

Control de las inundaciones en el valle del Río Tumbes mediante la habilitación de un cauce de alivio – Simulación hidráulica

Control of floods in the Tumbes River Valley by enabling a relief channel - Hydraulic simulation

Kevin Erick Elizalde Carrillo; Fiorela Escobar Mena;
Napoleón Puño Lecarnaque*

Resumen

El dren Correntoso y el dren El Piojo constituyen cauces antiguos del río Tumbes; estos podrían aprovecharse como cauces de alivio durante períodos de crecida para reducir los efectos de las inundaciones en la parte baja del valle. Se construyó un Modelo Hidrodinámico Bidimensional, empleando mallas flexibles, con el software MIKE 21 Flow Model FM desarrollado por DHI, representando el valle del Río Tumbes con un área de 143,10 km², considerado desde la estación El Tigre (Caserío Higuierón) hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico. Las simulaciones permitieron determinar el caudal mínimo que genera desbordes en el tramo de estudio, siendo su valor aproximadamente igual a 723 m³/s. El cauce de alivio se diseñó considerando las dimensiones actuales del tramo que cruza por el puente El Piojo. Comparando la inundación del valle entre la situación actual y la situación con el cauce de alivio, los resultados nos indican que para caudales menores a 1000 m³/s que se registren en la estación El Tigre, las áreas inundables en la margen izquierda del río, aguas abajo del inicio del cauce de alivio se reducirían hasta en 100%, y para caudales entre 1000 a 1400 m³/s se reducen hasta en 75%. La habilitación de un cauce de alivio permite mitigar considerablemente el efecto de las inundaciones aguas abajo del sector San Jacinto y por tanto reducir las pérdidas económicas de las actividades productivas y los daños en las infraestructuras que año a año se generan por el desborde del Río Tumbes.

Palabras clave: Cauce de alivio; MIKE 21fm; aliviadero; El Piojo; Correntoso.

Abstract

The Correntoso drainage and the El Piojo drainage are ancient riverbed of the Tumbes River; these could be used as relief channels during periods of flood to reduce the effects of flooding in the lower part of the valley. A two-dimensional hydrodynamic model was constructed using flexible meshes with the MIKE 21 Flow Model FM software developed by the DHI, representing the Tumbes River valley with an area of 143.10 km², considered the El Tigre (Village Higuierón) station to the mouth of the river in the Pacific Ocean. The simulations allowed determining the minimum flow that generates overflows in the study section, being its approximately equal to 723 m³/s. The relief channel was designed considering the current dimensions of the section that crosses the El Piojo Bridge. Comparing the valley flood between the current situation and the situation with the relief channel, the results indicate that for flow rates of less than 1000 m³/s recorded at El Tigre station, flood areas on the left bank of the river, downstream of the relief channel start, would be reduced by up to 100%, and for flows between 1000 and 1400 m³/s reduced by up to 75%. Enabling of a relief channel makes it possible to considerably mitigate the effect of flooding downstream of the San Jacinto sector and thereby reduce the economic losses of productive activities and damage to the infrastructures generated year by year by the overflow of the Tumbes River.

Keywords: Channel of relief; MIKE 21fm; spillway; El Piojo; Correntoso.

Introducción

El valle del Río Tumbes es afectado cada año por las inundaciones debido a la agradación - sedimentación de su cauce, que reduce la capacidad de su caja hidráulica, originando en las épocas de avenidas, el desborde e inundación de las áreas agrícolas instaladas en el valle, afectando a su producción e infraestructura, así como la pérdida de terrenos por la erosión de riberas.

Controlar una inundación es mitigar sus efectos. Es una combinación de medidas estructurales y no estructurales que permiten a las poblaciones que viven cerca de los ríos minimizar sus pérdidas y mantener una convivencia armónica con el río (Soluciones Prácticas, 2015). Como refiere Maza y Franco (1997), dentro de las medidas estructurales, las acciones más efectivas son los desvíos permanentes y presas de almacenamiento, ya que disminuyen el gasto máximo de la avenida en todo el tramo del río aguas abajo.

Los desvíos o cauces de alivio consisten en desviar un cierto volumen de agua del cauce principal y conducirlo, por medio de un canal, hacia el mar o a otra cuenca. En la margen izquierda, el dren El Correntoso y su prolongación el dren El Piojo, son cauces antiguos del Río Tumbes (Reyes, 2003), actualmente cerrados por estructuras de protección y aprovechados como

drenes para evacuar los excedentes del regadío de las áreas de cultivo (Figura 1), sin embargo, en épocas de avenidas, al no encontrarse en condiciones adecuadas para funcionar como aliviios, se dificulta la rápida evacuación del agua excedente (Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes [PEBPT], 2014).

Se plantea desviar parte de las crecidas del Río Tumbes mediante cauces de alivio, considerando que el dren Correntoso y el dren El Piojo constituyen cauces potenciales de alivio por ser cauces antiguos del río. Para determinar el efecto que produciría la habilitación y adecuación de estos drenes como cauces de alivio, se construyó un modelo Hidrodinámico bidimensional, empleando mallas flexibles, con el software MIKE 21fm desarrollado por DHI, representando el valle del Río Tumbes abarcando un área de 143,10 km² desde la estación El tigre (Caserío Higuerón) hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico; y se simuló las crecidas e identificó las zonas de desborde e inundación en la margen izquierda del río, determinando el caudal a aliviar para disminuir las inundaciones, diseñando el Cauce de alivio para luego realizar la comparación entre la inundación del valle entre la situación actual y la situación con el cauce de alivio.

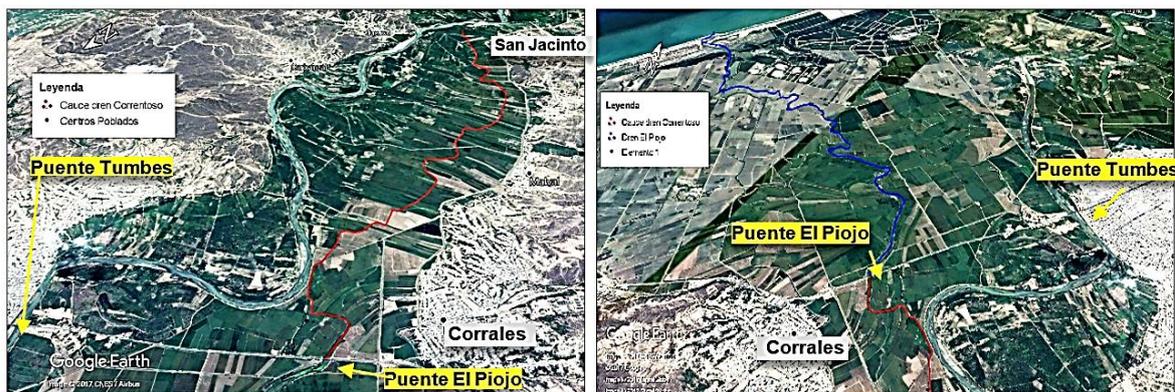


Figura 1. Superior, Cauce del dren Correntoso (rojo). Inferior, Cauce del dren el Piojo (azul).

Fuente: Adaptado de Google Earth

Materiales y métodos

Para analizar el impacto que generaría la habilitación del Dren Correntoso - El Piojo como cauce de alivio, se hace uso de la modelación numérica. Se construyó un modelo hidrodinámico bidimensional mediante el empleo de la herramienta numérica MIKE 21 Flexible Mesh Flow Model (MIKE 21 FM), que resuelve las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes), las cuales están sujetas a hipótesis de incompresibilidad, presión hidrostática, considerando la aproximación de Boussinesq y utiliza la solución de Riemann para manejar cualquier discontinuidad en la solución (DHI, 2016).

MIKE 21 FM es un modelo comercial, desarrollado por DHI (DHI Water and Environment – www.dhigroup.com). Está basado en el enfoque de una malla flexible. La construcción triangular no ortogonal de la malla permite una flexibilidad en la resolución en el área del modelo al combinar elementos de tamaño variable en comparación con la estricta cuadrícula de malla utilizado en el enfoque clásico de otros programas bidimensionales (Salmonsson, 2015). La discretización del dominio del modelo en elementos de tamaños variables, permite que la esquematización concentre el esfuerzo computacional en áreas particulares de interés (Figura 2).

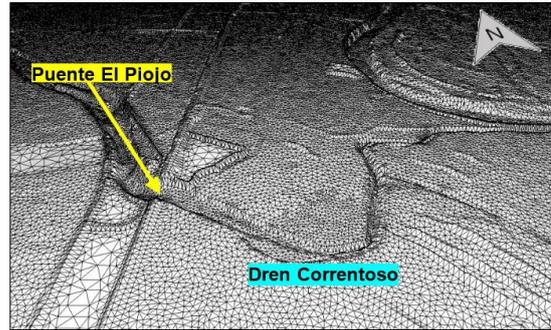


Figura 2. Malla flexible en MIKE 21 FM (visor 3D de MIKE ANIMATOR) en zona comprendida entre Carretera Panamericana y curva La Noria.

Área de estudio

El área de Estudio se ubica en la margen izquierda del Río Tumbes, tramo comprendido aguas abajo del sector San Jacinto, donde se encuentran los drenes naturales del sistema de drenaje de la margen izquierda del río, el dren Correntoso y el dren El Piojo.

Según el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84), proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), Zona 17 Sur, el tramo de estudio se encuentra entre las coordenadas mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio

Límites	Este (m)	Norte (m)
Inferior izquierdo	555 586	9 595 877
Superior derecho	563 766	9 605 423

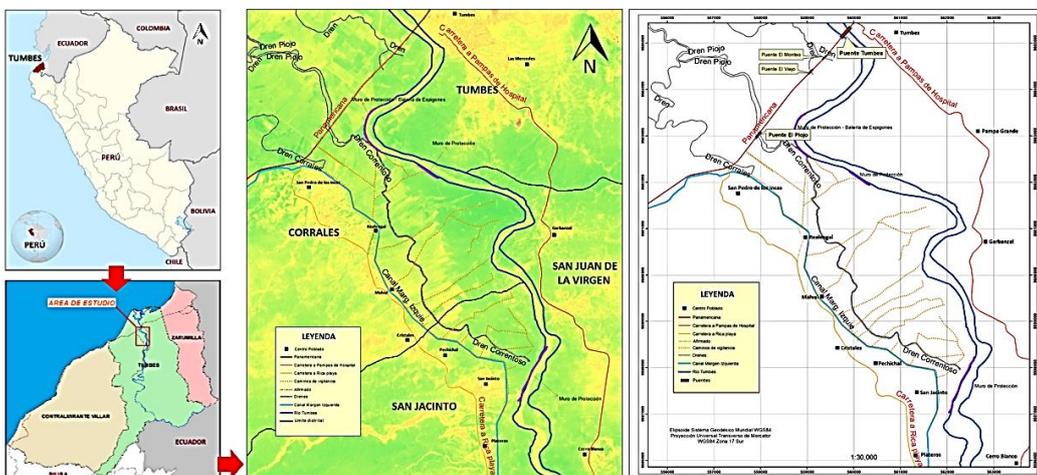


Figura 3. Izquierda: Ubicación política. Derecha: Ubicación geodésica del tramo en estudio.

Información Utilizada

Se utilizó información de precisión, datos provenientes del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), ráster de resolución de 1x1m del valle del Río Tumbes, producto de la información topográfica de alta resolución (nube de puntos obtenidos con tecnología LIDAR, resolución aprox. 18 cm, diciembre 2013 y batimetrías del río, otorgado por la Secretaría Técnica del Consejo de Recursos Hídricos Cuenca Tumbes).

Asimismo, se empleó datos de batimetría de los drenes Correntoso, El Piojo, proporcionados por el PEBPT. Para la zona correspondiente a las márgenes del dren Correntoso, desde San Jacinto hasta Realengal, se ejecutó un levantamiento topográfico mediante topografía convencional. Se complementó la información topográfica con Modelo de Superficie del Terreno de satélite ALOS resolución 30m, de JAXA (Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial), para las zonas en donde no se tiene información LIDAR.

Se utilizó herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), mediante el empleo del software ArcMap (de ArcGis) se generó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del valle del Río Tumbes desde Estación El Tigre (caserío

Higuerón) hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico, el cual se empleó en la construcción del modelo hidrodinámico bidimensional (Figura 4).



Figura 4. MDE con resolución de 2x2m por píxel. Zona aguas abajo de San Jacinto (Inicio dren Correntoso - El Piojo).

Además, se emplearon datos de las estaciones meteorológicas operadas por el PEBPT y por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI], así como niveles de mar pronosticados por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú [DHN] e imágenes satelitales de la zona en estudio (Figura 5).

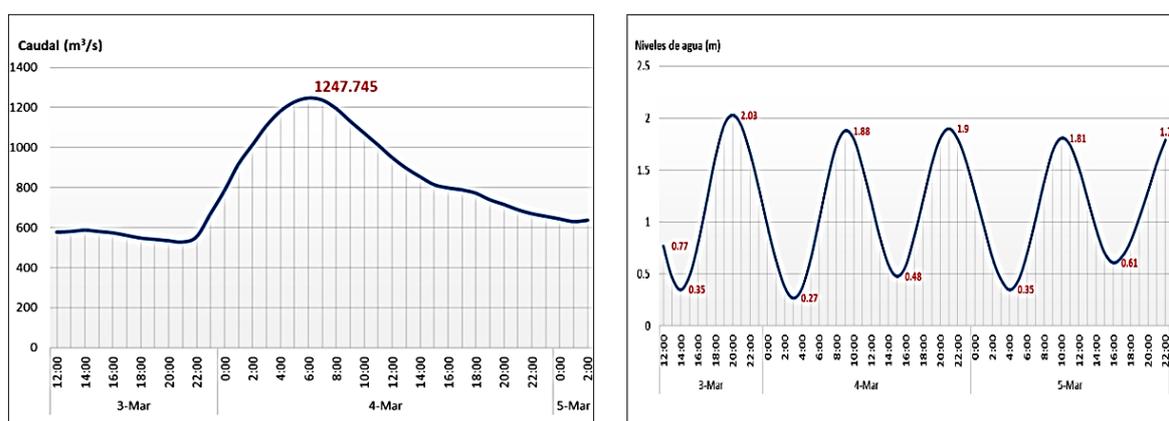


Figura 5. Izquierda. Hidrograma de crecida del año 2017, período del 3 al 5 de marzo, con caudal máximo instantáneo de 1247,745 m³/s (Reporte SENAMHI, 07 de marzo 2017). Derecha. Niveles de marea (m), período del 3 al 5 de marzo del 2017 (DHN).

Modelo hidrodinámico

El dominio del modelo fue representado mediante una malla flexible (Figura 6) comprendiendo un área de 143,10 km² del valle del Río Tumbes desde Estación El Tigre (caserío Higuerón) hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico. Se incorporaron las condiciones de entrada en la Estación El Tigre

mediante los hidrogramas de las máximas crecidas, del año 2015 (27-30 marzo), e hidrograma que originó primer desborde hacia el cauce El Piojo en el presente año, 2017 (3-5 marzo), así como las condiciones de salida, los niveles de mareas para los mismos periodos de tiempo en la desembocadura del Río Tumbes y los brazos antiguos del río.

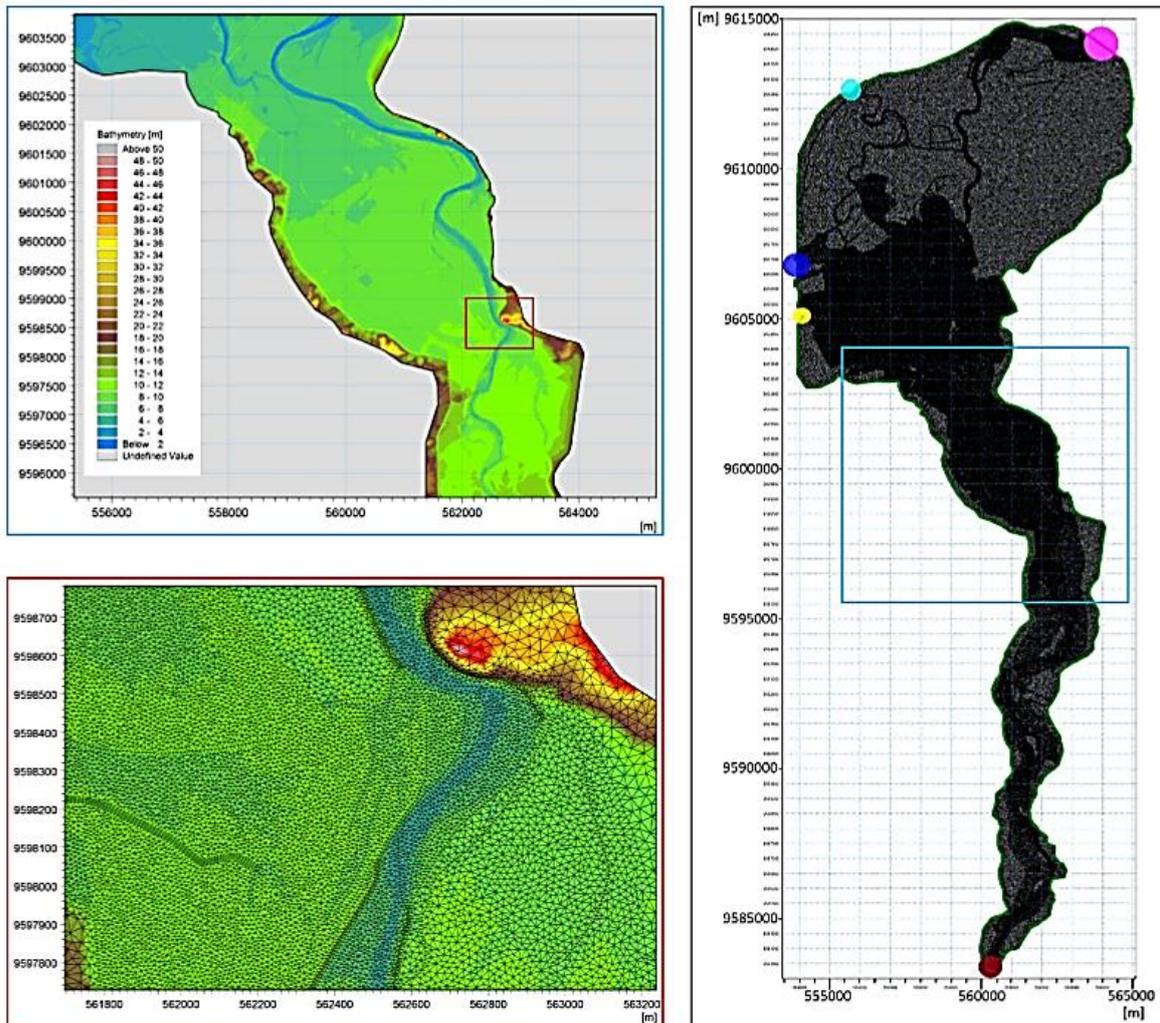


Figura 6. Malla flexible del valle del Río Tumbes. Condiciones de entrada: El Tigre (Marrón); condiciones de salida: desembocadura Río Tumbes (rosado), El Piojo (amarillo), La Carbonera (Azul), La Y (celeste).

Se establecieron polígonos con diferentes áreas máximas de elemento tomando en cuenta la importancia del detalle en los resultados: la malla con mayor resolución se encuentra en las estructuras de defensas ribereñas (4 m²), carreteras (10 m²), los cauces del río y de los drenes (50 m²), mientras que en la llanura se cons-

truyeron subdominios con área máxima de elemento desde 100 m² hasta 900 m². Para la calibración del modelo se empleó los datos medidos de niveles, tomados de la estación hidrológica Puente Tumbes y se realizó mediante el ajuste del coeficiente de rugosidad.

Para la validación del modelo se simuló el hidrograma de la máxima crecida del año 2015, en el que se registró un caudal máximo instantáneo de $1887,7\text{m}^3/\text{s}$, causando gran inundación en el valle. Se usó los mapas de inundación (imágenes satelitales y/o registros de inundación) y se realizó la comparación con los mapas obtenidos en las simulaciones. Para determinar de una manera cuantitativa la bondad del modelo para detectar zonas afectadas, se emplearon los parámetros POD (probabilidad de detección), y FAR (índice de falsa alarma) (Mejía-Estrada, 2014, p. 62).

Para el procesamiento y análisis de los datos se consideró 3 escenarios:

Escenario base, que representa la situación actual del valle del Río Tumbes.

Escenario 1 - Habilitación de cauce de alivio con aliviadero en inicio del dren Correntoso (San Jacinto), ubicándose el aliviadero (inicio del cauce de alivio) entre las coordenadas UTM WGS84 17S E: 562214,3m N: 9 597 400,3m y E: 562393,2m N: 9 597 828,3m, en las progresivas 12+400 y 14+864.

La longitud de cresta del vertedero lateral se consideró en $L = 464\text{ m}$, y una altura de cresta igual a 2 m (Figura 7).

El diseño de la sección del cauce de alivio se muestra en la Figura 9.

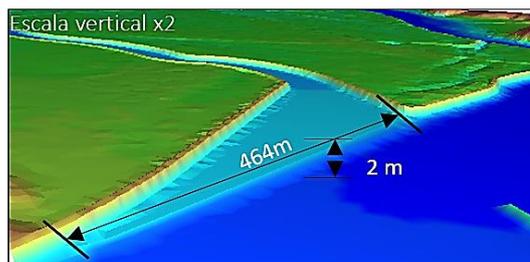


Figura 7. Diseño de estructura de derivación (aliviadero).

Escenario 2 - Habilitación de cauce de alivio con aliviadero en Curva La Noria (Corrales). Se ubicaría entre las coordenadas UTM WGS84 17S E: 558772m N: 9602 810 y E: 558 980m N: 9602 578, entre las progresivas 3+550 y 3+860. La longitud de cresta del vertedero lateral se consideró en $L = 400\text{ m}$, con una profundidad de $2,5\text{ m}$ (Figura 8).

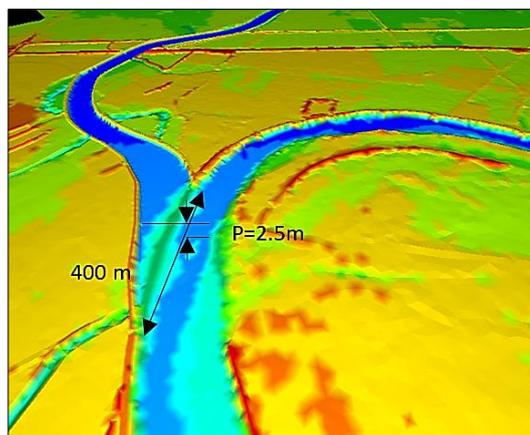


Figura 8. Diseño de aliviadero en Curva La Noria.

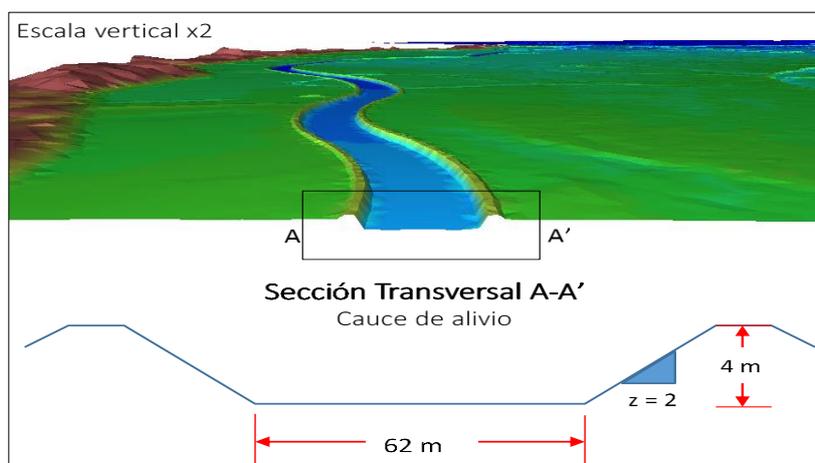


Figura 9. Sección de diseño de cauce de alivio.

Para determinar cuantitativamente la disminución de las inundaciones se realizó la comparación de las áreas inundadas entre los escenarios simulados (Tabla 3).

Resultados

Simulación de la crecida del río del 27 al 30 de marzo de 2015

El periodo simulado comprende del 27 de marzo de 2015 a las 20:00 horas al 30 de marzo a las 12:00 horas, con un total de 3840 pasos de tiempo, cada 60 segundos.

Se situaron 120 puntos en las inmediaciones de los cuerpos de agua del área de estudio, 80 de los cuales se ubicaban en áreas que se inundaron y 40 en zonas no afectadas.

Los índices encontrados a partir de la Tabla 2 ($POD = 0,963$, $FAR = 0,061$, $FOM = 0,038$), muestran que la simulación realizada en este trabajo de investigación es adecuada pues se tiene un índice de detección del 96,3%.

Tabla 2. Tabla de contingencia para la simulación de crecida del río 27-30 de marzo de 2015

	Observado		TOTAL
	Sí	No	
Pronóstico	Sí	77	82
	No	3	38
TOTAL		80	120

Tal como se aprecia en la Figura 10, mediante la comparación con la imagen satelital, la “mancha de inundación” obtenida por el modelo reproduce la inundación real ocurrida en ese período de tiempo. En este aspecto, la simulación suministra resultados que coinciden con el comportamiento natural del río representando las zonas de desborde y áreas de inundación ocurridas en las crecidas.

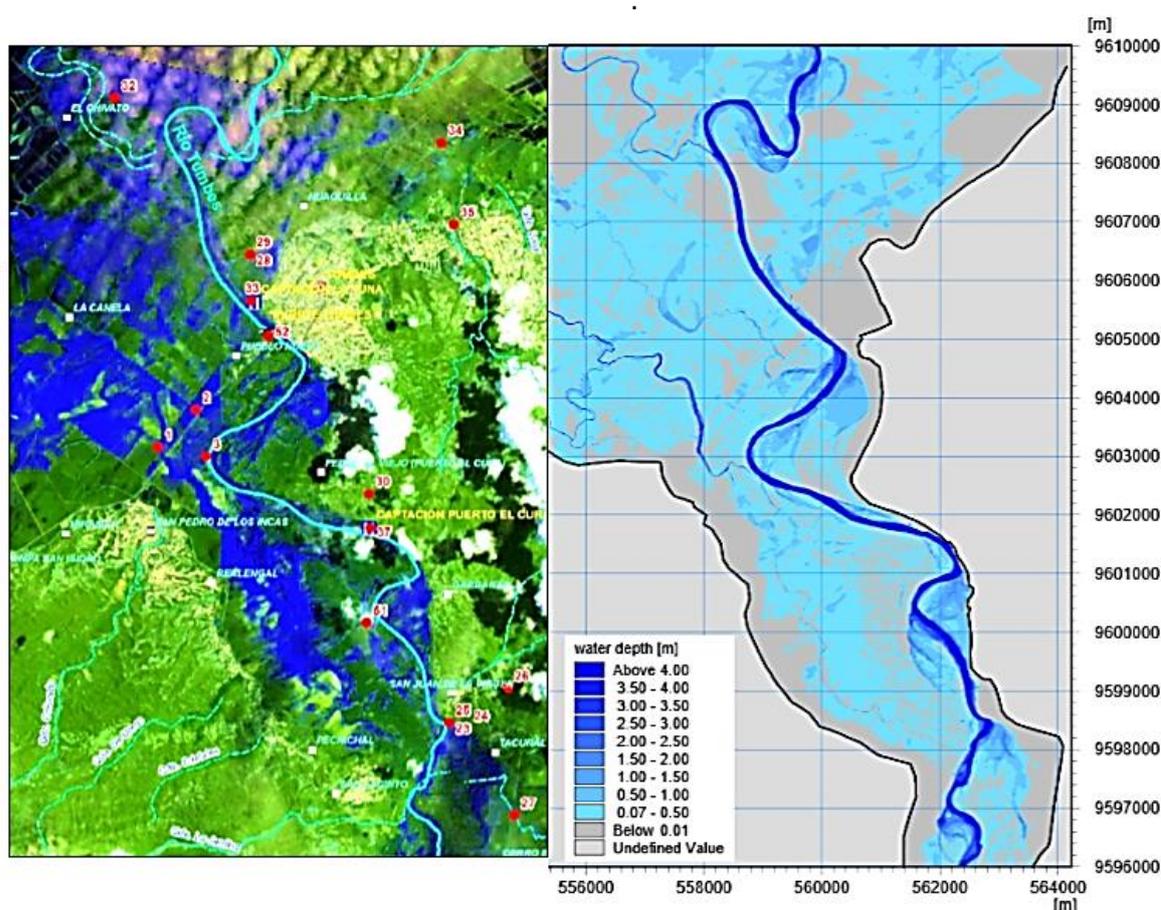


Figura 10. Comparación de la imagen satelital LANDSAT 30 de marzo de 2015 (izquierda), con mapa de profundidades obtenido de la simulación que se usaron para la validación del modelo (derecha).

Simulación de escenarios

Se simuló la crecida ocurrida del 03 al 05 de marzo de 2017, cuyo caudal máximo instantáneo que se registró en la estación El Tigre fue de $Q = 1247,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Reporte SENAMHI, 07 de marzo 2017).

Escenario base

La crecida simulada se caracterizó por ser el primer desborde que ocurrió este año en la zona de estudio.

Se determinó el caudal mínimo que genera desbordes en el tramo de estudio, siendo su valor aproximadamente igual a $723 \text{ m}^3/\text{s}$ (sección M-M', Prog. 12+410). Además de las zonas de desborde en el tramo de estudio (figura 11).

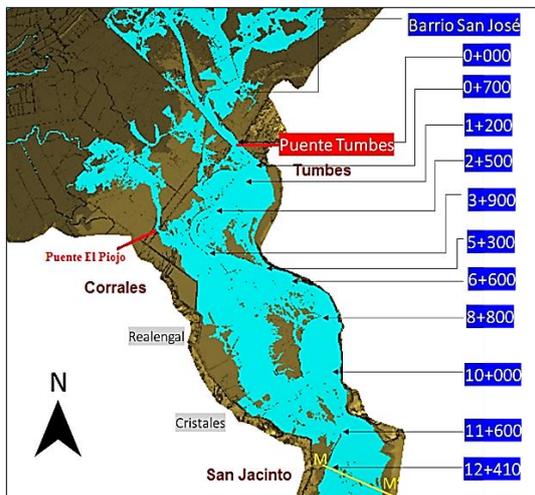


Figura 11. Ubicación de zonas de desborde en el tramo de estudio según progresivas. Inicio de progresivas (0+000) Puente Tumbes. Instante 12:00 pm del 04 de marzo del presente año en el Área de estudio.

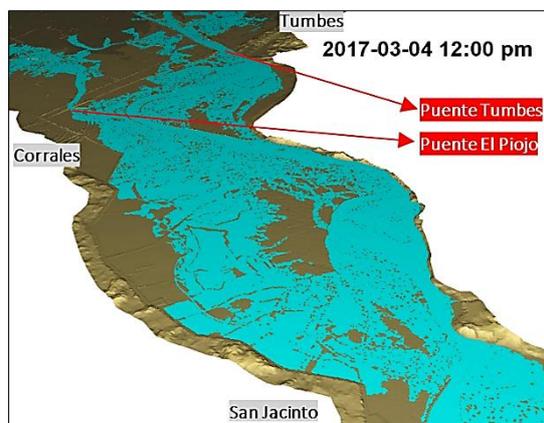


Figura 12. Vista 3D del Área de estudio (Escenario base). Caudal máximo registrado en estación El Tigre: $Q = 1247,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Escenario 1

Cauce de alivio con aliviadero en inicio del dren Correntoso.

Se reduce considerablemente el área de inundación en la margen izquierda del río en el tramo de estudio, además, como muestra la Figura 13, no ocurre inundación aguas abajo del Puente Piojo.

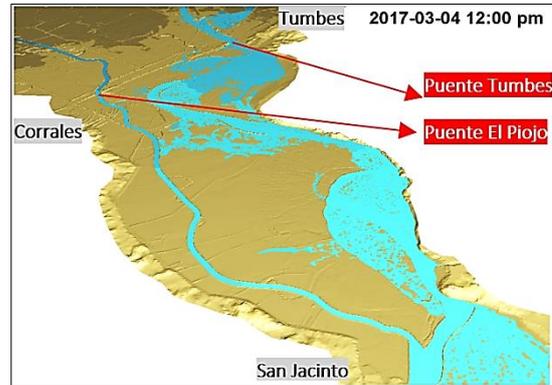


Figura 13. Vista 3D del área de estudio (escenario 1), Caudal máximo registrado en estación El Tigre: $Q = 1247,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Escenario 2

Cauce de alivio con aliviadero en Curva La Noria.

Se reduce la inundación aguas abajo del aliviadero, no solo aguas abajo del Puente El Piojo, sino también, aguas abajo en ambas márgenes del río (Pampa Grande, la Tuna - Romero, márgenes del dren la Carbonera). Sin embargo, las inundaciones en el tramo de estudio, en la margen izquierda del río, aguas abajo del sector San Jacinto no disminuyen.

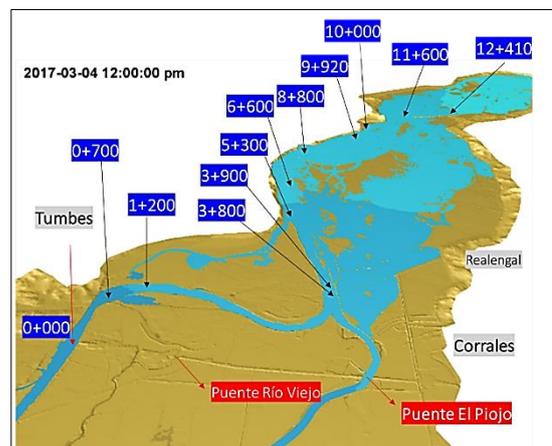


Figura 14. Vista 3D de Simulación de crecida con habilitación de cauce de alivio con inicio en Curva la Noria.

Discusión

Año a año debido a las intensas precipitaciones en la parte alta de la cuenca Puyango Tumbes, se espera en la parte baja, caudales mayores a 800 m³/s que generan desbordes en el valle (Oficina Regional de Defensa Civil, 2009). Las simulaciones permitieron determinar el caudal mínimo que genera desbordes en el tramo de estudio, siendo aproximadamente 723 m³/s medidos en la sección M-M' (progresiva 12+410). Tal como menciona Sato (2012), debido al arrastre de suelos, la sedimentación, colmatación y la falta de políticas de mantenimiento de los cauces, cada año el Río Tumbes desborda con menor caudal.

Tal como señala Chavarri (1999), para caudales mayores a 805 m³/s, la onda de crecida se atenúa con los desbordamientos

hacia las áreas agrícolas. Por ello, para reducir los efectos de las inundaciones en las áreas agrícolas, especialmente en la margen izquierda, los aliviaderos naturales (actualmente con capacidad de evacuación reducida), al habilitarse como cauces de alivio, reducirían el gasto de la crecida y con ello, reducirían el área de inundación tal como se muestra en los resultados de las simulaciones (Tabla 3).

De las Figuras 11 a 14 y de la Tabla 2, observamos que el Escenario 1 resulta más favorable respecto a la disminución de las inundaciones para la margen izquierda del río, siendo que éstas se reducen respecto al Escenario base, hasta un 77,3%, mientras que el escenario 2, solo un 63,6% para el caudal simulado.

Tabla 1. Comparación de áreas de Inundación (hectáreas) entre escenarios en el tramo de estudio.

Área del Cauce (ha)		Área Inundable Bruta (ha)	Área Inundable Neta (ha)	% Área de inundación respecto al cauce	Disminución del área inundable respecto al escenario base
Ambas márgenes	Escenario base	3766,5	3412,1	963%	
	Escenario 1	1809,6	1455,3	411%	57,4%
	Escenario 2	1771,7	1417,3	400%	58,5%
Sólo margen izquierda	Escenario base		2647,1	747%	
	Escenario 1		774,8	219%	77,3%
	Escenario 2		1243,1	351%	63,6%

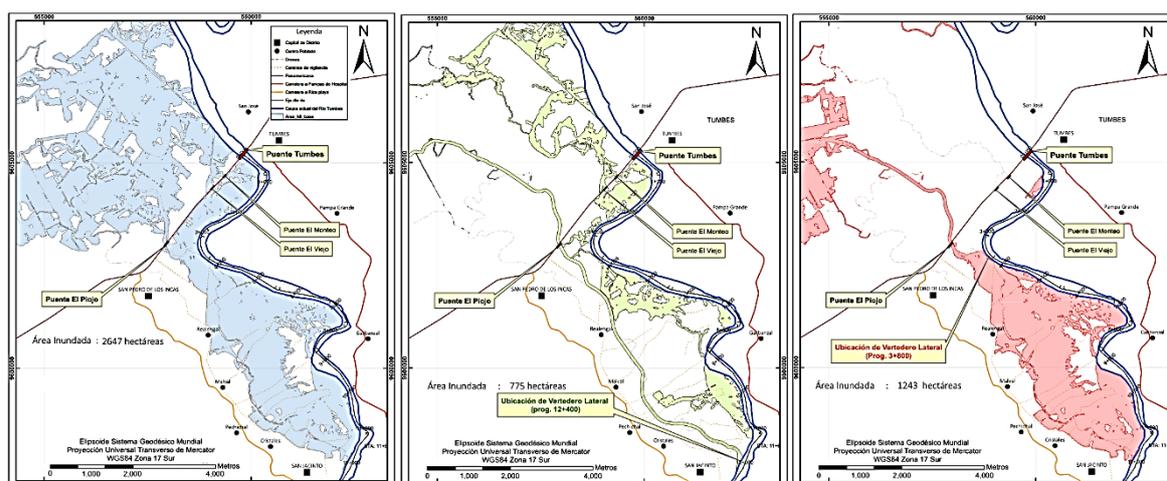


Figura 15. Comparación de las áreas de inundación en la margen derecha del tramo en estudio de los diferentes escenarios simulados, escenario base (situación actual), escenario 1 y escenario 2 (respectivamente) para la crecida ocurrida del 03 al 05 de marzo del presente año 2017, $Q_{max}=1247,745$ m³/s (SENAMHI).

Los resultados de la simulación del "Escenario 2", muestra que, no solo se reduce la inundación aguas abajo del Puente El Piojo (al igual que el escenario 1), sino también, aguas abajo en ambas márgenes del río (Pampa Grande, la Tuna - Romero, márgenes del dren la Carbonera). Sin embargo, el efecto respecto a las inundaciones aguas arriba del inicio del cauce de alivio, es mínima; siendo, no muy favorable respecto a las inundaciones en el tramo de estudio, en la margen izquierda del río, aguas abajo del sector San Jacinto hasta la carretera Panamericana (Figura 14). No obstante, su ubicación en la Curva La Noria es un lugar estratégico, dado que, permitiría que los escurrimientos sean desviados con mayor rapidez.

El diseño del cauce de alivio se propuso manteniendo las dimensiones actuales (ancho de solera 62 m) del tramo que cruza el Puente El Piojo, y a su vez tratando de optimizar las áreas agrícolas que se ocuparían con la adecuación del dren Correntoso - El Piojo como cauce de alivio y el máximo caudal a aliviar. No obstante, si se quiere desviar caudales

mayores (crecidas extraordinarias, $Q > 2000 \text{ m}^3/\text{s}$), debe adecuarse el cauce con dimensiones mayores para reducir aún más los efectos de las inundaciones.

Las inundaciones en el valle del río Tumbes se ven influenciadas por las variaciones del nivel del mar (especialmente aguas abajo del Puente Tumbes). Aún, cuando la crecida no ha producido desborde en el tramo de estudio, se observa que en la desembocadura del río las mareas inundan las zonas bajas. Pues tal como refiere Maceda (1989), dichos niveles alcanzan en promedio aproximadamente 1,80 m entre una pleamar y una bajamar. Cuando la crecida alcanza los últimos kilómetros hacia la desembocadura, dichas variaciones condicionan la rápida evacuación del sistema de drenaje del valle aumentando el área de inundación en este último tramo del río, incluso estos efectos alcanzan a los drenes naturales, por lo que es importante considerar el efecto de las mareas en el diseño del encauzamiento de los cauces de alivio.

Conclusiones

Ante los daños que provocan las avenidas en el Río Tumbes, que obligan al gasto permanente del Estado para desarrollar las obras durante las etapas de emergencia y rehabilitación, se hace necesario ejecutar obras que permitan el control de las avenidas y reducir los daños, de tal manera que las inversiones, eviten los mayores gastos que significan las fases de rehabilitación y reconstrucción. Por tanto, de los resultados de esta investigación se puede decir que la habilitación del cauce de alivio permite mitigar considerablemente el efecto de las inundaciones aguas abajo del sector San Jacinto y por tanto reducir las pérdidas económicas de las actividades productivas y los daños en las infraestructuras que año a año se generan por el desborde del Río Tumbes, e incluso resulta de gran efectividad para reducir los riesgos de inundación en zonas concretas ante eventos extremos.

Mediante la evaluación de diferentes simulaciones, se determinó la ubicación óptima del aliviadero (inicio del cauce de alivio), siendo ésta en el inicio del dren Correntoso, debido a que es el lugar donde el cauce del río pierde capacidad de conducción, donde inician los remansos que provocan la mancha de inundación en la margen izquierda del Río Tumbes y, por tanto, el efecto de la mitigación de las inundaciones es mayor.

Por tanto, la habilitación del cauce de alivio permite controlar las inundaciones en el valle, siendo que, de acuerdo a la simulación de escenarios y los caudales desviados por el cauce de alivio, se determinó que para caudales menores a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ que se registren en la estación El Tigre, las áreas inundables de la margen izquierda del río, según el "escenario 1", aguas abajo del inicio del cauce de alivio se reducirían hasta en 100%, además para

caudales entre 1000 a 1400 m³/s se reducen hasta en 75% (77,3% para $Q_{\max}=1247,7$ m³/s) y para caudales entre 1400 a 1800 m³/s se reducen hasta en 40%.

El valle del río Tumbes presenta otros cauces antiguos del río (La carbonera, Río Viejo, la Y), que, debido a la ocupación de los cauces por los agricultores, y a la falta de mantenimiento de estos cauces han impedido que funcionen como alivios durante la ocurrencia de avenidas, por ello de acuerdo a los resultados de esta investigación, constituyen potenciales cauces de alivio que si se habilitaran como tales mitigarían de gran manera las inundaciones en el valle del río Tumbes.

Si bien es cierto una malla con elementos pequeños implicará una mejor adecuación al terreno real, ésta, supondrá un coste computacional a menudo inasumible (Tiempo computacional largos, equipos de cómputo más potentes), por lo que el empleo de mallas flexibles permite la representación detallada del terreno sin

incrementar la cantidad de elementos de la malla, al combinar tamaños variables de elementos de malla. Por lo que el software MIKE21 FM, permite al usuario la posibilidad de formular el problema de una manera más sofisticada en comparación con lo que es posible en modelos bidimensionales clásicos, permitiendo representar a mayor detalle el dominio del modelo, aprovechando al máximo la calidad de información topográfica de entrada.

Con el modelo construido se ha logrado identificar las zonas de desborde y las inundaciones en el valle del Río Tumbes. Por tanto, constituye una poderosa herramienta para los sistemas de gestión del riesgo de inundación (generación de mapas de riesgo, Sistemas de alerta Temprana [SAT]), que facilita enormemente el proceso de toma de decisiones y de comunicación entre las Autoridades encargadas y la población ante estos eventos.

Agradecimientos

Los investigadores agradecen el apoyo logístico a la Secretaría Técnica del Consejo de Recursos Hídricos Cuenca Tumbes de la Autoridad Nacional del Agua.

A la empresa de consultoría danesa DHI Water & Environment (en especial a DHI Perú SAC) por otorgarnos Licencias temporales del software MIKE 2016.

Referencias bibliográficas

- DHI. 2016. MIKE 321 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module. Agern Allé 5, DK-2970 Hørsholm, Denmark. Recuperado de www.mikepoweredbydhi.com
- Maceda, E.A. 1989. Estudio de la Inundaciones en el Valle del Río Tumbes por efecto de las Mareas. Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 39-42 pp.
- Maza, J.A.; Franco, V. 1997. Obras de protección para el control de Inundaciones, Capítulo 15 del Manual de Ingeniería de ríos. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM. México, D.F.
- Mejía-Estrada, P. I. 2014. Caracterización del evento hidrometeorológico extremo en Acapulco, Guerrero. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Oficina Regional de Defensa Civil. 2009. Sustento técnico para declaratoria en situación de emergencia Tumbes por peligro inminente ante las lluvias 2008-2009. Tumbes.
- Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT). 2014. Ficha Técnica: Descolmatación del dren Correntoso, Margen Izquierda del río Tumbes, distrito de Corrales, provincia y departamento de Tumbes. Perú.
- Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes [PEBPT]. (2014). Descolmatación del dren El Piojo, Margen Izquierda del río Tumbes,

- distrito de Corrales, provincia y departamento de Tumbes. Ficha Técnica. Tumbes. Perú.
- Reyes, J. 2003. Inundaciones y Drenaje Urbano - Perú. En O. Campos, C. André, W. Ferreira, & M. Fernanda (Eds.), Inundações urbanas na América do Sul (Primera, pp. 379-428). Porto Alegre. Disponible en: http://www.agua.org.py/images/stories/biblioteca/humedales/jorge-reyes_peru.pdf
- Salmonsson, A. 2015. MIKE 21 FM in Urban Flood Risk Analysis: A comparative study relating to the MIKE 21 Classic model. Tesis de Maestría, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Civil and Architectural Engineering, Division of River Engineering, Estocolmo, Suecia. Disponible en: www.diva-portal.se/smash/get/diva2:839685/FULLTEXT01.pdf
- Sato, J.M. 2012. La Gestión Del Riesgo De Desastres En El Perú Documento País Perú 2012. Indeci, 1, 146. Disponible en: <http://dipecholac.net/docs/files/197-peru-la-gestion-del-riesgo-de-desastres-en-el-peru-documento-pais-2012.pdf>
- Soluciones Prácticas. 2015. Gestión de inundaciones en Perú. Disponible en: www.solucionespracticas.org.pe/Descargar/839%0A062/2534088