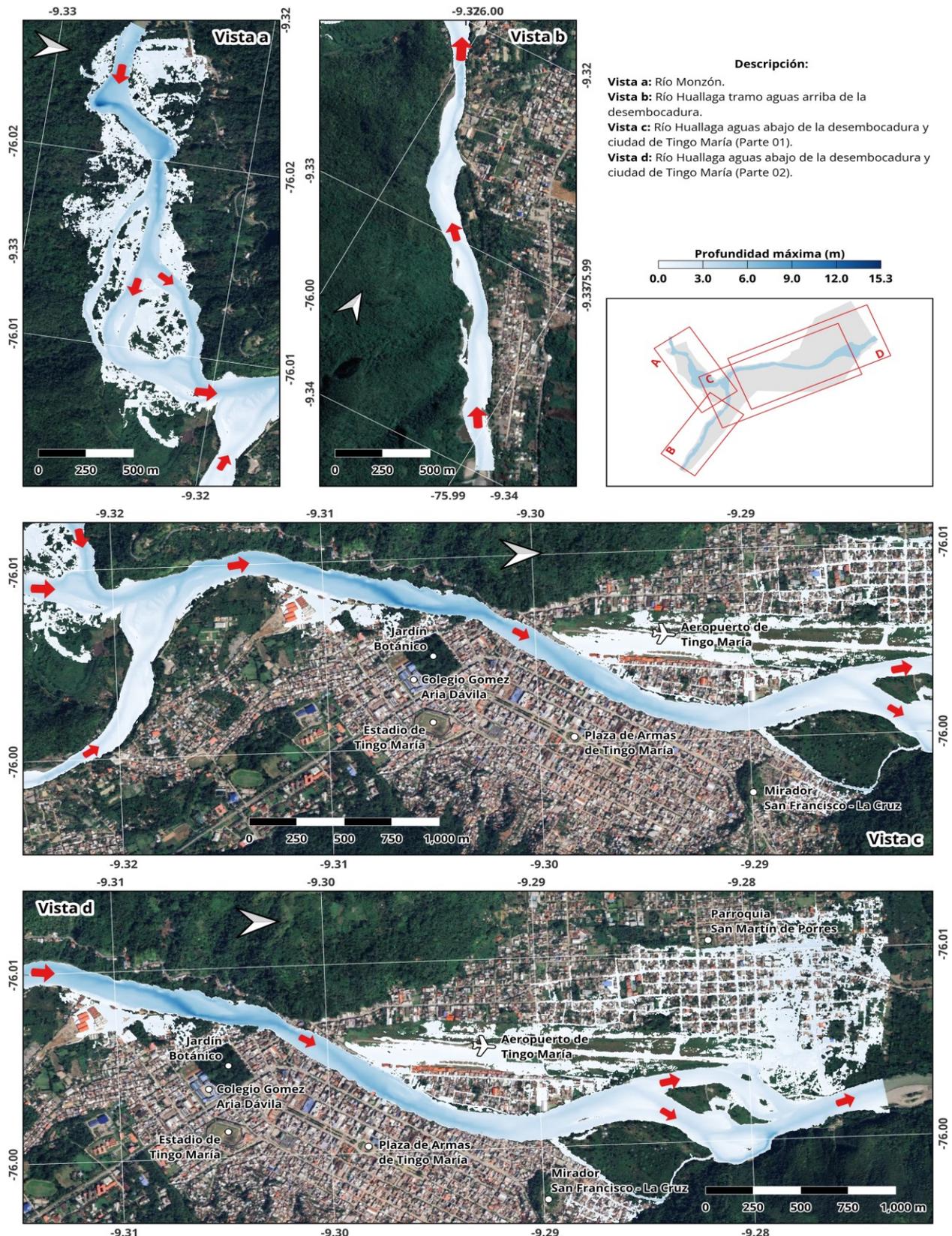


Figura A-1. Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 2 años.

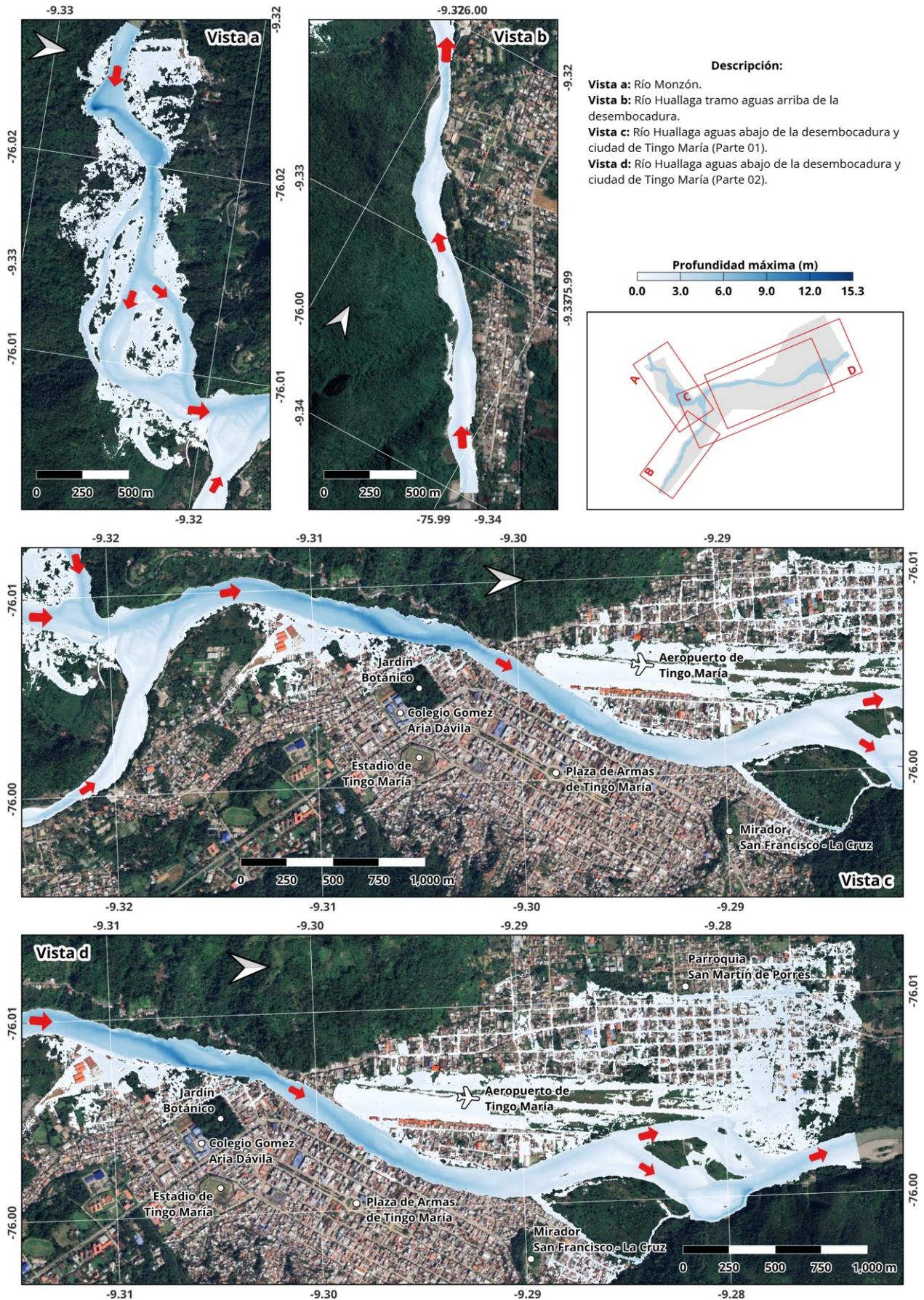


Figura A-2. Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 5 años.

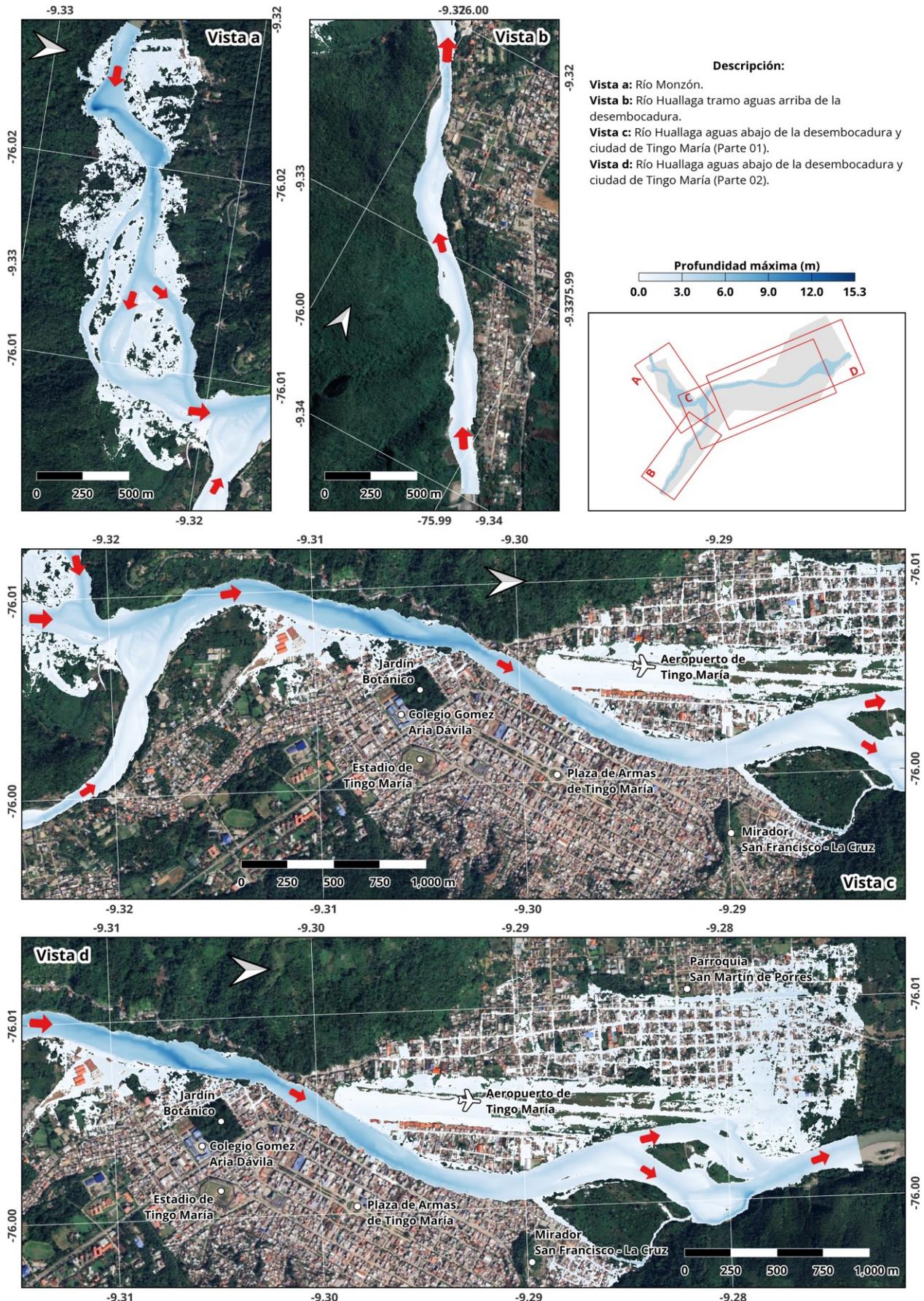


Figura A-3. Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 10 años.

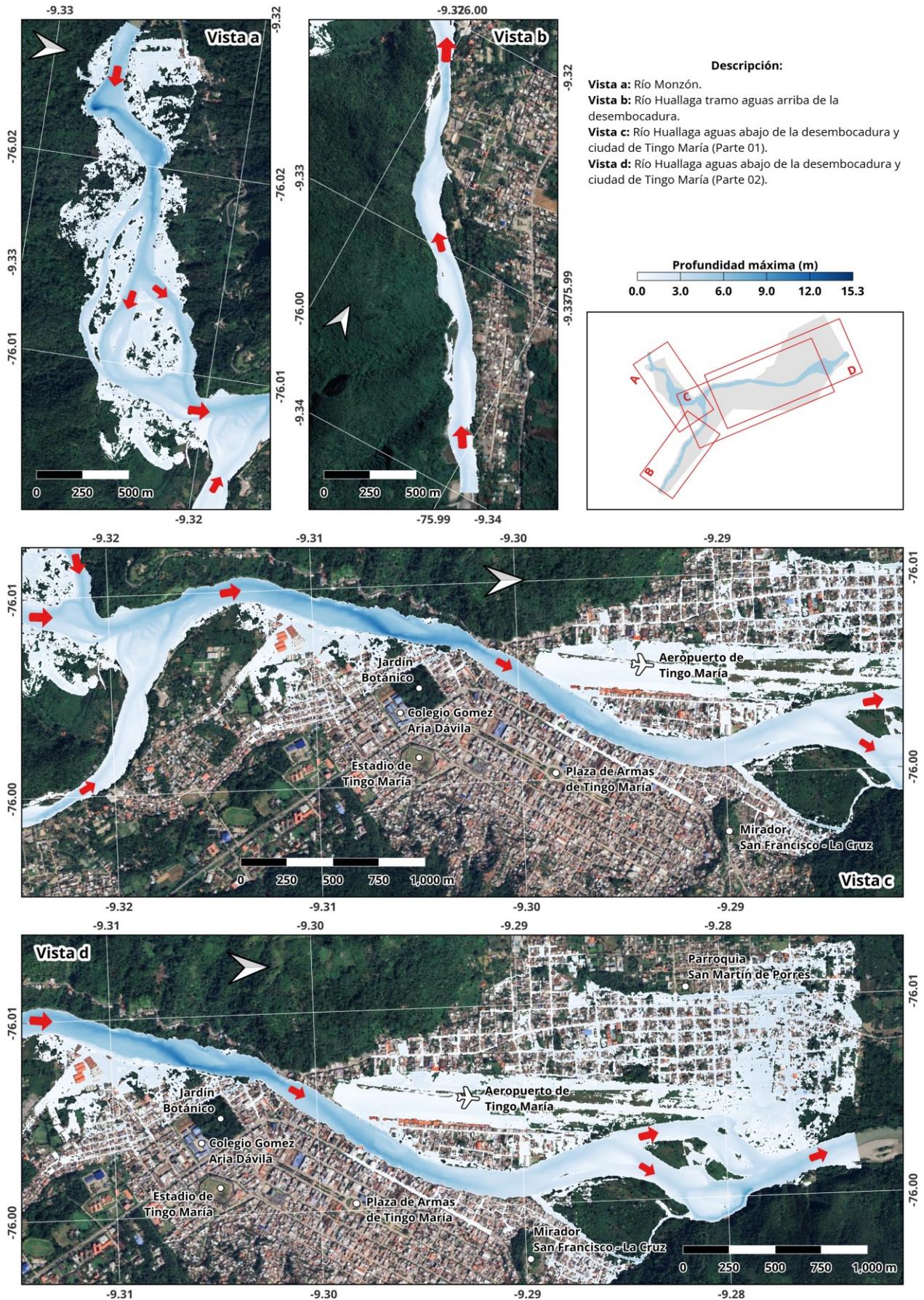


Figura A-4. Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 25 años.

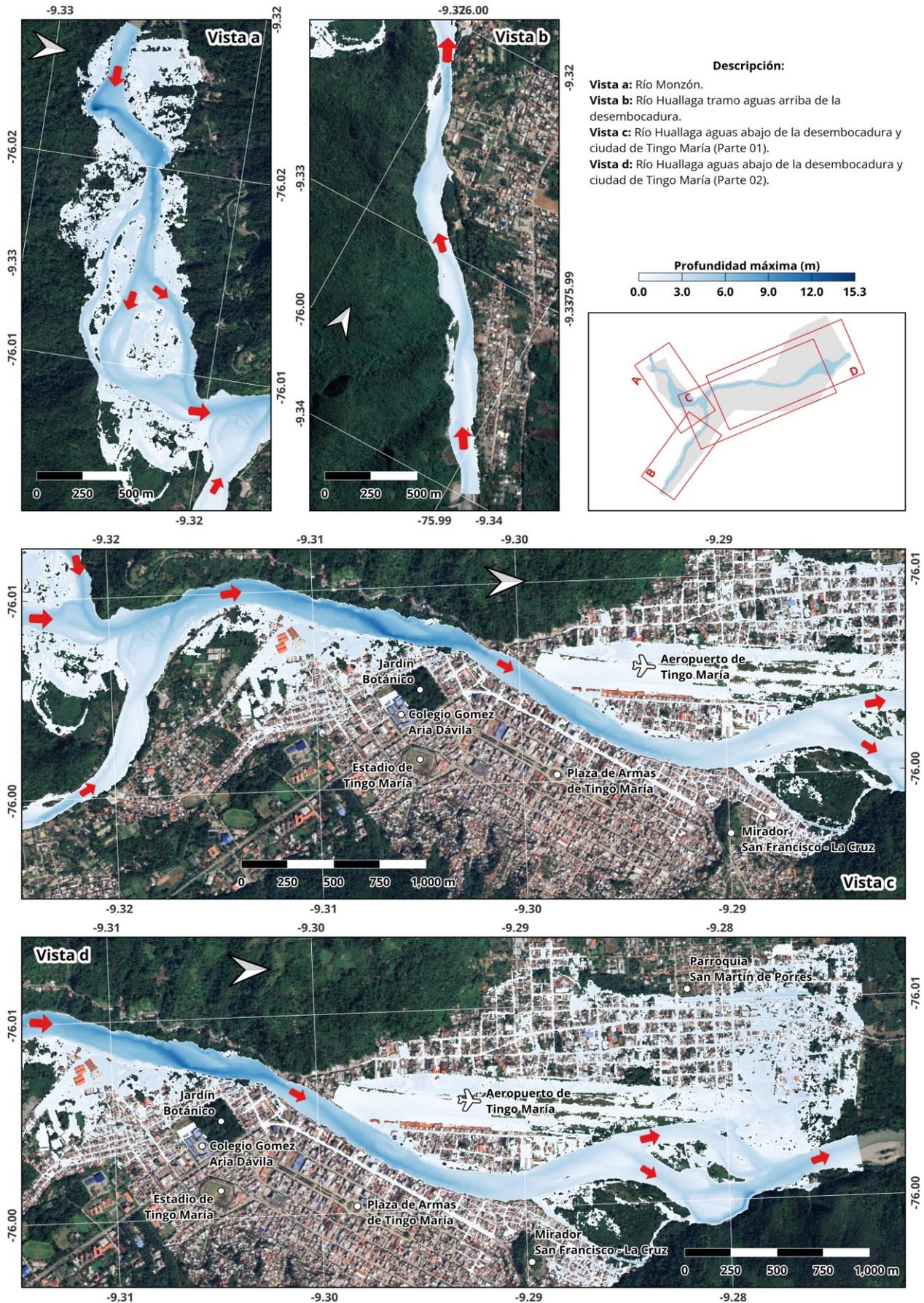


Figura A-5. Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 50 años.

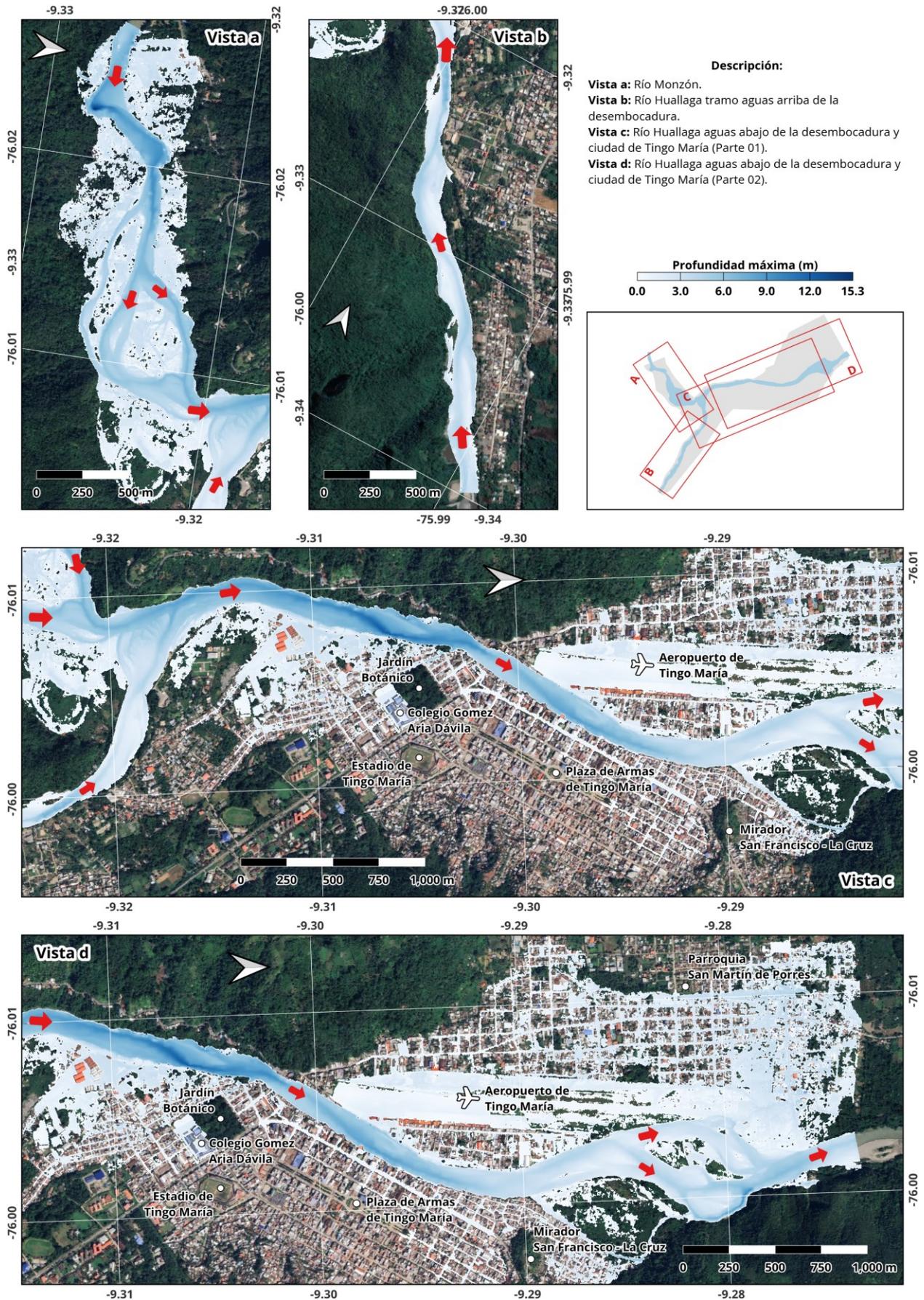


Figura A-6. Profundidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 200 años.

8.2 Velocidad Máxima de Inundación

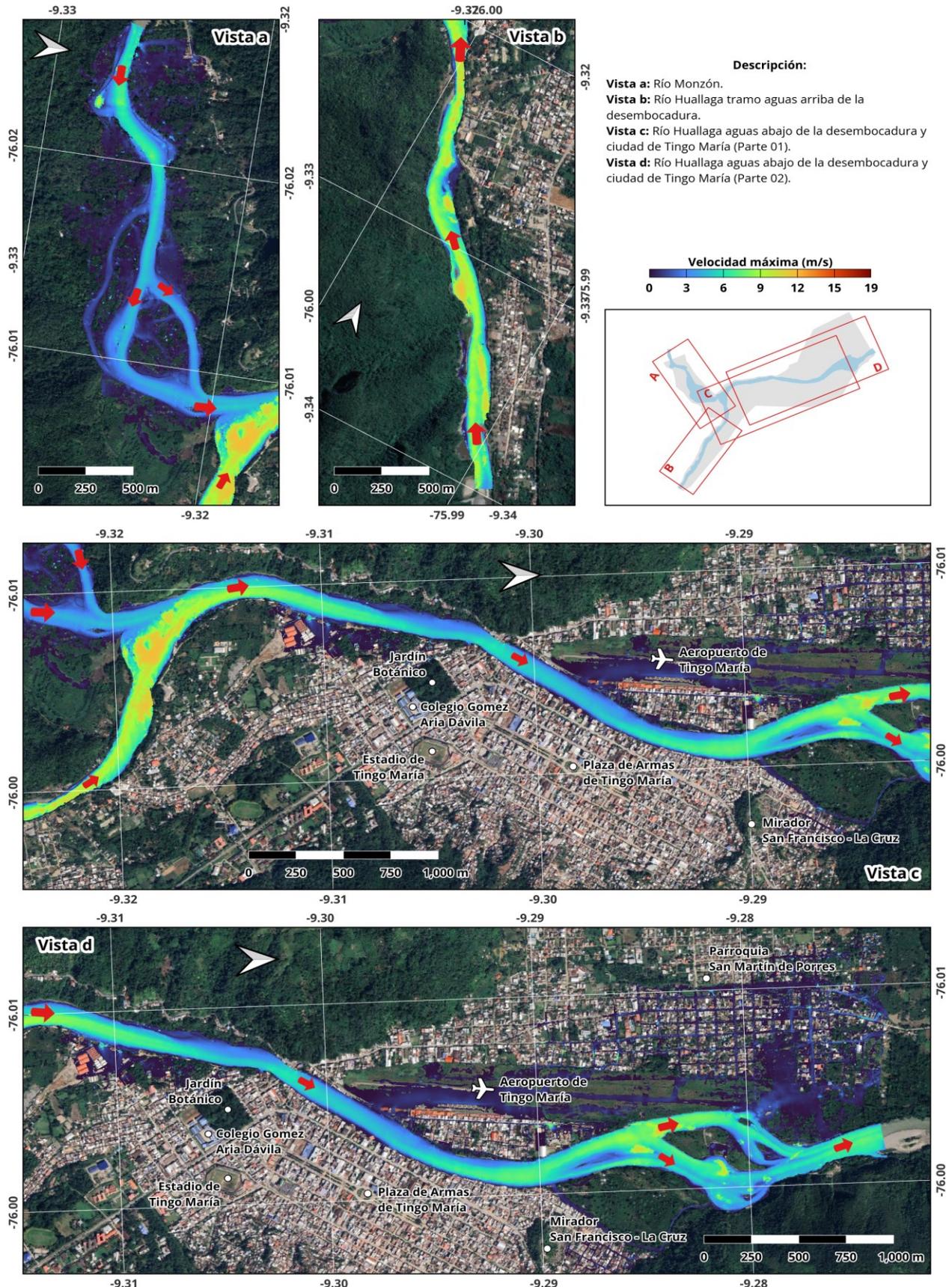


Figura A-7. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 2 años.

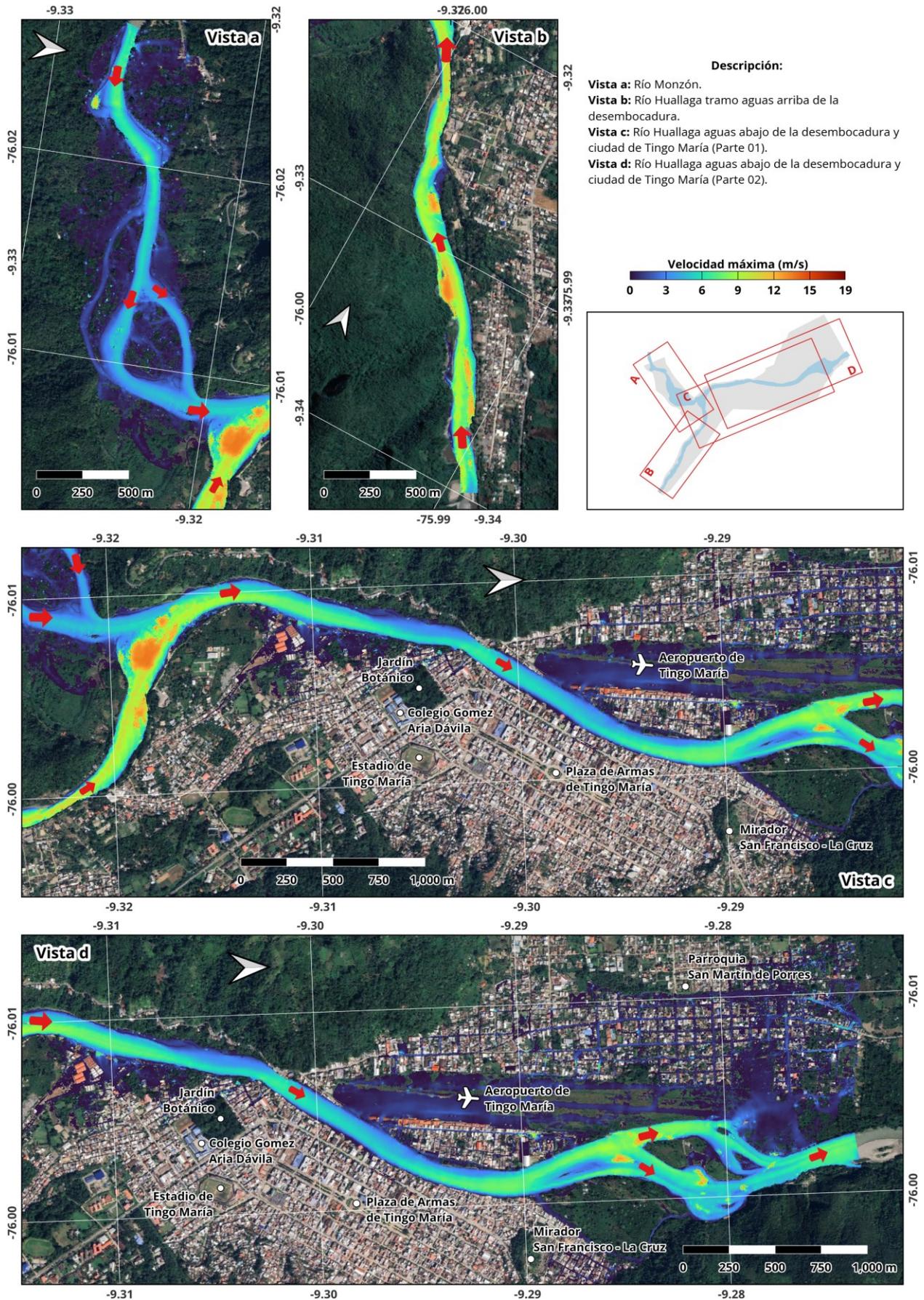


Figura A-8. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 5 años.

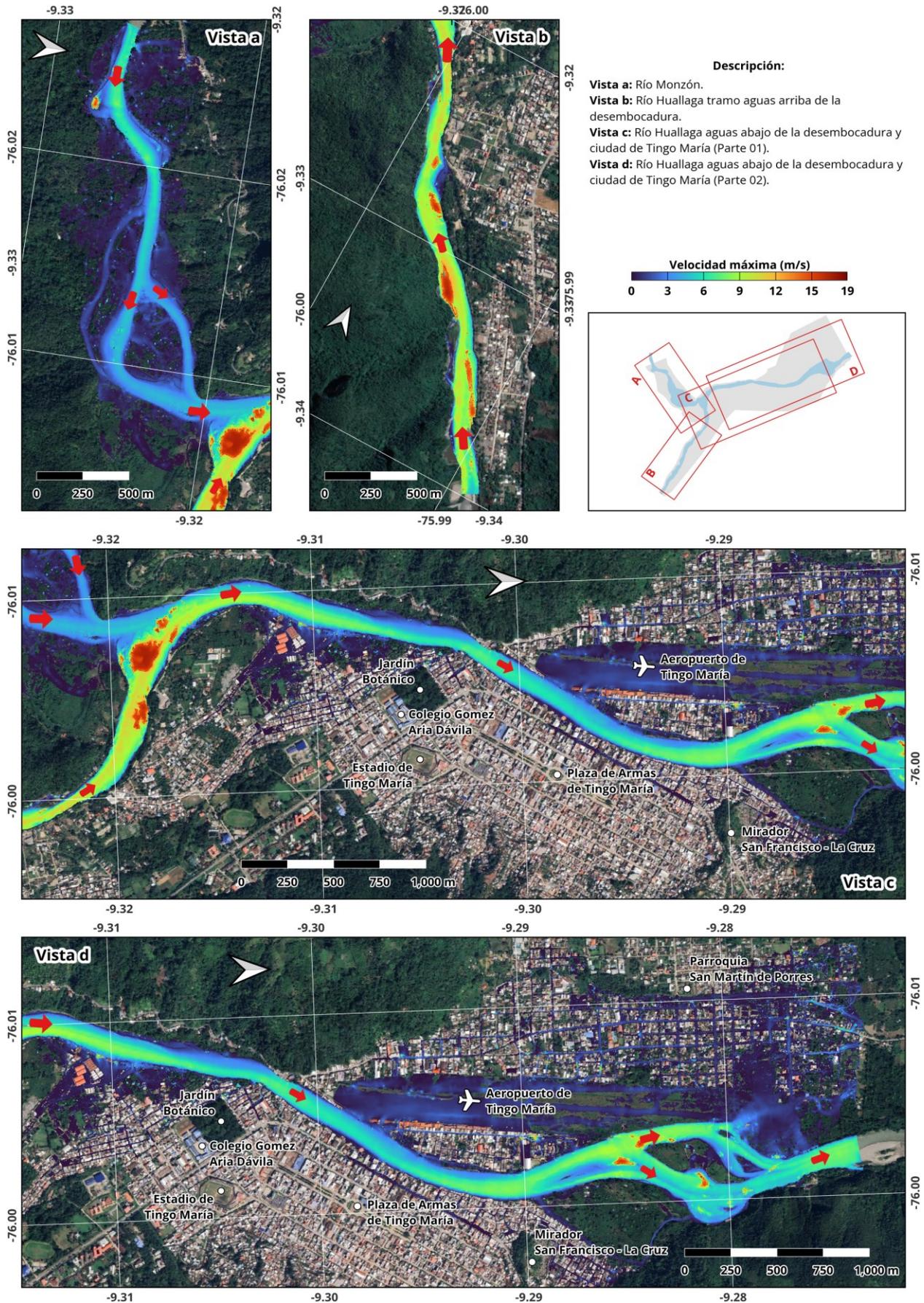


Figura A-9. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 10 años.

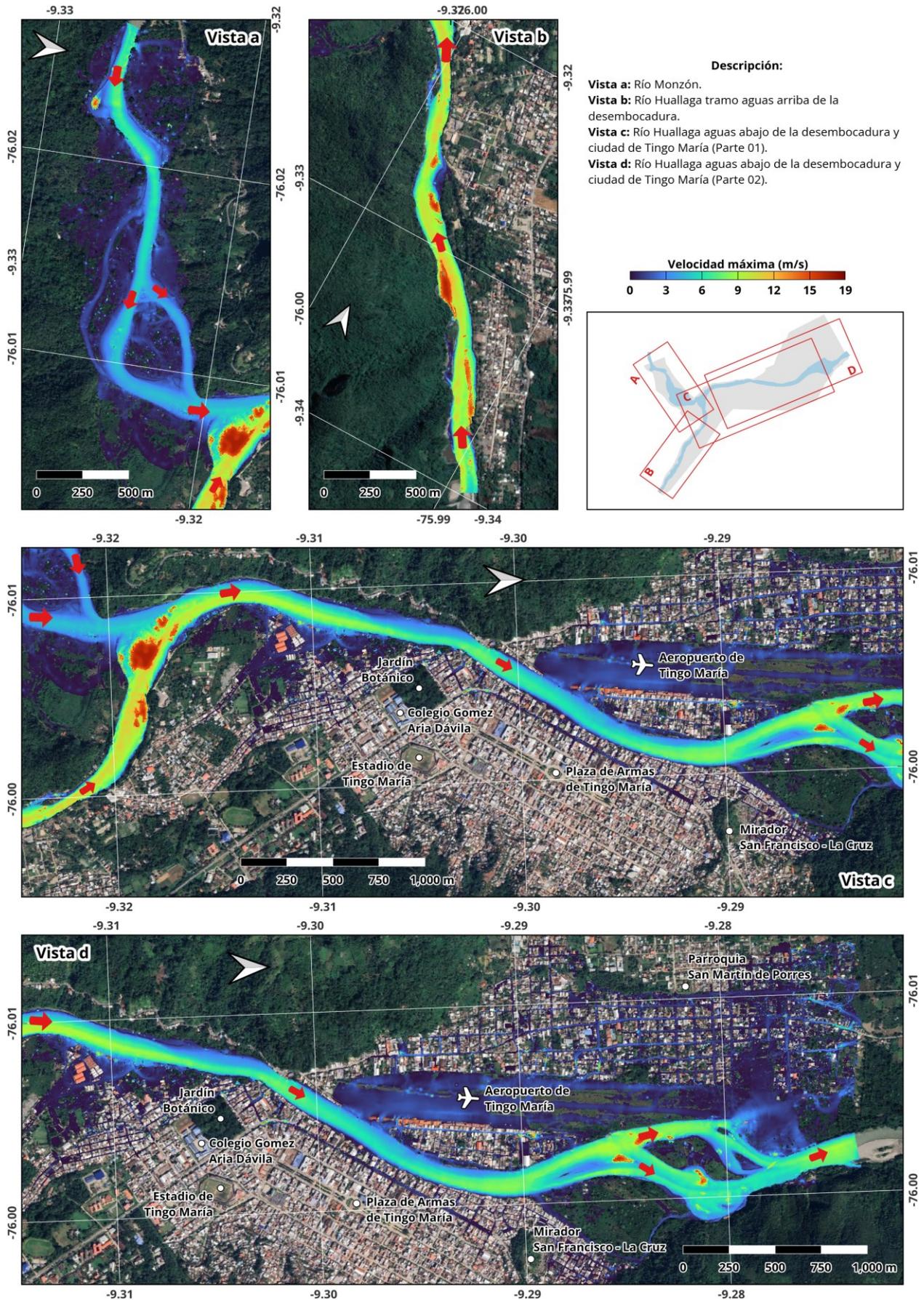


Figura A-10. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 25 años.

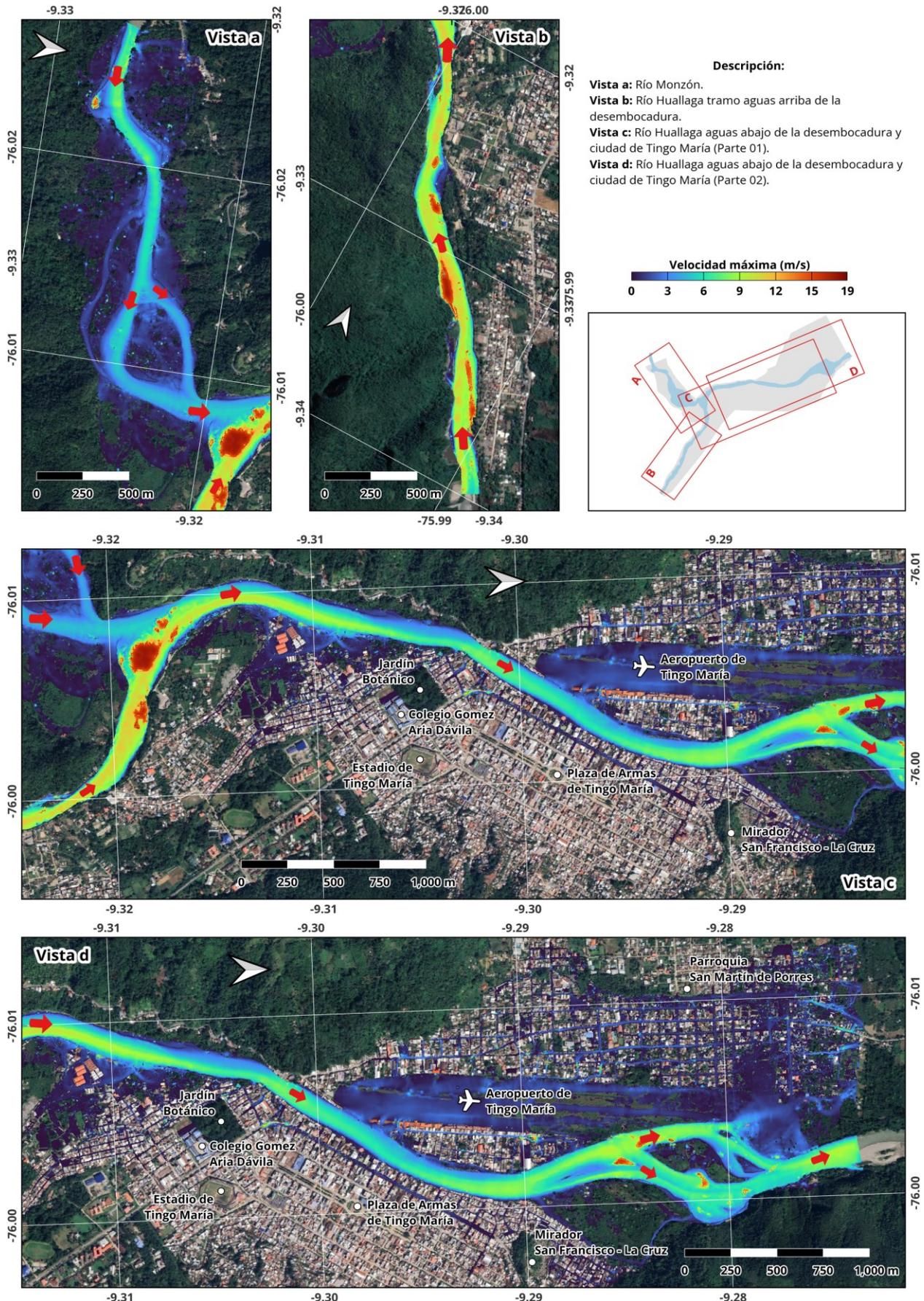


Figura A-11. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 50 años.

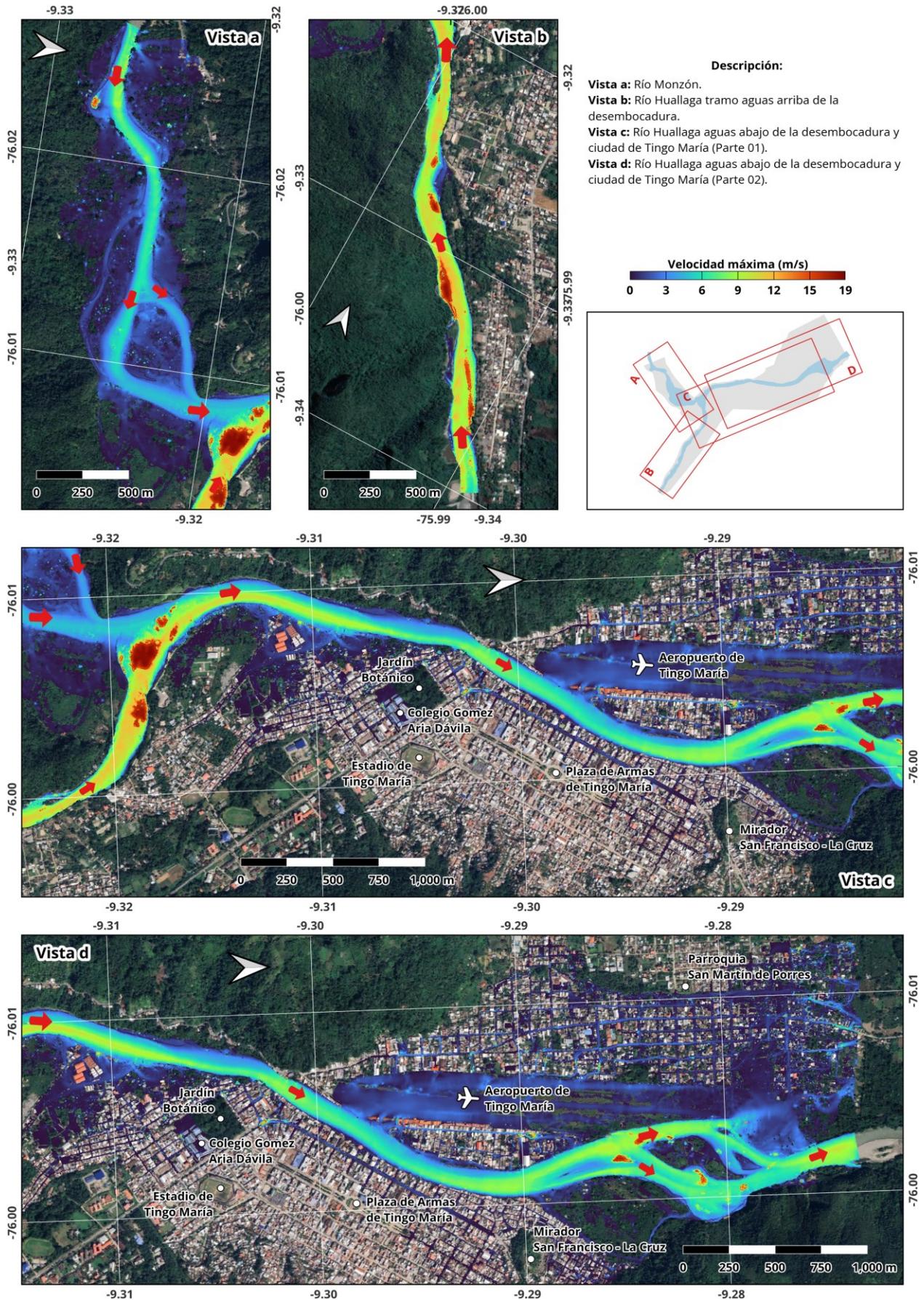


Figura A-12. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 200 años.

8.3 Peligrosidad por Inundación

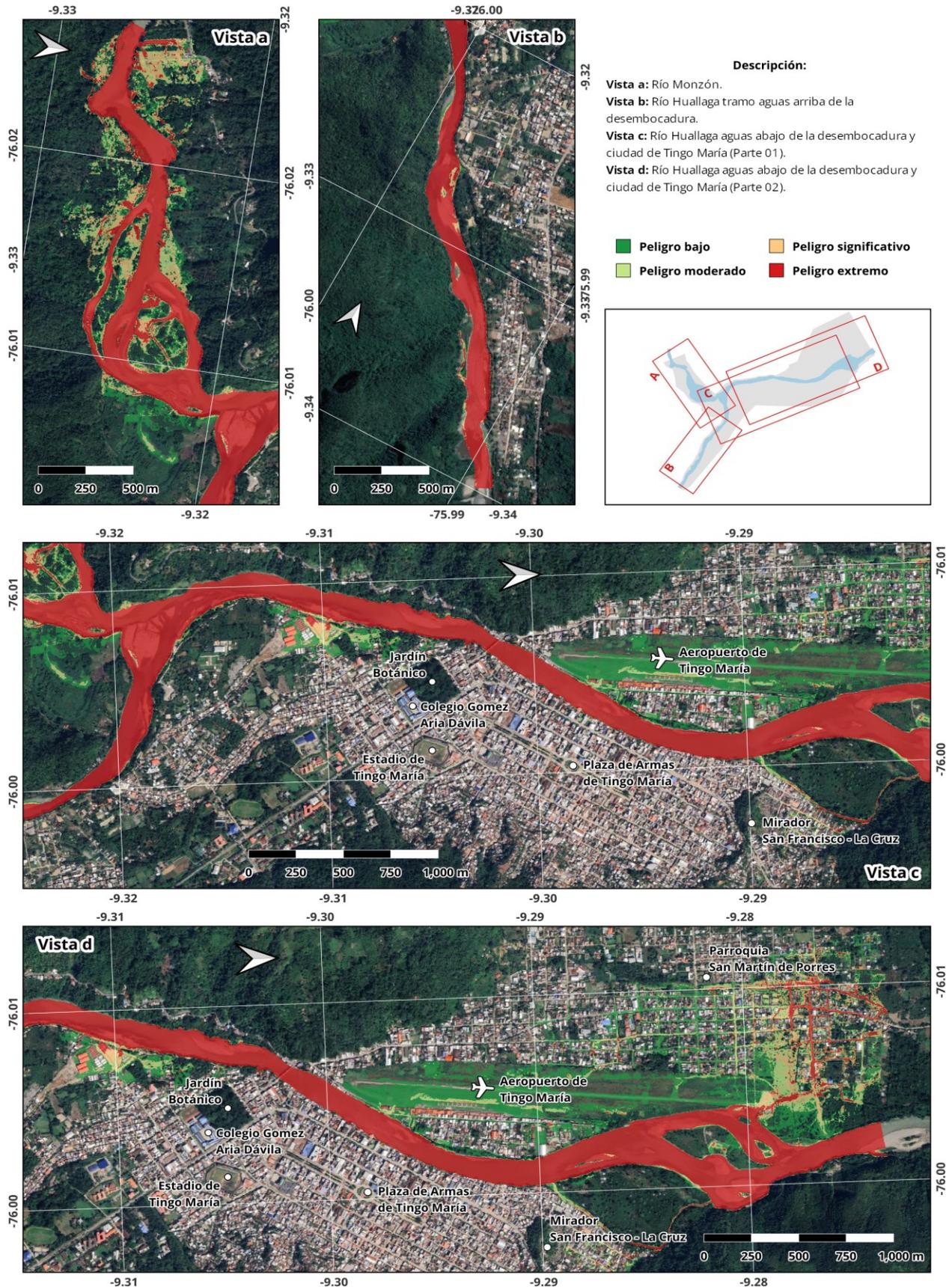


Figura A-13. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 2 años.

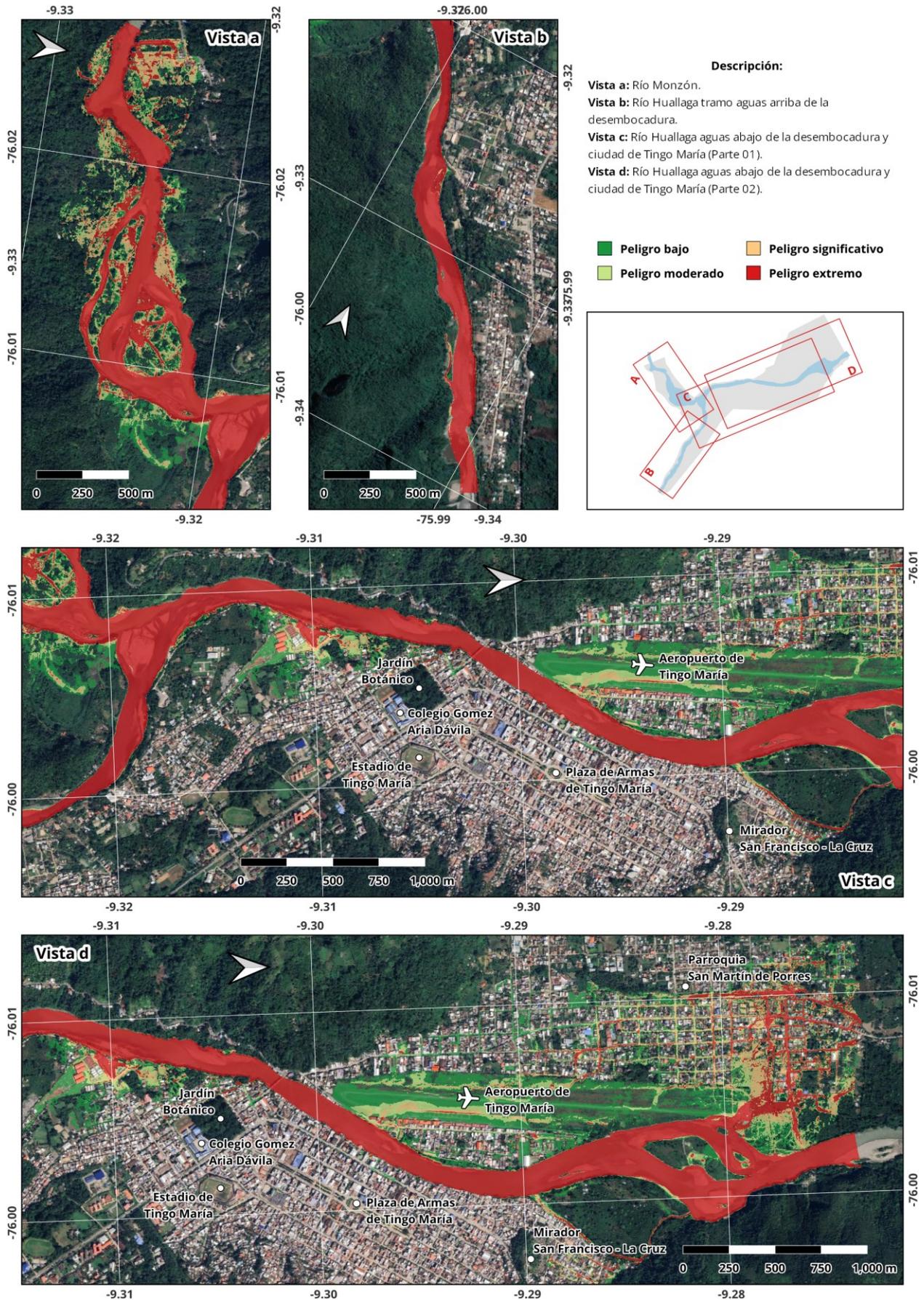


Figura A-14. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 5 años.

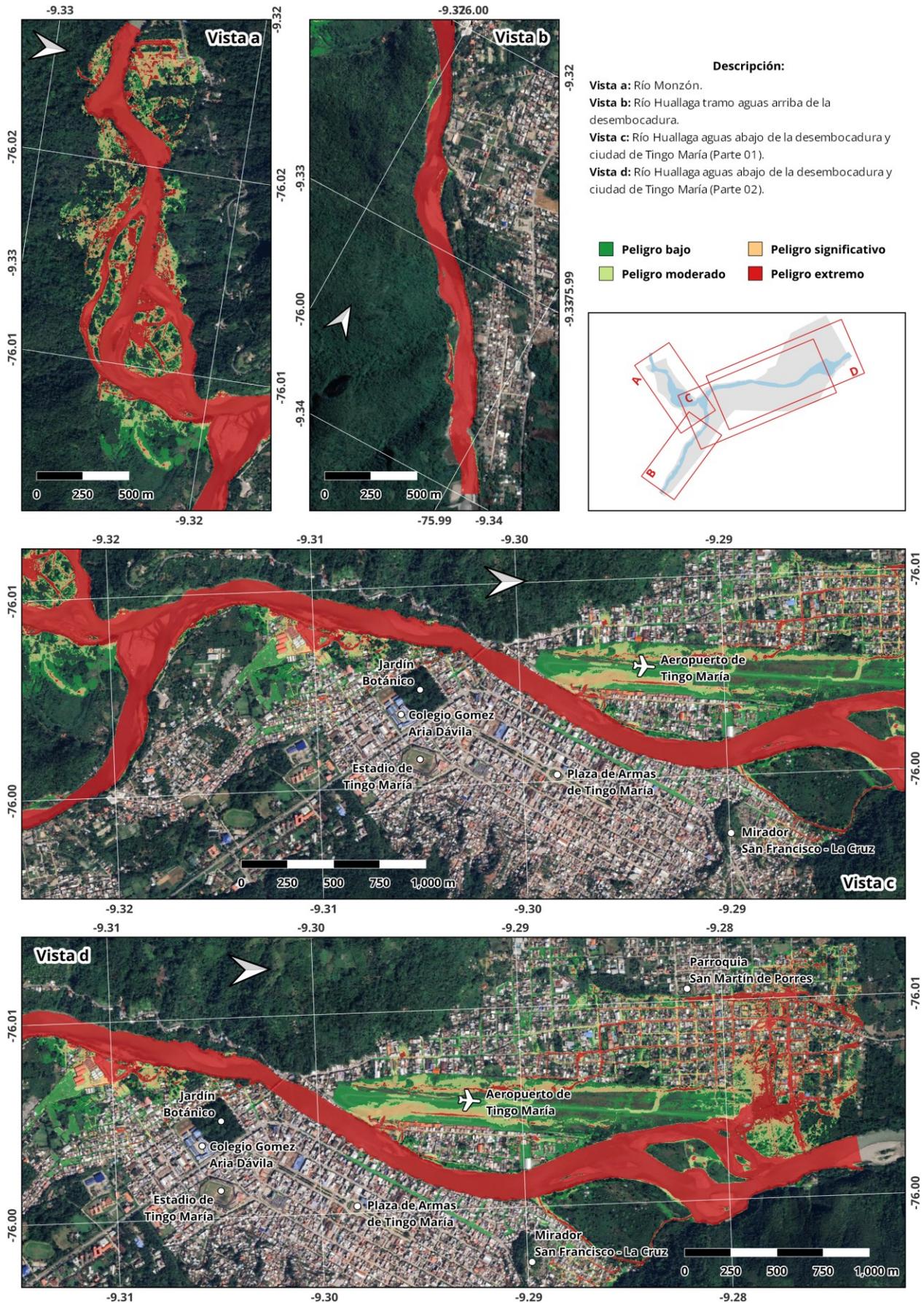


Figura A-15. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 10 años.

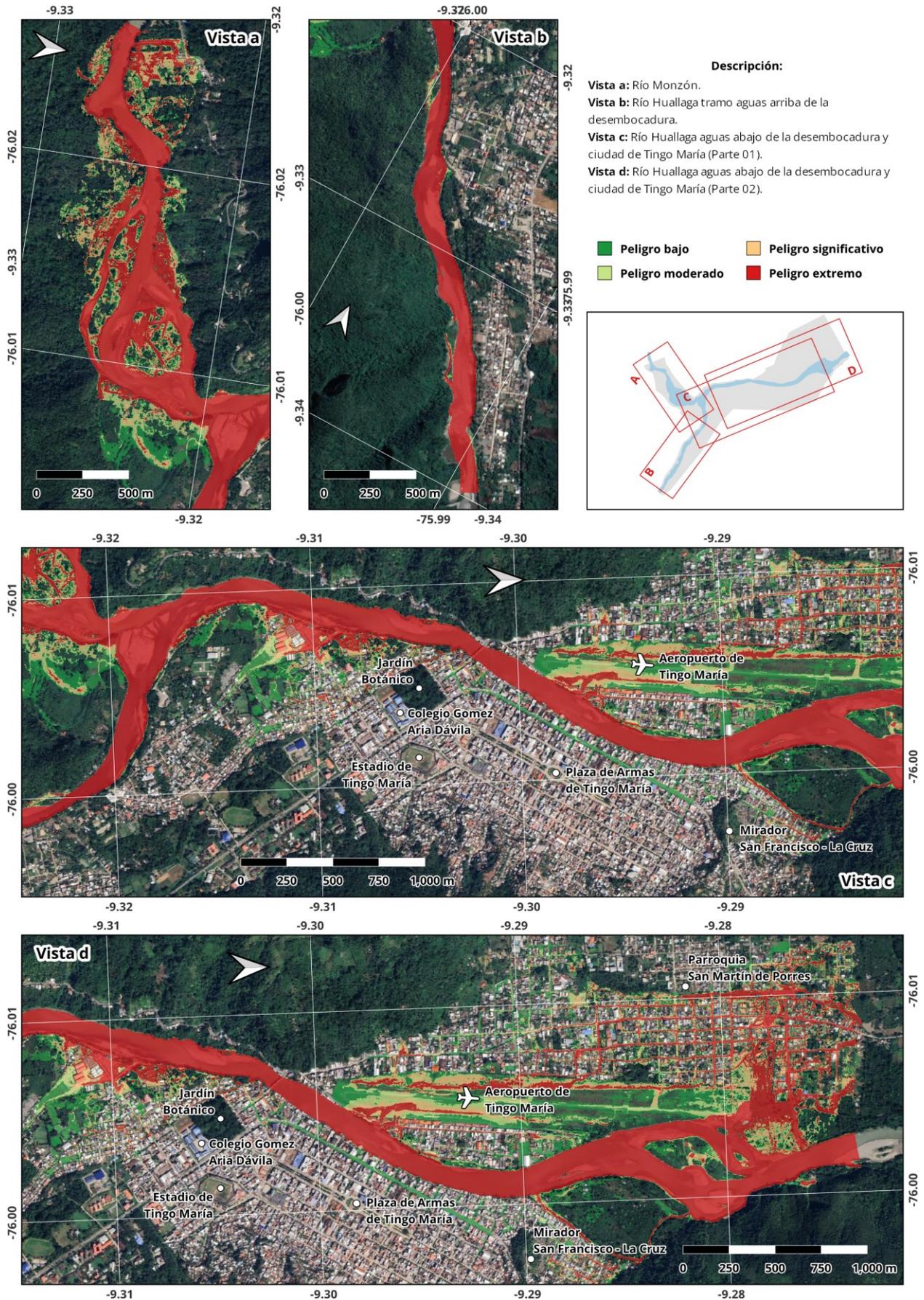


Figura A-16. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 25 años.

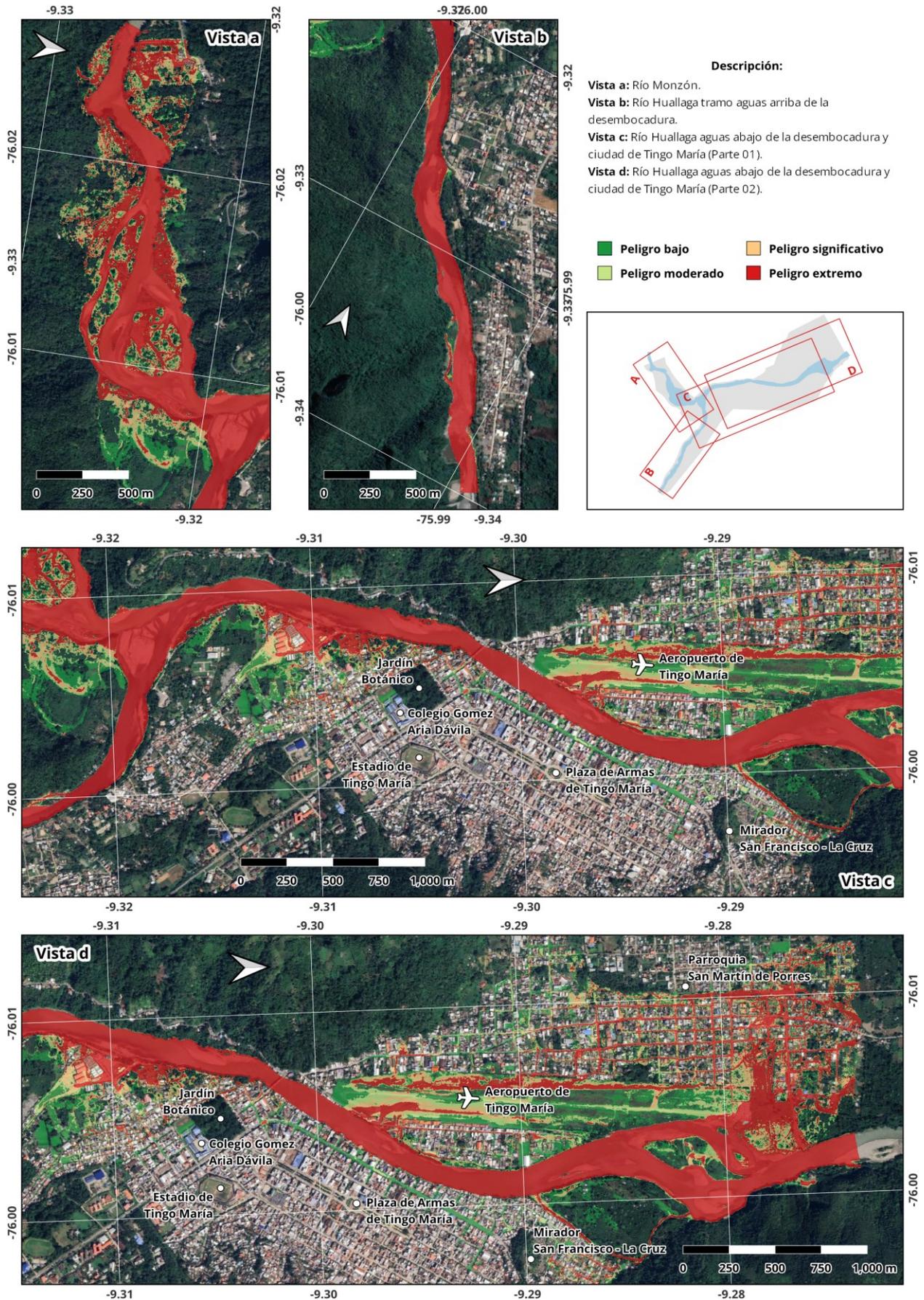


Figura A-17. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 50 años.

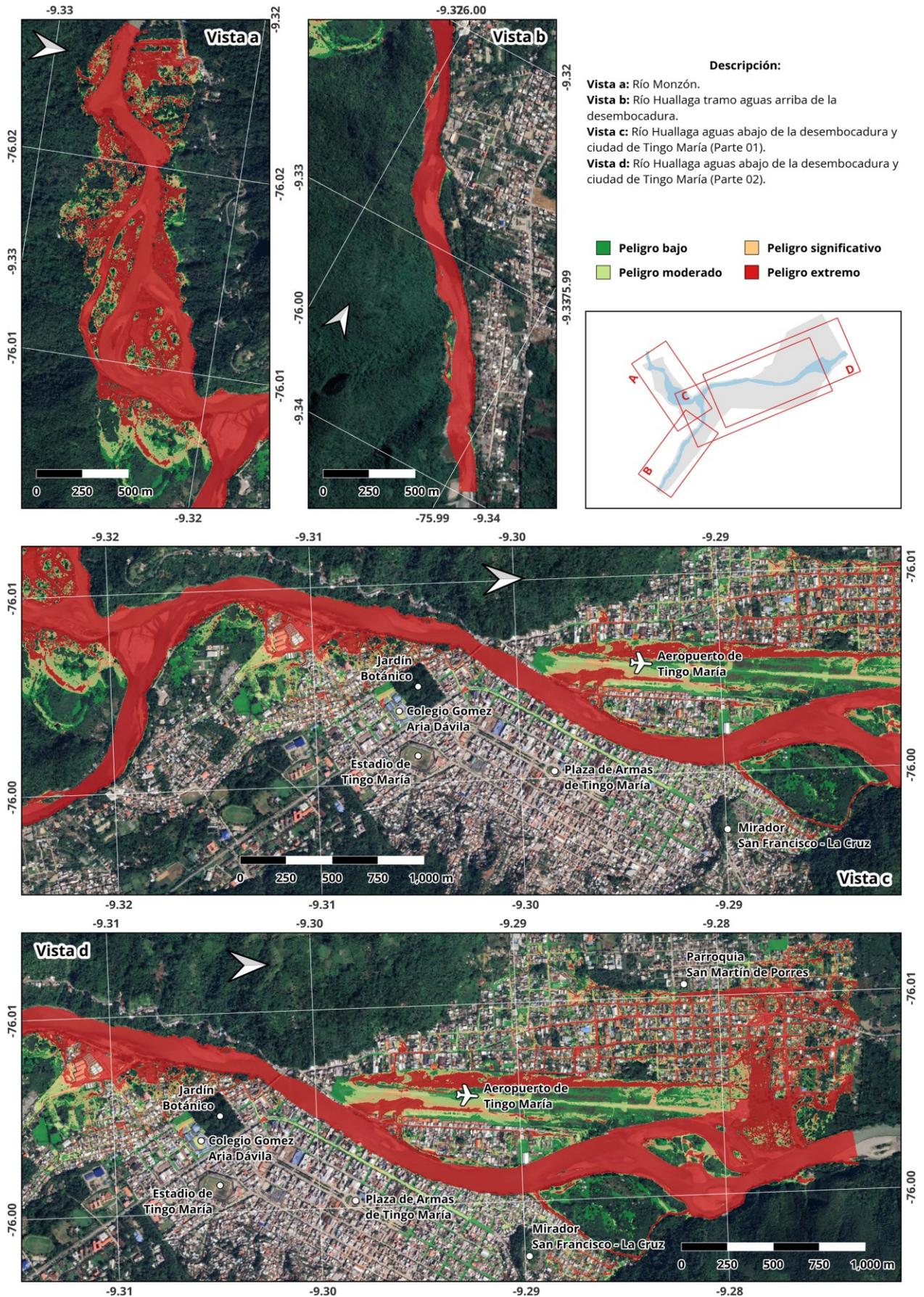


Figura A-18. Velocidad máxima de inundación asociada a un período de retorno de 200 años.