

Elaboración de un modelo espacializado que represente las interacciones entre ríos de aguas naturales, redes de riego y drenaje y los esteros.

1 Introducción

Este trabajo está vinculado al Proyecto de Investigación “Desarrollar y gestionar las planicies inundables en un contexto de cambio global”, el cual se encuentra relacionado con el convenio específico de cooperación entre la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), la empresa pública de servicios (ESPOL-TECH E.P.) y Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières (AVSF).

AVSF es el ejecutor en Ecuador del proyecto COSTEA, el cual se centra en producir conocimientos con fines aplicados en la cuenca del río Daule, que permitan pensar los desarrollos hidroagrícolas de manera integrada y razonada en función de múltiples objetivos. Por lo cual, el presente caso de estudio se enfoca en eje temático #2 del presente convenio: Caracterización hidro(geo)lógica e hidráulica de las llanuras inundables.

Los efectos de las inundaciones han ocasionado diversas alteraciones en el ecosistema natural y en zonas patrimoniales alrededor del mundo, como es el caso de sitios protegidos de la UNESCO (56% de los sitios afectados) (Arrighi, 2021). Por lo general, la periodicidad de las inundaciones provoca problemas ambientales y socioeconómicos en la población (Dhote et al., 2018), debido a eventos extremos como fuertes lluvias monzónicas (Pradhan & Youssef, 2011), el desbordamiento de los ríos en una determinada cuenca (Ali et al., 2022; Hromadka et al., 1988), por aumento del nivel del mar y hundimiento del suelo (Yin et al., 2019), entre otros.

Las inundaciones ocasionadas por los desbordamientos de los ríos es un tema de estudio que llevo a la generación de modelos para comprender su hidrodinámica y analizar el riesgo a inundaciones en zonas bajas de las cuencas (Chen et al., 2014; Tanaka et al., 2017). Al momento, lo que se conoce de la hidrodinámica del río Daule es limitado a la puesta en marcha de varias obras de captación, derivación. La información está esparcida en un sinnúmero de instituciones y fuentes, quienes realizan diversos estudios con diferentes enfoques, lo cual beneficia al investigador al contar con una base de datos amplia y diversa, aunque con difícil acceso en cierto casos (CIPAT-ESPOL et al., 2014; Kazakis et al., 2016; Koutsouris & Lyon, 2018; Rivero Solórzano, 2014; Rushton, 2007; Sanz et al., 2011; van Vliet et al., 2017). No obstante, lo que se conoce sobre la misma es útil para la elaboración de un proyecto que busque evaluar la interacción hidrodinámica entre el río y sus riberas.

Para la ejecución de este proyecto en la generación del modelo hidrodinámico bidimensional, el uso del software HECRAS es un medio por el cual se puede llegar a completar el objetivo, permite analizar las diferentes condiciones de flujo como resultado del desbordamiento de los ríos (Dasallas et al., 2019; Marimin et al., 2018; Syafrí et al., 2020). Esta herramienta genera simulaciones bajo diferentes perspectivas y enfoques (como hidrológico e hidrodinámico), para la evaluación del peligro y riesgo de inundaciones en zonas pobladas (Bezák et al., 2018; Farooq et al., 2019; Jamali et al., 2019; Zeleňáková et al., 2019). Por ello, se considera una recopilación de información existente y relevante, en especial aquellos datos cercanos a la zona de interés.

Se hace necesario la implementación de una simulación bidimensional debido a 2 razones. Primero, el conocimiento actual del río Daule y afluentes en cuanto a hidrodinámica es muy limitado. Segundo, la dinámica de inundaciones de estos ríos con respecto a sus planicies, esteros, afluentes y zonas potenciales de riego y drenaje de agricultura es muy activa, pese a que el río Daule y otros cursos de agua están parcialmente regulados hace algún tiempo (Presa Daule Peripa, Trasvase DauVin, entre otros). Estas estructuras intervienen directa e indirectamente en la cantidad de agua que atraviesa la zona de estudio.

La generación de este modelo ofrecerá adicionalmente la posibilidad de estudiar las posibles zonas de amortiguamiento. Logrando así disminuir el impacto de estos fenómenos naturales en zonas urbanas ubicadas en el sector y sectores río abajo, logrando un beneficio social y económico de la subcuenca influenciada por estos ríos.

Otro beneficio que ofrece esta modelación es su adaptabilidad a cualquier zona o subcuenca de interés, y bajo ciertos requisitos de datos indispensables que en este estudio se darán a conocer. Ésta es una zona piloto que ofrecerá de conocimiento oportuno en la hidrodinámica de sus ríos y de simulaciones para conocer las diversas circunstancias de inundaciones a las que están sometidos los pobladores de este sector.

A través de este modelo, el proceso de toma de decisión de los administradores de la subcuenca y de los diferentes actores involucrados, podrá ser realizado por medio de la simulación de diferentes opciones o decisiones visibles en este trabajo. Lo cual permitirá observar los beneficios influenciados a través de las mejoras del uso del suelo, anticipo de avenidas y planificación hídrica óptima, lo cual promueve ventajas claves a ser alcanzadas con el apoyo de una adecuada modelación hidrodinámica.

2 Objetivo

Desarrollar un modelo hidrodinámico espacial basado en los parámetros de datos hidrometeorológicos y espaciales entre los ríos Macul, Bobo, Pula y los humedales aledaños, para el establecimiento y conocimiento de áreas aptas como zonas de amortiguamiento, que servirán de captadores o almacenadores de agua en momentos de altas precipitaciones e inundaciones en la parte baja de la subcuenca, previniendo así pérdidas económicas del sector y de vidas humanas.

3 Lugar de estudio

La investigación se localiza en la subcuenca del río Daule, específicamente en el sector del cantón Palestina perteneciente a la provincia del Guayas. Se encuentra en la parte central de provincia, entre grandes extensiones de terreno de cultivos de arroz y actividades ganaderas, presenta un relieve topográfico muy bajo, lo que provoca que sean muy propensos a inundaciones, las cuales bloquean vías, destruyen los cultivos y el trabajo de quienes lo habitan.

Además, los ríos que intervienen en el sector son el río Macul y el río Pula (Figura 1, anexos), los cuales se ven principalmente influenciados por las precipitaciones (locales y aguas arriba) y por las obras hidráulicas aguas arriba (Daule-Peripa, Daule-Vinces y Presa Baba), provocando el desbordamiento de los ríos e inundaciones en las llanuras aledañas a estas zonas. Durante la época invernal o de fuertes precipitaciones, el caudal del río Pula cambia considerablemente, desbordándose e inundando las zonas cercanas al cauce de este río. Este río se ve fuertemente influenciado por el río Macul, el cual aporta considerables volúmenes en temporada invernal. Esto es influenciado por la presencia de humedales río arriba.

Con la finalidad de obtener un resultado más acorde a la necesidad del proyecto y en zonas de interés, se establece realizar el estudio a lo largo del cauce de dos ríos (río Pula y el río Macul), quienes se encuentran próximos al río Daule (Figura 1). Además, en base al recorrido realizado anteriormente junto a los miembros del AVSF (noviembre 2021), se concluyó que el mejor lugar para el estudio en la elaboración del modelo hidrodinámico es en el sector de Palestina, a largo del cauce del río Pula, aguas arriba y debajo de la confluencia con el río Macul (Figura 1, alrededor del punto P1).



Figura 1. Localización de la zona de estudio y los puntos de interés visitados.

4 Metodología y herramientas implementadas

La metodología aplicada se realizó por fases, como se presenta a continuación:

4.1 Fase I: Reconocimiento en campo de los sitios de interés.

Durante esta fase se llevó a cabo salidas de campo a los posibles puntos de interés, con el fin de observar y reconocer máximo tres secciones del río (de aproximadamente 6km cada uno, figura 1 en anexos). El recorrido implicó el reconocimiento de las zonas más propensas a inundarse, el uso y tipo de suelo, su disponibilidad a ser indudable, entre otros.

Previo a las salidas de campo y sobrevuelos con dron a lo largo del cauce de los ríos de interés, se determinó los lugares ideales para ejecutar los sobrevuelos. Se utilizó diferentes equipos como el dron por parte del CADS, GPS diferencial por parte de CIPAT y el uso de polvo tiza para marcar los puntos de control o calibración para el procesamiento de imágenes (Figura 2, anexos).

4.2 Fase II: Análisis de datos y procesamiento de la información.

El presente trabajo se enfocó en dos tipos de información:

- Información primaria. - Hace referencia a los datos in situ, como por ejemplo los datos batimétricos y fotogrametría por medio de dron. Estos datos fueron útiles para el procesamiento de datos en el área de la teledetección y generación de la geometría del cauce de los ríos.
- Información secundaria. - Se realizó a través de una revisión bibliográfica y de fuentes externas para la recopilación de datos como los siguientes:
 - Topografía - Modelo Digital de Elevación (DEM, resolución 3 m).
 - Datos meteorológicos e hidrológicos (Precipitaciones – Caudales, INAMHI).
 - Uso del suelo - Zonas de anegamiento.
 - Tipo de suelo – información geoespacial (NASA)
 - Represas y transvase (Registros)

Para la sección de muestreo, se ejecutó una campaña de recolección de datos de forma directa, principalmente en:

- Ortofotos. - Hace referencia al muestreo remoto obtenido por medio de un dron. Se efectuaron sobrevuelos a lo largo de los ríos (Figura 1, anexos), donde el número de vuelos dependió de las dimensiones de ríos y llanuras, logrando así obtener información útil para la construcción del DEM y minería de datos.

Lo generado en las 2 fases proporcionó información sólida para empezar la construcción del modelo, entre cuyas actividades está la generación de las condiciones de borde. Las imágenes obtenidas por medio del dron son ingresadas en el software Agisoft Metashape. A través de ello, se obtuvo una nube de puntos a partir de todas las imágenes georreferenciadas con los puntos de control establecidos en campo (Figura 3, anexos). Posterior a esto, se generó un TIN (red irregular de triángulos) en ArcMap, para corregir la interpolación espacial. De esta manera, fue posible obtener un modelo de elevación digital (DEM).

Los DEM procesados a partir de los sobrevuelos realizados con el dron generan información a escala centimétrica del cauce de los ríos Macul y Pula. Sin embargo, para efectos de complementar la topografía en sus contornos (precisamente para el caso de inundaciones durante eventos extremos), se utilizó un DEM proveniente del programa SIGAGRO (del MAG) a escala 3x3 m (Figura 4 en anexos, DEM final a escala de 1m). Ambos DEM (proveniente de ortofotos, y de SIGAGRO) fueron unificados mediante un mosaico.

Previo al uso de Hec-Ras y simulación de inundaciones, se generó la geometría en todo el trayecto de los ríos Macul y Pula, mediante el eje, líneas de banco (*banklines*) y líneas de extremo (*flowpaths*). Estas son indispensables para la posterior elaboración de las secciones transversales, delimitación de zonas de inundación y áreas de almacenamiento o *storage área* (de varios existentes) que aporta al cauce del río con agua almacenada durante las épocas de lluvia (Figura 5, anexos). Además, a través de las visitas en campo, se logró determinar el número de Manning para cada una de las secciones en todo el cauce de estudio (llanuras y cauce; entre 0.054 y 0.110), de acuerdo con la guía establecida por el USGS, Servicio Geológico de los Estados Unidos, (Arcement & Schneider, 1989). Estas secciones fueron asignadas a lo largo del río Macul y Pula (Figura 6, anexos).

4.3 Fase III: Generación del modelo hidrodinámico.

En esta etapa se procedió a la elaboración del modelo hidrodinámico (Figura 7, anexos) a través del software Hec-Ras y de los datos e información recopilada durante las fases anteriores, permitiendo simular el medio actual (línea base) lo más cercano a la realidad posible.

La información mencionada anteriormente, como la geometría del cauce de estudio, fue ingresada al software Hec-Ras en formato vector (shapefile) (Figura 8, anexos). Para el caso de las zonas de acumulación de volúmenes (almacenamiento), se ingresó los datos tabulados del elevación-volumen obtenidos a través de ArcMap. Además, a partir de las secciones transversales ingresadas en el software, se procedió a verificar la conexión de puntos en todo el eje de estudio e ingresar los coeficientes de rugosidad antes determinados para cada sección (Figura 9, anexos).

Con el fin de generar las solicitaciones de carga hidráulica, se generó un hidrograma sintético, cuyo valor máximo fue el asociado al periodo de retorno de diseño (100 años). Este hidrograma fue ingresado como condición de borde aguas arriba. Aguas abajo, se empleó la pendiente de fondo (*Normal Depth*).

Además, se incluyó zonas de amortiguamiento (*storage areas*) en las márgenes, basados en lo reportado por imágenes satelitales provenientes de la plataforma Google Earth Engine. Allí se resaltan las zonas de inundación en este sector (Figura 10, anexos). Estas áreas de almacenamiento están conectadas con las secciones transversales y entre ellas, garantizando conectividad y transporte durante los eventos extremos de inundación (Figura 11, anexos).

4.4 Fase IV: Escenarios y opciones de manejo.

Se evaluó los resultados de los diversos escenarios vs el escenario base y, además, el desempeño de diversas acciones de manejo propuestas o situaciones posibles en el futuro. En tal virtud, se generó cinco escenarios enfocados en: i) simulación con la geometría base y datos iniciales usados para la calibración para un periodo de retorno de $T = 2$ años; ii) simulación con los mismos datos iniciales e incluidas las áreas de almacenamiento en la geometría final para $T = 100$ años; iii) mismos parámetros que el escenario anterior, pero extrayendo o restringiendo el funcionamiento natural de las áreas de almacenamiento; iv) simulación con caudales con periodo de retorno de $T = 200$ años, pero con las áreas de almacenamiento y parámetros inicialmente establecidos; y v) misma simulación con caudales con periodo de retorno de $T = 200$ años, pero sin las áreas de almacenamiento.

5 Resultados

5.1 Simulación base y calibración del modelo.

La simulación inició con los datos del río Macul (geometría, DEM, coeficientes de rugosidad, etc). En ese contexto, se estimó un caudal de retorno de 100 años de $180 \text{ m}^3/\text{s}$ a partir de los datos registrados aguas arriba del río Pula. Tal situación se dio debido a que la única estación hidrológica disponible se encuentra sobre el río último mencionado. Observando los porcentajes de aporte de cada río, se pudo cotejar con los registros obtenidos en campo, y complementando con las consultas a sus pobladores en cuanto a niveles alcanzados en crecidas.

Debido a que con estas condiciones no se llega al punto de referencia que indicaron los agricultores y demás pobladores (Figura 2), se procedió a modificar los números de Manning para calibrar la simulación. Finalmente, con un caudal de $205.2 \text{ m}^3/\text{s}$ y pendiente de 1.2 ‰ (1.2 por mil), se consiguió llegar al nivel reportado durante eventos extremos (Figura 3).

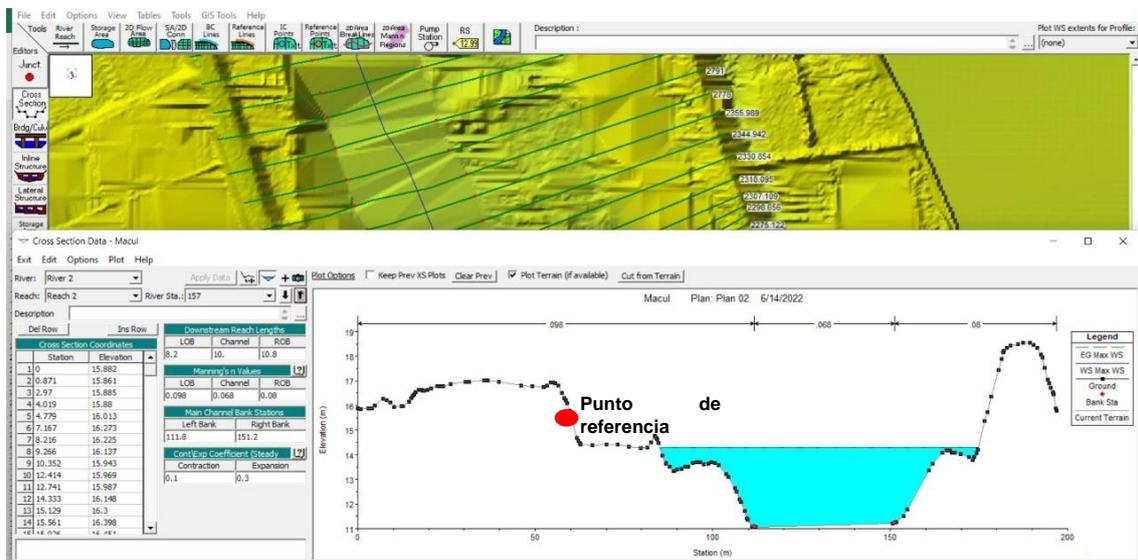


Figura 2. Punto de referencia para caudal de retorno de 100 años.

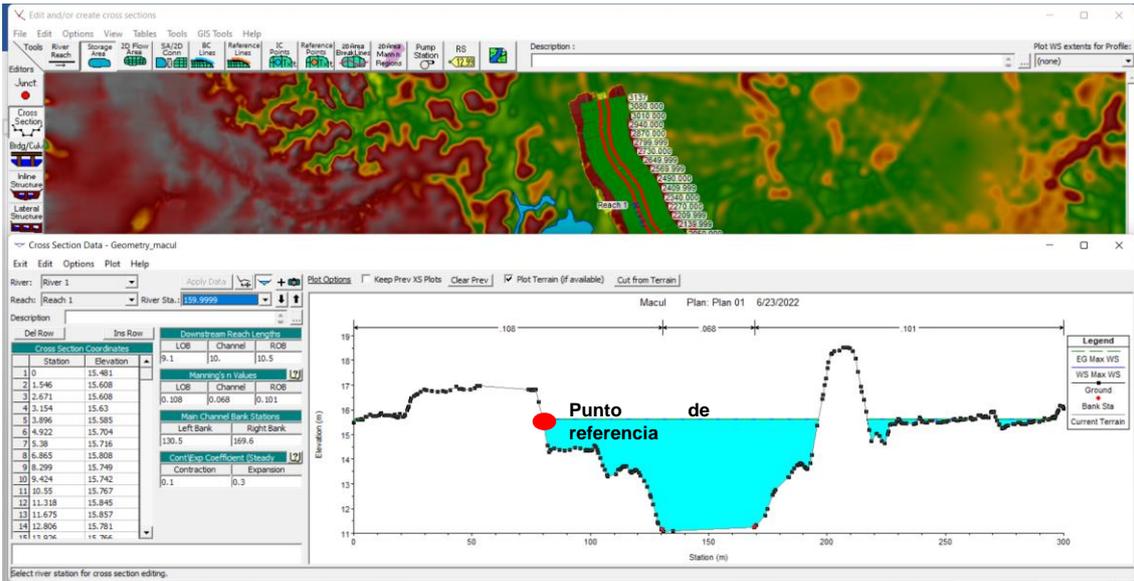


Figura 3. Punto de referencia alcanzado para un caudal de retorno de 100 años de 205.2 m³/s.

Con estas condiciones establecidas y el conjunto de datos calibrados se generó una geometría final, como capa base para las simulaciones de escenarios definidos anteriormente (Figura 11, anexos). Además, se identificó áreas de almacenamiento existentes para conocer el grado de importancia que tienen, a fin de contrastar la cantidad de caudal que circularía por el canal, de no existir zonas de amortiguamiento.

4.1 Simulación de escenarios.

Los escenarios simulados, al ser comparados contra el modelo patrón produjeron diversos resultados, los cuales van acorde a las diferentes limitantes y criterios establecidos para cada uno. En la figura 4, se observa el nivel del agua de cada simulación, siendo el numero 1 aquel de mayor probabilidad de ocurrencia (T = 2 años); y, por tanto, el nivel al que comúnmente llega el agua en un año hidrológico cualquiera. Esta sección fue corroborada en campo en base a la experiencia de los pobladores y las marcas de inundación experimentadas año tras año.

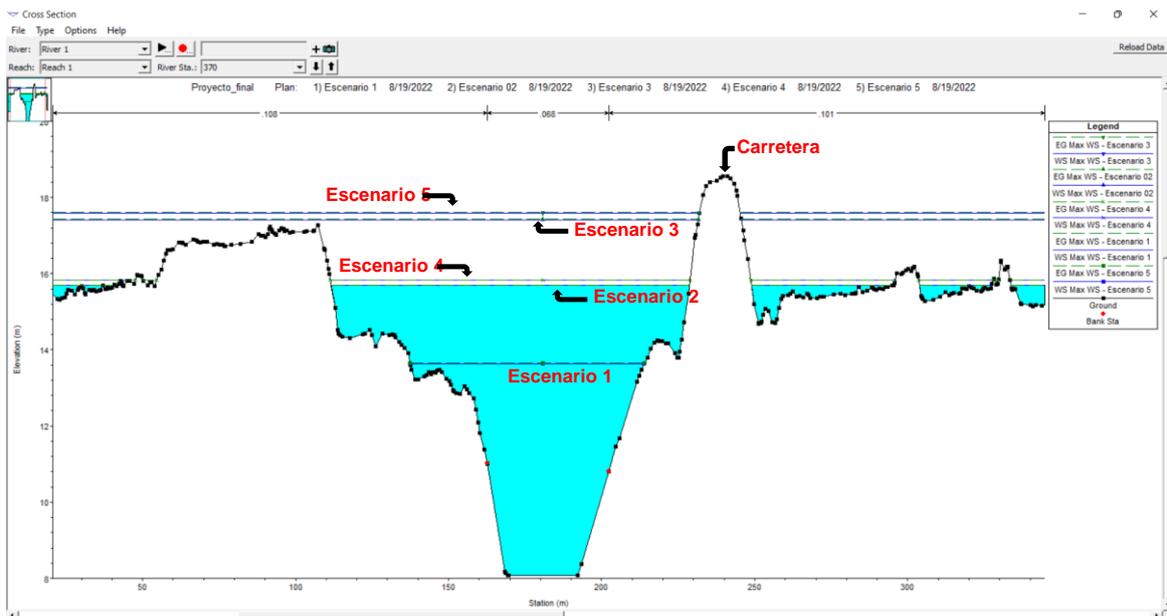


Figura 4. Representaciones gráficas del alcance máximo del nivel de agua en los cinco escenarios.

A primera vista, en esta figura se constata que el escenario 5 es aquel en el que ocurre una elevación considerable, tomando en cuenta que es un evento de muy poca probabilidad, pero gran intensidad ($T = 200$ años), y que carece de zonas de almacenamiento (Figura 10, anexos). Debido a ello, estaría cerca de sobrepasar la rasante de la carretera en esta sección de análisis. Sin embargo, en escenarios como el 2 y el 4, aunque se observa una elevación considerable (sobre las llanuras), no son tan prominentes como en el caso 5 o el 3, porque existen áreas de almacenamiento que cumplen la función de contener los excesos.

No obstante, analizando río arriba en el Macul, sí existen tramos en los cuales se desborda el río por encima de la carretera debido a la topografía de ese sector (Figura 12, anexos), inundando varias áreas donde se observa el agua al costado derecho de la vía. La extensión de cada escenario puede ser observada en la tabla 1, en la cual se expone el área de afectación y descripción de los resultados para cada una de las simulaciones realizadas.

Los escenarios 2 y 3 son simulados bajo los mismos parámetros (caudal y periodo de retorno) y geometría del cauce (secciones transversales y n de Manning), con la única diferencia de la presencia de las áreas de almacenamiento (Tabla 1).

Al reducir o eliminar completamente estas zonas por medio de confinamiento lateral del canal, se consigue evitar más del 80% de sectores inundados. Sin embargo, esto provocaría inundación aguas abajo (elevación de niveles más allá de lo experimentado actualmente). Esta situación puede darse si se convierten las zonas bajas en mención a arrozales, o para uso de otros cultivos.

Uno de los efectos por la restricción de las zonas de almacenamiento son el cambio o aumento de las cotas de agua, lo cual sucede en cada sección de los ríos (medidos con referencia al nivel de mar).

Esto ha provocado que en el escenario 2, el agua se eleve casi 2 metros a diferencia del primer escenario, degradando la estabilidad de los taludes cercanos a la carretera, y donde podría comprometerse la vía por la cual circulan diariamente cientos de personas. En ese sentido, las altas velocidades asociadas (a $T = 100$ años) ocasionarían un efecto erosivo que devastaría las estructuras antropogénicas que se localicen aguas abajo (viviendas, puentes, etc). Este efecto es el más perjudicial dado su aumento de 60% y 76% (en el centro y extremos del canal del río, respectivamente).

Algo similar sucede con los escenarios 3 y 5, donde en vez de emplear $T = 100$ años, se toma en cuenta $T = 200$ años, equivalente a un fenómeno de El Niño de grado elevado (ver tabla 1). Su efecto es más notable que antes, dado el aumento de caudal y el área afectada (aproximadamente 30000 m^2 y 68000 m^2 más que antes, con y sin áreas de almacenamiento respectivamente), reflejando una considerable afectación para los entremos del cauce de los ríos.

Por otro lado, en la primera simulación (escenario 1) se pronostica un escenario con parámetros hidrológicos bajos debido a su periodicidad de 50 % de probabilidad de ocurrencia cada año, es decir, muy frecuente.

Los efectos de la restricción o privatización de las zonas de anegamiento se ven reflejadas en las zonas más bajas del área de simulación (parte sur del río Pula, Figura 1 - Anexos), en donde se juntan las aguas del río Macul y Pula (aguas arriba).

Tabla 1. Resumen de los escenarios simulados y criterios establecidos.

		Escenario #1	Escenario #2	Escenario #3	Escenario #4	Escenario #5
Caudal [m³/s]	Macul	106 m ³ /s	205.2 m ³ /s	205.2 m ³ /s	238.2 m ³ /s	238.2 m ³ /s
	Pula (aguas arriba)	198.9 m ³ /s	385.1 m ³ /s	385.1 m ³ /s	418.1 m ³ /s	418.1 m ³ /s
Periodo de retorno [T = # años]		2 años	100 años	100 años	200 años	200 años
Presencia de áreas de almacenamiento		No infiere debido al bajo caudal	Si	No	Si	No
Área inundada [m²]		914,645.28 m ²	10,122,566.30 m ²	1,939,242.42 m ²	10,190,931.76 m ²	1,968,715.42 m ²
Porcentaje de eliminación de áreas de almacenamiento [%]		No infiere debido al bajo caudal	Eliminación del 80.9%		Eliminación del 80.7%	
Altura máxima de agua sobre el nivel del mar [m]		13.80 m	15.65 m	17.62 m	15.80 m	17.80 m
Porcentaje de afectación por eliminación de áreas de almacenamiento [%]		No infiere debido al bajo caudal	Aumento del 11.1%		Aumento del 11.2%	
Velocidad máxima del agua [m/s]	Centro del canal	0.28 m/s	0.18 m/s	0.45 m/s	0.19 m/s	0.46 m/s
	Extremos del canal	0.06 m/s	0.04 m/s	0.17 m/s	0.06 m/s	0.18 m/s
Porcentaje de afectación por eliminación de áreas de almacenamiento [%]	Centro del canal	No infiere debido al bajo caudal	Aumento del 60%		Aumento del 60%	
	Extremos del canal		Aumento del 76%		Aumento del 67%	

En la figura 5 se observa las cuatro primeras simulaciones en las que se ha usado y restringido las áreas de almacenamiento. Esto permite verificar que los efectos ocasionados por el cierre de zonas de anegamiento influyen directamente aguas abajo, aumentando drásticamente el valor de la velocidad de agua a aproximadamente 3 m/s (Figura 5, superior derecha e inferior izquierda). Esto además afectaría el ecosistema y corredores ecológicos a lo largo de los ríos.

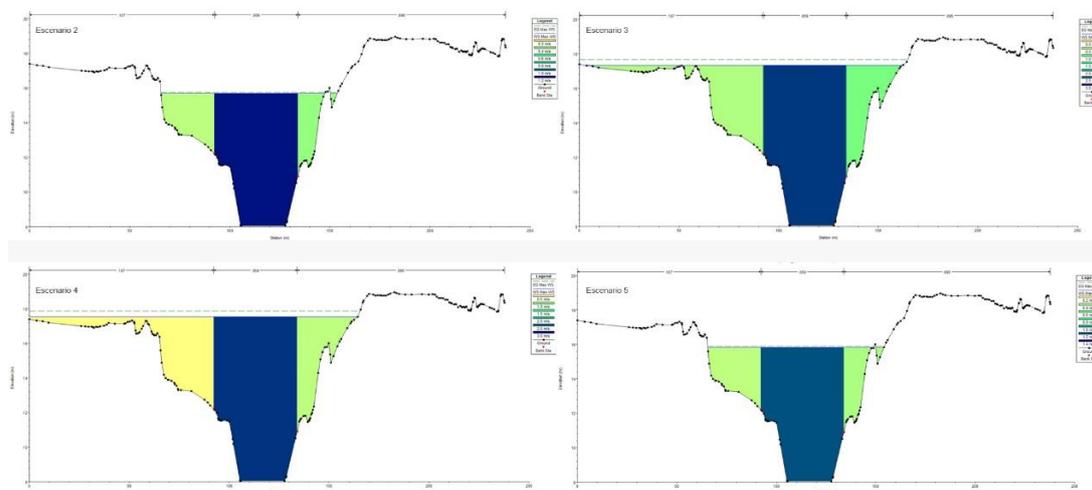


Figura 5. Representaciones gráficas de las velocidades máximas alcanzadas en los escenarios simulados.

6 Discusión

El proceso de la calibración es esencial para refinar los criterios y geometría base del modelo, lo que influye directamente en los resultados de los diferentes escenarios en los que se ejecuta un determinado proyecto. Uno de los métodos se enfoca específicamente en la altimetría o crecidas máximas del agua, logrando mejorar la precisión en cada punto de muestreo y en los resultados de los escenarios (Jiang et al., 2019). Por lo que, el modelo hidrodinámico es calibrado en base a la experiencia de los pobladores y agricultores de la zona, en donde se reconoce sectores puntuales en los que ha llegado el nivel de agua, permitiendo obtener un nivel referencial para un periodo de retorno de 100 años.

Otra forma es el uso de imágenes satelitales como los mapas de zonas inundables (Figura 10, anexos), el cual es útil para calibrar el modelo y validar los resultados en su forma base para un determinado periodo de retorno, tal como lo menciona la literatura (Dung et al., 2011) y (Dasgupta et al., 2020). Este método forma parte de la teledetección que, en conjunto con los puntos de referencia determinados en campo, se modifican los parámetros iniciales de la modelización como el ingreso de caudales y el coeficiente de rugosidad “n de Manning” (Ferreira et al., 2021; Mohammadian et al., 2022). En el caso presente, a través de una imagen satelital obtenida de la plataforma Google Earth Engine (Marzo del 2019), se logró validar el escenario base (Escenario 1) en el cual se estimó una inundación de 1012 hectáreas para un periodo de retorno de 100 años.

El uso de áreas de almacenamiento que conectan con los bordes de los ríos permite acumular agua que se desborda del cauce. Los cuales se inundan parcial o completamente y disminuyen las descargas de caudal río abajo de un determinado sector de estudio, tal como se menciona en el trabajo de (Chatterjee et al., 2008). Sin embargo, al restringir el paso del agua a las áreas de almacenamiento, debido a cambios en el uso de suelo (normalmente parte de la expansión agrícola), ocasiona elevación de niveles que puede comprometer la estabilidad de los cauces del río, y aumentando la vulnerabilidad frente a inundaciones en zonas antes no afectadas (ver figura 12 en anexos). El modelo hidrodinámico generado por Zeng et al. (Zeng et al., 2018), resalta la importancia de estas zonas como soluciones basadas en la naturaleza para mantener en control del caudal de los ríos. Este sistema es más conveniente y barato que medidas estructurales convencionales, ej. el uso de compuertas o vertederos.

Por medio del software Hec-Ras, al igual que los trabajos de Yalcin (2020) y Abdella & Mekuanent (2021) fue posible obtener datos de varios parámetros que intervienen en las crecidas de los ríos, como es la profundidad y extensión de la inundación, velocidad del agua, tiempos de llegada, etc. Se evidenció que río abajo existe un elevado nivel resultante en zonas donde antes no se inundaba, debido al aumento de descarga asociada a periodos de retorno de baja probabilidad, e.g. T = 100 y 200 años (escenarios 2 y 4, ver figura 5).

No obstante, con la eliminación de las áreas de almacenamiento bajo esos mismos caudales, estos sectores se verían afectados drásticamente debido al aumento de la velocidad y nivel de agua (corridos 3 y 5, ver figura 5). Estas dos variables pueden permitir el análisis del grado o nivel de afectación en una determinada zona, logrando planificar esquemas de mitigación de inundaciones apropiados y rentables (Salunkhe et al., 2018).

7 Conclusiones

La zona de estudio posee una topografía relativamente baja, casi uniforme y que, en promedio, no varía más de 5 metros de altitud. Por lo cual, y para este tipo de modelamiento en el cauce de un río, se requirió de un DEM (Modelo Digital del Terreno) con escala centimétrica o métrica (1m) para determinar de mejor manera toda la geometría del cauce y llanuras de los ríos Macul y Pula. Debido a que el DEM disponible de mejor resolución espacial era de 3m, fue imprescindible ejecutar fotogrametría a través de drones. Esto permitió extraer ortofotos para su procesamiento y obtención de un DEM a gran escala, logrando generar adecuadamente la geometría del lecho del cauce como las secciones transversales, altura de los bancos, ancho del canal, etc. Se generó entonces un primer modelo de elevación digital integrado de la zona.

Se generó un modelo hidrodinámico del sector de confluencia de los ríos Macul y Pula para este estudio. Con base en los puntos de muestreo o reconocimiento de sectores anegados por parte de los pobladores (cotas referenciales de zonas inundadas), se modificó los parámetros de modelización inicialmente cargados como los caudales o coeficientes de rugosidad (n de Manning). Lo cual permitió estimar secciones con diferentes rugosidades debido a la irregularidad del terreno, presencia de vegetación, actividad agrícola, etc. Un segundo recurso innovador para calibración de la simulación fue el uso de imágenes satelitales, a fin de comparar el área de inundación modelada vs un evento real de periodo de retorno similar a lo estipulado.

Las zonas de anegamiento juegan un papel fundamental como un amortiguador natural del agua excedente de los ríos, también conocida como inundación controlada. Esto permite mantener un caudal bajo aguas abajo sin perjudicar los bordes del cauce del río, evitando que se rebosen en zonas vulnerables aguas abajo. No obstante, tal fenómeno podría ocurrir debido a dos amenazas: i) el caudal de un periodo de retorno mayor a los simulados; y, ii) el cierre o cambio de uso del suelo en zonas que antes actuaban como amortiguadores, y que en un futuro estarían desconectadas por alguna estructura a lo largo del cauce.

En los escenarios 3 y 5 se simulan situaciones donde se eliminan estos sectores. En tal contexto, todo el volumen inicialmente contenido es enviado río abajo y, por consiguiente, la velocidad del agua aumenta en más del 60% y 76%, provocando una mayor energía y fuerza de contacto con los bordes del cauce. Este suceso se debe a que las áreas de almacenamiento representan aproximadamente el 80% de las zonas afectadas. Por consiguiente, al restringir su funcionamiento natural como regulador de inundaciones, el caudal que se almacenaba deberá fluir únicamente por el cauce y llanuras adyacentes, resultando en una capacidad reducida de transporte, y avenida indeseada inminente.

8 Mensajes claves para actores públicos y privados

Las zonas de almacenamiento son vitales para mitigar o retardar el efecto de las inundaciones, porque retienen gran cantidad de volúmenes de agua, evitando el desbordamiento de los ríos. Su correcto manejo podrá beneficiar zonas o poblados ubicados río abajo del sector de estudio. Por lo cual, se debe gestionar adecuadamente estas áreas, mediante ordenanzas municipales o política pública responsable y mantener una relación de beneficio mutuo, involucrando a los respectivos dueños o administradores privados de estas áreas de anegamiento. Adicionalmente, el mantener estas zonas de inundación controlada, permite el mantenimiento de corredores ecológicos para fauna y flora del sector, constituyéndose, en sí mismos, en soluciones verde-azules, o basadas en la naturaleza.

Esta investigación proporcionó información de gran relevancia de la zona de estudio, la cual se encuentra disponible y está bajo la administración de AVSF y de CADS-ESPOL para posteriores trabajos. Estos datos corresponden a los sobrevuelos realizados en los ríos Macul y Pula, además de una pequeña sección en la que fluye agua constantemente en época de invierno. Lo recabado en cuanto a fotogrametría, como la topografía a escala centimétrica de este sector, puede ser de interés para los diferentes actores públicos que estén realizando obras a lo largo de estos ríos. Uno de ellos corresponde a la construcción de la avenida o vía de tránsito y el puente de esta zona (Figura 1 en anexos, cauce de invierno 1 y 2); así como para política pública de los municipios aledaños y planificación hídrica para el MAATE (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica).

9 Referencias

- Abdella, K., & Mekuanent, F. (2021). Application of hydrodynamic models for designing structural measures for river flood mitigation: the case of Kulfo River in southern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2779–2791. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01057-5>
- Ali, R. M., Kamran, A., Rubab, S., Sailuj, S., & Sajjad, A. (2022). 2D Hydrodynamic Model for Flood Vulnerability Assessment of Lower Indus River Basin, Pakistan. In *World Environmental and Water Resources Congress 2018* (pp. 468–482). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784481400.044>
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*.
- Arrighi, C. (2021). A Global Scale Analysis of River Flood Risk of UNESCO World Heritage Sites. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.764459>
- Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., & Mikoš, M. (2018). Impact of the Rainfall Duration and Temporal Rainfall Distribution Defined Using the Huff Curves on the Hydraulic Flood Modelling Results. *Geosciences*, 8(2), 69. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020069>
- Chatterjee, C., Förster, S., & Bronstert, A. (2008). Comparison of hydrodynamic models of different complexities to model floods with emergency storage areas. *Hydrological Processes*, 22(24), 4695–4709. <https://doi.org/10.1002/hyp.7079>
- Chen, Y.-W., Tsai, J.-P., Chang, L.-C., Ho, C.-C., & Chen, Y.-C. (2014). The development of a real-time flooding operation model in the Tseng-Wen Reservoir. *Hydrology Research*, 45(3), 490–503. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.301>
- CIPAT-ESPOL, Agua, S. N. del, & Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. (2014). *Proceso: Re-Senagua-026-2012 Proyecto: Elaboración Del Mapa Hidrogeológico a Escala 1: 250.000 Informe Final*. 110–121. file:///C:/Users/Wimdowns/10/Downloads/4_MAPA HIDROGEOLOGICO ESPOL.pdf
- Dasallas, L., Kim, Y., & An, H. (2019). Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. *Water*, 11(10), 2048. <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Dasgupta, A., Thakur, P. K., & Gupta, P. K. (2020). Potential of SAR-Derived Flood Maps for Hydrodynamic Model Calibration in Data Scarce Regions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001988](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001988)
- Dhote, P. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Sharma, V. C., Garg, V., Nikam, B. R., & Chouksey, A. (2018). Experimental flood early warning system in parts of beas basin using integration of weather forecasting, hydrological and hydrodynamic models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII–5, 221–225. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-221-2018>
- Dung, N. V., Merz, B., Bárdossy, A., Thang, T. D., & Apel, H. (2011). Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1339–1354. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1339-2011>
- Farooq, M., Shafique, M., & Khattak, M. S. (2019). Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and high-resolution 12-m TanDEM-X DEM (WorldDEM). *Natural Hazards*, 97(2), 477–492. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03638-9>
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., Kaviski, E., & Bleninger, T. (2021). Calibration of river hydrodynamic models: Analysis from the dynamic component in roughness coefficients. *Journal of Hydrology*, 598, 126136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126136>
- Hromadka, T. V., Walker, T. R., & Yen, C. C. (1988). Using the Diffusion Hydrodynamic model (DHM) to evaluate flood plain environmental impacts. *Environmental Software*, 3(1), 4–11. [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(88\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0266-9838(88)90003-2)

- IGM. (2013). *Capas de Información Geográfica Básica del IGM de Libre Acceso*. Cartas Topográficas Escala 1:50.000, Formato Shp. <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- INAHMI. (2020). *Anuarios Meteorológicos del INAHMI año 2012*. Anuarios Meteorológicos Por Año: INAHMI. <https://elyex.com/inamhi-anuarios-metereologicos-en-pdf/>
- Jamali, B., Bach, P. M., Cunningham, L., & Deletic, A. (2019). A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model. *Water Resources Research*, 55(6), 4936–4953. <https://doi.org/10.1029/2018WR023679>
- Jiang, L., Madsen, H., & Bauer-Gottwein, P. (2019). Simultaneous calibration of multiple hydrodynamic model parameters using satellite altimetry observations of water surface elevation in the Songhua River. *Remote Sensing of Environment*, 225, 229–247. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.014>
- Kazakis, N., Vargemezis, G., & Voudouris, K. S. (2016). Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of The Total Environment*, 550, 742–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133>
- Koutsouris, A. J., & Lyon, S. W. (2018). Advancing understanding in data-limited conditions: estimating contributions to streamflow across Tanzania's rapidly developing Kilombero Valley. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2), 197–209. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1426857>
- Marimin, N. A., Mohammad Razi, M. A., Ahmad, M. A., Adnan, M. S., & Rahmat, S. N. (2018). HEC-RAS Hydraulic Model for Floodplain Area in Sembrong River. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.02.029>
- Mohammadian, A., Morse, B., & Robert, J.-L. (2022). Calibration of a 3D hydrodynamic model for a hypertidal estuary with complex irregular bathymetry using adaptive parametrization of bottom roughness and eddy viscosity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 265, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107655>
- Pradhan, B., & Youssef, A. M. (2011). A 100-year maximum flood susceptibility mapping using integrated hydrological and hydrodynamic models: Kelantan River Corridor, Malaysia. *Journal of Flood Risk Management*, 4(3), 189–202. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01103.x>
- Rivero Solórzano, J. (2014). *Actualización del Estudio Hidrológico Complejo Multipropósito Jaime Roldós Aguilera. Informe final*.
- Rushton, K. (2007). Representation in regional models of saturated river–aquifer interaction for gaining/losing rivers. *Journal of Hydrology*, 334(1–2), 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.008>
- Salunkhe, S. S., Rao, S. S., Prabu, I., Raghu Venkataraman, V., Krishna Murthy, Y. V. N., Sadolikar, C., & Deshpande, S. (2018). Flood Inundation Hazard Modelling Using CCHE2D Hydrodynamic Model and Geospatial Data for Embankment Breaching Scenario of Brahmaputra River in Assam. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(6), 915–925. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0749-3>
- Sanz, D., Castaño, S., Cassiraga, E., Sahuquillo, A., Gómez-Alday, J. J., Peña, S., & Calera, A. (2011). Modeling aquifer–river interactions under the influence of groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeology Journal*, 19(2), 475–487. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0694-x>
- SNI. (2014). *Sistema Nacional de Información*. IEDG Geoportal. <https://sni.gob.ec>
- Syafri, R. R., Hadi, M. P., & Suprayogi, S. (2020). Hydrodynamic Modelling of Juwana River Flooding Using HEC-RAS 2D. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 412, 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012028>
- Tanaka, T., Tachikawa, Y., Ichikawa, Y., & Yorozu, K. (2017). Impact assessment of upstream flooding on extreme flood frequency analysis by incorporating a flood-inundation model for

- flood risk assessment. *Journal of Hydrology*, 554, 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.012>
- van Vliet, M. T. H., Flörke, M., & Wada, Y. (2017). Quality matters for water scarcity. *Nature Geoscience*, 10(11), 800–802. <https://doi.org/10.1038/ngeo3047>
- Yalcin, E. (2020). Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. *Natural Hazards*, 101(3), 995–1017. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>
- Yin, J., Zhao, Q., Yu, D., Lin, N., Kubanek, J., Ma, G., Liu, M., & Pepe, A. (2019). Long-term flood-hazard modeling for coastal areas using InSAR measurements and a hydrodynamic model: The case study of Lingang New City, Shanghai. *Journal of Hydrology*, 571, 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.015>
- Zeleňáková, M., Fijko, R., Labant, S., Weiss, E., Markovič, G., & Weiss, R. (2019). Flood risk modelling of the Slatvinec stream in Kružlov village, Slovakia. *Journal of Cleaner Production*, 212, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.008>
- Zeng, Z., Liang, J., Yang, M., Zeng, Z., & Lang, Y. (2018). A hydrodynamic model coupled multiple scenarios for plain river network and its application. *MATEC Web of Conferences*, 246, 01016. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824601016>

10 Anexos

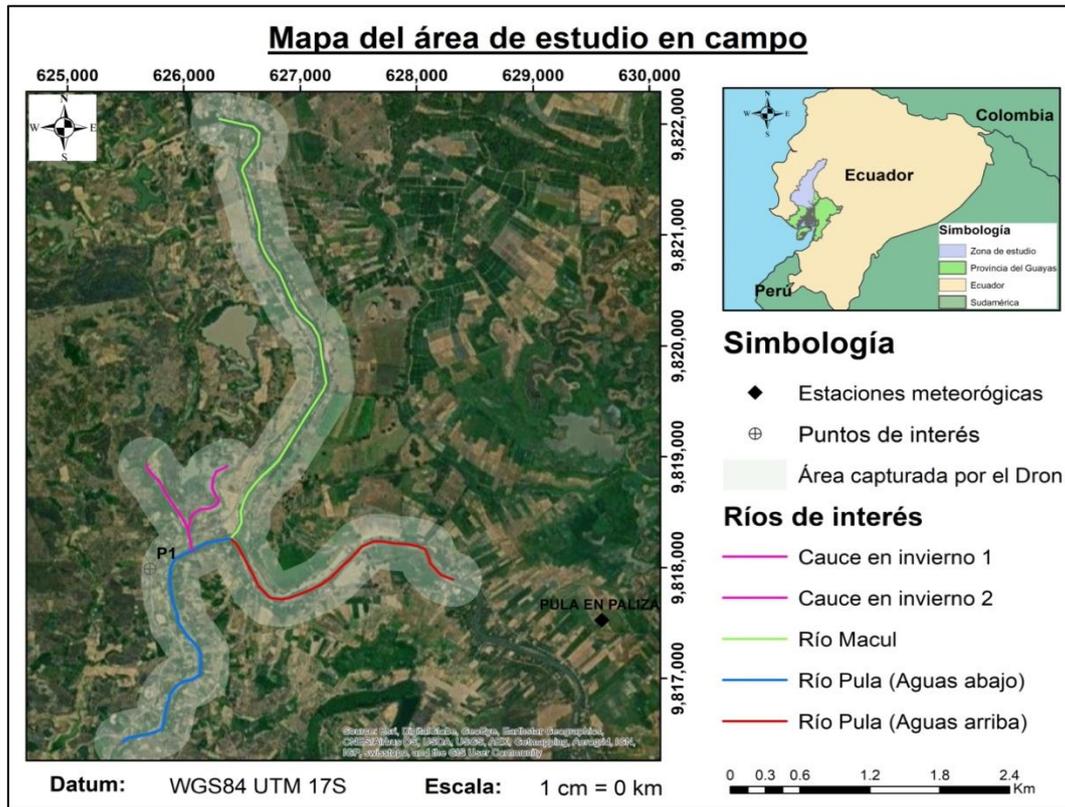


Figura 1. Mapa de ubicación de los ríos de interés y sobrevuelo con dron (Palestina - Vinces). Adaptado de (IGM, 2013; INAHMI, 2020; SNI, 2014).



Figura 2. Salida de campo por los ríos Macul y Pula del sitio de interés

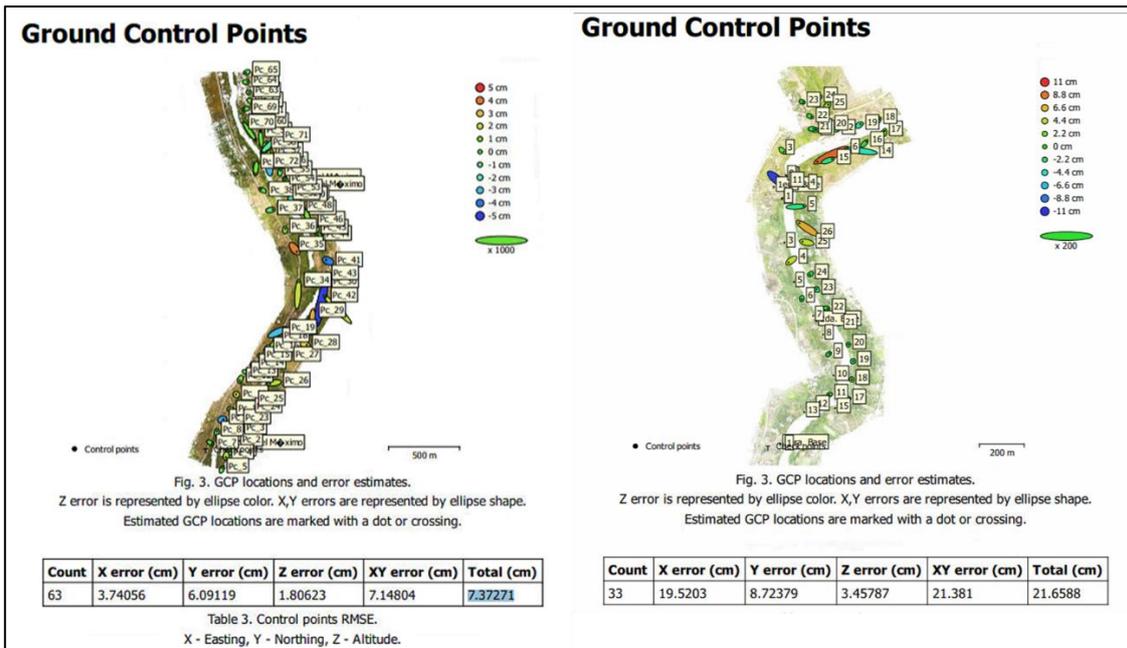


Figura 3. Nube de puntos y geo-referenciación en Agisoft a partir de puntos de control.

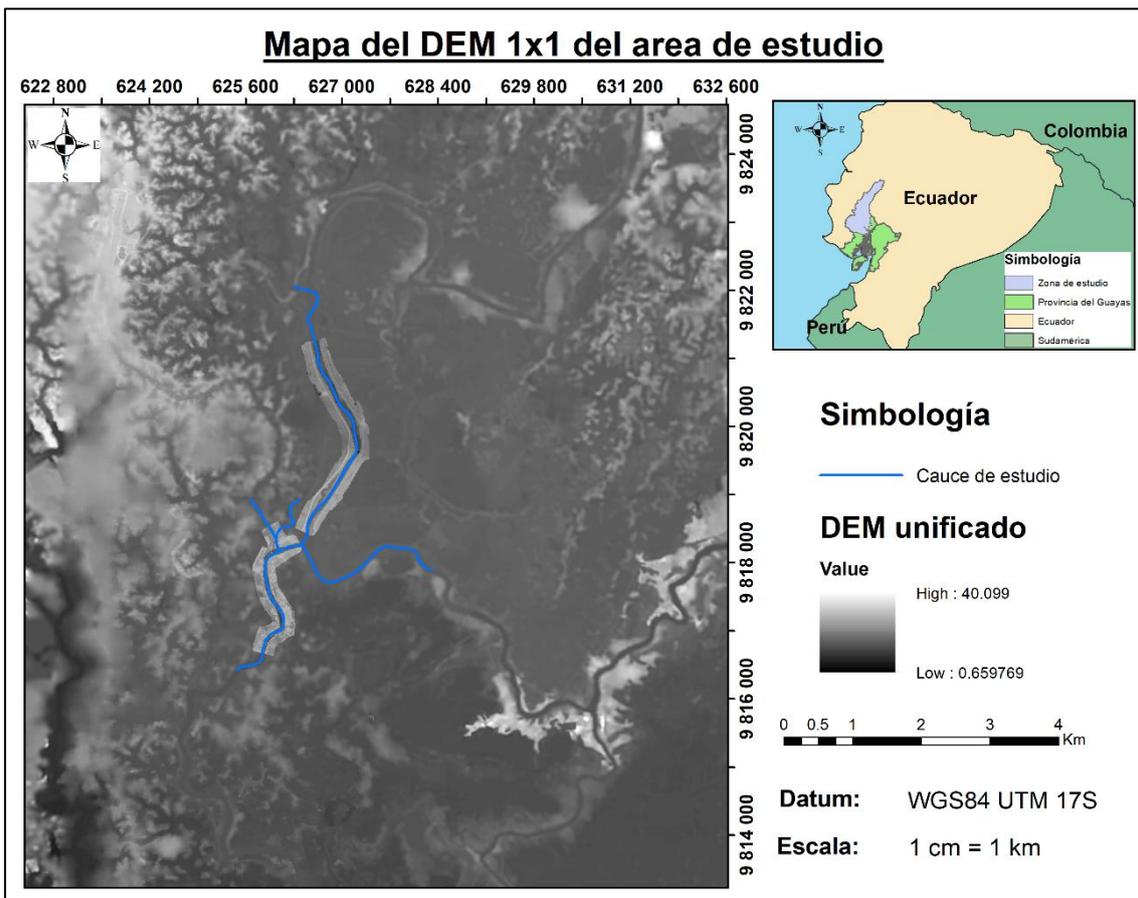


Figura 4. DEM final a escala de 1m de la zona de estudio para las simulaciones en Hec-Ras.

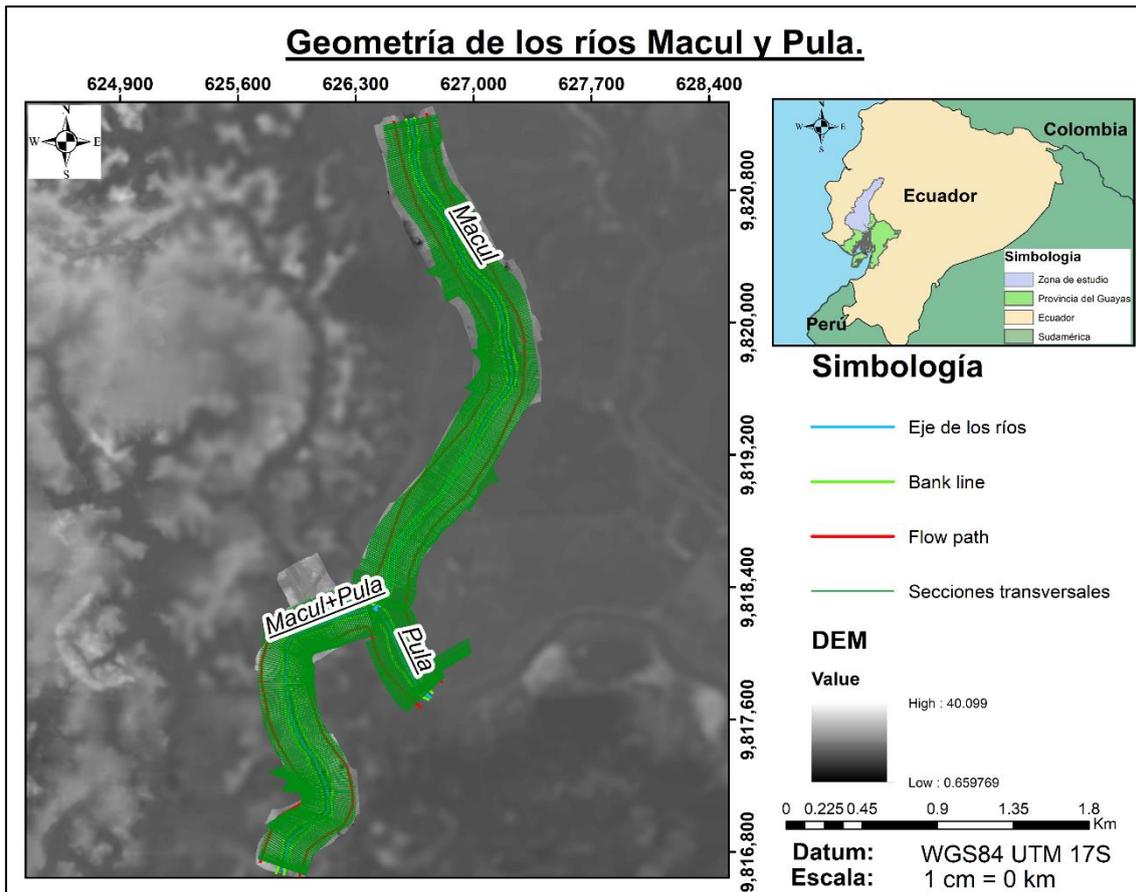


Figura 5. Geometría de los ríos de la zona de estudio.

Río Macul									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularid supr	cambios sección	obstrucc	vegetación	meandros	n corr
			firm_soil / Arena guesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Medium	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3345 - 0+3135	Llanura izq	0.028	0.004	0.000	0.025	0.043	1.00	0.100
		Canal	0.031	0.007	0.005	0.001	0.010	1.00	0.054
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.020	0.040	1.00	0.092
			Arena / Arena gruesa / Arena	Minor / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3135 - 3075	Llanura izq	0.027	0.004	0.000	0.024	0.038	1.00	0.093
		Canal	0.031	0.008	0.005	0.001	0.010	1.00	0.055
		Llanura der	0.026	0.005	0.000	0.022	0.035	1.00	0.088
			firm_soil / Arena guesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Very Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3075 - 0+2485	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.027	0.050	1.00	0.110
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.002	0.010	1.00	0.059
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.023	0.040	1.00	0.095
			Arena / Arena gruesa / Arena	Moderate / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible / Appreciable	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+2485 - 0+2275	Llanura izq	0.027	0.006	0.000	0.028	0.040	1.00	0.101
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.001	0.010	1.00	0.056
		Llanura der	0.026	0.005	0.000	0.027	0.040	1.00	0.098

Río Pula									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularid supr	cambios sección	obstrucc	vegetación	meandros	n corr
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Medium	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+2190 - 0+1970	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.025	0.049	1.00	0.107
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.004	0.010	1.00	0.059
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.023	0.040	1.00	0.095
			Arena / Arena gruesa / Arena	Minor / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1970 - 1630	Llanura izq	0.027	0.004	0.000	0.027	0.038	1.00	0.096
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.004	0.010	1.00	0.061
		Llanura der	0.026	0.010	0.000	0.026	0.048	1.00	0.110
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Very Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1630 - 0+1330	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.026	0.049	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.004	0.010	1.00	0.061
		Llanura der	0.026	0.008	0.000	0.028	0.036	1.00	0.098
			Arena / Arena gruesa / Arena	Moderate / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1330 - 0+1110	Llanura izq	0.027	0.005	0.000	0.026	0.049	1.00	0.107
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.002	0.010	1.00	0.057
		Llanura der	0.026	0.007	0.000	0.024	0.030	1.00	0.087
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible / Minor	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1110 - 0+900	Llanura izq	0.028	0.006	0.000	0.020	0.040	1.00	0.094
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.001	0.010	1.00	0.056
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.019	0.039	1.00	0.090
			Arena / Arena gruesa / firm_soil	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Minor / Negligible / Appreciable	Very Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+900 - 0+440	Llanura izq	0.026	0.005	0.000	0.026	0.051	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.009	0.010	0.004	0.010	1.00	0.064
		Llanura der	0.028	0.010	0.000	0.026	0.040	1.00	0.104

Figura 6. Estimación de coeficientes de rugosidad en los ríos Macul y Pula.

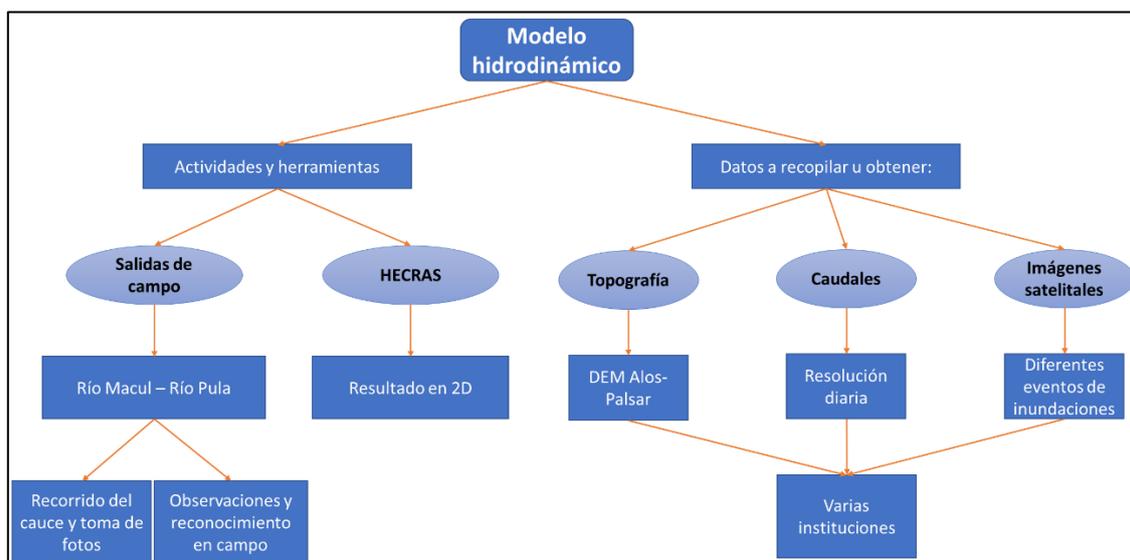


Figura 7. Esquema del modelo hidrodinámico.

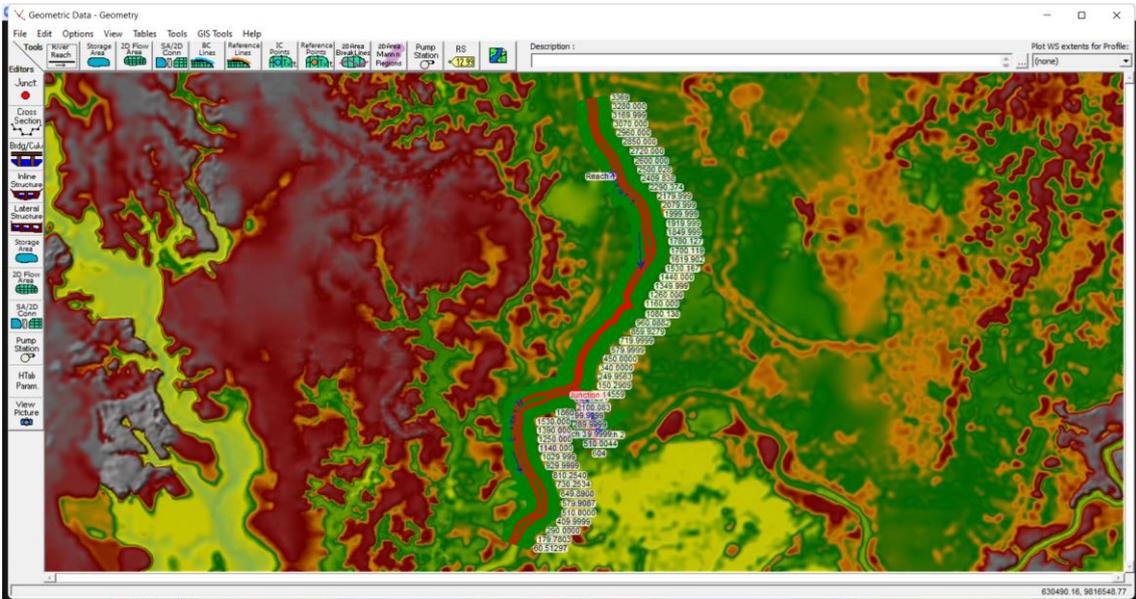


Figura 8. Geometría de los ríos Macul y Pula en Hec-Ras.

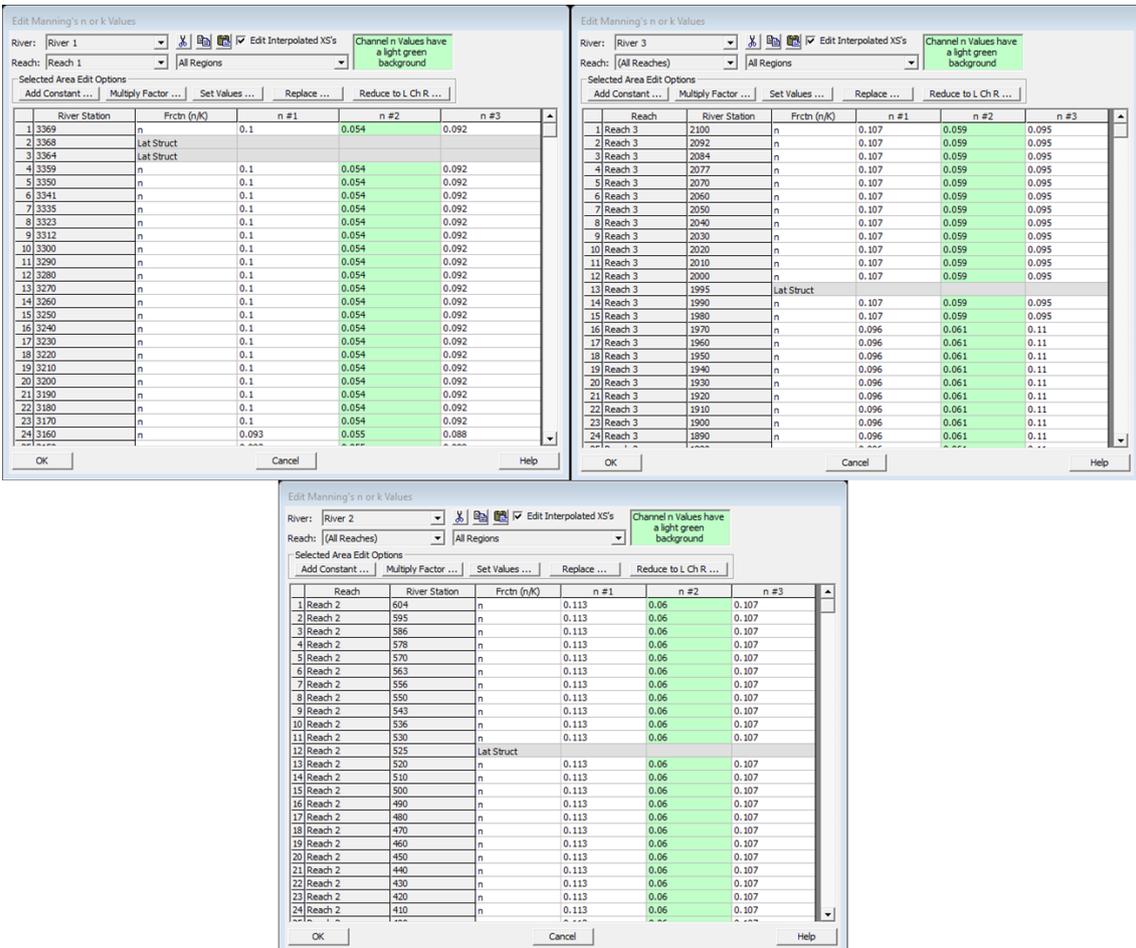


Figura 9. Ingreso de datos en las secciones transversales.

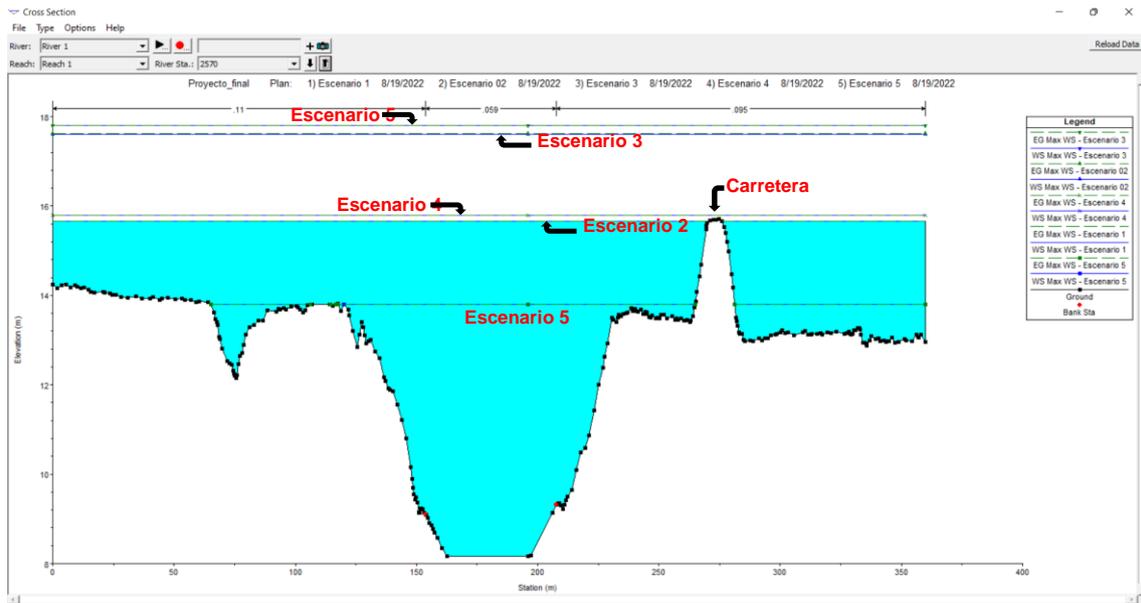


Figura 12. Sección inundable del río arriba del Macul.