

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLÓGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE
EROSIÓN-SEDIMENTACIÓN VERTICAL Y DE EROSIÓN
LATERAL, RÍO HUALLAGA: YURIMAGUAS - SELVA
ALEGRE”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

SMITH CALIXTO NUÑEZ NUÑEZ

ID: 0009-0009-3388-6913

ASESOR:

MSc. ROBERTO LUIS CAMPAÑA TORO

ID: 0000-0001-8133-2848

LIMA - PERÚ

2024

DEDICATORIA:
A quien siempre estará orgulloso de mi,
a mi papá.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre, María Anita, por su amor incondicional y su constante apoyo. Ella ha sido mi fuente de inspiración en cada paso de este camino. A mis hermanos, Caty y Miguel, les estoy eternamente agradecido por su aliento y compañía, siempre estando ahí para mí en los momentos más importantes.

A toda mi familia, a mis primos de Lima y en especial a mi Tía María, les debo una gran deuda de gratitud por su apoyo y aliento durante mi estadía en la ciudad. Su hospitalidad ha sido fundamental en mi viaje académico. Un agradecimiento especial a mi tío Andrés, cuya generosidad al permitirme vivir en su departamento fue un acto de bondad que nunca olvidaré. A mi asesor MSc. Roberto Campaña, gracias por guiarme a través de este proceso.

Finalmente, quiero dedicar una mención muy especial a mi padre, quien lamentablemente nos dejó en 2021. Aunque ya no está con nosotros, su espíritu y confianza en mí han sido una fuente constante de motivación. Sé que estaría orgulloso de ver hasta dónde he llegado.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract	5
Prólogo	6
Lista de tablas	7
Lista de figuras	8
Lista de símbolos y siglas	10
Capítulo I: Introducción	13
1.1 Descripción del problema de estudio	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo General	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Hipótesis	14
1.4 Metodología	14
1.5 Antecedentes y estado del arte	15
Capítulo II: Fundamento teórico y conceptual	18
2.1 Definición de términos	18
2.1.1 Modelo hidrológico	18
2.1.2 Transporte de sedimentos	18
2.1.3 Geomorfología en ríos del Amazonas	18
2.1.4 Análisis multitemporal	18
2.1.5 Modelación hidráulica unidimensional de un río con fondo fijo	19
2.1.6 Modelación hidráulica unidimensional de un río con fondo móvil	19
2.1.7 Modelación hidráulica unidimensional de un río con fondo móvil y erosión lateral	19
2.1.8 Modelo HEC-RAS 1D de fondo Móvil con Incorporación de Erosión Lateral	19
2.2 Geomorfología en ríos del Amazonas	19
2.3 Imágenes satelitales	21
2.3.1 Satélites artificiales Landsat	21
2.3.2 Bandas Espectrales	22
2.4 Teoría de transporte de sedimentos	22

2.4.1	Modelo numérico	22
2.4.2	Ecuación de Exner	24
2.4.3	Velocidad de caída	24
2.4.4	Inicio de movimiento	26
2.4.5	Capacidad de Transporte	27
2.4.6	BSTEM	28
2.5	Índices de evaluación de la calibración	30
2.5.1	Coeficiente de correlación (R)	30
2.5.2	Relación de la desviación estándar de observaciones (RSR)	30
2.5.3	Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	31
2.5.4	Índice promedio (P)	31
Capítulo III: Caracterización de procesos de erosión lateral y de sedimentación y erosión vertical		32
3.1	Caracterización física	32
3.1.1	Caracterización de la cuenca del Río Huallaga	32
3.1.2	Caracterización geomorfológica del tramo de estudio	34
3.1.3	Caracterización hidrológica del tramo	35
3.1.4	Caracterización sedimentológica de tramo	38
3.2	Caracterización de procesos de sedimentación y erosión vertical	42
3.2.1	Levantamiento batimétrico	42
3.2.2	Análisis de cambio de fondo	42
3.3	Caracterización de procesos de erosión lateral	47
3.3.1	Procesamiento de imágenes satelitales	47
3.3.2	Evolución del eje central del río	48
3.3.3	Cálculo y evolución de los parámetros del río	49
Capítulo IV: Modelación de procesos de erosión lateral y de sedimentación y erosión vertical		55
4.1	Metodología de modelamiento	55
4.2	Construcción del modelo	55
4.2.1	Creación de la geometría	55
4.2.2	Rugosidad del lecho	56
4.2.3	Conexiones	56
4.2.4	Condiciones de borde	57
4.2.5	Incremento computacional	60
4.2.6	Capacidad de transporte de sólidos	60

4.2.7	Parámetros de calibración	61
4.2.8	Consideraciones del modelo	64
4.3	Calibración del modelo	65
4.3.1	Calibración sin erosión lateral	66
4.3.2	Calibración con erosión lateral	71
4.4	Análisis de resultados	74
4.4.1	Presentación de las variaciones medias del lecho modeladas	74
4.4.2	Análisis de cambio de fondo de los modelos	75
4.4.3	Evaluación de las variaciones en los volúmenes de sedimentos erosionados y/o sedimentados	81
4.4.4	Validación de resultados de erosión lateral	82
	Conclusiones	84
	Recomendaciones	87
	Referencias bibliográficas	88
	Anexos	90

RESUMEN

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo general representar los procesos de erosión lateral, y de erosión y sedimentación vertical en el tramo del río Huallaga comprendido entre Yurimaguas y Selva Alegre mediante la modelación numérica unidimensional. A lo largo del estudio, se lograron plenamente los objetivos planteados, demostrando la capacidad del modelo para reflejar de manera adecuada las dinámicas geomorfológicas del río en sus diferentes zonas a lo largo de los 80,3 km del tramo estudiado. La modelación de este tramo se realizó utilizando el modelo HEC–RAS 1D en su versión de fondo móvil y erosión lateral. Este modelo se fundamenta en tres aspectos clave: a) las ecuaciones unidimensionales de continuidad y cantidad de movimiento del agua, b) la ecuación de continuidad de sedimentos, y c) el análisis de estabilidad de taludes según la metodología BSTEM. Gracias a esta combinación, fue posible simular con precisión los cambios medios en el lecho y los taludes erosionables, lo que permitió capturar de manera eficaz los procesos de erosión y sedimentación en el tramo del río Huallaga. En cuanto a los objetivos específicos, se llevó a cabo una detallada caracterización de los procesos de erosión lateral, así como de sedimentación y erosión vertical. Para ello, se comparó la información topo-batimétrica disponible de los meses de marzo y agosto de 2018, complementada con datos de estudios previos. Este análisis permitió identificar con precisión las zonas donde predomina cada proceso: en las áreas con geología terciaria, más resistente a la erosión lateral, se observó una mayor prevalencia de la erosión vertical del lecho, mientras que, en las áreas de geología cuaternaria, con menor resistencia, predominaron los procesos de sedimentación vertical. Finalmente, el modelo numérico unidimensional fue construido, calibrado y analizado con éxito, representando con precisión los procesos de erosión lateral, basados en el procesamiento de imágenes satelitales Landsat desde 1984 hasta 2023, y los procesos de erosión y sedimentación vertical. Los resultados obtenidos proporcionan una herramienta para futuros análisis de las dinámicas fluviales en el tramo estudiado del río Huallaga.

ABSTRACT

The general objective of this thesis work was to represent the processes of lateral erosion, and vertical erosion and sedimentation in the section of the Huallaga River between Yurimaguas and Selva Alegre through one-dimensional numerical modeling. Throughout the study, the stated objectives were fully achieved, demonstrating the capacity of the model to adequately reflect the geomorphological dynamics of the river in its different areas along the 80,3 km of the studied section. The modeling of this section was carried out using the HEC–RAS 1D model in its moving bottom and lateral erosion version. This model is based on three key aspects: a) the one-dimensional equations of continuity and momentum of water, b) the sediment continuity equation, and c) the slope stability analysis according to the BSTEM methodology. Thanks to this combination, it was possible to accurately simulate the average changes in the bed and erodible slopes, which made it possible to effectively capture the erosion and sedimentation processes in the Huallaga River section. Regarding the specific objectives, a detailed characterization of the lateral erosion processes, as well as sedimentation and vertical erosion, was carried out. To do this, the topo-bathymetric information available for the months of March and August 2018 was compared, complemented with data from previous studies. This analysis allowed us to precisely identify the areas where each process predominates: in the areas with Tertiary geology, more resistant to lateral erosion, a greater prevalence of vertical erosion of the bed was observed, while, in the areas of Quaternary geology, with lower resistance, vertical sedimentation processes predominated. Finally, the one-dimensional numerical model was successfully built, calibrated and analyzed, accurately representing the lateral erosion processes, based on the processing of Landsat satellite images from 1984 to 2023, and the vertical erosion and sedimentation processes. The results obtained provide a tool for future analysis of fluvial dynamics in the studied section of the Huallaga River.

PRÓLOGO

El ámbito del estudio es el tramo de 80.3 km del río Huallaga comprendido entre las estaciones hidrométricas Yurimaguas y Selva Alegre; en dicho tramo el río, de 0.10‰ de pendiente y 406 m de ancho, se tiene un comportamiento meándrico típico de tramos de lecho arenoso y baja pendiente. En los 42 km iniciales del tramo las orillas están constituidas por rocas sedimentarias de origen terciario; en los 38.3 km finales, las orillas están constituidas por material aluvial de origen cuaternario.

En la primera parte del estudio se realizó: a) La caracterización de los procesos de erosión y sedimentación vertical a partir de la información batimétrica del río correspondiente a los meses de marzo y agosto de 2018, y b) La caracterización de los procesos de erosión lateral a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat entre 1984 y 2023. Los resultados mostraron la predominancia de los procesos de erosión vertical del lecho en la porción del tramo cuyas orillas están compuestas por rocas sedimentarias resistentes a la erosión lateral, y la predominancia de procesos de sedimentación vertical del lecho en la porción del tramo con orillas compuestas por material aluvial con baja resistencia a la erosión lateral.

En la segunda parte del estudio se realizó la modelación matemática de los procesos de erosión y sedimentación vertical, y de erosión lateral caracterizados en la primera parte; para tal fin se empleó el modelo numérico unidimensional HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. El modelamiento se realizó empleando la opción del software que considera que el fondo es móvil y que las orillas pueden erosionarse lateralmente. Para el modelamiento de estos procesos el software empleó respectivamente la ecuación de continuidad de sedimentos (Ecuación de Exner) y el análisis de estabilidad lateral con el modelo de equilibrio límite en capas horizontales de BSTEM.

La modelación matemática realizada reprodujo razonablemente bien las tendencias observadas en la primera parte del estudio, demostrando así la relevancia de considerar los procesos de erosión lateral en la modelación de los procesos de sedimentación y erosión vertical del tramo de estudio. El trabajo se constituye en un aporte para el entendimiento y caracterización del desarrollo de los procesos de erosión lateral, y de erosión y sedimentación vertical, característicos en los ríos Amazónicos de naturaleza meándrica. Asimismo, se considera que estos procedimientos pueden ser de utilidad para el desarrollo de nuevas investigaciones y estudios relacionados con los procesos estudiados.

ASESOR

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2.1:	Bandas espectrales del satélite Landsat 8	22
Tabla N° 3.1:	Unidades hidrográficas de la cuenca del río Huallaga	32
Tabla N° 3.2:	Caudales medios mensuales del río Huallaga en las esta- ciones Chazuta y Yurimaguas	36
Tabla N° 3.3:	Caudales medios mensuales simulados para 2018	37
Tabla N° 3.4:	Muestras tomadas en los Malos Pasos Paranapura, Provi- dencia, Metrópolis, Oromina, Progreso	38
Tabla N° 3.5:	Resumen de diámetros característicos en cada mal paso .	40
Tabla N° 3.6:	Lista de imágenes satelitales descargadas	47
Tabla N° 3.8:	Parámetros geométricos promedio de todo el tramo de es- tudio	50
Tabla N° 3.9:	Parámetros geométricos promedio de todo el tramo terciario	51
Tabla N° 3.10:	Parámetros geométricos promedio de todo el tramo cuater- nario	51
Tabla N° 4.1:	Caudales medios mensuales simulados en 2018 para la si- mulación en HEC-RAS	57
Tabla N° 4.2:	Caudal de sólidos medios mensuales simulados en HEC- RAS	60
Tabla N° 4.3:	Resumen de diámetros característicos en cada mal paso .	61
Tabla N° 4.4:	Materiales por defecto incluidos en Hec Ras	63
Tabla N° 4.5:	Modelos para calibración final sin erosión lateral	66
Tabla N° 4.6:	Índices de calibración de modelos sin erosión lateral en zo- na terciaria	68
Tabla N° 4.7:	Modelos para calibración final con erosión lateral	71
Tabla N° 4.8:	Índices de calibración de modelos con erosión lateral en zona cuaternaria	73
Tabla N° 4.10:	Índices de calibración de modelos finales en todo el tramo	75

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Vista satelital del río Huallaga para 2 distintos años	20
Figura N° 2.2: Equilibrio de fuerzas de una partícula en suspensión . . .	25
Figura N° 2.3: Relación entre el Coeficiente de Arrastre CD y el Número de Reynolds – Partícula	25
Figura N° 2.4: Diagrama de SHIELDS para la Iniciación del Movimiento .	27
Figura N° 2.5: Diagrama de fuerzas para el cálculo del factor de seguridad	29
Figura N° 3.1: Unidades hidrográficas de la cuenca del río Huallaga y tra- mo de estudio	33
Figura N° 3.2: Mapa geológico del tramo de estudio	34
Figura N° 3.3: Cuencas aportantes en el tramo de estudio	35
Figura N° 3.4: Curva granulométrica en la zona Parapapura	38
Figura N° 3.5: Curva granulométrica en la zona Providencia	39
Figura N° 3.6: Curva granulométrica en la zona Metrópolis	39
Figura N° 3.7: Curva granulométrica en la zona Oromina	39
Figura N° 3.8: Curva granulométrica en la zona Progreso	40
Figura N° 3.9: Ubicación de las muestras tomadas	41
Figura N° 3.10: Cambio lecho e identificación procesos en la zona Terciaria	43
Figura N° 3.11: Cambio medio de lecho en la zona A	44
Figura N° 3.12: Cambio lecho e identificación procesos en la zona C . . .	45
Figura N° 3.13: Cambio medio de lecho en la zona cuaternaria	46
Figura N° 3.14: Evolución del eje central del río entre 1984-2023	49
Figura N° 3.15: Esquema de los parámetros de geometría de un meandro	50
Figura N° 3.16: Evolución de la sinuosidad media en la zona terciaria entre 1984-2023	51
Figura N° 3.17: Evolución de la sinuosidad media en la zona cuaternaria entre 1984-2023	52
Figura N° 3.18: Corte meándrico en el año 2020	52
Figura N° 3.19: Evolución de la migración en todo el tramo entre 1984-2022	53
Figura N° 3.20: Evolución de la migración en la zona terciaria entre 1984- 2022	53
Figura N° 3.21: Evolución de la migración en la zona cuaternaria entre 1984-2022	54
Figura N° 3.22: Migración lateral del tramo en 2018	54
Figura N° 4.1: Flujograma para la modelación numérica	55
Figura N° 4.2: Secciones establecidas para el modelamiento	56

Figura N° 4.3: Conexiones del modelo	57
Figura N° 4.4: Cuencas delimitadas hasta estaciones usadas para la construcción de la curva de descarga	58
Figura N° 4.5: Curva de descargar construida para la estación selva alegre	59
Figura N° 4.6: Método de deposición de sedimentos	62
Figura N° 4.7: Calibración final sin erosión lateral	67
Figura N° 4.8: Variación media del lecho de los modelos finales sin erosión lateral en la zona sin erosión lateral	68
Figura N° 4.9: Modelo final sin erosión lateral a lo largo del tramo de geología cuaternaria	69
Figura N° 4.10: Modelo final sin erosión lateral a lo largo de todo el tramo de estudio	69
Figura N° 4.11: Variación media del lecho del modelo final sin erosión lateral en todo el tramo de estudio	70
Figura N° 4.12: Modelos de calibración final incluyendo erosión lateral en zona cuaternaria	72
Figura N° 4.13: Variación media del lecho modelada y real de los modelos finales con erosión lateral en el tramo cuaternario	73
Figura N° 4.14: Modelos de calibración final en todo el tramo	74
Figura N° 4.15: Variación media del lecho del modelo final en todo el tramo de estudio	75
Figura N° 4.16: Variación media del lecho de los modelos finales en zona terciaria	76
Figura N° 4.17: Resultados en la sección de progresiva 1+030 Km	76
Figura N° 4.18: Resultados en la sección de progresiva 17+130 Km	77
Figura N° 4.19: Resultados en la sección de progresiva 37+010 Km	77
Figura N° 4.20: Resultados en la sección de progresiva 33+230 Km	77
Figura N° 4.21: Resultados en la sección de progresiva 29+220 Km	78
Figura N° 4.22: Variación media del lecho de los modelos finales en zona cuaternaria	78
Figura N° 4.23: Resultados en la sección de progresiva 53+030 Km	79
Figura N° 4.24: Resultados en la sección de progresiva 67+140 Km	79
Figura N° 4.25: Resultados en la sección de progresiva 49+420 Km	80
Figura N° 4.26: Resultados en la sección de progresiva 58+340 Km	80
Figura N° 4.27: Resultados en la sección de progresiva 76+200 Km	80
Figura N° 4.28: Resultados en la sección de progresiva 78+330 Km	81
Figura N° 4.29: Volúmenes de sedimentos modelados a través del tramo	81
Figura N° 4.30: Erosión lateral observada y modelada entre marzo y agosto de 2018	83

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

t	: Tiempo
x	: Distancia a lo largo del eje
q_l	: Flujo lateral por unidad de distancia
Q	: Caudal
A_T	: Área de sección transversal
g	: Aceleración de la gravedad
S_f	: Pendiente de energía
V	: Velocidad
Q	: Caudal
z	: Cota de terreno
A_T	: Área de sección transversal
η	: Elevación de fondo
λ_p	: Porosidad
q_t	: Transporte de sedimentos
V_*	: Velocidad de corte
γ_s	: Peso específico del sedimento
γ	: Peso específico del agua
Re_*	: Número de Reynolds de la partícula
ν	: Viscosidad cinemática
δ	: Espesor de subcapa laminar
g_s	: Capacidad de transporte
$(\tau_o)_c$	: Esfuerzo de corte crítico.
τ_b	: Esfuerzo cortante en el lecho
τ^*	: Parámetro de shields adimensional
d_{50}	: Diámetro medio de la partícula

L	: Longitud de plano de falla
S	: Fuerza de la matriz de succión
U	: Fricción hidrostática
P	: Fuerza hidrostática de confinamiento
ϕ'	: Ángulo de fricción
ϕ^b	: Relación entre la matriz de succión y la cohesión aparente
C'	: Cohesión efectiva
β	: Ángulo de plano de falla
α	: Ángulo de talud
X_i^{obs}	: Datos observados
X_i^{sim}	: Información simulada

SIGLAS

NASA	: National Aeronautics and Space Administration
USGS	: United States Geological Survey
NSE	: Índice de eficiencia Nash-Sutcliffe
RSR	: Relación de la desviación estándar de observaciones
UTM	: Universal transversal Mercator
MTC	: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
SWAT	: Soil & Water Assessment Tool
HEC-RAS	: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
INGEMET	: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
ANA	: Autoridad Nacional del Agua
BSTEM	: Bank Stability and Toe Erosion Model

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

La realización de estudios ambientales y de ingeniería en el ámbito de los ríos de la Amazonía Peruana, requiere de una representación adecuada de su cambiante morfología consistente con sus procesos simultáneos de erosión lateral, y de erosión y sedimentación vertical de sus lechos. Para una mejor representación de los fenómenos involucrados, Rhoads (2020) menciona la importancia que tiene la erosión lateral de bancos como parte fundamental de la dinámica de los cursos aluviales con patrones meándricos naturales; a menos que estén restringidos por roca madre u otros materiales resistentes, los ríos meándricos experimentan migración a lo largo de los lechos del valle, lo que contribuye al desarrollo de llanuras de inundación y a la acumulación y eventual movilización ocasional de sedimentos en estas áreas.

Como expone Lai et al. (2015) la mayoría de los modelos de sedimentos ignoran los mecanismos de fallo de las orillas o implementan solo métodos simples; asimismo, Semmad, Jotisankasa, Mahannopkul, y Inazumi (2022), mencionan que numerosos estudios han evidenciado los impactos negativos ocasionados por la erosión de los bancos en la carga acumulativa de sedimentos en los ríos. El exceso de sedimentos se destaca como un elemento fundamental que incide en el equilibrio del sistema fluvial, dando lugar a perjuicios en su entorno ecológico al incrementar la turbidez del agua y el transporte de sustancias contaminantes asociadas a los sedimentos.

En base a lo anteriormente explicado, el problema a tratar en la tesis es la descripción, y la representación mediante modelación matemática unidimensional de los procesos de erosión lateral, y de erosión y sedimentación vertical en un tramo de un río meándrico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Representar los procesos de erosión lateral, y de erosión y sedimentación vertical en el tramo del río Huallaga comprendido entre Yurimaguas y Selva Alegre mediante la modelación numérica unidimensional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización de los procesos de erosión lateral, y de erosión y sedimentación vertical del tramo del río Huallaga comprendido entre Yurimaguas y Selva Alegre.

- Construir, calibrar y analizar los resultados de un modelo numérico unidimensional que permita modelar los procesos previamente caracterizados.

1.3 HIPÓTESIS

Es posible representar los procesos de erosión lateral, y de erosión y sedimentación vertical del tramo del río Huallaga comprendido entre Yurimaguas y Selva Alegre mediante un modelo numérico unidimensional.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo de la presente tesis fue la siguiente:

- Se recopiló información existente correspondiente a batimetría, mediciones de caudales líquidos y sólidos, granulometría, erosiones laterales disponibles para el presente estudio y proveniente de estudios previos.
- A partir de la información topo-batimétrica disponible, consistente en levantamientos topo- batimétricos efectuados en los meses de marzo y agosto de 2018, se caracterizó los procesos de erosión lateral, y de sedimentación y erosión vertical presentados en dicho lapso de tiempo. El análisis de los procesos de erosión lateral fue complementado con la información proveniente de las imágenes satelitales LANDSAT, descargadas por la plataforma USGS.
- Se modelaron los procesos de erosión lateral, y de sedimentación y erosión vertical mediante el modelo HEC-RAS 1D, en su versión 6.2, con el módulo de fondo móvil que incorpora el cálculo de la erosión lateral mediante el modelo BSTEM. La construcción del modelo y su calibración empleó los levantamientos topo- batimétricos efectuados en los meses de marzo y agosto de 2018 y la información hidrológica y sedimentológica recopilada de estudios previos.

1.5 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El MTC (2018) realizó caracterizaciones hidrológicas, hidráulicas y del transporte de sedimentos del tramo, los cuales tuvieron como objetivo analizar la disponibilidad de navegación del río a lo largo del año.

En la Tesis de maestría "Modelamiento fluviomorfológico bidimensional de procesos de sedimentación y erosión vertical de malos pasos en el tramo bajo del río Huallaga" (Reyes, 2023), que tuvo por objetivo analizar los procesos de sedimentación y erosión vertical de malos pasos en el tramo bajo del río Huallaga mediante el empleo del modelo numérico bidimensional de fondo móvil Telemac 2D y Sisiphe, se observó que el modelo presentó mejores resultados en los tramos donde la erosión lateral está restringida por la presencia de bancos con afloramientos de rocas sedimentarias del terciario en comparación con los obtenidos en los tramos con bancos fácilmente erosionables compuestos por material aluvial de naturaleza cuaternaria.

En la Tesis de maestría "Modelación morfodinámica de un cauce trenzado en Colombia (río Cusiana)" (Carvajal, 2022), que tuvo por objetivo identificar el modelo morfodinámico de mejor desempeño para un tramo del Río Cusiana trenzado, se concluyó que el modelo Telemac 2D y Sisyphe era el más adecuado para abordar la dinámica lateral y el desplazamiento de barras en ríos de tipo trenzado, como es el caso del tramo de interés en el Río Cusiana.

En el artículo "A coupled simulation of lateral erosion, unsaturated seepage and bank instability due to prolonged high flow" (Semmad et al., 2022), se analizó cómo la infiltración saturada/no saturada y la disminución del nivel del río afectan la estabilidad de los bancos, y la erosión fluvial, para esto, se llevó a cabo análisis de la retirada de un banco durante un flujo prolongado en el sur de Tailandia, donde se tuvo en cuenta estos procesos hidrológicos y mecánicos, mediante un modelo de infiltración de elementos finitos (SEEP/W), análisis de estabilidad (SLOPE/W) y un modelo de Estabilidad de Bancos y Erosión del pie de talud (BSTEM). El análisis reveló que una lluvia antecedente prolongada llevó a la saturación del suelo del banco, lo que desencadenó una falla por deslizamiento del banco en una etapa temprana del evento de inundación.

En el estudio "Methodological guidelines for the development of the physical baseline of the Andes-Amazon rivers- Case study of the Huallaga river" (Guerrero et al., 2021), se realizó un análisis multitemporal con imágenes satelitales Landsat a lo largo del curso del río para el intervalo 1987-2017, además de mediciones de

distintas variables como las velocidades y los patrones de flujo, a través de mediciones en secciones transversales, se cuantificó e identificó el material fino (arcilla y limo) y grueso (arena) que compone el río. De este estudio se concluyó que el transporte de sedimentos en el lecho del río no fue homogéneo a lo largo de un río, que pudo haber el mismo caudal a lo largo del río, pero el transporte de sedimentos ser diferente en cada sección. También que sería necesario dragado de áreas en aguas poco profundas para mantener la viabilidad de la navegación las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

En el artículo "Variable discharges control composite bank erosion in Zoige meandering rivers" (Gao, Li, y Yang, 2021), se utilizó el modelo BSTEM el cual fue calibrado a partir de descargas diarias compiladas, mediciones de campo y parámetros de modelo predefinidos para modelar la erosión fluvial (FE) y el colapso de los bancos (BC) en la capa inferior de un perfil bancario compuesto, a partir de esto se demostró un gran potencial para utilizar caudales efectivos (Q_e) basados en hidrogramas para FE y BC respectivamente para revelar muchos procesos complejos en sistemas fluviales.

En el Tesis de pregrado "Simulación numérica de la dinámica del flujo secundario helicoidal y del transporte de sedimentos en el modelo hidráulico del río Madre de Dios – tramo La Pastora" (Cusipuma, 2020), se tuvo como objetivo analizar la influencia del flujo secundario en la morfología y el transporte de sedimentos en un tramo curvo del Río Madre de Dios para esto se construyó un modelo hidráulico de lecho móvil a escala 1/60 en el Laboratorio Nacional de Hidráulica - LNH, así como se realizó una simulación numérica bidimensional empleando el módulo TELEMAC-2D (hidráulico) y SISYPHE (transporte de sedimentos) del sistema de código abierto Open TELEMAC-MASCARET, los resultados de la simulación permitieron concluir que el perfil de velocidades en el plano x-y debido a la formación del flujo helicoidal eran mayores en la margen derecha llegando a ser el máximo de 0.5 m/s.

En la Investigación "Análisis geomorfológico y dinámica fluvial del río Huallaga en la localidad de Yurimaguas" (Ramos y Alva, 2020), se caracterizó y representó la geomorfología y dinámica fluvial del río Huallaga en la localidad de Yurimaguas a partir de recopilar información bibliográfica y mediciones publicadas por diferentes instituciones.

En el artículo "Modeling of multilayer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model" (Lai et al., 2015), se creó un modelo acoplado que

combina el modelo BSTEM con un modelo bidimensional de lecho móvil recién desarrollado. El modelo desarrollado se mostró estable y fácil de aplicar, lo que lo convirtió en una herramienta práctica para predecir la erosión de bancos causada por procesos fluviales y geotécnicos.

En la Tesis de pregrado "Procesos fluviomorfológicos de relevancia en el río Tahuamanu en el ámbito del puente Tahuamanu" (Solorzano, 2013), se empleó imágenes satelitales adquiridas de plataformas como ESDI (Earth Science Data Interface) y CBERS (satélite chino-brasileño de recursos terrestres), procesadas para obtener datos estadísticos que sirvieron de base para generar ecuaciones de migración de río. Del análisis se observó, desde la construcción del puente en 1998, una disminución en el radio de curvatura del meandro aguas arriba del puente, pasando de 260 m a 205 m. Esto resultó en un aumento significativo de las tasas de migración en esa área, de 8.0 m/año a 14 m/año.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

2.1.1 Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico es una representación matemática simplificada del ciclo del agua en una cuenca hidrográfica o sistema acuático. Estos modelos se utilizan para simular y predecir el comportamiento de las variables hidrológicas, como la precipitación, el caudal de los ríos, la infiltración, la evaporación y la recarga de los acuíferos. Ayudan a comprender cómo responden los sistemas hidrológicos a diferentes condiciones climáticas y de uso de la tierra, lo que permite tomar decisiones informadas sobre la gestión del agua y la planificación de recursos hídricos.

2.1.2 Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos es el proceso de transporte de las partículas sólidas que se incorporan a un río o a un canal provenientes de la erosión del lecho del curso, de sus riberas o del aporte de tributarios. Los procesos de transporte de sedimentos incluyen a los fenómenos de erosión y la sedimentación que pueden presentarse tanto en materiales cohesivos como no cohesivos.

Las partículas sólidas o sedimentos pueden ser transportados en las modalidades de suspensión, rodadura y/o saltación; el inicio del movimiento y la modalidad y cuantificación del transporte depende tanto de las características hidráulicas de la corriente como de las características de los sedimentos involucrados.

2.1.3 Geomorfología en ríos del Amazonas

La red de drenaje de los ríos del Amazonas presenta un patrón dendrítico, donde numerosos afluentes convergen hacia el río principal, formando una intrincada red de canales interconectados. Estos ríos exhiben una amplia gama de formas fluviales, incluyendo meandros sinuosos, islas fluviales y bancos de arena. Debido a las fuertes lluvias y al flujo constante de sedimentos provenientes de la erosión de los suelos amazónicos, los ríos del Amazonas presentan una dinámica fluvial intensa y una rápida sedimentación en las áreas bajas (Latrubesse et al., 2017).

2.1.4 Análisis multitemporal

El análisis multitemporal consiste en un método de comparación de imágenes satelitales en un río, esta comparación permite analizar los cambios morfológicos y la migración del río dada principalmente por procesos de erosión y sedimentación lateral.

2.1.5 Modelación hidráulica unidimensional de un río con fondo fijo

Es la representación de las características hidráulicas de un tramo de un río en términos de sus velocidades y niveles de flujo medios de la sección, calculados mediante la solución de las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento.

2.1.6 Modelación hidráulica unidimensional de un río con fondo móvil

Es la representación de las características hidráulicas de un tramo de un río en términos de sus velocidades y niveles de flujo medios de la sección, pero incorporando los procesos de erosión y sedimentación del lecho. Se realiza mediante la solución de las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento, y la ecuación de continuidad de sedimentos, también llamada ecuación de Exner. La ecuación de Exner establece una relación entre la tasa de sedimentación que transporta un río y el cambio del nivel de su lecho.

2.1.7 Modelación hidráulica unidimensional de un río con fondo móvil y erosión lateral

Es un modelo hidráulico que, aparte de incorporar los procesos de transporte líquido mediante las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, y los procesos de transporte de sedimentos, mediante la ecuación de Exner, incorpora los efectos de la erosión lateral de los bancos y el efecto de los sedimentos así incorporados a la corriente.

2.1.8 Modelo HEC-RAS 1D de fondo Móvil con Incorporación de Erosión Lateral

En la presente tesis se empleará el modelo HEC-RAS 1D Versión 6.2, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos que permite representar los procesos de transporte líquido, transporte sólido, erosión y sedimentación vertical y de erosión lateral.

2.2 GEOMORFOLOGÍA EN RÍOS DEL AMAZONAS

La geomorfología de un río se refiere al estudio de la forma, estructura y evolución del curso de agua y su entorno. Comprende el análisis de las características físicas y geológicas del río, así como los procesos que moldean su forma. La geomorfología de un río abarca una amplia variedad de elementos, como el cauce principal, los meandros, las terrazas fluviales, los deltas, las llanuras de inundación y las cuencas de captación.

La red de drenaje de los ríos del Amazonas presenta un patrón dendrítico, donde

numerosos afluentes convergen hacia el río principal, formando una intrincada red de canales interconectados. Estos ríos exhiben una amplia gama de formas fluviales, incluyendo meandros sinuosos, islas fluviales y bancos de arena. Además, debido a las fuertes lluvias y al flujo constante de sedimentos provenientes de la erosión de los suelos amazónicos, los ríos del Amazonas presentan una dinámica fluvial intensa y una rápida sedimentación en las áreas bajas (Latrubesse et al., 2017).

Los procesos geomorfológicos están estrechamente relacionados con la dinámica fluvial y las interacciones entre el agua, el sedimento y la vegetación en la cuenca del Amazonas.

Según los estudios en el río Huallaga de Ramos y Alva (2020) se puede observar que los procesos de geodinámica fluvial están afectados por la cantidad de caudal que fluye, por lo que en los años de mayor caudal se observan mayores procesos de dinámica fluvial. También concluyeron que los procesos geodinámicos más comunes incluyen inundaciones que cubren áreas extensas cerca del río Huallaga, así como socavamiento y erosión lateral, que son más frecuentes en las zonas donde el río cambia de dirección.

En la Figura N° 2.1 se puede observar el efecto de la dinámica fluvial en el tramo de estudio del río Huallaga con 2 imágenes satelitales correspondientes a los años 1984 (Figura N° 2.1a) y 2022 (Figura N° 2.1b).

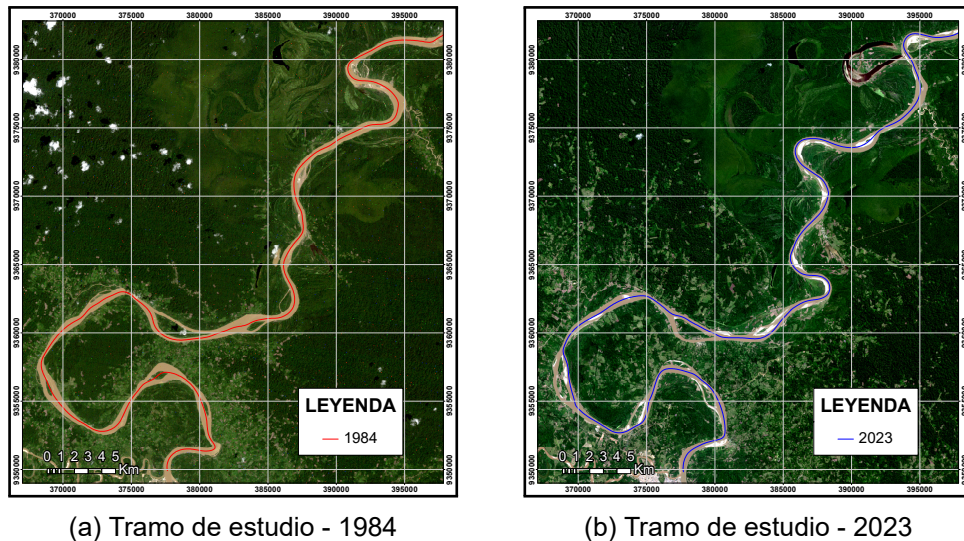


FIGURA N° 2.1: Vista satelital del río Huallaga para 2 distintos años. Fuente: USGS (2023).
Elaboración propia.

El río Huallaga cuenta con un caudal promedio significativo, superando los 5 000 m³/s durante los meses de crecida, con un caudal promedio que supera los 2500 m³/s. En los meses de estiaje, el caudal disminuye incluso por debajo de 1 000

m³/s. La variabilidad del caudal diario es aún más notable, con valores máximos que superan los 11 000 m³/s y frecuentes valores que exceden los 8 000 m³/s, el tramo de estudio cuenta también con una pendiente media de 0.0001 con lo cual se encontraría ubicado como río meándrico según el criterio de LANE (Rocha, 1998).

2.3 IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes satelitales son representaciones gráficas captadas a partir de serie de sensores que se reflejan diferentes longitudes de onda sobre la superficie de la tierra y que es procesada cuidadosamente para obtener esta información valiosa y útil en distintos campos.

2.3.1 Satélites artificiales Landsat

Los satélites artificiales, y en particular los satélites Landsat, desempeñan un papel fundamental en la observación y el monitoreo de la Tierra desde el espacio. Los satélites Landsat, fueron lanzados por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y han proporcionado una perspectiva única de nuestro planeta durante décadas. Equipados con sensores avanzados, estos satélites capturan imágenes de alta resolución de la superficie terrestre en varias bandas espectrales, lo que permite realizar un seguimiento de cambios ambientales, estudiar fenómenos naturales, gestionar recursos naturales y tomar decisiones informadas sobre el uso de la tierra. A lo largo de los años distintos satélites landsat han sido lanzados al espacio, cada vez con una mejor tecnología, estos satélites son los siguientes:

- Landsat 1-5: 4 bandas, 60 m de resolución, Periodo: 1972-1992
- Landsat 4-5: 7 bandas, 30 m de resolución, Periodo: 1982-2012
- Landsat 7: 8 bandas, resolución de 30 m, desde 1999-hoy
- Landsat 8: 11 bandas, resolución de 30 m, Periodo: 2013-hoy
- Landsat 9: 11 bandas, resolución de 30 m, Periodo: 2022-hoy

2.3.2 Bandas Espectrales

Los satélites Landsat miden la radiación electromagnética reflejada y emitida por la superficie terrestre en varias bandas espectrales. Los sensores a bordo de los satélites Landsat capturan información en el espectro visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo térmico. Cada banda corresponde a una parte específica del espectro electromagnético y se utiliza para diferentes propósitos en la observación de la Tierra.

En el Tabla N° 2.1 se pueden observar las distintas bandas espectrales del satélite landsat 8, así como su rango de onda en micrómetros (μm).

TABLA N° 2.1: Bandas espectrales del satélite Landsat 8

Nombre de banda	Landsat-8 Longitudes de onda (μm)	Resolución (m)
Coastal/Aerosol (CA)	0.433-0.453	30
Blue	0.450-0.515	30
Green	0.525-0.600	30
Red	0.630-0.680	30
NIR	0.845-0.885	30
SWIM	1.560-1.660	30
SWIR2	2.100-2.300	30
PAN	0.500-0.680	15
Cirrus	1.360-1.390	30

Fuente: Barsi et al. (2014)

2.4 TEORÍA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

2.4.1 Modelo numérico

2.4.1.1 Modelo hidráulico

Es una herramienta ampliamente utilizada en ingeniería hidráulica para simular el flujo de agua en ríos, canales y sistemas de drenaje. La modelación hidráulica para este estudio se realizó en HEC-RAS 1D que significa “Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System”(Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica) en su módulo 1D utiliza las ecuaciones de conservación de la masa y la energía para resolver el comportamiento del flujo.

Las ecuaciones que HEC-RAS 1D resuelve incluyen la ecuación de continuidad,

que describe la conservación de la masa en un flujo estacionario o gradualmente variado, y la ecuación de momentum, que representa la conservación de la energía en un flujo gradualmente variado. Estas ecuaciones tienen en cuenta factores como la pendiente del canal, el área de flujo transversal, el coeficiente de rugosidad y las condiciones de contorno para determinar las variaciones en la profundidad y la velocidad del agua a lo largo del canal.

A continuación, se presentan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento utilizadas por HEC-RAS (II.1 y II.2).

- Ecuación de Continuidad

Esta ecuación describe la conservación de la masa en un flujo estacionario o gradualmente variado (Brunner, 2016):

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (\text{II.1})$$

Donde:

- t : Tiempo
- x : Distancia a lo largo del canal
- q_l : Flujo lateral por unidad de distancia
- Q : Caudal
- A_T : Área de sección transversal

- Ecuación de Cantidad de Movimiento

Es una representación de la segunda ley de Newton y es usado normalmente en situaciones donde el flujo es rápidamente variado (Brunner, 2016):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA_T\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (\text{II.2})$$

Donde:

- g : Aceleración de la gravedad
- S_f : Pendiente de energía
- V : Velocidad
- Q : Caudal
- z : Nivel de agua
- A_T : Área de sección transversal

La modelación hidráulica con HEC-RAS 1D proporciona información valiosa sobre el comportamiento del flujo en diferentes escenarios, lo que permite a los ingenieros y planificadores realizar evaluaciones precisas de inundaciones, diseño de obras hidráulicas y análisis de impacto ambiental. Al considerar las ecuaciones fundamentales del flujo y utilizar datos topográficos y de calibración adecuados, HEC-RAS 1D ofrece una herramienta confiable y eficiente para el análisis hidráulico.

2.4.1.2 Modelo de fondo móvil

El mismo programa HEC-RAS en su módulo 1D ofrece capacidades para modelar los procesos de erosión, sedimentación y transporte de sedimentos que dan lugar a cambios en el lecho. El modelado de fondo móvil en HEC-RAS 1D se basa en la ecuación de Exner, que describe la conservación de la masa de los sedimentos y su interacción con el flujo de agua. El modelo también hace uso de ecuaciones de capacidad de transporte de sedimentos para el cálculo de la cantidad de transporte de sedimentos, la velocidad de caída y una serie de algoritmos para definir las formas de erosión y sedimentación de los modelos.

2.4.2 Ecuación de Exner

Esta ecuación describe la continuidad de los sedimentos con el fondo móvil del sistema, fue propuesta por el geólogo austriaco Antonie Exner en 1925. La ecuación establece una relación entre la tasa de sedimentación que transporta un río y el cambio de su lecho. Describe cómo los sedimentos son transportados por la corriente de agua y cómo se depositan en el lecho del río (Parker, 2004).

La ecuación es la siguiente:

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial q_t}{\partial x} \quad (II.3)$$

Donde:

- η : Elevación de fondo
- λ_p : Porosidad
- q_t : Transporte de sedimentos en la dirección x

2.4.3 Velocidad de caída

La velocidad de caída es la velocidad con la cual las partículas sedimentarias se desplazan en suspensión a través del flujo como consecuencia de un equilibrio de fuerzas entre el peso del grano y la resistencia hidrodinámica del fluido, de manera conceptual se puede apreciar en la Figura N° 2.2.

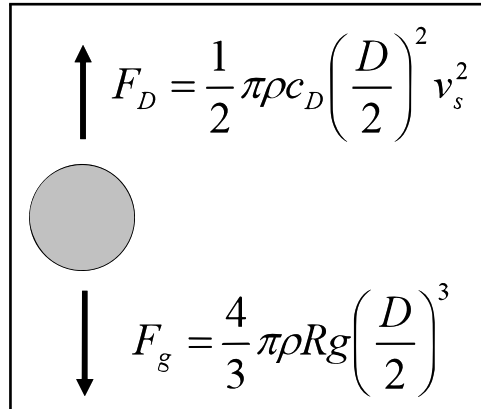


FIGURA N° 2.2: Equilibrio de fuerzas de una partícula en suspensión. Fuente: HEC (2022)

Para el coeficiente de arrastre C_d es conocido el diagrama de la Figura N° 2.3.

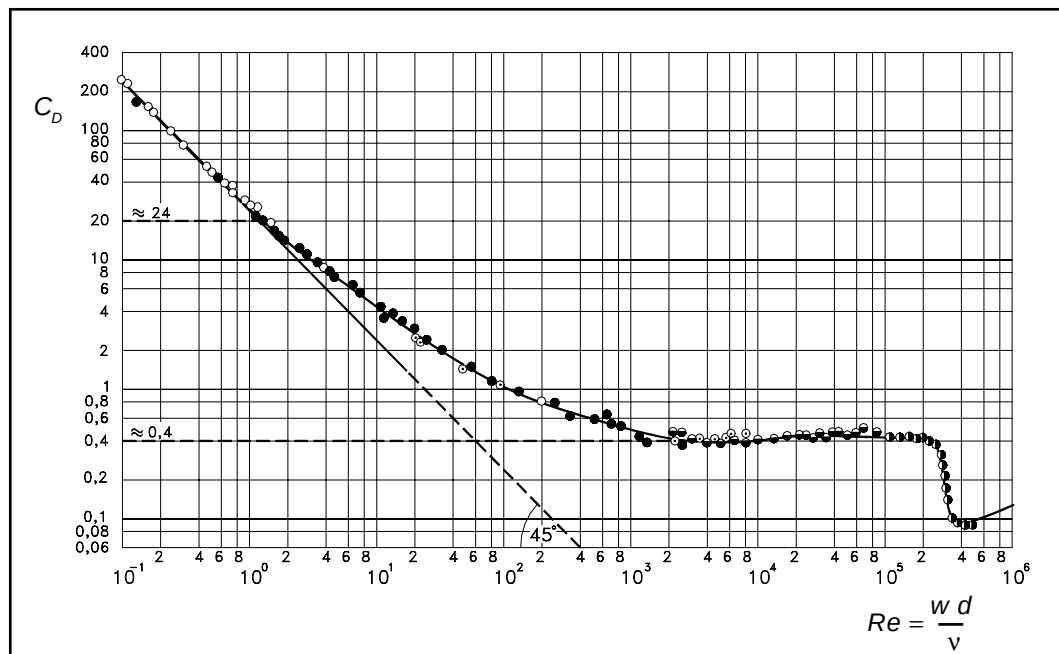


FIGURA N° 2.3: Relación entre el Coeficiente de Arrastre C_D y el Número de Reynolds – Partícula. Fuente: Rocha (1998)

En la dinámica fluvial, la velocidad de caída es un parámetro importante para comprender los procesos de transporte de sedimentos y la erosión y deposición del lecho fluvial. Esta velocidad de caída es usada por el modelo para limitar la sedimentación que se da entre pasos computacionales ya que este tiempo debe ser el suficiente para que la partícula logre sedimentar.

2.4.4 Inicio de movimiento

Se refiere al momento en el que las partículas sólidas comienzan a moverse debido a la acción del flujo de agua. El parámetro de Shields, también conocido como el número de Shields, es una herramienta utilizada para predecir cuándo ocurrirá el inicio de movimiento de las partículas sedimentarias. El parámetro de Shields se define como la relación entre la fuerza de corte del flujo de agua y la fuerza de gravedad que actúa sobre las partículas sedimentarias. El parámetro de Shields (adimensional) se define de la siguiente forma:

$$\tau_c^* = \frac{(\tau_o)_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{\rho V_*^2}{(\gamma_s - \gamma)d} = F_{cr}^* \quad (II.4)$$

Donde:

- $(\tau_o)_c$: Esfuerzo de corte.
- V_* : Velocidad de corte $= \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \sqrt{gRS}$
- γ_s : Peso específico del sedimento
- γ : Peso específico del agua
- d : Diámetro de la partícula

Y el índice de inestabilidad:

$$Re_* = \frac{V_* d}{\nu} = 11.6 \frac{d}{\delta} \quad (II.5)$$

Donde:

- Re_* : Número de Reynolds calculado con la velocidad de corte y el diámetro de la partícula
- ν : Viscosidad cinemática
- δ : Espesor de subcapa laminar

Cuando el valor del parámetro de Shields es menor que un valor crítico relacionado con el índice de inestabilidad, generalmente conocido como el umbral de movimiento, las partículas sedimentarias permanecen en reposo en el lecho. Sin embargo, cuando el valor del parámetro de Shields supera el umbral de movimiento, las partículas se vuelven inestables y comienzan a moverse. Esto se representa en el diagrama de Shields que se presenta en la Figura N° 2.4.

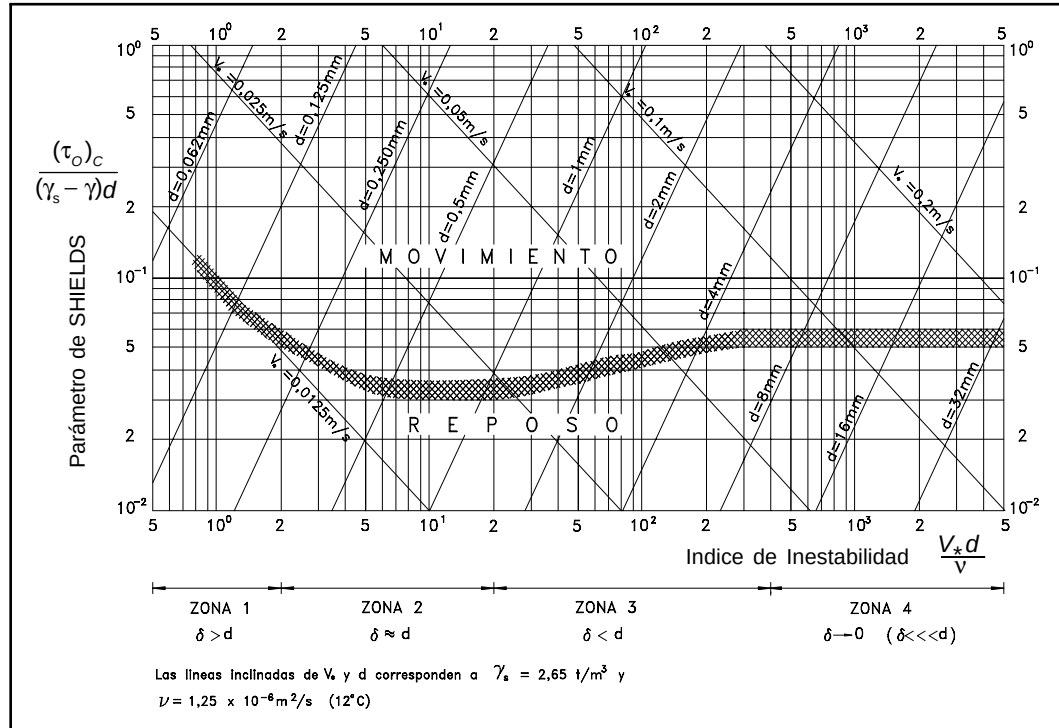


FIGURA N° 2.4: Diagrama de SHIELDS para la Iniciación del Movimiento. Fuente: Rocha (1998)

2.4.5 Capacidad de Transporte

El potencial de transporte de sedimentos es la masa transportable de una clase de grano particular en respuesta a los parámetros hidráulicos transversales al río. Esta capacidad se calcula a partir de la relación de Lane propuesta en 1955, esta relación establece la proporcionalidad entre el gasto sólido de fondo (T_F), el caudal (Q), la pendiente (S) y el diámetro característico del material sólido de fondo (d) (Rocha, 1998):

$$T_F^a \cdot d^b :: Q^c \cdot S \quad (\text{II.6})$$

En este estudio se hizo uso de la ecuación de capacidad de transporte total de Engelund- Hansen, la cual cuenta con un rango de validación d_{50} entre 0.19 a 0.93 mm, la ecuación se presenta a continuación:

$$g_s = V^2 \left(\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} = V^2 (\tau^*)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \quad (\text{II.7})$$

Donde:

- g_s : Capacidad de transporte por unidad de ancho
 γ_s : Peso específico del sedimento
 γ : Peso específico del agua
 V : Velocidad media de la sección
 τ_b : Esfuerzo cortante en el lecho
 τ^* : Parámetro de shields adimensional
 d_{50} : Diámetro medio de la partícula

El modelo Hec Ras utiliza la capacidad de transporte para la totalidad de sedimento transportado por el río, pero para aplicar estas ecuaciones, HEC-RAS calcula el potencial de transporte, asignando la función de transporte elegida (en este caso Engelund- Hansen) independiente a cada clase de grano presente en el sistema, como si fuera la única clase de grano en el sistema. Luego, el potencial de transporte se pondera según la prevalencia de la clase de grano para calcular la capacidad de transporte, que pasaría a ser el transporte utilizado en la ecuación de Exner.

2.4.6 BSTEM

El modelo BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model), en español Modelo de estabilidad del talud y erosión del pie, integra tres modelos de equilibrio límite que estiman el Factor de Seguridad (Fs) para taludes fluviales con múltiples capas. Los métodos simulados incluyen capas horizontales, cortes verticales con grietas de tensión y fallos en voladizo. El modelo considera la resistencia de las capas de suelo, el efecto de la presión del agua en los poros (tanto positiva como negativa, es decir, succión matricial), la presión de confinamiento generada por el flujo del agua en el río y el refuerzo del suelo (Simon, Thomas, Curini, y Bankhead, 2016).

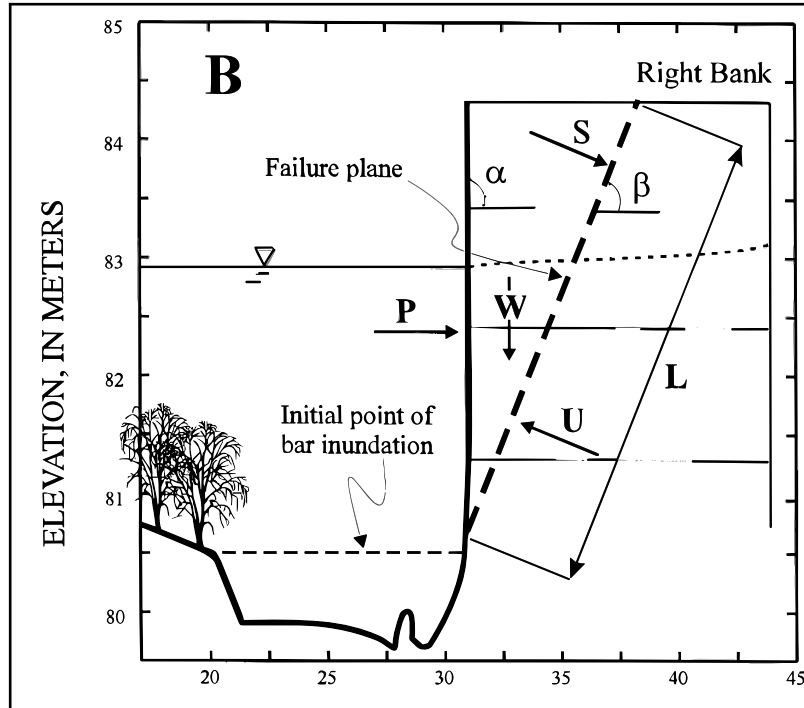


FIGURA N° 2.5: Diagrama de fuerzas para el cálculo del factor de seguridad. Fuente: Simon et al. (2016). Elaboración: HEC (2022)

El factor de seguridad determinar la estabilidad de los estratos relacionando las fuerzas inestables en el numerador y las fuerzas de resistencia en el denominador. Se calcula de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + S_i \tan \phi'_i + [W_i \cos \beta - U_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi'_i)}{\sum_{i=1}^I (W_i \sin \beta - P_i \sin[\alpha - \beta])} \quad (II.8)$$

Donde:

- i : Estrato
- L : Longitud de plano de falla
- S : Fuerza de la matriz de succión
- U : Fricción hidrostática
- P : Fuerza hidrostática de confinamiento
- ϕ' : Ángulo de fricción
- ϕ^b : Relación entre la matriz de succión y la cohesión aparente
- C' : Cohesión efectiva
- β : Ángulo del plano de falla
- α : Ángulo de talud

El modelo de Hec Ras, a través de una secuencia de procesos iterativos determina el plano de fallo y el momento en el que este se da. Un gran fallo del talud puede resultar en la adición de una cantidad considerable de sedimentos al sistema, lo que puede generar deposición aguas abajo y aumentar la estabilidad de los taludes en esa área, este sedimento se adiciona a al volumen calculado originalmente por el modelo, mediante la capacidad de transporte.

2.5 ÍNDICES DE EVALUACIÓN DE LA CALIBRACIÓN

Los índices de calibración son medida estadística que miden la variabilidad entre dos funciones y pueden ser usadas para determinar la validez de un modelo.

2.5.1 Coeficiente de correlación (R)

Indica la proporción de la variabilidad de una variable dependiente que puede ser explicada por una variable independiente o un modelo de regresión, El coeficiente de correlación puede tomar valores entre 0 y 1. Un valor de 0 indica que el modelo no explica nada de la variabilidad de la variable dependiente, mientras que un valor de 1 indica que el modelo explica toda la variabilidad. Se calcula mediante la fórmula:

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^P (X_i^{obs} - \hat{X}^{obs}) (X_i^{sim} - \hat{X}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^P (X_i^{obs} - \hat{X}^{obs})^2 \sum_{i=1}^P (X_i^{sim} - \hat{X}^{sim})^2}} \right)^2 \quad (II.9)$$

Donde X_i^{obs} corresponde a los datos observados mientras que X_i^{sim} corresponde a la información simulada.

2.5.2 Relación de la desviación estándar de observaciones (RSR)

Proporciona una medida de la dispersión relativa de los residuos del modelo en comparación con la dispersión de los valores observados. Un valor de RSR cercano a cero indica un buen ajuste del modelo, por otro lado, un valor de RSR cercano a 1 o mayor indica que los residuos son grandes en relación con la variabilidad de los valores observados. Se calcula mediante la fórmula:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^P (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^P (X_i^{obs} - \hat{X}^{obs})^2}} \quad (II.10)$$

2.5.3 Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Se basa en la diferencia entre los valores observados y los valores simulados, considerando tanto la variabilidad como la tendencia de los datos. El NSE varía en un rango de $-\infty$ a 1, donde un valor de 1 indica un ajuste perfecto entre los valores observados y los simulados, mientras que un valor cercano a cero o negativo indica un ajuste deficiente. Se calcula mediante la fórmula:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^P (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^P (X_i^{obs} - \hat{X}^{obs})^2} \quad (II.11)$$

2.5.4 Índice promedio (P)

Para la calibración de los modelos se hizo uso de un índice promedio definido de la siguiente forma:

$$P = \frac{(R + (1 - RSR) + NSE)}{3} \quad (II.12)$$

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN LATERAL Y DE SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN VERTICAL

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

3.1.1 Caracterización de la cuenca del Río Huallaga

El tramo de estudio se encuentra situado en la cuenca del río Huallaga. La cuenca del río Huallaga pertenece a la vertiente del Atlántico y se extiende principalmente por las regiones de San Martín y Huánuco, asimismo abarca partes de las regiones de Loreto, Amazonas, La Libertad y Pasco. La cuenca del río Huallaga se encuentra en la ZONA 18 Sur de la proyección UTM y se extiende desde los $-77^{\circ} 46'$ y $-75^{\circ} 30'$ de longitud oeste y los paralelos $-5^{\circ} 02'$ y $-10^{\circ} 46'$ de latitud sur.

3.1.1.1 Características morfológicas

La cuenca del río Huallaga cuenta con una extensión de 89416 Km², zonas de orografía abrupta y elevaciones que varían entre los 5000 m.s.n.m. en la zona andina hasta los 100 m.s.n.m. en la llanura amazónica. La cuenca cuenta con 9 unidades hidrográficas las cuales se detallan en el Tabla N° 3.1 y se pueden visualizar en la Figura N° 3.1.

TABLA N° 3.1: Unidades hidrográficas de la cuenca del río Huallaga

Unidad Hidrográfica	Superficie	
	km ²	%
Alto Huallaga	30 275.9	33.9
Medio Huallaga	2 133.3	2.4
Medio Alto Huallaga	5 064.1	5.7
Huayabamba	13 801.0	15.4
Medio Bajo Huallaga	8 926.2	10.0
Paranapura	3 965.6	4.4
Mayo	9 722.4	10.9
Bajo Huallaga	8 416.7	9.4
Biabo	7 111.0	8.0
Total	89 416.2	100.0

Fuente: ANA (2015)

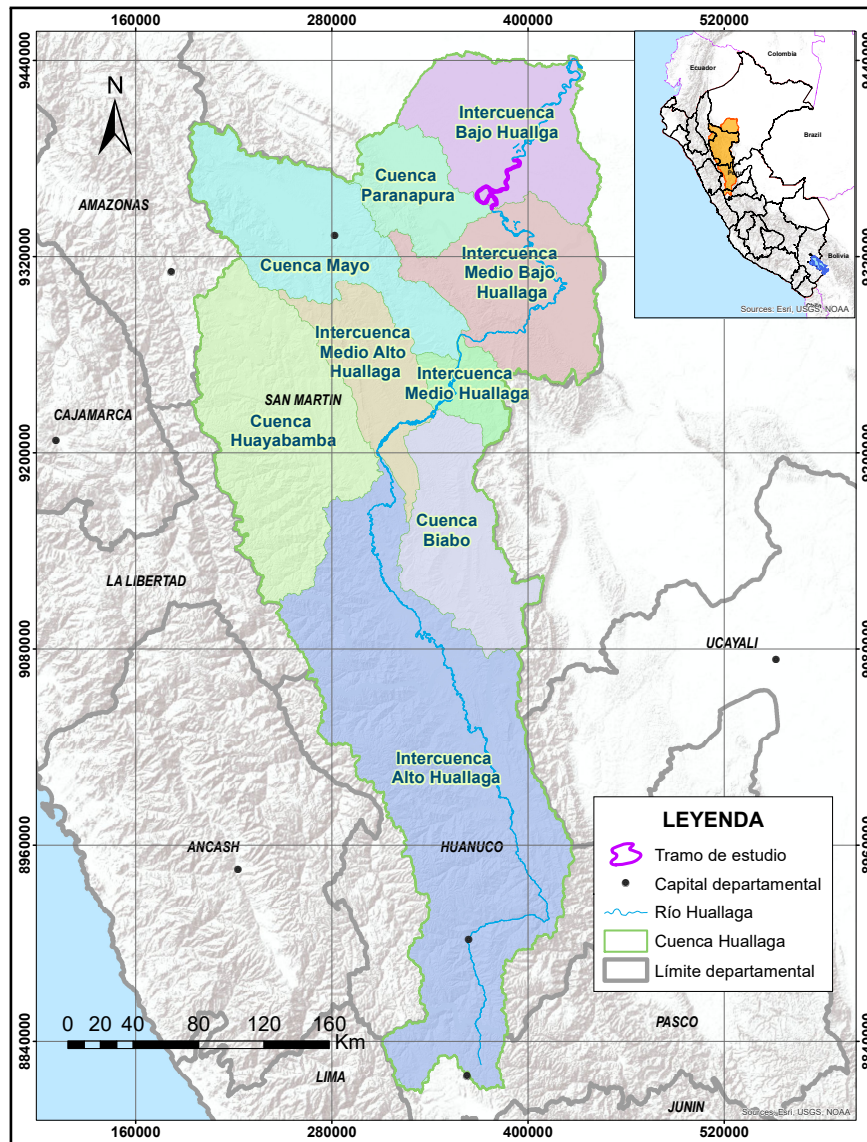


FIGURA N° 3.1: Unidades hidrográficas de la cuenca del río Huallaga y tramo de estudio. Fuente: ANA (2015)

3.1.1.2 Características climatológicas

Durante el periodo 1965 a 2013 en la cuenca del río Huallaga, se encontró que la temperatura promedio anual fue de aproximadamente 17.6 °C con una clara variación de temperatura con la altitud, y una variación no tan marcada para los meses de invierno. La humedad relativa varió entre el 75 % y el 91 % a lo largo del año con los valores más altos en los meses de diciembre a marzo, y los más bajos se registraron en julio y septiembre. La velocidad del viento aumentó con la altitud y se mantuvo relativamente estable a lo largo del año. La evapotranspiración potencial fluctuó a lo largo del año, con valores que oscilaron entre 143 mm en diciembre y 52 mm en junio. La precipitación total promedio multianual en este periodo fue de

aproximadamente 1 738 mm (ANA, 2015).

3.1.2 Caracterización geomorfológica del tramo de estudio

El tramo de estudio cuenta con longitud de 80.332 Km, una pendiente media de 0.10‰ y un ancho medio de 406 m, se trata de un tramo meándrico en el cual se pudieron identificar zonas con distintas características según el mapa geológico realizado por INGEMET entre el año 2000 y 2003 (Figura N° 3.2).

La primera zona se presenta desde la progresiva 0+00 Km y 42+00 Km en la cual se observó la presencia de depósitos de geología terciaria como la formación Ipururo (Nmp-i) o la formación Chambira (PN-ch) (INGEMMET, 2018). Esta zona presentó una pendiente media de 0.09‰ y un ancho medio de 429 m. Estas formaciones limitan los movimientos laterales del río principalmente en las partes externas de las curvas.

La segunda zona se presenta desde la progresiva 42+00 Km y 80+331.6 Km en la cual se observó la presencia de depósitos de geología cuaternaria aluviales recientes (Qh-al) y antiguos (Qp-al) (INGEMMET, 2018). Esta zona presentó una pendiente media de 0.11‰ y un ancho medio de 385 m. Estas formaciones permitieron un mayor movimiento lateral el cual desencadenó un corte meándrico en el año 2020, tal como se observa más adelante en la Figura N° 3.18.

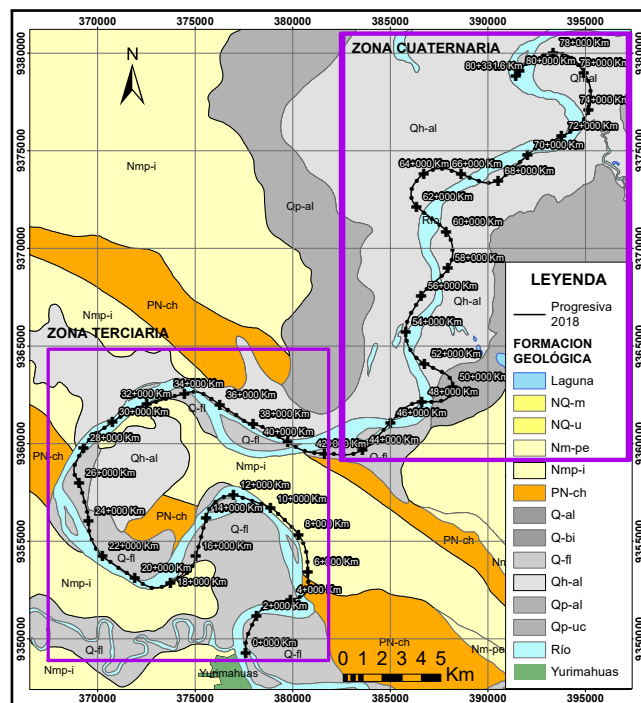


FIGURA N° 3.2: Mapa geológico del tramo de estudio. Fuente: INGEMMET (2018)

Estos mapas se presentan también en el ANEXO I: MAPAS.

3.1.3 Caracterización hidrológica del tramo

El tramo de estudio se encuentra situado en la cuenca del río Huallaga. La cuenca del río Huallaga pertenece a la vertiente del atlántico y se extiende principalmente por las regiones de San Martín y Huánuco, asimismo abarca partes de las regiones de Loreto, Amazonas, La Libertad y Pasco. La cuenca aportante río Huallaga en la estación Yurimaguas (tramo de estudio) tiene una extensión de 77139.8 Km² la cual forma parte de la cuenca del río Huallaga (89416.2 Km²), asimismo a lo largo del tramo se tienen 3 ríos aportantes delimitados por las cuencas de los ríos, Paranapura (3965.6 Km²), Zapote (438.8 Km²) y Shishinahua (1134.3 Km²), la representación de las cuencas aportantes y sus áreas se presentan en la Figura N° 3.3.

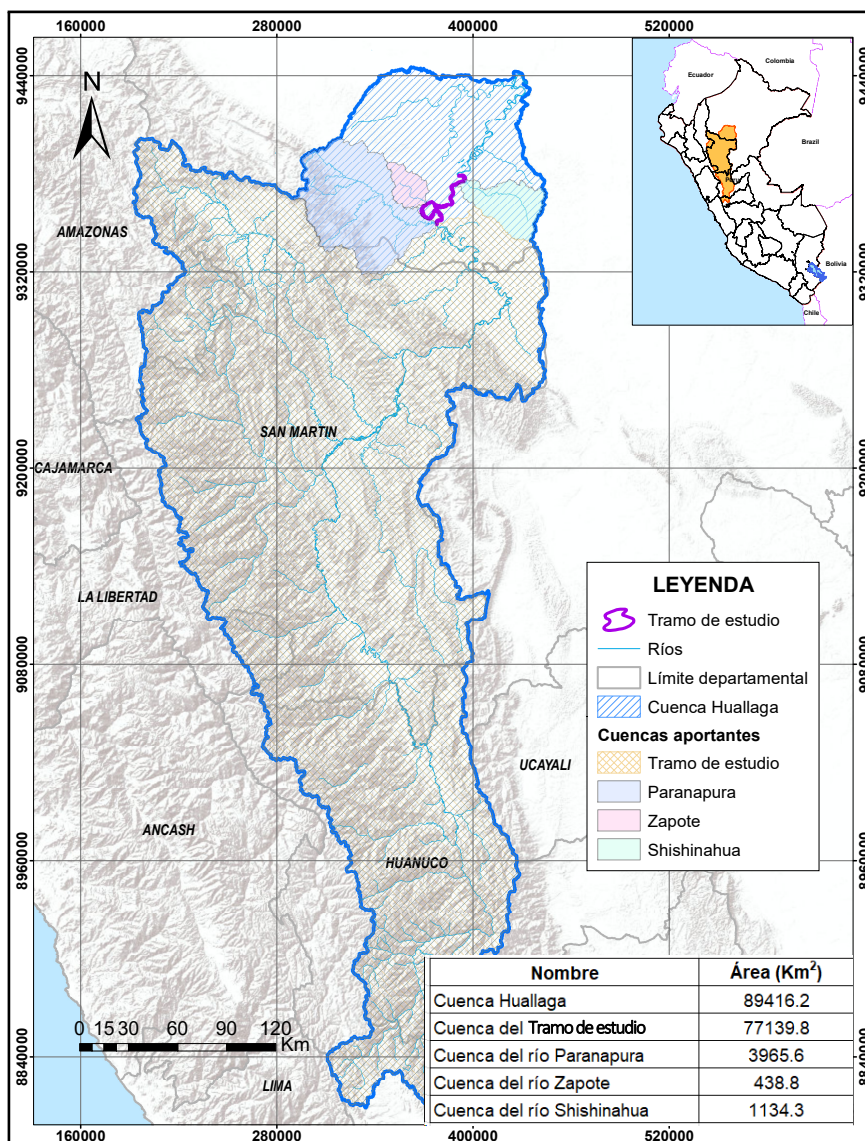


FIGURA N° 3.3: Cuencas aportantes en el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia

En el Tabla N° 3.2 se resumen los caudales medios mensuales del río Huallaga en las estaciones Chazuta y Yurimaguas para el periodo indicado.

TABLA N° 3.2: Caudales medios mensuales del río Huallaga en las estaciones Chazuta y Yurimaguas

Mes	Caudales medios mensuales en el Río Huallaga (m ³ /s)	
	Río Huallaga en la Estación Chazuta	Río Huallaga en la Estación Yurimaguas
	(2000-2012, 2018-2020)	(2000-2012)
Enero	4026.4	4 732.0
Febrero	4524.1	5 317.0
Marzo	4933.5	5 798.0
Abril	4318.8	5 076.0
Mayo	2823.4	3 318.0
Junio	2048.4	2 408.0
Julio	1633.3	1 920.0
Agosto	1066.9	1 254.0
Setiembre	1247.1	1 466.0
Octubre	2266.2	2 663.0
Noviembre	3228.9	3 795.0
Diciembre	4018.3	4 723.0
Promedio (m³/s)	3011.3	3 539.0

Fuente: Campaña et al. (en preparación)

En el Tabla N° 3.3 se presentan las series de caudales medios mensuales del río Huallaga en la estación Yurimaguas y en sus tributarios, los ríos Paranapura, Zapote y Shinshinahua para el año 2018, obtenidas en el estudio "Simulación de Flujos Diarios y Mensuales en la Cuenca Baja del Río Huallaga empleando el Modelo Swat". (Campaña et al., en preparación).

TABLA N° 3.3: Caudales medios mensuales simulados para 2018

Mes	Caudales medios mensuales simulados para el año 2018 (m ³ /s)			
	Río Huallaga (E. Yurimaguas)	Río Paranapura	Río Zapote	Río Shishinahua
Enero	4298.23	188.12	34.16	75.05
Febrero	5525.57	280.86	33.47	89.98
Marzo	5841.16	303.27	39.84	107.07
Abril	4846.90	221.44	37.51	98.77
Mayo	2856.55	123.35	23.47	64.86
Junio	1728.47	55.25	11.98	39.46
Julio	1394.84	34.46	7.59	23.16
Agosto	1270.48	32.81	7.14	16.95
Setiembre	1233.10	34.25	4.55	23.16
Octubre	1712.06	56.28	10.90	30.25
Noviembre	2827.03	137.42	17.92	47.55
Diciembre	3561.32	175.06	22.87	57.66
Promedio (m³/s)	3091.31	136.88	20.95	56.16

Fuente: Campaña et al. (en preparación)

Las series de caudales simulados a nivel diario se presentan en el ANEXO II: CAU-DALES MODELADOS.

3.1.4 Caracterización sedimentológica de tramo

Para la caracterización sedimentológica del tramo se hizo uso del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto de Hidrovía Amazónica (MTC, 2018). En este estudio se realizaron distintos análisis granulométricos que datan de abril de 2018 en los malos pasos ubicados a lo largo del tramo de estudio, en el Tabla N° 3.4 se presentan las muestras recolectadas en cada mal paso estudiado.

TABLA N° 3.4: Muestras tomadas en los Malos Pasos Paranapura, Providencia, Metrópolis, Oromina, Progreso

Mal paso	Progresiva	Muestras						
Paranapura	02+000 Km	P-12	P-14	P-34	P-54			
Providencia	10+000 Km	S-11	S-14	S-15				
Metrópolis	22+000 Km	M-11	M-14	M-16	M-26	M-41	M-43	M-46
Oromina	33+000 km	O-13	O-16	O-21	O-23	O-24	O-33	O-34
Progreso	80+332 Km	SA-16	SA-23	SA-26	SA-31	SA-33	SA-35	

Fuente: MTC (2018)

En la Figura N° 3.4, Figura N° 3.5, Figura N° 3.6, Figura N° 3.7 y Figura N° 3.8 se muestra las curvas granulométricas de las muestras tomadas en los 5 malos pasos, asimismo en el Tabla N° 4.3 se presenta un resumen de los diámetros representativos de cada mal paso.

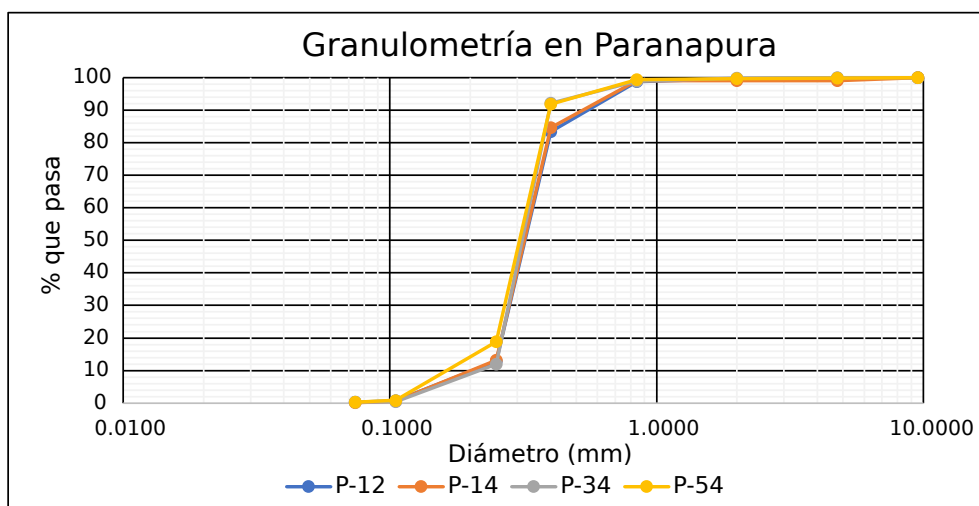


FIGURA N° 3.4: Curva granulométrica en la zona Paranapura. Fuente: MTC (2018)

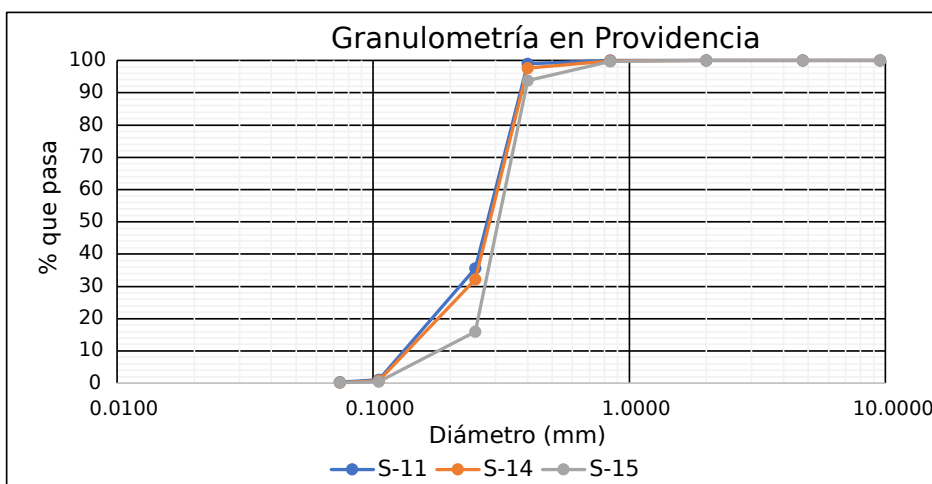


FIGURA N° 3.5: Curva granulométrica en la zona Providencia. Fuente: MTC (2018)

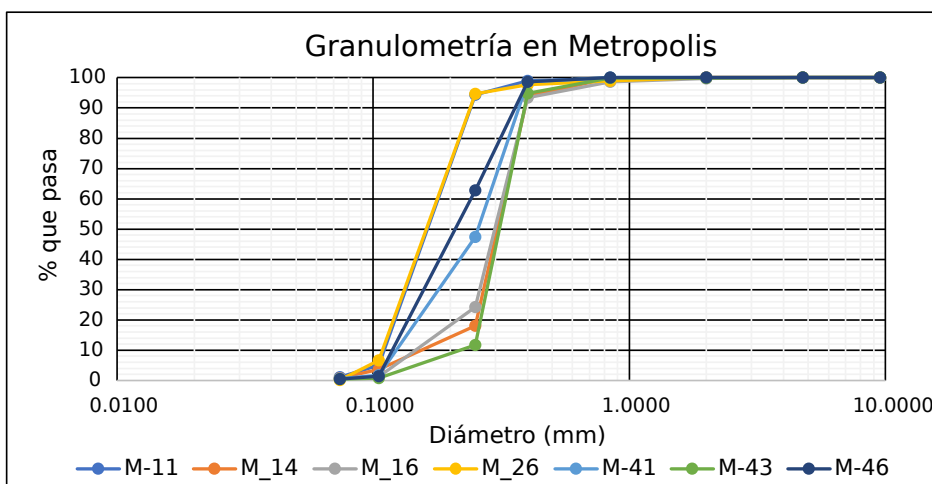


FIGURA N° 3.6: Curva granulométrica en la zona Metrópolis. Fuente: MTC (2018)

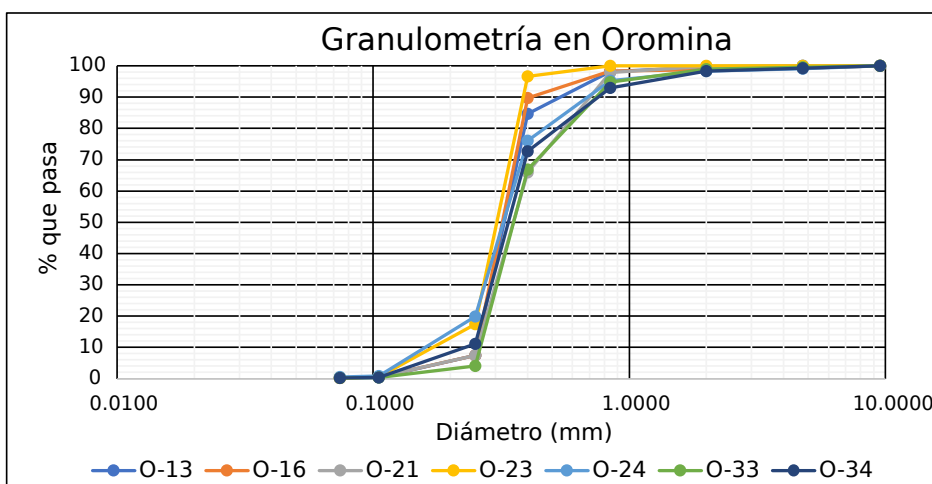


FIGURA N° 3.7: Curva granulométrica en la zona Oromina. Fuente: MTC (2018)

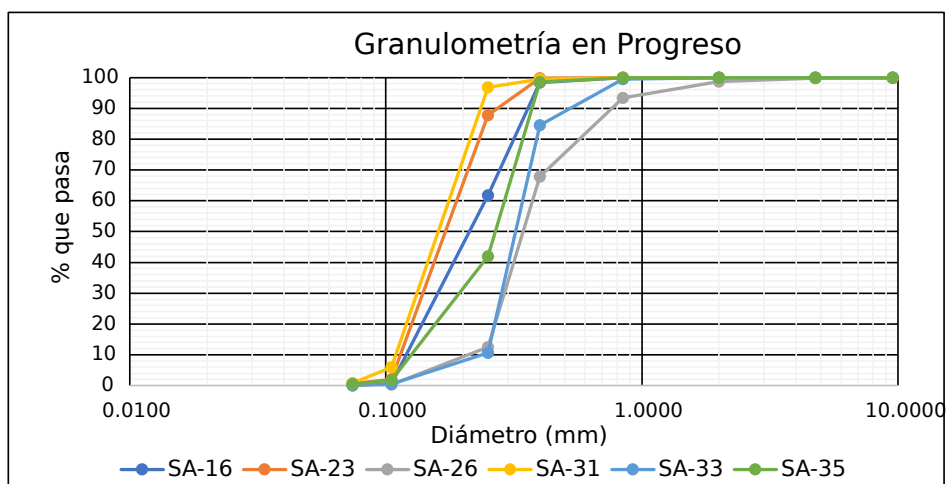


FIGURA N° 3.8: Curva granulométrica en la zona Progreso. Fuente: MTC (2018)

TABLA N° 3.5: Resumen de diámetros característicos en cada mal paso

Zona de muestreo	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D84 (mm)
Paranapura	0.191	0.277	0.314	0.335	0.390
Providencia	0.141	0.254	0.291	0.311	0.3671
Metrópolis	0.119	0.172	0.248	0.276	0.352
Oromina	0.236	0.286	0.328	0.351	0.494
Progreso	0.121	0.171	0.242	0.275	0.366

En la Figura N° 3.9 se presenta un esquema de la ubicación de las zonas de los malos pasos y de las muestras tomadas en el tramo de estudio.

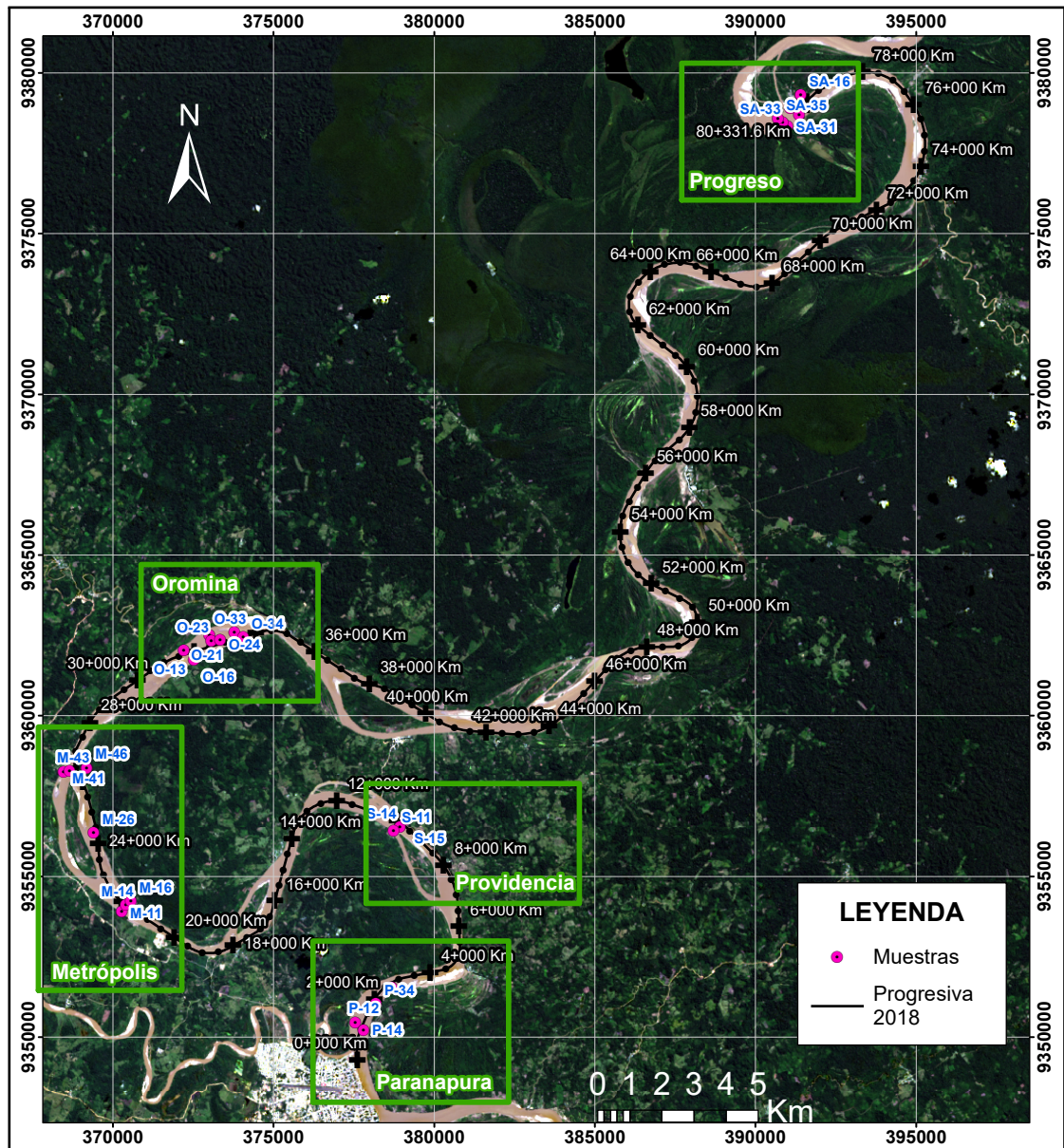


FIGURA N° 3.9: Ubicación de las muestras tomadas. Fuente: MTC (2018)

La granulometría de cada muestra se puede ver en el ANEXO III: GRANULOMETRÍA con un mayor detalle.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN VERTICAL

3.2.1 Levantamiento batimétrico

Se realizó un levantamiento batimétrico en la época de avenida de marzo de 2018, el levantamiento fue realizado por el MTC (2018) el 22 de marzo 2018.

El levantamiento fue realizado a lo largo del talweg del río Huallaga, con mediciones cada 25 a 40 metros. Se levantaron secciones espaciadas cada 40 a 55 metros en las zonas de malos pasos reportados y 300 a 550 metros en el resto del tramo. Cada sección se levantó con mediciones cada 20 a 25 metros.

En el ANEXO IV: BATIMETRÍA Y CAMBIO DE LECHO se presenta los mapas batimétricos levantados en marzo (época de avenidas) y agosto de 2018 en el tramo de estudio.

3.2.2 Análisis de cambio de fondo

Del mismo estudio se realizó un levantamiento batimétrico en el mes de agosto de 2018 (época de estiaje), este levantamiento también se realizó por el MTC y con la misma metodología que la de marzo de 2018.

Para la caracterización se realizó una descripción del cambio de fondo en la época de marzo a agosto de 2018, para esto se dividió el tramo de estudio en 2 zonas (la zona principalmente con material terciario y la zona con material cuaternario) para una mejor descripción y visualización de la evolución del lecho. Para el análisis se calculó el cambio medio de lecho en secciones calculando el área entre las secciones y dividiendo entre la longitud para así tener un cambio representativo a lo largo de las secciones levantadas.

De la Figura N° 3.10 se observó que el tramo de la zona Terciaria inicia con una zona de sedimentación denominada A-1 en la parte externa de la curva del curso original del río, esto debido a que el río Paranapura causa una sedimentación aguas abajo de esta y cambia la dirección de la curva original.

En la curva ubicada en la progresiva 4+000 Km se presentó una zona de sedimentación A-2 en el fondo y parte interna de la curva, así como una zona de erosión A-1 en la parte más externa de la curva.

En la progresiva 8+500 Km se pudo ubicar la zona de sedimentación A-3 la cual se forma debido a que el curso de agua pasa a transcurrir solo por el brazo derecho de la isla Providencia y el brazo izquierdo de la isla Shitari, lo cual disminuiría la curvatura original del tramo.

En la progresiva 13+000 Km se presentó un estrechamiento del ancho del cauce

donde se identifica una zona de sedimentación A-4 en el fondo.

En la curva ubicada en la progresiva 19+000 Km se presentó una zona de sedimentación A-5 en el fondo y parte interna de la curva, así como una zona de erosión A-2 en la parte más externa de la curva.

En la progresiva 27+000 Km se presentó un estrechamiento del ancho del cauce donde se identifica una zona de sedimentación A-6 en el fondo.

En la curva ubicada en la progresiva 34+270 km se observó la entrada del río Zapote, el cual pareció no afectar los procesos normales de sedimentación y erosión de curva que se pudo apreciar en la zona de erosión A-3 y la zona de sedimentación A-7.

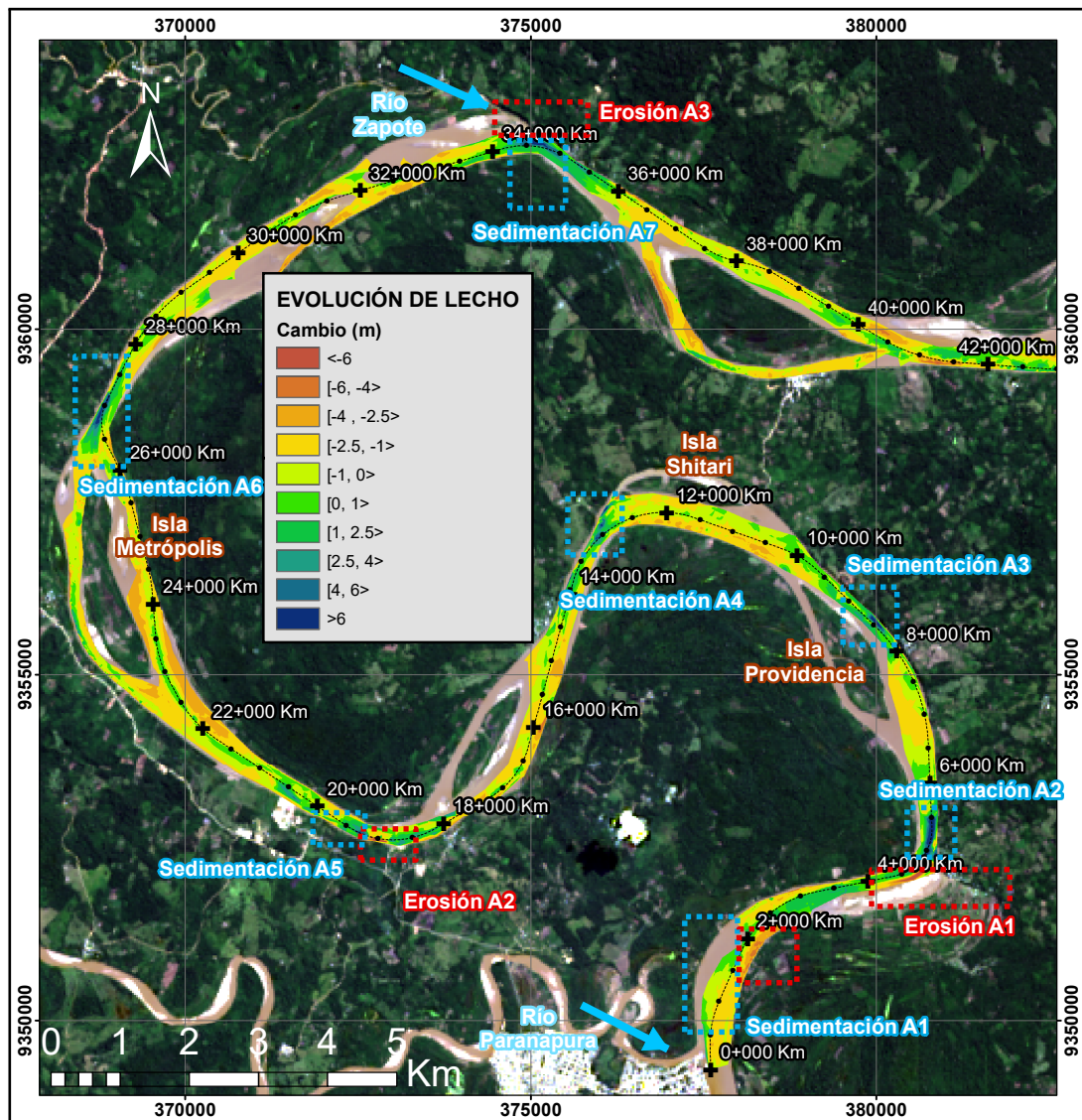


FIGURA N° 3.10: Cambio lecho e identificación procesos en la zona Terciaria. Fuente: Elaboración propia

En la zona se calculó el cambio medio del lecho en el cauce principal a lo largo de esta zona Terciaria, las cuales se muestran en la Figura N° 3.11. Se observó un cambio de lecho medio de -0.46 metros y variaciones desde -2.37 m a 4.17 m. Se observó una predominancia de los procesos de sedimentación vertical sobre los procesos de erosión vertical en el canal principal a lo largo del tramo.

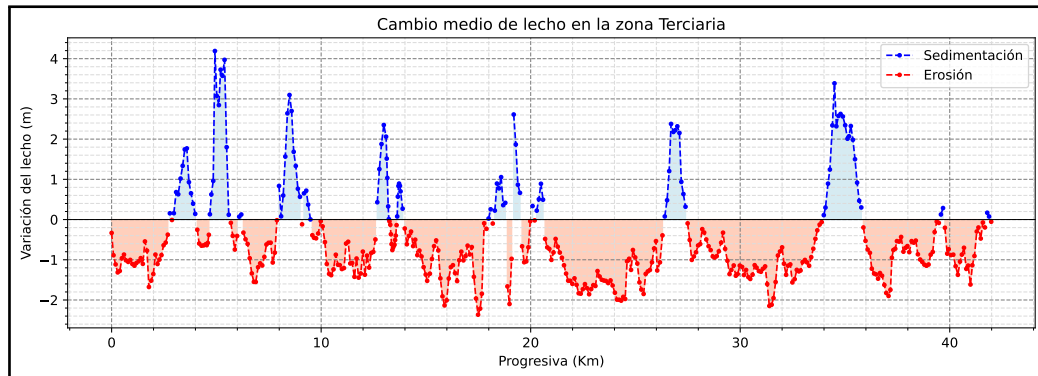


FIGURA N° 3.11: Cambio medio de lecho en la zona terciaria. Fuente: Elaboración propia

De la la Figura N° 3.12 se observó que la zona Cuaternaria inicia con la presencia de una zona de sedimentación denominada B-1 en la progresiva 47+100 Km, en la parte externa de la curva lo que se pudo deber a la disminución del radio de curvatura para el mes de agosto debido a que el flujo pasa por la parte más profunda del río y experimenta un estrechamiento.

De la curva ubicada en la progresiva 49+600 Km se observó una zona de sedimentación B-2 en la parte más profunda e interna de la curva, pero poca o casi nula erosión.

A lo largo de las curvas ubicadas en las progresivas 54+000 Km y 59+000 km se observó las zonas de erosión B-1 y B-2 en las partes externas de las curvas, sin embargo, no se mostró sedimentaciones excesivas en alguna área que forme alguna barra de sedimentos.

Para finalizar en la curva ubicada en la progresiva 62+500 km se pudo identificar una zona de sedimentación B-3 en la parte más profunda e interna, así mismo se observó pequeñas zonas de erosión al inicio, en la parte externa de la curva, pero no muy significativa.

Se observó la curva ubicada en la progresiva 68+000 km, la cual presentó una zona de sedimentación denominada C-1 en el fondo y parte interna de la curva, así como una zona de erosión C-1 en la parte más externa de la curva.

De la curva ubicada en la progresiva 73+600 km se observó la entrada del río Shinshinahua, el cual pareció no afectar los procesos normales de sedimentación y erosión de curva que se pudo apreciar en la zona de erosión C-2 y la zona de

sedimentación C-2.

En la curva ubicada en la progresiva 77+000 km se presentó una zona de sedimentación C-3 en el fondo y parte interna de la curva, así como una zona de erosión C-3 en la parte más externa de la curva. En la parte final del tramo se observó una zona de erosión C-4 debido a efectos de la morfología fluvial aguas arriba de la zona de estudio.

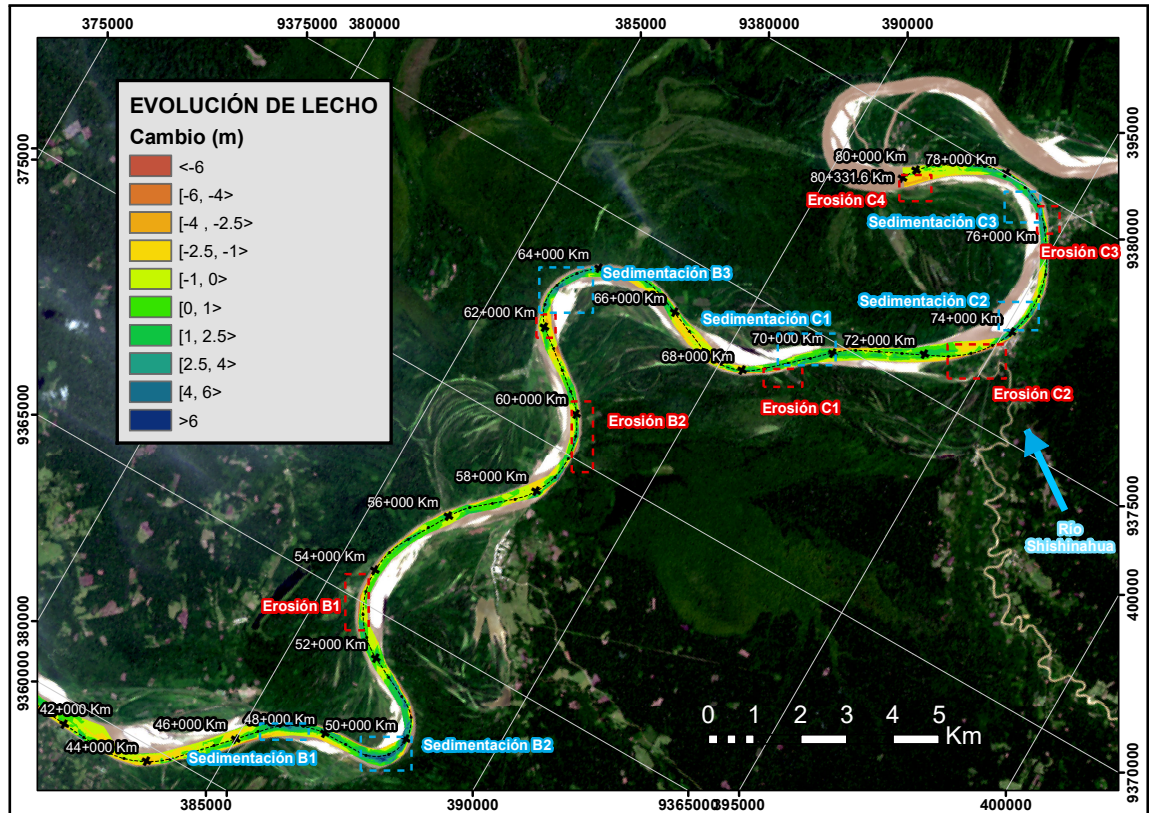


FIGURA N° 3.12: Cambio lecho e identificación procesos en la zona cuaternaria. Fuente: Elaboración propia

En la zona se calculó el cambio de lecho medio a lo largo del tramo en esta zona cuaternaria, las cuales se muestran en la Figura N° 3.13. Se observó un cambio de lecho medio de +0.42 metros y variaciones desde -2.36 m a 3.44 m. Se observó una predominancia de los procesos de sedimentación vertical sobre los procesos de erosión vertical en el canal principal a lo largo del tramo.

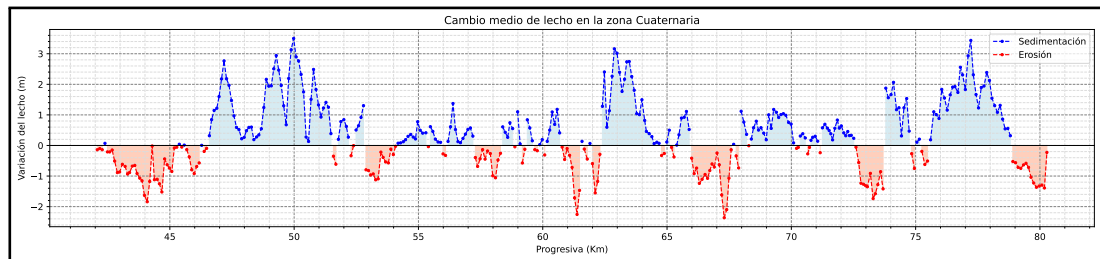


FIGURA N° 3.13: Cambio medio de lecho en la zona cuaternaria. Fuente: Elaboración propia

En el ANEXO IV: BATIMETRÍA Y CAMBIO DE LECHO se presenta estos mismos mapas de evolución de fondo de marzo a agosto de 2018, así como el cambio de lecho en distintas secciones transversales a lo largo del tramo.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN LATERAL

Para la caracterización de procesos de erosión lateral se realizó un análisis multi-temporal mediante imágenes satelitales Landsat.

3.3.1 Procesamiento de imágenes satelitales

3.3.1.1 Descarga de imágenes satelitales

La descarga se hizo a través del portal web de USGS (2023), se delimitó el área de interés y se descargaron imágenes correspondientes a los satélites landsat 4,5,8 y 9.

Se evitó el uso de las imágenes Landsat 7 debido a que lamentablemente la mayoría están dañados por la presencia de franjas transversales sin datos sobre cada banda.

Las imágenes satelitales descargas se presentan en la Tabla N° 3.6.

TABLA N° 3.6: Lista de imágenes satelitales descargadas

Fecha	Satelite	Imagen
16-12-1984	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19841216_20200918_02_T1
12-05-1986	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19860512_20200917_02_T1
20-09-1987	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19870920_20201014_02_T1
24-10-1988	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19881024_20200917_02_T1
17-09-1989	Landsat 4	LT04_L1TP_008064_19890917_20200916_02_T1
28-09-1990	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19900928_20200915_02_T1
26-05-1991	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19910526_20200915_02_T1
31-07-1992	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19920731_20200914_02_T1
20-09-1993	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19930920_20200913_02_T1
21-07-1994	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19940721_20200913_02_T1
09-08-1995	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19950809_20200912_02_T1
26-07-1996	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19960726_20200911_02_T1
01-10-1997	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19971001_20200909_02_T1
18-09-1998	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19980918_20200908_02_T1
20-08-1999	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_19990820_20200907_02_T1
01-10-2000	Landsat 7	LE07_L1TP_008064_20001001_20200918_02_T1
25-08-2001	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20010825_20200905_02_T1
31-08-2003	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20030831_20200904_02_T1

Fecha	Satélite	Imagen
07-12-2004	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20041207_20200902_02_T1
03-07-2005	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20050703_20200902_02_T1
06-07-2006	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20060706_20200831_02_T1
13-09-2008	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20080913_20200829_02_T1
15-08-2009	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20090815_20200827_02_T1
18-08-2010	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20100818_20200823_02_T1
20-07-2011	Landsat 5	LT05_L1TP_008064_20110720_20200822_02_T1
27-09-2013	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20130927_20200912_02_T1
30-09-2014	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20140930_20200911_02_T1
15-06-2016	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20160615_20200906_02_T1
20-07-2017	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20170720_20200903_02_T1
25-09-2018	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20180925_20200830_02_T1
10-07-2019	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20190710_20200827_02_T1
10-06-2020	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20200610_20200824_02_T1
01-09-2021	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20210901_20210909_02_T1
28-09-2022	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20220928_20230327_02_T1
13-07-2023	Landsat 8	LC08_L1TP_008064_20230713_20230713_02_T1

Fuente: USGS (2023)

3.3.1.2 Extracción del eje central del río

Para el procesamiento de las imágenes satelitales se hizo uso de un programa escrito en Python 2 realizado por Monegaglia, Zolezzi, Güneralp, Henshaw, y Turbino (2018). Este programa permitió la digitalización del eje central de cada imagen satelital para su posterior análisis.

Las imágenes satelitales descargadas, así como el eje central extraído de cada una se presenta en los mapas del ANEXO V: EVOLUCIÓN DE EJE CENTRAL.

3.3.2 Evolución del eje central del río

La evolución del eje central del tramo de estudio se presenta en la Figura N° 3.14, así mismo en los mapas presentados en el ANEXO IV: EVOLUCIÓN DE EJE CENTRAL.

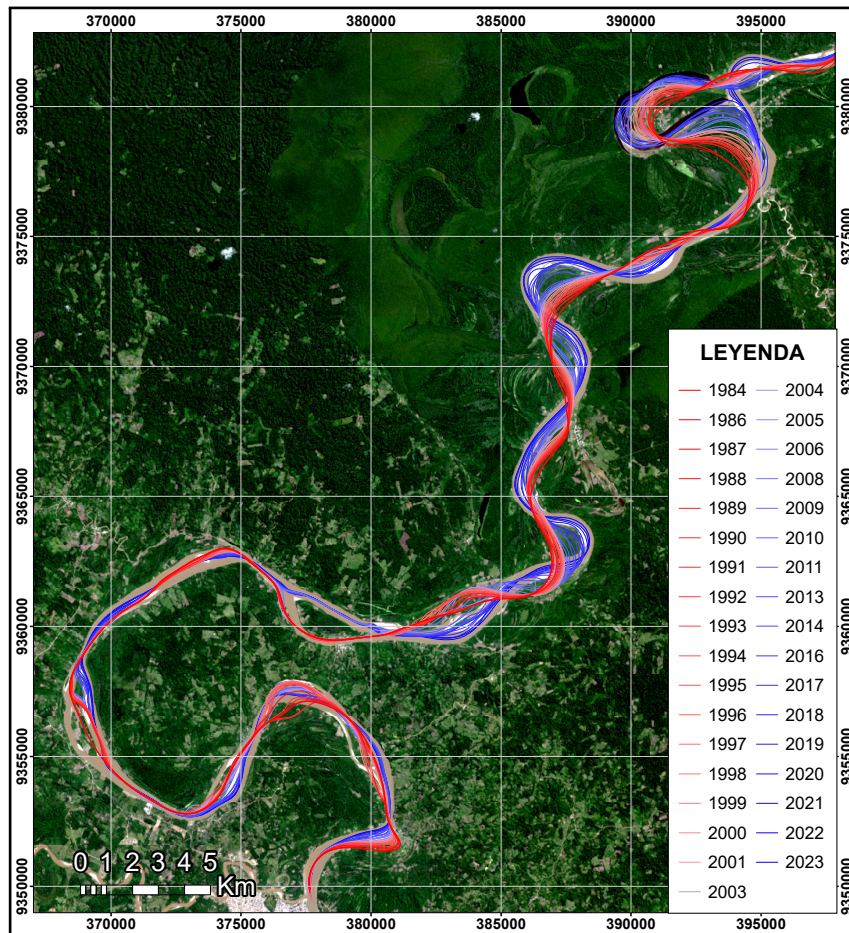


FIGURA N° 3.14: Evolución del eje central del río entre 1984-2023. Fuente: USGS (2023), Elaboración propia.

3.3.3 Cálculo y evolución de los parámetros del río

Para el cálculo de los distintos parámetros a partir de los ejes centrales extraídos, se hizo uso de un script en Python que permita parametrizar las curvas y calcular su geometría y la migración existente entre imágenes contiguas.

3.3.3.1 Geometría de los meandros

La geometría de un meandro puede ser definida por los siguientes parámetros (Solorzano, 2013):

- **Radio de curvatura (R):** Radio de una curva meándrica individual medida entre dos puntos de inflexión.
- **Longitud de onda (λ):** Longitud repetida del patrón del meandro a lo largo de la línea central del valle o eje de los meandros.
- **Ancho (W):** ancho medio del meandro.

- **Amplitud (A):** Ancho de la secuencia de meandros calculada perpendicularmente al eje de los meandros.

Estos parámetros se presentan ilustrados en la Figura N° 3.15.

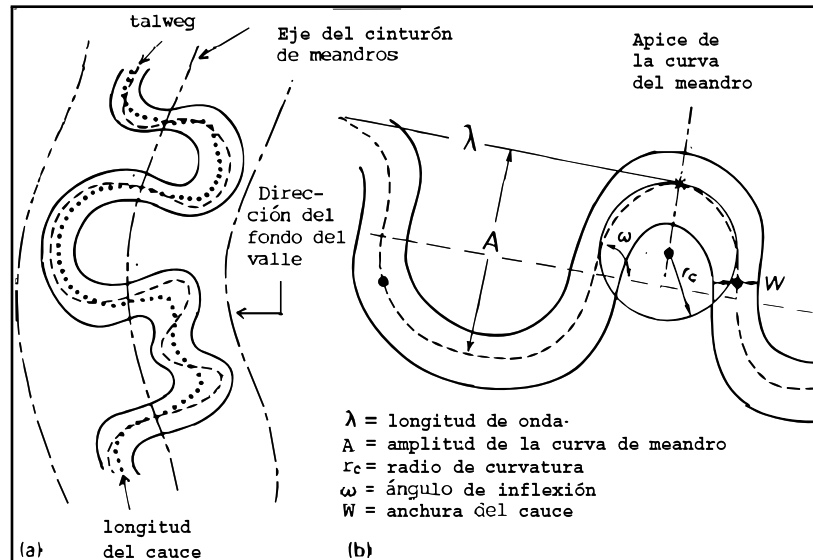


FIGURA N° 3.15: Esquema de los parámetros de geometría de un meandro. Fuente: García (1992)

El cálculo de los parámetros se realizó para todo el tramo de estudio, los cuales se presentan en promedio en el Tabla N° 3.8, así mismo se realizó el cálculo para la zona con presencia de las formaciones geológicas terciarias, progresivas desde la 0+00 Km hasta los 46+00 Km, en el Tabla N° 3.9 y de las zonas con presencia de formaciones geológicas cuaternarias, progresivas desde la 46+00 Km hasta la 80+00 Km, en el Tabla N° 3.10.

TABLA N° 3.8: Parámetros geométricos promedio de todo el tramo de estudio

Parámetro	Valor (m)
Radio (R)	966.79
Ancho (W)	405.74
Longitud de onda (λ)	4740.26
Amplitud (A)	2361.91

Fuente: propia.

TABLA N° 3.9: Parámetros geométricos promedio de todo el tramo terciario

Parámetro	Valor (m)
Radio (R)	834.47
Ancho (RW)	428.46
Longitud de onda (λ)	5606.15
Amplitud (A)	921.05

Fuente: propia.

TABLA N° 3.10: Parámetros geométricos promedio de todo el tramo cuaternario

Parámetro	Valor (m)
Radio (R)	1004.11
Ancho (RW)	385.10
Longitud de onda (λ)	4665.57
Amplitud (A)	2417.17

Fuente: propia.

3.3.3.2 Evolución de sinuosidad media y corte de meandro

La sinuosidad media de un tramo de un río meándrico se refiere a la medida de la curvatura que tiene el cauce de un río en relación con su longitud total. Se calcula dividiendo la distancia real que recorre el río a lo largo de su curso, que es mucho más larga debido a sus meandros, por la distancia en línea recta entre su inicio y final.

En la Figura N° 3.16 se presenta la evolución de la sinuosidad media en la zona terciaria desde el año 1984 hasta el 2023.

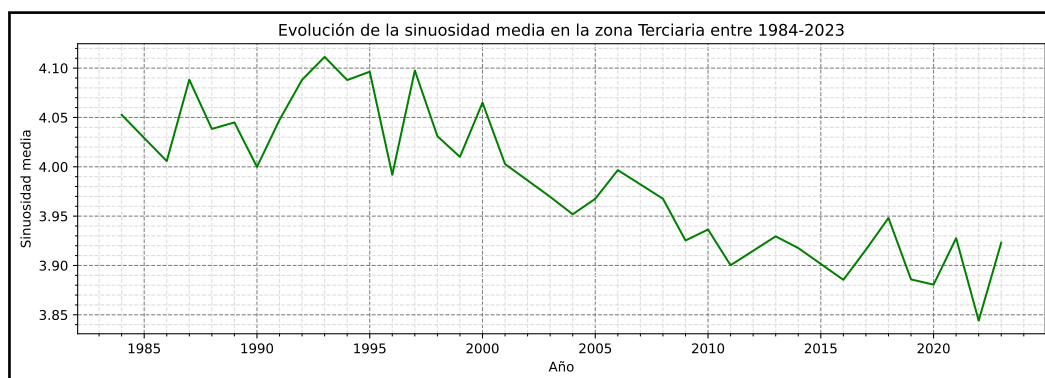


FIGURA N° 3.16: Evolución de la sinuosidad media entre 1984-2023. Fuente: elaboración propia.

En la Figura N° 3.17 se presenta la evolución de la sinuosidad media en la zona

cuaternaria desde el año 1984 hasta el 2023.

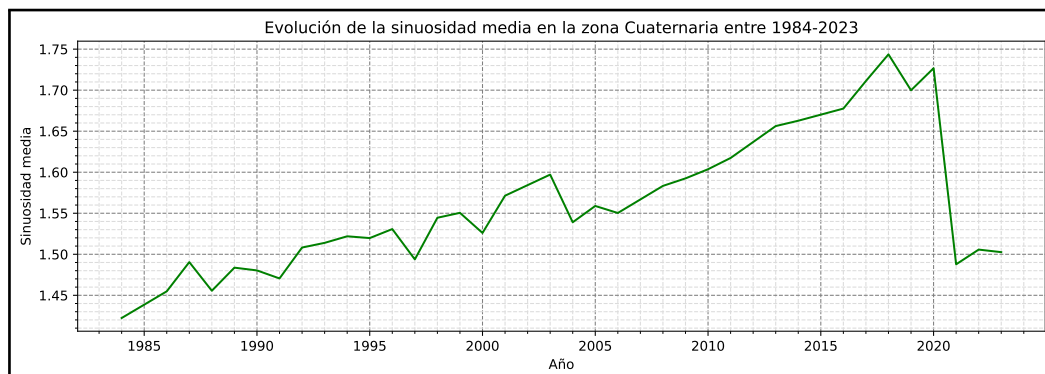
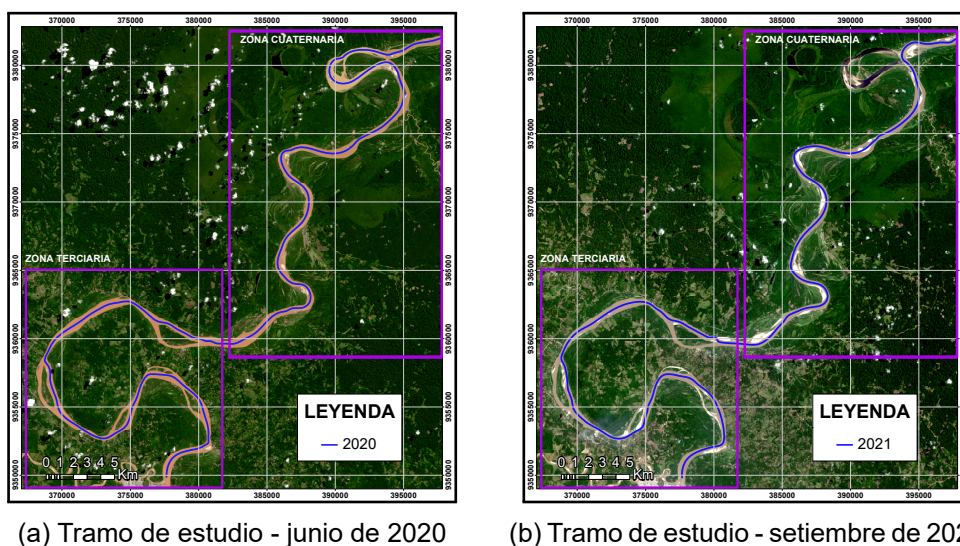


FIGURA N° 3.17: Evolución de la sinuosidad media entre 1984-2023. Fuente: elaboración propia.

La caída abrupta de la sinuosidad media en el año 2020 en el tramo de geología cuaternaria representa un corte meándrico dado ese mismo año y que se presenta de mejor forma en Figura N° 3.18, mientras que para la zona terciaria no se presenta ningún cambio abrupto en la sinuosidad media.



(a) Tramo de estudio - junio de 2020

(b) Tramo de estudio - setiembre de 2021

FIGURA N° 3.18: Corte meándrico en el año 2020. Fuente: USGS (2023). Elaboración propia.

3.3.3.3 Evolución de migración promedio

La migración de un río (metros por año) se calculó a través de la comparación de ejes centrales entre imágenes de años consecutivos, esta se presenta en la Figura N° 3.19 para el tramo total entre el año 1984 y 2022, interpolando de forma lineal la migración para los años que no se tuvo data (1985, 2002, 2007, 2012, 2015). Se observó que para el tramo total se tuvo una migración promedio de 40.6 m/año, una migración mínima 14.4 m/año para el año 1984 y máxima de 81.3 m/año para

el año 2003.

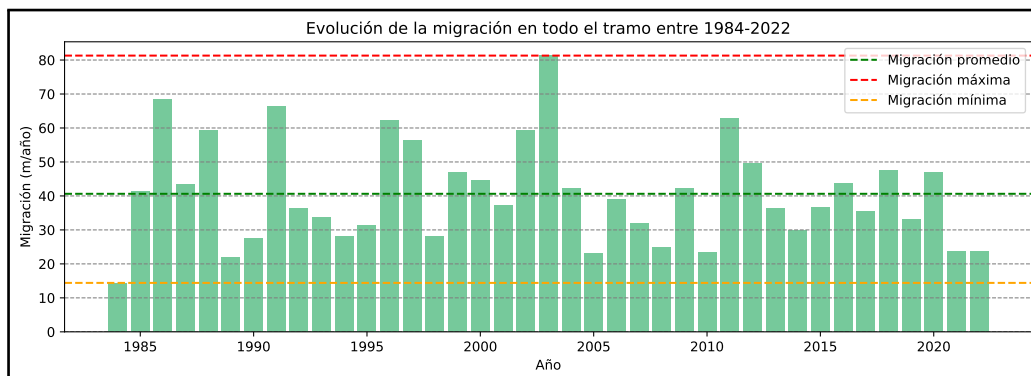


FIGURA N° 3.19: Evolución de la migración en todo el tramo entre 1984-2022. Fuente: elaboración propia.

En la Figura N° 3.20 se presenta la evolución de la migración para la zona terciaria (progresivas desde la 0+00 Km hasta los 42+00 Km), donde se tuvo una migración promedio de 22.1 m/año, una migración mínima 8.5 m/año para el año 1984 y máxima de 36.0 m/año para el año 1996.

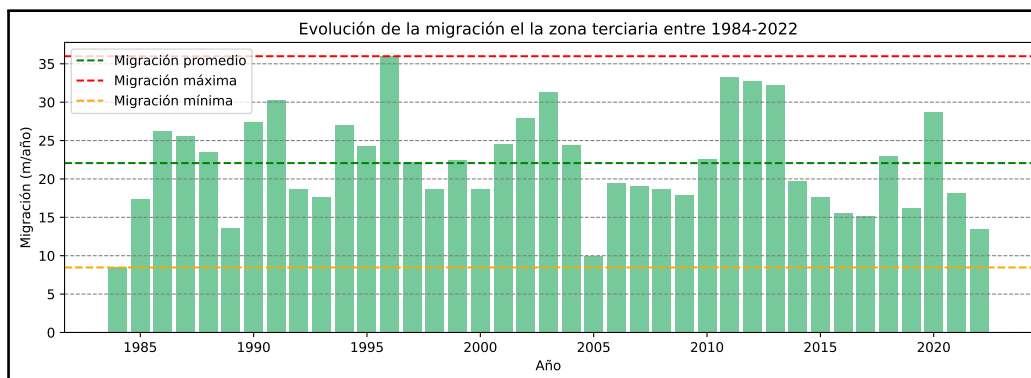


FIGURA N° 3.20: Evolución de la migración en la parte del tramo con geología del terciario entre 1984-2022. Fuente: elaboración propia.

En la Figura N° 3.21 se presenta la evolución de la migración para la zona cuaternaria (progresivas desde la 42+00 Km hasta la 80+00 Km), donde se tuvo una migración promedio de 49.0 m/año, una migración mínima 19.38 m/año para el año 1984 y máxima de 84.0 m/año para el año 2003.

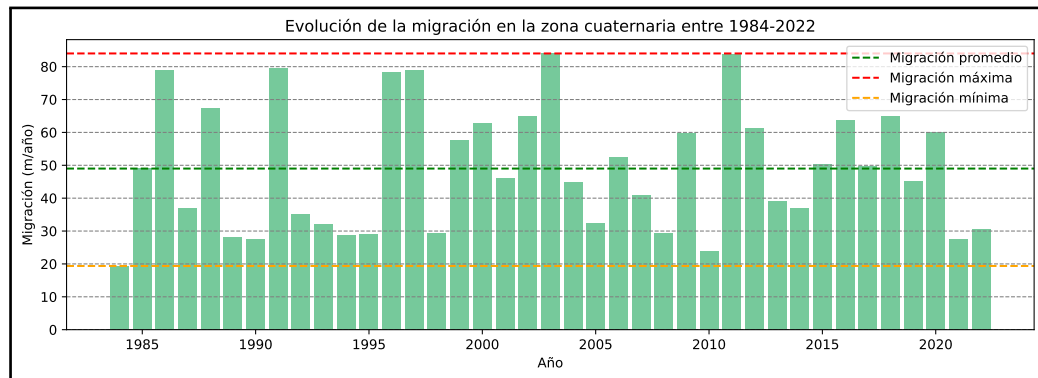


FIGURA N° 3.21: Evolución de la migración en la parte del tramo con geología del cuaternario entre 1984-2022. Fuente: elaboración propia.

3.3.3.4 Migración lateral del 2018

Para nuestro año de estudio 2018 se calculó la variación longitudinal de la migración lateral en el tramo de estudio a partir de las imágenes LANDAST descargadas para las fechas entre julio de 2017 y setiembre de 2018, el cual se presenta en la Figura N° 3.22.

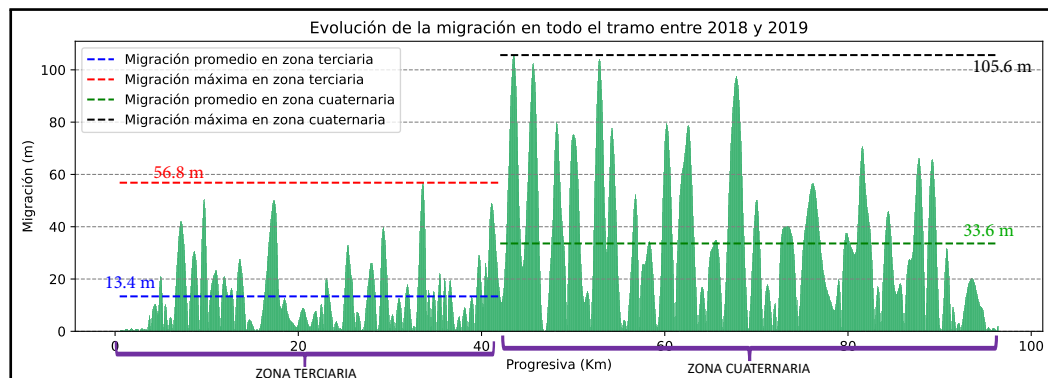


FIGURA N° 3.22: Migración lateral a través del tramo de estudio entre julio de 2017 y setiembre de 2019. Fuente: elaboración propia.

Se observó un aumento de la migración absoluta promedio entre la zona de geología terciaria y cuaternaria de 13.4 m/año (en la zona terciaria hasta el kilómetro 42) a 33.6 m/año (en la zona cuaternaria a partir del kilómetro 42), a su vez en la zona cuaternaria se observó la tendencia de una mayor migración en las áreas con mayor curvatura (curvas más cerradas), mientras que en la zona terciaria la tendencia es menos clara.

CAPÍTULO IV: MODELACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN LATERAL Y DE SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN VERTICAL

4.1 METODOLOGÍA DE MODELAMIENTO

El modelamiento fluviomorfológico fue realizado mediante las ecuaciones 1D de Saint Venant para la parte hidrodinámica, las ecuaciones de Engelund- Hansen para el cálculo de la capacidad de transporte (rango de validación: d_{50} entre 0.19 a 0.93mm), la ecuación de Exner para el equilibrio en los cambios de fondo, y las ecuaciones BSTEM para la modelación de fallo de talud externo en curvas; estas ecuaciones se explican más a detalle en la sección 2.4. El modelamiento se realizó mediante el software HEC-RAS v6.2, haciendo uso de sus módulos de flujo cuasi permanente y modelación de sedimentos. La metodología completa se resume en la Figura N° 4.1 la cual al igual que en la sección 3.2 se modeló de marzo a agosto de 2018. El modelo también se detalla en las secciones 4.2 y 4.3.

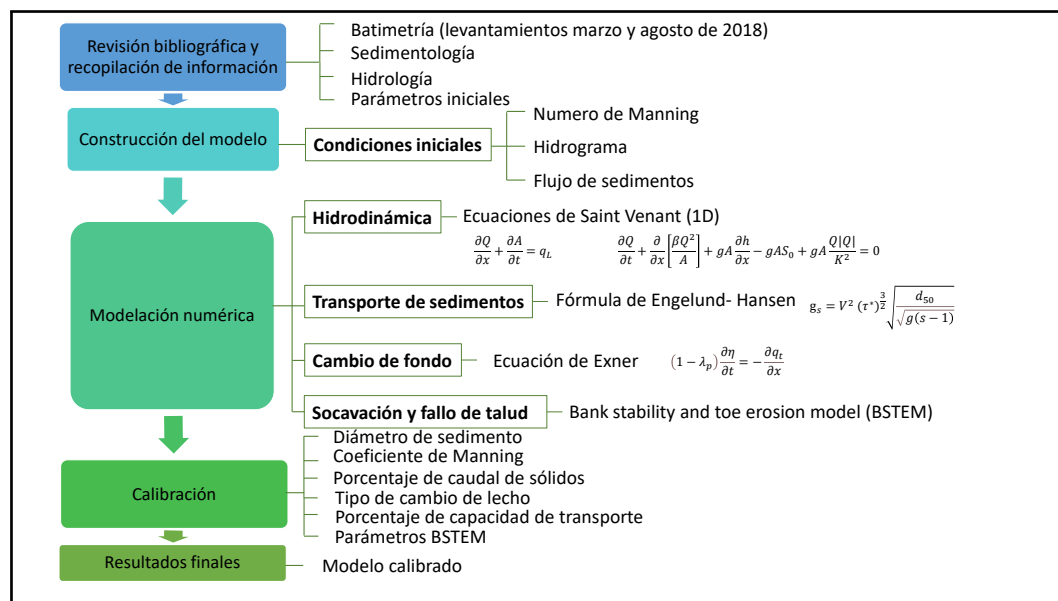


FIGURA N° 4.1: Flujograma para la modelación numérica. Fuente: Elaboración propia

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

4.2.1 Creación de la geometría

La geometría se estableció mediante secciones cada 100 metros (Figura N° 4.2) ya que con estas se obtuvo una modelación más estable y se conservaba la mayor cantidad de detalle del terreno optimizando a su vez los tiempos de modelación.

Estas secciones abarcaron todo el ancho del río y 250 metros más en cada banco de inundación aproximadamente.

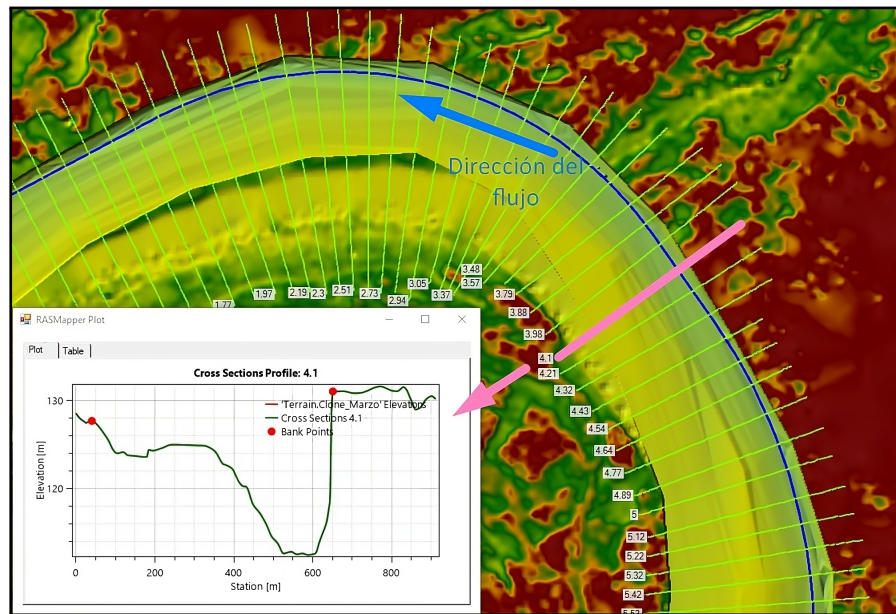


FIGURA N° 4.2: Secciones establecidas para el modelamiento. Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Rugosidad del lecho

El coeficiente de rugosidad de Manning reportado para este tramo fue de 0.028 para el río y 0.05 para las planicies de inundación (MTC, 2018), estos mismos valores fueron utilizados y validados por Reyes (2023).

4.2.3 Conexiones

A lo largo del modelo fueron realizadas 3 conexiones para los distintos ríos: Parapapura, Zapote y Shishinahua, estas conexiones se muestran esquemáticamente en la Figura N° 4.3.

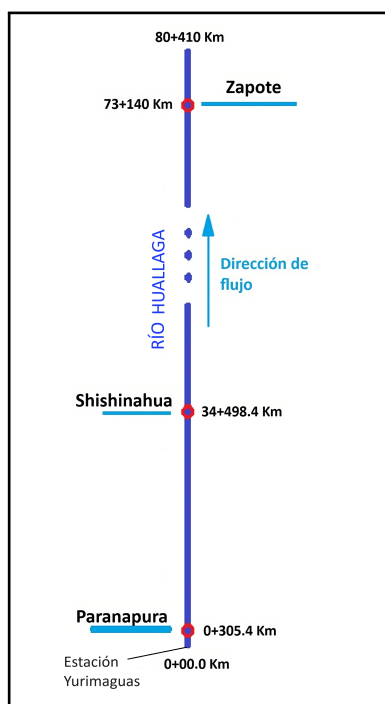


FIGURA N° 4.3: Conexiones del modelo. Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Condiciones de borde

4.2.4.1 Hidrogramas de ingreso

Como condición de contorno de aguas arriba se utilizó los hidrogramas de ingreso representados en la sección 3.1.3 y reportados en el ANEXO II: CAUDALES MODELADOS. En el Tabla N° 4.1 se presentan los caudales medios mensuales en los ríos Huallaga (estación Yurimaguas), Parapapura, Zapote y Shishinahua correspondientes al periodo de simulación.

TABLA N° 4.1: Caudales medios mensuales simulados en 2018 para la simulación en HEC-RAS

Mes	Río Huallaga (E. Yurimaguas)	Río Parapapura	Río Zapote	Río Shishinahua
Marzo 2018	5841.16	303.27	39.84	107.07
Abril 2018	4846.90	221.44	37.51	98.77
Mayo 2018	2856.55	123.35	23.47	64.86
Junio 2018	1728.47	55.25	11.98	39.46
Julio 2018	1394.84	34.46	7.59	23.16
Agosto 2018	1270.48	32.81	7.14	16.95

Fuente: Campaña et al. (en preparación)

4.2.4.2 Curva de descarga

Como condición de contorno de aguas abajo se utilizó la curva de descarga de la estación Selva Alegre. Esta curva fue generada a partir de: a) Las medidas horarias de niveles de agua realizadas por el MTC (2018) durante el periodo del 31/7/2018 al 13/11/2018, y b) Los caudales del río Huallaga generados en la estación Selva Alegre para el mismo periodo como la suma de los caudales históricos registrados en la estación Chazuta y los caudales generados con el modelo SWAT en Campaña et al. (en preparación) para la cuenca del río Huallaga comprendida entre las estaciones Chazuta y Selva Alegre (Figura N° 4.4).

La curva de descarga ajustada se presenta en la Figura N° 4.5.

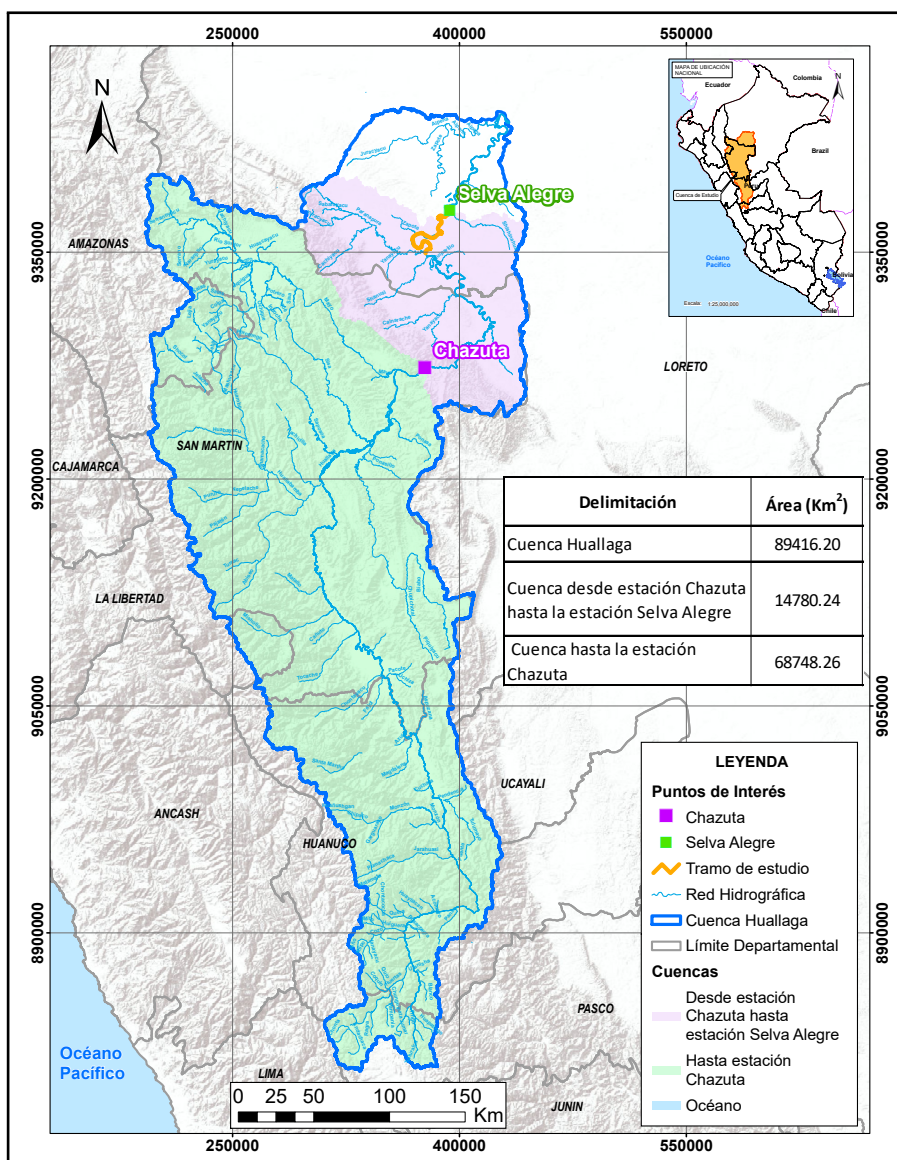


FIGURA N° 4.4: Cuencas delimitadas hasta estaciones usadas para la construcción de la curva de descarga. Fuente: Elaboración propia

La curva de descarga ajustada se presenta en la Figura N° 4.5.

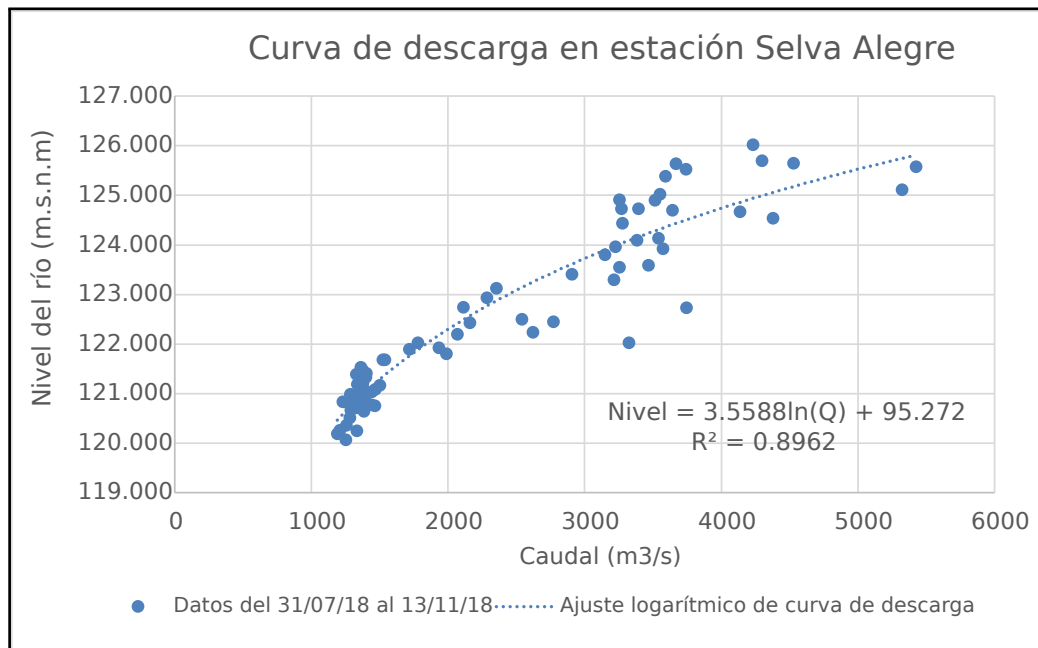


FIGURA N° 4.5: Curva de descargar construida para la estación selva alegre. Fuente: Elaboración propia

4.2.4.3 Sedimentograma de ingreso

Como condición de contorno de aguas arriba para el ingreso de caudal de sólidos (q_s) fueron ingresados sedimentogramas estimados como una fracción de las capacidades de transporte sólido calculadas en la sección inicial mediante la aplicación de la ecuación de Engelund Hansen a los caudales líquidos de los hidrogramas previamente calculados. Como se indica en la sección 4.3 y a más detalle en el ANEXO VI: CALIBRACIÓN DE MODELOS, la fracción de la capacidad de transporte sólido utilizada fue tomada como un parámetro de calibración.

En el Tabla N° 4.2 se presentan los caudales sólidos medios mensuales en los ríos Huallaga (E. Yurimaguas), Paranapura, Zapote y Shinshinahua correspondientes al periodo de simulación.

TABLA N° 4.2: Caudal de sólidos medios mensuales simulados en HEC-RAS

Mes	Caudal de sólidos (Ton/día)			
	Río Huallaga (E. Yurimaguas)	Río Paranapura	Río Zapote	Río Shishinahua
Marzo 2018	230940.82	1459.84	83.29	264.45
Abril 2018	162496.52	535.99	85.60	924.45
Mayo 2018	52350.29	1844.82	72.06	984.01
Junio 2018	15873.93	112.36	8.67	421.72
Julio 2018	15611.45	36.76	3.00	153.21
Agosto 2018	13966.00	575.33	19.71	82.83

Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Incremento computacional

La modelación de transporte de sedimentos en el modelo HEC-RAS se dió a través de un hidrograma cuasi permanente lo que indica que el caudal se va a leyendo paso a paso de forma discreta y por ende la actualización de la forma de lecho y el transporte de sedimentos se calcula por cada incremento computacional.

Para esta modelación se vio por conveniente usar como incremento computacional de 0.2 horas para que las secciones se calculen y actualicen por cada caudal ingresado del hidrograma.

4.2.6 Capacidad de transporte de sólidos

La capacidad de transporte de sólidos es una medida de la competencia del volumen de control para pasar sedimentos por cada clase de grano.

Para el modelo de Hec Ras se usó como cantidad de sedimentos transportadas a la capacidad de transporte total calculada por la ecuación de Engelund- Hansen (rango de validación: d_{50} entre 0.19 a 0.93mm).

La ecuación de Engelund- Hansen se detalla en la sección 2.4.5, y se hizo uso de esta ecuación debido a los diámetros de sedimentos reportados en la sección 3.1.4, con rango de diámetros que varía entre 0.1 a 0.5 mm, lo que se encuentra dentro del rango de la aplicación de la ecuación, además en el estudio realizado por Reyes (2023), fueron usados estas mismas ecuaciones, cuyo rendimiento se valida en la sección siguiente 4.3.

4.2.7 Parámetros de calibración

Para la calibración se hizo uso de los siguientes datos de entrada: diámetro de sedimentos de fondo, caudal de sólidos que ingresa al tramo, tipo de cambio de lecho, capacidad de transporte a lo largo del tramo, coeficiente de Manning y los parámetros del modelo BSTEM. El análisis de sensibilidad de las variables se muestra en la sección 4.3 y con mayor detalle en el ANEXO VI: CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS.

4.2.7.1 Parámetros sedimentológicos

- Diámetro de sedimentos de fondo:

Para el diámetro de sedimentos de fondo se utilizó los valores indicados en la sección 3.1.4 y en el Tabla N° 4.3, pero también se le realizó un análisis de sensibilidad para la calibración del modelo.

TABLA N° 4.3: Resumen de diámetros característicos en cada mal paso

Zona de muestreo	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D84 (mm)
Paranapura	0.191	0.277	0.314	0.335	0.390
Providencia	0.141	0.254	0.291	0.311	0.3671
Metrópolis	0.119	0.172	0.248	0.276	0.352
Oromina	0.236	0.286	0.328	0.351	0.494
Progreso	0.121	0.171	0.242	0.275	0.366

- Caudal de sólidos que ingresa al tramo: Los caudales sólidos que ingresan al tramo fueron estimados como una fracción de la capacidad de transporte en la sección inicial. El valor de dicha fracción fue tomado como un parámetro de calibración.

- Tipo de cambio de lecho:

El modelo de Hec-ras por defecto deposita u erosiona el sedimento calculado a lo largo del cauce de manera regular y no altera los bancos. A este tipo de cambio de lecho se le conoce como Veneer (Figura N° 4.6a), sin embargo, también existe la opción de depositar los sedimentos en los bancos de manera inversamente proporcional a la distancia al cauce (Figura N° 4.6b), opción utilizada en el tramo estudiado, ya que como se presenta en la sección 4.3, de calibración, esta representa mejor el fenómeno natural y mejoraba los índices de eficiencia.

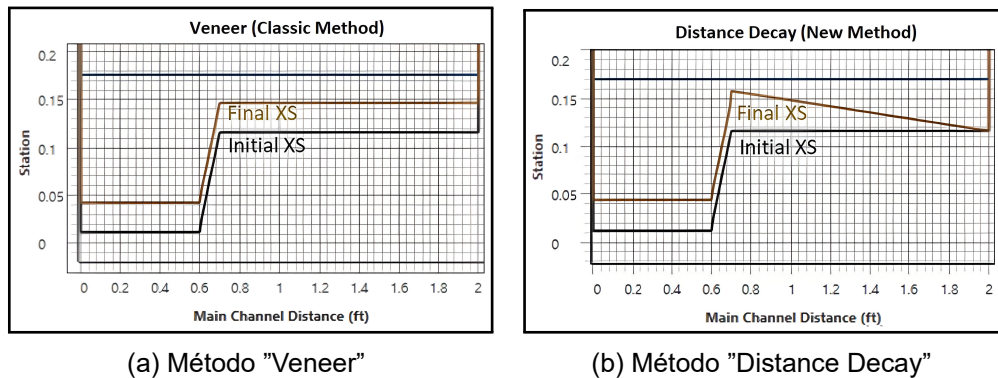


FIGURA N° 4.6: Métodos de deposición de sedimentos. Fuente: HEC (2022)

- Capacidad de transporte de sólidos a lo largo del tramo:

La capacidad de transporte a lo largo del tramo se estimó como una fracción de la capacidad de transporte calculada con la fórmula de Engelund Hansen. El valor de dicha fracción se tomó como un parámetro de calibración.

4.2.7.2 Parámetros BSTEM

Para obtener una mejor representación de la realidad se hizo uso del módulo BSTEM para la modelación del fallo de talud en la parte externa de las curvas a lo largo de la zona cuaternaria del tramo, esta mejora en el modelo se observa en los índices de calibración mostrados en la sección 4.3.2 y el ANEXO VI: CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS.

Para la primera prueba del modelo se utilizaron los valores especificados por defecto para los materiales que se incluyen en el software, este material representa a una mezcla de la arena fina con materiales cohesivos que se pueden encontrar en el Tabla N° 4.4, y cuyos parámetros iniciales son 1887 Kg/m³ de Peso Unitario Saturado, 31° de ángulo de fricción, 0.5 Kpa de Cohesión, 15° de ϕ^b , 1.0 Pa de Cortante Crítico y 5×10^{-7} m³/N-s de Erosionabilidad.

TABLA N° 4.4: Materiales por defecto incluidos en Hec Ras

Material por Defecto	Peso unitario saturado (Kg/m ³)	Ángulo de Fricción (ϕ')	Cohesión (KPa)	ϕ^b	Esfuerzo de corte crítico (Pa)	Erodibilidad (m ³ /N-s)
Cantos rodados	2039.1	42.0	0.000	15.00	498.0	1.81E-07
Guijarros	2039.1	42.0	0.000	15.00	124.0	3.65E-07
Grava	2039.1	36.0	0.000	15.00	11.0	1.22E-06
Arena Gruesa Angular	1887.0	32.3	0.4	15.00	0.5	5.70E-06
Arena gruesa Redondeada	1887.0	28.3	0.4	15.00	0.5	5.70E-06
Arena Fina Angular	1887.0	32.3	0.4	15.00	0.1	5.70E-06
Arena Fina Redondeada	1887.0	28.3	0.4	15.00	0.1	5.70E-06
Limo Erosionable	1835.7	26.6	4.3	15.00	0.1	1.28E-05
Limo Moderado	1835.7	26.6	4.3	15.00	5.0	1.82E-06
Limo Resistente	1835.7	26.6	4.3	15.00	50.0	5.67E-07
Arcilla Suave Erosionable	1805.3	26.4	8.2	15.00	0.1	1.28E-05
Arcilla Suave Moderada	1805.3	26.4	8.2	15.00	5.0	1.82E-06
Arcilla Suave Resistente	1805.3	26.4	8.2	15.00	50.0	1.28E-05
Arcilla Rígida Erosionable	1805.3	21.1	12.6	15.00	700	1.28E-05
Arcilla Rígida Moderada	1805.3	21.1	12.6	15.00	5.0	1.82E-06
Arcilla Rígida Resistente.	1805.3	21.1	12.6	15.00	50.0	1.28E-05

Fuente: HEC (2022)

Para la calibración del modelo BSTEM se analizó la sensibilidad de los siguientes parámetros:

- **Ángulo de fricción:**

Es el parámetro utilizado comúnmente en geotecnia como una medida de la resistencia del suelo que cuantifica la resistencia al corte por fricción del

suelo.

- Cohesión:

Es el parámetro utilizado comúnmente en geotecnia como una medida de la resistencia del suelo que cuantifica la resistencia al corte por fricción del suelo.

- Esfuerzo cortante crítico:

Es el esfuerzo cortante con el cual el banco comienza a erosionar.

- Erosionabilidad:

Es la tasa de eliminación de sedimentos en respuesta a una unidad de esfuerzo cortante.

Para el esfuerzo cortante crítico Simon et al. (2000), propone la siguiente ecuación (ec. IV.1) aproximada:

$$E = 1.42\tau_c^{-0.824} \quad (\text{IV.1})$$

Donde:

E : Erosionabilidad ($\text{ft}^3/\text{lbf-s}$)

τ_c : Esfuerzo cortante crítico (lb/ft^2)

4.2.8 Consideraciones del modelo

Las simulaciones aplican la ecuación de transporte de Engelund-Hansen original (transporte de carga total con origen en el lecho), como se mencionó esta ecuación considera el transporte como la totalidad de la capacidad de transporte. En la sección de calibración se modificó también capacidad de transporte por una fracción de esta.

Para el proceso de calibración se comparó el cambio medio del nivel del lecho medio medido versus el simulado, en secciones cada 250 metros.

El movimiento lateral que genera en los tramos curvos se da principalmente por el flujo secundario, la fuerza centrífuga del movimiento, o el avance de la vegetación en la zona sedimentada. El modelo escogido no puede considerar todas estas variables por ende fueron usados los parámetros de fallo de banco del modelo BSTEM para emular estos fenómenos de manera simplificada.

4.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

El proceso de calibración consistió en el cambio de algunos parámetros sensibles para el modelo de erosión y sedimentación, con el objetivo de obtener resultados que emulen de mejor manera el cambio medio en el lecho en el periodo de marzo a agosto de 2018.

Los parámetros de calibración utilizados fueron: diámetro de sedimentos de fondo, caudal de sólidos que ingresa al tramo, coeficiente de Manning, capacidad de transporte a lo largo del tramo, tipo de cambio de lecho y los parámetros de BSTEM (ángulo de fricción, cohesión, esfuerzo cortante crítico y erosionabilidad).

El análisis se hizo cada 250 metros, (322 secciones) y se comparó el cambio medio de lecho en cada sección observada entre marzo y agosto de 2018 con los resultados de cada modelación. Donde un valor negativo corresponde a un valor medio de erosión, mientras que un valor positivo indica un valor medio de sedimentación.

La metodología desarrollada constó de dos partes como recomendación del manual de usuario de HEC-RAS, se recomienda primero la calibración mediante los parámetros sedimentológicos antes de incorporar el módulo de BSTEM, para luego calibrar los parámetros que controlen los procesos de erosión lateral.

Para cada simulación fueron utilizados los índices de calibración presentados en la sección 2.5: Coeficiente de correlación (R), Relación de la desviación estándar de observaciones (RSR), Coeficiente de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) y el parámetro estadístico promedio (P).

4.3.1 Calibración sin erosión lateral

Se realizó un análisis de sensibilidad con los parámetros de diámetro de sedimentos de fondo, caudal de sólidos que ingresa al tramo, coeficiente de Manning, capacidad de transporte a lo largo del tramo y tipo de cambio de lecho. Este análisis se realizó con el fin de obtener los resultados de mejor correlación a los medidos en el tramo que no presenta efecto significativo de erosiones laterales, el tramo con geología terciaria como se puede observar en la sección 3.1.2, que corresponde desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km. El procedimiento y resultados detallados de la sensibilidad se presentan en el ANEXO VI: CALIBRACIÓN DE MODELOS.

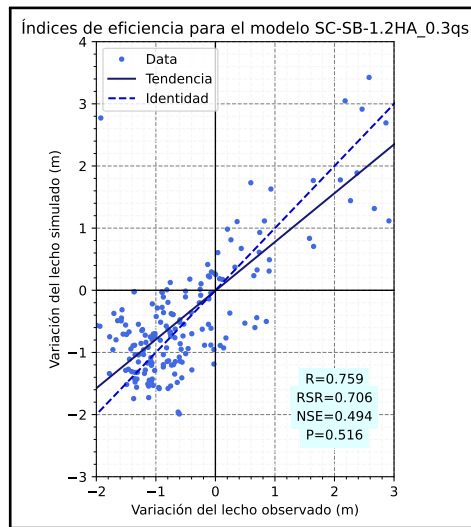
Para la calibración final se realizó un análisis de 4 escenarios finales, donde se variaron los distintos parámetros mencionados en la sensibilidad, los detalles de estos 4 modelos se presentan en el Tabla N° 4.5.

TABLA N° 4.5: Modelos para calibración final sin erosión lateral

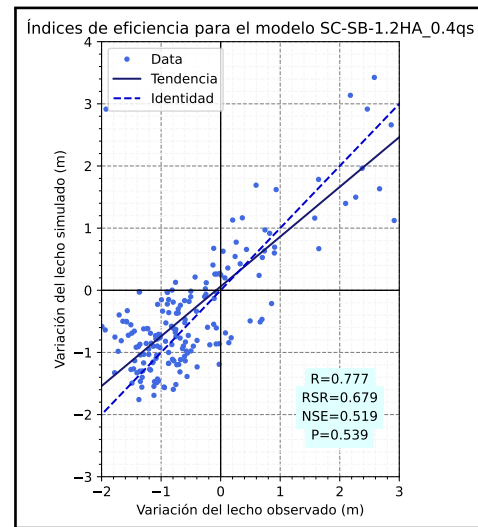
NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES					TIEMPO (hh:mm:ss)
	Diámetro de sedimento	Caudal de sólidos	Número de Manning del lecho	Capacidad de transporte	Tipo de cambio de lecho	
SC-SB-1.2HA-0.3qs	100 %	30 %	0.028	120 %	Dist. Decay	2:13:40
SC-SB-1.2HA-0.4qs	100 %	40 %	0.028	120 %	Dist. Decay	2:07:10
SC-SB-1.3HA-0.4qs	100 %	40 %	0.028	130 %	Dist. Decay	2:11:34
SC-SB-1.3HA-0.3qs	100 %	30 %	0.028	130 %	Dist. Decay	2:14:48

Fuente: Propia

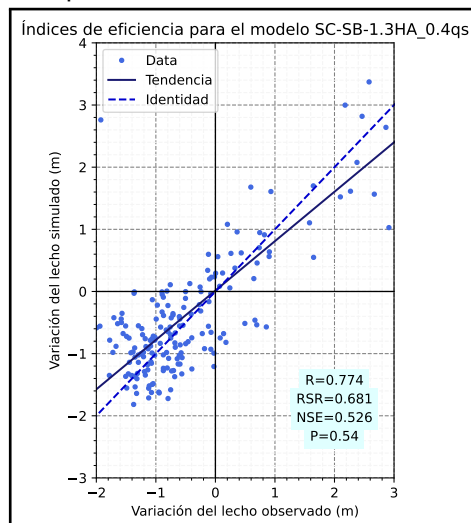
En la Figura N° 4.7 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-SB-1.2HA-0.3qs (Figura N° 4.7a), SC-SB-1.2HA-0.4qs (Figura N° 4.7b), SC-SB-1.3HA-0.4qs (Figura N° 4.7c) y SC-SB-1.3HA-0.3qs (Figura N° 4.7d) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.



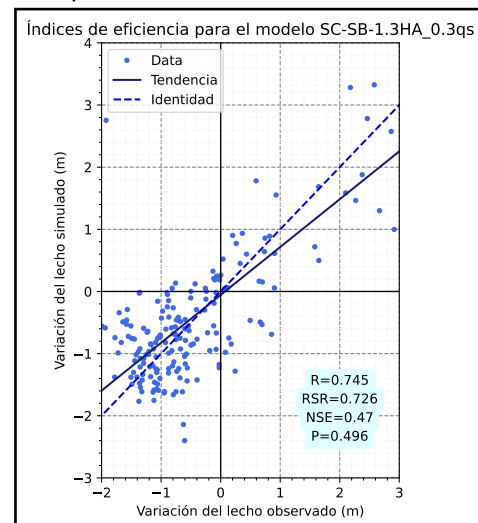
(a) Modelo con 30 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.2



(b) Modelo con 40 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.2



(c) Modelo con 40 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.3



(d) Modelo con 30 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.3

FIGURA N° 4.7: Calibración final sin erosión lateral. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura N° 4.8 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos finales evaluados y el real en el tramo que corresponde desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.

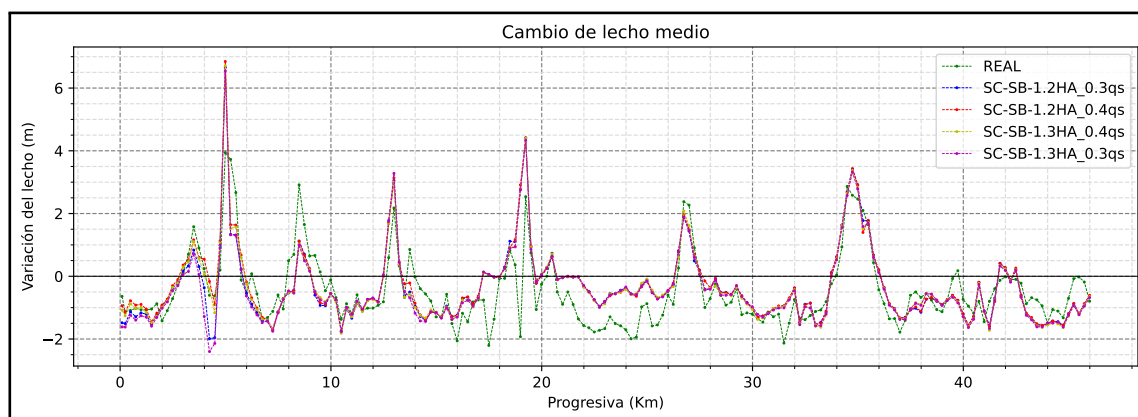


FIGURA N° 4.8: Variación media del lecho modelada y real de los modelos finales sin erosión lateral en la zona sin erosión lateral. Fuente: Elaboración propia

En el Tabla N° 4.6 se observa que el modelo donde el caudal de sólidos que ingresa al tramo se modifica a un 40 % y su capacidad de transporte se ve aumentada por 1.3 (SC-SB-1.3HA-0.4qs) presenta los mejores índices de evaluación.

TABLA N° 4.6: Índices de calibración de modelos de sensibilidad final sin erosión lateral en zona terciaria

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-SB-1.2HA-0.3qs	0.759	0.706	0.494	0.516
SC-SB-1.2HA-0.4qs	0.777	0.679	0.519	0.539
SC-SB-1.3HA-0.4qs	0.774	0.681	0.526	0.54
SC-SB-1.3HA-0.3qs	0.745	0.726	0.47	0.496

Fuente: Propia

El modelo SC-SB-1.3HA-0.4qs se estableció entonces como el modelo final sin considerar erosión lateral. A continuación, se presenta también su rendimiento en la zona de geología terciaria y en todo el tramo (hasta la progresiva 80+370 Km) en la Figura N° 4.9 y Figura N° 4.10, y la evolución del lecho en la Figura N° 4.11.

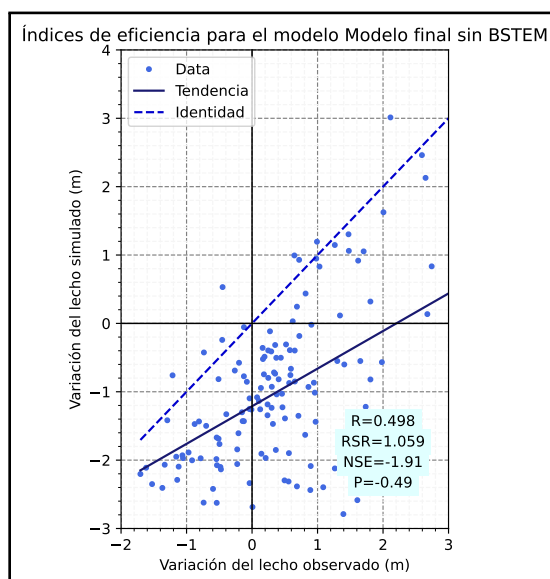


FIGURA N° 4.9: Modelo final sin erosión lateral a lo largo del tramo de geología cuaternaria.
Fuente: Elaboración propia

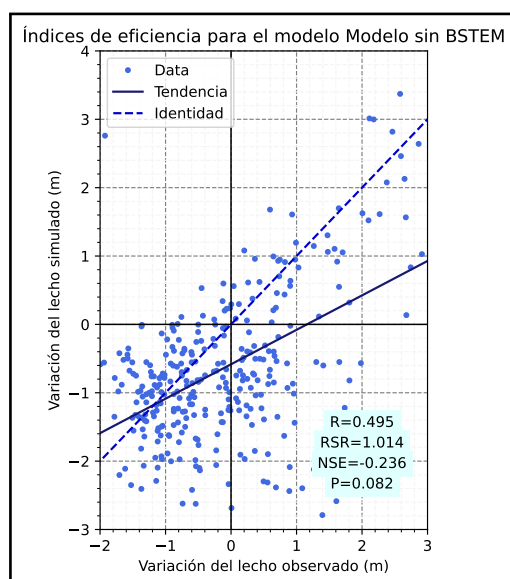


FIGURA N° 4.10: Modelo final sin erosión lateral a lo largo de todo el tramo de estudio. Fuente:
Elaboración propia

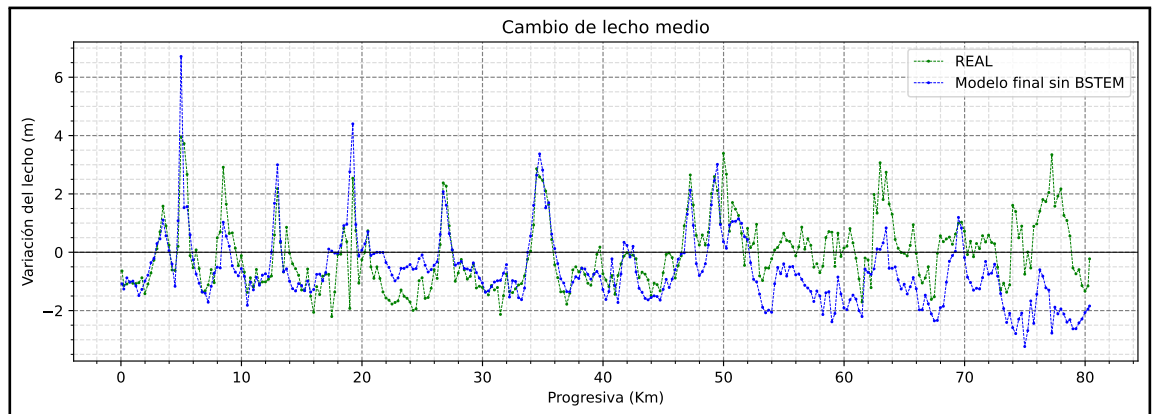


FIGURA N° 4.11: Variación media del lecho del modelo final sin erosión lateral en todo el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia

Los valores ideales para los índices utilizados son: R fue de 1, RSR fue de 0, NSE fue de 1 y P fue de 1. Se concluyó a partir de los índices de la Figura N° 4.7c, Figura N° 4.9 y Figura N° 4.10, que el modelo calibrado sin incluir BSTEM presenta un buen rendimiento en la zona de geología terciaria ($R=0.7740$ $RSR=0.681$, $NSE=0.526$ y $P=0.54$), pero un mal rendimiento de la zona de geología cuaternaria ($R=0.498$, $RSR=1.059$, $NSE=-1.91$ y $P=-0.49$), concluyendo en los siguientes índices para el tramo total: $R=0.495$, $RSR=1.014$, $NSE=-0.236$ y $P=0.082$.

4.3.2 Calibración con erosión lateral

Una vez establecido el modelo sin erosión lateral (SC-SB-1.3HA-0.4qs) se procedió a incluir el módulo BSTEM y realizar un análisis de sensibilidad entre las variables de: ángulo de fricción, cohesión, esfuerzo cortante crítico y erosionabilidad. Este análisis se realizó con el fin de obtener los resultados de mejor correlación a los medidos en el tramo que sí presenta efectos de erosión lateral importantes, el tramo con geología cuaternaria como se puede observar en la sección 3.1.2, que corresponde desde la progresiva 46+00.0 Km hasta la 80+410.0 Km.

Para la primera prueba del modelo fueron utilizados los parámetros de los materiales por defecto que se incluyen en el software, este material representa a una mezcla de la arena fina con materiales cohesivos que se pueden encontrar en el Tabla N° 4.4, y cuyos parámetros iniciales son 1887 Kg/m³ de Peso Unitario Saturado, 31° de ángulo de fricción, 1.0 Kpa de Cohesión, 15° de ϕ^b , 1.5 Pa de Cortante Crítico y 2×10^{-7} m³/N-s de Erosionabilidad.

Las sensibilidades con los parámetros mencionados se muestran con mayor detalles en ANEXO VI: CALIBRACIÓN DE MODELOS.

Para finalizar la calibración incluyendo ahora erosión lateral, se probaron 3 escenarios finales, donde se variaron distintos parámetros BSTEM mencionados en la sensibilidad, los detalles de estos modelos se presentan en el Tabla N° 4.7.

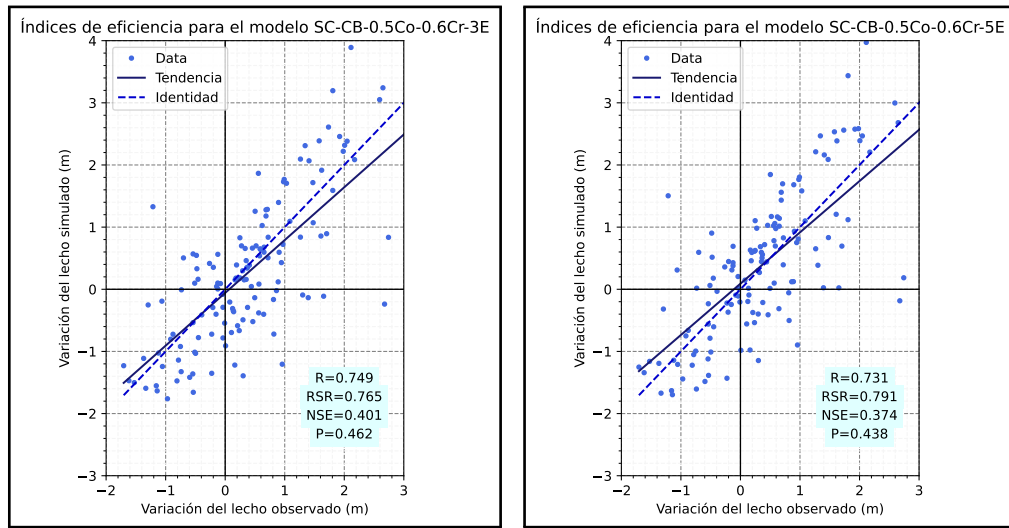
TABLA N° 4.7: Modelos para calibración final con erosión lateral

NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES				TIEMPO (hh:mm:ss)
	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (KPa)	Esfuerzo cortante crítico (Pa)	Erosionabilidad (10 ⁻⁷ m ³ /N-s)	
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-3E	31°	0.5	0.6	3	3:33:49
SC-CB-0.5Co-0.6r-5E	31°	0.5	0.6	5	3:34:38
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E	31°	0.5	0.6	6	3:43:02

Fuente: Propia

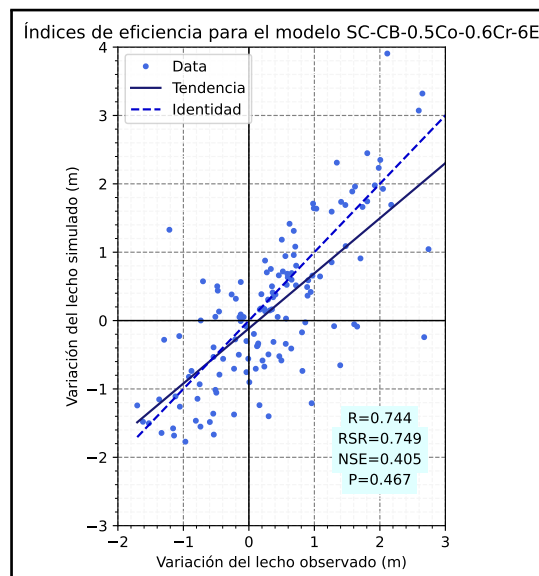
En la Figura N° 4.12 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-CB-0.5Co-0.6Cr-3E (Figura N° 4.12a), SC-SC-CB-0.5Co-0.6Cr-5E (Figura N° 4.12b) y SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E (Figura N° 4.12c), estos modelos con valores de erosionabilidad mayores de la última curva la cual

presenta mayores tasas de erosión, con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.



(a) Modelo con 0.5 KPa de cohesión, 0.6 Pa de Cortante Crítico, $3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad

(b) Modelo con 0.5 KPa de cohesión, 0.6 Pa de Cortante Crítico, $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad



(c) Modelo con 0.5 KPa de cohesión, 0.6 Pa de Cortante Crítico, $6 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad

FIGURA N° 4.12: Calibración final incluyendo erosión lateral en zona cuaternaria. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura N° 4.13 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos finales evaluados y el real en el tramo de geología cuaternaria, que corresponde desde la progresiva 46+00.0 Km hasta la 80+410.0 Km.

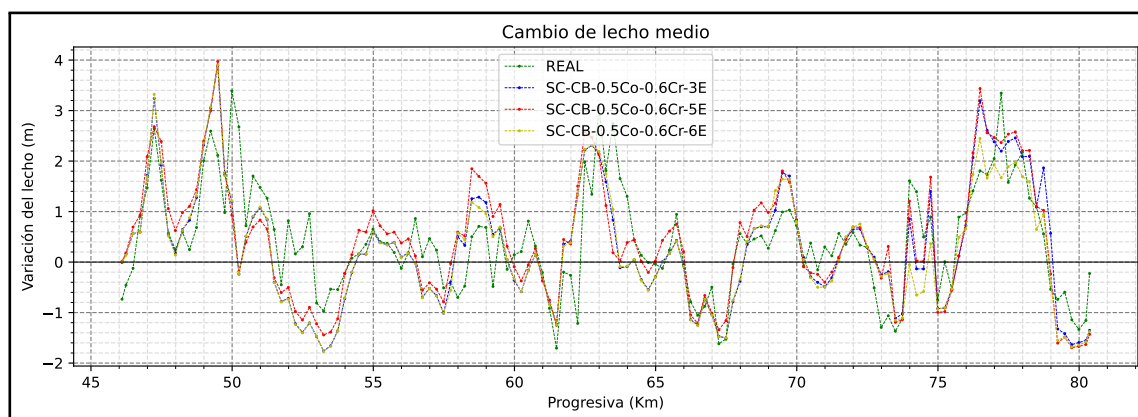


FIGURA N° 4.13: Variación media del lecho modelada y real de los modelos finales con erosión lateral en el tramo cuaternario. Fuente: Elaboración propia

En el Tabla N° 4.8 se observa que el modelo donde la cohesión fue de 0.5 KPa, el esfuerzo cortante crítico fue de 0.6 Pa y la erosionabilidad fue de $6 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ (SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E) presenta los mejores índices de evaluación.

TABLA N° 4.8: Índices de calibración de modelos de sensibilidad final con erosión zona cuaternaria

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-CB-0.5Co-1.3Cr-3E	0.749	0.765	0.401	0.462
SC-CB-0.5Co-1.3Cr-5E	0.731	0.791	0.374	0.438
SC-CB-0.5Co-1.3Cr-6E	0.744	0.749	0.405	0.467

Fuente: Propia

En el Tabla N° 4.9 se presentan también los índices de calibración en la zona terciaria del modelo final (SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E).

TABLA N° 4.9: Sensibilidad por Modelos finales en zona terciaria

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
Modelo Final	0.805	0.659	0.52	0.555

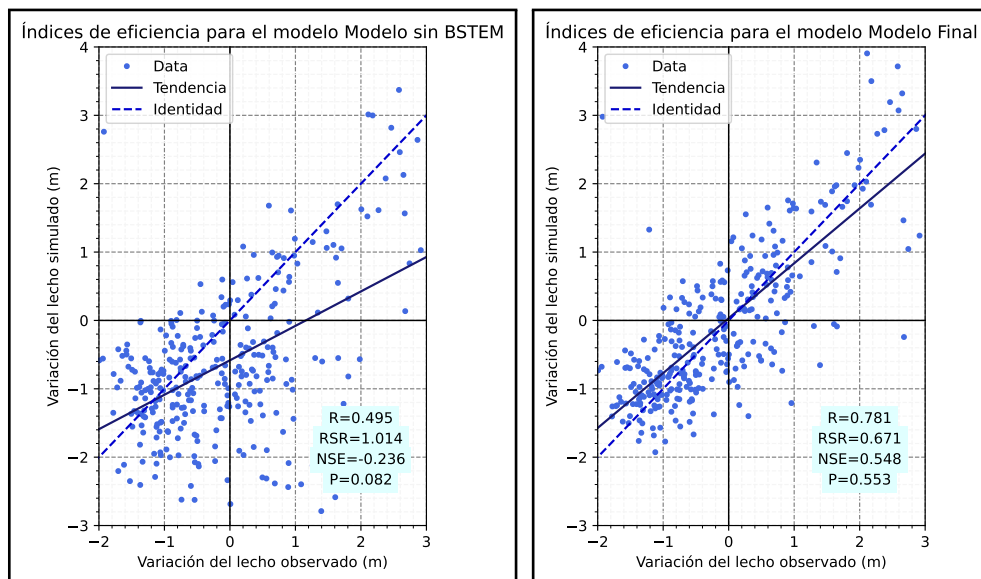
Fuente: Propia

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.4.1 Presentación de las variaciones medias del lecho modeladas

En esta sección se presentaron y compararon las variaciones medias del lecho modeladas (sin incluir e incluyendo erosión lateral) con los medidos en campo entre el mes de marzo y agosto. Para la estimación de la variación media del lecho fueron extraídas secciones cada 250 metros y para cada sección se calculó la variación promedio en la situación observada y simulada como se muestra en la sección 4.3, en el cual un valor positivo representó sedimentación y un valor negativo representó la erosión. Asimismo, se analizó los índices de desempeño globales a lo largo del tramo de estudio.

Una vez establecidos los modelos finales, se presenta el rendimiento en todo el tramo (desde la progresiva 00+00.0 Km hasta 80+410 Km) para el modelo sin erosión lateral en la Figura N° 4.14a y con erosión lateral en la Figura N° 4.14b, así como en el Tabla N° 4.10.



(a) Modelo final sin erosión lateral a lo largo de todo el tramo de estudio

(b) Modelo final con erosión lateral a lo largo de todo el tramo de estudio

FIGURA N° 4.14: Modelos de calibración final en todo el tramo. Fuente: propia

Los valores ideales para los índices de calibración utilizados son los siguientes: R es de 1, RSR es de 0, NSE es de 1 y P es de 1. Se concluyó a partir de los índices del Tabla N° 4.10, que el modelo calibrado al incluir erosión lateral BSTEM presentó una mejora significativa de los índices de calibración, los cuales fueron: $R=0.781$, $RSR=0.671$, $NSE=0.548$ y $P=0.553$, en comparación a los del modelo sin BSTEM, que eran: $R=0.495$, $RSR=1.014$, $NSE=-0.236$ y $P=0.082$, representando así una

TABLA N° 4.10: Índices de calibración de modelos finales en todo el tramo

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
Modelo sin BSTEM	0.495	1.014	-0.236	0.082
Modelo Final	0.781	0.671	0.548	0.553

Fuente: Propia

mejora promedio del 51.3 % respecto a una modelación 1D sin incluir erosión lateral.

4.4.2 Análisis de cambio de fondo de los modelos

En general en la Figura N° 4.15 se observó una similitud en las tendencias de las variaciones medias del cauce observadas con las del modelo final, para el análisis se dividió el tramo en la zona cuaternaria y terciaria para observar e interpretar los resultados.

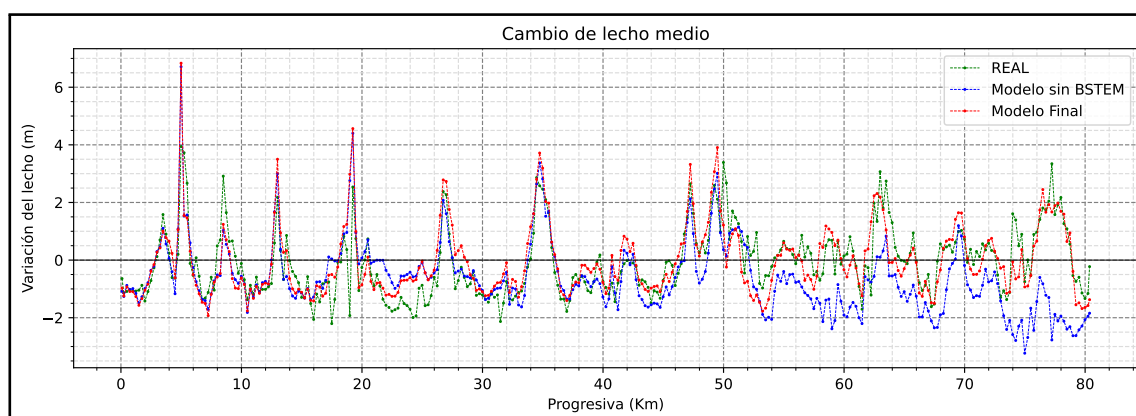


FIGURA N° 4.15: Variación media del lecho del modelo final en todo el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia

4.4.2.1 Análisis de cambio de fondo en la zona de geología de terciaria

La zona de geología terciaria abarca las progresivas desde la 0+00.0 Km hasta los 42+00.0 Km y fue la zona que tuvo un mejor rendimiento general del modelo, incluso antes de la inclusión de las ecuaciones para la erosión lateral.

En la Figura N° 4.16 se observó cómo tanto las tendencias como los órdenes de magnitud fueron representados en los modelos con erosión lateral como sin erosión lateral. En la misma figura se observó que para la situación observada se tuvo un cambio medio de lecho de -0.475 m, y cuyos valores variaron entre -2.204 y 3.942 metros. Para la situación modelada final se observó un cambio medio de lecho de -0.24 m, y unos valores que variaron entre -1.927 y 6.711 metros, también se observó una tendencia de menor sedimentación que en la situación real.

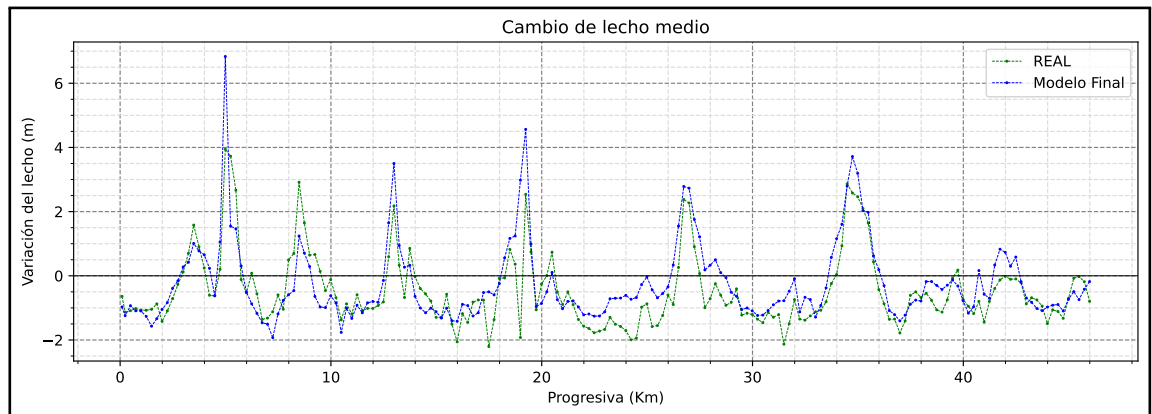


FIGURA N° 4.16: Variación media del lecho de los modelos finales en zona terciaria. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las secciones modeladas tanto sin considerar y considerando erosión lateral.

El modelo sin erosión lateral reprodujo los fenómenos de erosión y sedimentación distribuyendo los sedimentos de manera uniforme en el lecho móvil del área mojada, representó de mejor forma esta zona terciaria, en comparación a la zona cuaternaria que presentó una considerable erosión lateral, como se observó en la erosión de la sección 1+030 Km, Figura N° 4.17, o en promedio en las secciones 17+130 Km, Figura N° 4.18, y 37+010 Km, Figura N° 4.19.

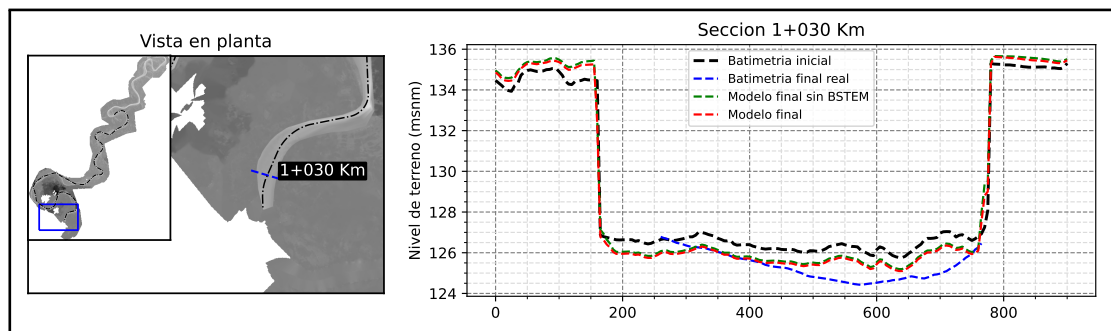


FIGURA N° 4.17: Resultados en la sección de progresiva 1+030 Km. Fuente: Elaboración propia

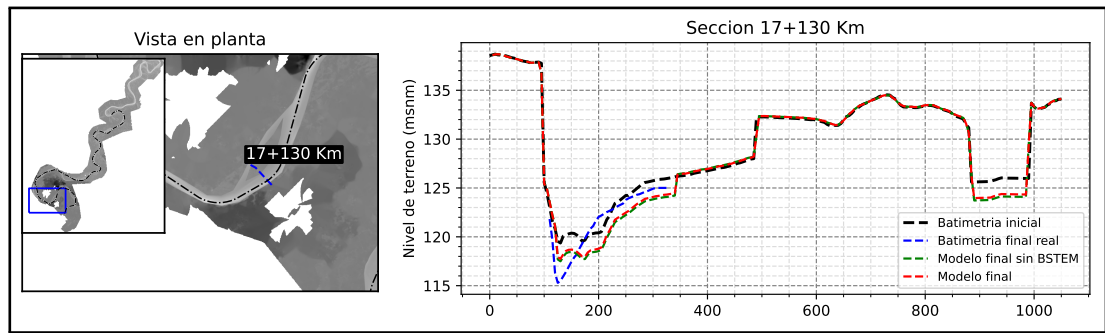


FIGURA N° 4.18: Resultados en la sección de progresiva 17+130 Km. Fuente: Elaboración propia

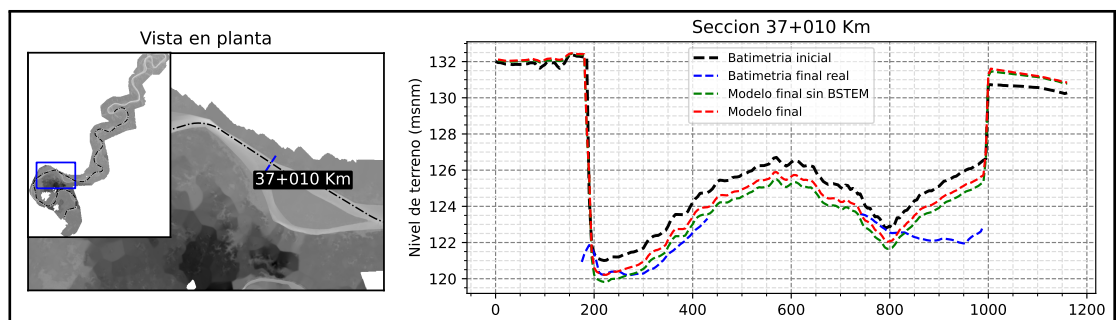


FIGURA N° 4.19: Resultados en la sección de progresiva 37+010 Km. Fuente: Elaboración propia

En la zona curva de esta área de geología terciaria se pudo observar, como se describió en la caracterización, una prácticamente nula erosión lateral y una representación de la realidad a partir del modelo. Por ejemplo, en la sección 33+230 Km, Figura N° 4.20.

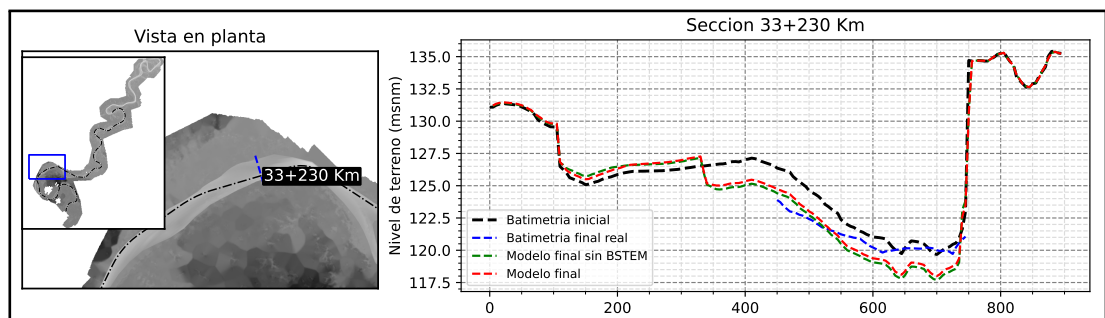


FIGURA N° 4.20: Resultados en la sección de progresiva 33+230 Km. Fuente: Elaboración propia

El modelo no representó los procesos de erosión y sedimentación de manera distribuida a lo largo de una sección debido a que, al ser un modelo 1D promedia los cambios a lo largo de la sección como se pudo observar en la sección 29+220 Km, Figura N° 4.21, en el cual a pesar de haber pequeñas áreas de erosión y sedimentación el modelo casi no se inmutó respecto a la situación original.

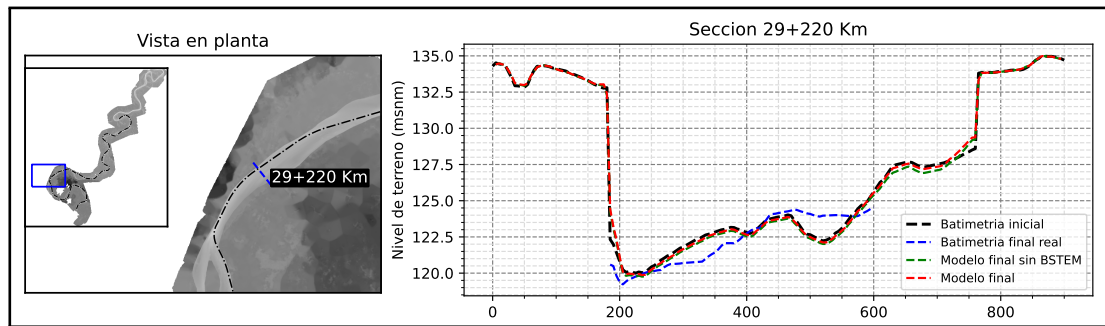


FIGURA N° 4.21: Resultados en la sección de progresiva 29+220 Km. Fuente: Elaboración propia

4.4.2.2 Análisis de cambio de fondo en la zona de geología de cuaternaria

La zona de geología cuaternaria abarca las progresivas desde la 42+00.0 Km hasta los 80+410.0 Km y fue la zona que tuvo rendimiento algo menor respecto a la zona terciaria, pero una mejora considerable con la inclusión de las ecuaciones de erosión lateral.

En la Figura N° 4.22 se observa como las tendencias se vieron representados en el modelo con erosión lateral, mas no en el modelo sin incluir erosión lateral. En la misma figura se observó que para la situación observada se tuvo un cambio medio de lecho de 0.417 m, y cuyos valores varían entre -1.705 y 3.389 metros. Para la situación modelada final se observó que el cambio medio de lecho de 0.216 m, con unos valores que varían entre -1.771 y 3.906 metros.

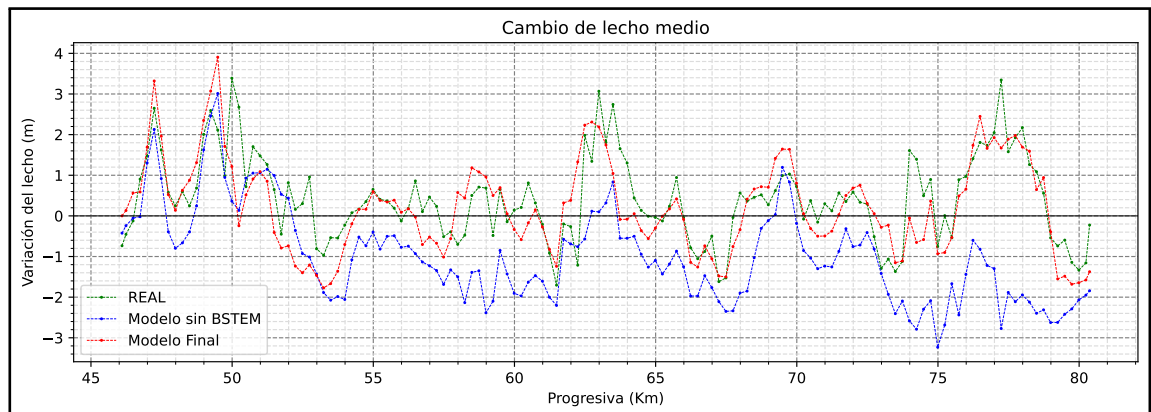


FIGURA N° 4.22: Variación media del lecho de los modelos finales en zona cuaternaria. Fuente: Elaboración propia

Para la zona cuaternaria se observó como la modelación sin incluir erosión lateral tendió a sobrestimar la erosión en el lecho, lo que se debería a un exceso de capacidad de transporte al no contar el material erosionado, una vez que se incluyen las variables BSTEM para el cálculo de erosión laterales se observó una mejora en los índices de calibración y en la representación de los cambios medios del lecho.

A diferencia del modelo simple, el cambio de lecho modelado con erosión lateral ya no fue tan uniforme al contar ahora con erosiones en banco externo de las curvas. En las secciones 53+030 Km, Figura N° 4.23, o 67+140 Km, Figura N° 4.24, se observa una disminución de la erosión, del modelo final respecto al modelo sin incluir erosión lateral, asemejándose más a la realidad, así como pequeñas erosiones laterales coincidentes con la batimetría medida y la curvatura presente en la sección la cual no fue excesivamente cerrada.

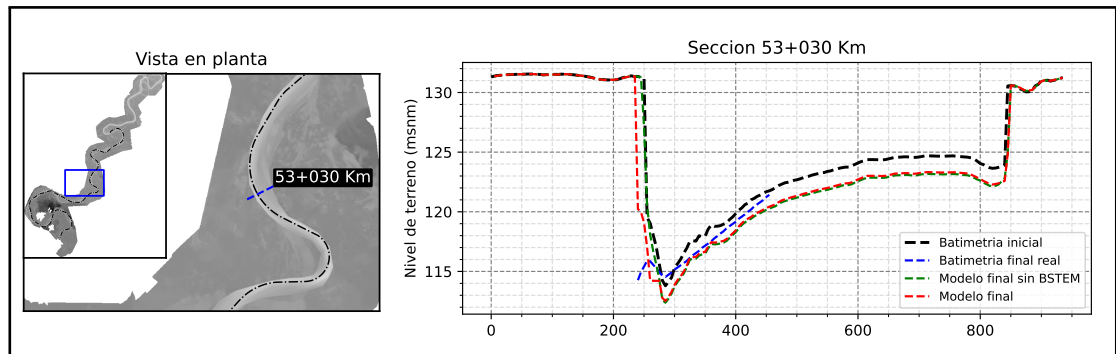


FIGURA N° 4.23: Resultados en la sección de progresiva 53+030 Km. Fuente: Elaboración propia

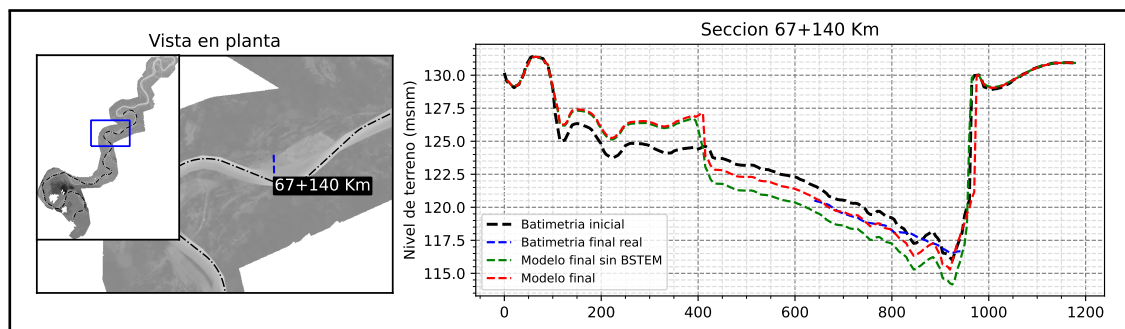


FIGURA N° 4.24: Resultados en la sección de progresiva 67+140 Km. Fuente: Elaboración propia

En la sección 49+420 Km, Figura N° 4.25, se observa un aumento en la sedimentación, del modelo final respecto al modelo sin incluir erosión lateral, asemejándose más a la realidad.

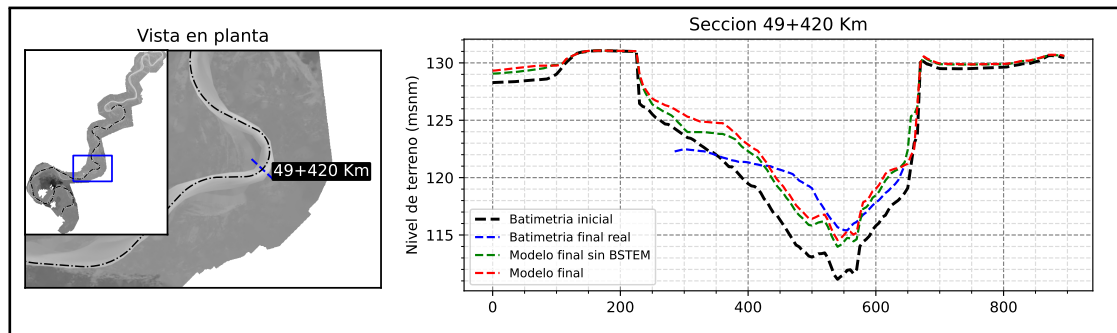


FIGURA N° 4.25: Resultados en la sección de progresiva 49+420 Km. Fuente: Elaboración propia

En las secciones 58+340 Km, Figura N° 4.26, 76+200 Km, Figura N° 4.27, y 78+330 Km, Figura N° 4.28, se observa una mejora considerable del modelo final, donde los procesos pasan de erosión a sedimentación al incluir los efectos de erosión lateral asemejándose más a la realidad, así como una erosión lateral coherente comparada con la batimetría medida del mes de agosto.

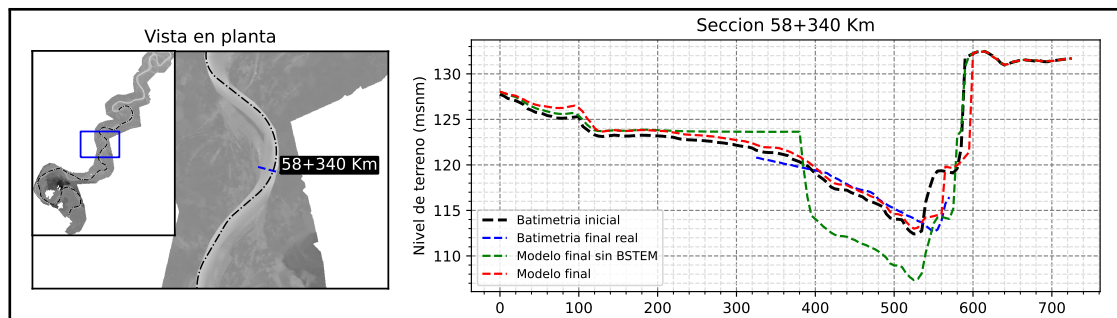


FIGURA N° 4.26: Resultados en la sección de progresiva 58+340 Km. Fuente: Elaboración propia

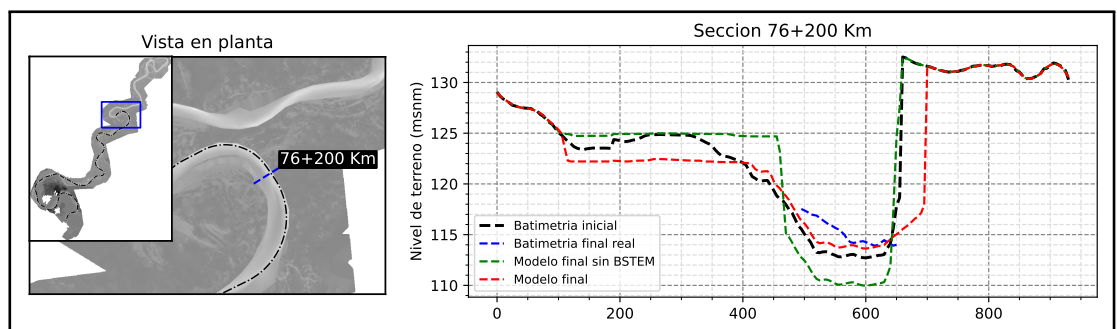


FIGURA N° 4.27: Resultados en la sección de progresiva 76+200 Km. Fuente: Elaboración propia

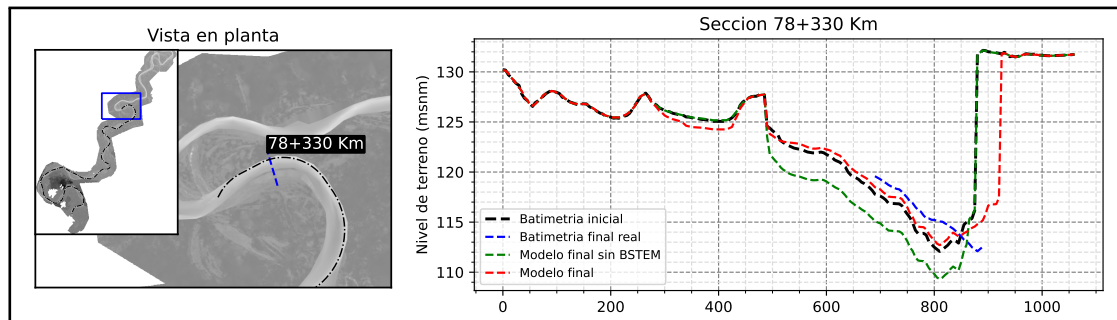


FIGURA N° 4.28: Resultados en la sección de progresiva 78+330 Km. Fuente: Elaboración propia

En el ANEXO VII: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN, se presentan los resultados ordenados de una serie de secciones modeladas.

4.4.3 Evaluación de las variaciones en los volúmenes de sedimentos erosionados y/o sedimentados

En esta sección se compararán las variaciones de volumen de sedimentos transportados en secciones cada 250 metros en el área de batimetría levantada entre los medidos en los meses de marzo a agosto, y los obtenidos mediante la modelación matemática incluyendo erosión lateral para el mismo periodo. Se observó del análisis una similitud general entre el volumen de sedimentos medido y modelado. Para la estimación del volumen transportado real se calculó la diferencia de volúmenes entre las batimetrías del mes de agosto y setiembre donde un valor positivo representó una sección donde predomina la sedimentación y un valor negativo, una sección donde predomina la erosión. En la figura Figura N° 4.29 se presenta la comparación de volúmenes observados y modelados con y sin incluir erosión lateral.

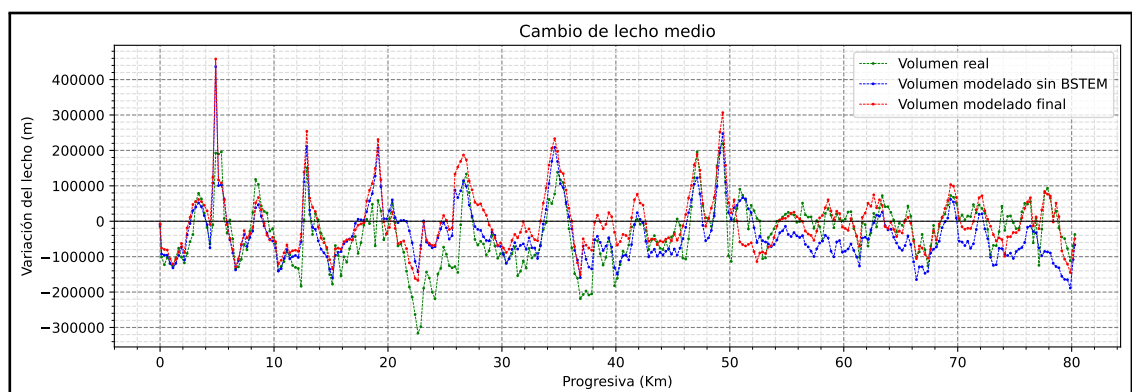


FIGURA N° 4.29: Volúmenes de sedimentos modelados a través del tramo. Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo que en la sección 4.3 se calcularon los índices de desempeño

globales a lo largo de todo el tramo de estudio, los cuales se presentan en el Tabla N° 4.11.

TABLA N° 4.11: Sensibilidad por Volúmenes modelados

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
Volumen modelado sin BSTEM	0.634	0.821	0.324	0.379
Volumen modelado final	0.7	0.76	0.295	0.412

Fuente: Propia

Los valores ideales para los índices de calibración utilizados son los siguientes: R es de 1, RSR es de 0, NSE es de 1 y P es de 1. Al igual que para el cambio medio del lecho se observó una mejora significativa de los índices de calibración del modelo al incluir erosión lateral BSTEM, los cuales fueron: $R=0.700$, $RSR=0.760$, $NSE=0.295$ y $P=0.412$, en comparación a los del modelo sin BSTEM, que fueron: $R=0.634$, $RSR=0.821$, $NSE=0.324$ y $P=0.379$, representando así una mejora promedio del 5.3% en el rendimiento general del modelo.

Al comparar el volumen sedimentado, se observó una representación adecuada tanto en las tendencias como en los órdenes de magnitud a lo largo de todo el tramo.

Al comparar el volumen erosionado, se observó que el modelo final presentó una menor erosión desde la progresiva 21+500 Km hasta la 47+00 Km, lo que generó una disminución del volumen de sedimentos transportados total acumulado de 1067601.08 m³ respecto a lo medido en campo.

A lo largo de todo el tramo de estudio se midió un volumen total erosionado de 16729317.58 m³ y sedimentado de 5777481.4 m³, mientras que para el modelo final se calculó un volumen erosionado de 17332777.83 m³ y sedimentado de 5313340.543 m³, lo que representó un error de 3.6% y 8.0% respectivamente.

4.4.4 Validación de resultados de erosión lateral

Para finalizar se realizó una comparación de los órdenes de magnitud de la erosión lateral vista en planta a partir de imágenes satelitales para los meses de marzo y agosto de 2018, como se muestra en Figura N° 4.30

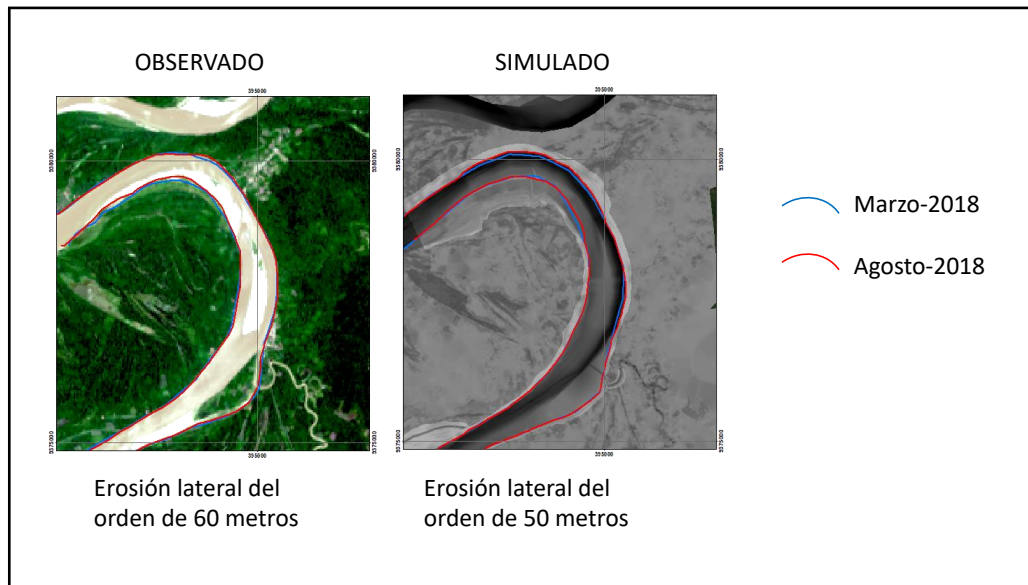


FIGURA N° 4.30: Erosión lateral observada y modelada entre marzo y agosto de 2018. Fuente: Elaboración propia

De estos resultados se concluyó que para la situación observada se obtuvo erosiones laterales del orden de 60 metros, comparadas con los modelados que estuvieron en el orden de 45 metros, por lo que se concluyó que el modelo está subestimando las erosiones laterales con un error del 25 %.

CONCLUSIONES

De la caracterización física:

La cuenca del río Huallaga hasta la estación Yurimaguas cuenta con una extensión 77139.8 Km², y para el periodo modelado (1984-2020) el caudal medio diario fue de 2956.8 m³/s.

El tramo de estudio, de 80.3 km de longitud, presenta 2 zonas claramente diferenciadas desde el punto de vista geológico; la primera zona se presenta desde la progresiva 0+00 Km y 42+00 Km en la cual se observó la presencia de depósitos de geología terciaria resistentes a la erosión como la formación Ipururo (Nmp-i) o la formación Chambira (PN-ch). La segunda zona se presenta desde la progresiva 42+00 Km y 80+331.6 Km en la cual se observó la presencia de depósitos de geología cuaternaria aluviales recientes (Qh-al) y antiguos (Qp-al) con escasa resistencia a la erosión.

La zona de estudio presentó un grano medio general de 0.285 mm, que correspondió principalmente a un grano arenoso, con muestras tomadas cuyos D50 variaron desde 0.242 hasta 0.328 mm.

De la caracterización de los procesos de erosión y sedimentación vertical:

En la zona geológica terciaria se observó un cambio de lecho medio de -0.46 metros y variaciones desde -2.37 m a 4.17 m entre los meses de marzo y agosto de 2018.

En la zona geológica cuaternaria se observó un cambio de lecho medio de +0.42 metros y variaciones desde -2.36 m a 3.44 m entre los meses de marzo y agosto de 2018.

En la zona geológica cuaternaria se observó que prevalecen los procesos de sedimentación mientras que, en la zona geológica terciaria, los de erosión.

De la caracterización de los procesos de erosión lateral:

El tramo de estudio contó con una sinuosidad media para el periodo de la caracterización (1984-2023) de 2.14, mientras que para la zona geológica terciaria y cuaternaria fue de 3.99 y 1.16 respectivamente.

En el año 2020 se presentó un corte meándrico en una de las curvas del tramo de geología cuaternaria, lo que se puede comprobar en la caída abrupta de la sinuosidad media en el año 2020 (de 1.73 a 1.49).

A partir de la evolución histórica (1984-2022) de la migración lateral para la zona geológica terciaria (progresivas desde la 0+00 Km hasta los 42+00 Km), se tuvo una migración promedio de 22.1 m/año, una migración mínima 8.5 m/año para el año 1984 y máxima de 36.0 m/año para el año 1996.

A partir de la evolución histórica (1984-2022) de la migración lateral para la zona geológica cuaternaria (progresivas desde la 42+00 Km hasta la 80+00 Km), se tuvo una migración promedio de 49.0 m/año, una migración mínima 19.38 m/año para el año 1984 y máxima de 84.0 m/año para el año 2003.

A partir del análisis de imágenes satelitales para el año 2018 se observó un aumento de la migración absoluta promedio entre la zona de geología terciaria y cuaternaria de 13.4 m/año a 33.6 m/año respectivamente.

Del modelamiento de los procesos de erosión y sedimentación:

Sin Tomar en Cuenta los Efectos de la Erosión Lateral:

La modelación del tramo total, sin tomar en cuenta los efectos de la erosión lateral arrojó buenos resultados en el tramo de geología terciaria, pero no tan buenos resultados en el tramo de geología cuaternaria. Siendo los valores ideales para los índices de calibración utilizados de $R = 1$, $RSR = 0$, $NSE = 1$ y $P = 1$, para el tramo de geología terciaria se obtuvieron los valores de $R=0.774$, $RSR=0.681$, $NSE=0.526$ y $P = 0.540$, y para el tramo de geología cuaternaria se obtuvieron los valores de $R=0.498$, $RSR=1.059$, $NSE=-1.91$ y $P=-0.490$. Los valores de los índices para la totalidad del tramo fueron de $R=0.495$, $RSR=1.014$, $NSE=-0.236$ y $P = 0.082$.

La calibración se realizó afectando por un factor de 0.4 el sedimentograma de ingreso calculado como la capacidad de transporte sólido al inicio de tramo del río Huallaga, además de aumentar la capacidad de transporte por 1.3.

Tomando en Cuenta los Efectos de la Erosión Lateral:

Considerando los efectos de la erosión lateral, se mejoró la calidad de los resultados en el tramo de geología cuaternaria. Para el tramo de geología terciaria se obtuvieron los valores de $R=0.805$, $RSR=0.659$, $NSE=0.520$ y $P=0.555$ y para el tramo de geología cuaternaria se obtuvieron los valores de $R=0.744$, $RSR=0.749$, $NSE=0.405$ y $P=0.467$. Los valores de los índices para la totalidad del tramo fueron de $R=0.781$, $RSR=0.671$, $NSE=0.548$ y $P=0.553$, representando así una mejora promedio del 51.3% respecto a una modelación 1D sin incluir erosión lateral.

La calibración se realizó caracterizando los taludes del tramo de geología cuaternaria con un ángulo de fricción de 31° , una cohesión de 0.5 KPa, un esfuerzo crítico de 0.6 Pa y una erosionabilidad es de 6×10^{-7} m³/N-s. Además, se mantuvo el sedimentograma de ingreso y el aumento en la capacidad de transporte utilizado en la modelación sin erosión lateral.

En la zona de geología terciaria el modelamiento arrojó un cambio medio del lecho de -0.24 m, y unos valores que variaron entre -1.927 y 6.711 metros, Estos valores son cercanos a los observados donde se obtuvo un cambio medio del lecho de

-0.475 m, con valores que variaron entre -2.204 y 3.942 m.

En la zona de geología cuaternaria el modelamiento arrojó un cambio medio del lecho de 0.216 m, con unos valores que variaron entre -1.771 y 3.906 metros. Estos valores son cercanos a los observados donde se obtuvo un cambio medio del lecho de 0.417 m, con valores que variaron entre -1.705 y 3.389 metros.

Al comparar el volumen sedimentado, se observó una representación adecuada tanto en las tendencias como en los órdenes de magnitud a lo largo de todo el tramo. A lo largo de todo el tramo de estudio se midió un volumen total erosionado de 16729317.58 m³ y sedimentado de 5777481.4 m³, mientras que para el modelo final se calculó un volumen erosionado de 17332777.83 m³ y sedimentado de 5313340.543 m³, representando así un error de 3.6% y 8.0% respectivamente.

A partir de imágenes satelitales para los meses de marzo y agosto de 2018 se obtuvo erosiones laterales del orden de 60 metros, comparadas con los modelados que estuvieron en el orden de 45 metros, por lo que se concluye que el modelo subestimó las erosiones laterales con un error del 25%.

RECOMENDACIONES

A fin de mejorar la caracterización de los procesos de erosión lateral y de sedimentación y erosión vertical en el tramo estudiado y en otros ríos de la selva se recomienda:

Realizar levantamientos batimétricos periódicos que permitan observar cambios estacionales y anuales en la morfología fluvial. Realizar programas de caracterización de las propiedades geotécnicas del material de fondo y de los bancos. Uso de tecnologías de teledetección más avanzadas para una recolección de datos más precisa.

A fin de mejorar el nivel predictivo de los modelos de predicción de procesos de erosión lateral y de sedimentación y erosión vertical en el tramo estudiado y en otros ríos de la selva se recomienda:

Realizar calibraciones similares para otros periodos con disponibilidad de información.

Evaluar el nivel predictivo de los modelos realizando el contraste con información correspondiente periodos posteriores.

Implementar programas de monitoreo de transporte de sedimentos a corto, mediano y largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

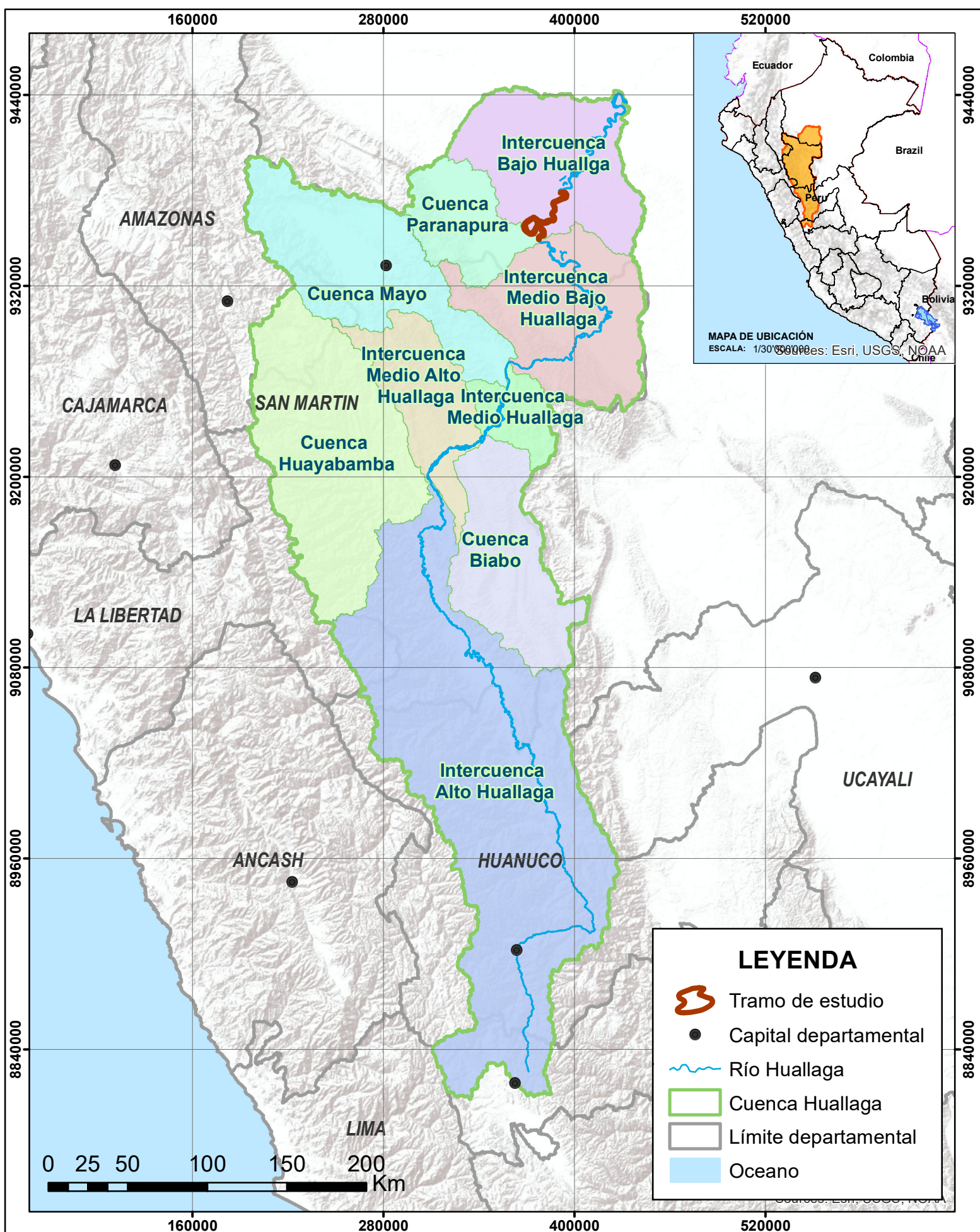
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Observatorio nacional de recursos hídricos (ONRH). Aplicativo informativo. ANA*. <https://snirh.ana.gob.pe/onrh/Index2.aspx>
- Barsi, J. A., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B. L., y Pedelty, J. A. (2014). The spectral response of the landsat-8 operational land imager. *Remote Sensing*, 6, 10232-10251. doi: 10.3390/rs61010232
- Brunner, G. (2016, 2). *Hec-ras river analysis system hydraulic reference manual*. Hydrologic Engineering Center. www.hec.usace.army.mil
- Campaña, R., Collarani, F., Nuñez, S., y Reyes, M. (en preparación). *Simulación de flujos diarios y mensuales en la cuenca baja del río huallaga empleando el modelo swat*.
- Carvajal, L. Y. (2022). *Modelación morfodinámica de un cauce trenzado en colombia (río cusiana)*. [Tesis de maestría, Universidad La Salle]. Repositorio UNISALLE. <https://hdl.handle.net/20.500.14625/351>
- Cusipuma, M.(2020). *Simulación numérica de la dinámica del flujo secundario helicoidal y del transporte de sedimentos en el modelo hidráulico de río madre de dios-tramo pastora*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. UNMSM-Tesis. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/15657>
- Gao, P., Li, Z., y Yang, H. (2021, 9). Variable discharges control composite bank erosion in zoige meandering rivers. *Catena*, 204. doi: 10.1016/j.catena.2021.105384
- García, C. C. (1992, 1). Trazados de baja y alta sinuosidad en rios espanoles. *Papeles de geografía*, 18, 9-29.
- Guerrero, L., Marín, J., Estrada, Y., Henry, T., Valverde, H., y Barreto, D. (2021). Case study of the huallaga river. En A. F. Militza (Ed.), (p. 324-340). Centro de Investigación y Tecnología del Agua CITA-UTEC.
- HEC. (2022). *Hec-ras 1d sediment transport 1d sediment transport user's manual-1*.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (2018). *Mapa geológico del Perú. [Mapa]*. INGEMMET. <https://portal.ingemmet.gob.pe/web/guest/mapa-geologico-nacional>
- Lai, Y. G., Thomas, R. E., Ozeren, Y., Simon, A., Greimann, B. P., y Wu, K. (2015, 8). Modeling of multilayer cohesive bank erosion with a coupled bank stability and mobile-bed model. *Geomorphology*, 243, 116-129. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.07.017
- Latrubesse, E. M., Arima, E. Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V. R., D'Horta, F. M., ... Stevaux, J. C. (2017, 6). Damming the rivers of the amazon basin. *Nature*, 546, 363-369. doi: 10.1038/nature22333

- Monegaglia, F., Zolezzi, G., Güneralp, I., Henshaw, A. J., y Tubino, M. (2018, 7). Automated extraction of meandering river morphodynamics from multitemporal remotely sensed data. *Environmental Modelling and Software*, 105, 171-186. doi: 10.1016/j.envsoft.2018.03.028
- MTC. (2018). *Estudio de impacto ambiental detallado del proyecto "hidrovía amazónica: Ríos marañón y Amazonas, tramos saramirizia-iquitos-santa rosa; río Huallaga, tramo Yurimaguas-confluencia con el río marañón; río Ucayali, tramo Pucallpa-confluencia con el río marañón"*.
- Parker, G. (2004). Generalized exner equation for the conservation of sediment mixtures.. (Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000 ; Conference date: 30-07-2000 Through 02-08-2000) doi: 10.1061/40517(2000)295
- Ramos, R. B., y Alva, M. E. (2020, 8). Análisis geomorfológico y dinámica fluvial del río Huallaga en la localidad de Yurimaguas. *Investigaciones Sociales*, 23, 71-85. doi: 10.15381/is.v23i43.18487
- Reyes, M. V. (2023). *Modelamiento fluviomorfológico bidimensional de procesos de sedimentación y erosión vertical de malos pasos en el tramo bajo del río Huallaga*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional De Ingeniería.
- Rhoads, B. (2020). *River Dynamics: geomorphology to support management*. Cambridge University Press .
- Rocha, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial* (Primera Edición ed.). Universidad Nacional de Ingeniería. <https://www.researchgate.net/publication/315829253>
- Semmad, S., Jotisankasa, A., Mahannopkul, K., y Inazumi, S. (2022). A coupled simulation of lateral erosion, unsaturated seepage and bank instability due to prolonged high flow. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 32, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100301>
- Simon, A., Thomas, R., Curini, A., y Bankhead, N. (2016). *Bank-stability and toe-erosion model*. <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5044>
- Solorzano, B. F. (2013). *Procesos fluviomorfológicos de relevancia en el río Tahuamanu en el ámbito del puente Tahuamanu*. [Tesis de presgrado]. Universidad Nacional De Ingeniería.
- United States Geological Survey. (2023). *USGS global visualization viewer* (GloVis). [Aplicativo informático]. USGS. <https://glovis.usgs.gov/>

ANEXOS

Anexo I: Mapas	91
Anexo II: Caudales modelados	97
Anexo III: Información granulométrica	102
Anexo IV: Batimetría y cambio de lecho	108
Anexo V: Evolución del eje central	134
Anexo VI: Calibración de los modelos	144
Anexo VII: Resultados de la modelación	180

ANEXO I: MAPAS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO:
UNIDADES HIDROGRÁFICAS DE
LA CUENCA DE ESTUDIO

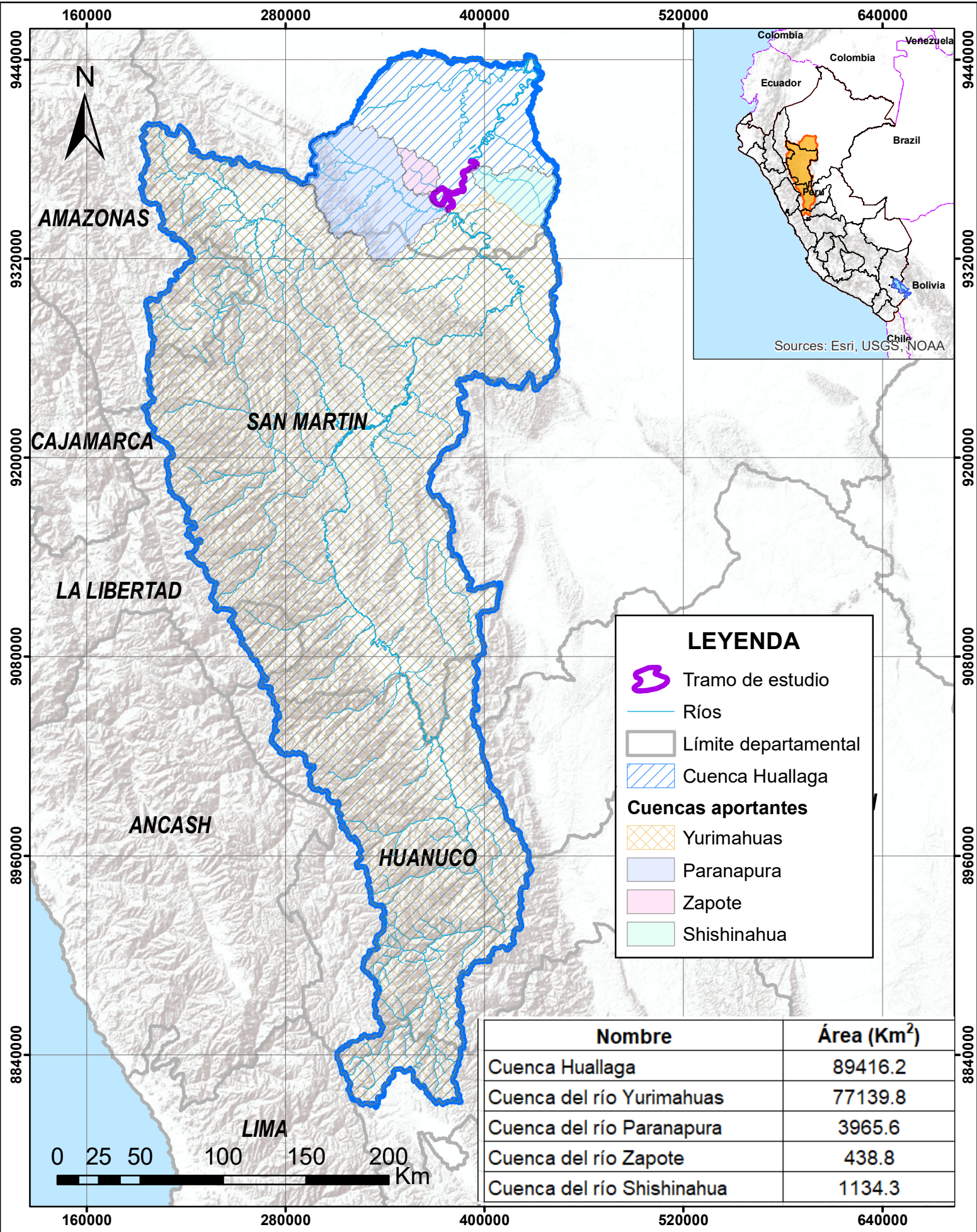
TESISTA:
Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/3'000'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

I.1



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

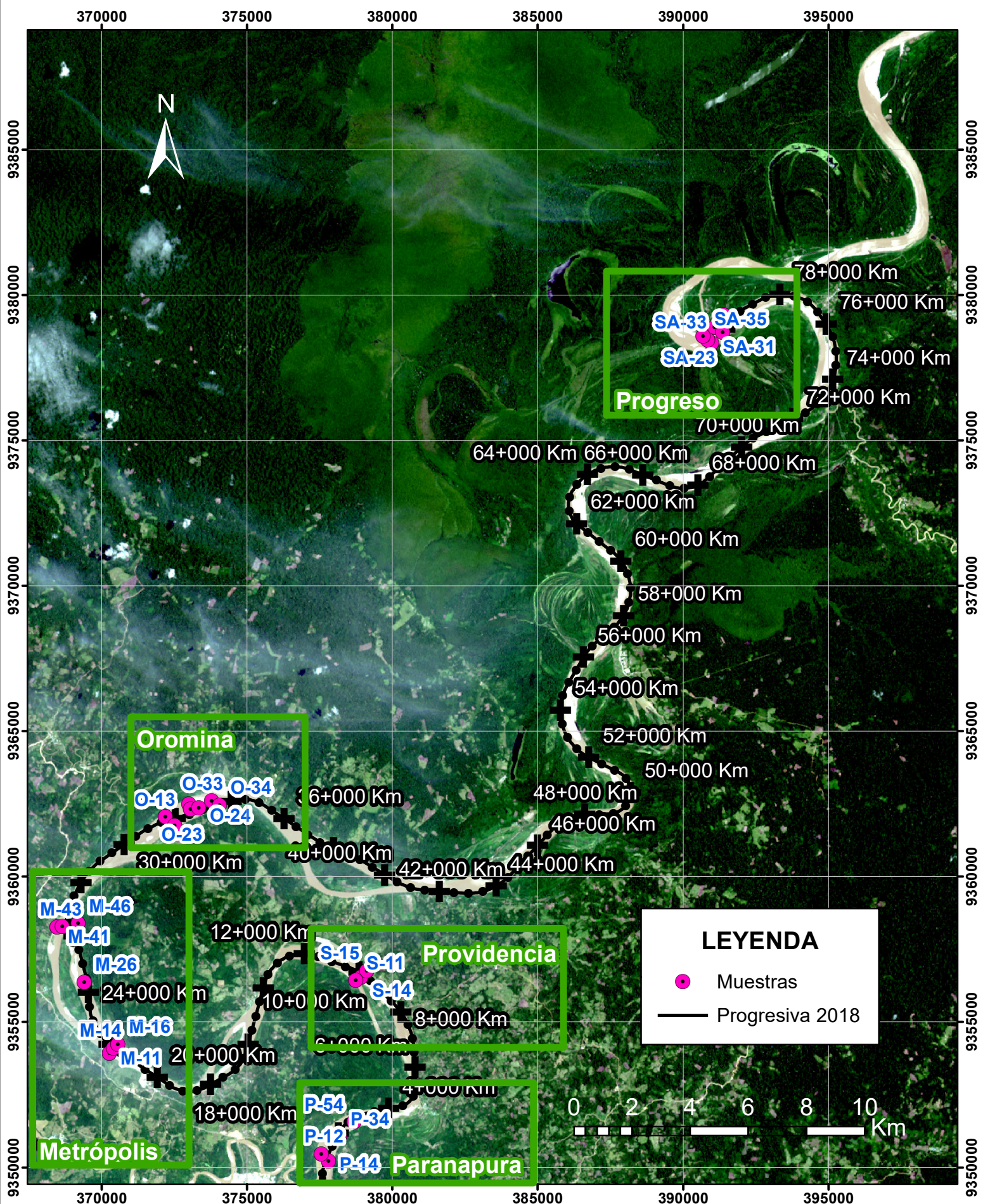
TÍTULO:
CUENCAS APORTANTES EN
EL TRAMO DE ESTUDIO

TESISTA:
Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/3'000'000 y 1/30'000'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

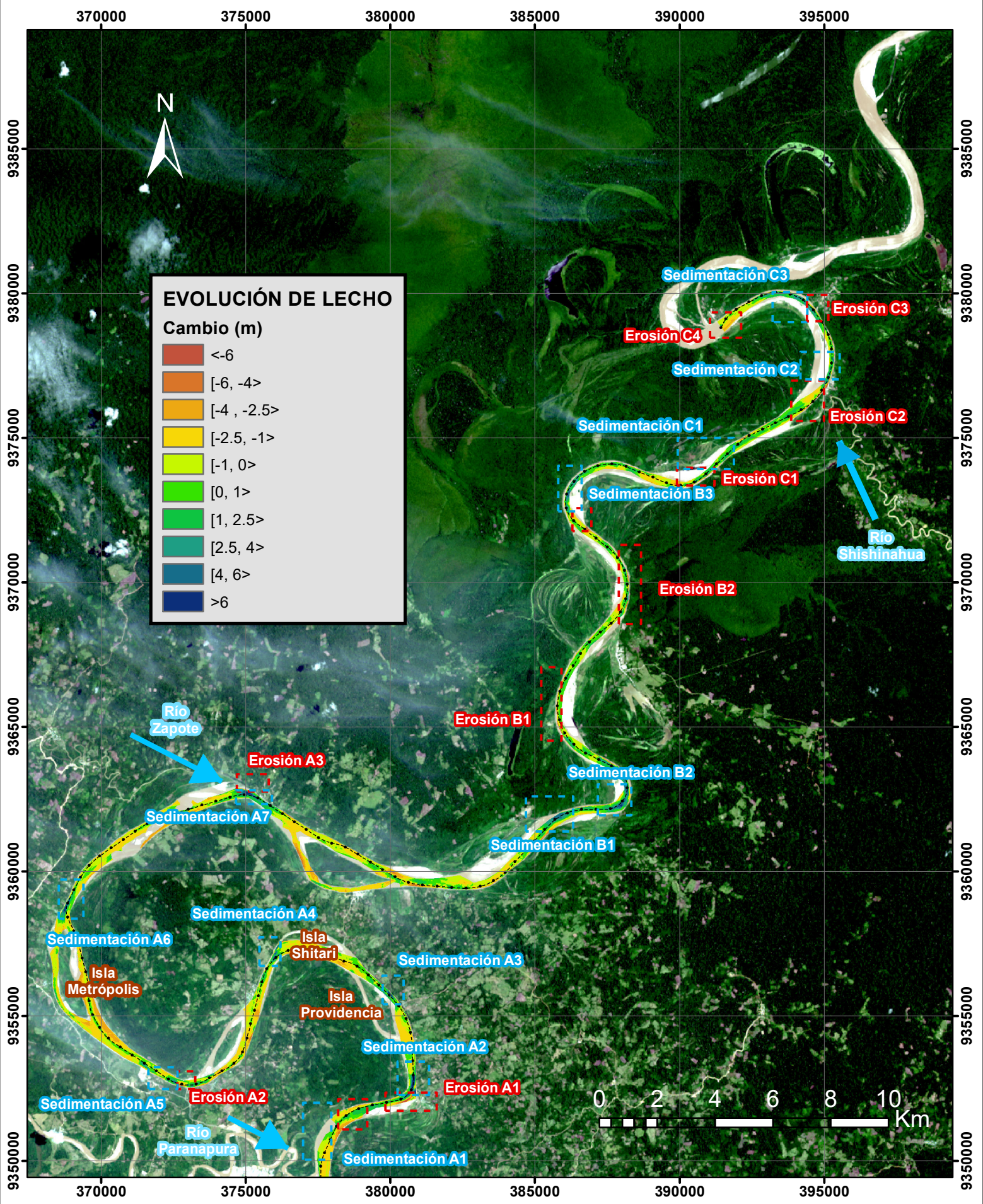
MAPA N°:
I.2



LEYENDA

● Muestras

— Progresiva 2018



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO:
CAMBIO DE LECHO E
IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS

TESISTA:
Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA:
1/1'165'000

DATUM:
WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:
1.5

ANEXO II: CAUDALES MODELADOS

ANEXO II.1

TESIS: "MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE"

Caudal diario modelado para el año 2018- Cuenca del Río Huallaga en la Estación Yurimaguas (m³/s)

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1	3493.0	4346.0	5840.0	6977.0	3867.0	2136.0	1399.0	1194.0	1223.0	1219.0	1858.0	2695.0
2	4229.0	4452.0	6025.0	4890.0	3253.0	2048.0	1522.0	1218.0	1138.0	1332.0	2889.0	2984.0
3	4095.0	5995.0	5700.0	5132.0	3226.0	2117.0	1352.0	1258.0	1245.0	1238.0	2134.0	2844.0
4	4103.0	5055.0	5318.0	4949.0	3239.0	1896.0	1438.0	1294.0	1280.0	1714.0	2534.0	2997.0
5	4196.0	5730.0	5360.0	5571.0	3643.0	1934.0	1562.0	1327.0	1130.0	1422.0	2723.0	3562.0
6	3933.0	5654.0	6203.0	5264.0	3289.0	2001.0	1498.0	1490.0	1155.0	1309.0	2655.0	4512.0
7	4256.0	5576.0	5655.0	4589.0	3623.0	1932.0	1449.0	1333.0	1164.0	1718.0	2809.0	3880.0
8	4269.0	4785.0	5704.0	5016.0	3264.0	1929.0	1491.0	1470.0	1235.0	1412.0	2549.0	3755.0
9	5350.0	5091.0	5826.0	5290.0	3182.0	1910.0	1415.0	1370.0	1205.0	1630.0	2897.0	3390.0
10	4178.0	5751.0	5166.0	4959.0	3141.0	1817.0	1519.0	1355.0	1178.0	1646.0	2530.0	3048.0
11	4297.0	5474.0	5367.0	5299.0	3157.0	1767.0	1442.0	1310.0	1155.0	1889.0	3234.0	3689.0
12	4198.0	5514.0	5932.0	5470.0	3145.0	1824.0	1478.0	1242.0	1160.0	1698.0	2618.0	3519.0
13	3848.0	5396.0	6062.0	4830.0	3009.0	1808.0	1348.0	1299.0	1138.0	1832.0	3405.0	3237.0
14	3898.0	6350.0	5914.0	5002.0	2748.0	1817.0	1318.0	1312.0	1194.0	1764.0	2545.0	2869.0
15	4396.0	5691.0	5397.0	4660.0	2738.0	1756.0	1420.0	1441.0	1599.0	1612.0	3093.0	3463.0
16	4134.0	6017.0	5755.0	5368.0	2936.0	1812.0	1378.0	1170.0	1325.0	1769.0	2921.0	3932.0
17	4810.0	5447.0	6383.0	4749.0	2855.0	1652.0	1439.0	1222.0	1226.0	1622.0	2517.0	3402.0
18	4965.0	5881.0	5387.0	4663.0	2724.0	1673.0	1388.0	1226.0	1205.0	1846.0	3025.0	4247.0
19	3855.0	5855.0	5910.0	4682.0	2652.0	1632.0	1404.0	1257.0	1272.0	1691.0	2600.0	3745.0
20	4623.0	5584.0	5843.0	4828.0	2787.0	1559.0	1376.0	1216.0	1230.0	1689.0	2760.0	3604.0
21	4003.0	5356.0	6118.0	4414.0	2711.0	1718.0	2208.0	1436.0	1183.0	1597.0	2865.0	3379.0
22	4156.0	5476.0	6022.0	4319.0	2657.0	1611.0	1340.0	1244.0	1204.0	1741.0	2709.0	3480.0
23	4535.0	5357.0	5308.0	4376.0	2501.0	1622.0	1287.0	1328.0	1362.0	1737.0	3330.0	3926.0
24	4173.0	5614.0	5678.0	4272.0	2400.0	1395.0	1249.0	1283.0	1287.0	2441.0	2713.0	3591.0
25	4361.0	6605.0	5930.0	4011.0	2409.0	1388.0	1237.0	1266.0	1281.0	2095.0	2796.0	4021.0
26	3983.0	5639.0	7111.0	4302.0	2417.0	1326.0	1124.0	1331.0	1347.0	2184.0	3262.0	3736.0
27	4106.0	5758.0	5737.0	4290.0	2469.0	1460.0	1334.0	867.8	1258.0	1836.0	3083.0	3473.0
28	4469.0	5267.0	5560.0	4182.0	2285.0	1551.0	1258.0	1073.0	1154.0	1871.0	3447.0	3697.0
29	5209.0		5651.0	4042.0	1886.0	1385.0	1135.0	1145.0	1217.0	1796.0	3049.0	3682.0
30	4469.0		6769.0	5011.0	1970.0	1378.0	1211.0	1233.0	1243.0	1898.0	3261.0	3370.0
31	4655.0		6445.0		2370.0		1221.0	1174.0		1826.0		4672.0
Promedio	4,298.2	5,525.6	5,841.2	4,846.9	2,856.5	1,728.5	1,394.8	1,270.5	1,233.1	1,712.1	2,827.0	3,561.3
Máximo	5,350.0	6,605.0	7,111.0	6,977.0	3,867.0	2,136.0	2,208.0	1,490.0	1,599.0	2,441.0	3,447.0	4,672.0
Mínimo	3,493.0	4,346.0	5,166.0	4,011.0	1,886.0	1,326.0	1,124.0	867.8	1,130.0	1,219.0	1,858.0	2,695.0

Fuente: Estudio de cambio climático en la cuenca del huallaga (Campaña et al, en preparación).

Elaboración propia

ANEXO II.2

TESIS: "MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE"

Caudal diario modelado para el año 2018 - Cuenca del río Paranapura (m³/s)

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1	149.50	246.10	352.00	310.90	179.70	72.94	43.93	47.77	28.17	47.61	74.65	135.00
2	134.80	239.70	305.80	263.60	168.50	66.31	37.73	29.34	30.47	45.29	81.31	126.30
3	119.50	295.50	326.60	261.00	175.30	66.59	41.31	39.42	28.22	53.07	126.80	138.70
4	168.60	323.40	331.20	301.00	161.60	53.65	43.36	29.62	27.26	45.39	82.25	116.30
5	130.60	270.60	295.60	249.60	159.70	60.23	47.74	27.52	31.85	46.04	150.60	176.20
6	112.10	262.70	291.00	269.10	162.70	62.37	44.16	31.25	28.48	44.41	162.90	118.90
7	112.30	252.10	310.70	244.70	155.90	63.23	42.93	30.02	28.17	42.33	143.80	126.80
8	170.40	303.90	303.30	266.10	163.80	64.44	42.35	29.54	27.77	42.57	245.90	112.60
9	182.50	254.40	357.10	236.40	152.40	72.02	41.12	25.92	27.67	48.27	145.90	241.10
10	127.40	259.15	320.50	238.10	142.25	62.31	40.78	24.21	29.15	42.38	185.20	140.60
11	160.40	241.90	298.60	227.20	138.45	61.63	37.36	37.43	24.34	61.67	147.00	132.20
12	209.70	214.40	301.00	218.90	120.70	59.74	50.97	29.06	22.05	47.22	150.80	129.50
13	154.10	229.40	286.40	206.15	124.50	58.17	36.50	27.12	22.15	48.33	148.90	145.40
14	147.90	254.40	291.80	213.90	128.80	55.00	36.01	34.82	26.58	40.70	140.80	139.30
15	156.70	242.30	291.40	185.10	127.70	53.30	34.75	30.87	22.94	45.29	145.50	145.80
16	145.60	247.20	319.60	208.90	125.80	56.73	34.21	26.73	35.67	34.18	158.00	180.60
17	191.70	242.70	289.70	197.50	120.00	50.87	32.69	28.24	29.99	42.25	128.10	204.70
18	314.50	293.70	347.40	207.90	116.30	50.65	38.69	43.57	28.96	41.67	162.00	153.50
19	217.10	294.40	288.00	199.70	114.50	47.86	30.71	30.90	51.04	63.18	159.00	343.40
20	193.50	288.70	315.20	245.50	108.00	46.48	29.53	31.22	34.48	51.84	142.20	222.80
21	210.00	269.10	306.50	201.30	102.90	44.93	29.05	30.06	50.78	55.39	131.50	203.10
22	189.80	233.00	307.10	196.30	98.86	53.05	26.79	47.74	38.37	48.37	136.00	198.30
23	224.00	327.70	306.40	205.00	94.91	49.22	24.82	32.75	37.53	101.10	119.80	191.80
24	190.30	299.50	283.00	196.30	92.90	45.96	27.04	32.95	39.43	64.53	117.40	234.00
25	186.30	431.40	286.50	184.70	89.91	46.01	20.58	31.38	38.91	69.12	104.15	186.50
26	193.10	330.70	275.20	176.80	86.77	55.03	27.28	35.89	39.51	61.87	133.85	204.70
27	347.50	293.90	305.90	190.50	93.39	45.99	24.00	42.31	46.75	89.76	88.50	187.90
28	224.60	422.20	267.70	176.30	80.70	44.93	25.80	35.57	44.69	63.21	150.30	228.40
29	213.60		303.30	173.80	81.30	46.55	23.79	31.20	58.89	67.49	109.40	193.70
30	217.30		263.20	191.00	76.67	41.33	26.01	31.87	47.10	102.40	150.10	189.80
31	336.40		273.70		78.97		26.29	30.84		87.64		179.00
Promedio	188.1	280.9	303.3	221.4	123.4	55.3	34.5	32.8	34.2	56.3	137.4	175.1
Máximo	347.5	431.4	357.1	310.9	179.7	72.9	51.0	47.8	58.9	102.4	245.9	343.4
Mínimo	112.1	214.4	263.2	173.8	76.7	41.3	20.6	24.2	22.1	34.2	74.7	112.6

Fuente: Estudio de cambio climático en la cuenca del huallaga (Campaña et al, en preparación).
Elaboración propia

ANEXO II.3

TESIS: "MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE"

Caudal diario modelado para el año 2018 - Cuenca del río Zapote (m³/s)

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1	27.88	23.50	37.37	27.63	25.63	12.73	7.04	7.59	3.45	6.66	7.87	12.53
2	30.94	22.56	28.53	28.33	27.64	11.22	7.16	5.82	3.26	4.32	6.92	12.41
3	29.12	29.34	33.37	50.76	24.63	11.99	7.18	7.14	2.45	17.66	6.73	10.73
4	27.39	23.17	36.68	29.91	23.80	10.93	6.78	5.89	2.93	6.57	8.72	6.46
5	27.66	26.90	29.61	30.39	23.20	11.23	6.61	5.76	2.84	6.73	6.39	8.94
6	26.19	26.08	30.63	29.28	22.95	12.58	7.70	5.60	2.71	9.43	8.58	9.78
7	23.66	23.96	37.68	34.49	21.93	10.72	5.98	5.36	2.67	7.39	6.33	25.55
8	25.32	23.55	30.20	29.78	21.89	10.49	4.03	4.85	2.87	9.02	12.36	13.40
9	19.65	22.68	29.40	29.63	20.69	10.30	5.34	3.26	4.26	7.98	21.23	14.60
10	24.45	21.97	32.44	39.01	20.10	9.28	5.99	4.09	3.15	8.75	17.06	13.92
11	22.32	21.39	28.84	29.60	19.81	5.84	5.96	5.20	2.88	7.68	15.92	12.99
12	23.62	20.39	28.05	29.11	22.92	8.06	6.29	4.65	2.80	7.79	11.89	13.47
13	47.65	21.99	27.50	28.98	18.89	9.62	5.88	4.96	4.53	14.21	20.21	12.85
14	25.74	24.69	32.09	28.82	19.06	9.19	5.74	8.75	3.15	9.43	12.90	15.68
15	25.64	21.53	31.44	27.46	16.55	9.18	5.84	6.80	3.04	8.68	16.28	28.79
16	25.60	21.96	33.84	27.68	17.30	9.00	5.43	6.62	3.10	8.58	16.15	25.38
17	24.88	22.21	27.69	26.33	14.20	8.80	5.30	5.93	2.89	8.29	13.44	24.90
18	26.98	20.93	28.84	24.64	15.54	9.81	5.56	5.84	3.47	8.15	16.80	19.14
19	25.66	29.50	27.02	25.19	16.09	8.73	5.15	7.58	4.28	7.91	13.42	24.47
20	26.63	24.32	23.83	21.60	15.62	8.54	5.31	5.76	4.87	7.66	19.77	23.67
21	24.11	46.56	26.34	24.05	15.24	8.32	4.99	5.62	3.92	8.89	18.66	22.58
22	23.66	25.39	28.51	26.90	14.77	8.11	4.87	5.46	4.23	9.39	17.42	20.28
23	24.97	26.39	35.05	27.37	14.29	7.89	4.89	5.61	3.89	10.20	14.89	21.47
24	25.79	25.60	28.51	24.90	14.06	7.75	5.88	5.09	3.81	9.09	17.11	21.93
25	24.88	33.99	34.82	31.23	16.35	9.03	6.34	5.31	3.74	8.45	14.63	20.52
26	29.15	26.43	28.26	25.62	13.31	7.82	5.22	4.78	3.63	4.92	14.27	19.62
27	23.36	32.51	27.69	26.39	13.84	7.60	5.58	4.54	3.55	6.71	13.75	19.12
28	23.63	31.42	27.08	28.38	12.78	7.43	5.22	4.27	3.69	7.30	15.49	18.48
29	22.63		39.03	27.23	12.44	7.24	5.11	4.01	3.53	7.45	12.94	17.91
30	30.53		29.96	24.92	12.10	7.06	6.56	4.45	5.33	7.42	15.42	17.20
31	24.95		29.68		12.11		6.18	3.59		7.21		16.61
Promedio	26.3	25.7	30.6	28.9	18.1	9.2	5.8	5.5	3.5	8.4	13.8	17.6
Máximo	47.7	46.6	39.0	50.8	27.6	12.7	7.7	8.7	5.3	17.7	21.2	28.8
Mínimo	19.7	20.4	23.8	21.6	12.1	5.8	4.0	3.3	2.5	4.3	6.3	6.5

Fuente: Estudio de cambio climático en la cuenca del huallaga (Campaña et al, en preparación).

Elaboración propia

ANEXO II.4

TESIS: "MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE"

Caudal diario modelado para el año 2018 - Cuenca del río Shishinahua (m³/s)

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1	54.01	80.02	103.30	121.10	81.97	48.41	29.90	16.96	17.84	25.16	41.26	46.84
2	55.35	79.32	101.70	119.90	80.86	47.62	29.69	15.17	18.24	25.65	40.94	39.82
3	55.94	81.23	101.10	118.20	80.99	47.47	29.00	15.55	18.94	26.17	41.51	45.72
4	50.19	82.87	104.90	115.60	80.44	47.19	28.35	12.98	19.71	26.99	40.78	47.39
5	53.57	82.31	104.70	113.80	79.94	46.54	27.62	14.14	19.75	28.73	39.89	48.26
6	45.02	82.49	103.20	112.80	79.20	46.12	26.90	14.66	20.65	29.14	38.86	48.01
7	51.19	85.97	102.80	111.30	78.18	45.93	26.24	14.51	21.37	29.17	37.77	47.85
8	54.14	86.70	101.40	109.30	76.47	45.11	23.36	14.26	21.44	29.02	37.54	47.34
9	77.47	88.94	99.30	106.80	74.57	45.67	24.28	14.33	23.19	29.00	60.01	47.39
10	71.15	90.15	99.46	105.70	72.93	45.71	19.81	14.00	24.73	29.67	52.94	51.23
11	71.37	89.21	102.40	103.70	70.94	45.00	22.31	14.11	25.07	29.73	54.06	51.90
12	72.33	83.44	103.80	103.60	69.08	44.03	23.16	14.93	25.10	29.54	53.78	52.05
13	71.94	88.45	102.90	101.90	67.56	39.19	23.12	15.68	24.92	29.29	52.95	52.27
14	71.98	76.72	103.40	99.88	66.40	40.35	23.60	15.73	25.03	29.04	51.72	51.96
15	71.00	87.69	107.10	97.84	64.80	33.38	23.52	15.56	25.31	28.64	51.38	52.98
16	71.56	91.69	110.90	96.25	59.37	36.66	24.12	15.69	22.57	29.38	51.92	56.02
17	70.69	92.02	113.00	95.17	61.17	37.36	24.12	15.37	23.98	29.29	51.07	59.27
18	128.10	90.72	112.30	93.39	52.33	37.03	24.05	16.93	20.11	29.08	51.41	62.27
19	95.59	93.03	110.40	86.55	57.53	36.68	23.62	19.18	22.64	28.82	50.42	63.69
20	91.87	94.12	109.60	90.16	59.21	35.95	23.08	20.94	23.39	28.48	49.34	63.61
21	91.14	94.01	100.59	77.92	59.61	35.85	22.51	21.30	25.28	28.23	48.11	66.45
22	90.68	95.98	106.40	86.92	58.70	35.50	21.93	21.17	25.63	29.46	49.63	66.90
23	89.27	96.10	90.77	89.46	57.84	34.98	21.37	21.13	25.62	29.95	48.98	66.53
24	87.69	94.67	103.20	89.60	56.45	34.18	20.80	20.66	25.33	29.43	48.11	66.64
25	85.96	100.70	106.70	88.55	55.03	33.44	20.31	20.17	24.92	32.65	48.12	67.31
26	85.54	102.70	110.40	87.19	54.13	32.81	19.75	19.64	24.41	29.39	47.07	67.19
27	84.52	104.10	116.60	87.09	53.31	32.33	19.29	19.09	24.20	35.34	48.10	69.22
28	83.75	104.20	118.20	85.77	52.09	31.73	18.74	18.55	24.97	37.30	47.40	69.46
29	82.39		122.50	84.53	50.80	30.97	18.27	18.14	25.15	37.85	47.95	70.56
30	80.95		123.00	83.12	49.82	30.64	17.85	17.51	25.35	37.76	43.61	70.03
31	80.20		123.10		49.04		17.36	17.40		40.47		71.37
Promedio	75.0	90.0	107.1	98.8	64.9	39.5	23.2	16.9	23.2	30.3	47.6	57.7
Máximo	128.1	104.2	123.1	121.1	82.0	48.4	29.9	21.3	25.6	40.5	60.0	71.4
Mínimo	45.0	76.7	90.8	77.9	49.0	30.6	17.4	13.0	17.8	25.2	37.5	39.8

Fuente: Estudio de cambio climático en la cuenca del huallaga (Campana et al, en preparación).
Elaboración propia

ANEXO III: INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA

III.1 RESULTADOS DE ENSAYO GRANULOMÉTRICO EN MAL PASO PARANAPURA

En esta zona se tomaron 4 muestras de sedimentos. En el Cuadro III.1 se muestran los porcentajes que pasan en los diferentes tamices, en la Figura III.1 se grafica la respectiva curva granulométrica, de esta granulometría se determinaron los diámetros característicos d10, d30, d50, d84 y se presentan en el Cuadro III.2.

CUADRO III.1: Resultados granulométricos en las muestras en la zona de Paranapura

Tamaño de Partículas	Porcentaje que Pasa (%)			
	P-12	P-14	P-34	P-54
3/8"	100	100	100	100
N°4 (4760 µm)	99.8	99.1	100	99.8
N°10 (2000 µm)	99.6	99.1	99.8	99.7
N°20	98.7	99	98.9	99.4
N°40 (400 µm)	83.4	84.6	92.1	91.8
N°60	12.8	13.2	11.9	18.8
N°140	0.7	0.5	0.4	0.8
N°200 (74 µm)	0.3	0.1	0.2	0.2

Fuente: MTC (2018)

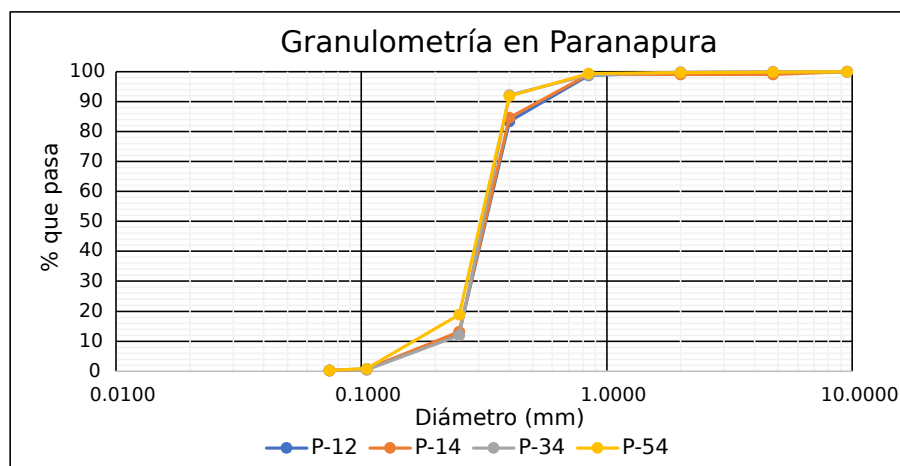


FIGURA III.1: Curva granulométrica en la zona de Paranapura. Fuente: MTC (2018)

CUADRO III.2: Resumen de diámetros característicos en zona de Paranapura

Zona de muestreo	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D84 (mm)
Paranapura	0.191	0.277	0.314	0.390	0.191

Fuente: MTC (2018)

III.2 RESULTADOS DE ENSAYO GRANULOMÉTRICO EN MAL PASO PROVIDENCIA

En esta zona se tomaron 3 muestras de sedimentos. En el Cuadro III.3 se muestran los porcentajes que pasan en los diferentes tamices, en la Figura III.2 se grafica la respectiva curva granulométrica, de esta granulometría se determinaron los diámetros característicos d10, d30, d50, d84 y se presentan en el Cuadro III.4.

CUADRO III.3: Resultados granulométricos en las muestras en la zona de Providencia

Tamaño de Partículas	Porcentaje que Pasa (%)		
	S-11	S-14	S-15
3/8"	100	100	100
N°4 (4760 µm)	100	100	100
N°10 (2000 µm)	100	100	100
N°20	100	99.9	99.8
N°40 (400 µm)	99	97.7	93.7
N°60	35.6	32.1	15.9
N°140	1	0.8	0.4
N°200 (74 µm)	0.3	0.1	0.1

Fuente: MTC (2018)

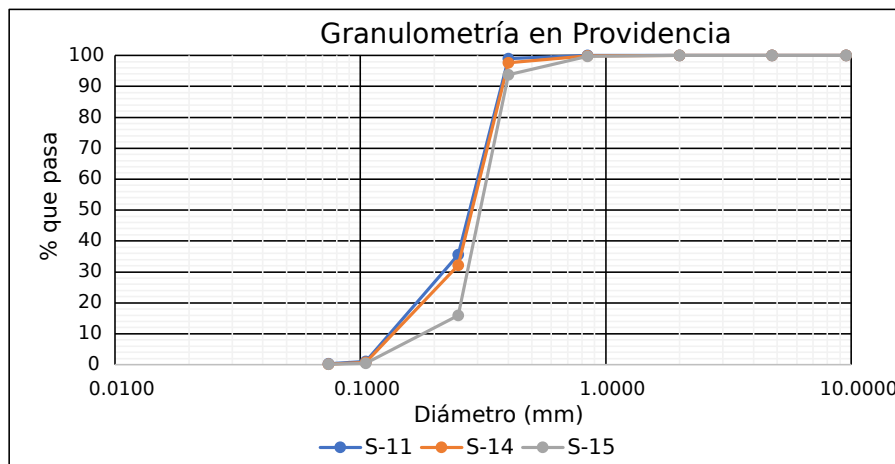


FIGURA III.2: Curva granulométrica en la zona de Providencia. Fuente: MTC (2018)

CUADRO III.4: Resumen de diámetros característicos en zona de Providencia

Zona de muestreo	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D84 (mm)
Providencia	0.141	0.254	0.291	0.367	0.141

Fuente: MTC (2018)

III.3 RESULTADOS DE ENSAYO GRANULOMÉTRICO EN MAL PASO METROPOLIS

En esta zona se tomaron 7 muestras de sedimentos. En el Cuadro III.5 se muestran los porcentajes que pasan en los diferentes tamices, en la Figura III.3 se grafica la respectiva curva granulométrica, de esta granulometría se determinaron los diámetros característicos d10, d30, d50, d84 y se presentan en el Cuadro III.6.

CUADRO III.5: Resultados granulométricos en las muestras en la zona de Metrópolis

Tamaño de Partículas	Porcentaje que Pasa (%)						
	M-11	M-14	M-16	M-26	M-41	M-43	M-46
3/8"	100	100	100	100	100	100	100
N°4 (4760 µm)	100	100	100	100	100	100	100
N°10 (2000 µm)	100	100	99.8	100	100	99.9	100
N°20	99.8	99.9	98.7	98.9	100	99.9	100
N°40 (400 µm)	98.9	93.8	93.4	97.7	98.6	94.9	98.6
N°60	94.4	18	24.3	94.7	47.4	11.7	62.8
N°140	5.1	3.7	1.3	6.7	1.8	0.8	1.4
N°200 (74 µm)	1.1	0.8	0.7	0.2	0.7	0.5	0.4

Fuente: MTC (2018)

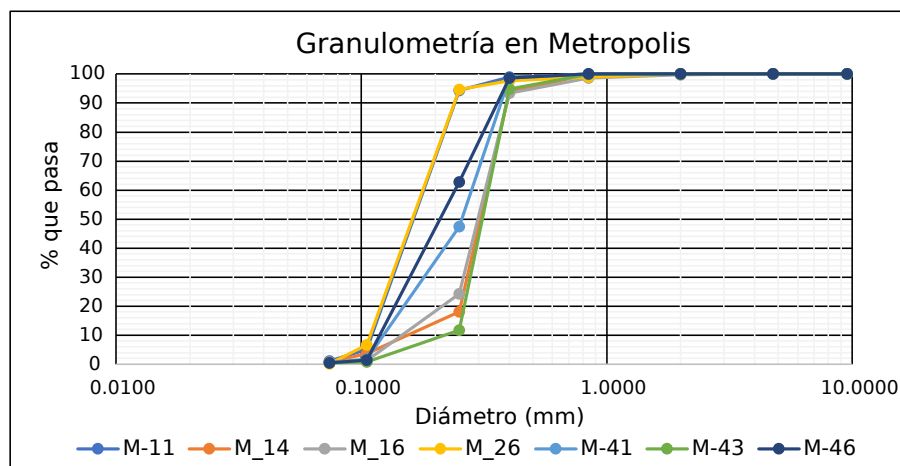


FIGURA III.3: Curva granulométrica en la zona de Metrópolis. Fuente: MTC (2018)

CUADRO III.6: Resumen de diámetros característicos en zona de Metrópolis

Zona de muestreo	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D84 (mm)
Metrópolis	0.119	0.172	0.248	0.352	0.119

Fuente: MTC (2018)

III.4 RESULTADOS DE ENSAYO GRANULOMÉTRICO EN MAL PASO OROMINA

En esta zona se tomaron 7 muestras de sedimentos. En el Cuadro III.7 se muestran los porcentajes que pasan en los diferentes tamices, en la Figura III.4 se grafica la respectiva curva granulométrica, de esta granulometría se determinaron los diámetros característicos d10, d30, d50, d84 y se presentan en el Cuadro III.8.

CUADRO III.7: Resultados granulométricos en las muestras en la zona de Oromina

Tamaño de Partículas	Porcentaje que Pasa (%)						
	O-13	O-16	O-21	O-23	O-24	O-33	O-34
3/8"	100	100	100	100	100	100	100
N°4 (4760 µm)	100	99.3	100	100	99.1	99.6	99.3
N°10 (2000 µm)	99.6	98.8	99.9	100	98.3	98.9	98.4
N°20	98.2	98.3	97.9	100	95.3	94.8	93
N°40 (400 µm)	84.6	89.8	66	96.7	76	66.9	72.7
N°60	7.4	7.5	7.4	17.4	19.9	4	11.2
N°140	0.4	0.5	0.6	0.5	0.9	0.4	0.4
N°200 (74 µm)	0.3	0.3	0.3	0.2	0.6	0.3	0.3

Fuente: MTC (2018)

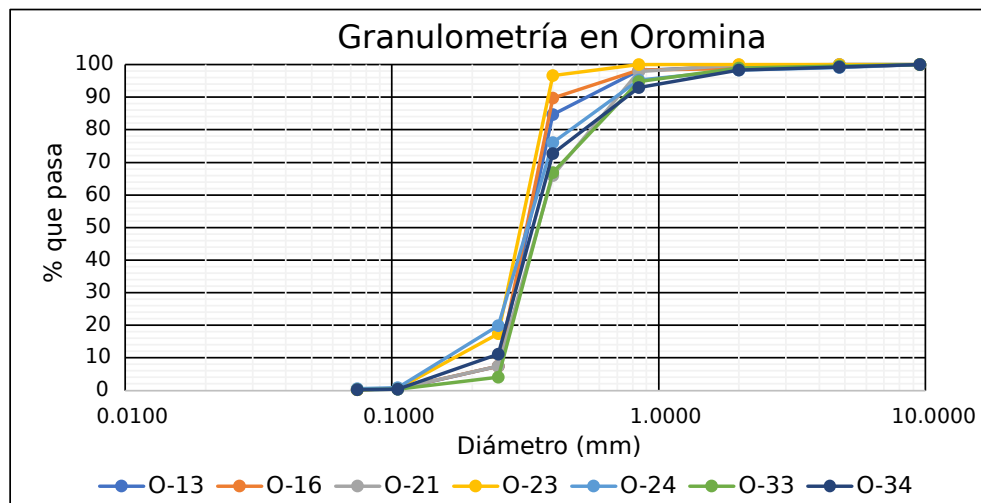


FIGURA III.4: Curva granulométrica en la zona de Oromina. Fuente: MTC (2018)

CUADRO III.8: Resumen de diámetros característicos en zona de Oromina

Zona de muestreo	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D84 (mm)
Oromina	0.236	0.286	0.328	0.494	0.236

Fuente: MTC (2018)

III.5 RESULTADOS DE ENSAYO GRANULOMÉTRICO EN MAL PASO PROGRESO

En esta zona se tomaron 6 muestras de sedimentos. En el Cuadro III.9 se muestran los porcentajes que pasan en los diferentes tamices, en la Figura III.5 se grafica la respectiva curva granulométrica, de esta granulometría se determinaron los diámetros característicos d10, d30, d50, d84 y se presentan en el Cuadro III.10.

CUADRO III.9: Resultados granulométricos en las muestras en la zona de Progreso

Tamaño de Partículas	Porcentaje que Pasa (%)					
	SA-16	SA-23	SA-26	SA-31	SA-33	SA-35
3/8"	100	100	100	100	100	100
N°4 (4760 µm)	100	100	99.8	100	100	100
N°10 (2000 µm)	100	100	98.7	100	100	100
N°20	100	100	93.4	99.9	99.4	100
N°40 (400 µm)	98.4	99.8	67.9	99.4	84.5	98.5
N°60	61.8	87.8	12.5	96.8	10.6	42
N°140	0.6	2.1	0.3	6	0.5	1.7
N°200 (74 µm)	0.1	0.6	0.2	0.9	0.3	0.5

Fuente: MTC (2018)

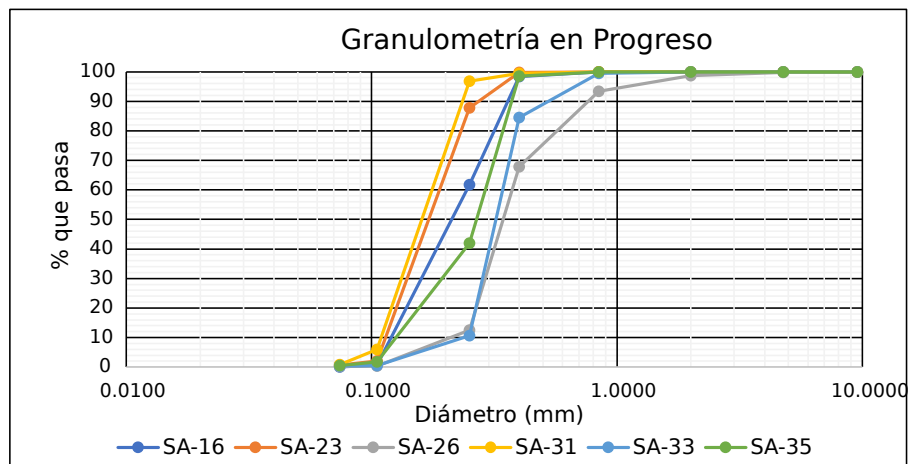


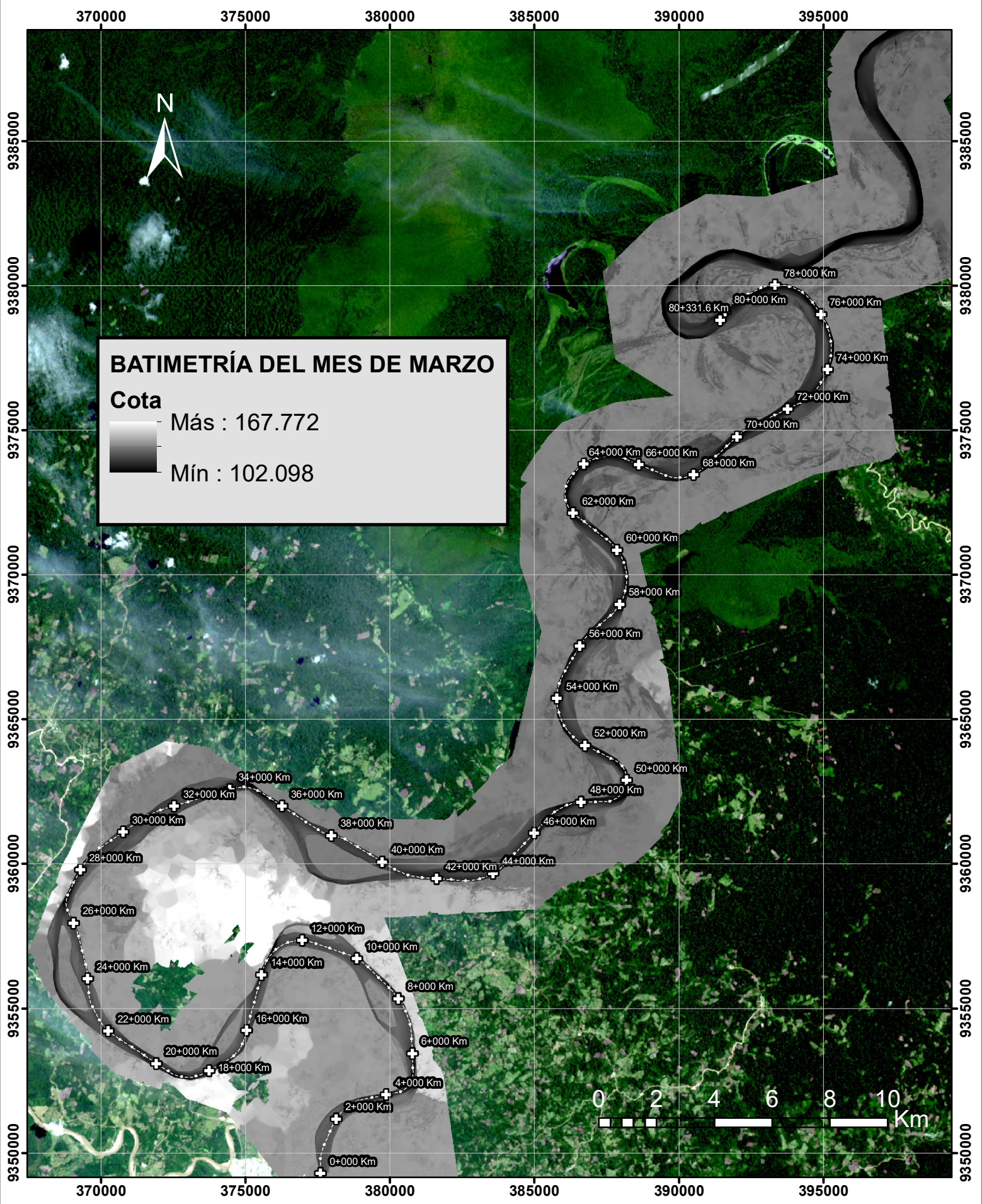
FIGURA III.5: Curva granulométrica en la zona de Progreso. Fuente: MTC (2018)

CUADRO III.10: Resumen de diámetros característicos en zona de Progreso

Zona de muestreo	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D84 (mm)
Progreso	0.121	0.171	0.242	0.366	0.121

Fuente: MTC (2018)

ANEXO IV: BATIMETRÍA Y CAMBIO DE LECHO

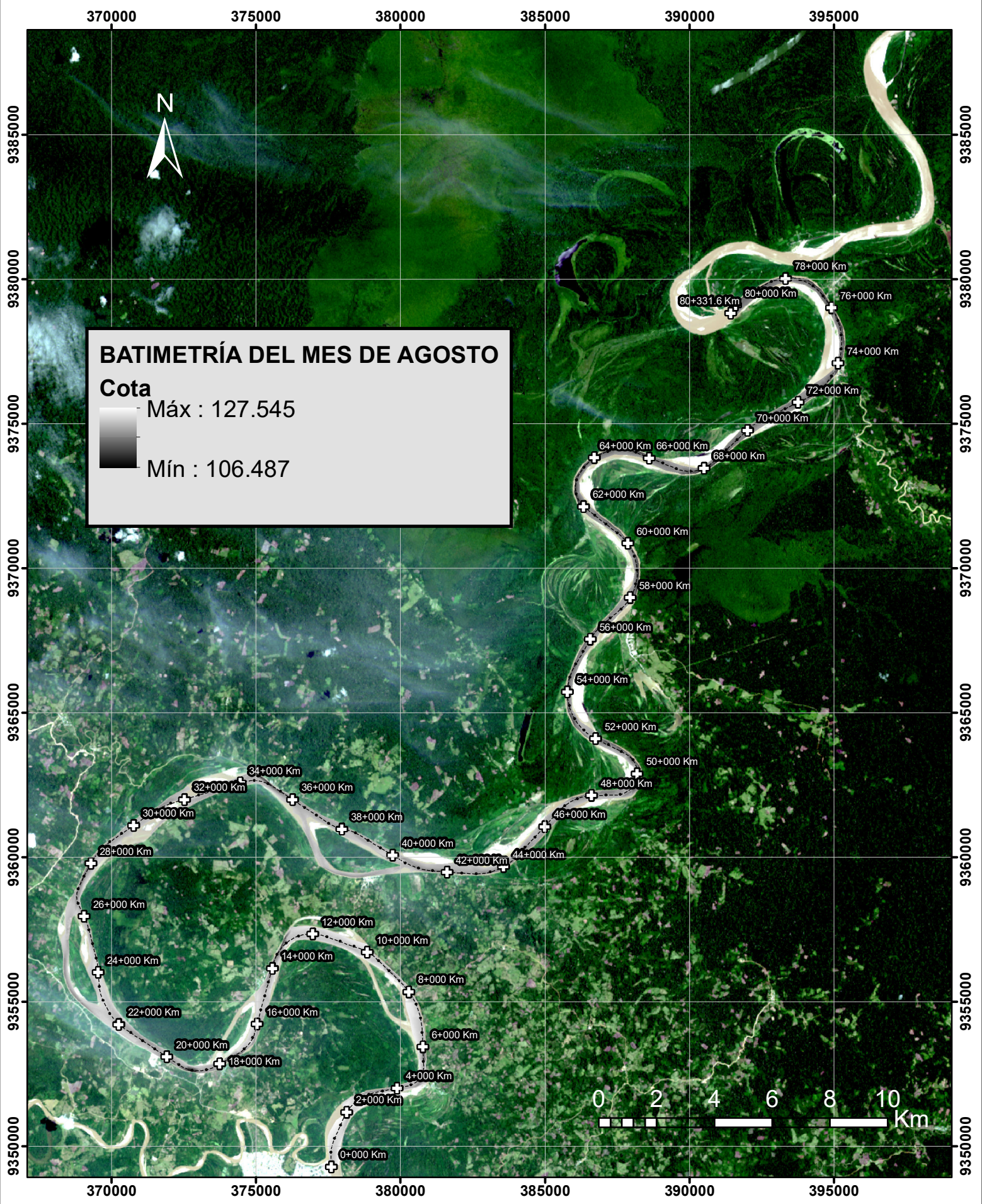


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO: BATIMETRÍA DEL MES DE MARZO	
TESISTA: Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez	
ESCALA:	1/165'000
DATUM:	WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:
IV.1



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

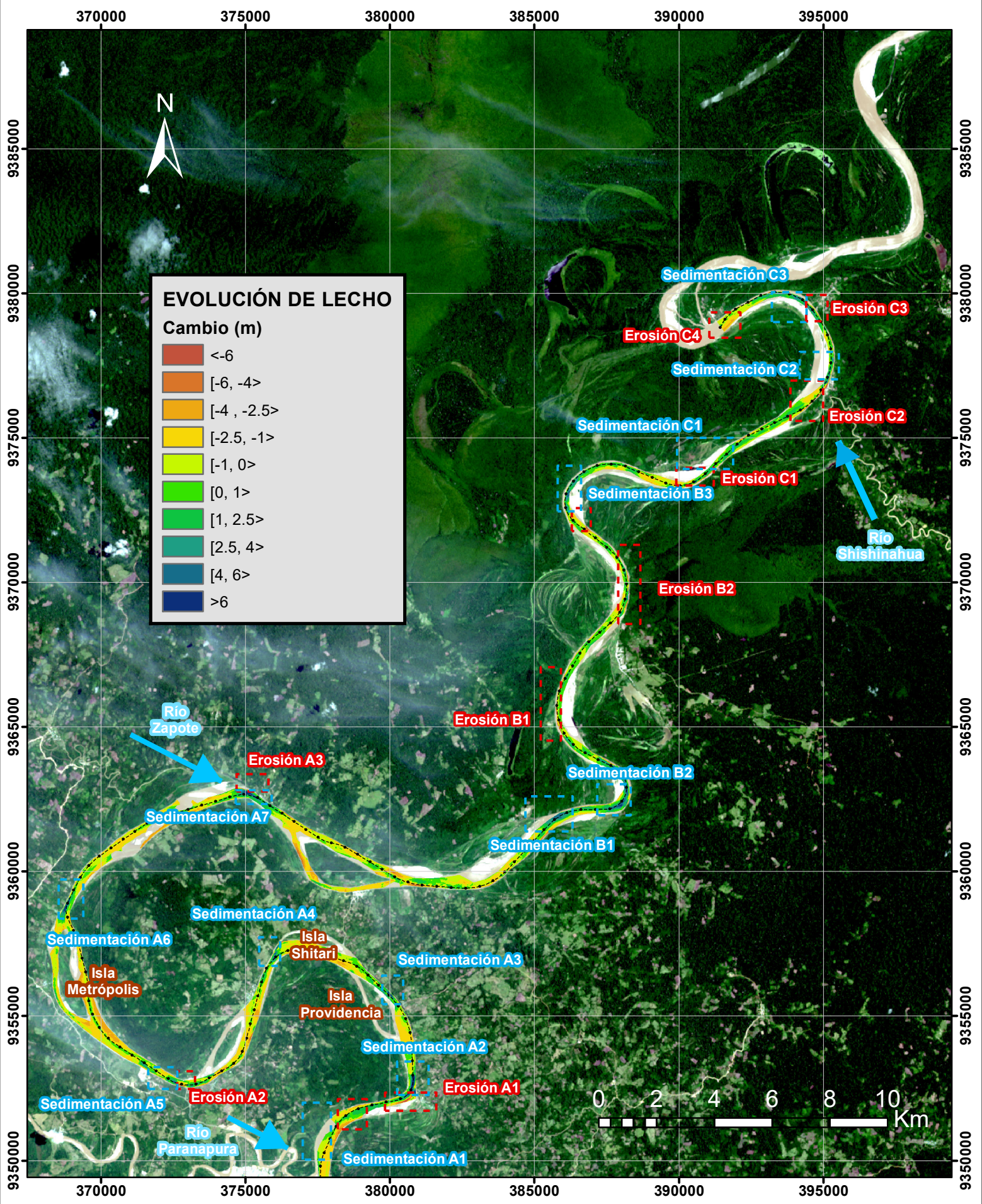
TÍTULO:
BATIMETRÍA DEL MES
DE AGOSTO

TESISTA:
Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/1'165'000

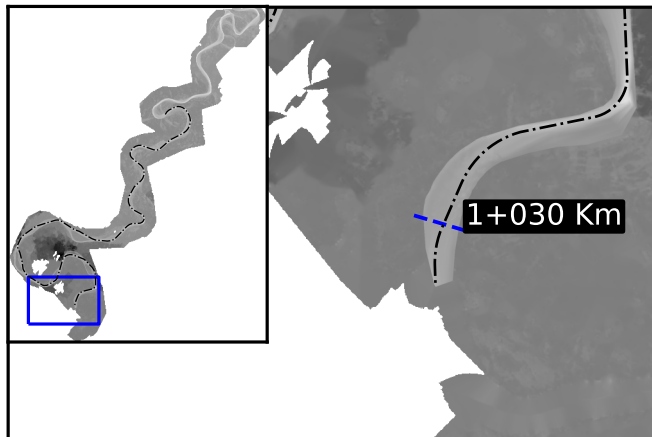
DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:
IV.2

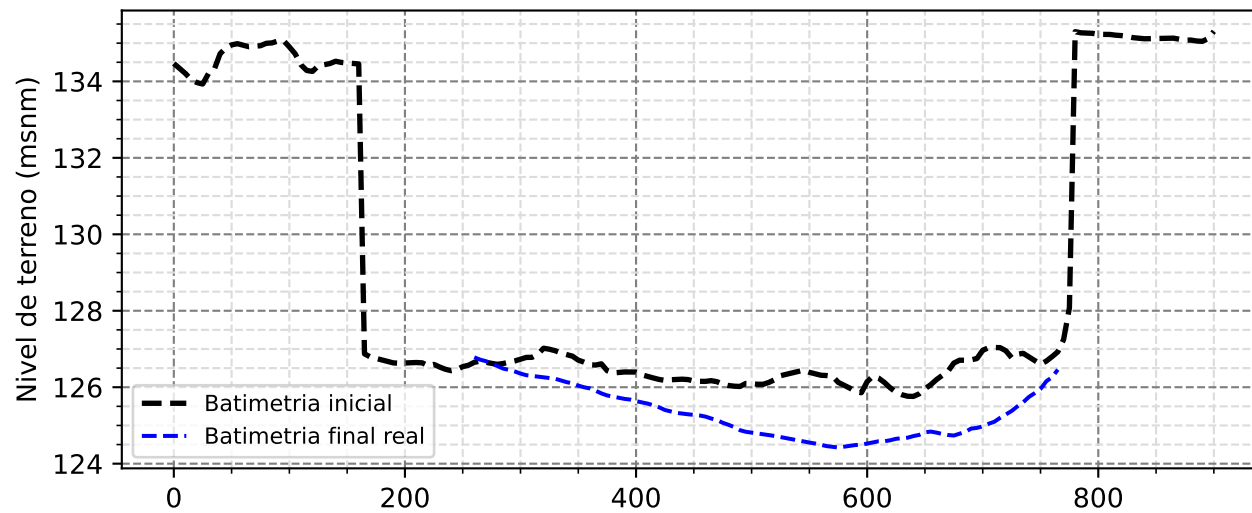


ANEXO IV.1 CAMBIO DE LECHO EN SECCIONES TRANSVERSALES A LO LARGO DEL TRAMO

Vista en planta



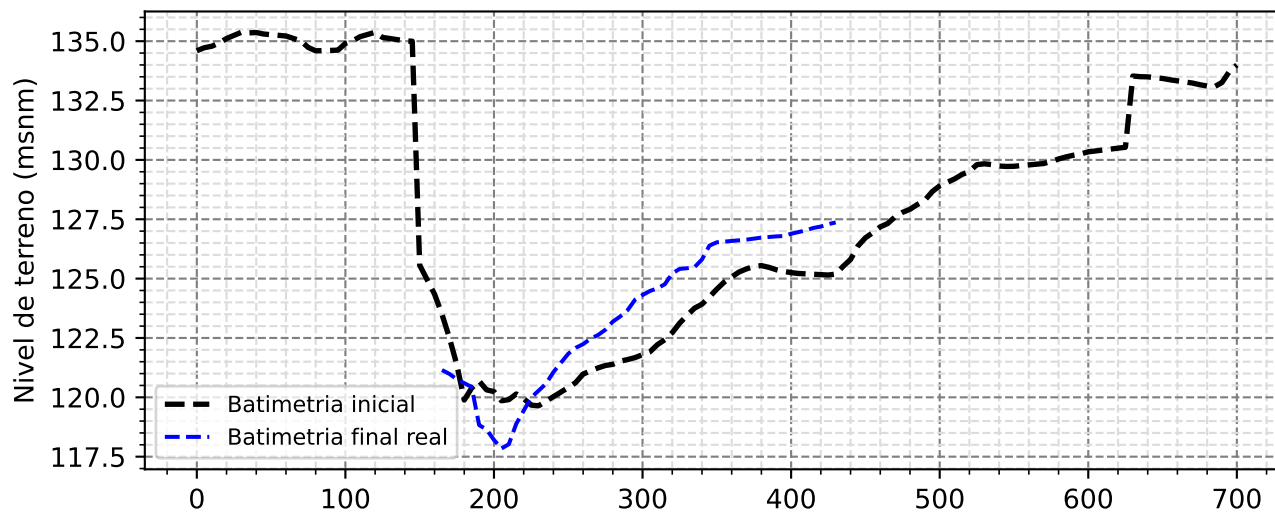
Seccion 1+030 Km



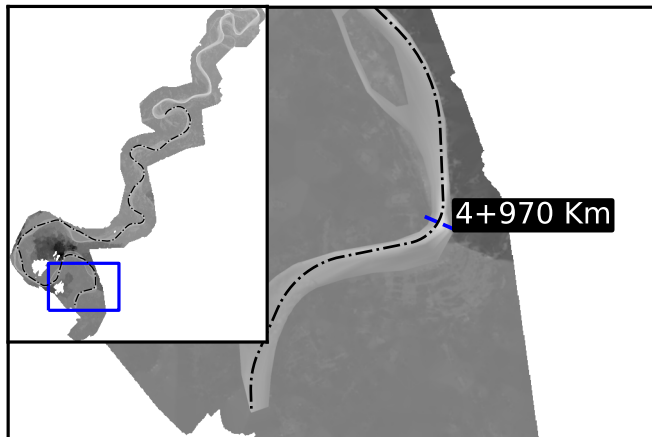
Vista en planta



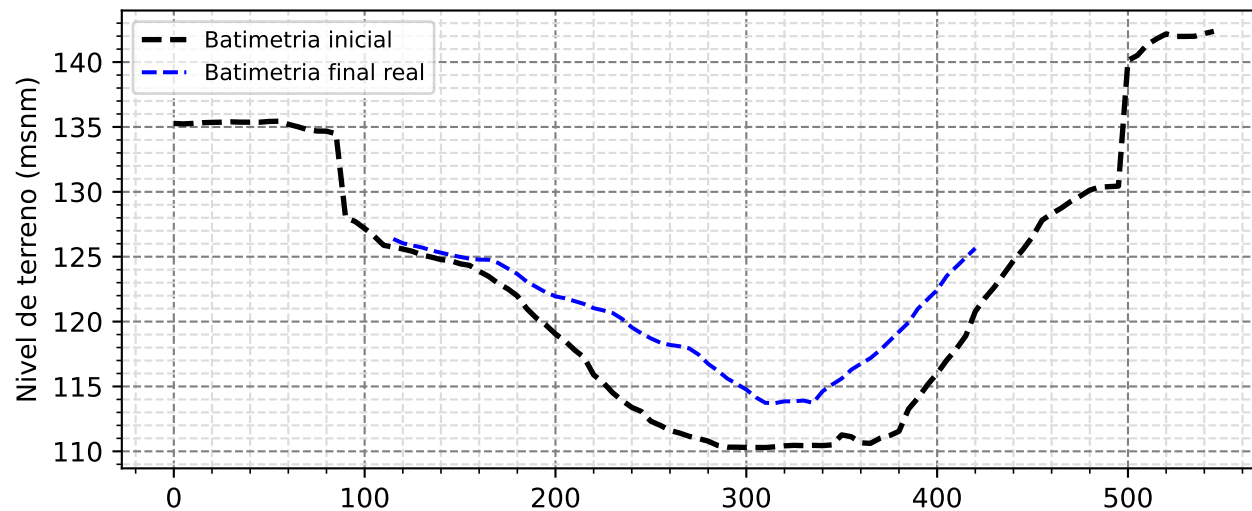
Seccion 3+330 Km



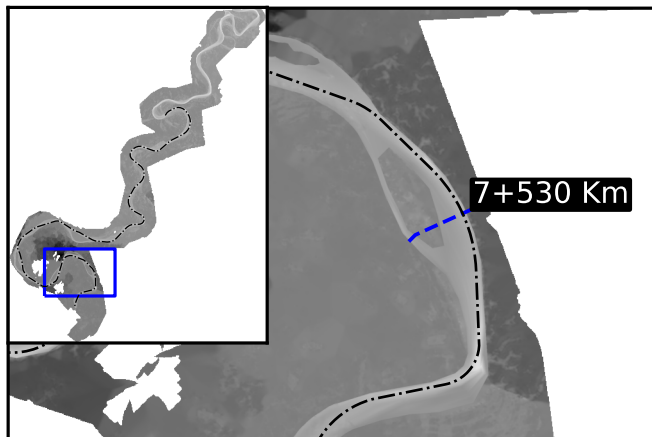
Vista en planta



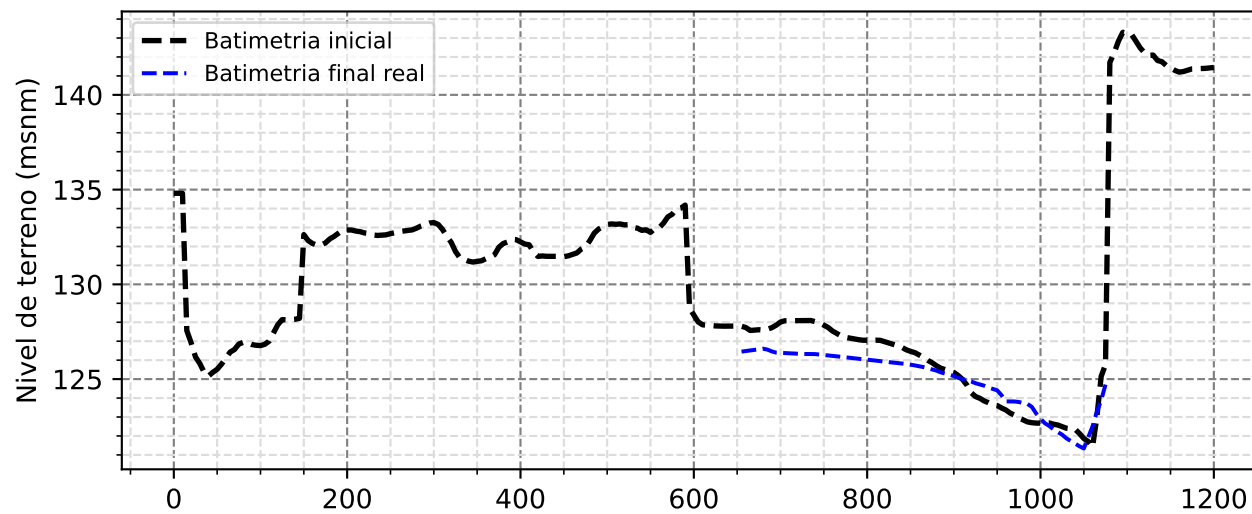
Seccion 4+970 Km



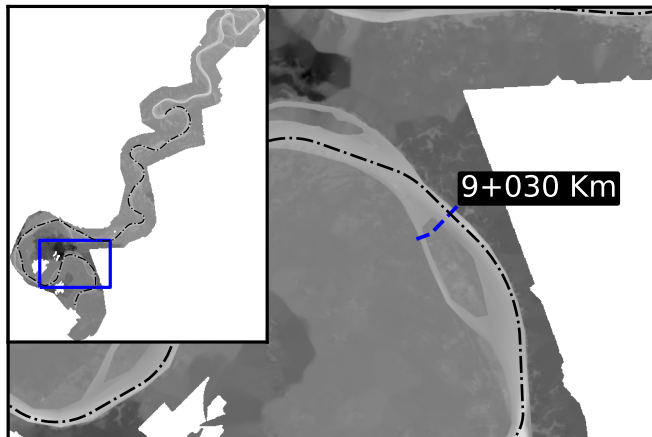
Vista en planta



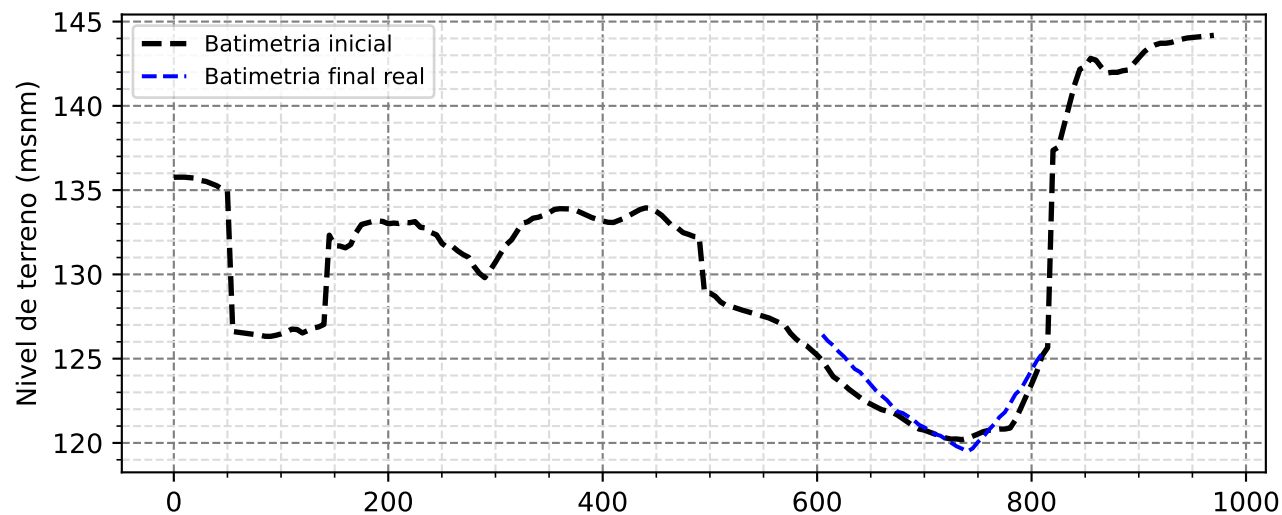
Seccion 7+530 Km



Vista en planta



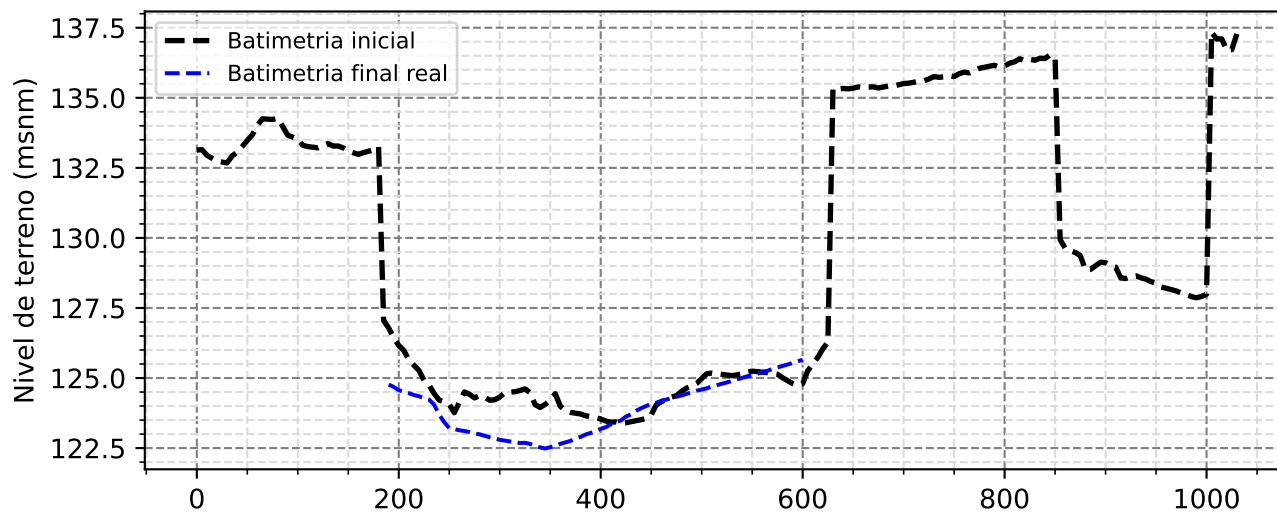
Seccion 9+030 Km



Vista en planta



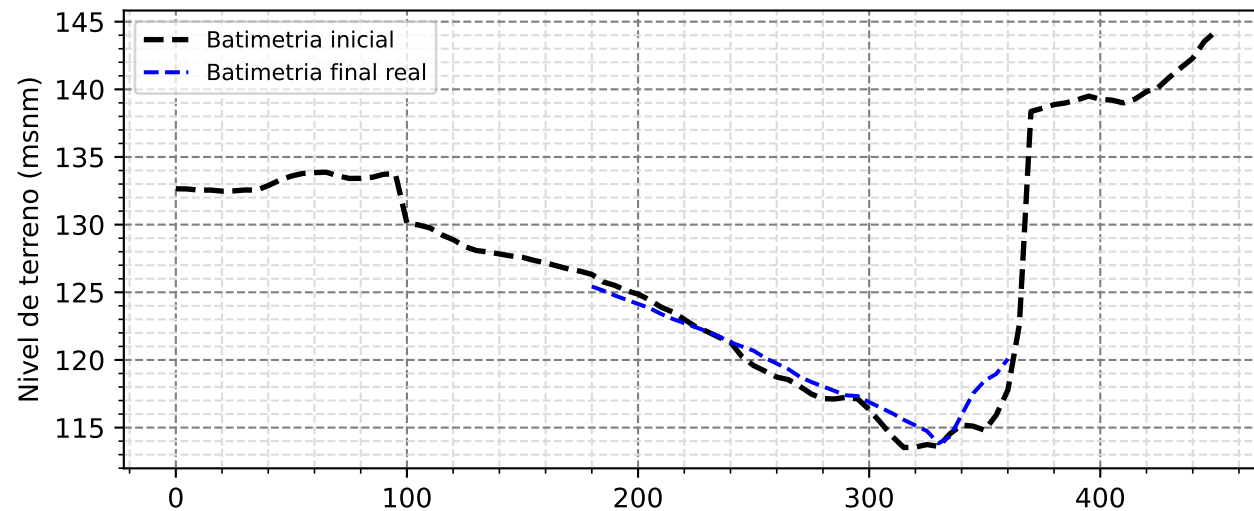
Seccion 11+230 Km



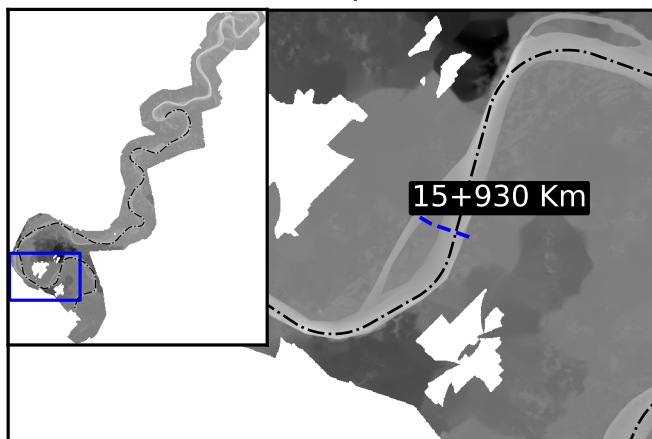
Vista en planta



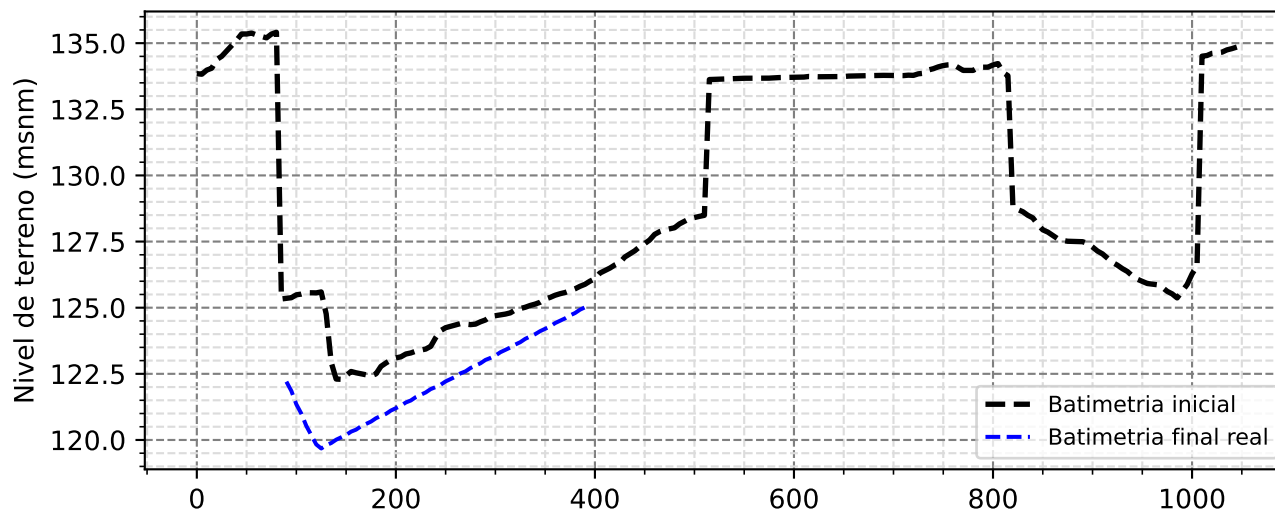
Seccion 13+240 Km



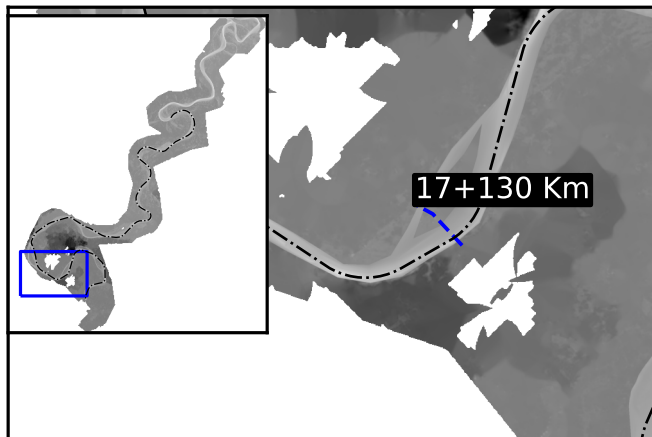
Vista en planta



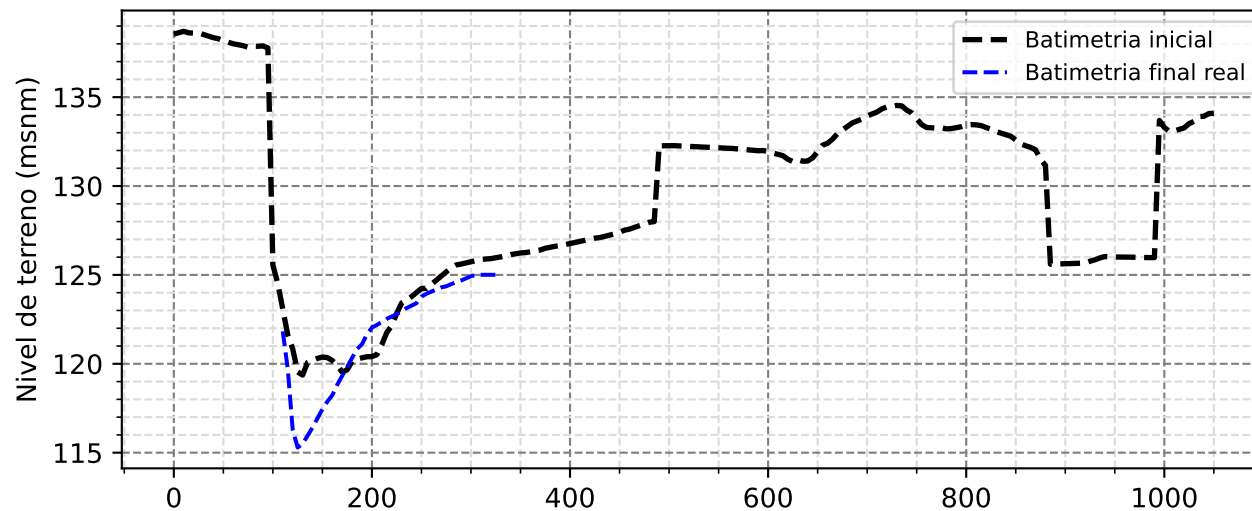
Seccion 15+930 Km



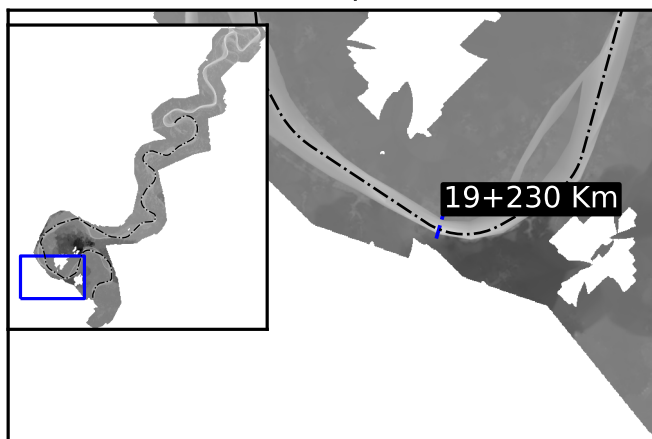
Vista en planta



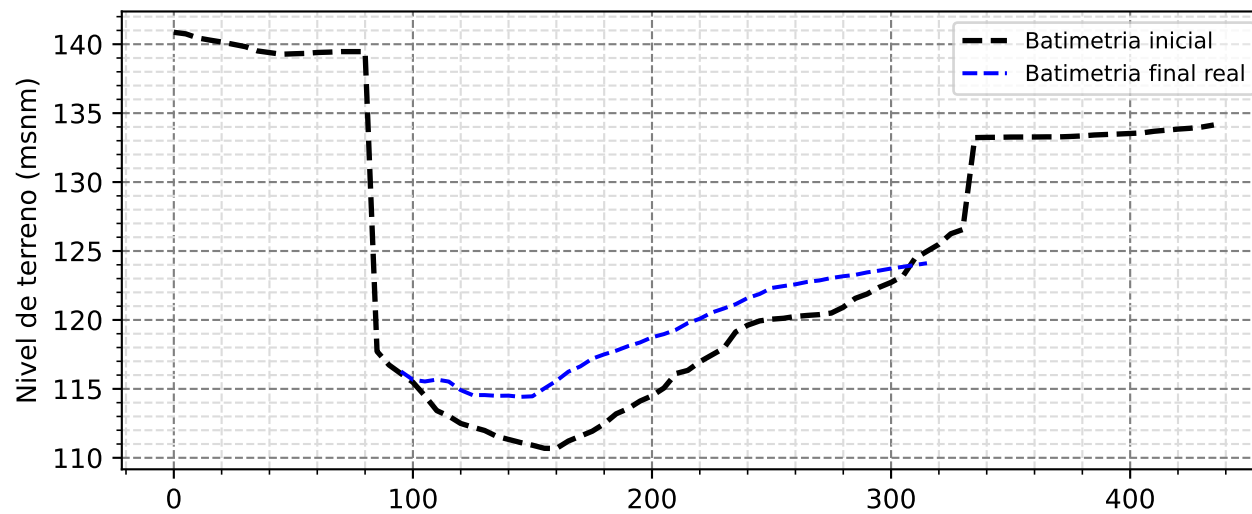
Seccion 17+130 Km



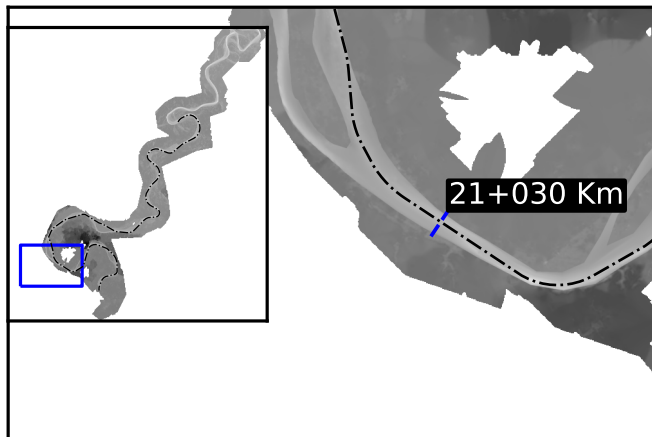
Vista en planta



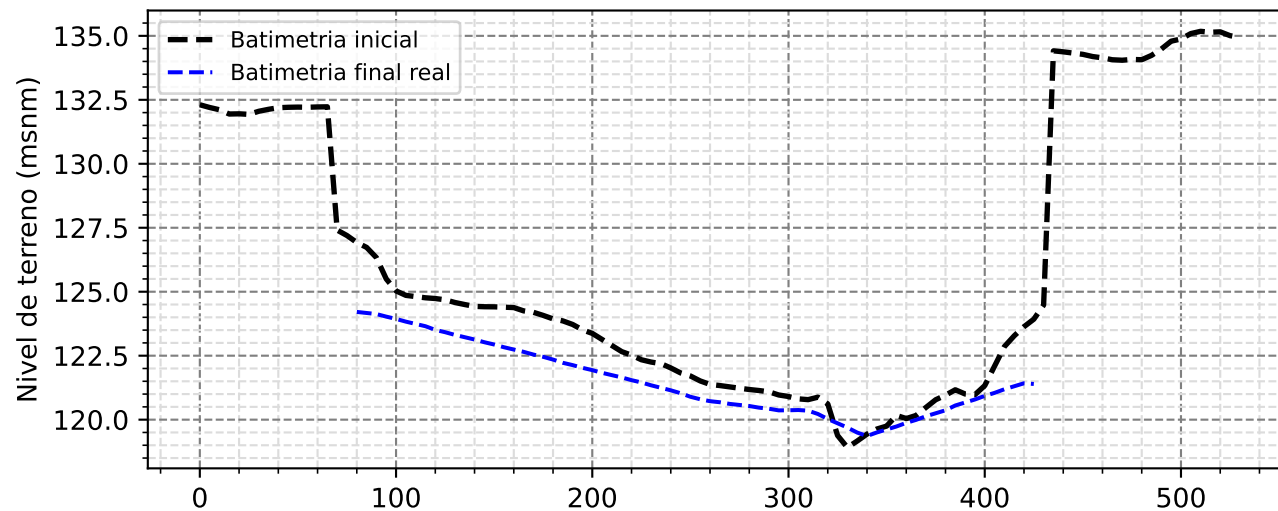
Seccion 19+230 Km



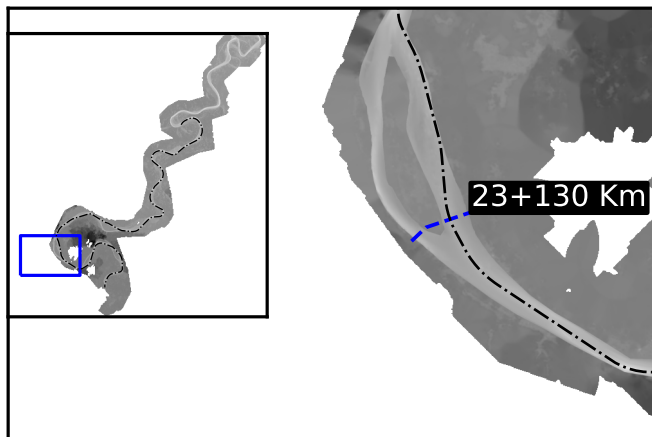
Vista en planta



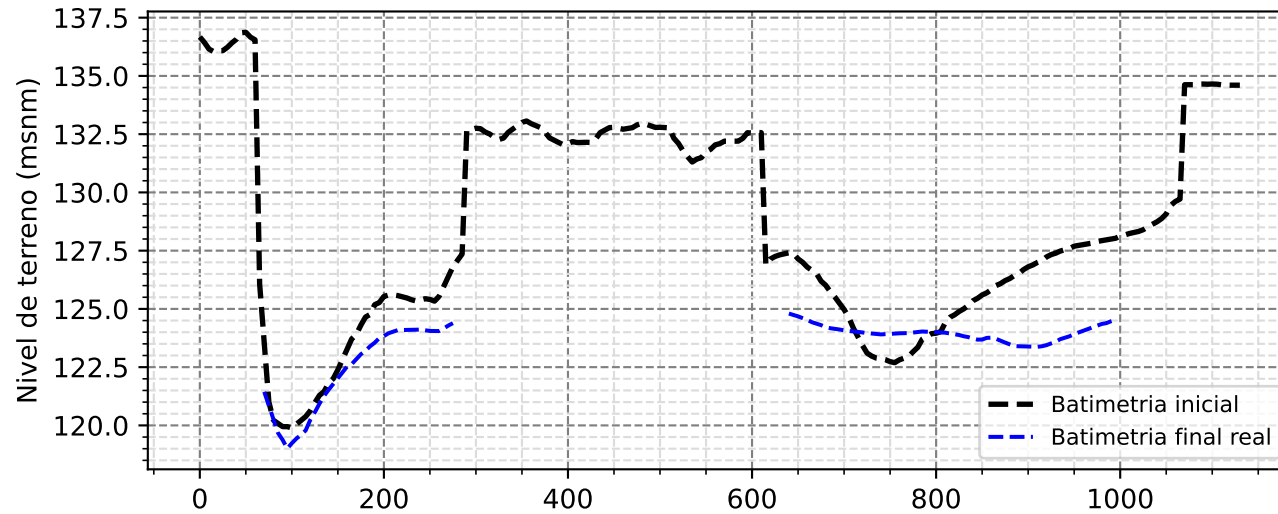
Seccion 21+030 Km



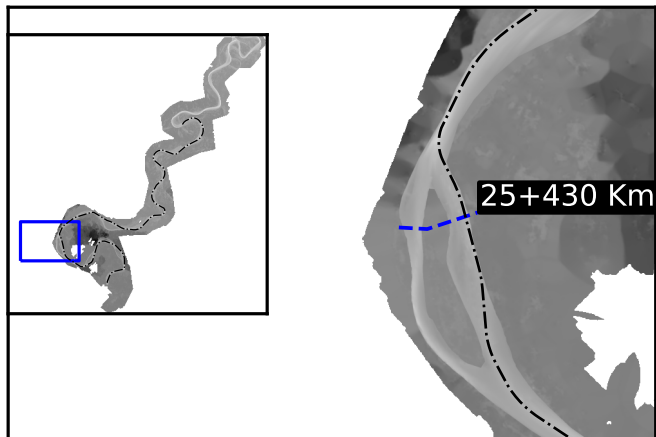
Vista en planta



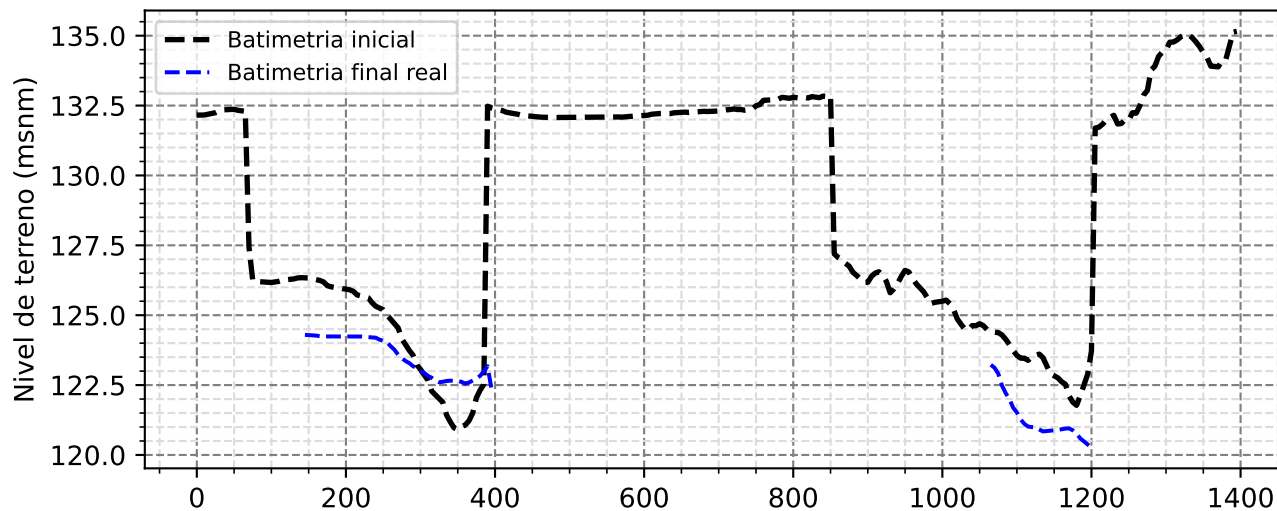
Seccion 23+130 Km



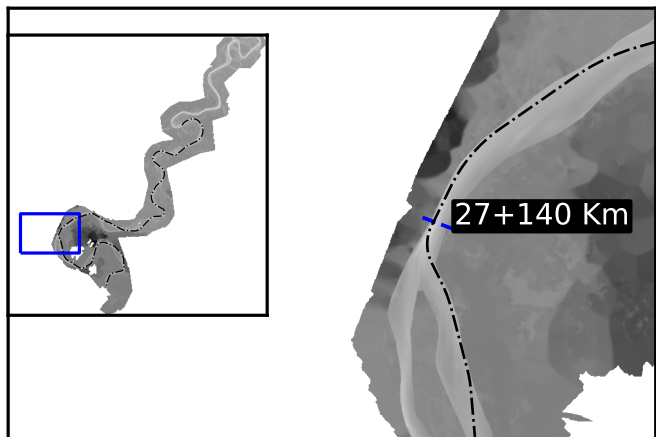
Vista en planta



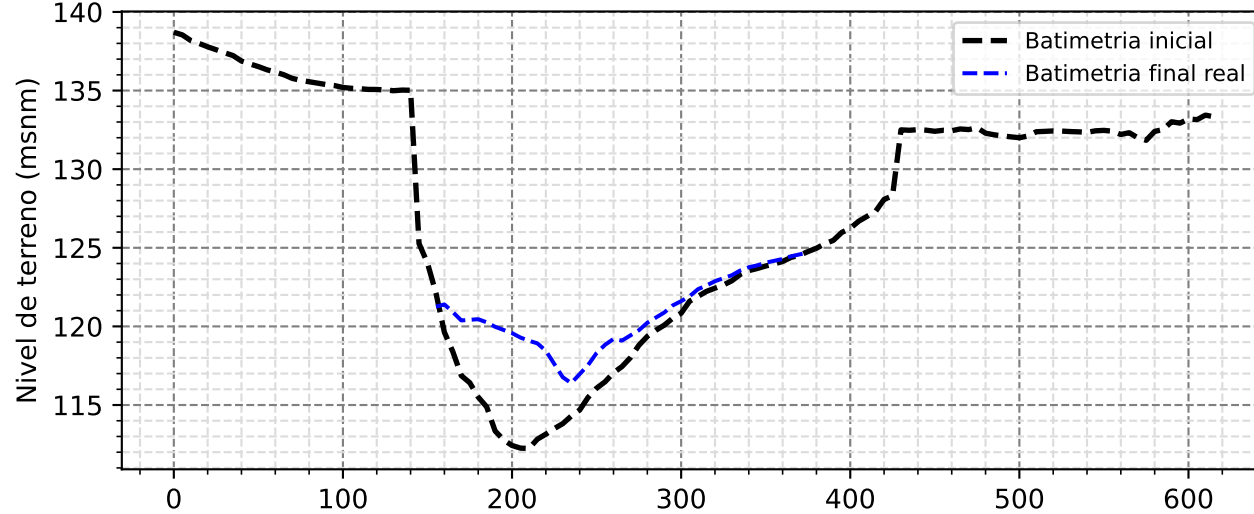
Seccion 25+430 Km



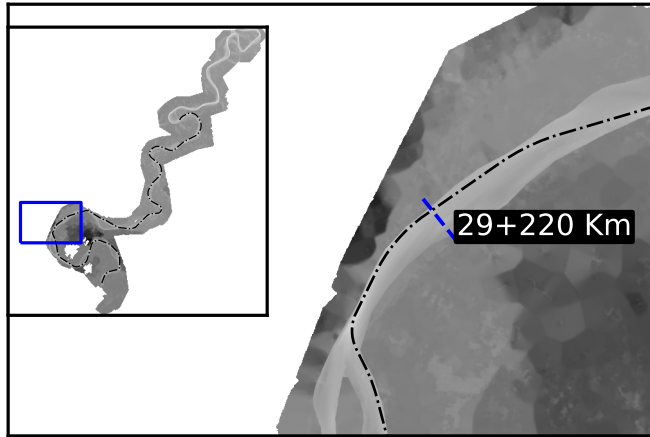
Vista en planta



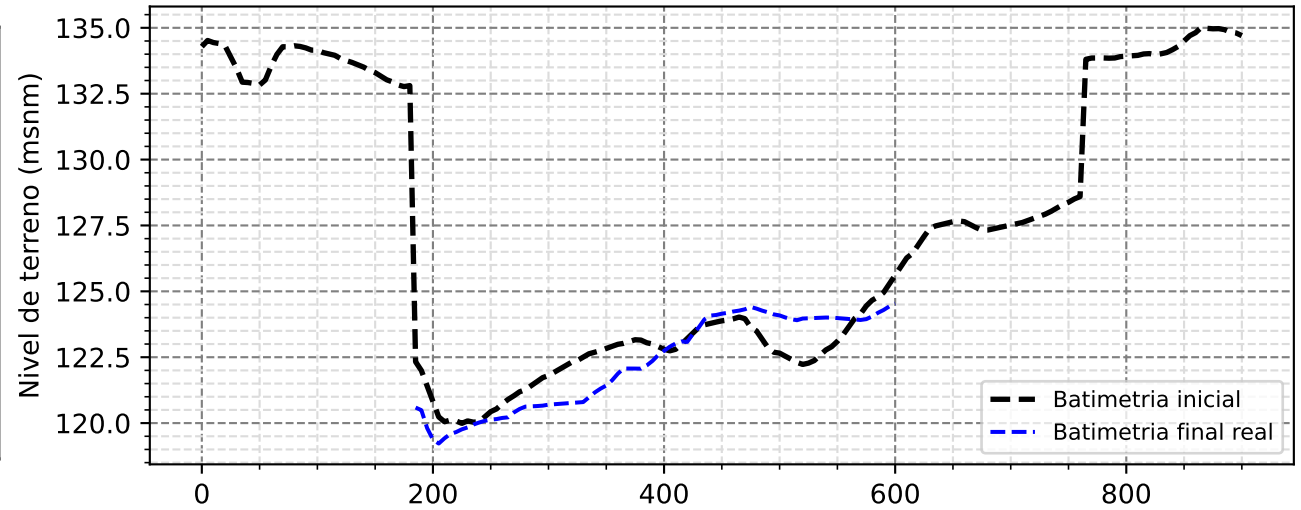
Seccion 27+140 Km



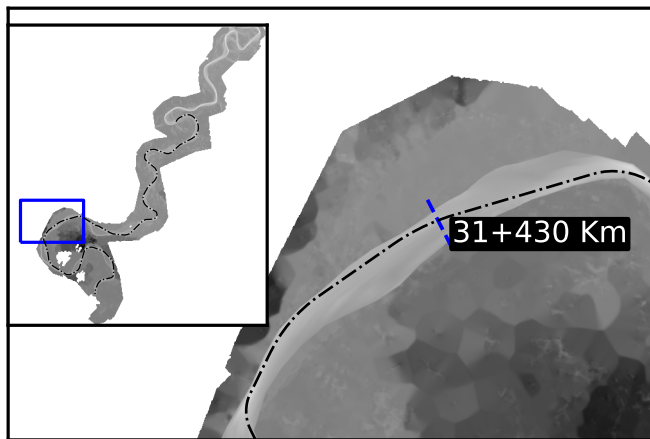
Vista en planta



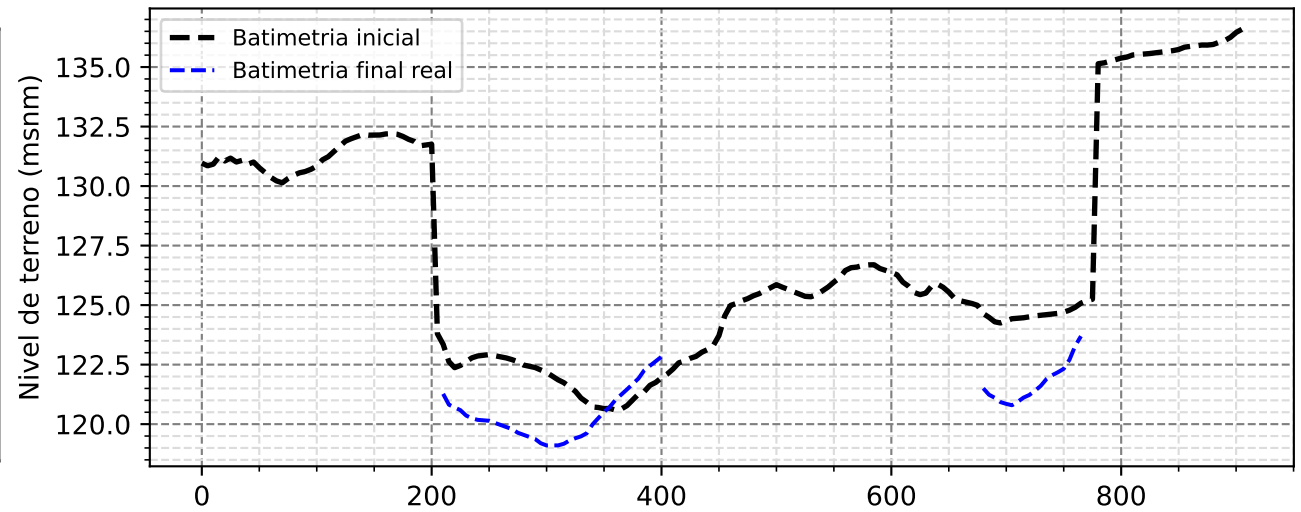
Seccion 29+220 Km



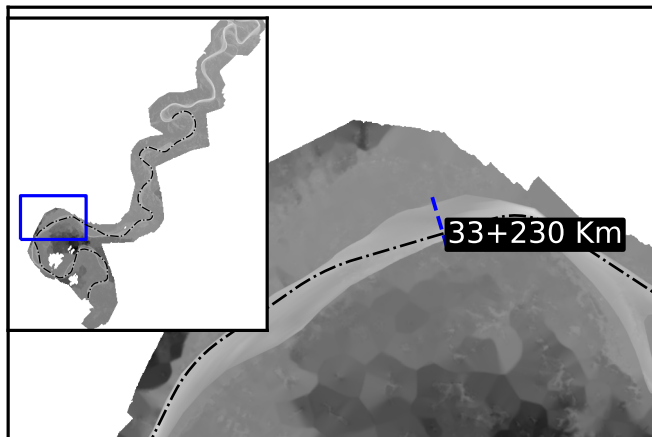
Vista en planta



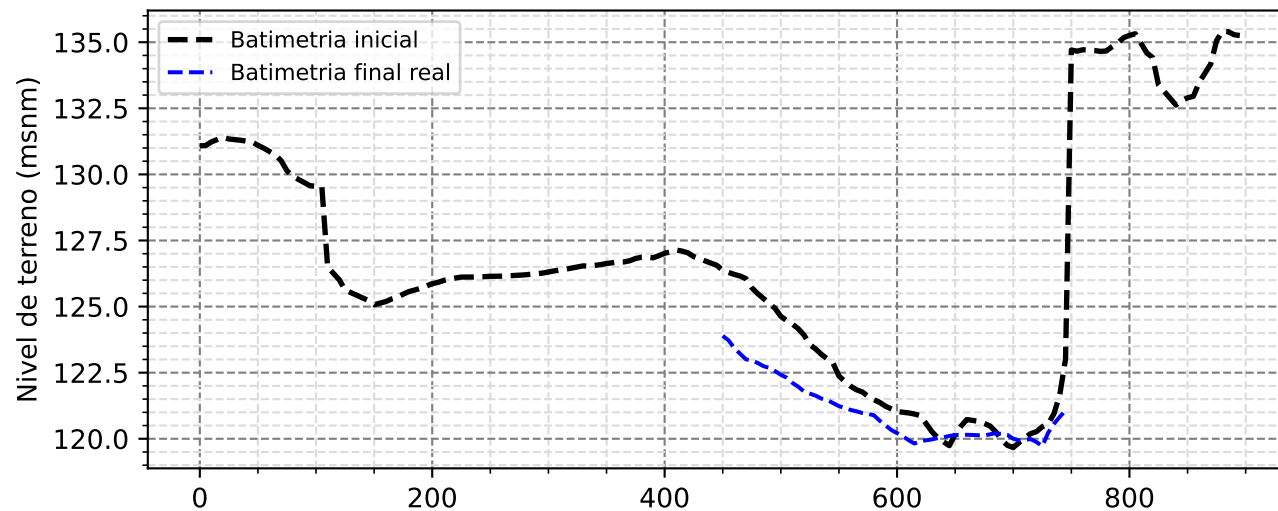
Seccion 31+430 Km



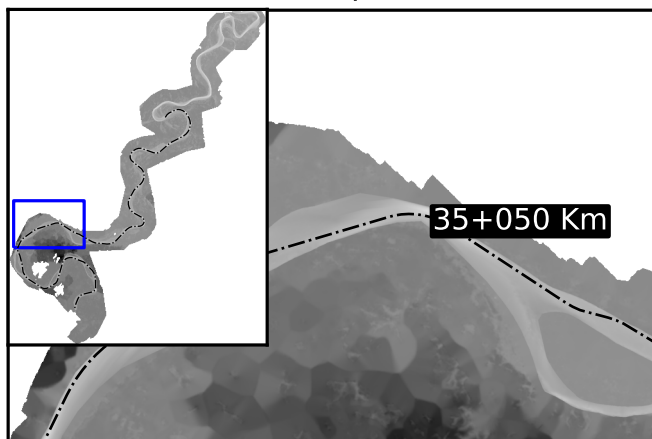
Vista en planta



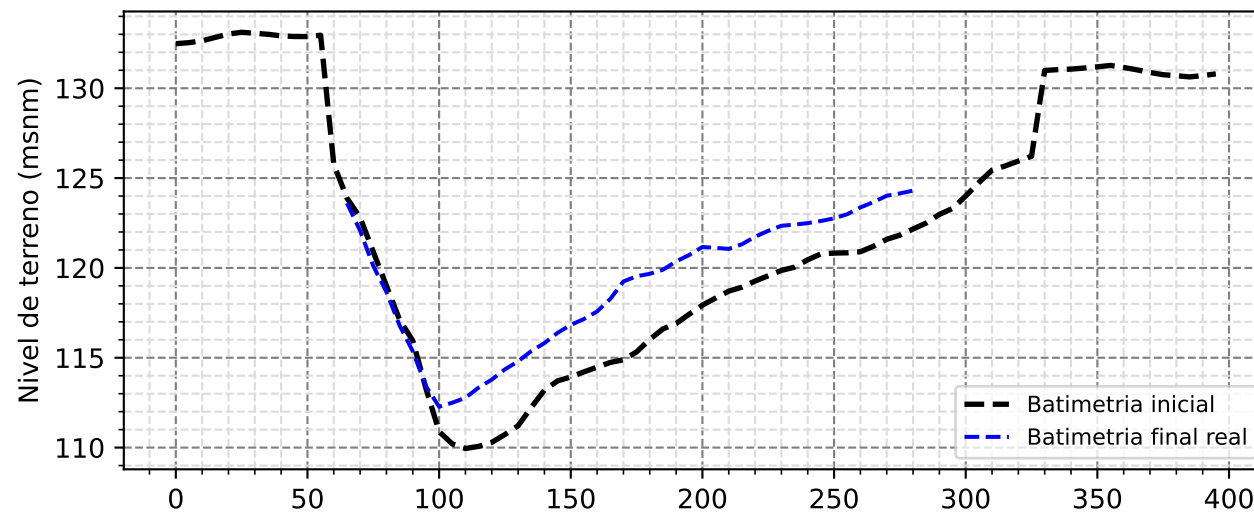
Seccion 33+230 Km



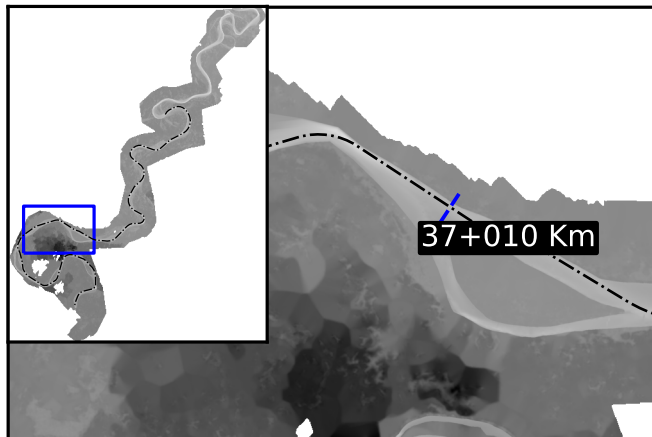
Vista en planta



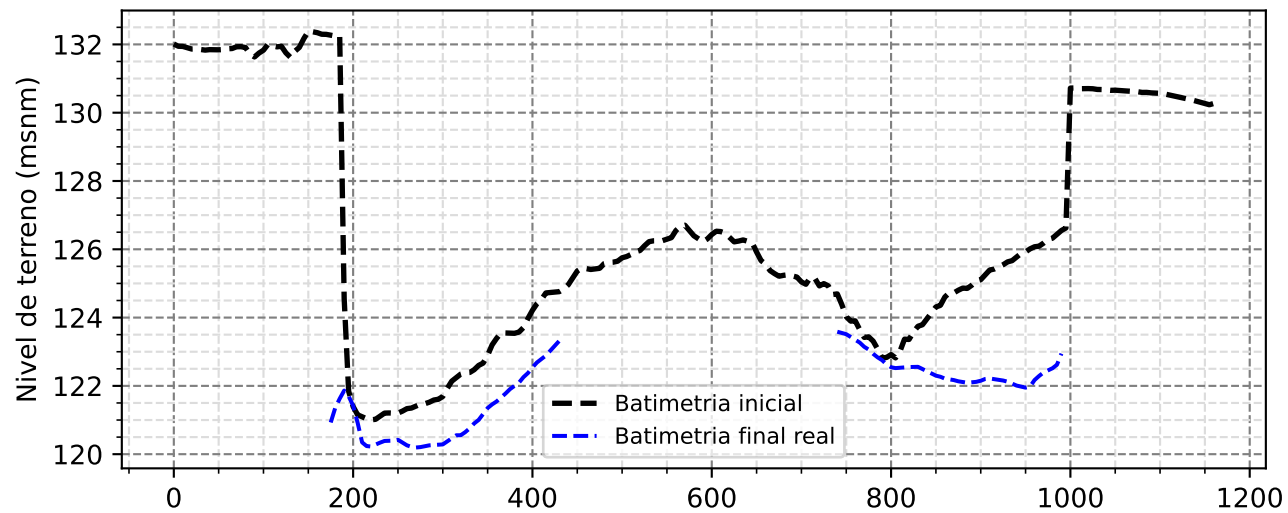
Seccion 35+050 Km



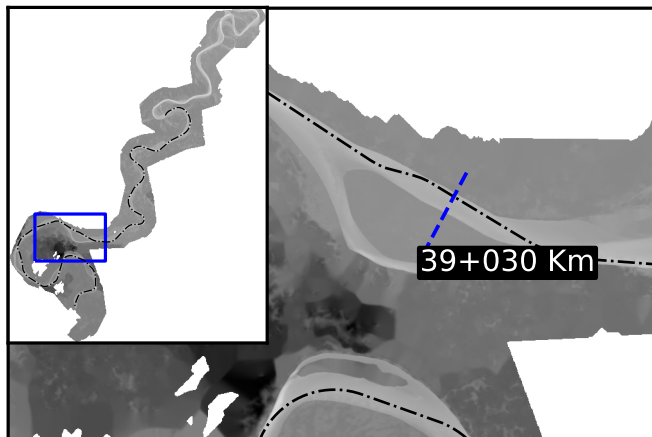
Vista en planta



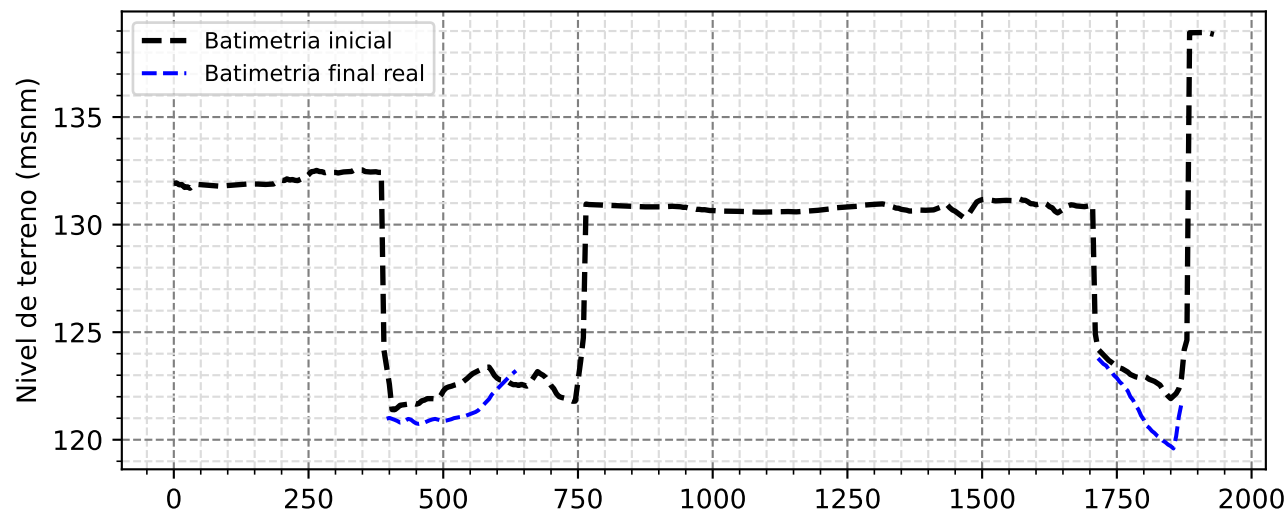
Seccion 37+010 Km



Vista en planta



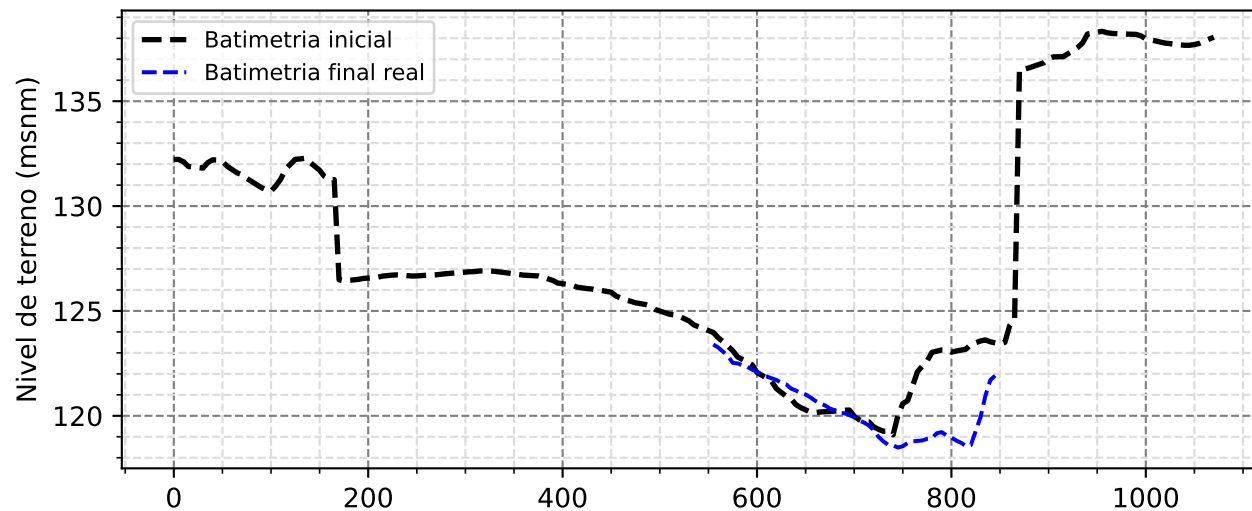
Seccion 39+030 Km



Vista en planta



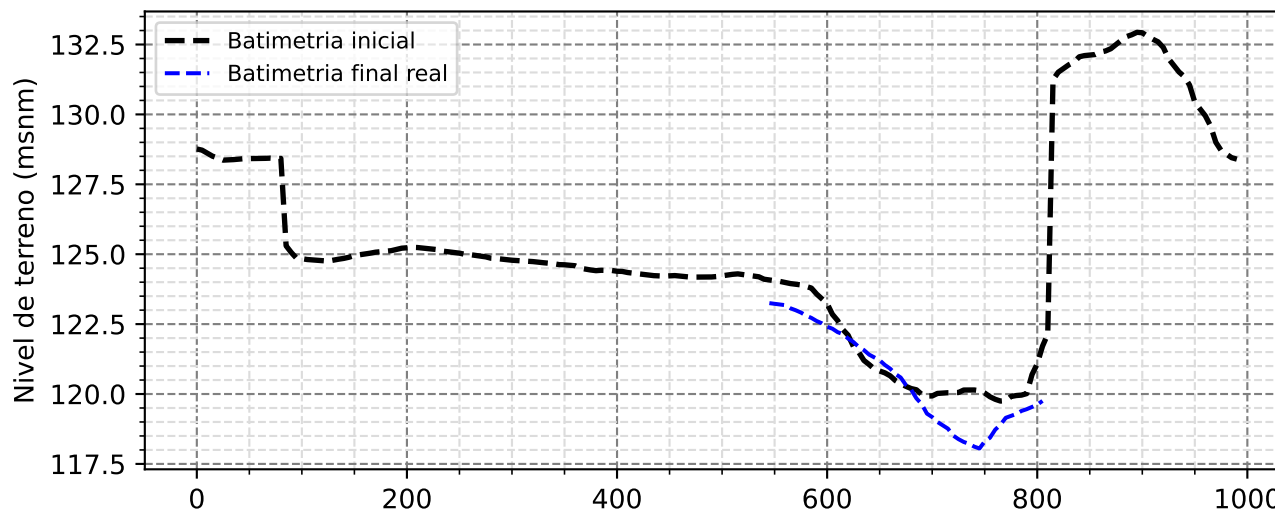
Seccion 41+120 Km



Vista en planta



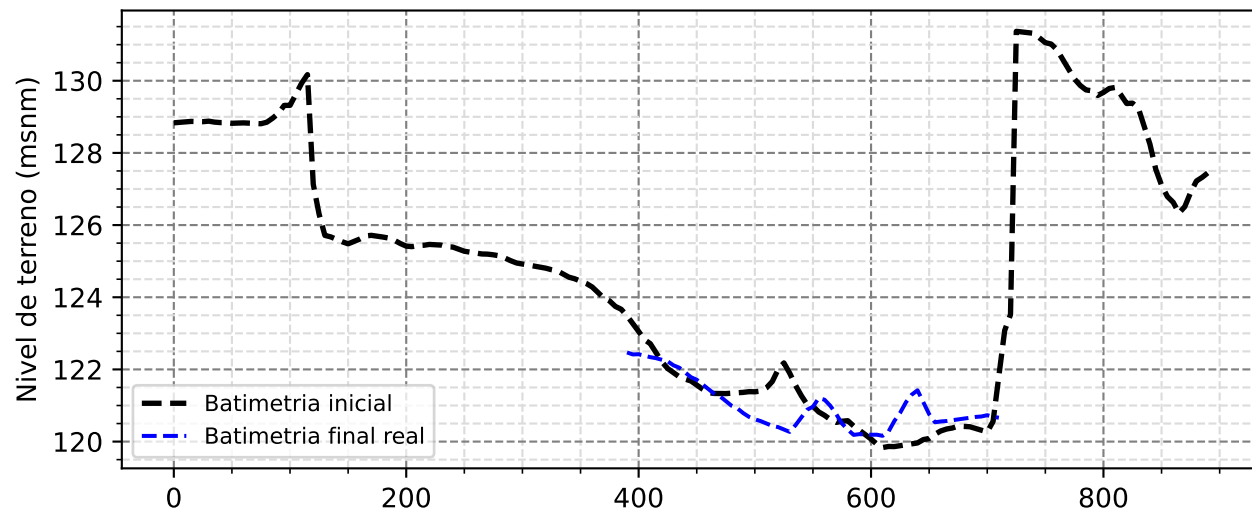
Seccion 43+240 Km



Vista en planta



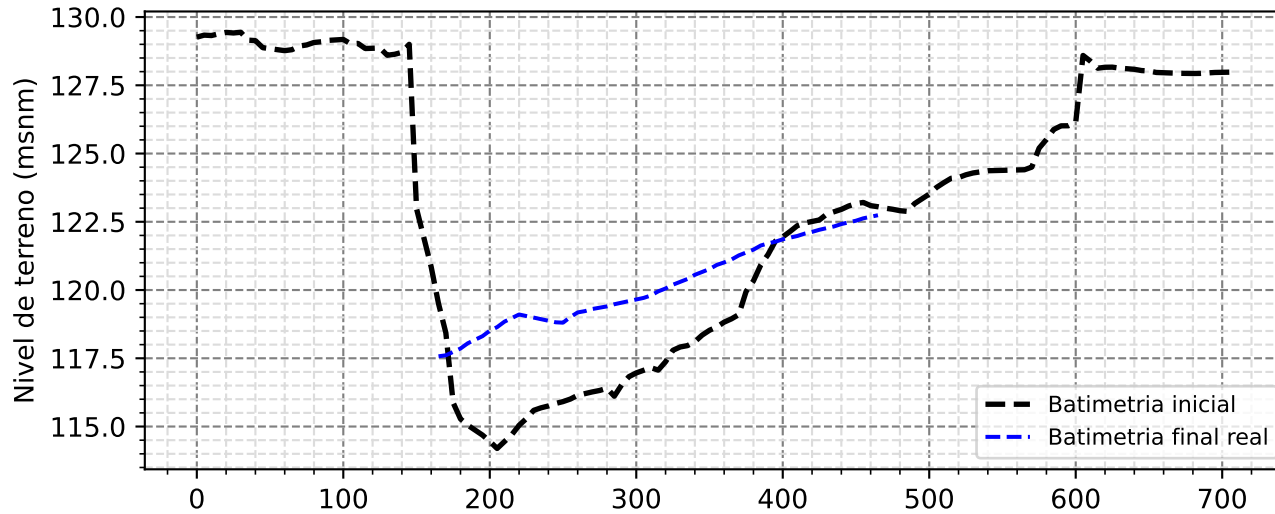
Seccion 45+320 Km



Vista en planta



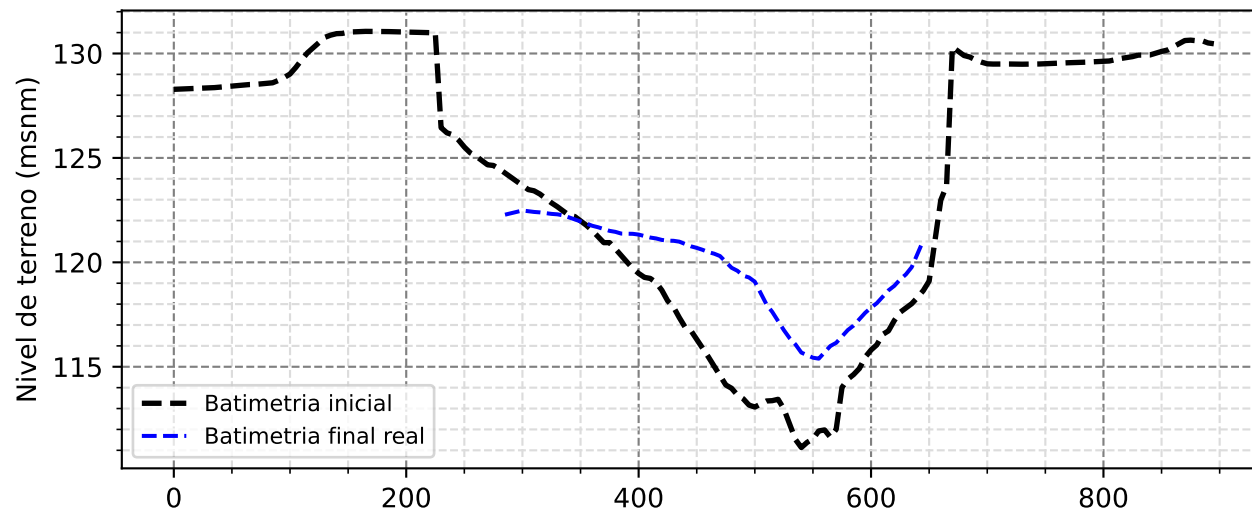
Seccion 47+420 Km



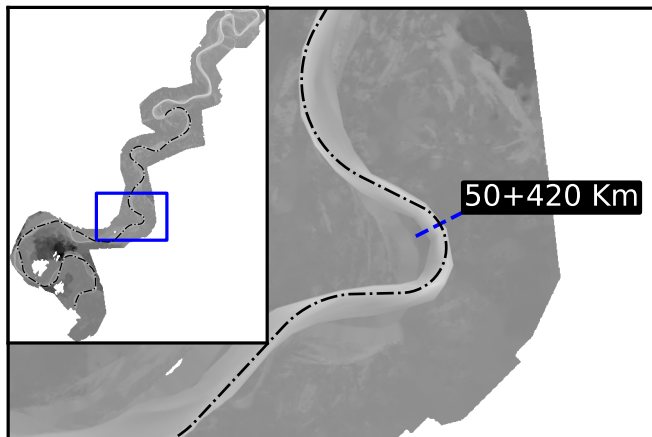
Vista en planta



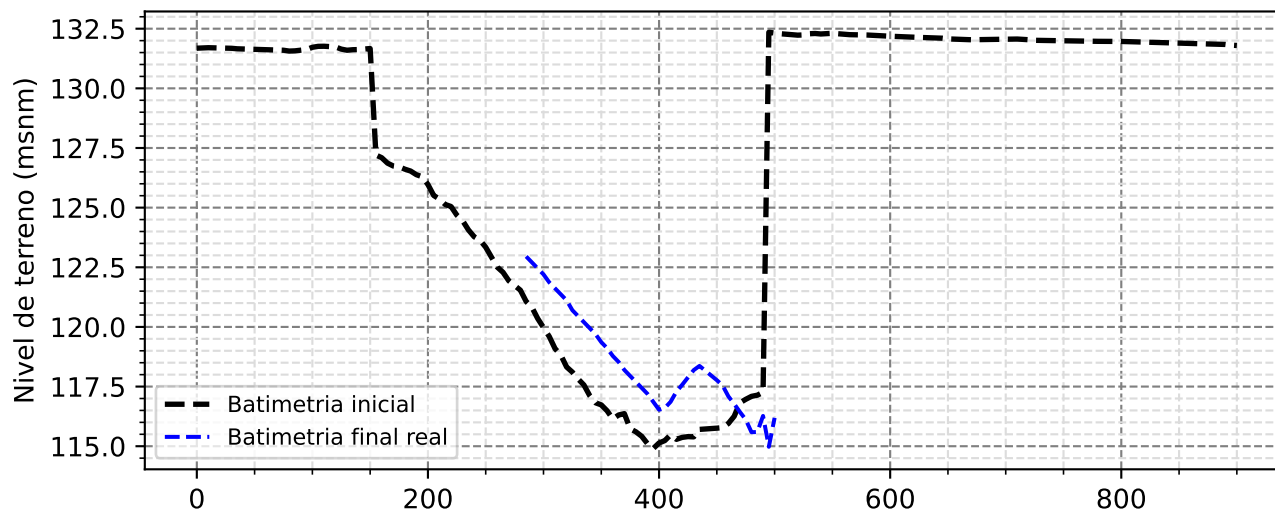
Seccion 49+420 Km



Vista en planta



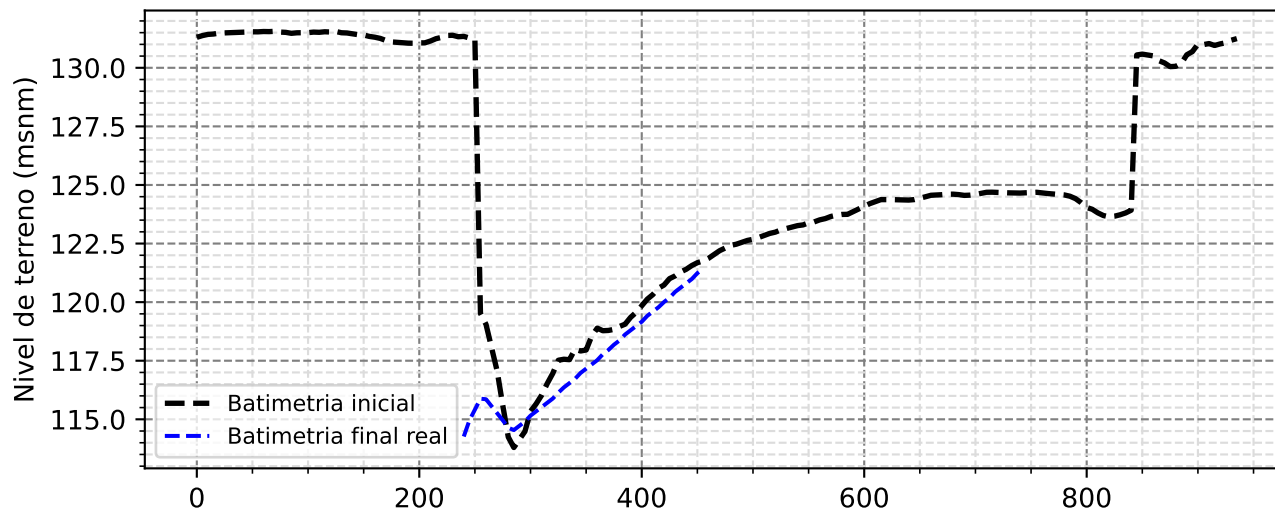
Seccion 50+420 Km



Vista en planta



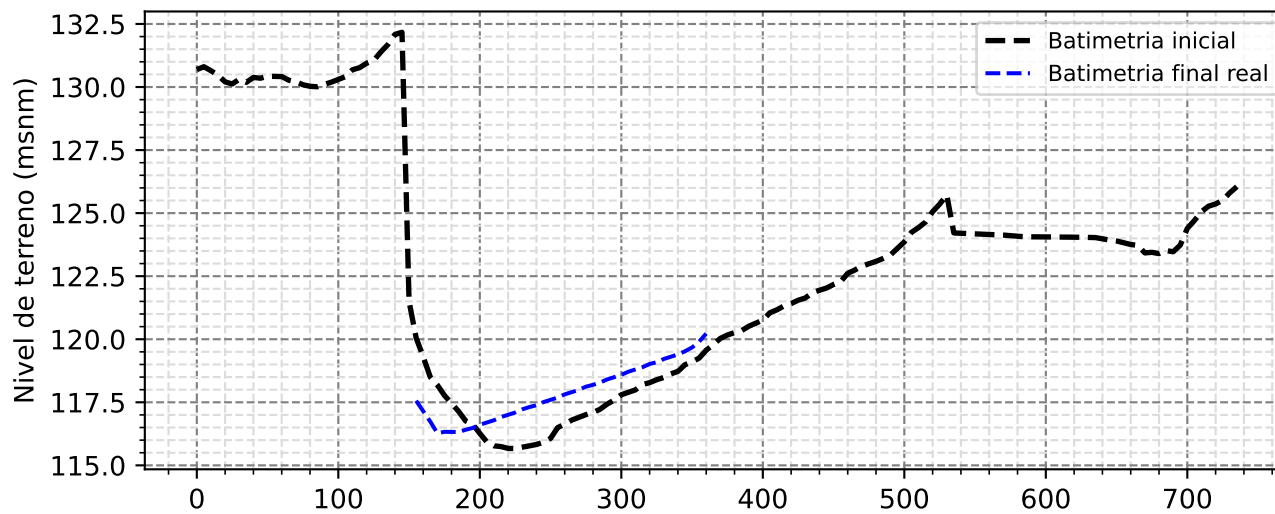
Seccion 53+030 Km



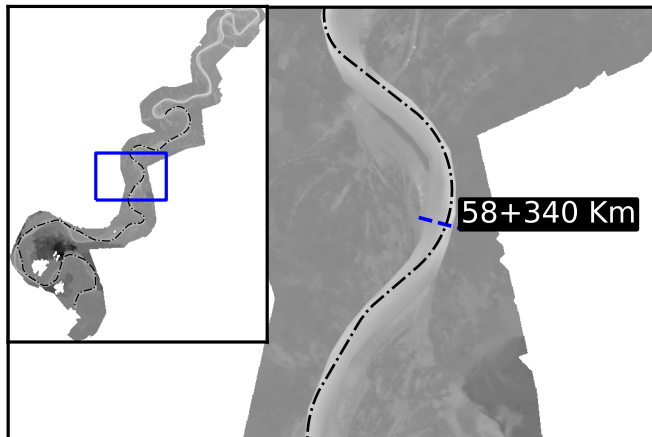
Vista en planta



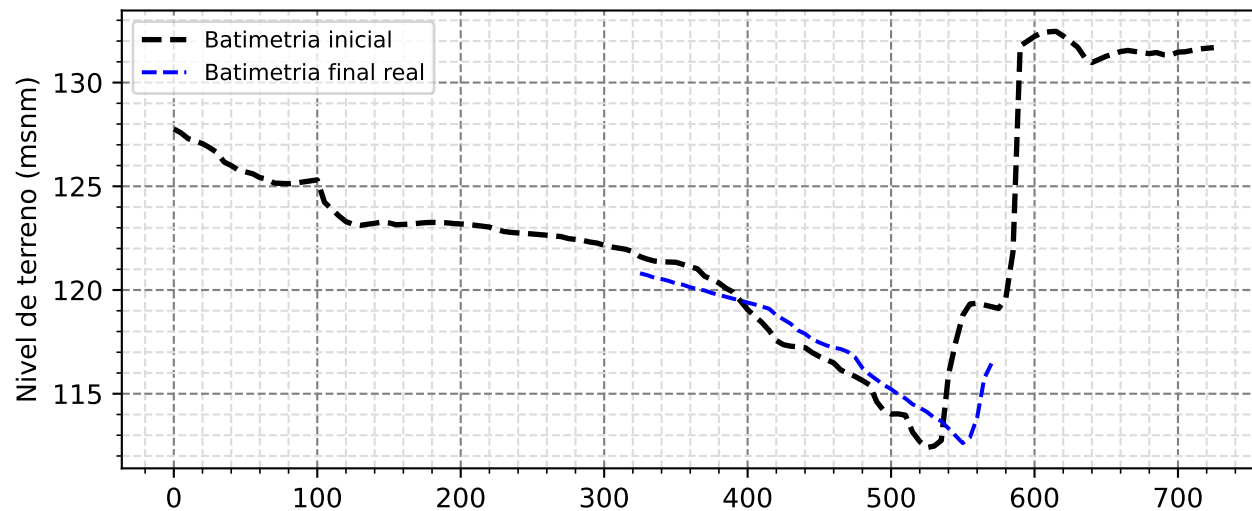
Seccion 55+210 Km



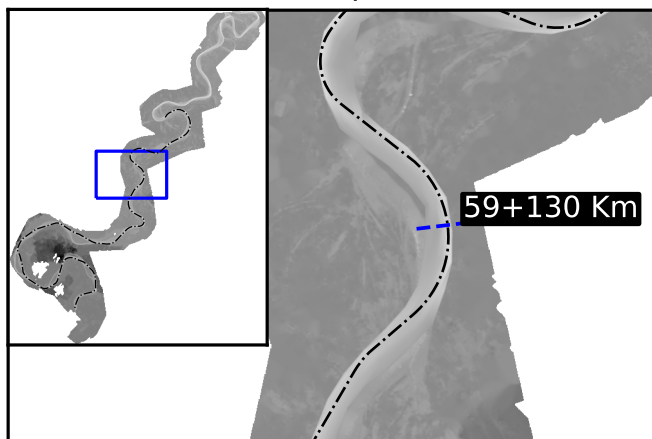
Vista en planta



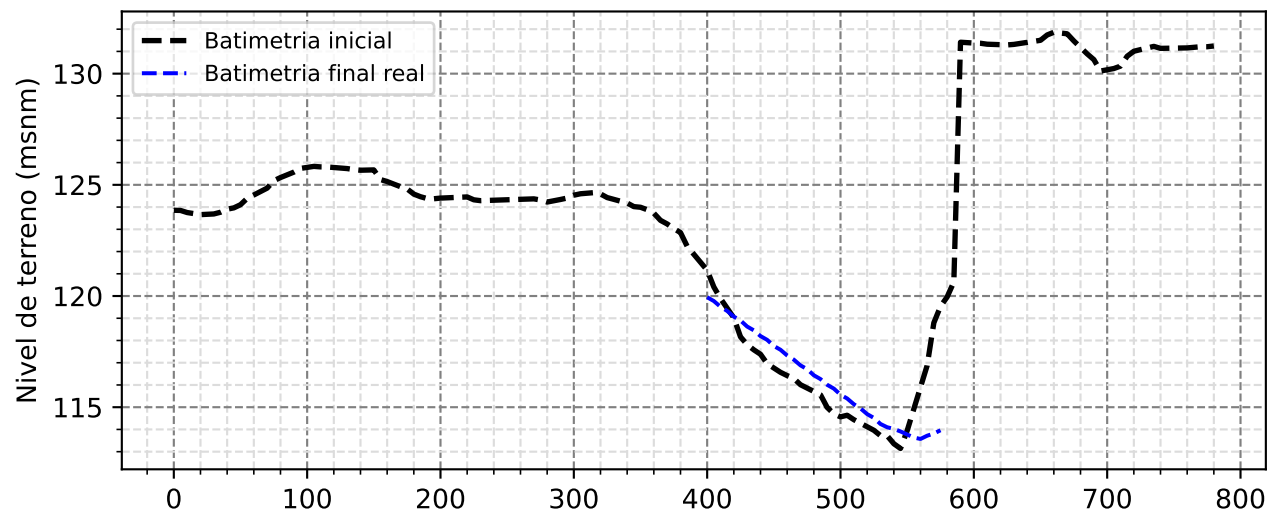
Seccion 58+340 Km



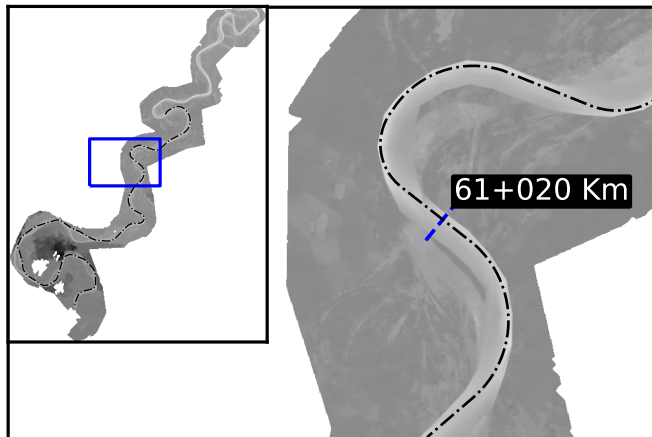
Vista en planta



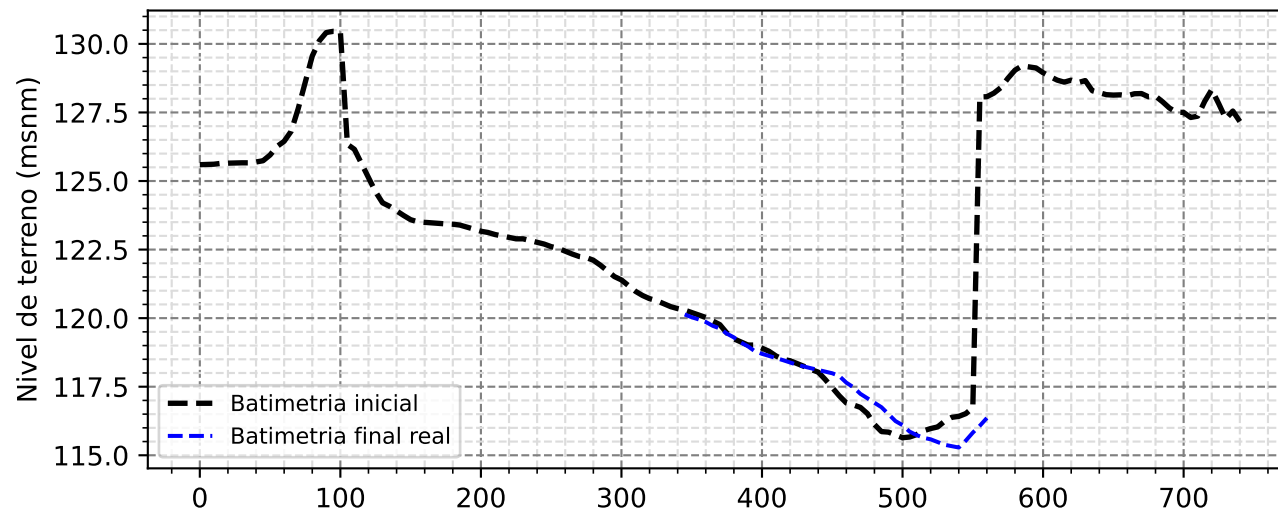
Seccion 59+130 Km



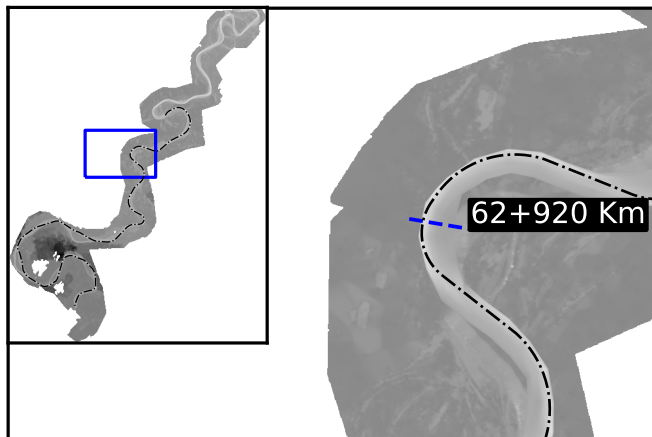
Vista en planta



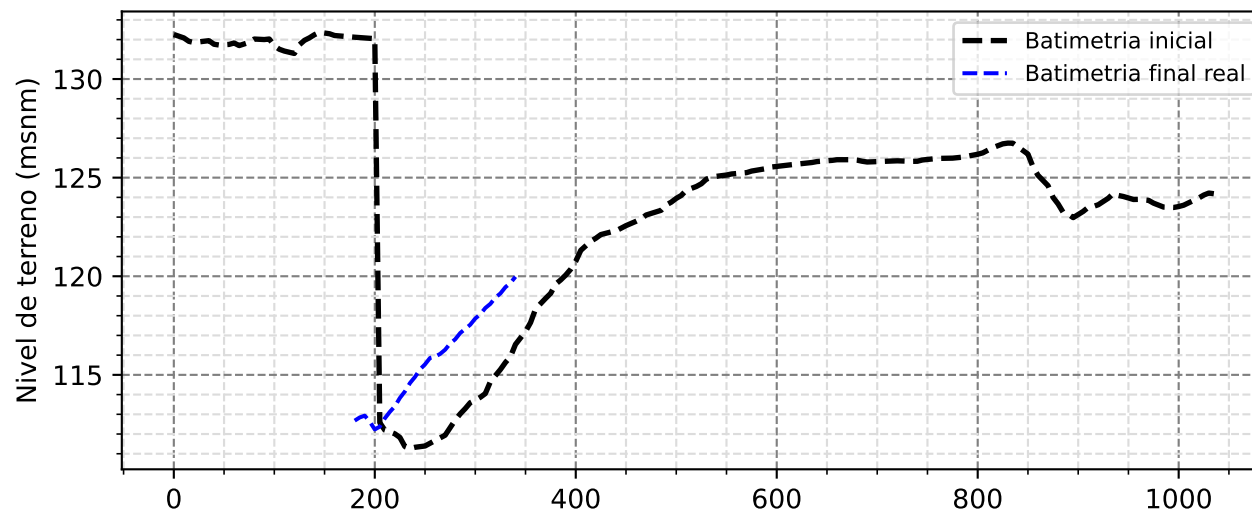
Seccion 61+020 Km



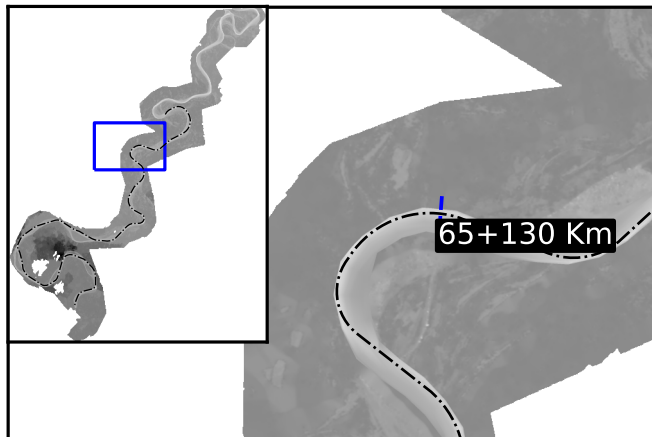
Vista en planta



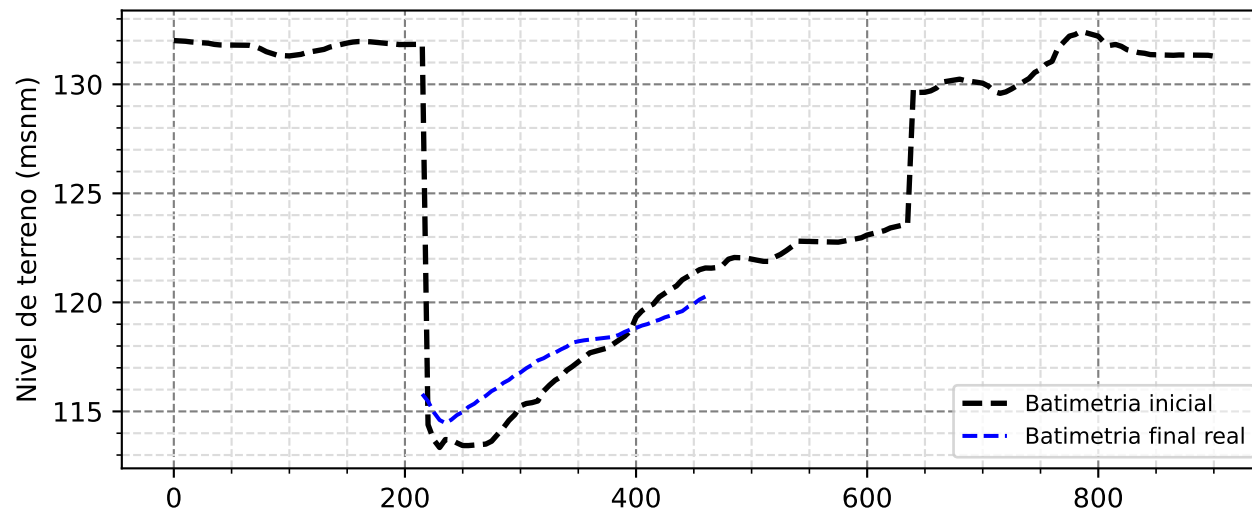
Seccion 62+920 Km



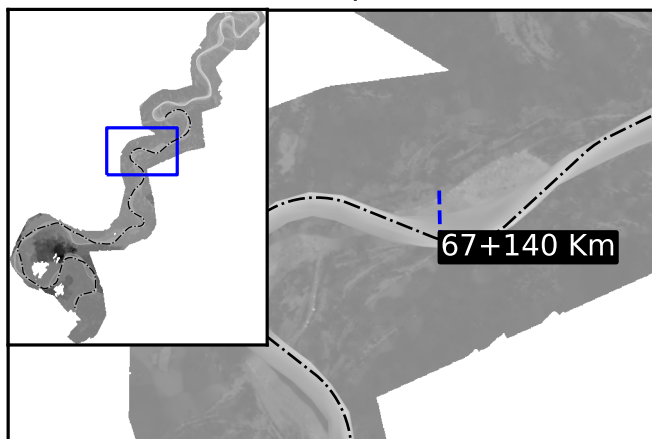
Vista en planta



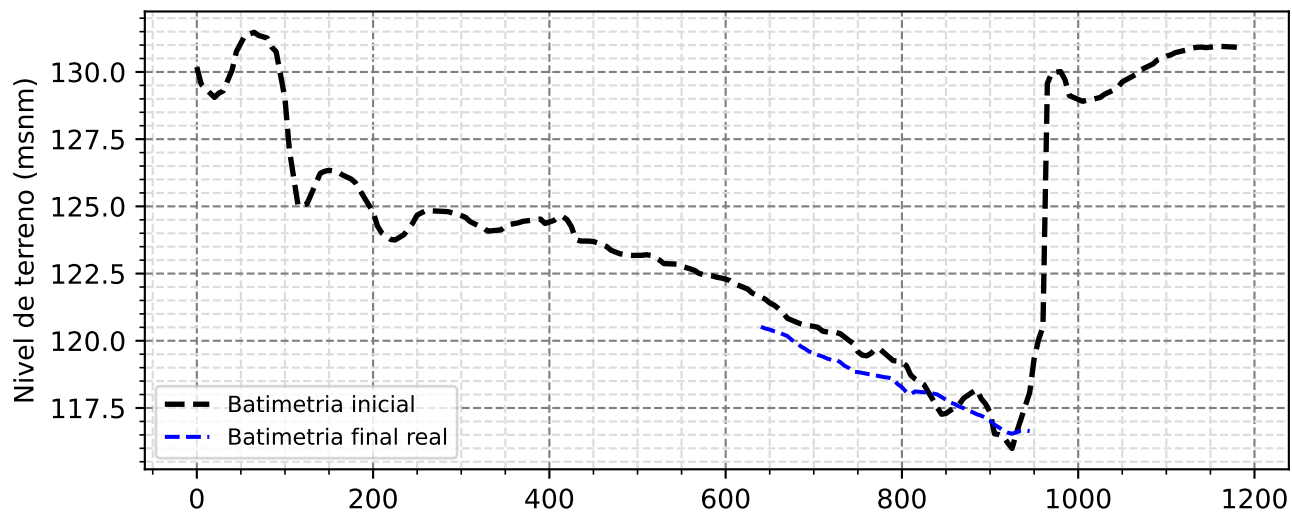
Seccion 65+130 Km



Vista en planta



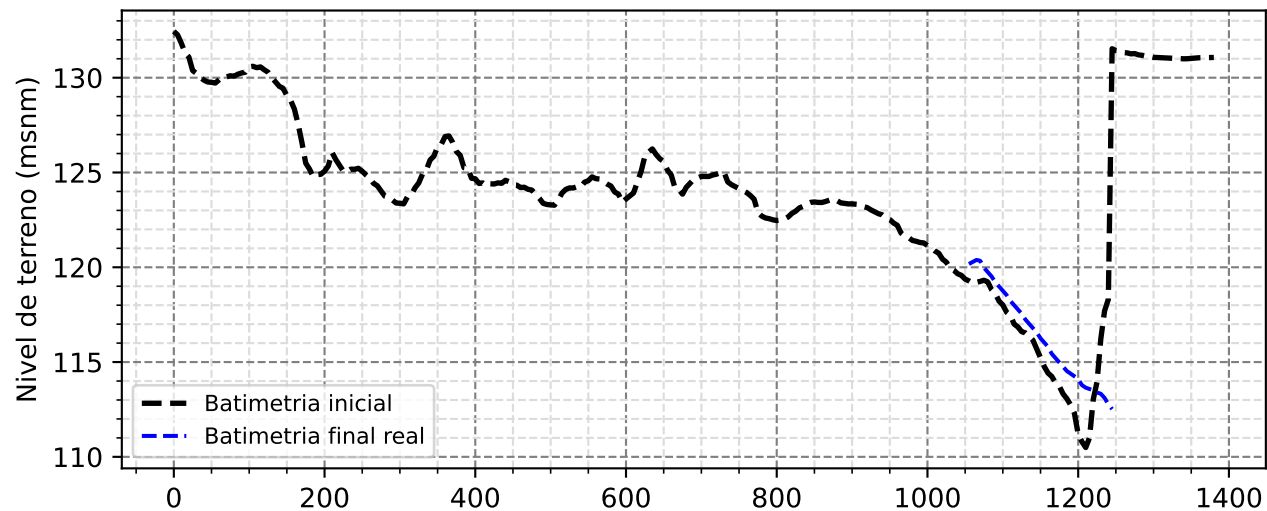
Seccion 67+140 Km



Vista en planta



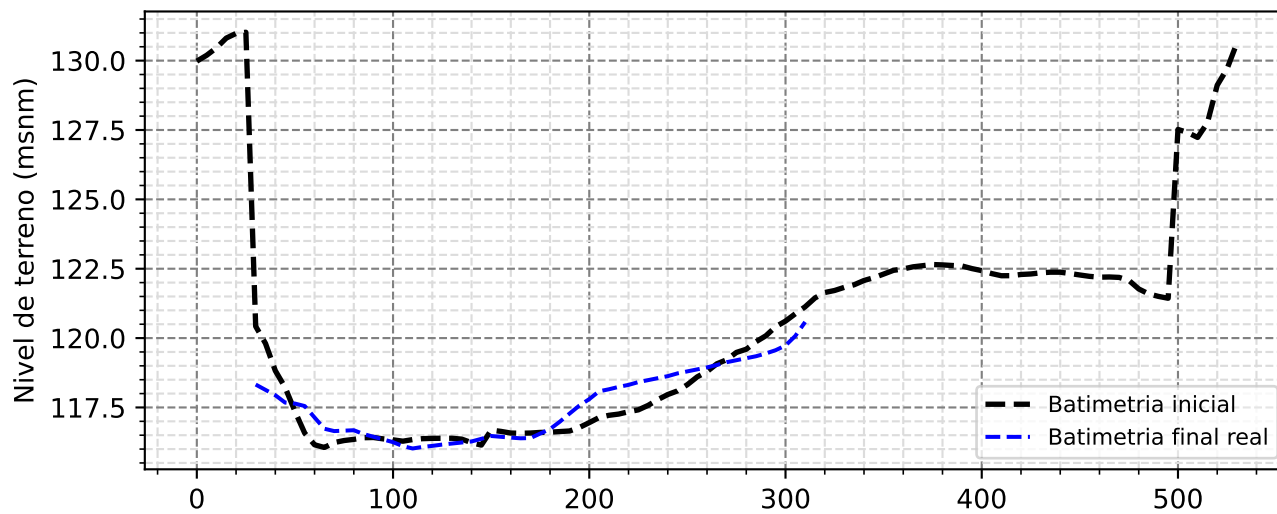
Seccion 68+520 Km



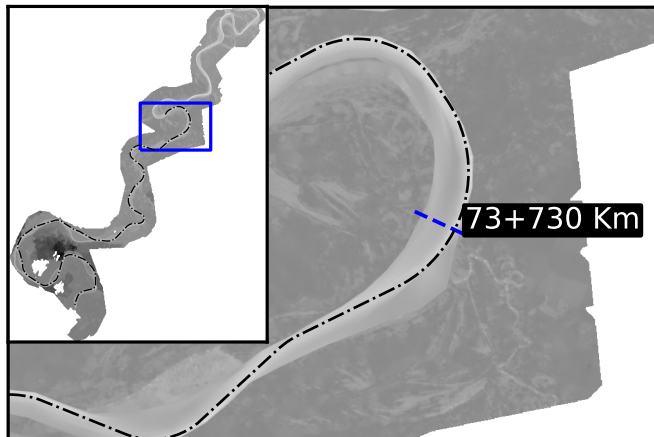
Vista en planta



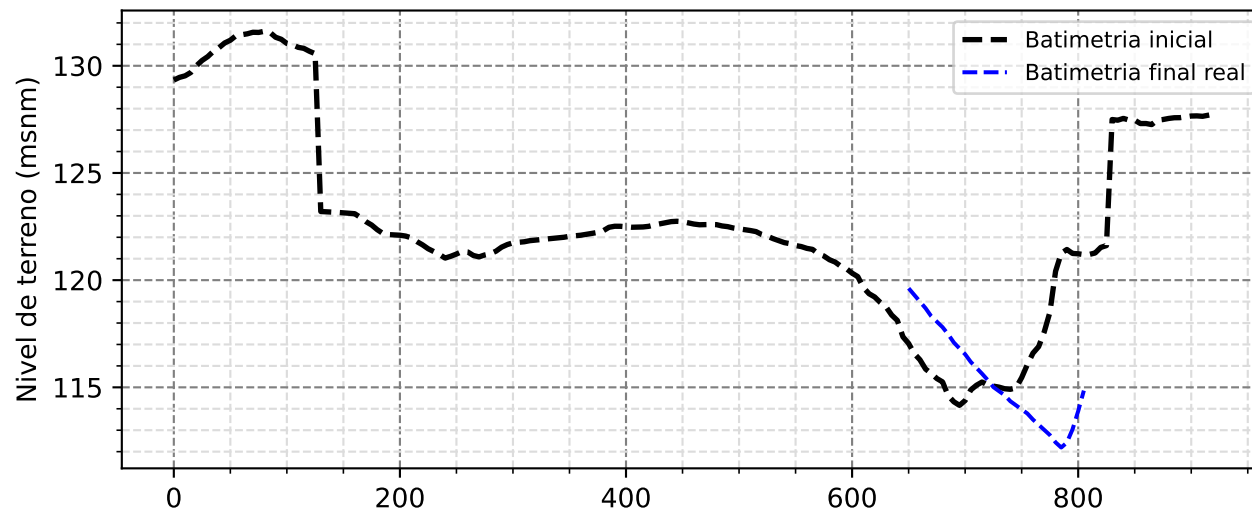
Seccion 71+100 Km



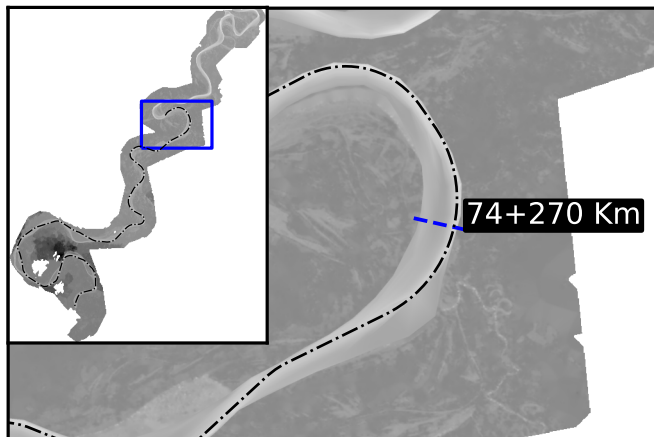
Vista en planta



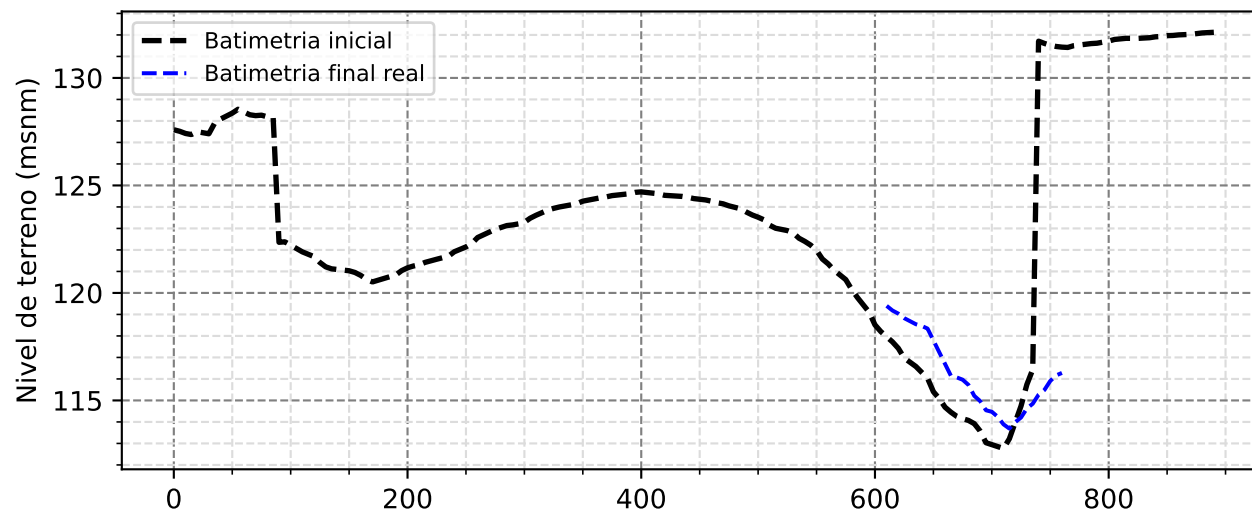
Seccion 73+730 Km



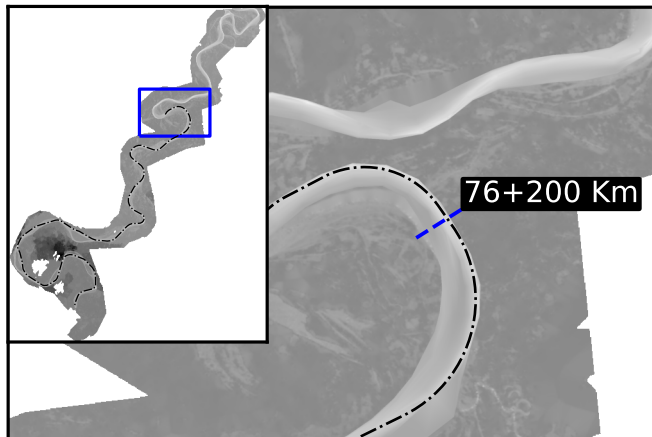
Vista en planta



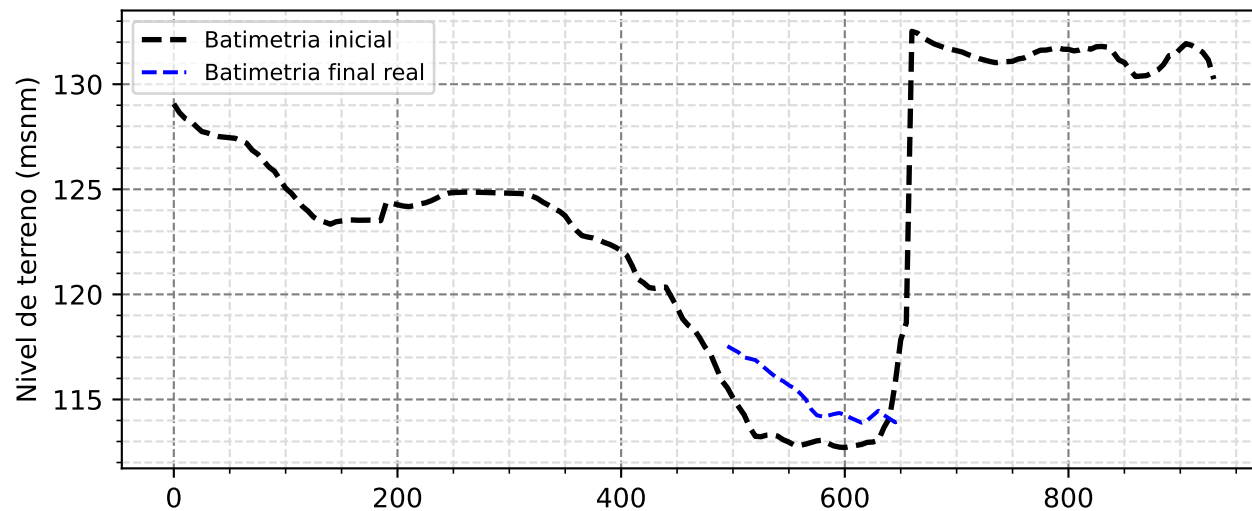
Seccion 74+270 Km



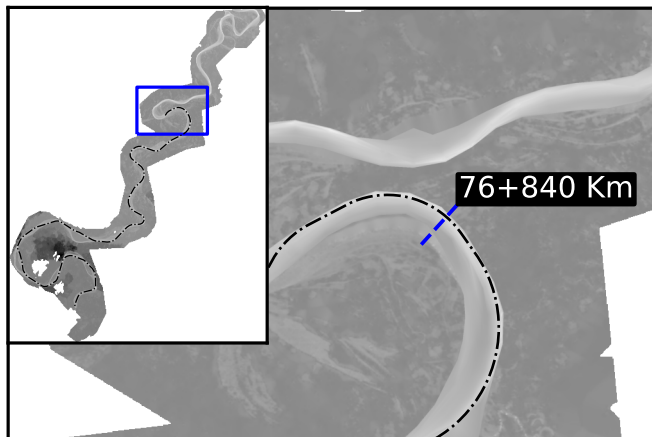
Vista en planta



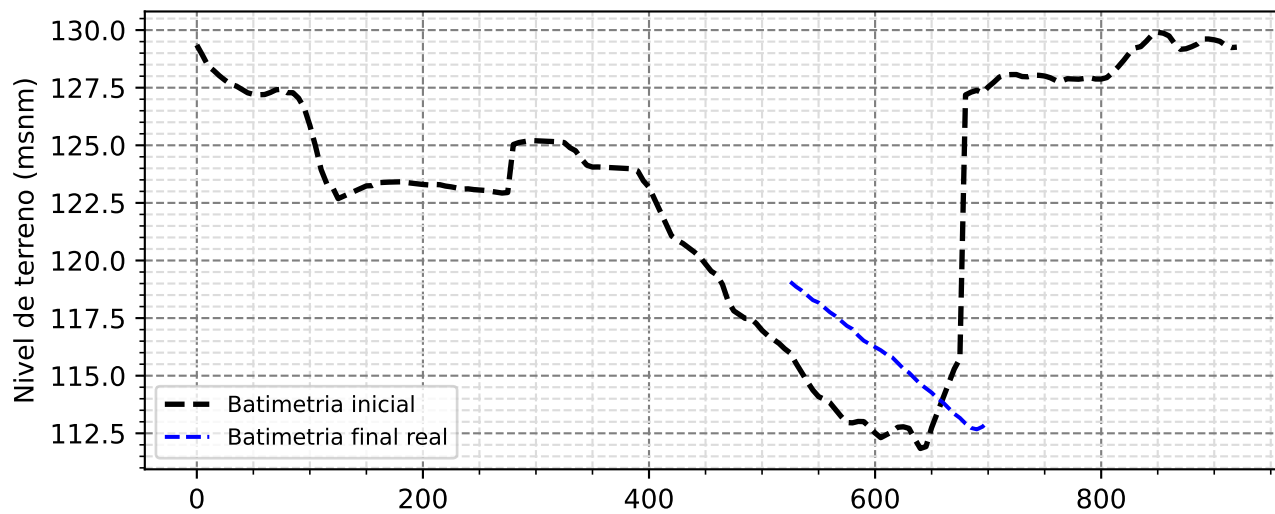
Seccion 76+200 Km



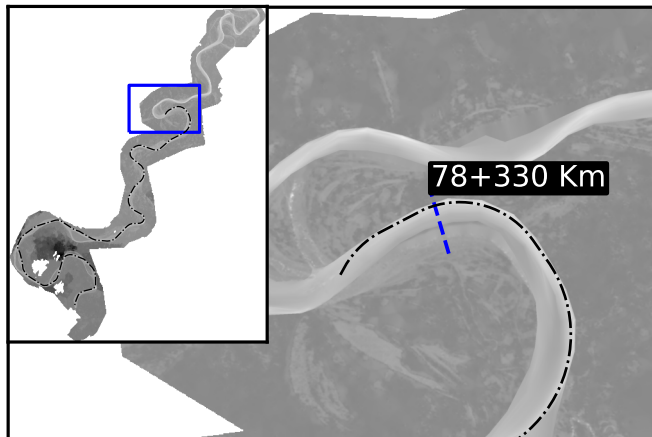
Vista en planta



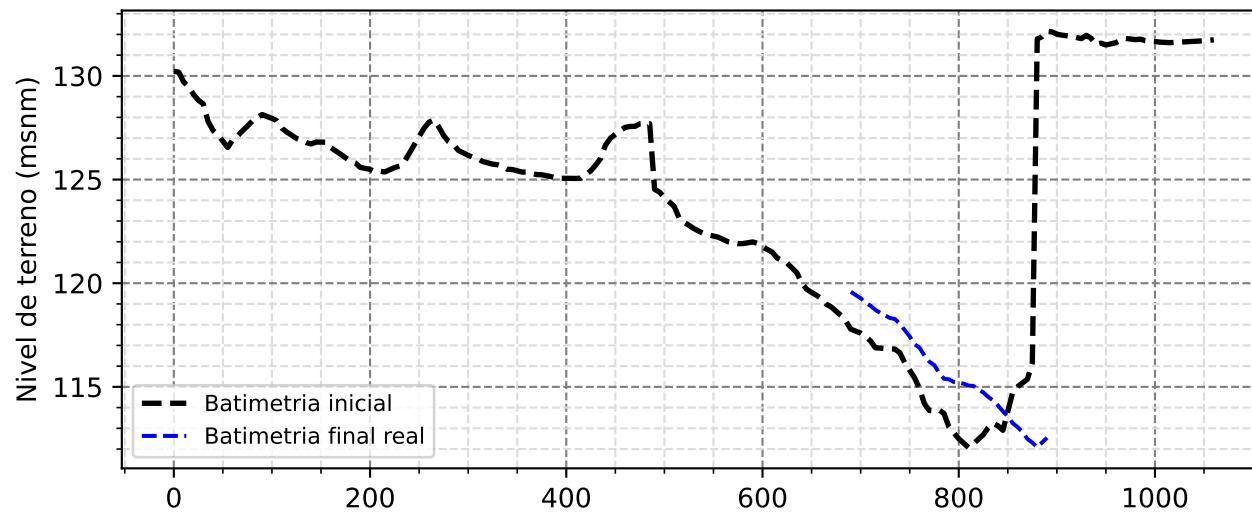
Seccion 76+840 Km



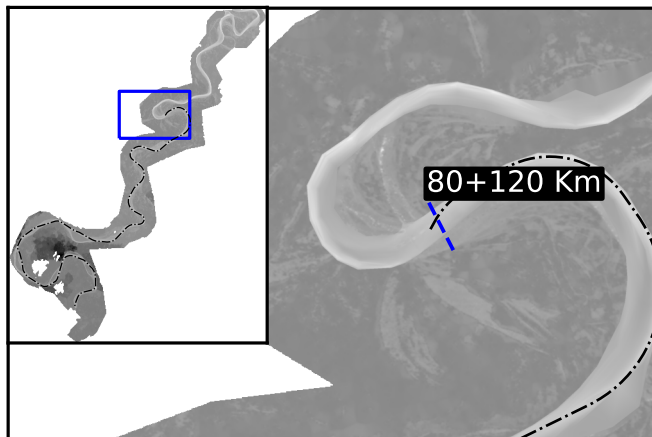
Vista en planta



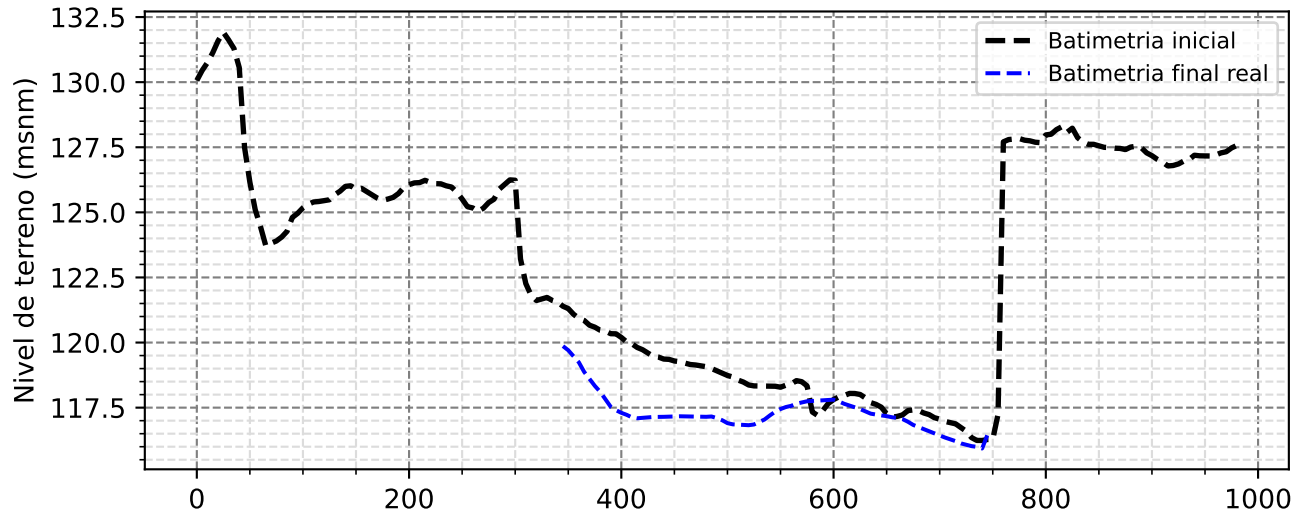
Seccion 78+330 Km



Vista en planta

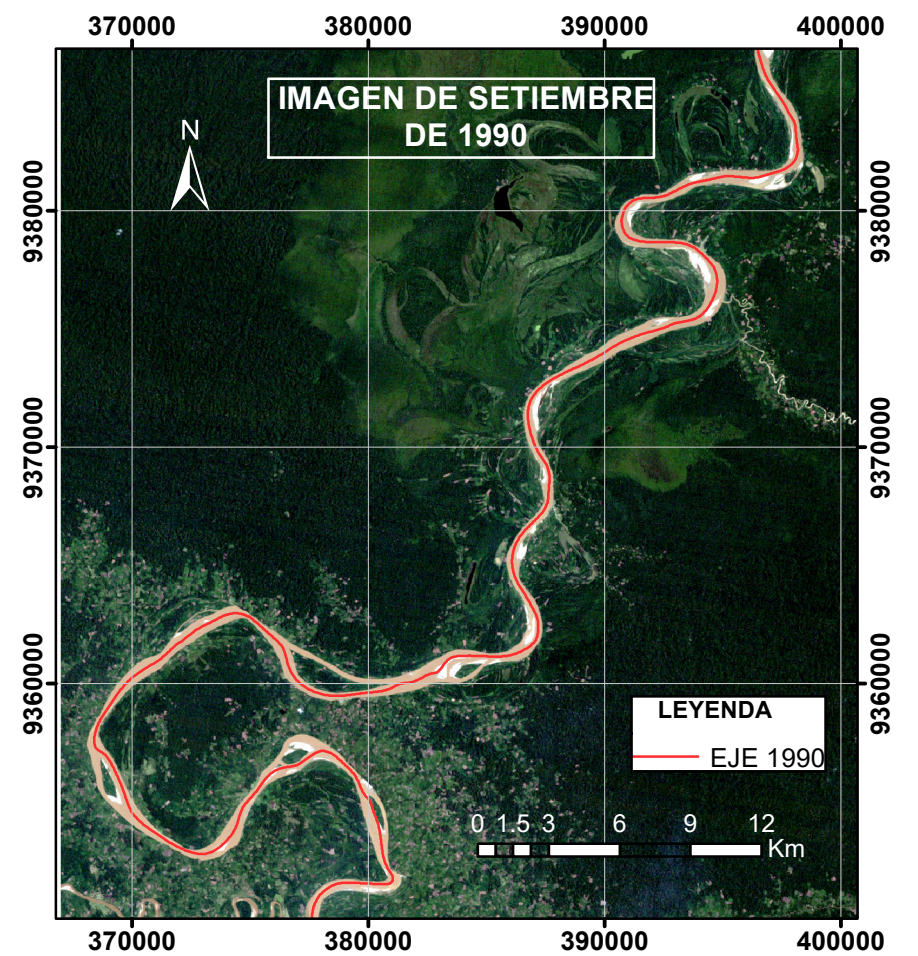
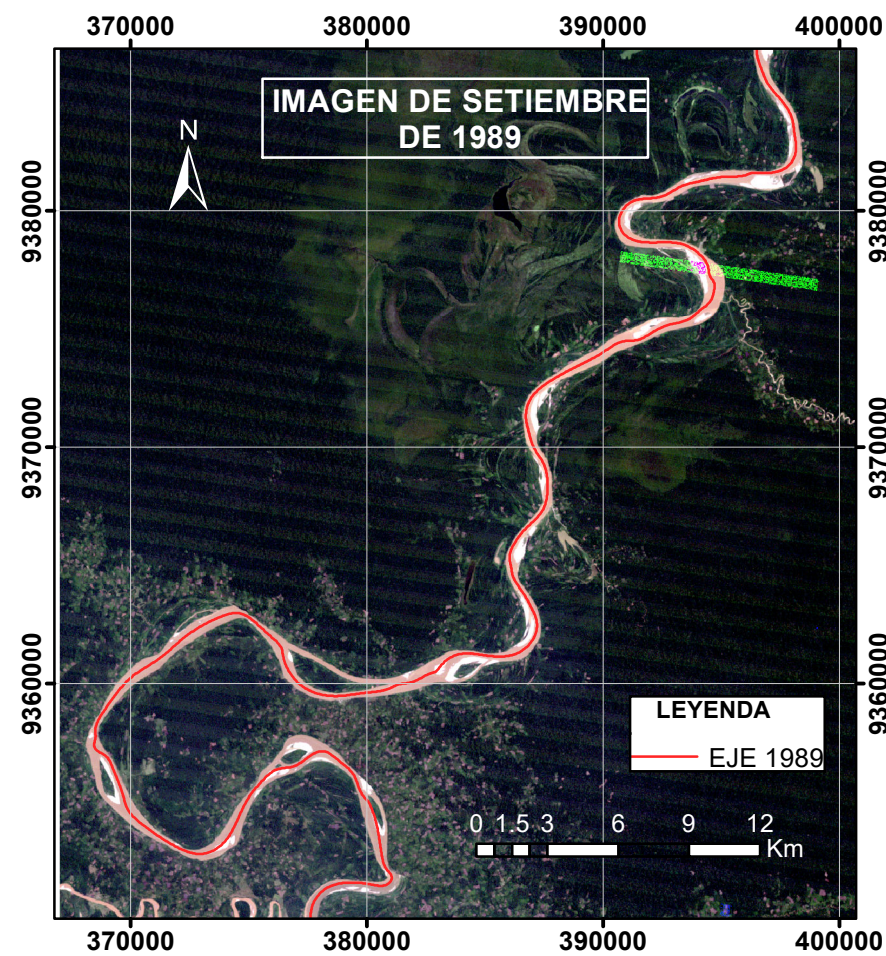
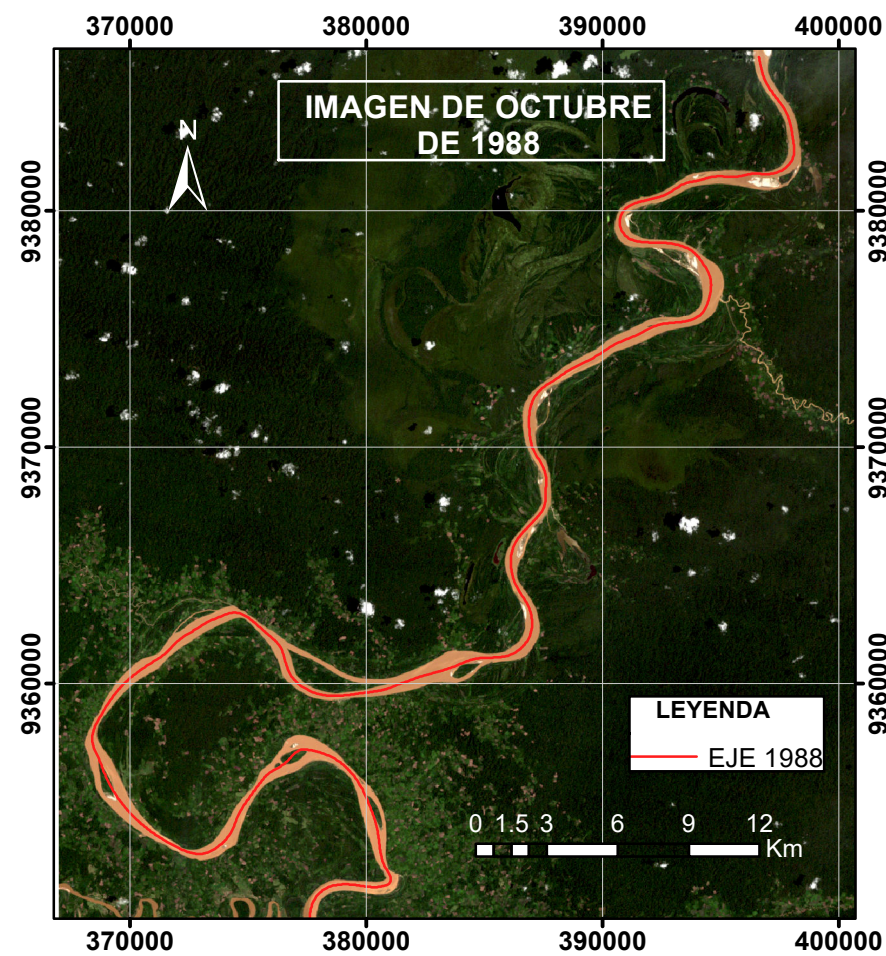
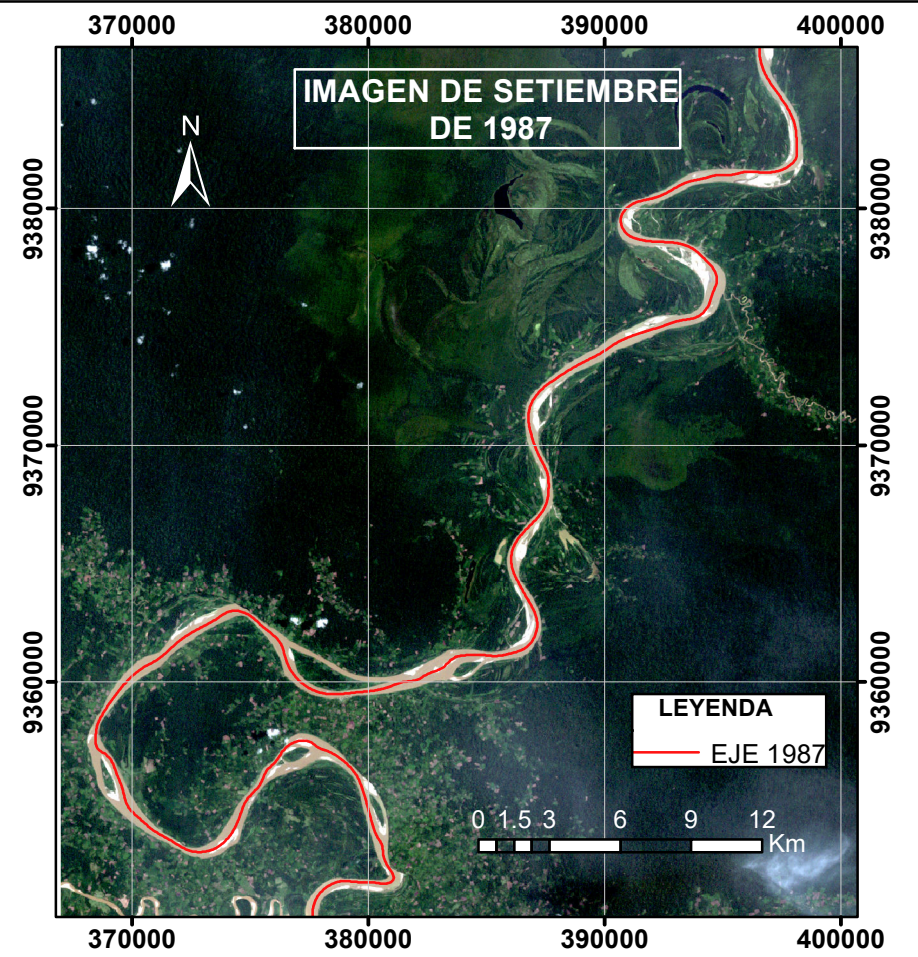
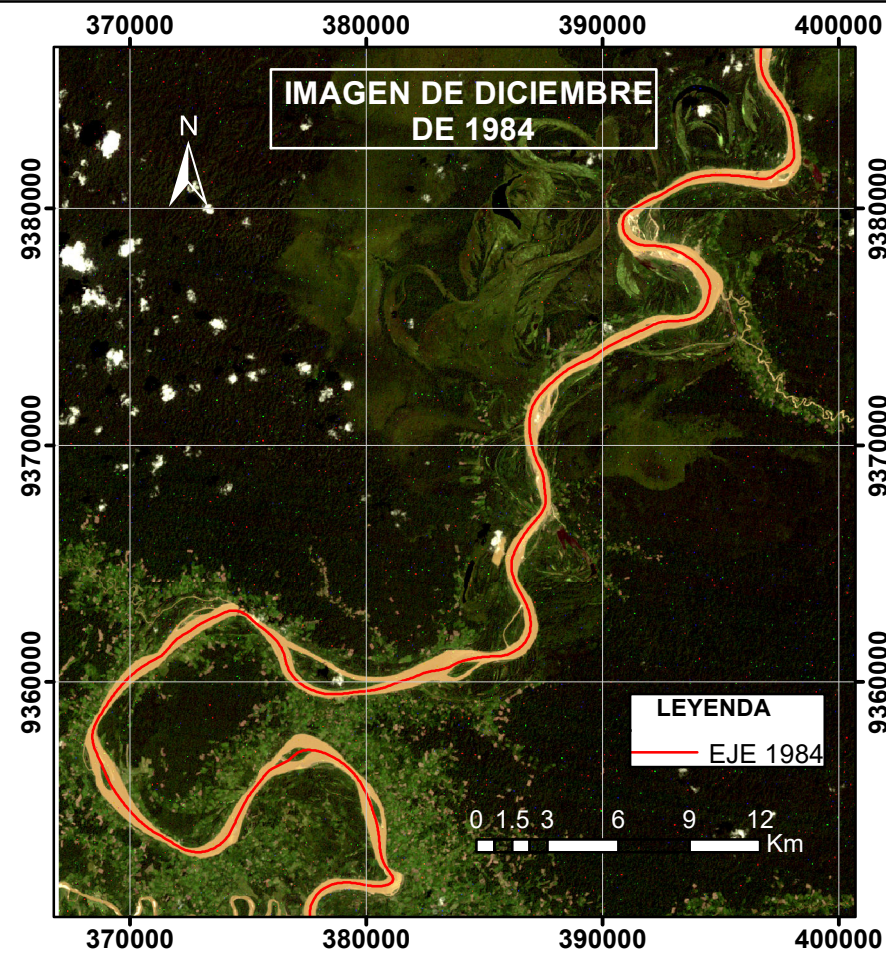


Seccion 80+120 Km



ANEXO V: EVOLUCIÓN DEL EJE CENTRAL

ANEXO V.1 IMÁGENES SATELITALES DE CADA AÑO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO: IMÁGENES SATELIATALES LANDSAT
 (COLOR REAL) ENTRE 1984-1990

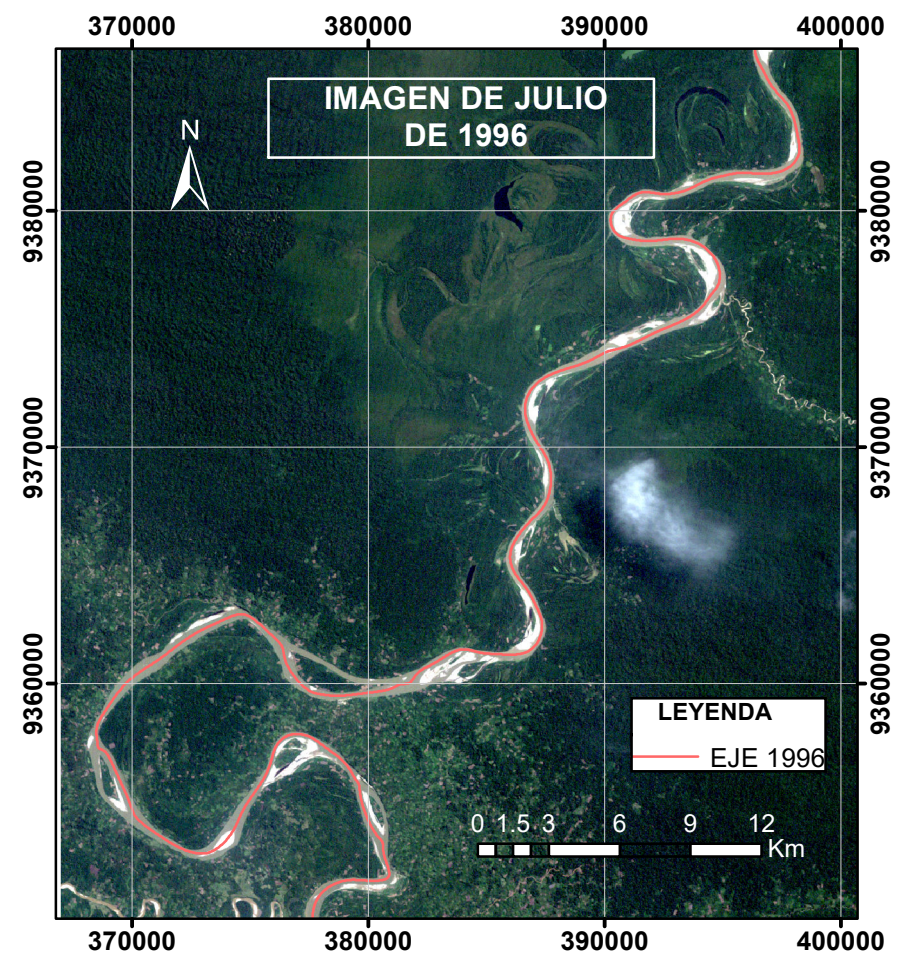
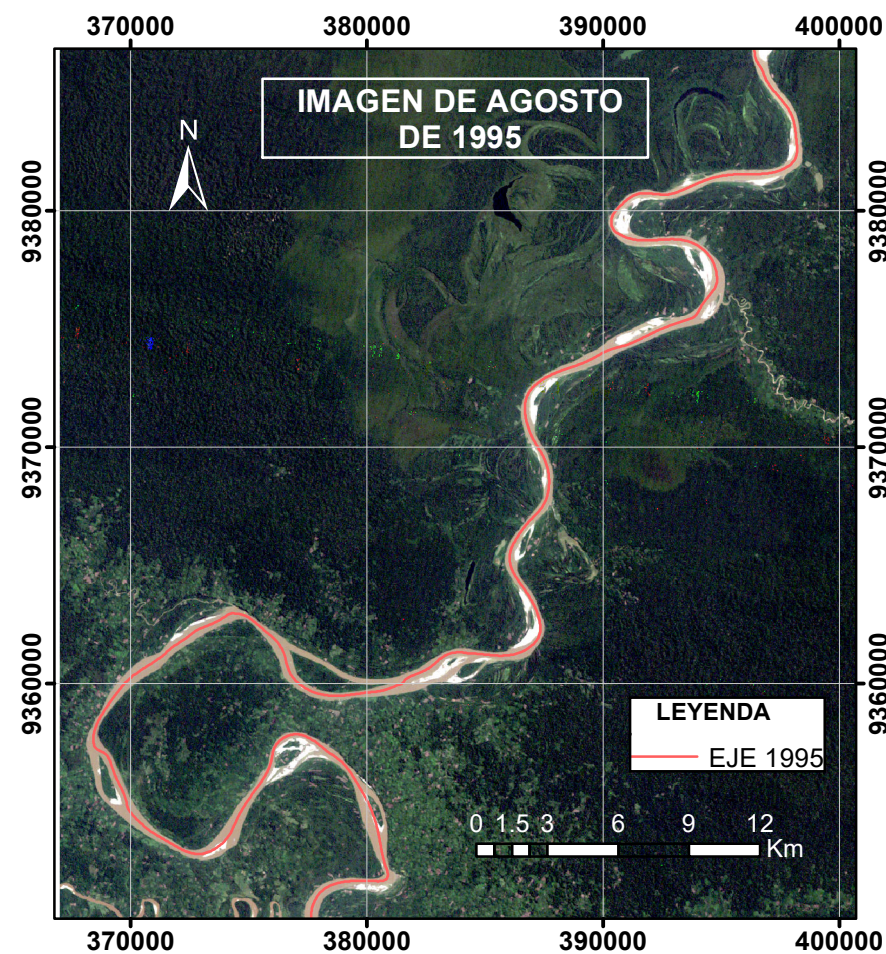
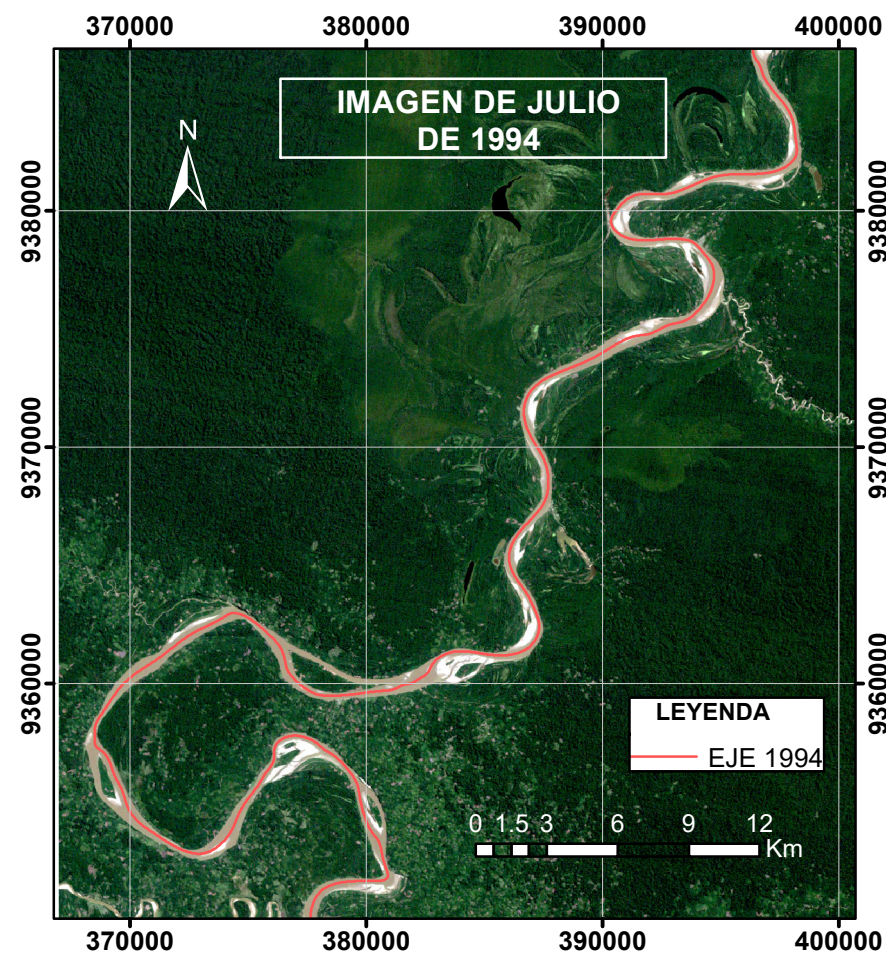
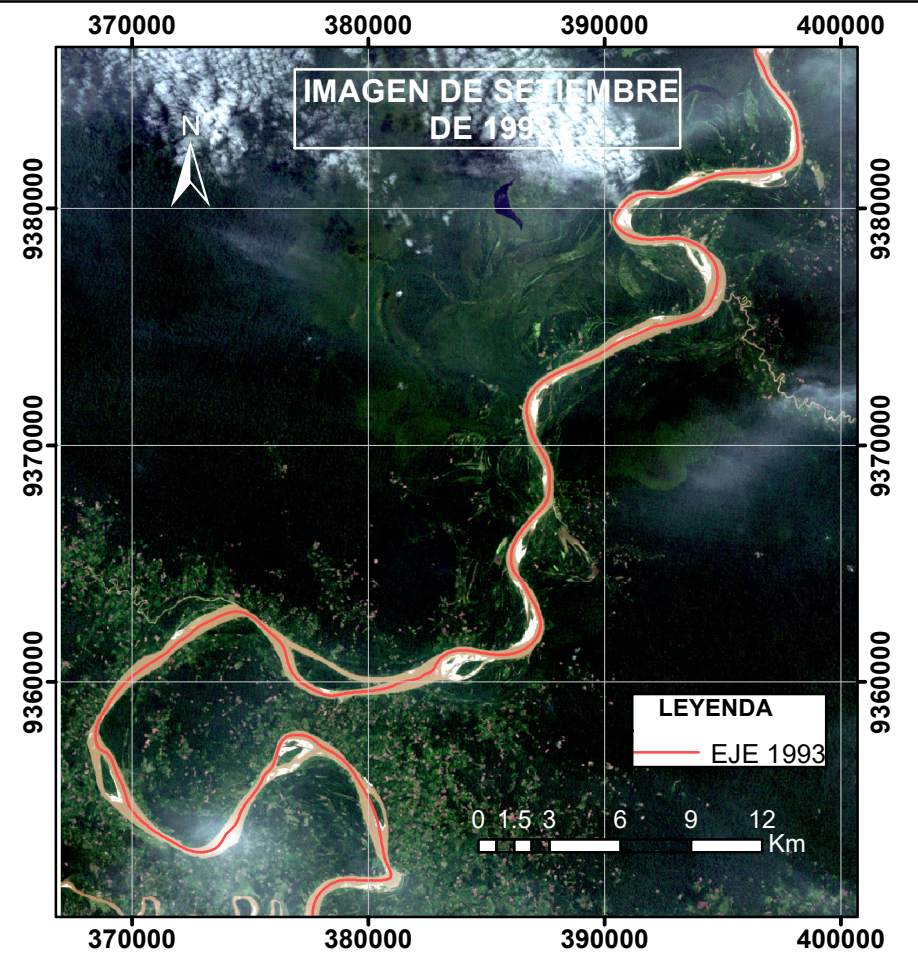
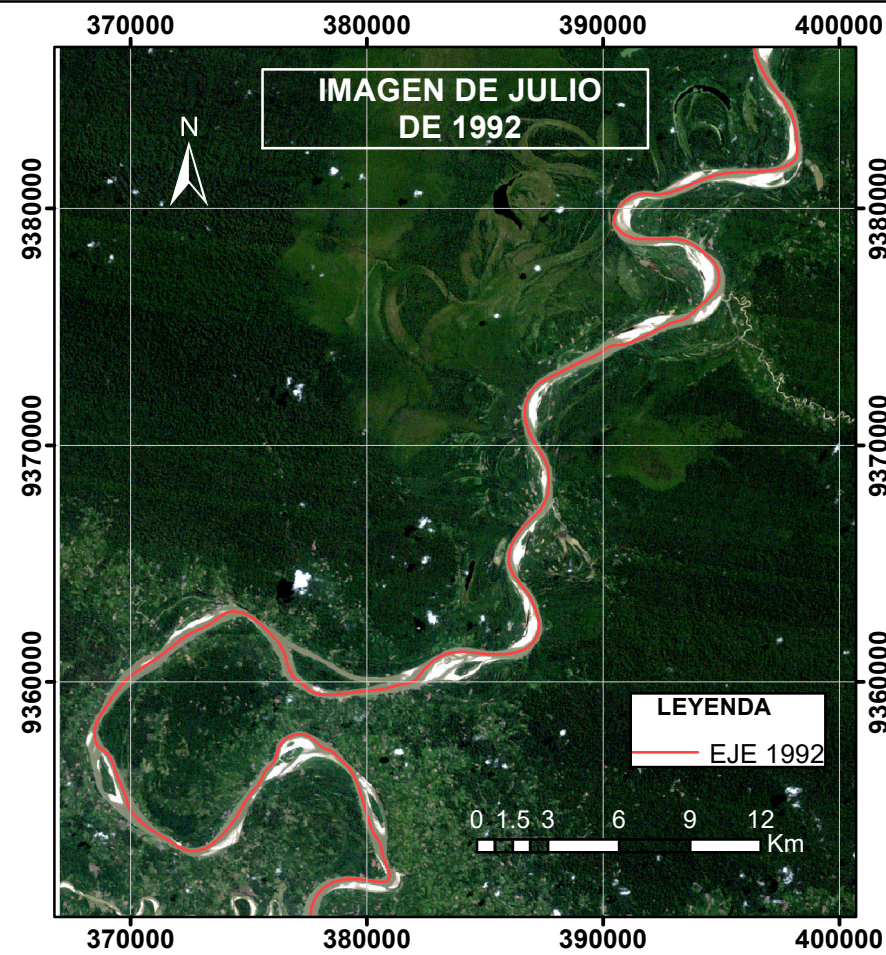
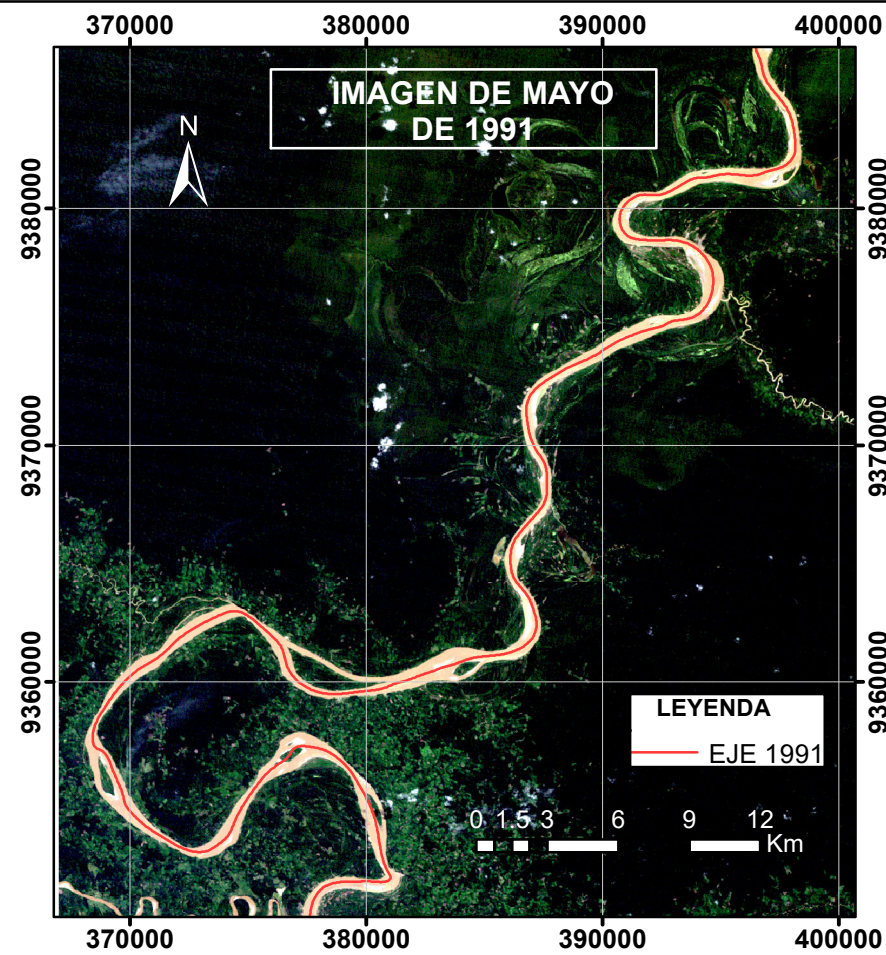
TESISTA: Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/320'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

V.1.1



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO: IMÁGENES SATELIAIALES LANDSAT
(COLOR REAL) ENTRE 1991-1996

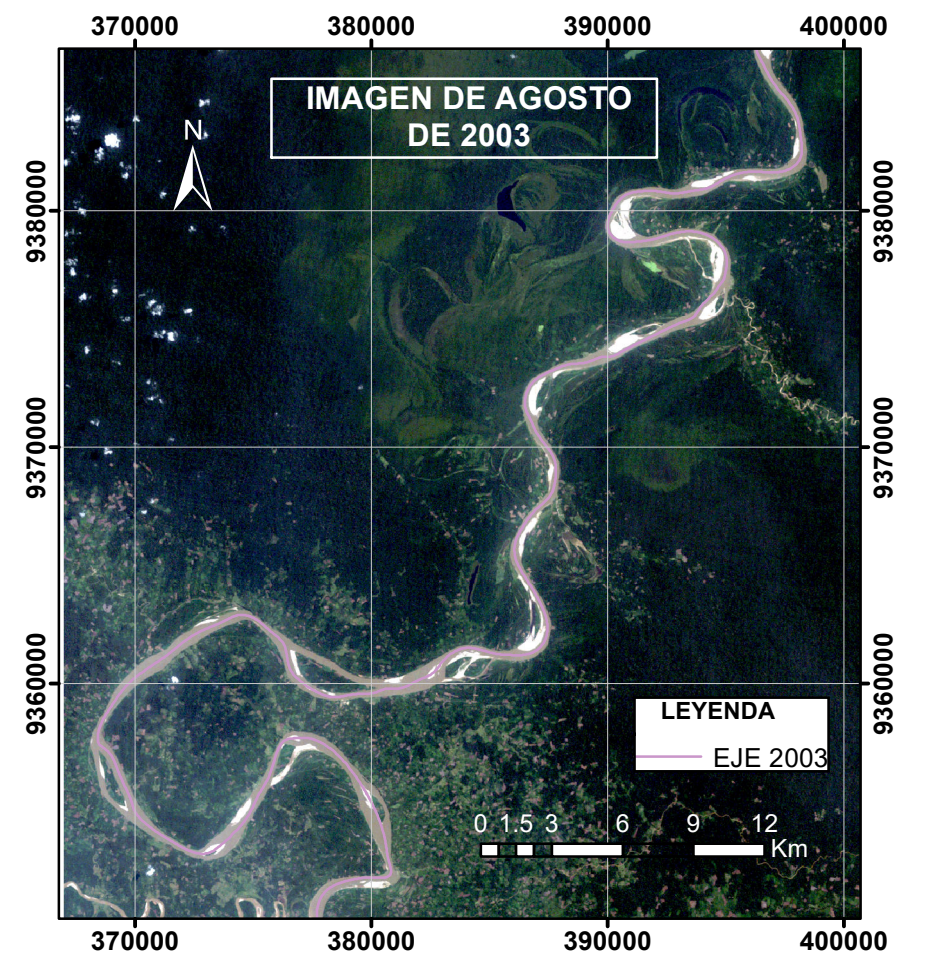
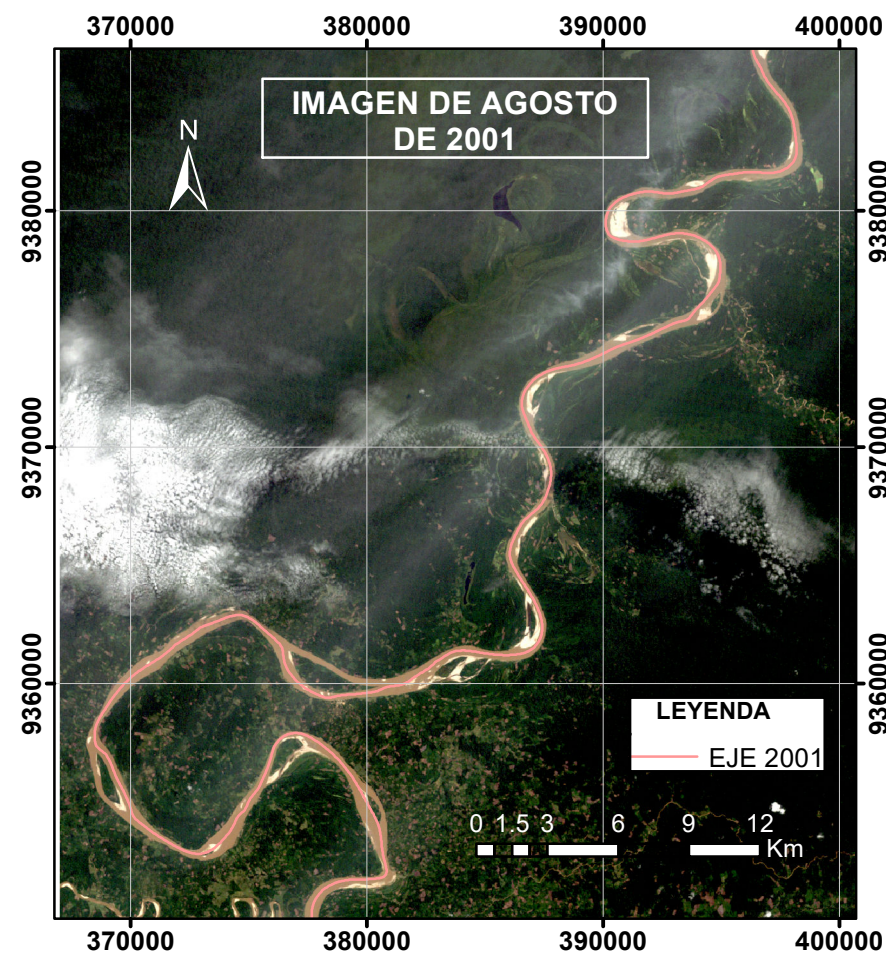
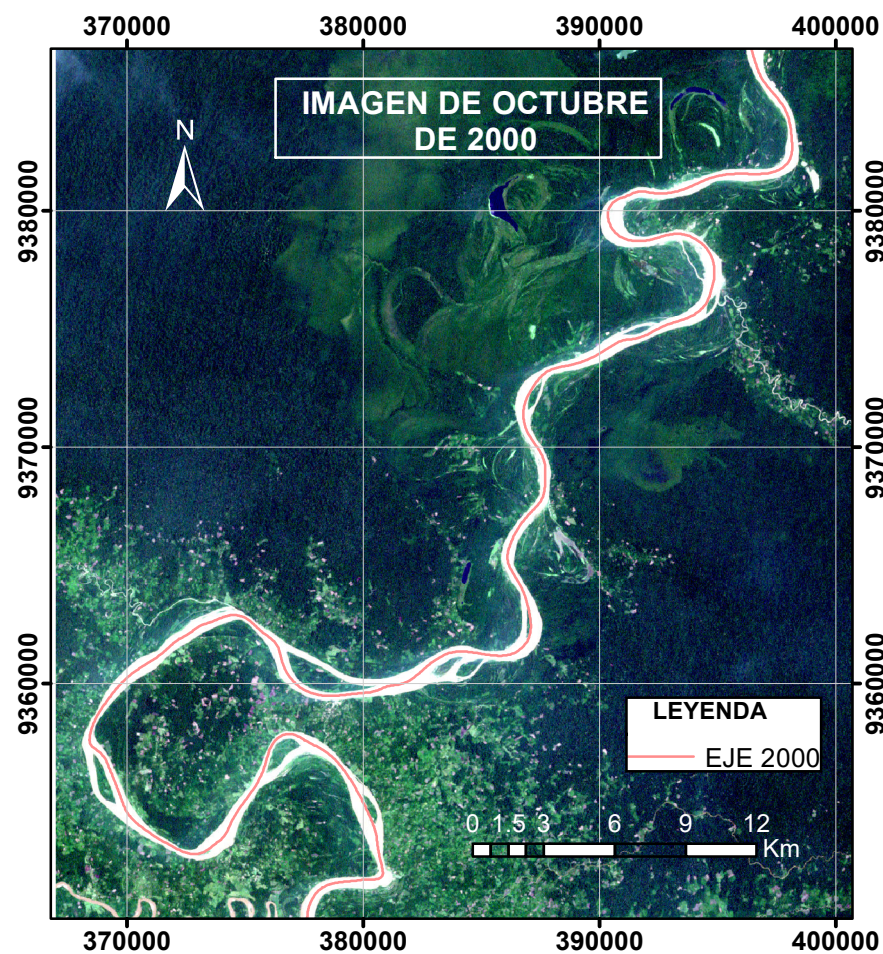
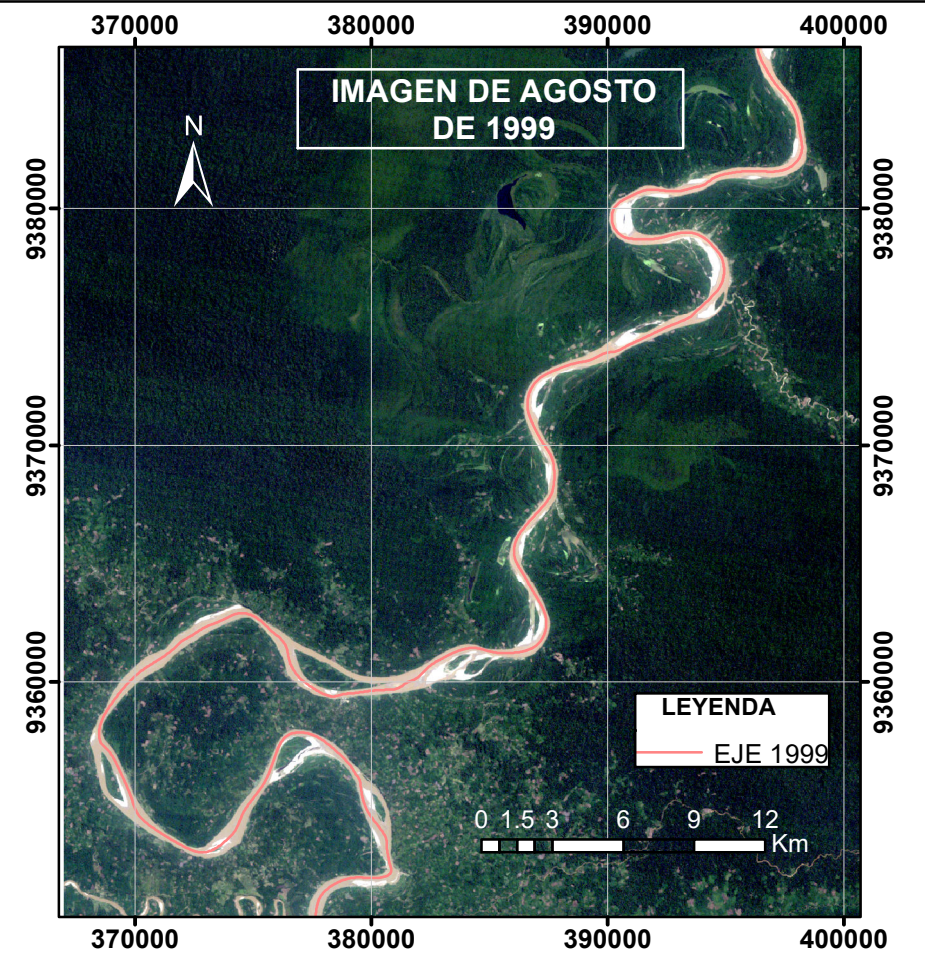
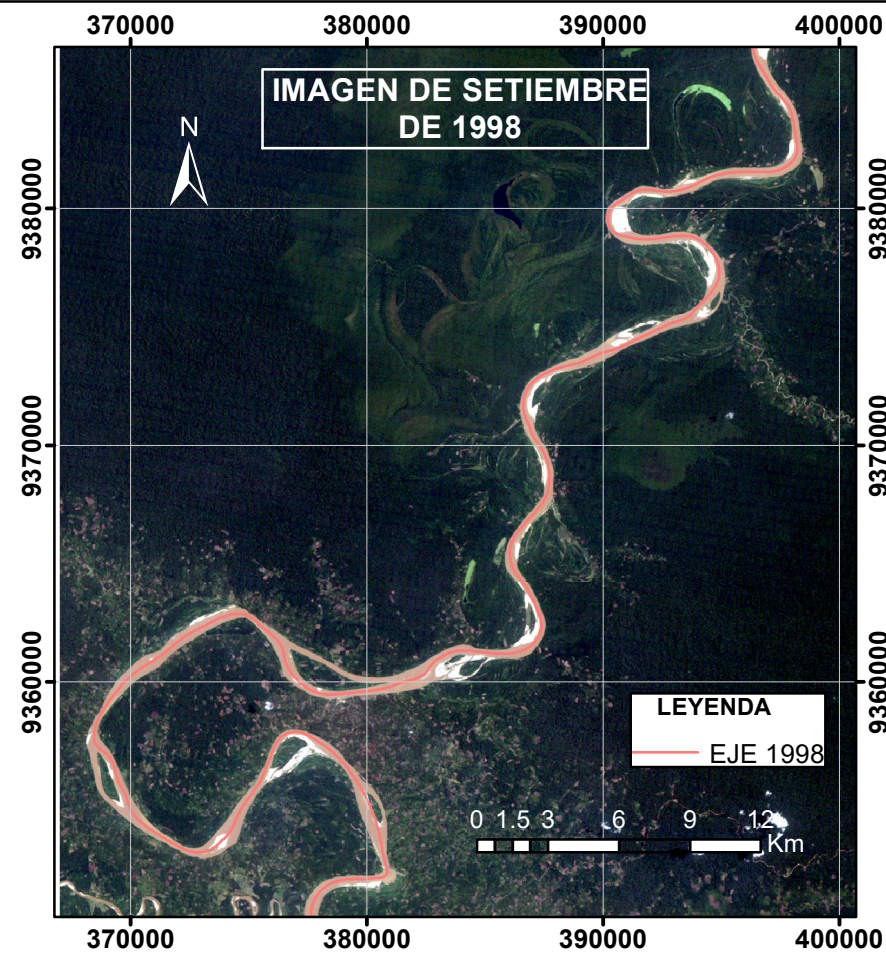
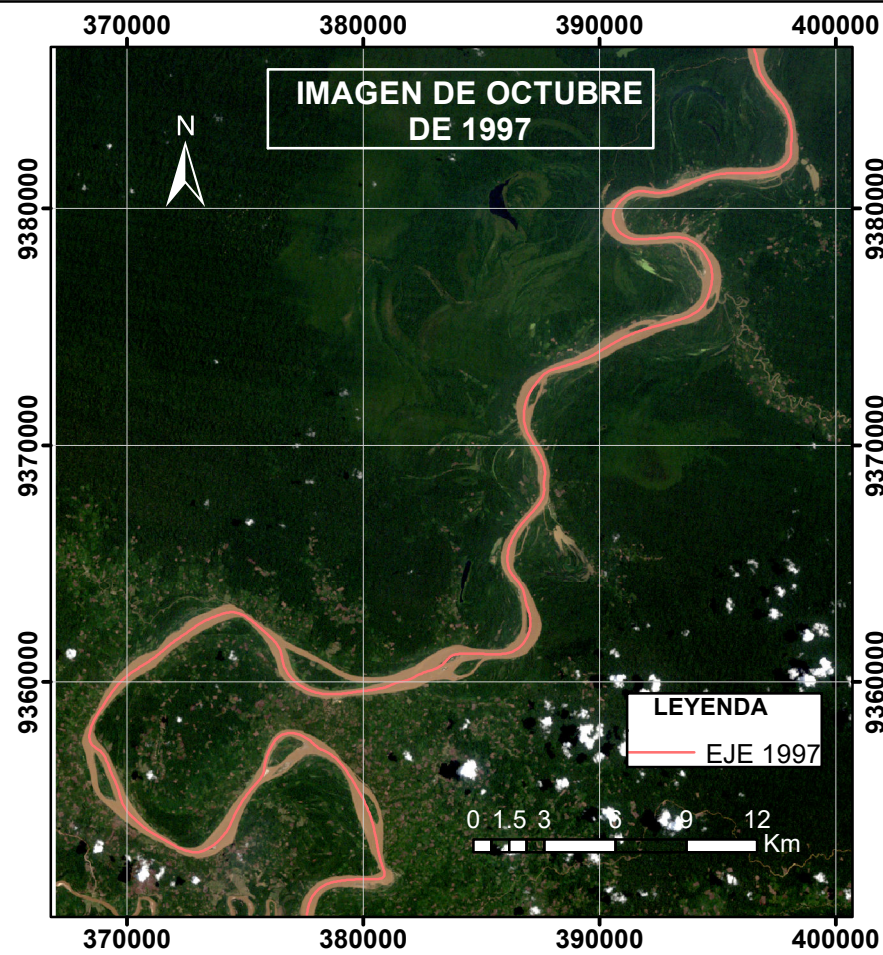
TESISTA: Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/320'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

V.1.2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO: IMÁGENES SATELIAIALES LANDSAT
 (COLOR REAL) ENTRE 1997-2003

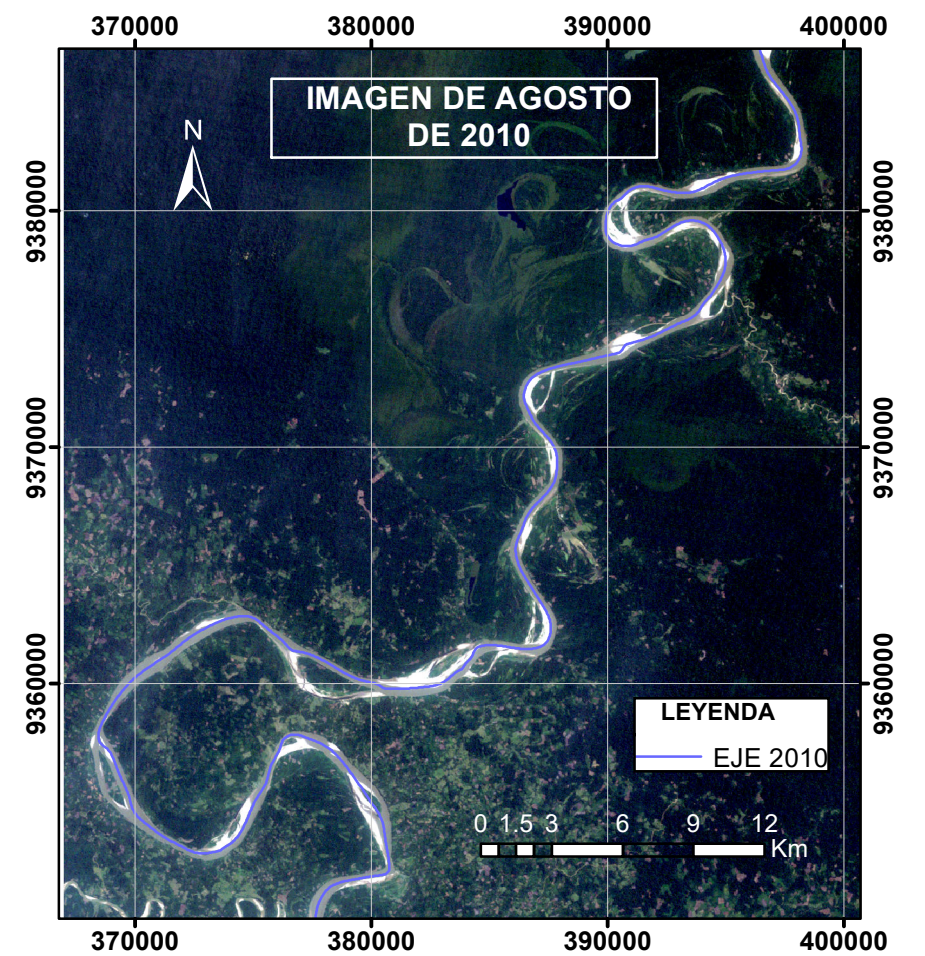
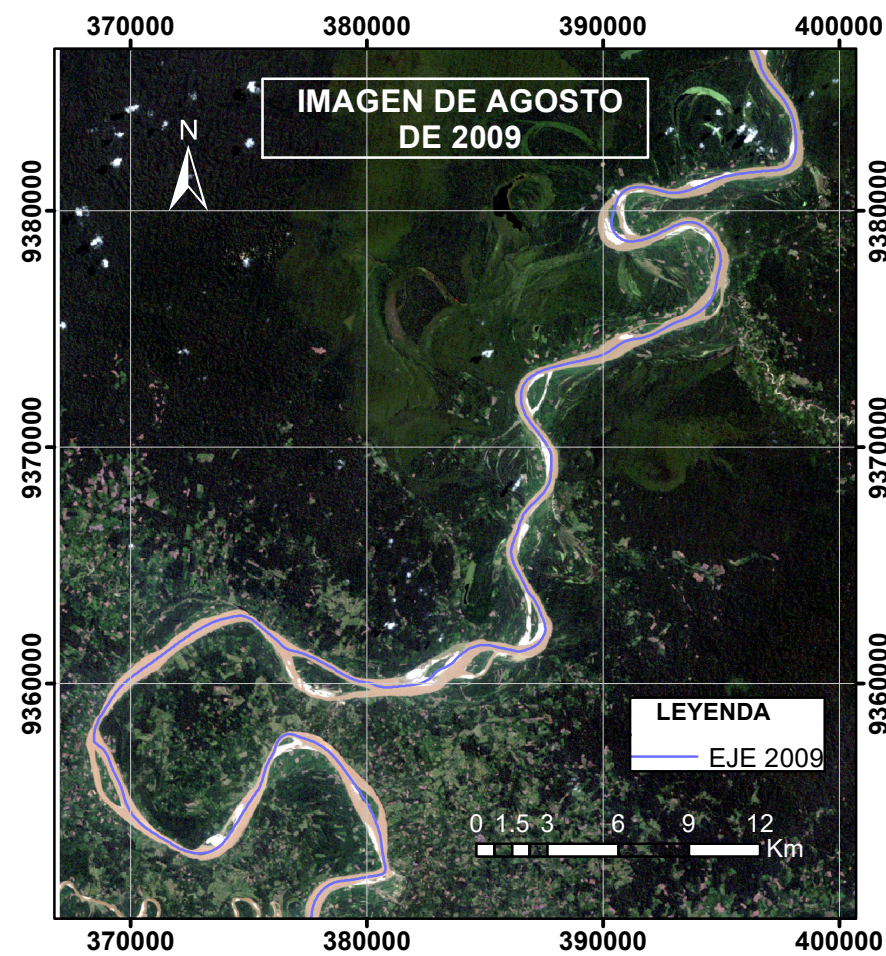
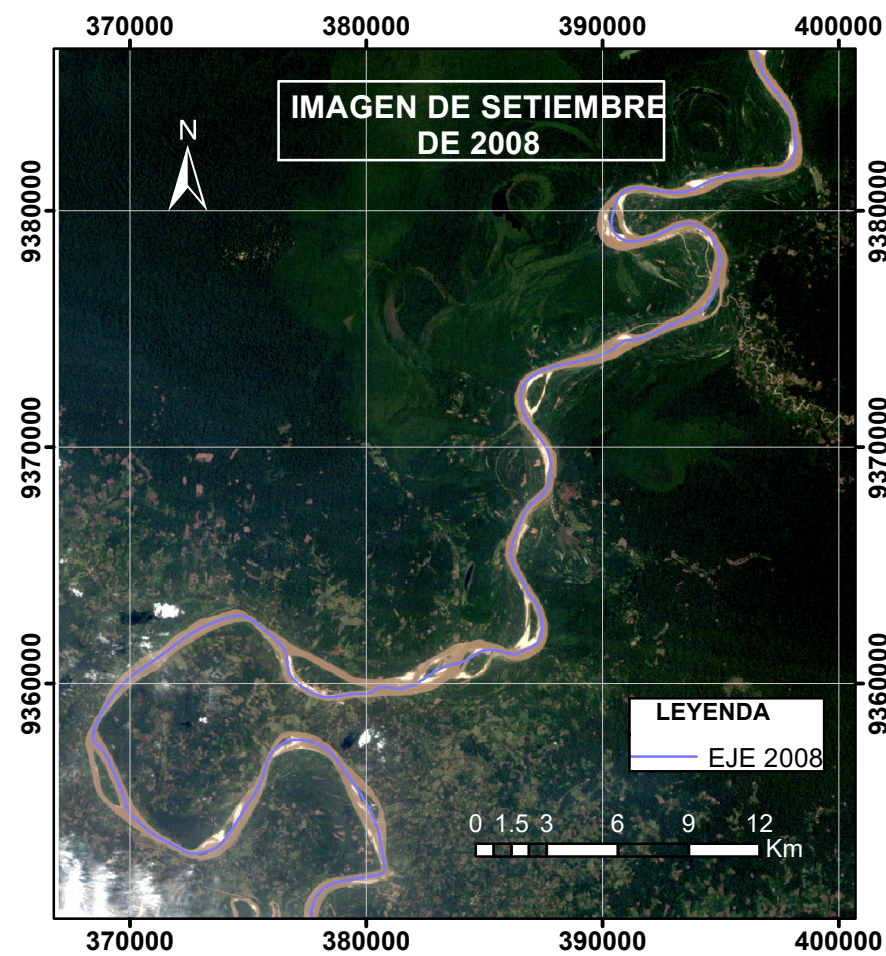
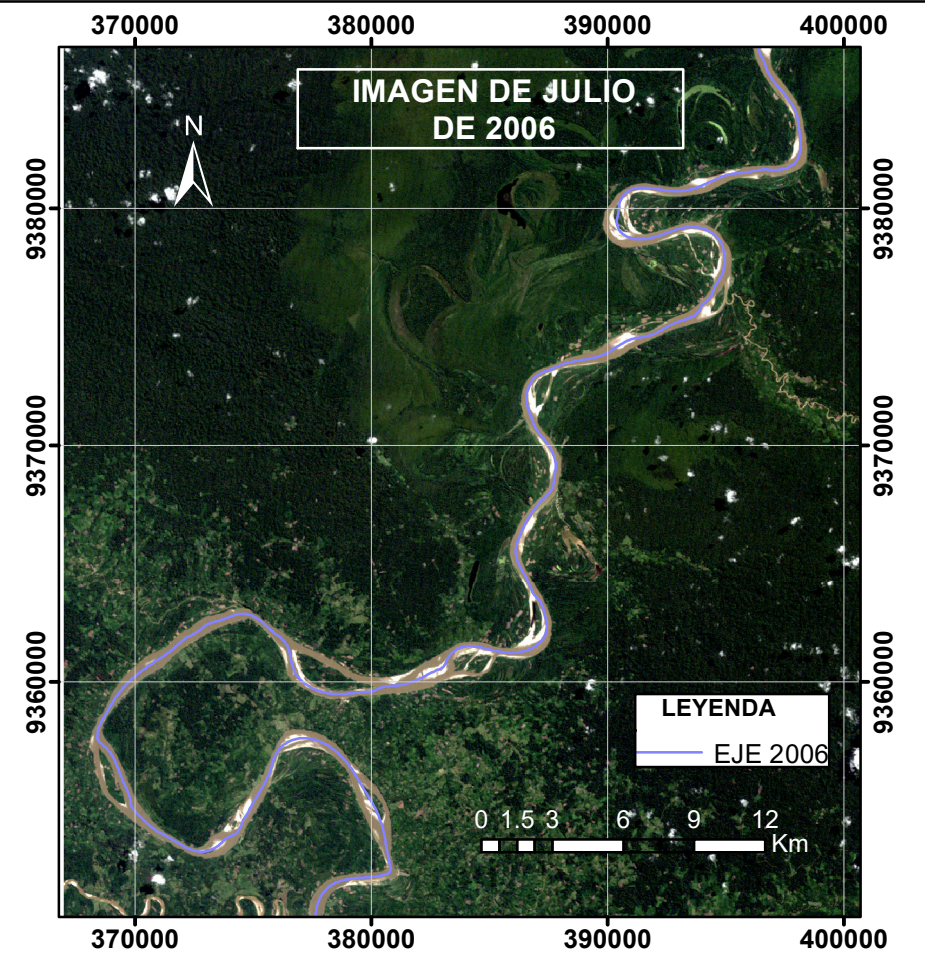
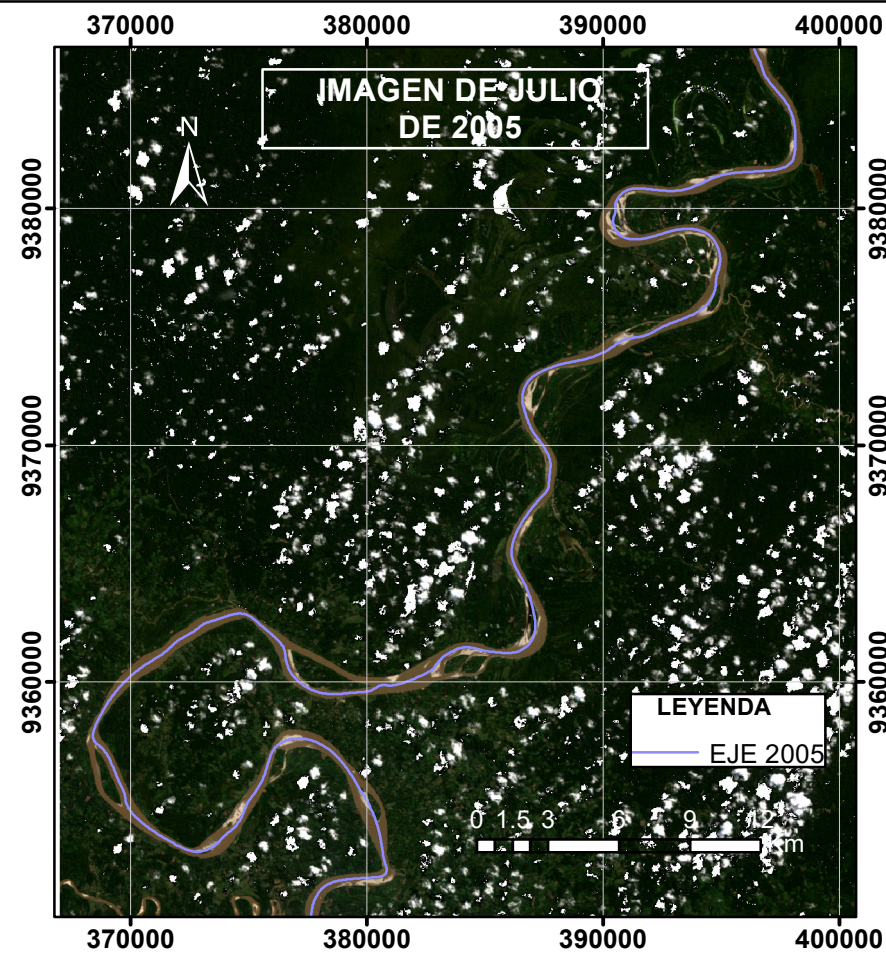
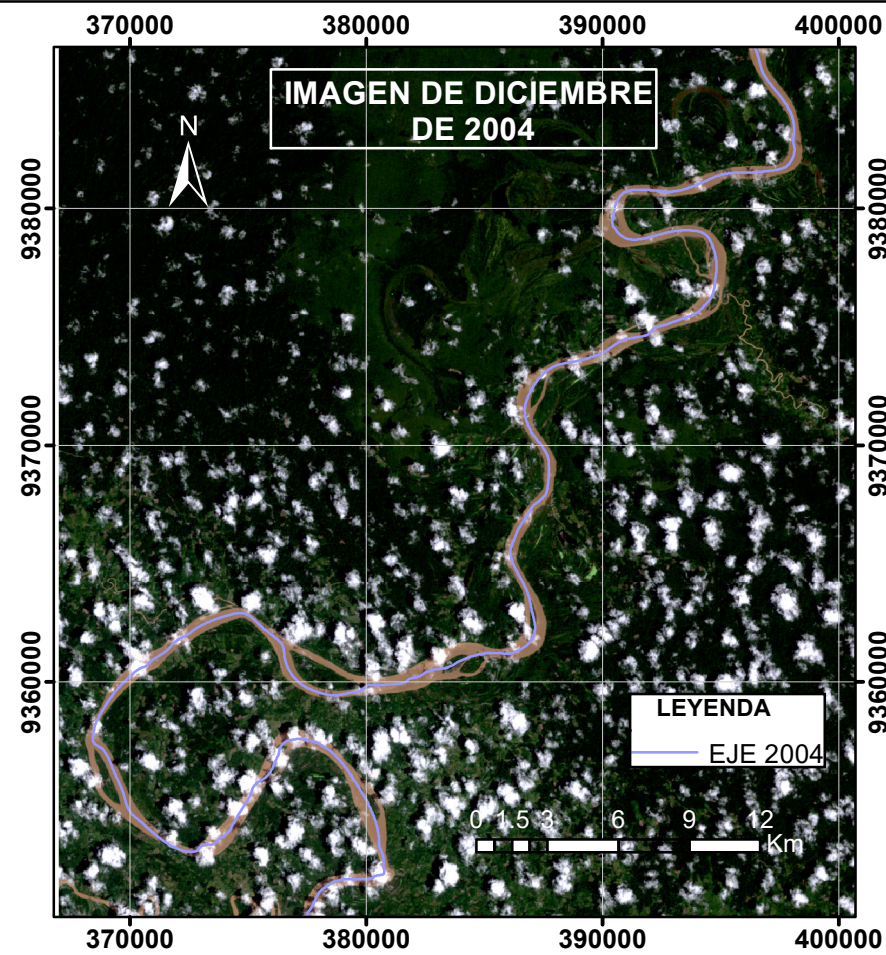
TESISTA: Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/320'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

V.1.3



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO: IMÁGENES SATELIAIALES LANDSAT
 (COLOR REAL) ENTRE 2004-2010

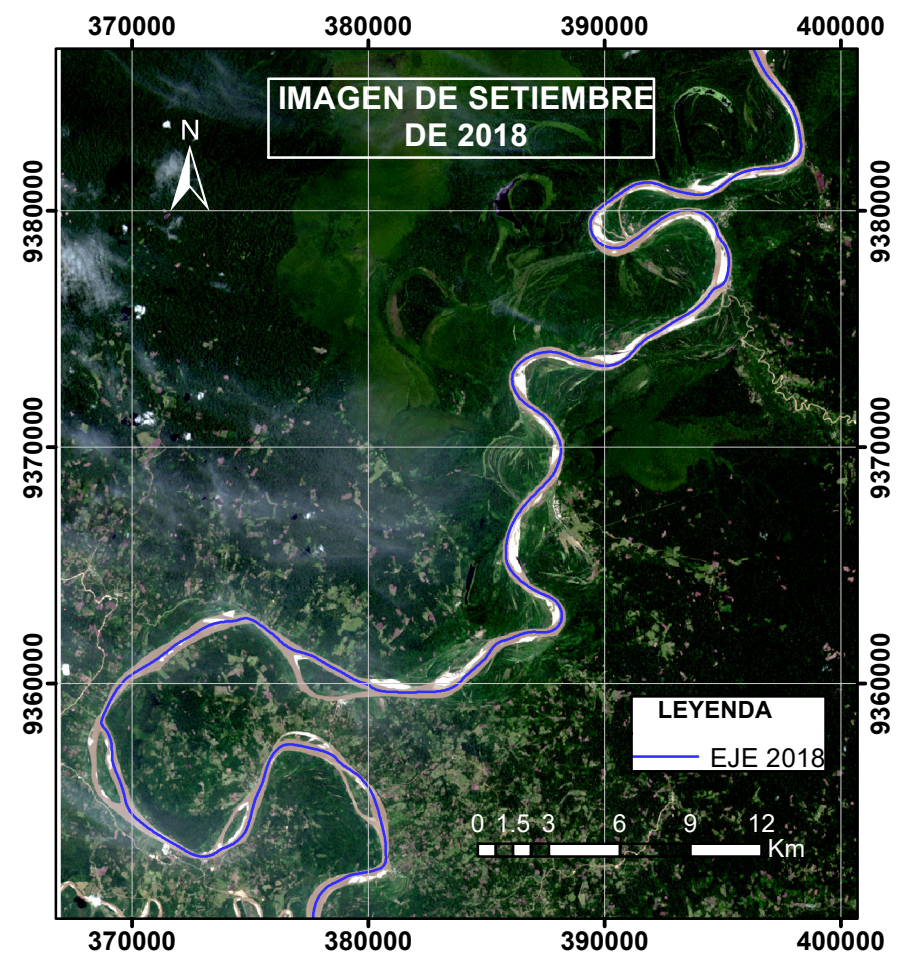
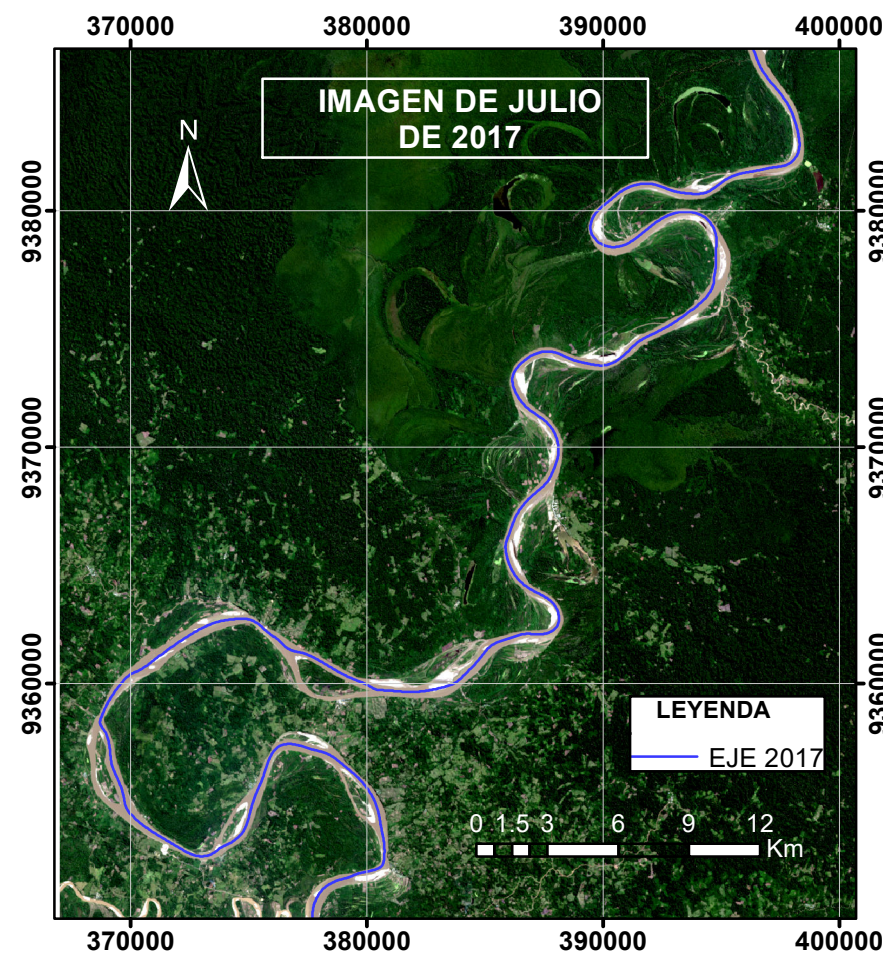
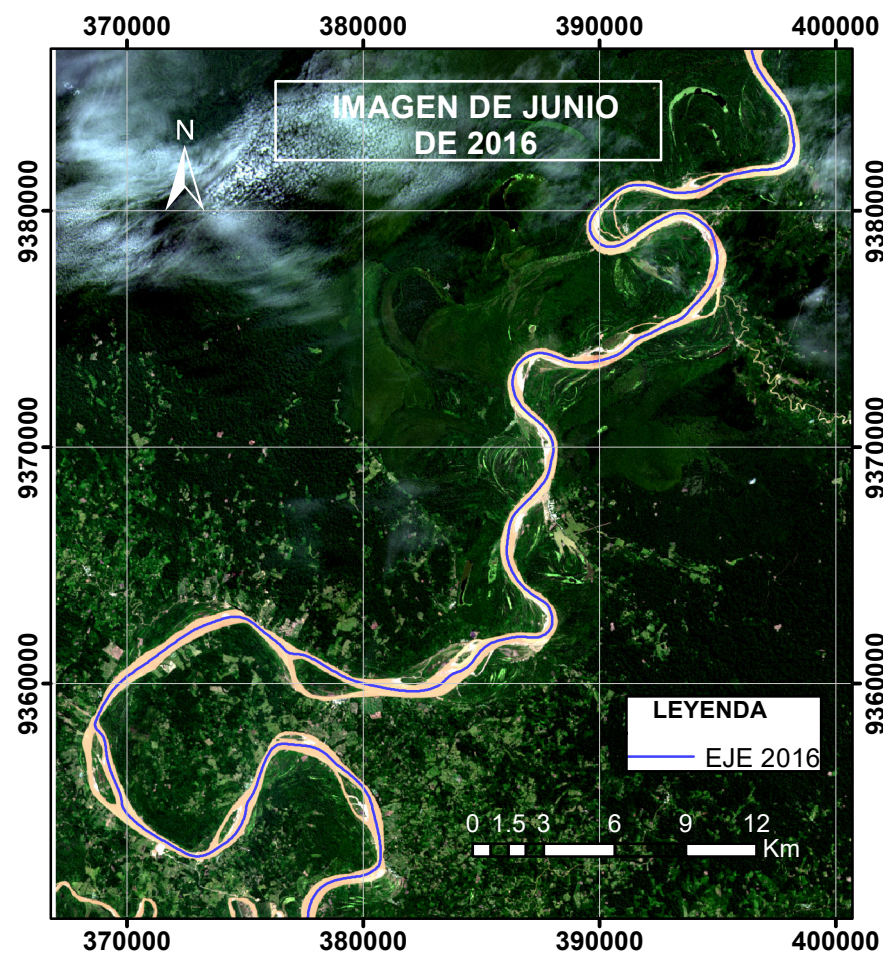
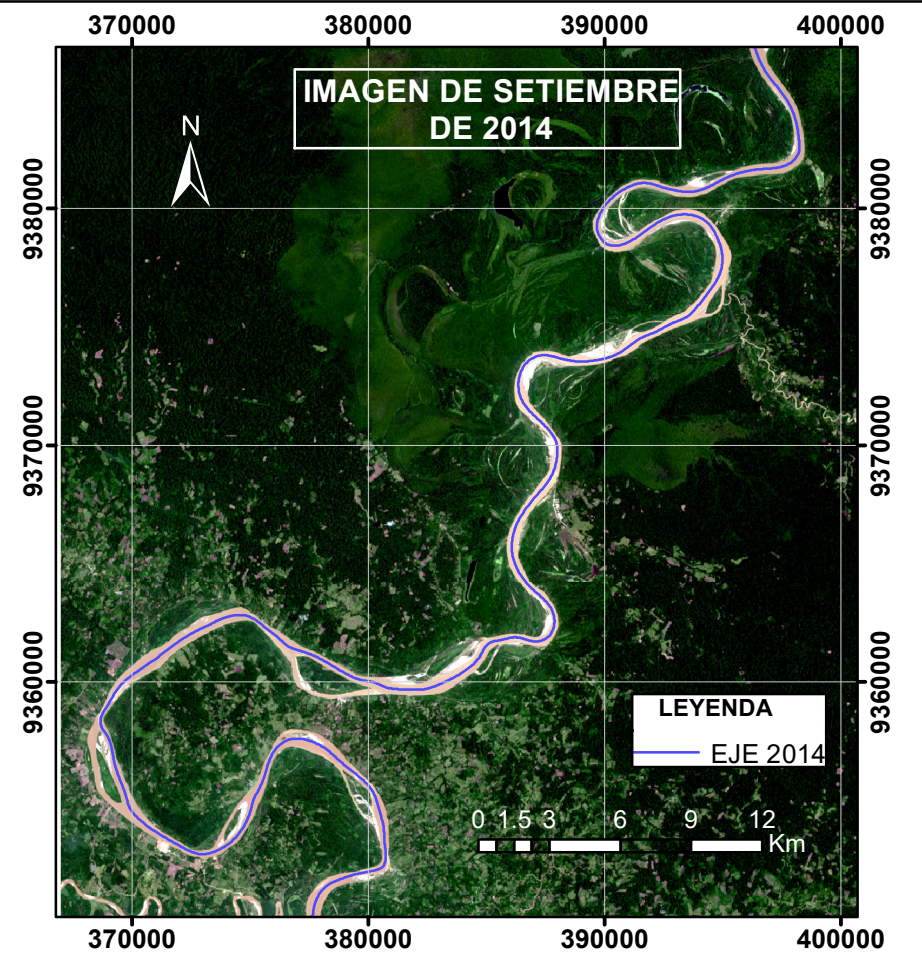
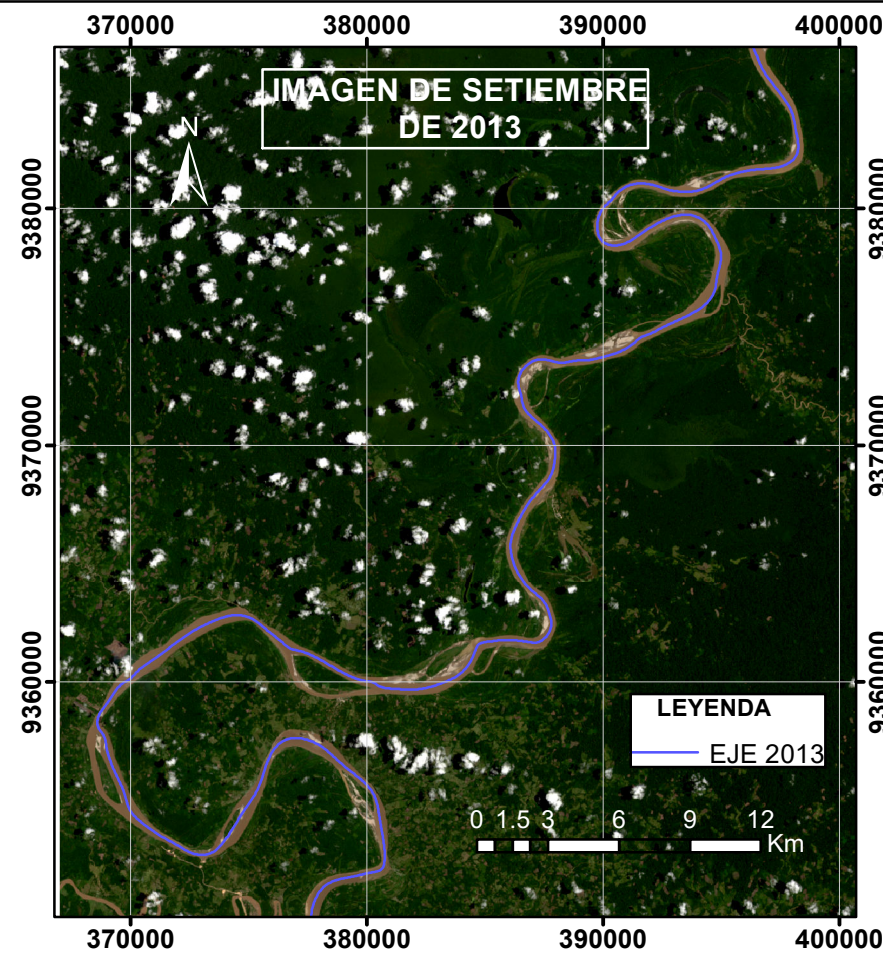
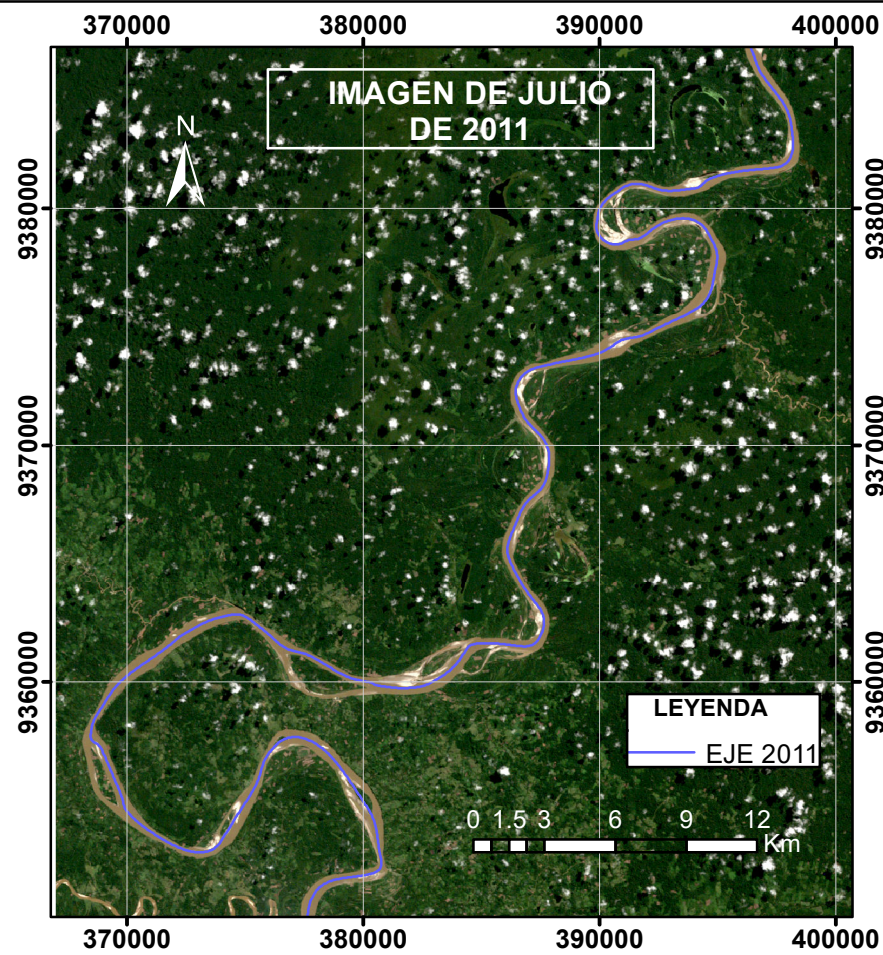
TESISTA: Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/320'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

V.1.4



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO: IMÁGENES SATELIAIALES LANDSAT
 (COLOR REAL) ENTRE 2011-2018

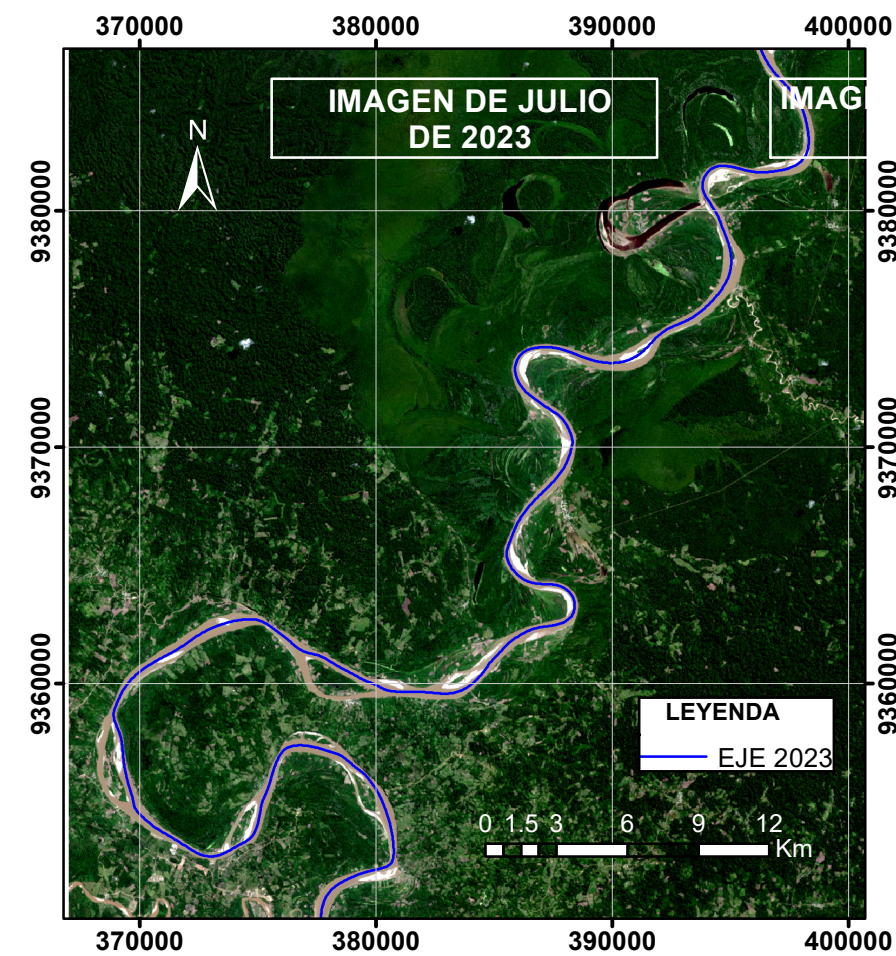
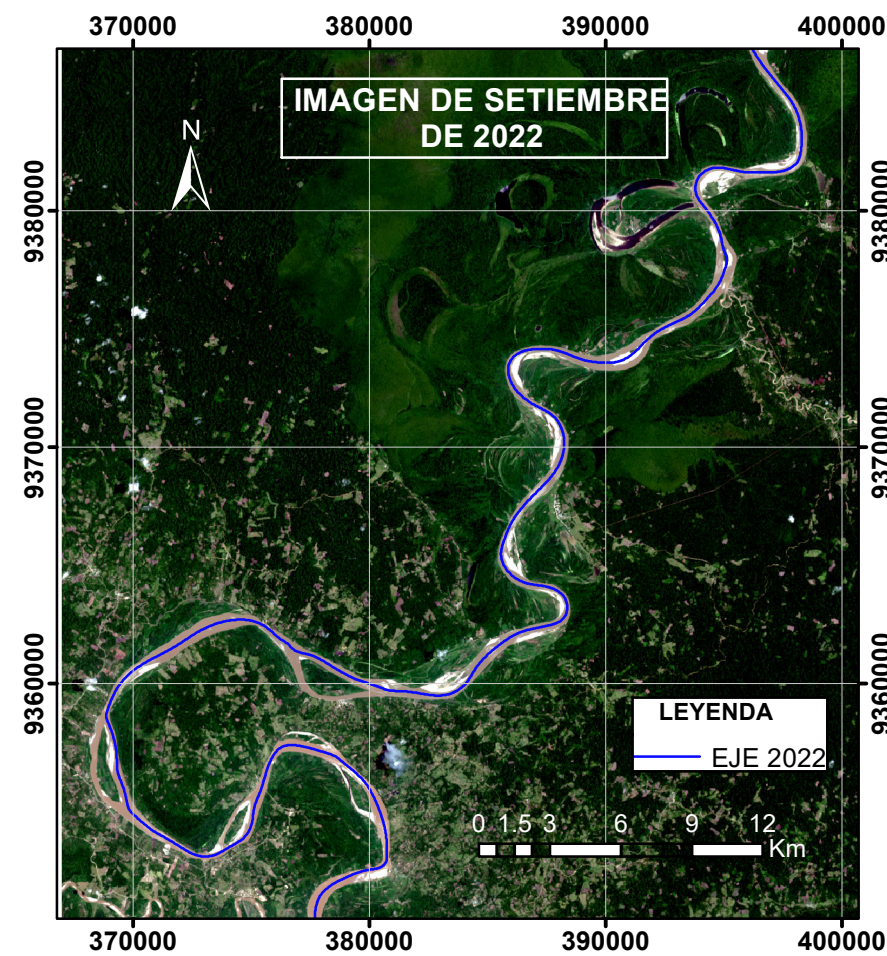
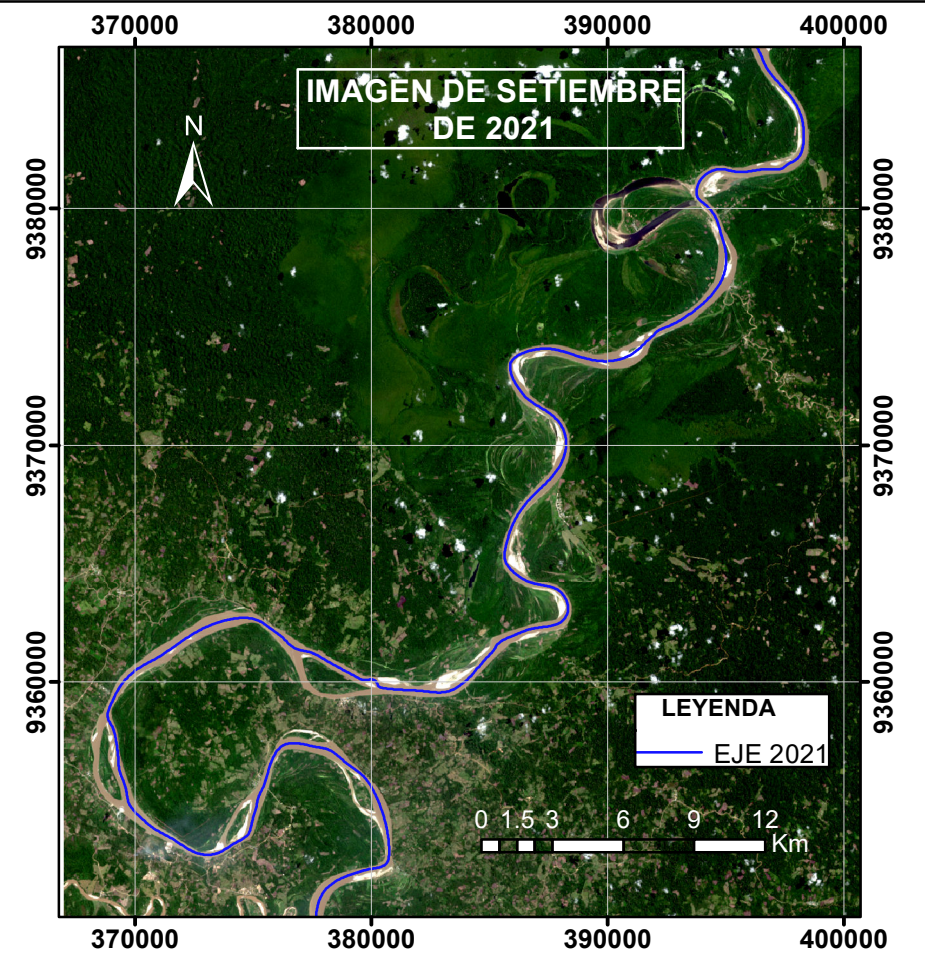
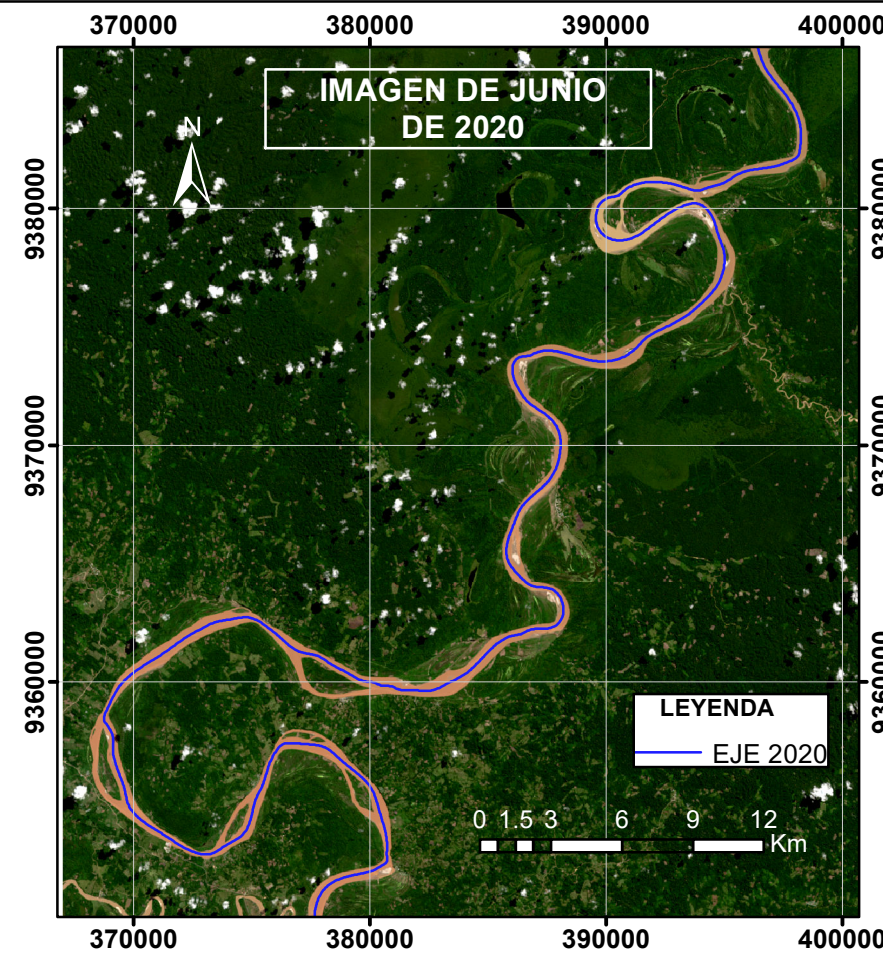
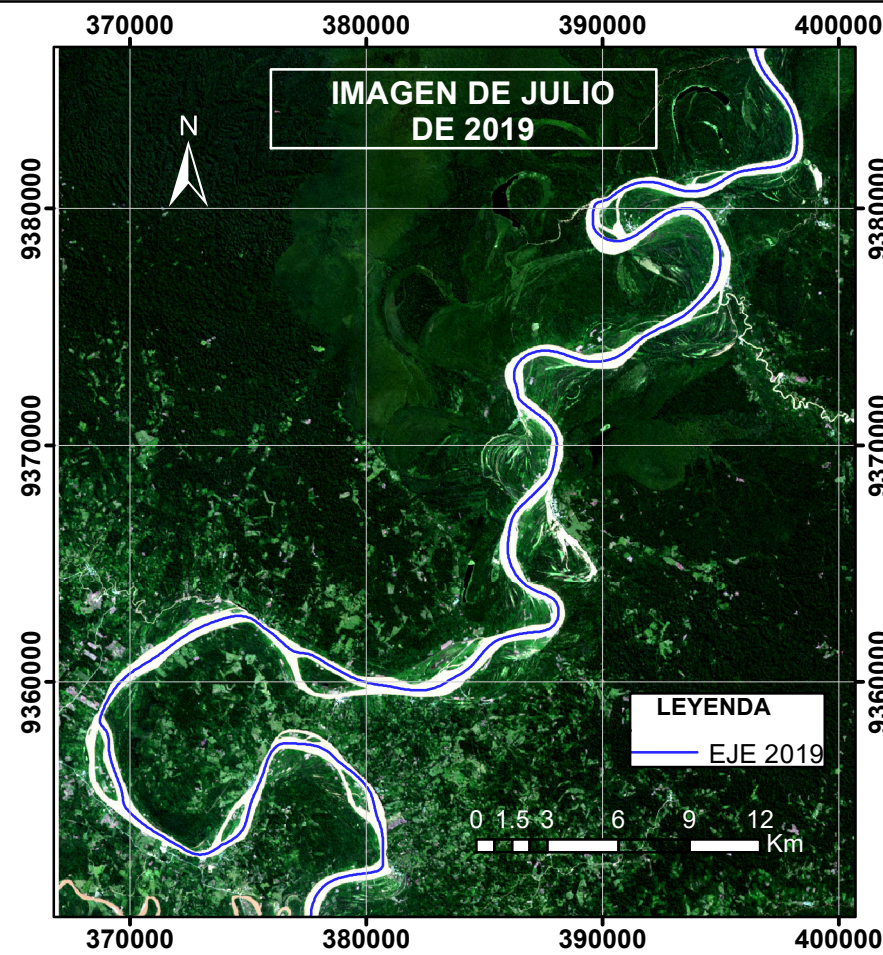
TESISTA: Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA: 1/320'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

V.1.5



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO: IMÁGENES SATELIAIALES LANDSAT
(COLOR REAL) ENTRE 2019-2023

TESISTA: Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

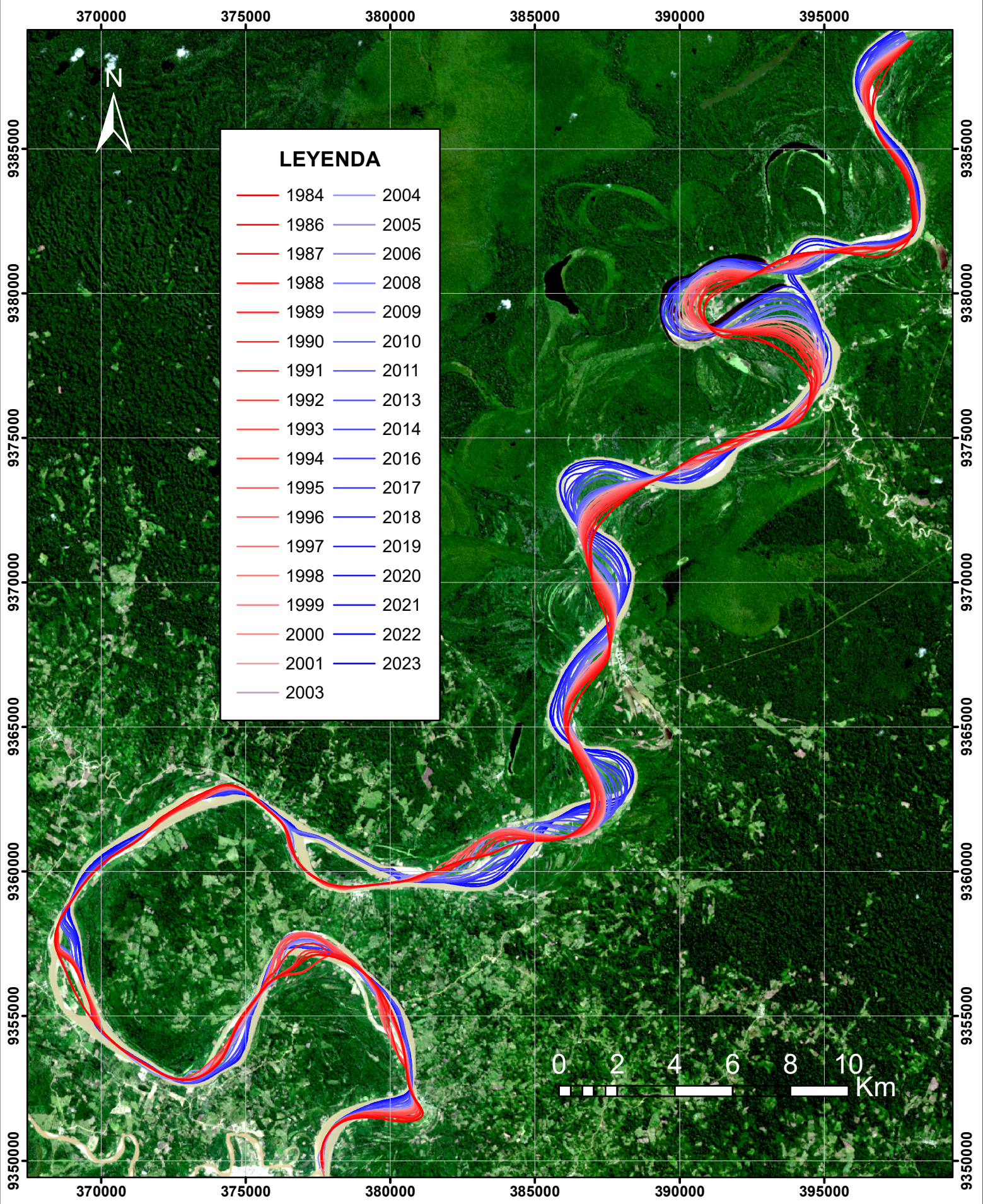
ESCALA: 1/320'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

V.1.5

ANEXO V.2 EVOLUCIÓN DE EJE CENTRAL



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:
MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO:
EVOLUCIÓN DEL EJE CENTRAL
DEL RÍO ENTRE 1984-2023

TESISTA:
Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

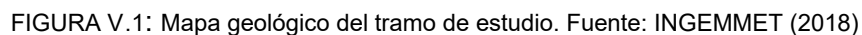
ESCALA: 1/165'000

DATUM: WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:
V.2

ANEXO VI: CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

Se realizó un análisis de sensibilidad con los los parámetros de diámetro de sedimento, caudal de sólidos que ingresa al tramo, coeficiente de Manning, capacidad de transporte a lo largo del tramo y tipo de cambio de lecho. Este análisis se realizó con el fin de obtener los resultados de mejor correlación a los medidos en el tramo que no presenta efecto significativo de erosiones laterales, el tramo con geología terciaria como se puede observar en la Figura V.1, que corresponde desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.



-Sensibilidad del método de deposición de sedimentos

Se probaron 2 escenarios posibles, el escenario donde se utiliza “Veneer” como única opción de erosión en el cauce (SC-SB-Veneer) y otro donde se utiliza también “distance decay” en los bancos de inundación en toda el área de estudio (SC-SB-0), los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.1.

CUADRO V.1: Modelos para sensibilidad - deposición de sedimentos

NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES					TIEMPO (hh:mm:ss)
	Diámetro de sedimento	Caudal de sólidos	Número de Manning del lecho	Capacidad de transporte	Tipo de cambio de lecho	
SC-SB-Veneer	100 %	100 %	0.028	100 %	Veneer	1:55:08
SC-SB-0	100 %	100 %	0.028	100 %	Dist. Decay	1:59:22

Fuente: Propia

En la Figura V.2 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos SC-SB-0 (Figura V.2a) y SC-SB-Veneer (Figura V.2b) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.

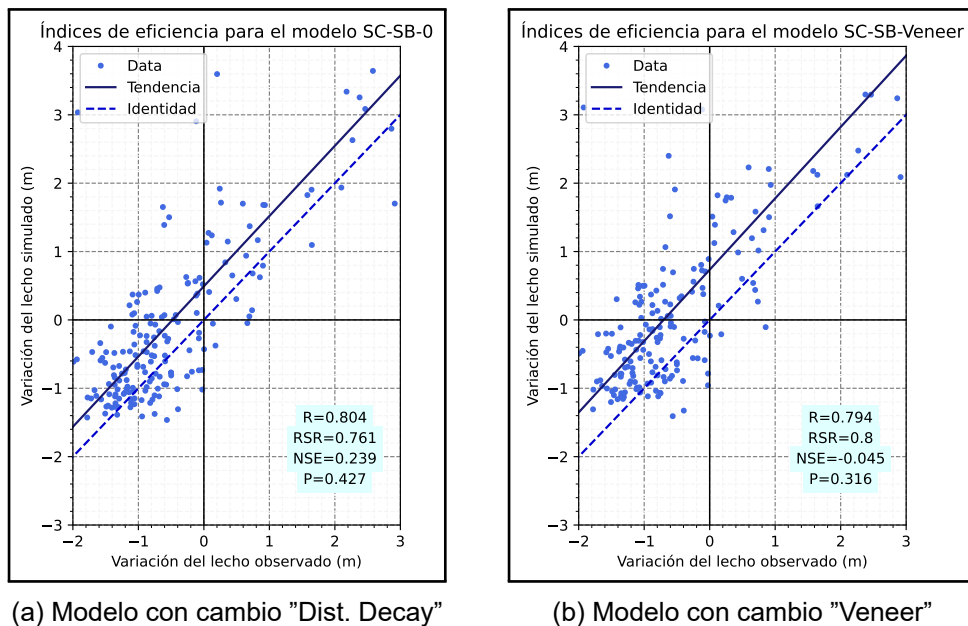


FIGURA V.2: Calibración por métodos de deposición de sedimentos. Fuente: propia

En la Figura V.3 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo que corresponde desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.

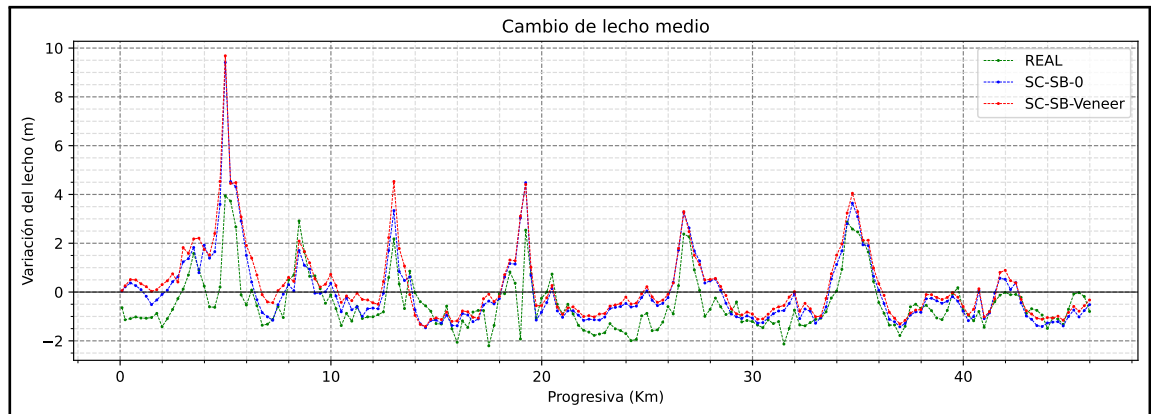


FIGURA V.3: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad del método de deposición de sedimentos. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.2 se observa que el modelo donde se utiliza el método de deposición distance decay en los bancos de inundación (SC-SB-0) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.2: Sensibilidad por deposición de sedimentos

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-SB-0	0.804	0.761	0.239	0.427
SC-SB-Veneer	0.794	0.8	-0.045	0.316

Fuente: Propia

-Sensibilidad del diámetro de sedimentos

Se probaron 3 escenarios posibles, el escenario donde se disminuyó en 20 % el diámetro de sedimentos de fondo (SC-SB-0.8dm), se aumentó en 20 % (SC-SB-1.2dm) y se mantuvo constante la granulometría (SC-SB-0) reportada por el MTC (2018), los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.3.

En la Figura V.4 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos SC-SB-0.8dm (Figura V.4a), SC-SB-1.2dm (Figura V.4b) y SC-SB-0 (Figura V.4c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.

CUADRO V.3: Modelos para sensibilidad - diámetro de sedimento

NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES					TIEMPO (hh:mm:ss)
	Diámetro de sedimento	Caudal de sólidos	Número de Manning del lecho	Capacidad de transporte	Tipo de cambio de lecho	
SC-SB-0.8dm	80 %	100 %	0.028	100 %	Dist. Decay	1:41:45
SC-SB-0	100 %	100 %	0.028	100 %	Dist. Decay	1:59:22
SC-SB-1.2dm	120 %	100 %	0.028	100 %	Dist. Decay	2:10:49

Fuente: Propia

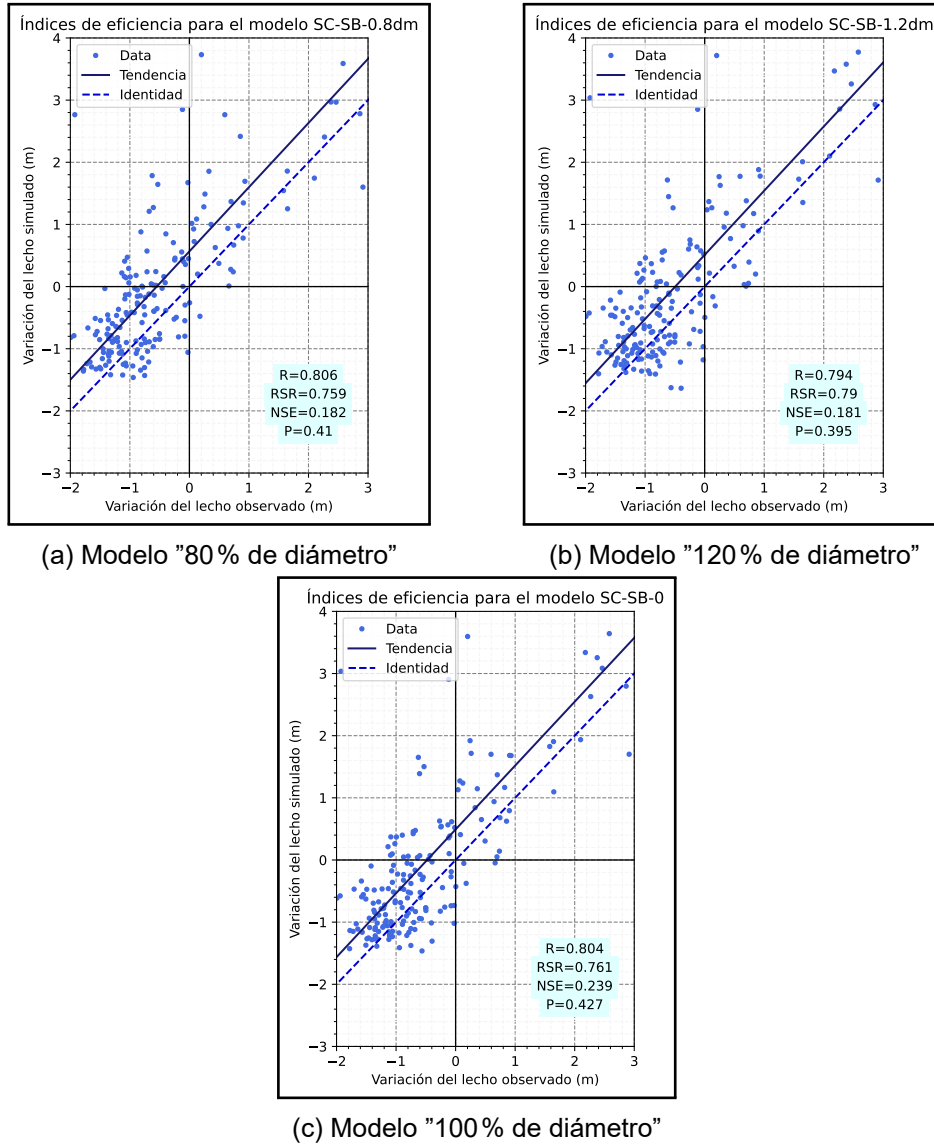


FIGURA V.4: Calibración por diámetro de sedimentos de fondo. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.5 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.

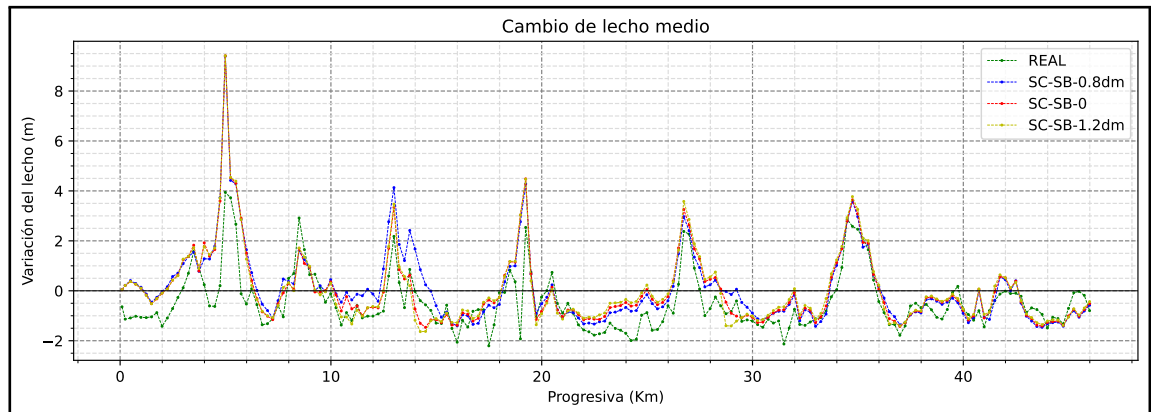


FIGURA V.5: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad del diámetro de sedimentos de fondo. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.4 se observa que el modelo donde no se altera el diámetro de sedimentos de fondo medidos (SC-SB-0) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.4: Sensibilidad por diametro de sedimento

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-SB-0.8dm	0.806	0.759	0.182	0.41
SC-SB-0	0.804	0.761	0.239	0.427
SC-SB-1.2dm	0.794	0.79	0.181	0.395

Fuente: Propia

-Sensibilidad del caudal de sólidos

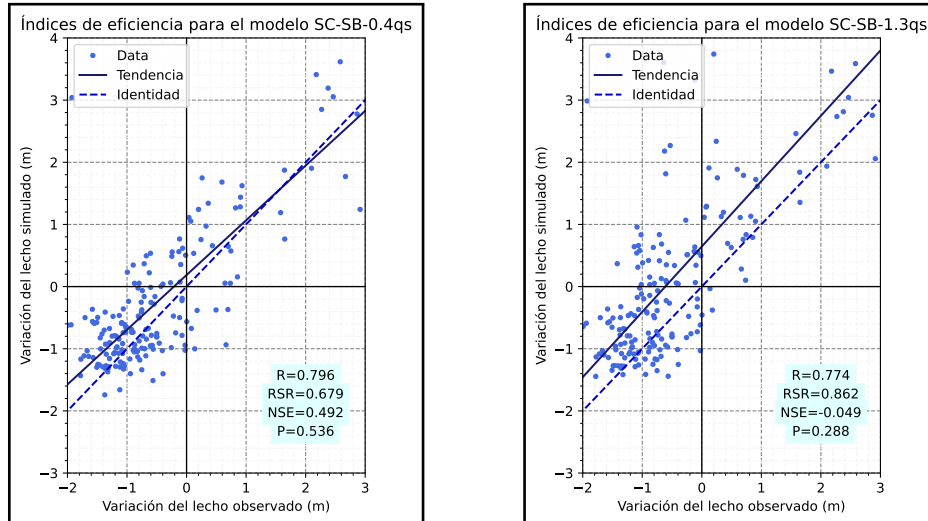
Se probaron 3 escenarios posibles, el escenario donde se disminuyó en 60 % el caudal de sólidos que ingresa al tramo (SC-SB-0.4qs), se aumentó en 30 % (SC-SB-1.3qs) y donde se mantuvo constante el caudal de sólidos que ingresa (SC-SB-0) estimado como la capacidad de transporte sólido calculado en la sección inicial mediante la aplicación de la ecuación de Engelund Hansen a los caudales líquidos de los hidrogramas previamente calculados, los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.5.

En la Figura V.6 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-SB-0.4qs (Figura V.6a), SC-SB-1.3qs (Figura V.6b) y SC-SB-0 (Figura V.6c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.

CUADRO V.5: Modelos para sensibilidad - caudal de solidos

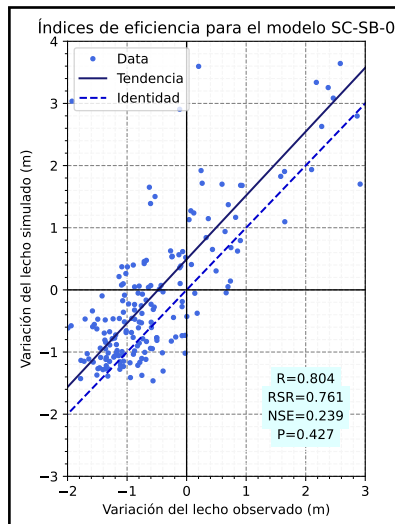
NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES					TIEMPO (hh:mm:ss)
	Diámetro de sedimento	Caudal de sólidos	Número de Manning del lecho	Capacidad de transporte	Tipo de cambio de lecho	
SC-SB-0.4qs	100 %	40 %	0.028	100 %	Dist. Decay	2:11:16
SC-SB-0	100 %	100 %	0.028	100 %	Dist. Decay	1:59:22
SC-SB-1.3qs	100 %	130 %	0.028	100 %	Dist. Decay	2:11:47

Fuente: Propia



(a) Modelo "40% de caudal de sólidos que ingresa al tramo"

(b) Modelo "130% de caudal de sólidos que ingresa al tramo"



(c) Modelo "100% de caudal de sólidos que ingresa al tramo"

FIGURA V.6: Calibración por caudal de sólidos que ingresa al tramo. Fuente: propia

En la Figura V.7 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.

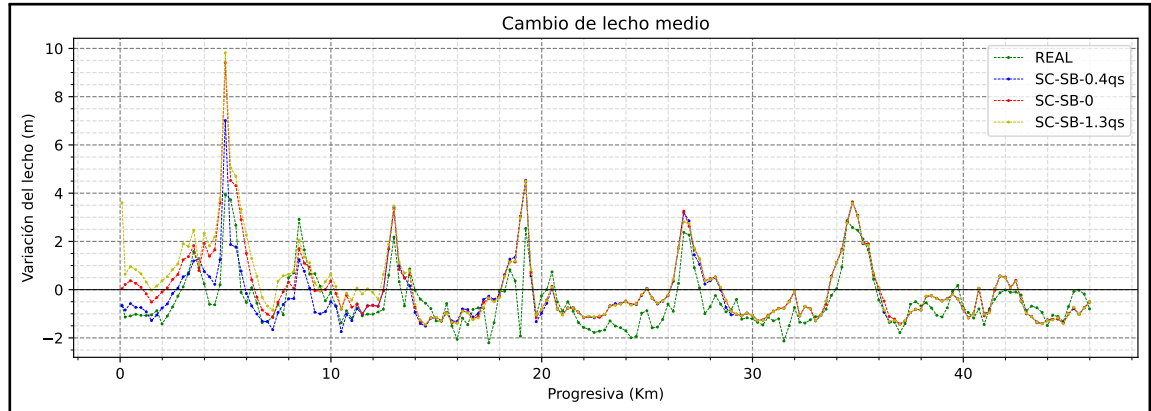


FIGURA V.7: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad del caudal de sólidos que ingresa al tramo. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.6 se observa que el modelo donde se disminuye el caudal de sólidos que ingresa al tramo a un 40 % (SC-SB-0.4qs) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.6: Sensibilidad por caudal de solidos

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-SB-0.4qs	0.796	0.679	0.492	0.536
SC-SB-0	0.804	0.761	0.239	0.427
SC-SB-1.3qs	0.774	0.862	-0.049	0.288

Fuente: Propia

-Sensibilidad de la capacidad de transporte

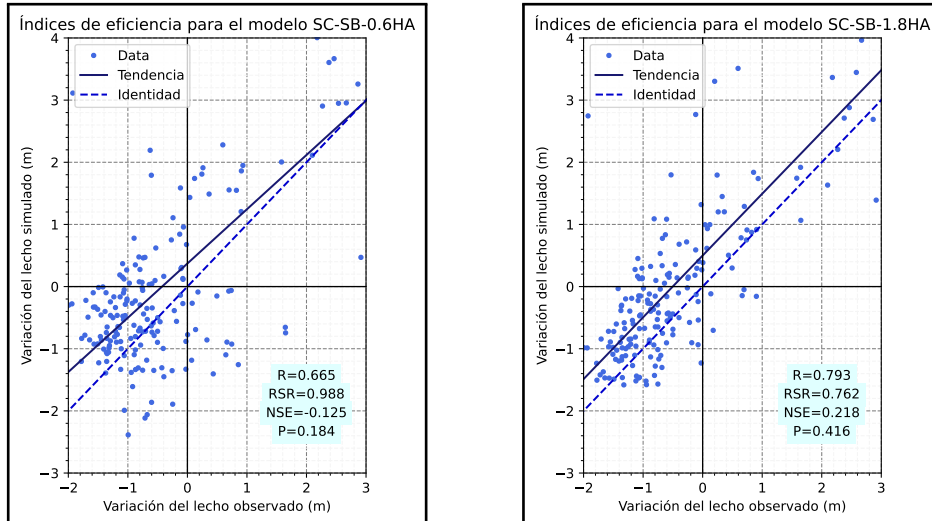
Se probaron 3 escenarios posibles, el escenario donde se disminuyó al 60 % la capacidad de transporte a lo largo del tramo calculada mediante la ecuación de Engelund-Hansen (SC-SB-0.6HA), se aumentó a un 180 % (SC-SB-1.8HA) y donde se mantuvo constante (SC-SB-0), los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.7.

En la Figura V.8 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-SB-0.6HA (Figura V.8a), SC-SB-1.8HA (Figura V.8b) y SC-SB-0 (Figura V.8c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.

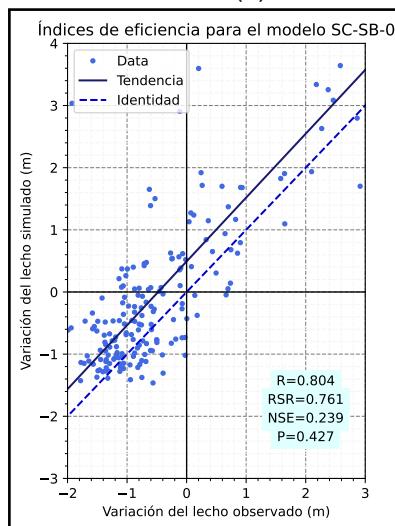
CUADRO V.7: Modelos para sensibilidad - capacidad de transporte

NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES					TIEMPO (hh:mm:ss)
	Diámetro de sedimento	Caudal de sólidos	Número de Manning del lecho	Capacidad de transporte	Tipo de cambio de lecho	
SC-SB-0.6HA	100 %	100 %	0.028	60 %	Dist. Decay	2:04:27
SC-SB-0	100 %	100 %	0.028	100 %	Dist. Decay	1:59:22
SC-SB-1.8HA	100 %	100 %	0.028	180 %	Dist. Decay	2:03:42

Fuente: Propia



(a) Modelo "60% de capacidad de trans." (b) Modelo "180% capacidad de trans."



(c) Modelo "100% capacidad de trans."

FIGURA V.8: Calibración por capacidad de transporte a lo largo del tramo. Fuente: propia

en la Figura V.9 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.

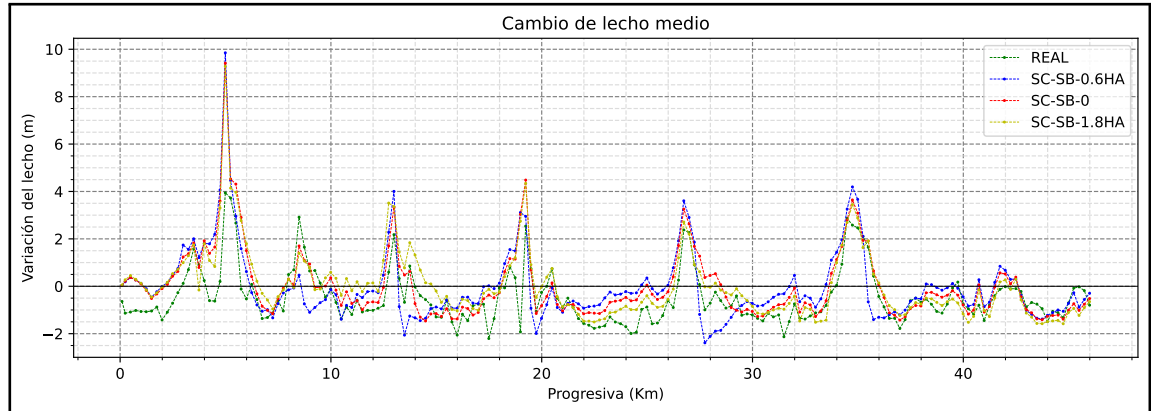


FIGURA V.9: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad de la capacidad de transporte a lo largo del tramo. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.8 se observa que el modelo donde no se altera la capacidad de transporte a lo largo del tramo (SC-SB-0) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.8: Sensibilidad por capacidad de transporte

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-SB-0.6HA	0.665	0.988	-0.125	0.184
SC-SB-0	0.804	0.761	0.239	0.427
SC-SB-1.8HA	0.793	0.762	0.218	0.416

Fuente: Propia

-Sensibilidad del coeficiente de Manning

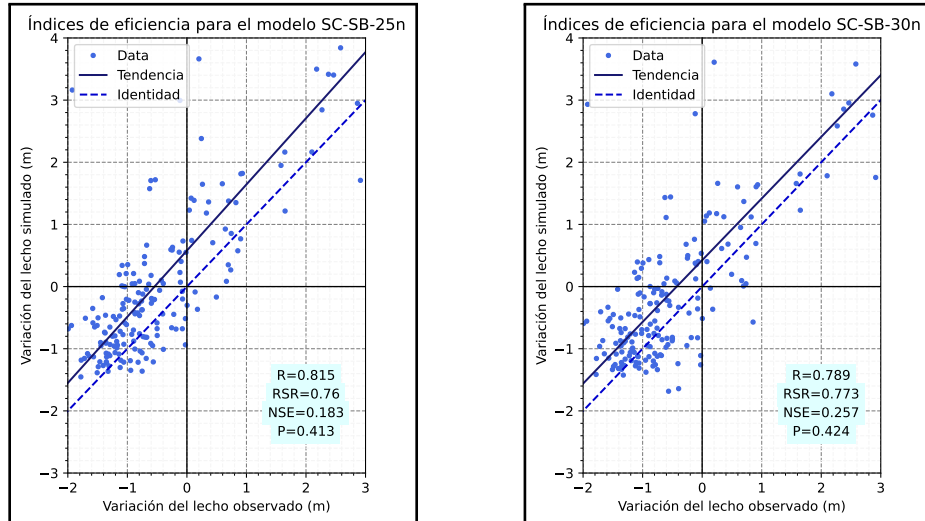
Se probaron 3 escenarios posibles, donde se varió el coeficiente de Manning evaluado por Reyes (2023) a 0.025 (SC-SB-25n), 0.030 (SC-SB-30n) y otro modelo donde se mantuvo sin variar en 0.028 (SC-SB-0), los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.9.

En la Figura V.10 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-SB-25n (Figura V.10a), SC-SB-30n (Figura V.10b) y SC-SB-0 (Figura V.10c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.

CUADRO V.9: Modelos para sensibilidad - coeficiente de Manning

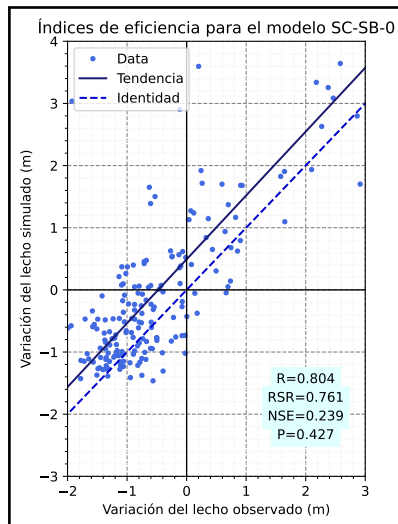
NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES					TIEMPO (hh:mm:ss)
	Diámetro de sedimento	Caudal de sólidos	Número de Manning del lecho	Capacidad de transporte	Tipo de cambio de lecho	
SC-SB-30n	100 %	100 %	0.030	100 %	Dist. Decay	2:14:51
SC-SB-0	100 %	100 %	0.028	100 %	Dist. Decay	1:59:22
SC-SB-25n	100 %	100 %	0.025	100 %	Dist. Decay	1:59:03

Fuente: Propia



(a) Modelo con 0.025 de coeficiente de Manning

(b) Modelo con 0.030 de coeficiente de Manning



(c) Modelo con 0.028 de coeficiente de Manning

FIGURA V.10: Calibración por coeficiente de Manning. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.11 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.

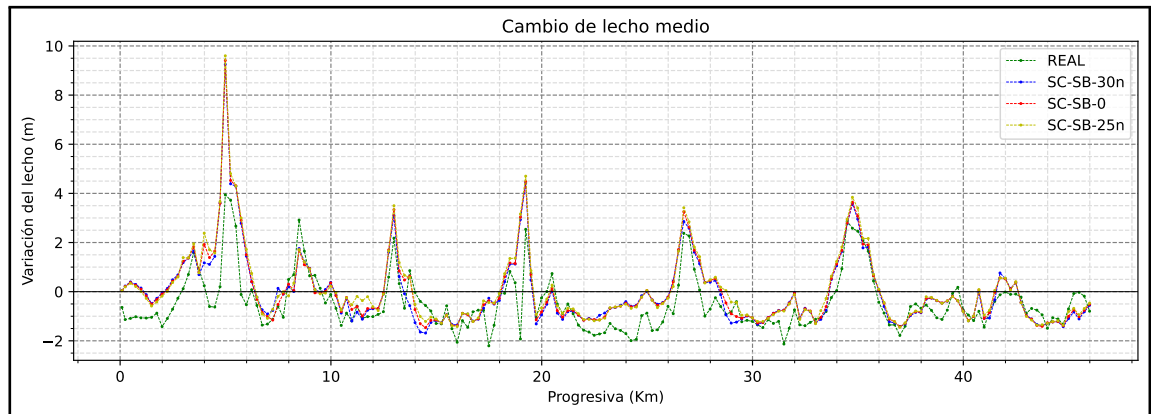


FIGURA V.11: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad del coeficiente de Manning. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.10 se observa que el modelo donde se conserva el coeficiente de Manning en 0.028 (SC-SB-0) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.10: Sensibilidad por numero de manning

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-SB-30n	0.789	0.773	0.257	0.424
SC-SB-0	0.804	0.761	0.239	0.427
SC-SB-25n	0.815	0.76	0.183	0.413

Fuente: Propia

-Sensibilidad final sin erosión lateral

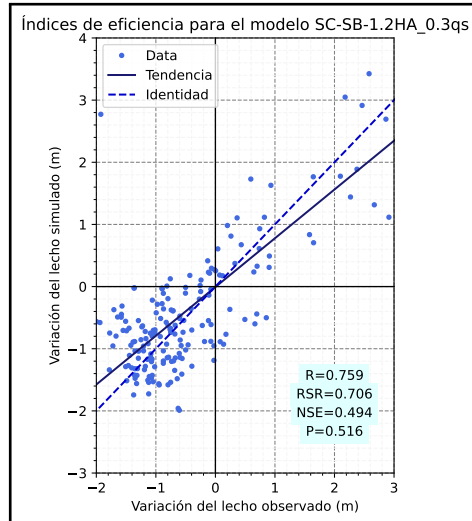
Se probaron 4 escenarios finales, donde se variaron distintos parámetros mencionados anteriormente, los detalles de estos modelos se presentan en el Cuadro V.11.

CUADRO V.11: Modelos para calibración final sin erosión lateral

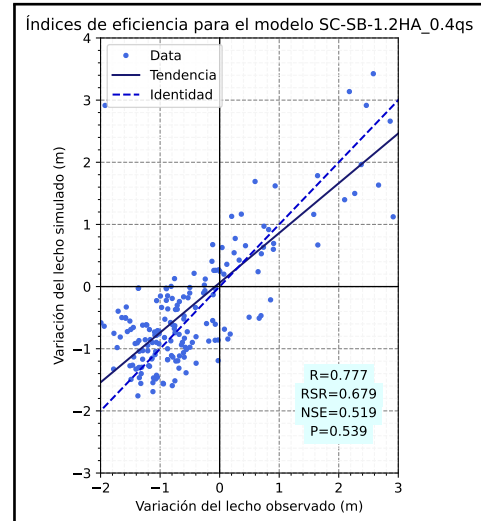
NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES					TIEMPO (hh:mm:ss)
	Diámetro de sedimento	Caudal de sólidos	Número de Manning del lecho	Capacidad de transporte	Tipo de cambio de lecho	
SC-SB-1.2HA-0.3qs	100 %	30 %	0.028	120 %	Dist. Decay	2:13:40
SC-SB-1.2HA-0.4qs	100 %	40 %	0.028	120 %	Dist. Decay	2:07:10
SC-SB-1.3HA-0.4qs	100 %	40 %	0.028	130 %	Dist. Decay	2:11:34
SC-SB-1.3HA-0.3qs	100 %	30 %	0.028	130 %	Dist. Decay	2:14:48

Fuente: Propia

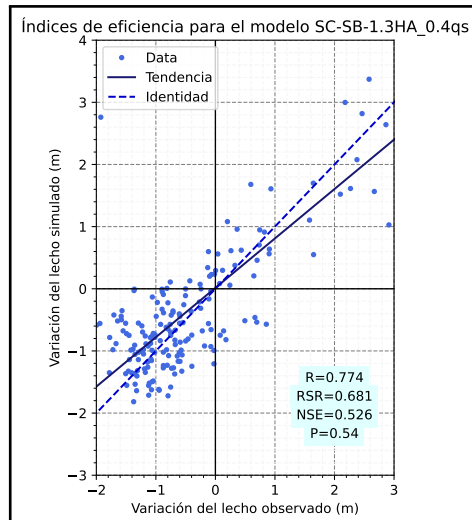
En la Figura V.12 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-SB-1.2HA-0.3qs (Figura V.12a), SC-SB-1.2HA-0.4qs (Figura V.12b), SC-SB-1.3HA-0.4qs (Figura V.12c) y SC-SB-1.3HA-0.3qs (Figura V.12d) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.



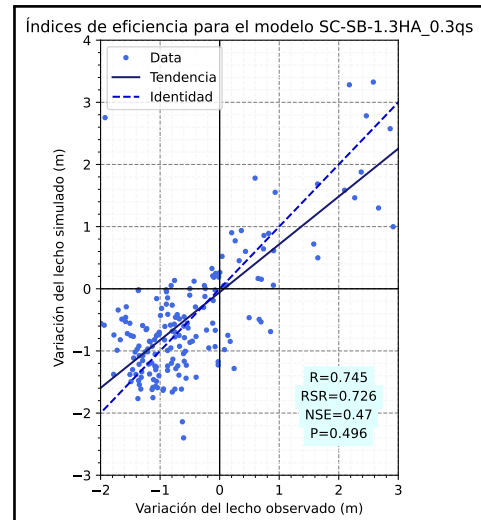
(a) Modelo con 30 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.2



(b) Modelo con 40 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.2



(c) Modelo con 40 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.3



(d) Modelo con 30 % de caudal de sólidos que ingresa al tramo y una capacidad de transporte aumentada en 1.3

FIGURA V.12: Calibración final sin erosión lateral. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.13 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos finales evaluados y el real en el tramo que corresponde desde la progresiva 00+00.0 Km hasta la 46+00.0 Km.

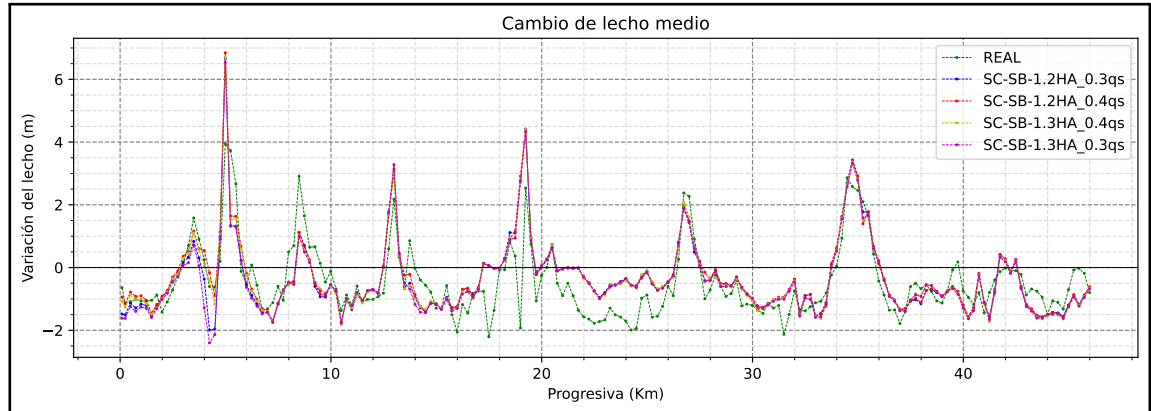


FIGURA V.13: Variación media del lecho modelada y real de los modelos finales. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.12 se observa que el modelo donde el caudal de sólidos que ingresa al tramo se modifica a un 40% y la capacidad de transporte se ve aumentada por 1.3 (SC-SB-1.3HA-0.4qs) presenta los mejores índices de evaluación.

CUADRO V.12: Sensibilidad por calibración final

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-SB-1.2HA-0.3qs	0.759	0.706	0.494	0.516
SC-SB-1.2HA-0.4qs	0.777	0.679	0.519	0.539
SC-SB-1.3HA-0.4qs	0.774	0.681	0.526	0.54
SC-SB-1.3HA-0.3qs	0.745	0.726	0.47	0.496

Fuente: Propia

Una vez establecido el modelo final sin erosión lateral se presenta su rendimiento en todo el tramo (hasta la progresiva 80+410 Km) en la Figura V.14, y la evolución del lecho en la Figura V.15.

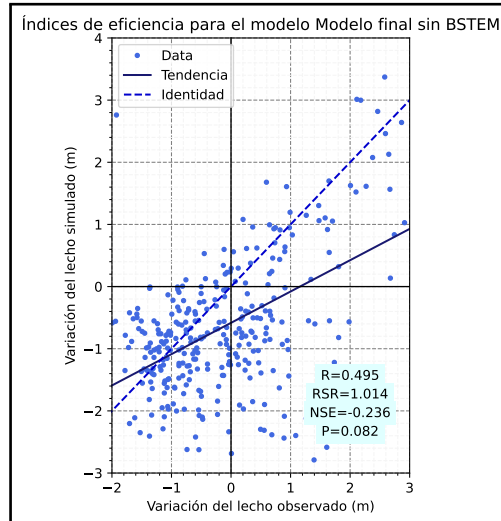


FIGURA V.14: Modelo final sin incluir erosión lateral a lo largo de todo el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia

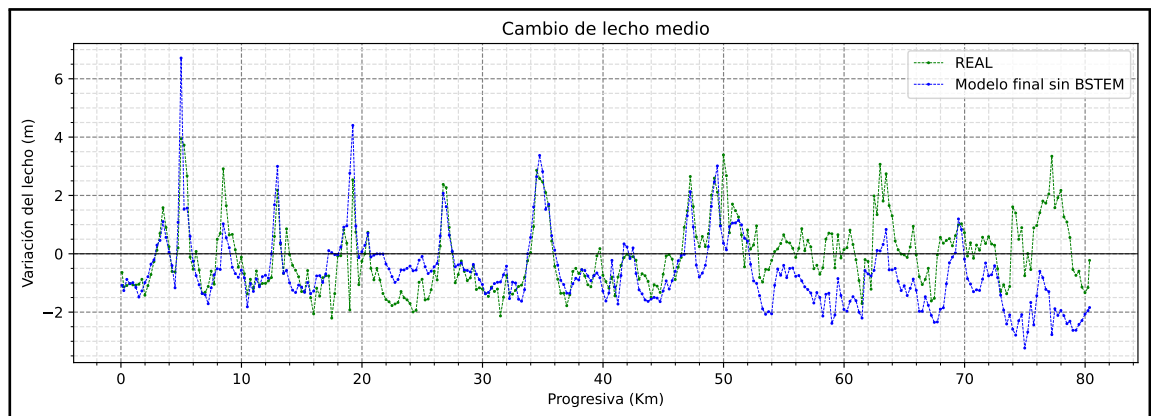


FIGURA V.15: Variación media del lecho del modelo final sin erosión lateral en todo el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia

Los valores ideales para los índices utilizados son: R es de 1, RSR es de 0, NSE es de 1 y P es de 1. Se concluye a partir de los índices de la Figura V.12b y Figura V.14, que el modelo calibrado sin incluir BSTEM presenta un buen rendimiento en la zona de geología terciaria ($R=0.7740$, $RSR=0.681$, $NSE=0.526$ y $P=0.54$), pero un mal rendimiento de la zona de geología cuaternaria ($R=0.498$, $RSR=1.059$, $NSE=-1.91$ y $P=-0.49$), concluyendo en los siguientes índices para el tramo total: $R=0.495$, $RSR=1.014$, $NSE=-0.236$ y $P=0.082$.

VI.2 Análisis de sensibilidad de parámetros BSTEM para erosión lateral

Una vez establecido el modelo sin erosión lateral (SC-SB-0.5qs) se procede a incluir el módulo BSTEM y realizar un análisis de sensibilidad entre las variables de: ángulo de fricción, cohesión, esfuerzo cortante crítico y erosionabilidad. Este análisis se realizó con el fin de obtener los resultados de mejor correlación a los medidos en el tramo que sí presenta efectos de erosión lateral importantes, el tramo con geología cuaternaria como se puede observar en la Figura V.1, que corresponde desde la progresiva 46+00.0 Km hasta la 80+410.0 Km. Para la primera prueba del modelo se utilizaron los de los materiales por defecto que se incluyen en el software, este material representa a una mezcla de la arena fina con materiales cohesivos que se pueden encontrar en el Cuadro V4.4, y cuyos parámetros iniciales son 1887 Kg/m³ de Peso Unitario Saturado, 31° de ángulo de fricción, 1.0 Kpa de Cohesión, 15° de ϕ^b , 1.5 Pa de Cortante Crítico y 2×10^{-7} m³/N-s de Erosionabilidad.

-Sensibilidad del angulo de fricción

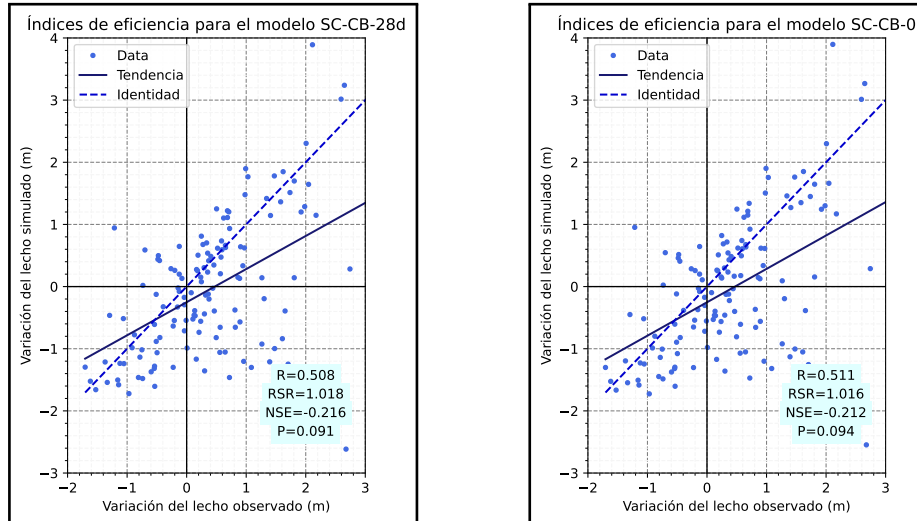
Se probaron 3 escenarios posibles, el escenario donde se utilizó un ángulo de fricción de 28° (SC-CB-28d), 31° (SC-CB-0) y 33° (SC-CB-33d) , los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.13.

CUADRO V.13: Modelos para sensibilidad BSTEM - ángulo de fricción

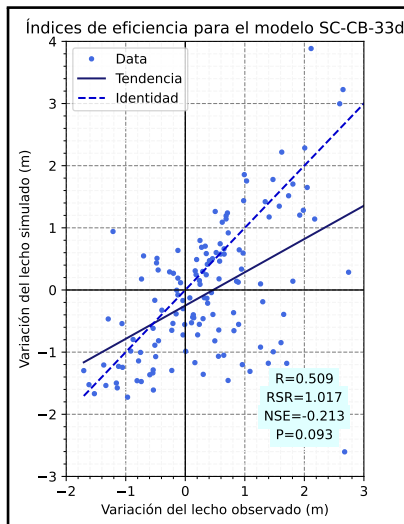
NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES				TIEMPO (hh:mm:ss)
	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (KPa)	Esfuerzo cortante crítico (Pa)	Erosionabilidad (10^{-7} m ³ /N-s)	
SC-CB-28d	28°	1.0	1.5	2.0	3:39:48
SC-CB-0	31°	1.0	1.5	2.0	3:33:31
SC-CB-33d	33°	1.0	1.5	2.0	3:31:30

Fuente: Propia

En la Figura V.16 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-CB-28d (Figura V.16a), SC-CB-0 (Figura V.16b) y SC-CB-33d (Figura V.16c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018 en el tramo cuaternario.



(a) Modelo con 28° de ángulo de fricción. (b) Modelo con 31° de ángulo de fricción.



(c) Modelo con 33° de ángulo de fricción.

FIGURA V.16: Calibración por ángulo de fricción en tramo cuaternario. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.17 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo cuaternario de progresivas desde 46+00.0 Km a 80+410 Km.

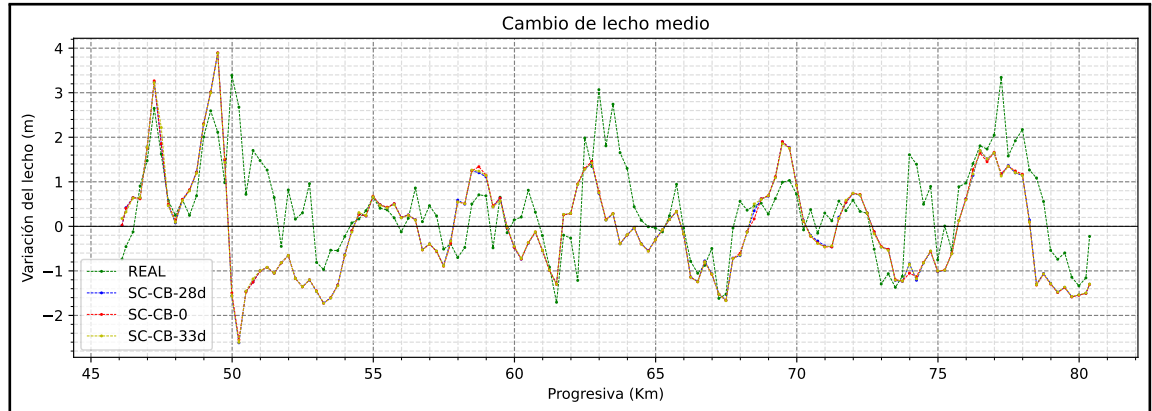


FIGURA V.17: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad del ángulo de fricción.
Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.14 se observa que el modelo donde se usa 31° como ángulo de fricción (SC-CB-0) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.14: Sensibilidad por angulo de friccion

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-CB-28d	0.508	1.018	-0.216	0.091
SC-CB-0	0.511	1.016	-0.212	0.094
SC-CB-33d	0.509	1.017	-0.213	0.093

Fuente: Propia

-Sensibilidad de la cohesión

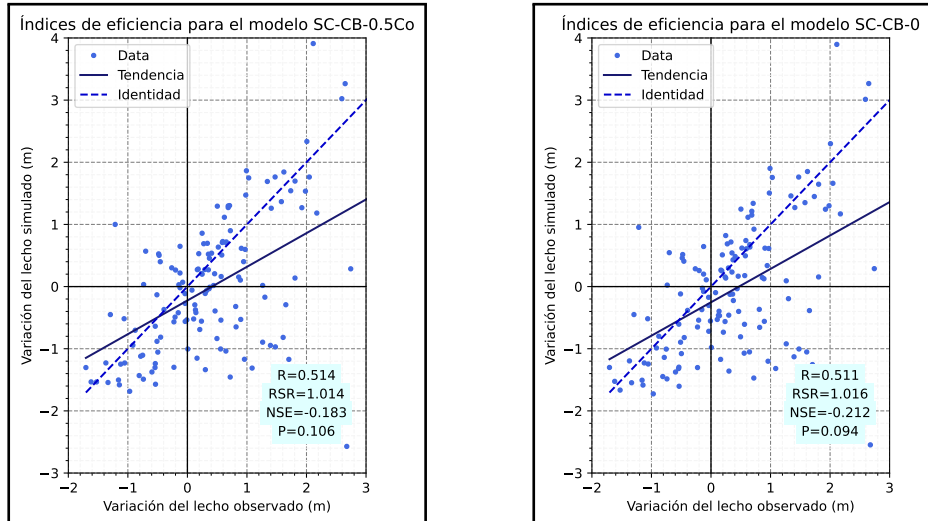
Se probaron 3 escenarios posibles, el escenario donde se utilizó una cohesión de 0.5 KPa (SC-CB-0.5Co), 1.0 KPa (SC-CB-0) y otro con 1.5 KPa (SC-CB-1.5Co), los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.15.

CUADRO V.15: Modelos para sensibilidad BSTEM - cohesión

NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES				TIEMPO (hh:mm:ss)
	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (KPa)	Esfuerzo cortante crítico (Pa)	Erosionabilidad (10^{-7} m ³ /N-s)	
SC-CB-0.5Co	31°	0.5	1.5	2.0	3:38:59
SC-CB-0	31°	1.0	1.5	2.0	3:33:31
SC-CB-1.5Co	31°	1.5	1.5	2.0	3:38:52

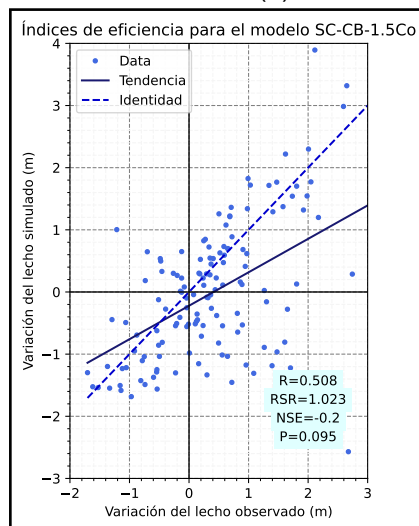
Fuente: Propia

En la Figura V.18 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-CB-0.5Co (Figura V.18a), SC-CB-0 (Figura V.18b) y SC-CB-1.5Co (Figura V.18c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018 en el tramo cuaternario.



(a) Modelo con 0.5 KPa de cohesión.

(b) Modelo con 1.0 KPa de cohesión.



(c) Modelo con 1.5 KPa de cohesión.

FIGURA V.18: Calibración por cohesión en tramo cuaternario. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.19 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo cuaternario de progresivas desde 46+00.0 Km a 80+410 Km.

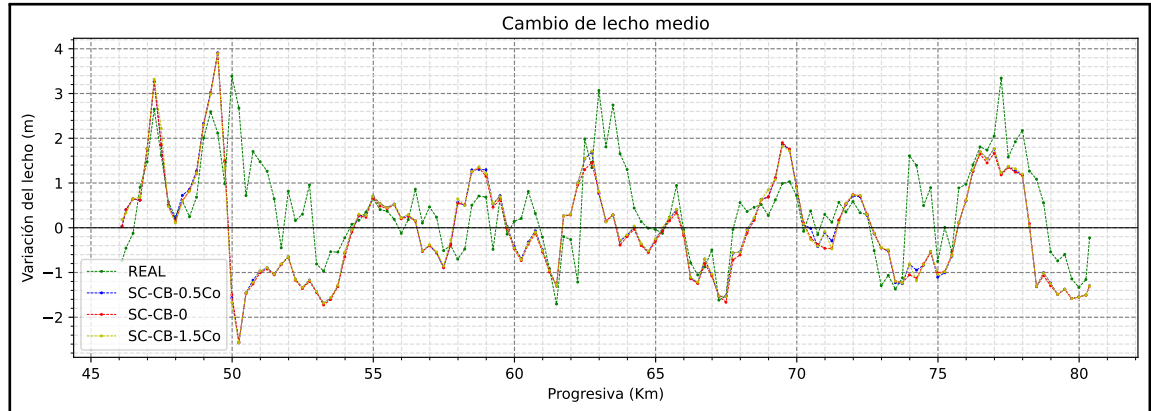


FIGURA V.19: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad de la cohesión. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.16 se observa que el modelo donde se usa 0.5 Kpa como cohesión (SC-CB-0.5Co) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.16: Sensibilidad por cohesión

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-CB-0.5Co	0.514	1.014	-0.183	0.106
SC-CB-0	0.511	1.016	-0.212	0.094
SC-CB-1.5Co	0.508	1.023	-0.2	0.095

Fuente: Propia

-Sensibilidad del esfuerzo cortante crítico

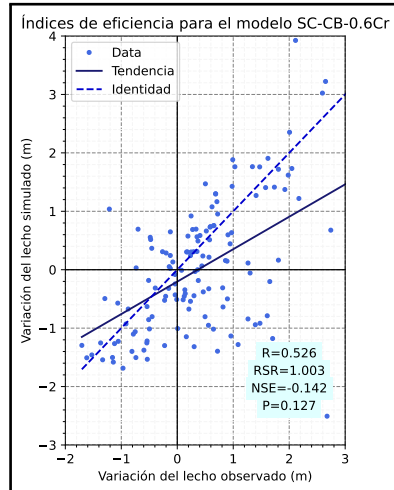
Se probaron 3 escenarios posibles, el escenario donde se utilizó un esfuerzo cortante crítico de 0.6 Pa (SC-CB-0.6Cr), 1.5 Pa (SC-CB-0) y otro con 2.0 Pa (SC-CB-2.0Cr), los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.17.

CUADRO V.17: Modelos para sensibilidad BSTEM - esfuerzo cortante critico

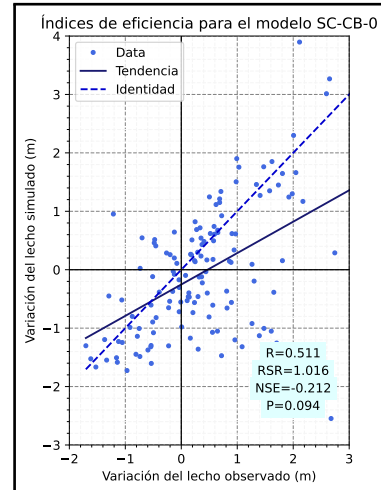
NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES				TIEMPO (hh:mm:ss)
	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (KPa)	Esfuerzo cortante crítico (Pa)	Erosionabilidad (10^{-7} m ³ /N-s)	
SC-CB-0.6Cr	31°	1.0	0.6	2.0	3:34:55
SC-CB-0	31°	1.0	1.5	2.0	3:33:31
SC-CB-1.3Cr	31°	1.0	2.0	2.0	3:27:46

Fuente: Propia

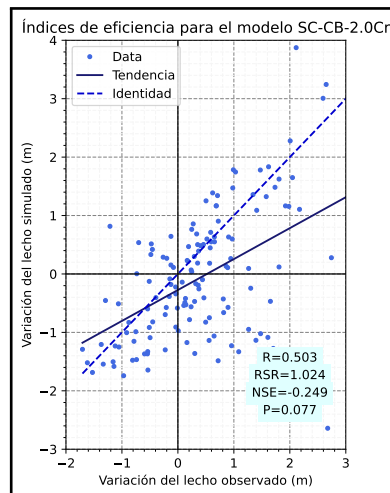
En la Figura V.20 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-CB-0.6Cr (Figura V.20a), SC-CB-0 (Figura V.20b) y SC-CB-2.0Cr (Figura V.20c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018 en el tramo cuaternario.



(a) Modelo con 0.6 Pa de esfuerzo cortante crítico.



(b) Modelo con 1.5 Pa de esfuerzo cortante crítico.



(c) Modelo con 2.0 Pa de esfuerzo cortante crítico.

FIGURA V.20: Calibración por esfuerzo cortante crítico en tramo cuaternario. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.21 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo cuaternario de progresivas desde 46+00.0 Km a 80+410 Km.

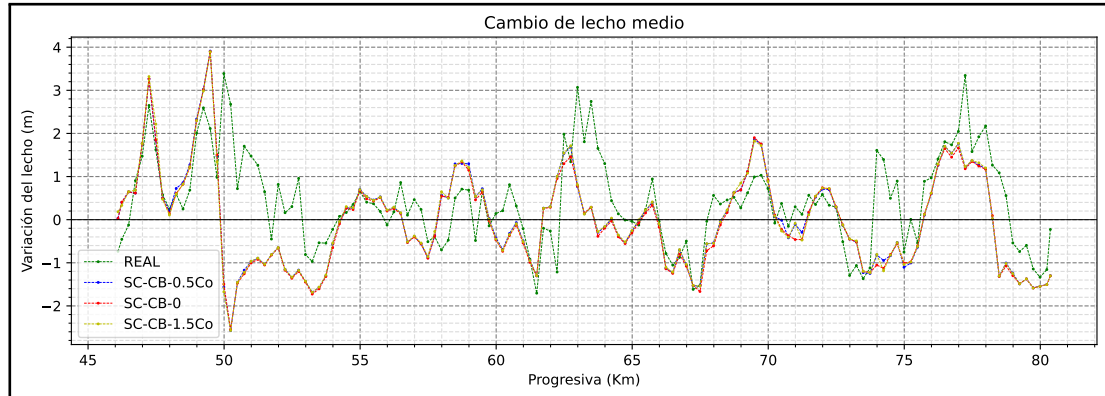


FIGURA V.21: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad de la cohesión. Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.18 se observa que el modelo que utiliza 0.6 Pa como esfuerzo de corte crítico (SC-SB-0.6Cr) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.18: Sensibilidad por esfuerzo cortante critico

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-CB-0.6Cr	0.526	1.003	-0.142	0.127
SC-CB-0	0.511	1.016	-0.212	0.094
SC-CB-2.0Cr	0.503	1.024	-0.249	0.077

Fuente: Propia

-Sensibilidad de la erosionabilidad

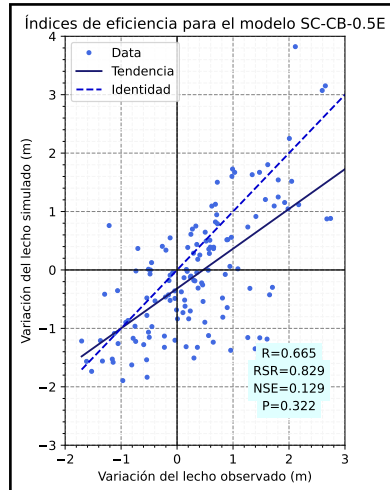
Se probaron 3 escenarios posibles, el escenario donde se utilizó una erosionabilidad de $5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{N-s}$ (SC-CB-0.5E), $2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ (SC-CB-0) y otro con $4 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ (SC-CB-4E), los detalles de los modelos se presentan en el Cuadro V.19.

CUADRO V.19: Modelos para sensibilidad BSTEM - erosionabilidad

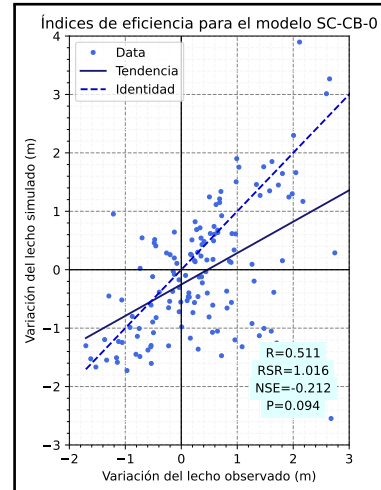
NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES				TIEMPO (hh:mm:ss)
	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (KPa)	Esfuerzo cortante crítico (Pa)	Erosionabilidad ($10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$)	
SC-CB-0.5E	31°	1.0	1.5	0.5	3:29:18
SC-CB-0	31°	1.0	1.5	2.0	3:33:31
SC-CB-4E	31°	1.0	1.5	4.0	3:23:10

Fuente: Propia

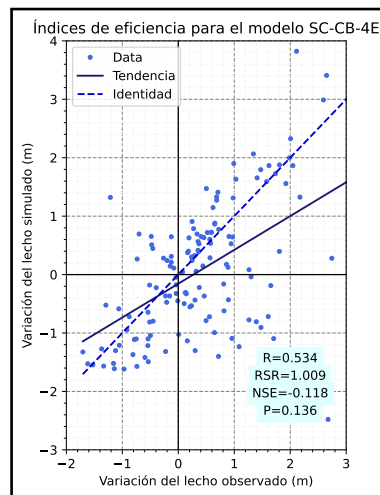
En la Figura V.22 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-CB-0.5E (Figura V.22a), SC-CB-0 (Figura V.22b) y SC-CB-4E (Figura V.22c) con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018 en el tramo cuaternario.



(a) Modelo con $5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad.



(b) Modelo con $2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad.



(c) Modelo con $4 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad.

FIGURA V.22: Calibración por cohesión en tramo cuaternario. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.23 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos evaluados y el real en el tramo cuaternario de progresivas desde 46+00.0 Km a 80+410 Km.

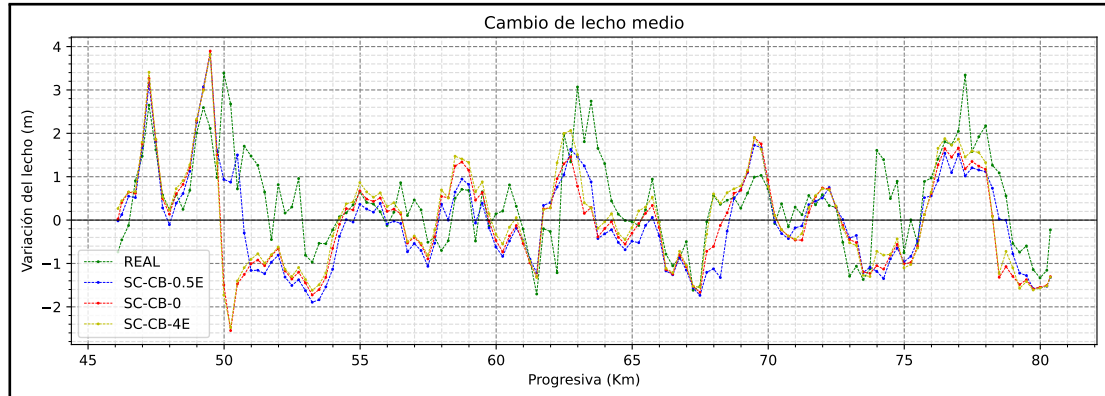


FIGURA V.23: Variación media del lecho modelada y real para sensibilidad de la erosionabilidad.
Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.20 se observa que el modelo que utiliza $5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{N-s Pa}$ como erosionabilidad (SC-CB-0.5E) presenta unos mejores índices de evaluación.

CUADRO V.20: Sensibilidad por erosionabilidad

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-CB-0.5E	0.665	0.829	0.129	0.322
SC-CB-0	0.511	1.016	-0.212	0.094
SC-CB-4E	0.534	1.009	-0.118	0.136

Fuente: Propia

-Sensibilidad final incluyendo erosión lateral

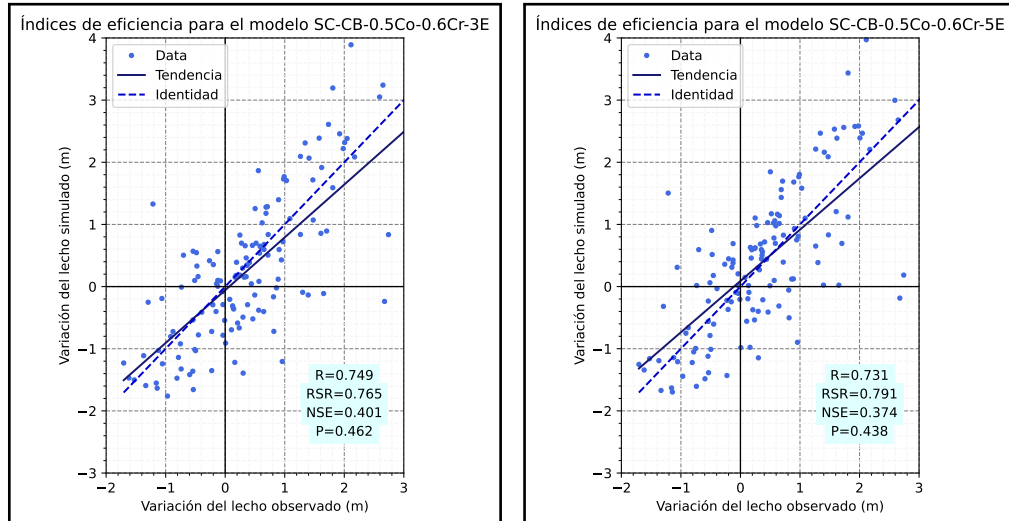
Se probaron 3 escenarios finales, donde se variaron distintos parámetros BSTEM mencionados anteriormente, los detalles de estos modelos se presentan en el Cuadro V.21.

CUADRO V.21: Modelos para calibración final con erosión lateral

NOMBRE DEL MODELO	VARIABLES				TIEMPO (hh:mm:ss)
	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (KPa)	Esfuerzo cortante crítico (Pa)	Erosionabilidad (10^{-7} m ³ /N-s)	
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-3E	31°	0.5	0.6	3	3:33:49
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-5E	31°	0.5	0.6	5	3:34:38
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E	31°	0.5	0.6	6	3:43:02

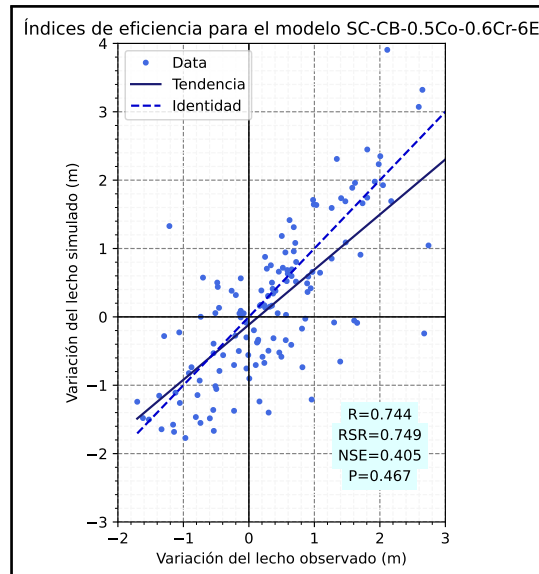
Fuente: Propia

En la Figura V.24 se presentan las correlaciones del cambio medio del lecho calculados de los modelos, SC-CB-0.5Co-0.6Cr-3E (Figura V.24a), SC-CB-0.5Co-0.6Cr-5E (Figura V.24b) y SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E (Figura V.24c), estos modelos con valores de erosionabilidad mayores de la última curva la cual presenta mayores tasas de erosión, con los medidos en campo entre marzo y agosto del 2018.



(a) 0.5 KPa de cohesión 0.6 Pa de esfuerzo crítico, $3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad

(b) 0.5 KPa de cohesión 0.6 Pa de esfuerzo crítico, $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad



(c) 0.5 KPa de cohesión 0.6 Pa de esfuerzo crítico, $6 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ de erosionabilidad

FIGURA V.24: Calibración final incluyendo erosión lateral. Fuente: propia

Como parte del análisis, en la Figura V.25 se presenta el cambio medio de lecho de los modelos finales evaluados y el real en el tramo de geología cuaternaria, que corresponde desde la progresiva 46+00.0 Km hasta la 80+410.0 Km.

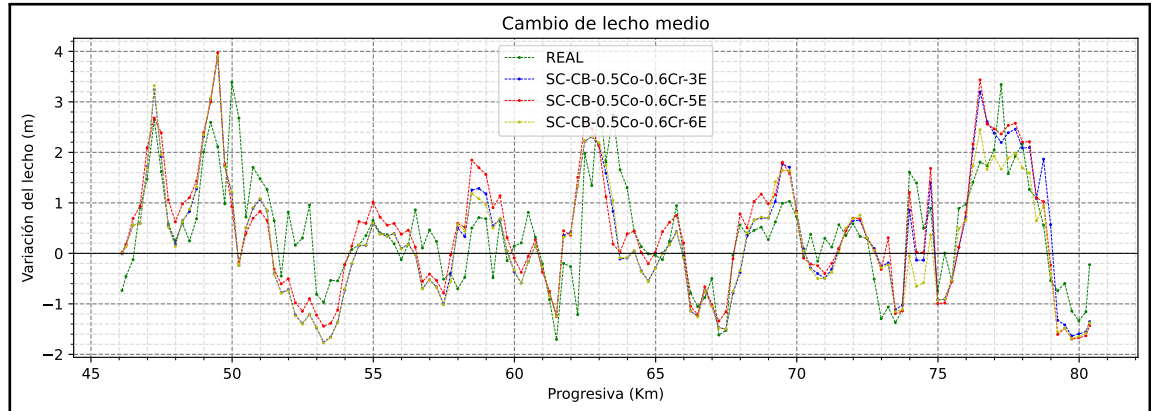


FIGURA V.25: Variación media del lecho modelada y real de los modelos finales con erosión lateral.
Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro V.22 se observa que el modelo donde se tiene 0.5 KPa de cohesión 0.6 Pa de esfuerzo crítico y la erosionabilidad es de $6 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{N-s}$ (SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E) presenta los mejores índices de evaluación.

CUADRO V.22: Sensibilidad por calibración final BSTEM

NOMBRE DEL MODELO	ÍNDICES DE EVALUACIÓN			
	R	RSR	NSE	P
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-3E	0.749	0.765	0.401	0.462
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-5E	0.731	0.791	0.374	0.438
SC-CB-0.5Co-0.6Cr-6E	0.744	0.749	0.405	0.467

Fuente: Propia

Una vez establecido el modelo final incluyendo erosión lateral se presenta su rendimiento en todo el tramo (desde la progresiva 00+00.0 Km hasta 80+410 Km) en la Figura V.26, y la evolución del lecho en la Figura V.27.

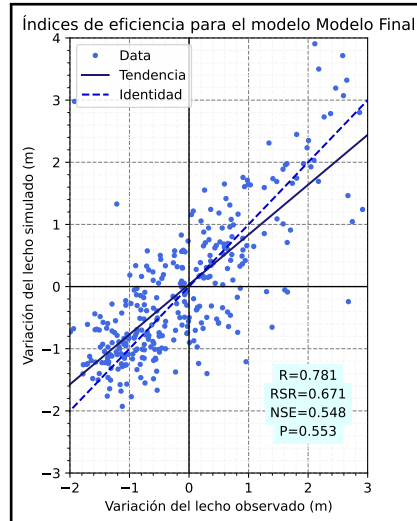


FIGURA V.26: Modelo final con erosión lateral a lo largo de todo el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia

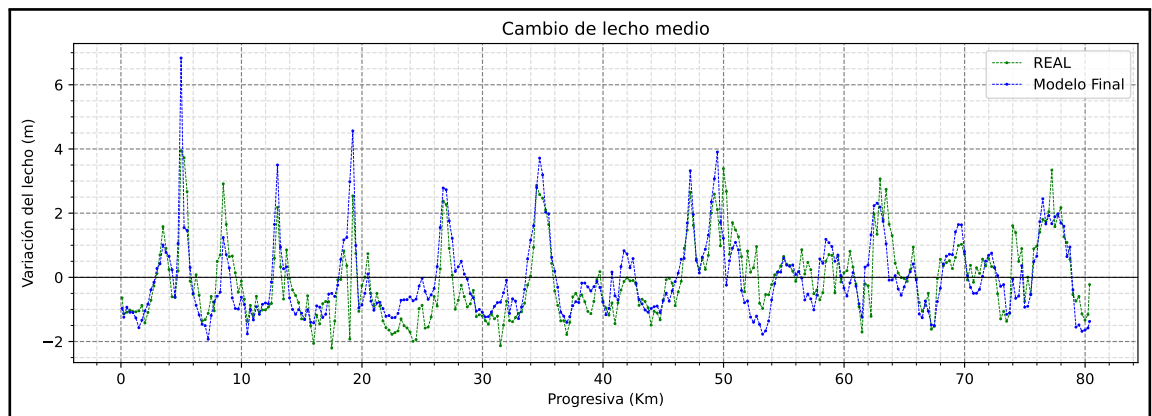
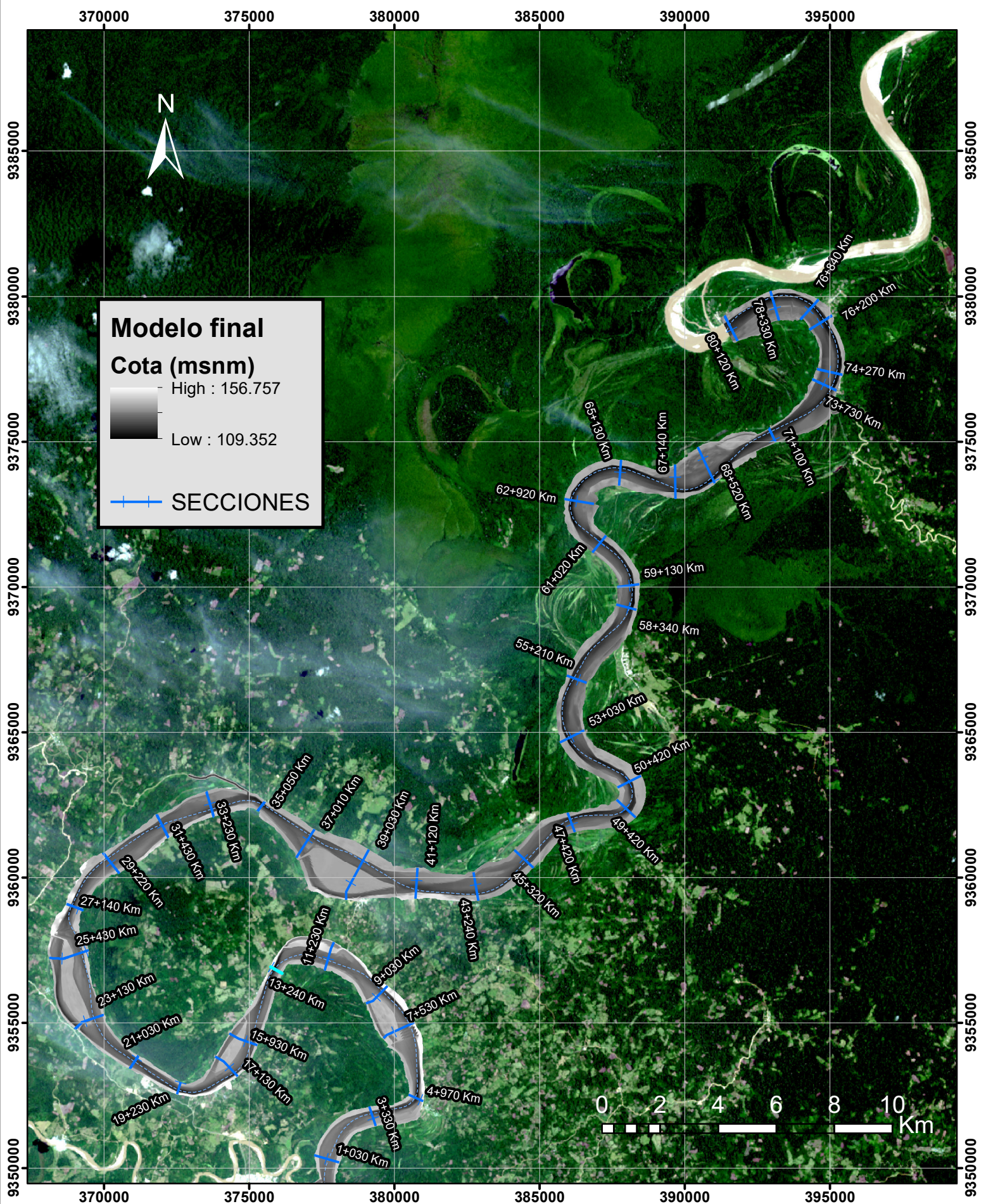


FIGURA V.27: Variación media del lecho del modelo final con erosión lateral en todo el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia

Los valores ideales para los índices de calibración utilizados son los siguientes: R es de 1, RSR es de 0, NSE es de 1 y P es de 1. Se concluye a partir de los índices de la Figura V.26, que el modelo calibrado al incluir erosión lateral BSTEM presenta una mejora significativa de los índices de calibración siendo estos ahora: $R=0.781$, $RSR=0.671$, $NSE=0.548$ y $P=0.553$, en comparación a los del modelo sin BSTEM, que eran: $R=0.495$, $RSR=1.014$, $NSE=-0.236$ y $P=0.082$, representando así una mejora promedio del 51.3 % respecto a una modelación 1D sin incluir erosión lateral.

ANEXO VII: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

ANEXO VII.1 SECCIONES REPRESENTADAS A LO LARGO DEL TRAMO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DPTO. ACADEMICO DE HIDRAULICA
E HIDROLOGIA

TESIS:

MODELAMIENTO FLUVIOMORFOLOGICO
UNIDIMENSIONAL DE PROCESOS DE EROSION
LATERAL, Y DE EROSION Y SEDIMENTACION
VERTICAL EN EL TRAMO DEL RIO HUALLAGA
COMPRENDIDO ENTRE YURIMAGUAS Y SELVA ALEGRE

TÍTULO:

SECCIONES Y
MODELO FINAL

TESISTA:

Bach. Smith Calixto Nuñez Nuñez

ESCALA:

1/165'000

DATUM:

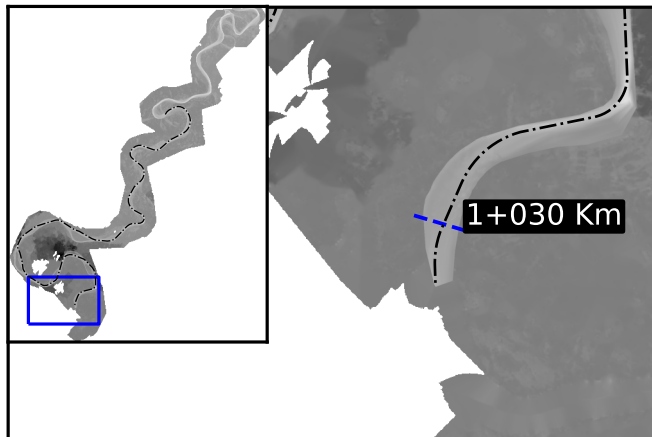
WGS84, ZONA 18 SUR.

MAPA N°:

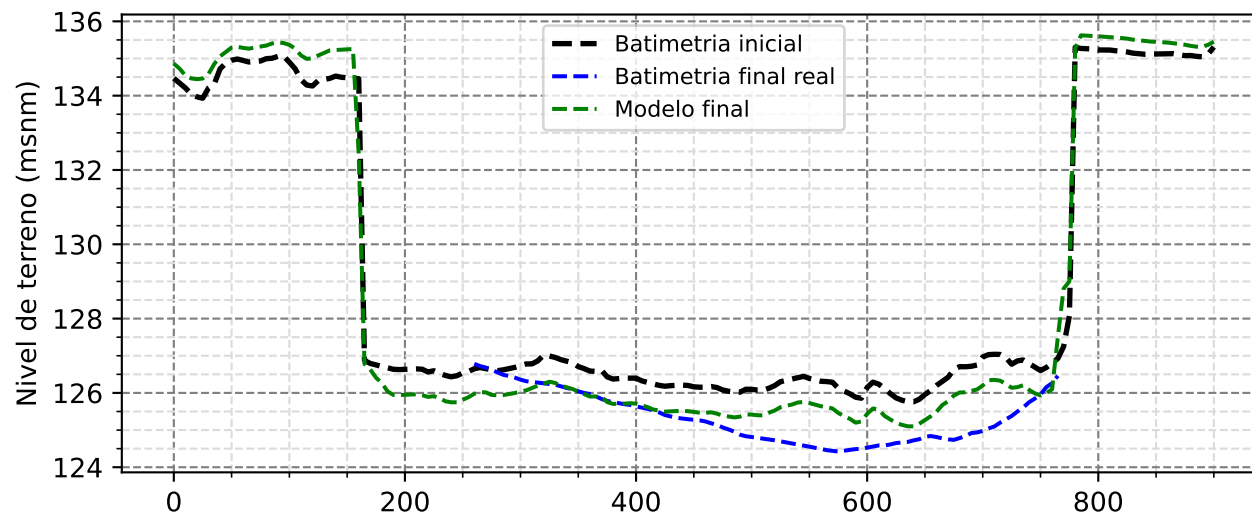
VII.1

ANEXO VII.2 CAMBIO MODELADO Y REAL EN SECCIONES

Vista en planta



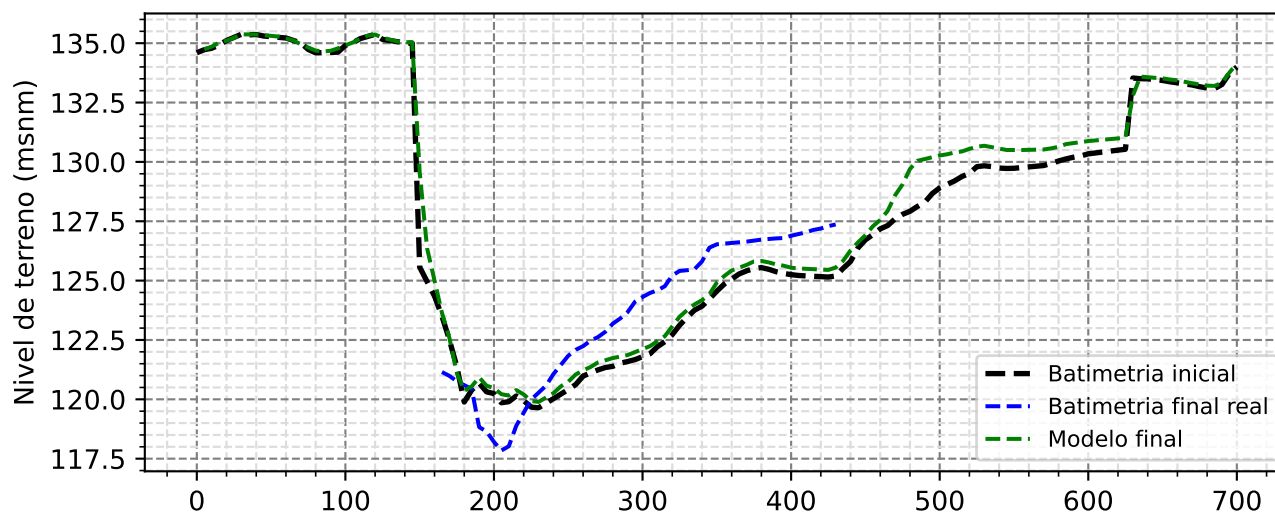
Seccion 1+030 Km



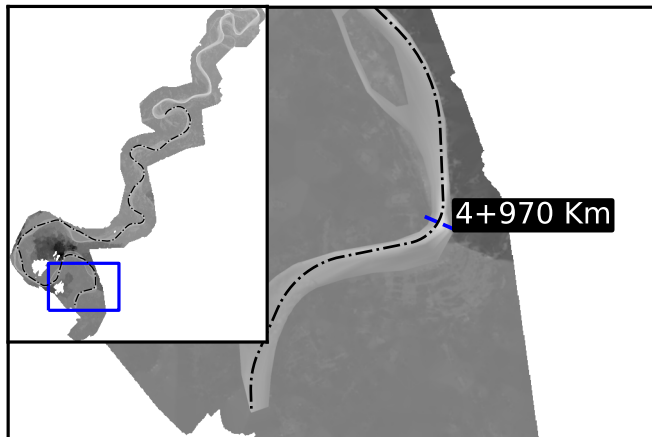
Vista en planta



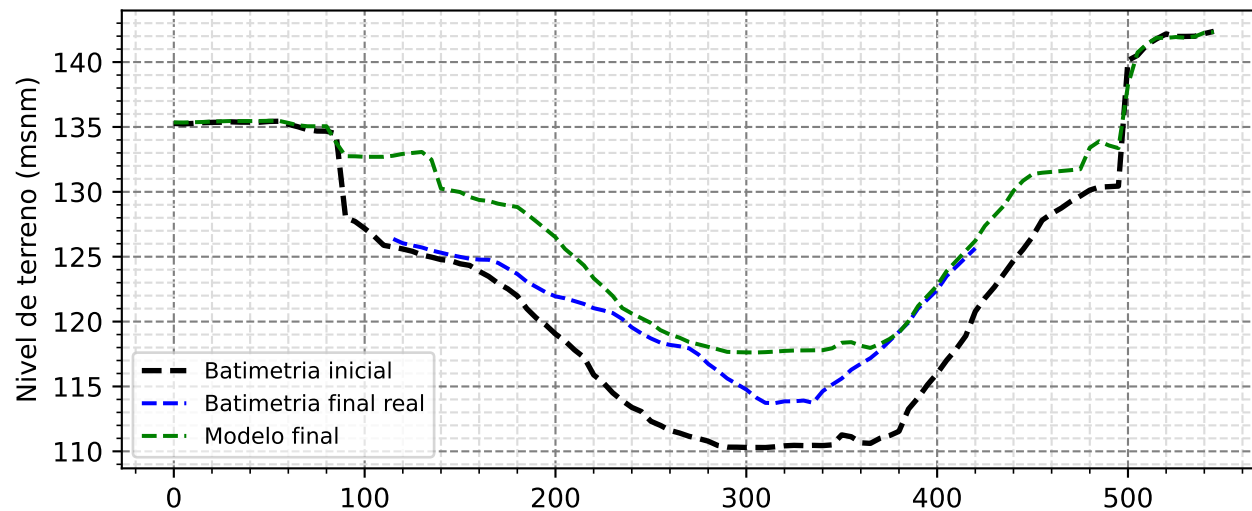
Seccion 3+330 Km



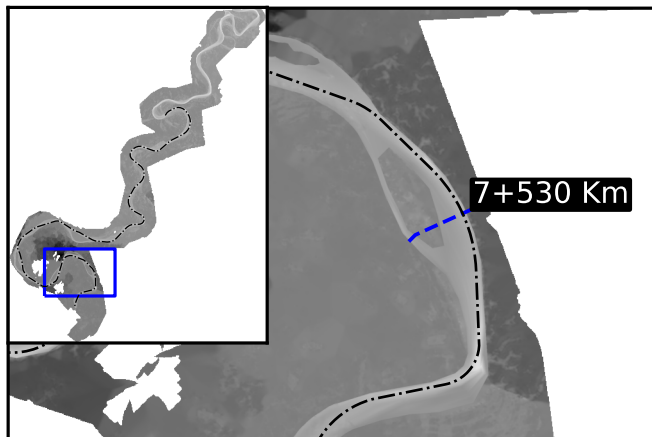
Vista en planta



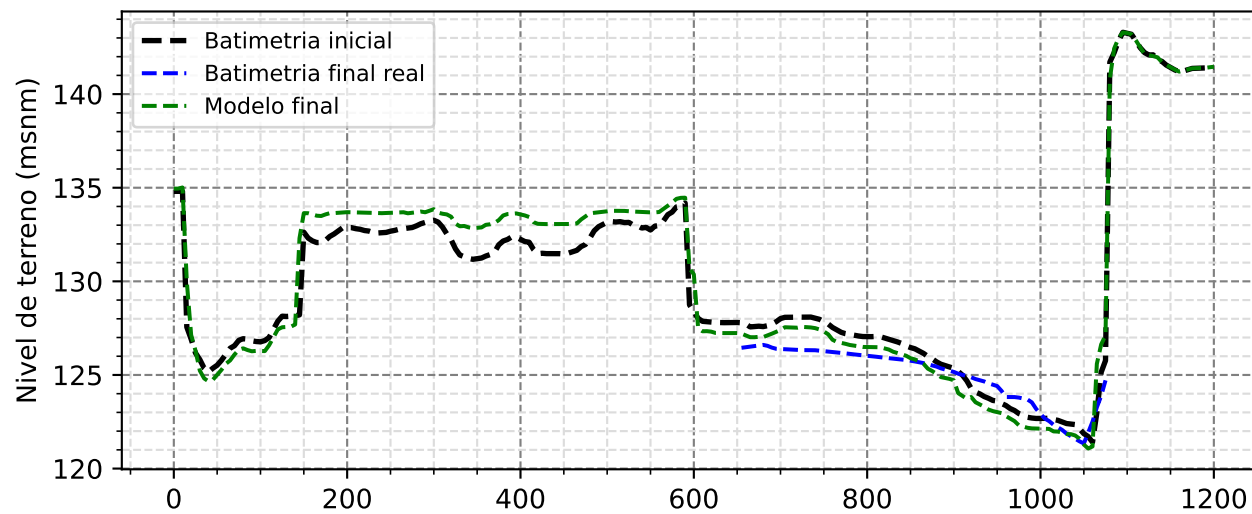
Seccion 4+970 Km



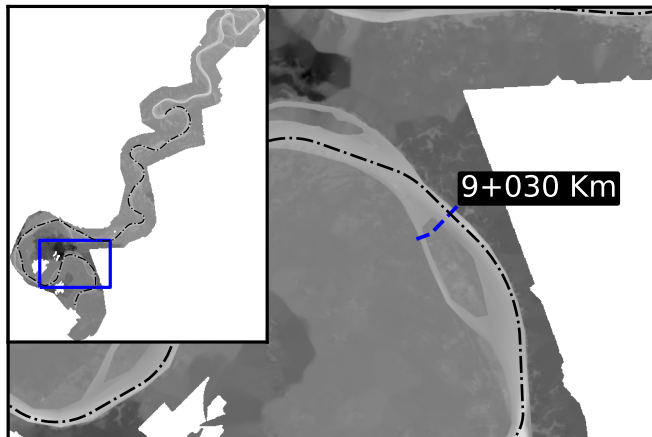
Vista en planta



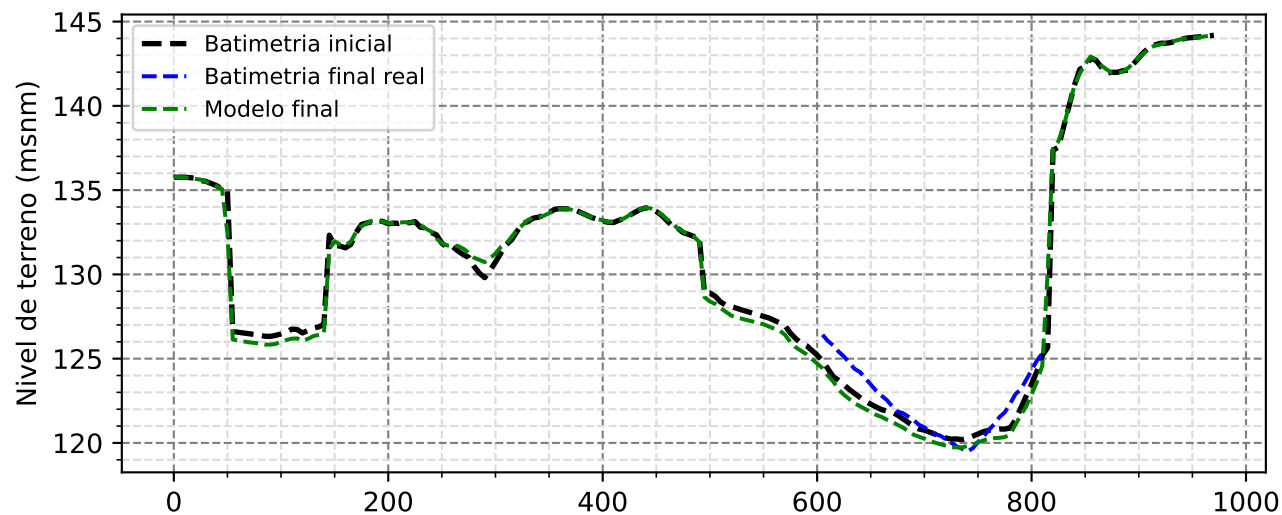
Seccion 7+530 Km



Vista en planta



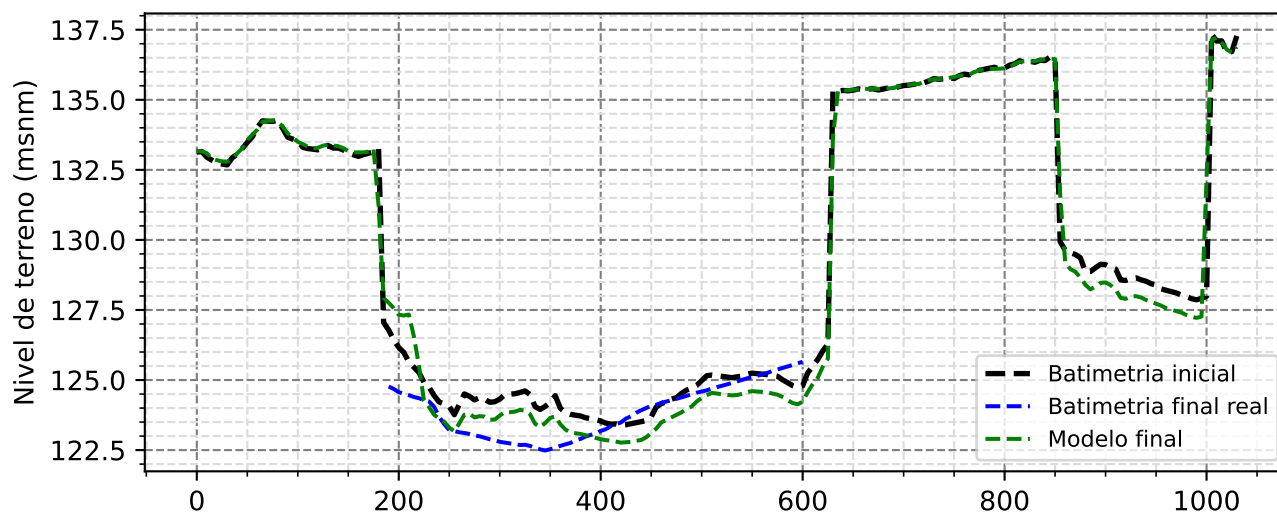
Seccion 9+030 Km



Vista en planta



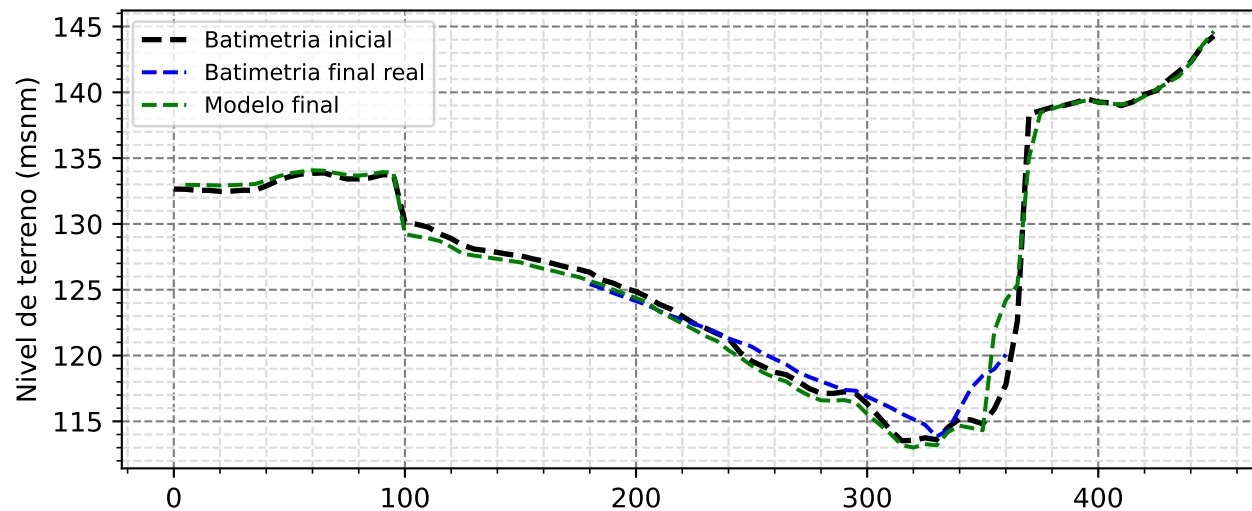
Seccion 11+230 Km



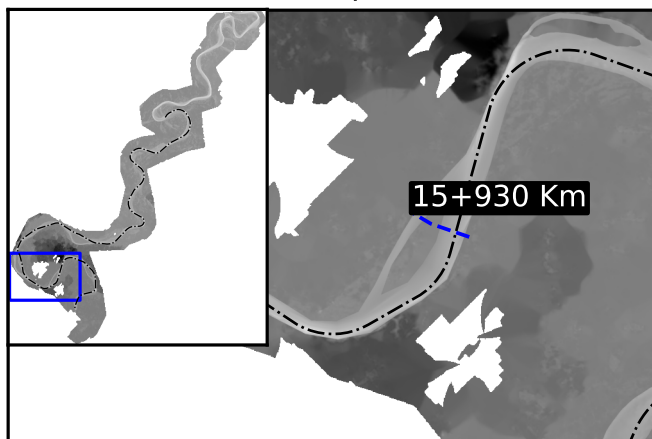
Vista en planta



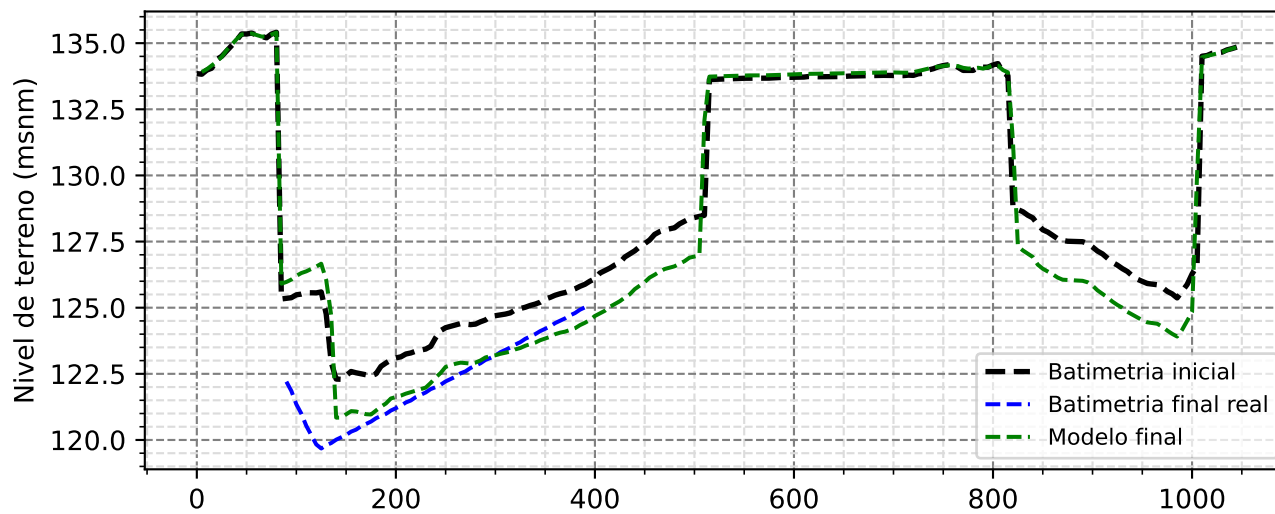
Seccion 13+240 Km



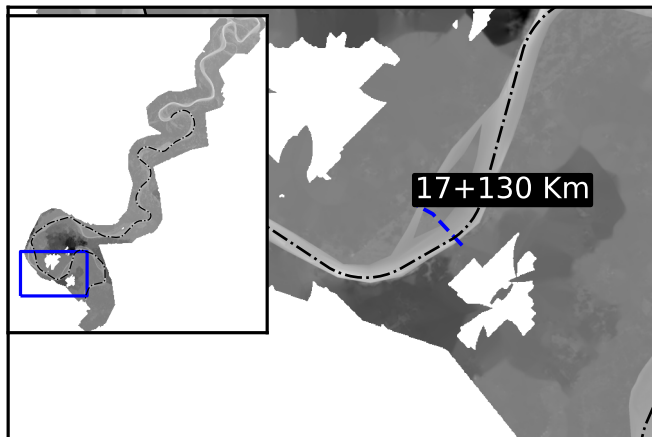
Vista en planta



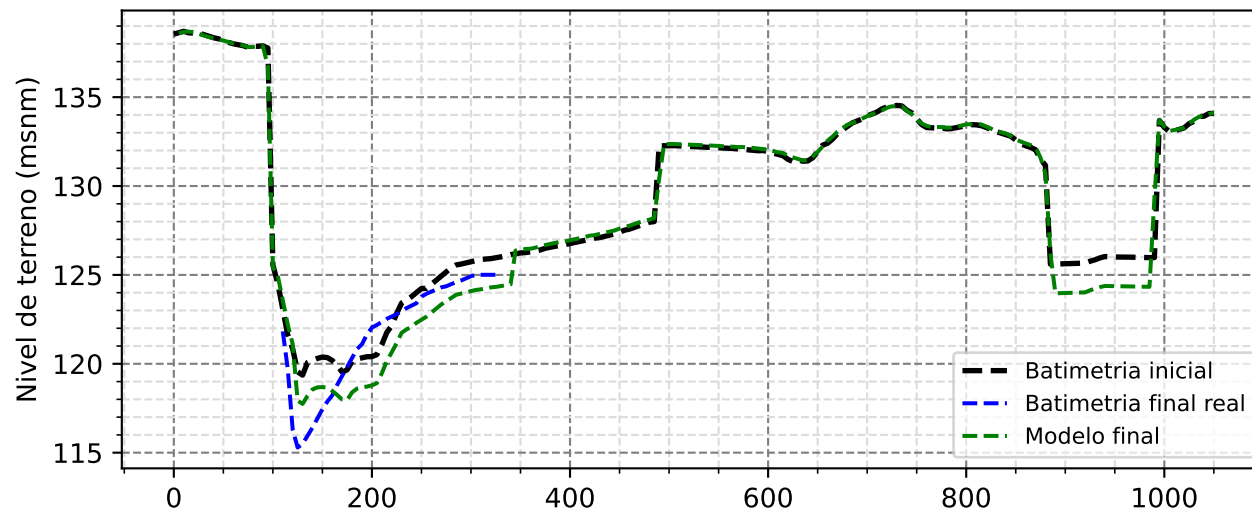
Seccion 15+930 Km



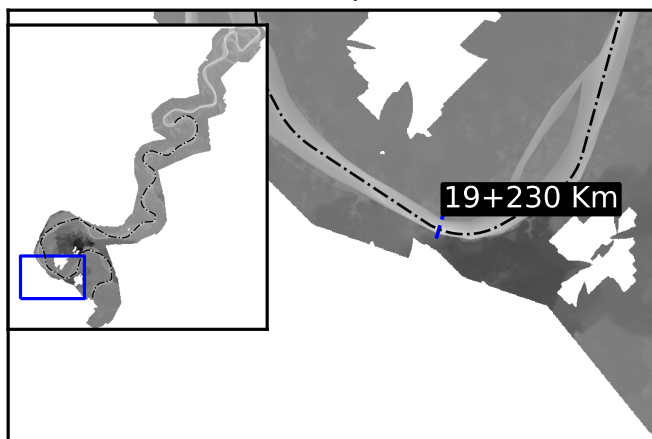
Vista en planta



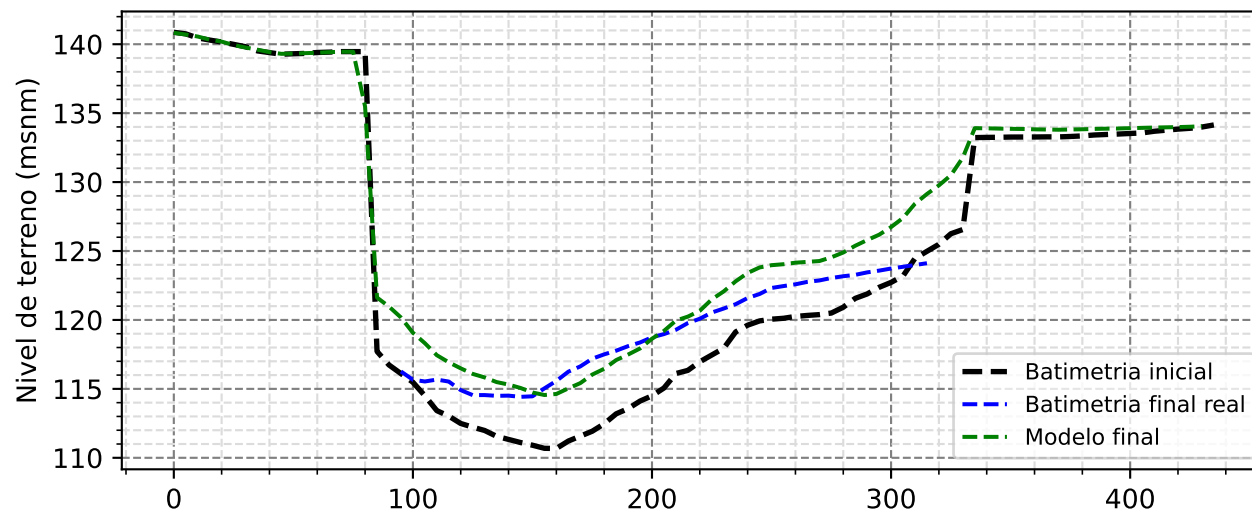
Seccion 17+130 Km



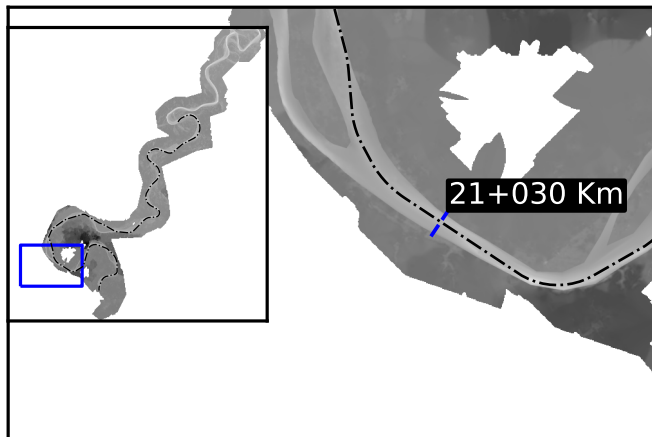
Vista en planta



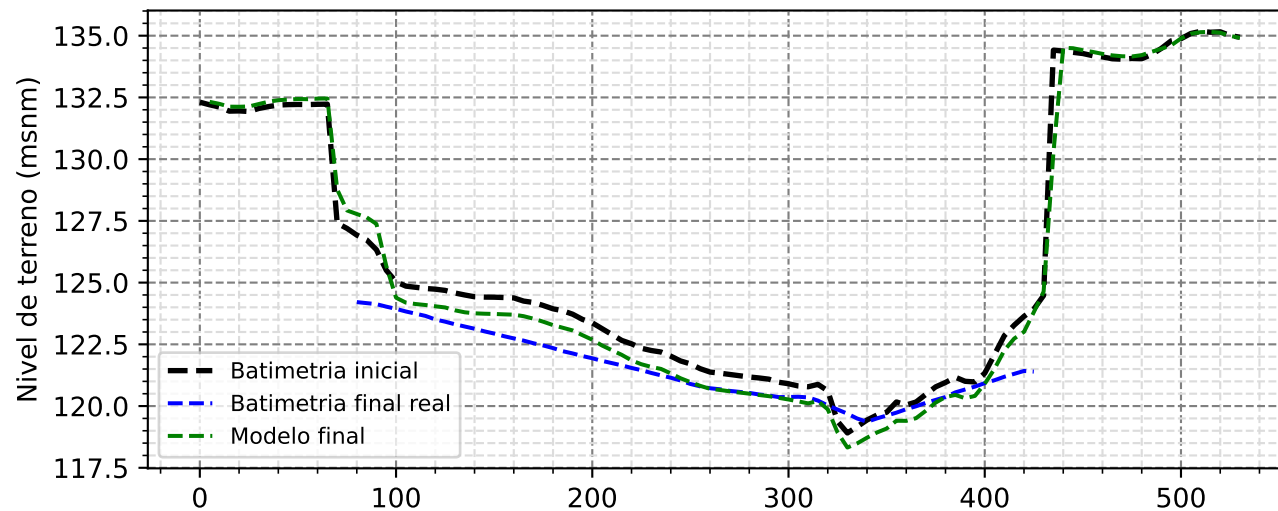
Seccion 19+230 Km



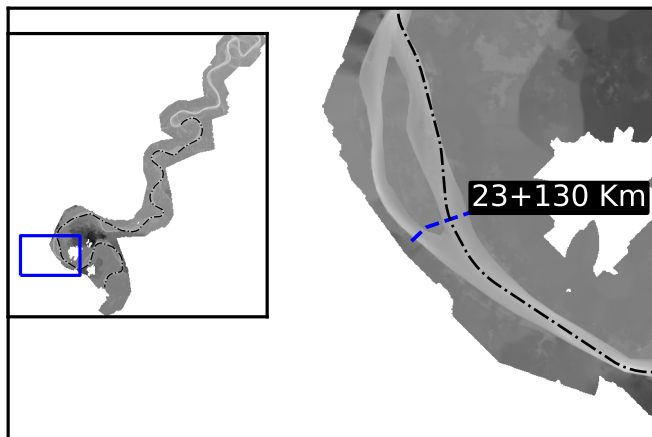
Vista en planta



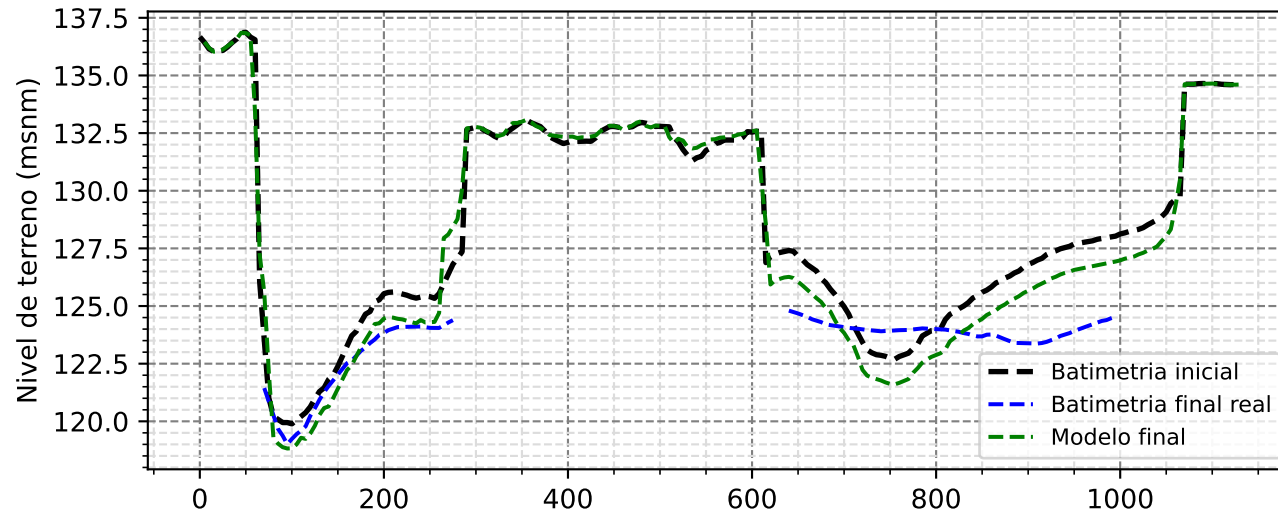
Seccion 21+030 Km



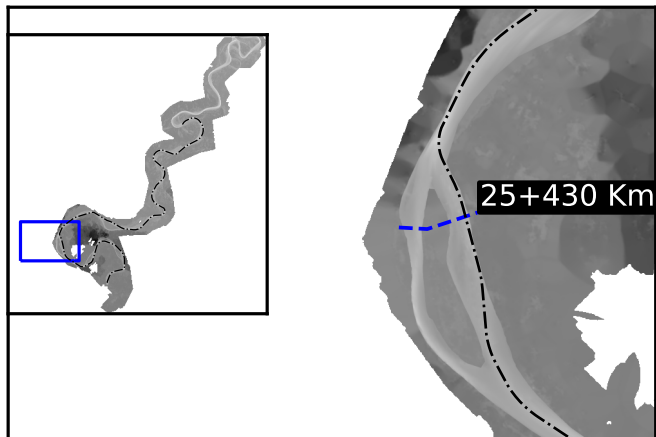
Vista en planta



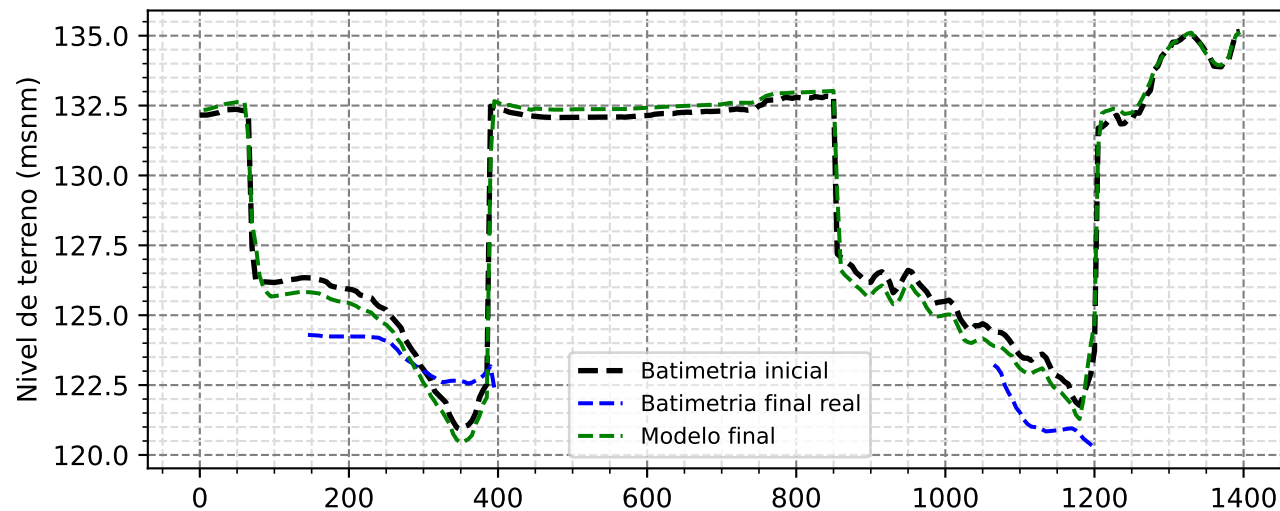
Seccion 23+130 Km



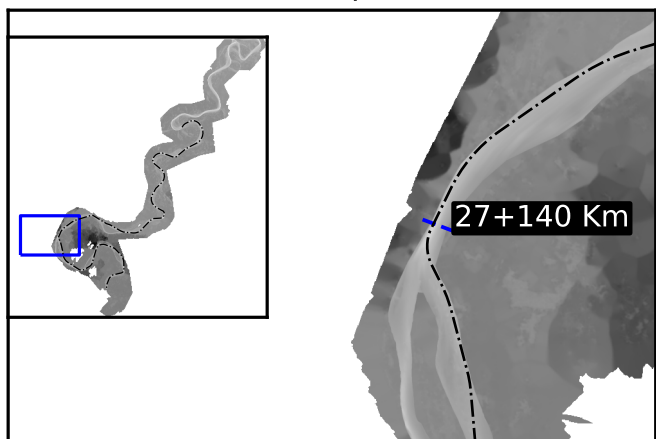
Vista en planta



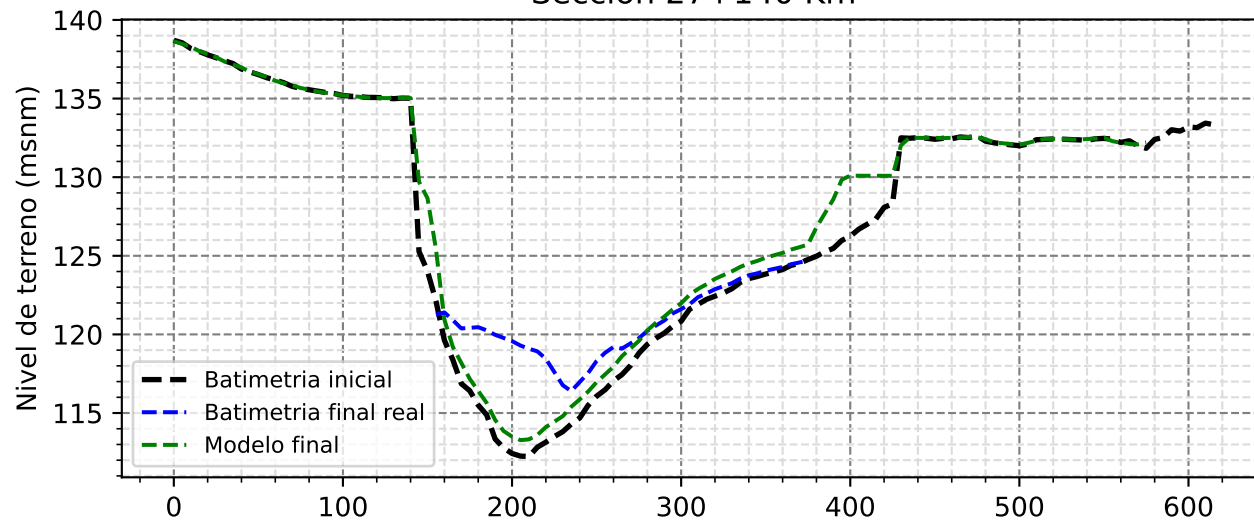
Seccion 25+430 Km



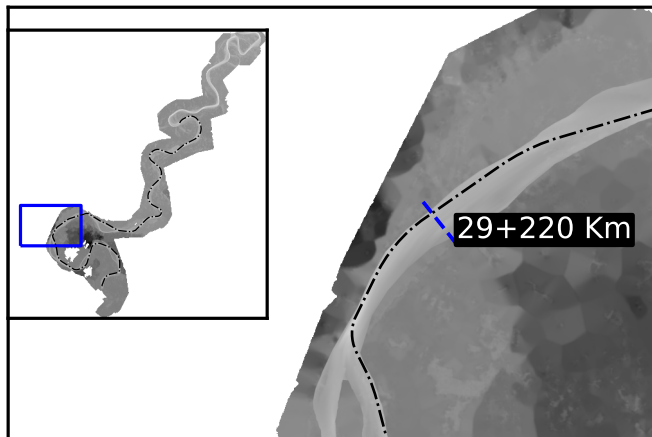
Vista en planta



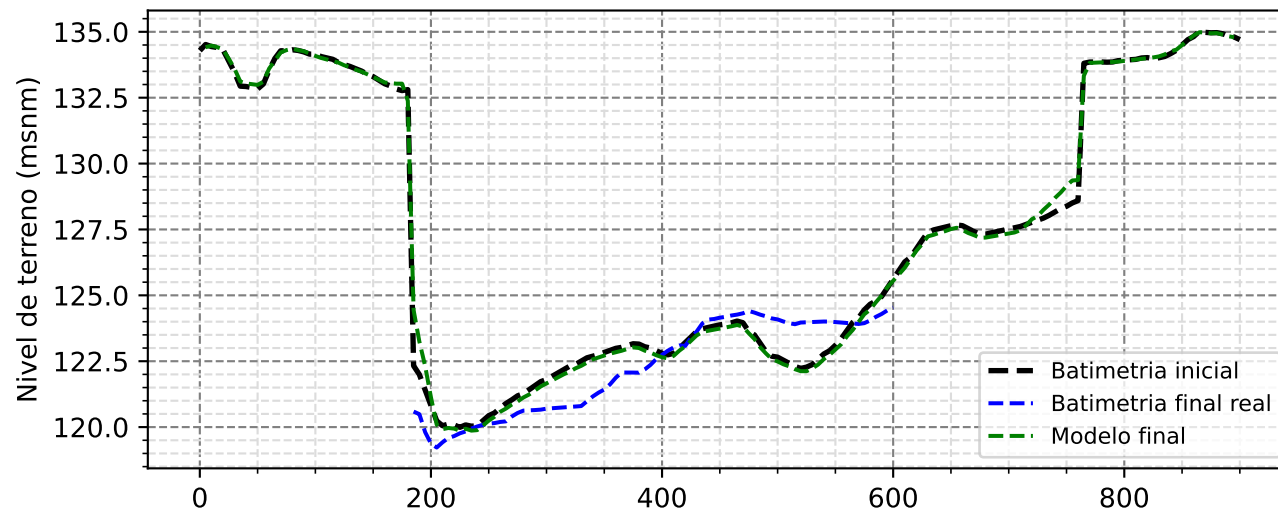
Seccion 27+140 Km



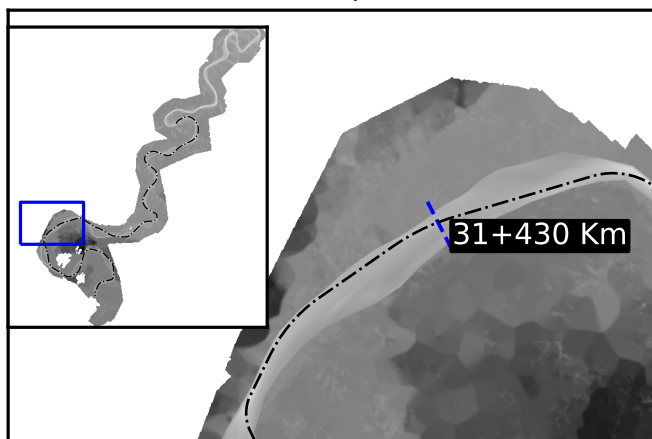
Vista en planta



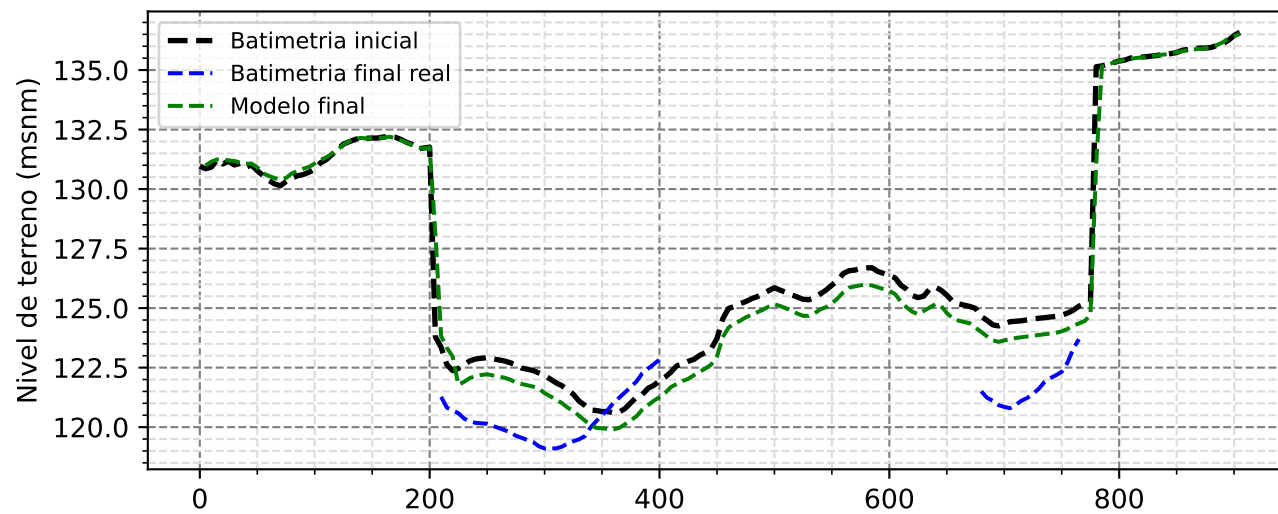
Seccion 29+220 Km



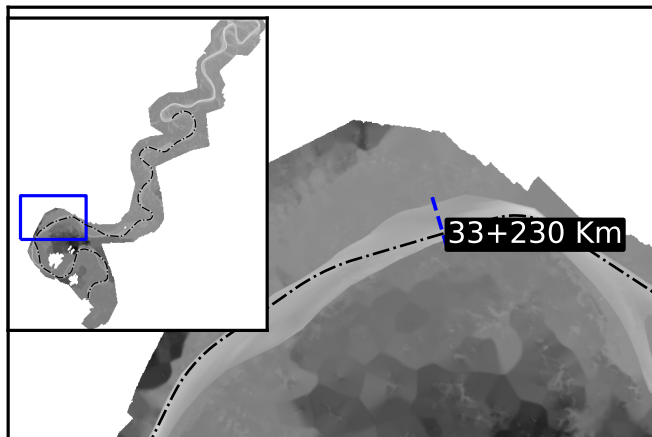
Vista en planta



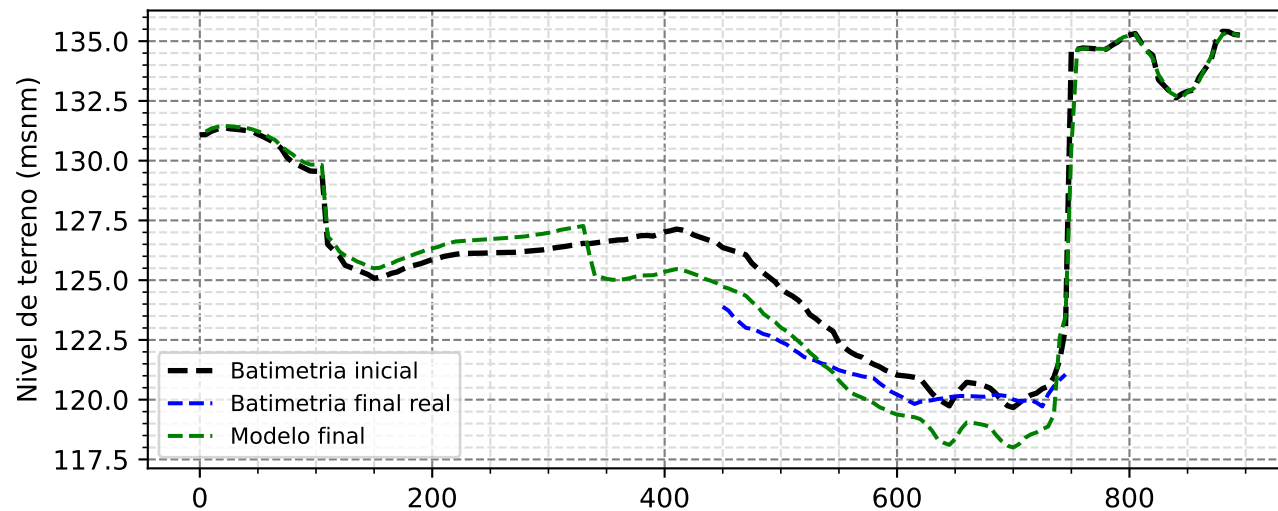
Seccion 31+430 Km



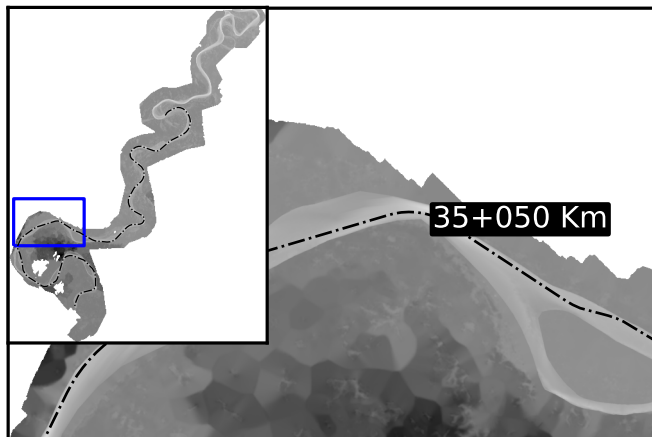
Vista en planta



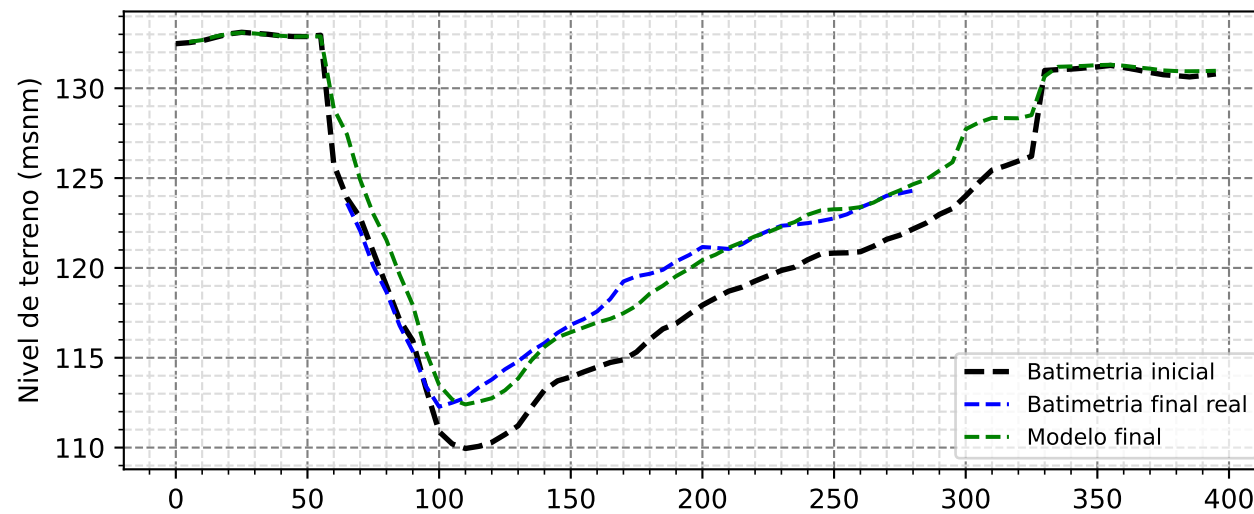
Seccion 33+230 Km



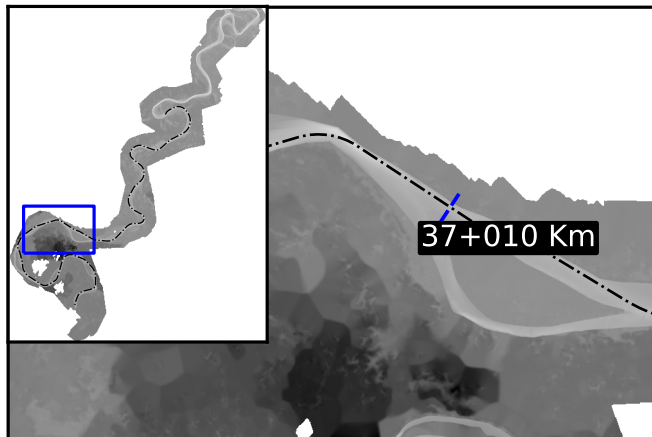
Vista en planta



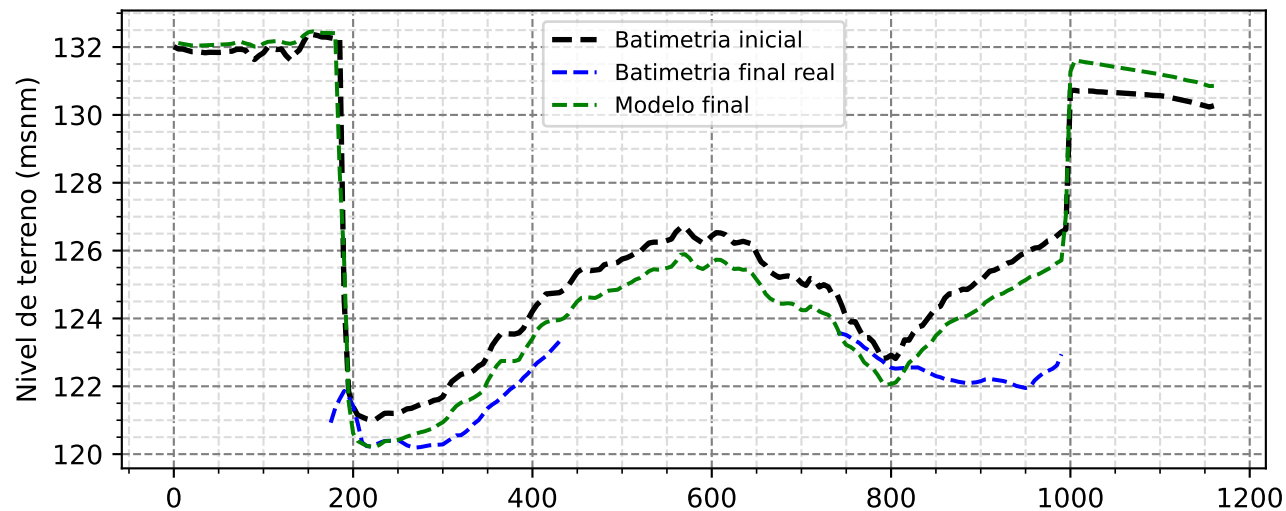
Seccion 35+050 Km



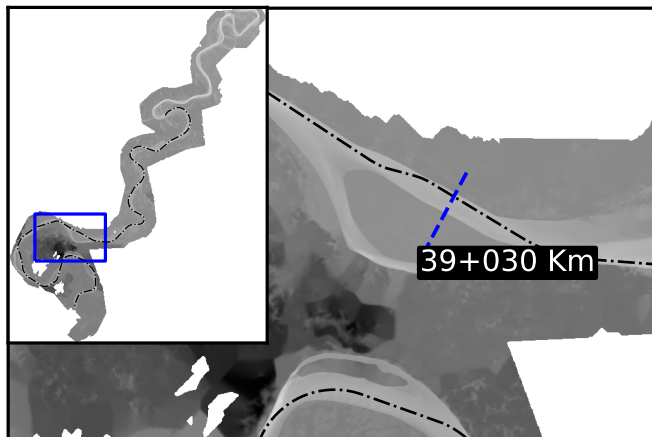
Vista en planta



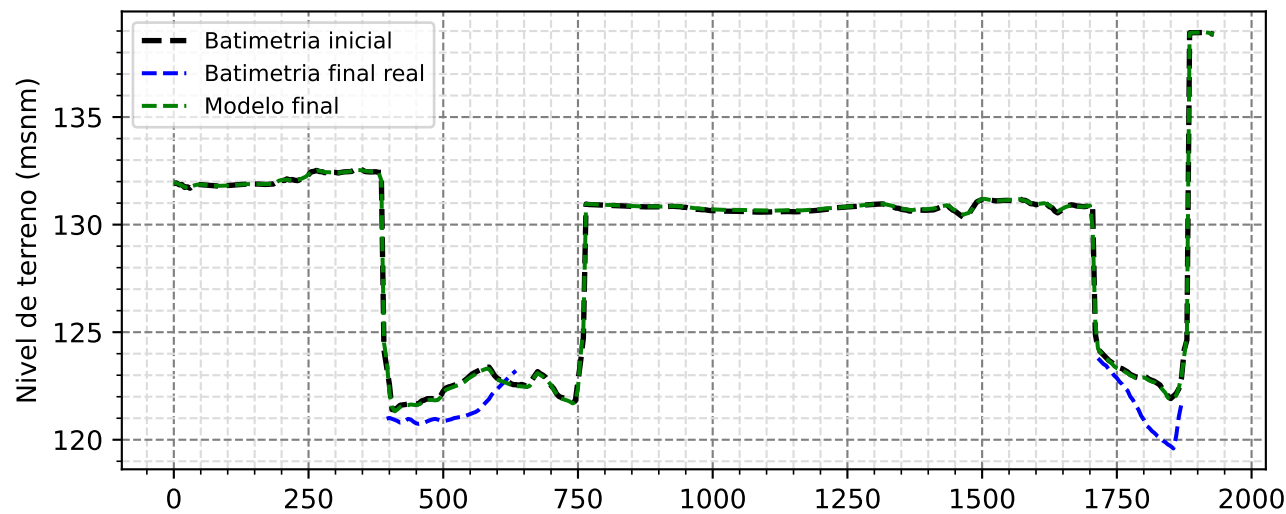
Seccion 37+010 Km



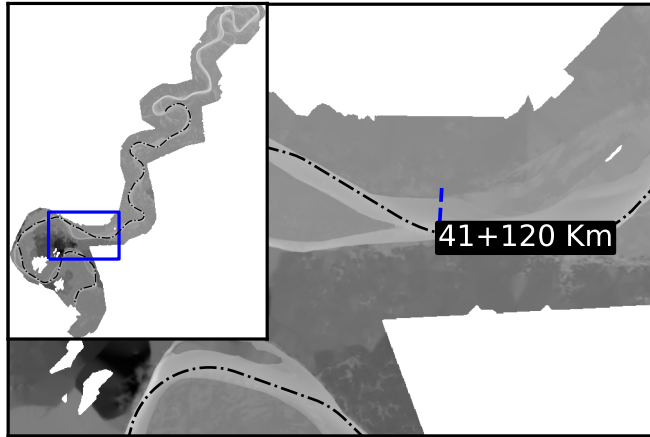
Vista en planta



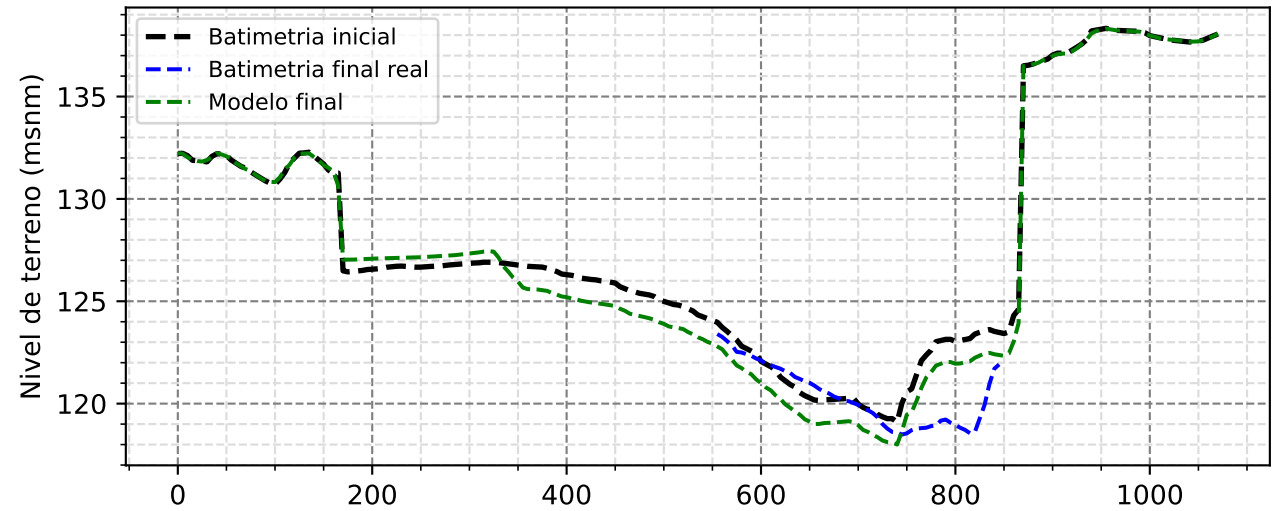
Seccion 39+030 Km



Vista en planta



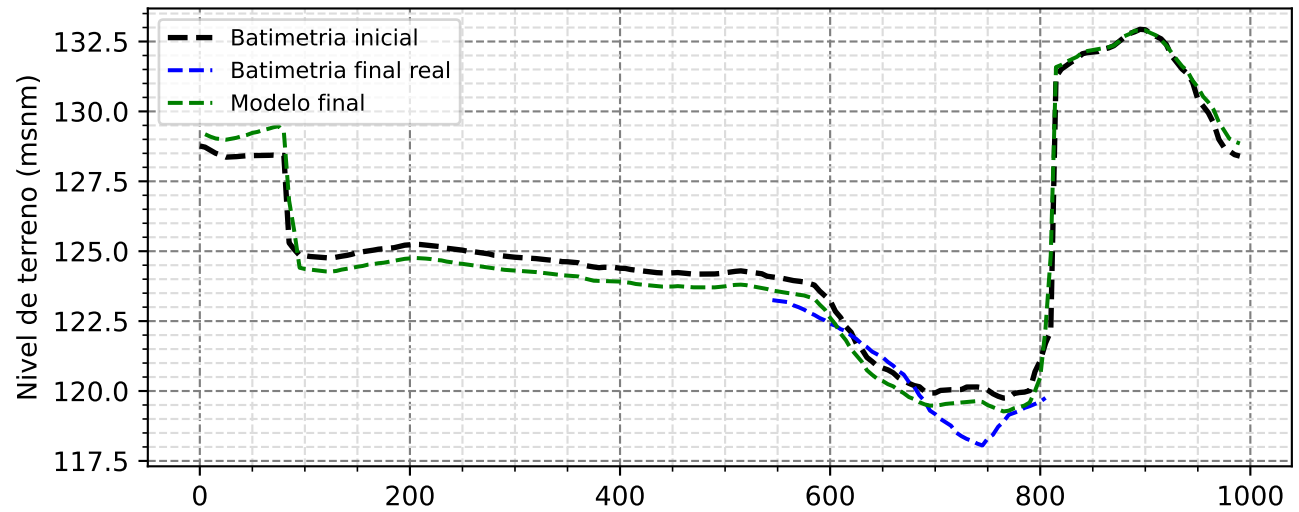
Seccion 41+120 Km



Vista en planta



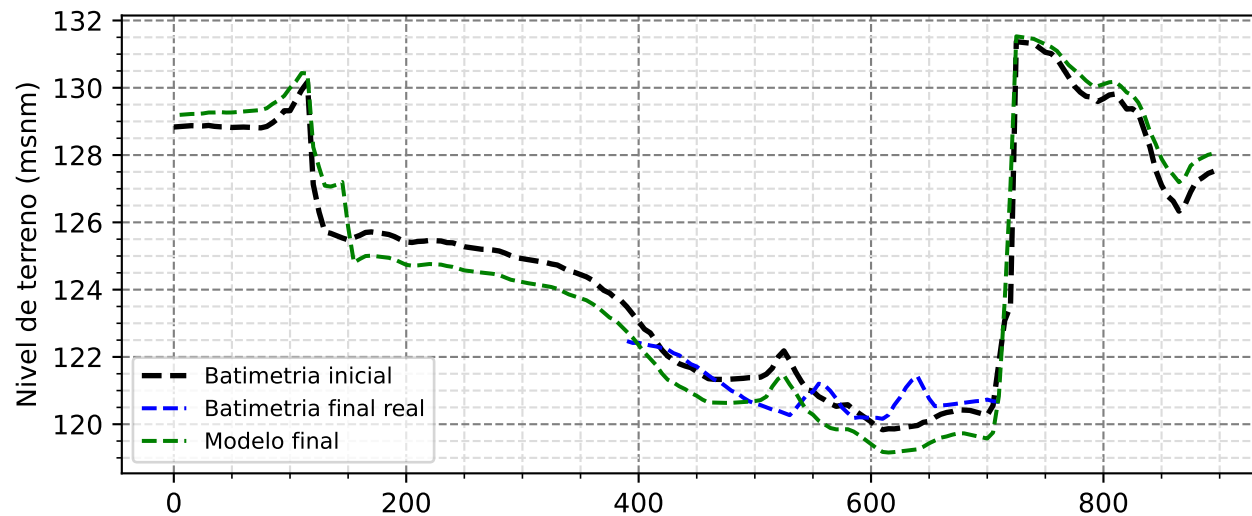
Seccion 43+240 Km



Vista en planta



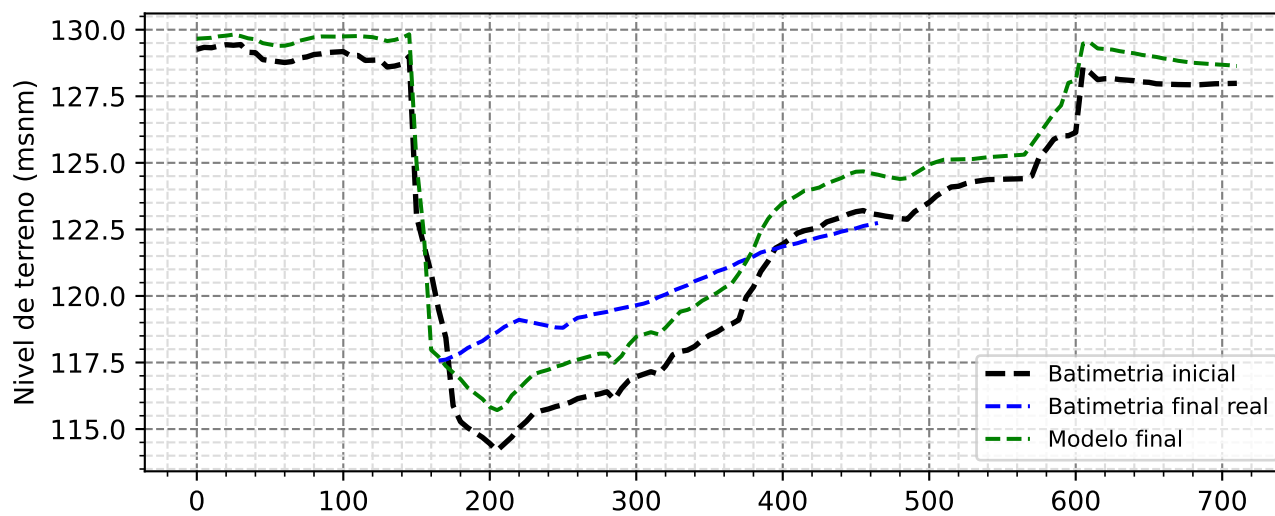
Seccion 45+320 Km



Vista en planta



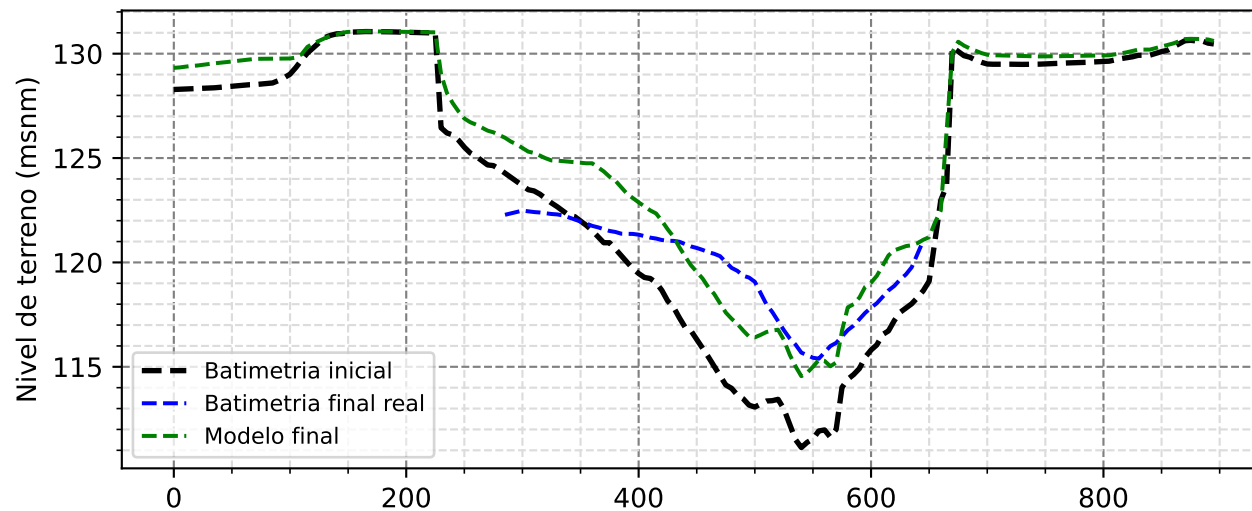
Seccion 47+420 Km



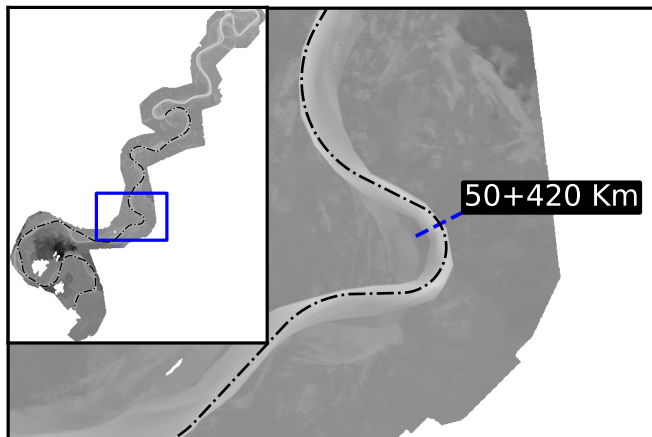
Vista en planta



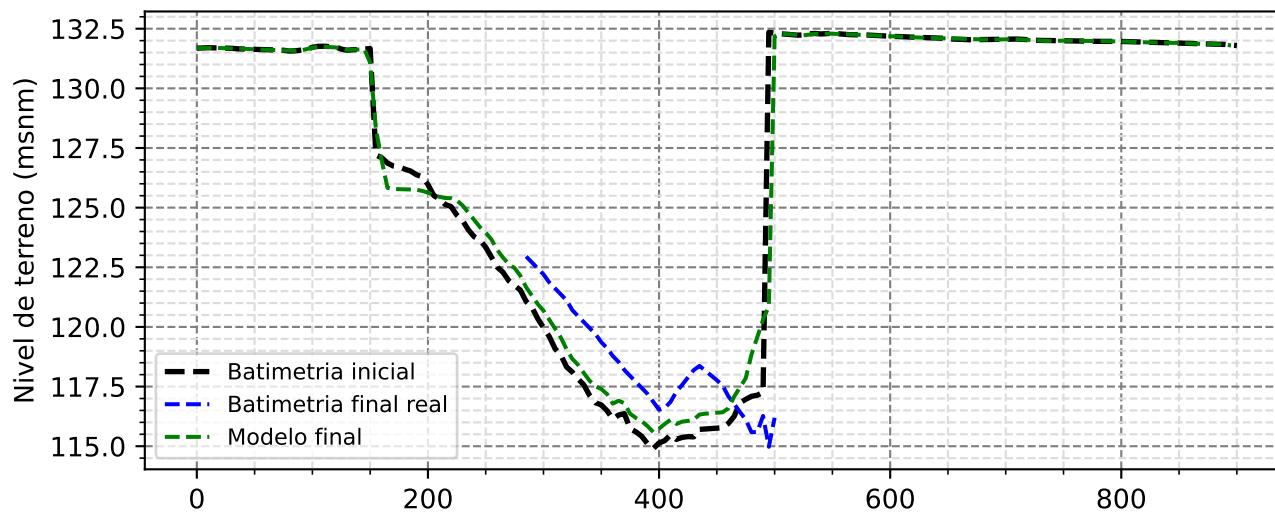
Seccion 49+420 Km



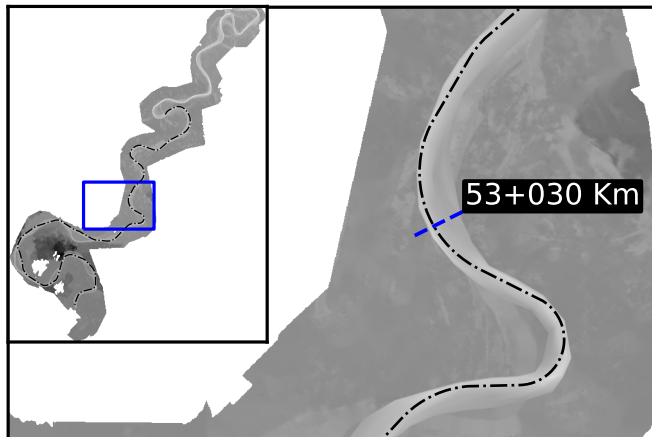
Vista en planta



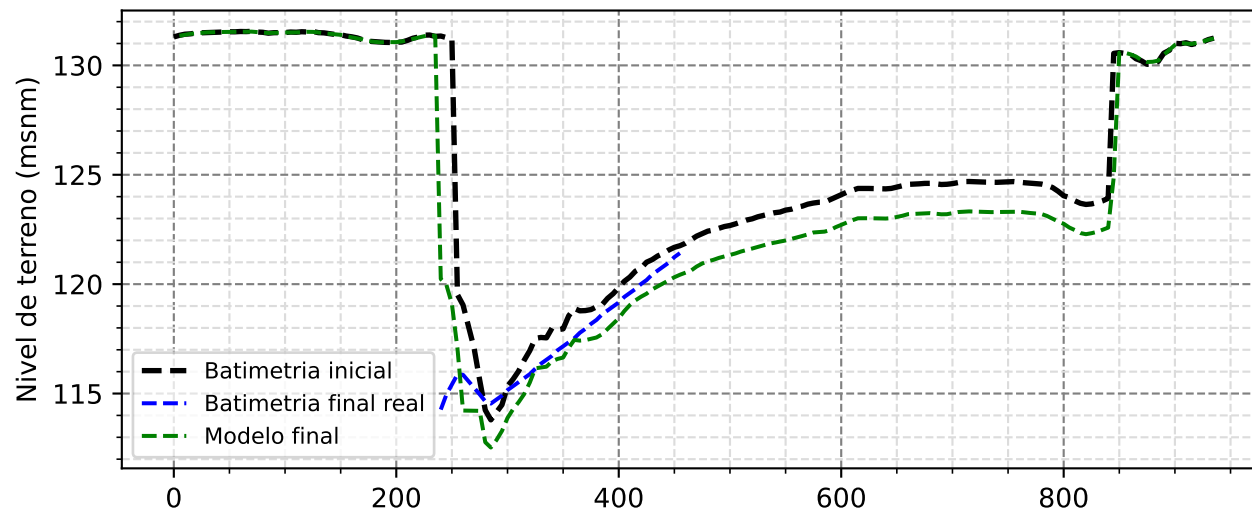
Seccion 50+420 Km



Vista en planta



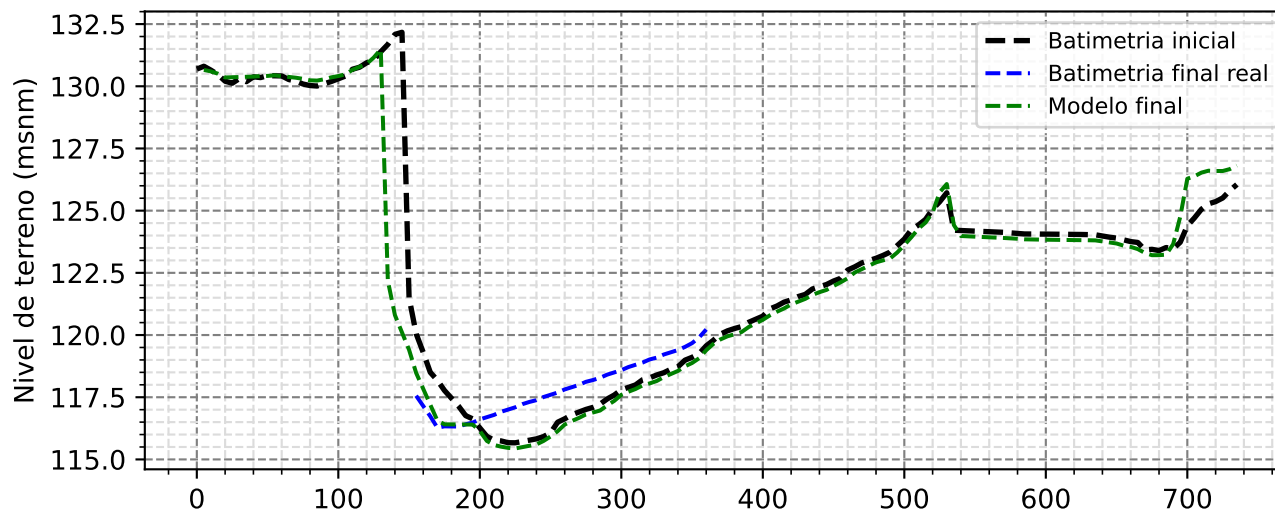
Seccion 53+030 Km



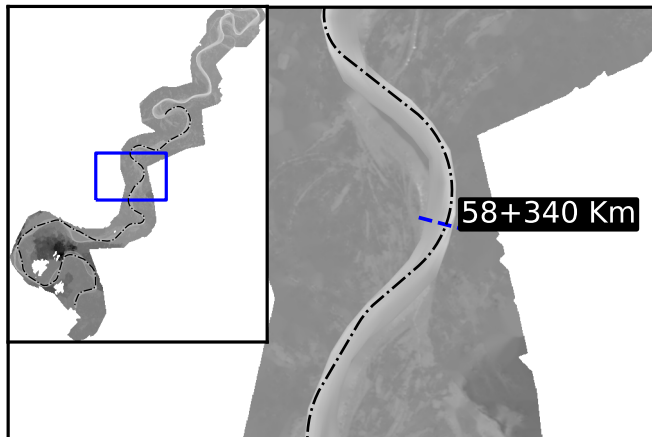
Vista en planta



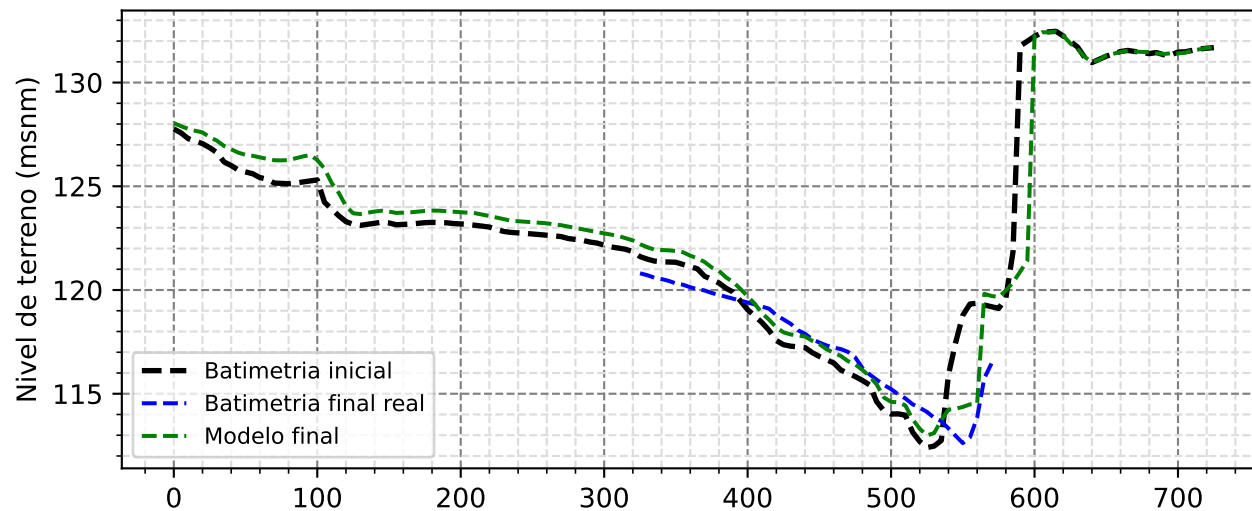
Seccion 55+210 Km



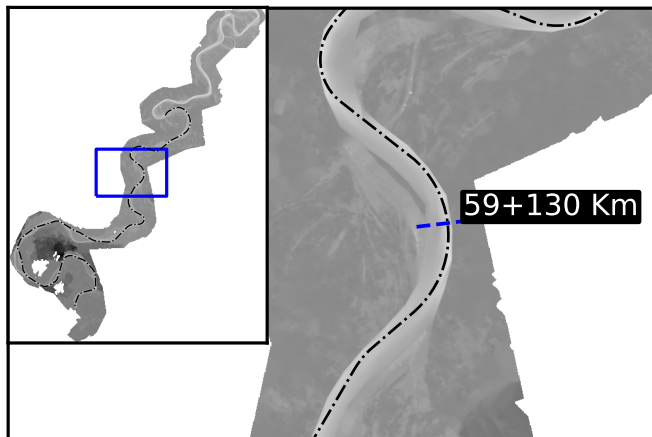
Vista en planta



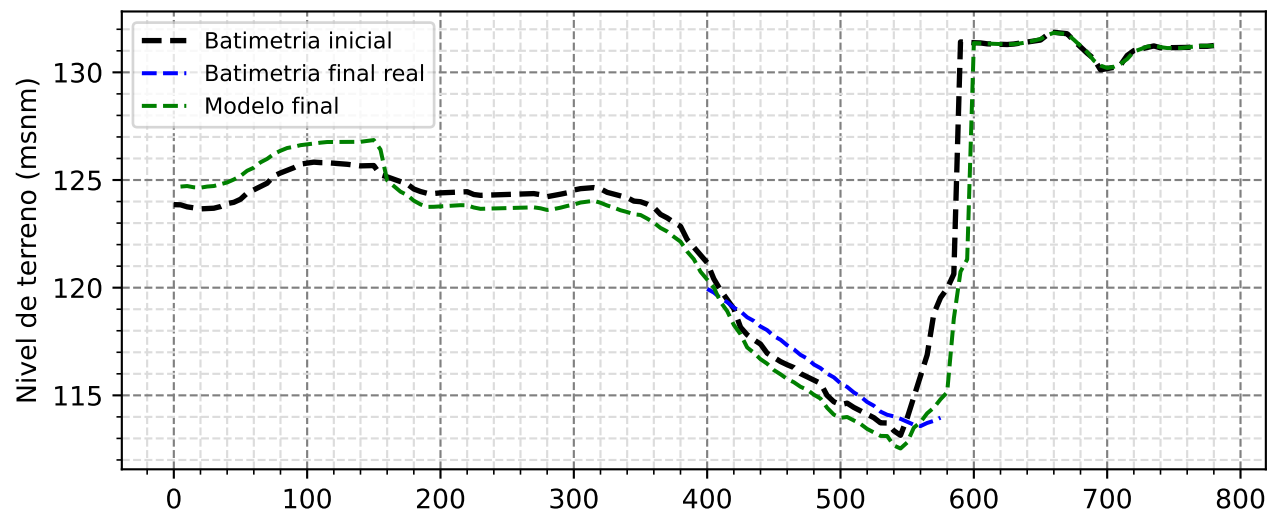
Seccion 58+340 Km



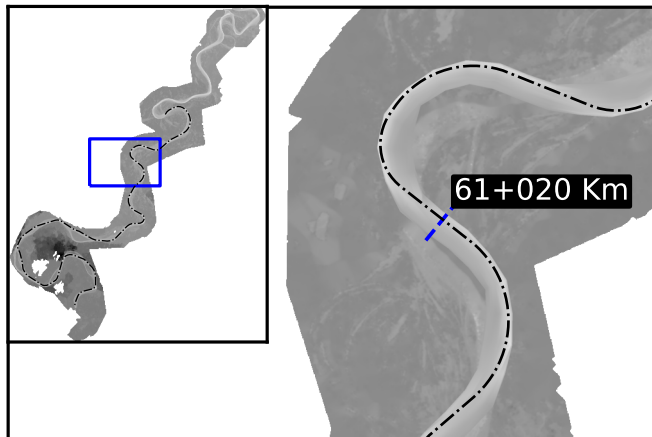
Vista en planta



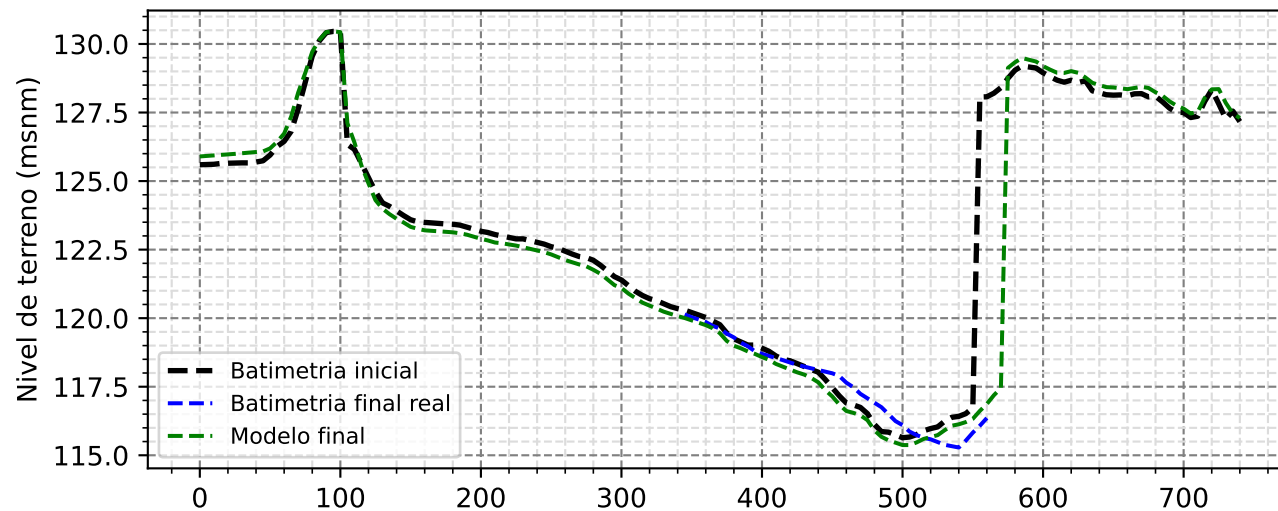
Seccion 59+130 Km



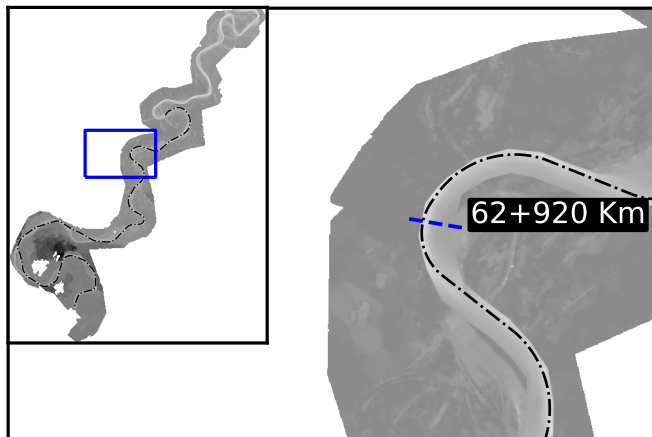
Vista en planta



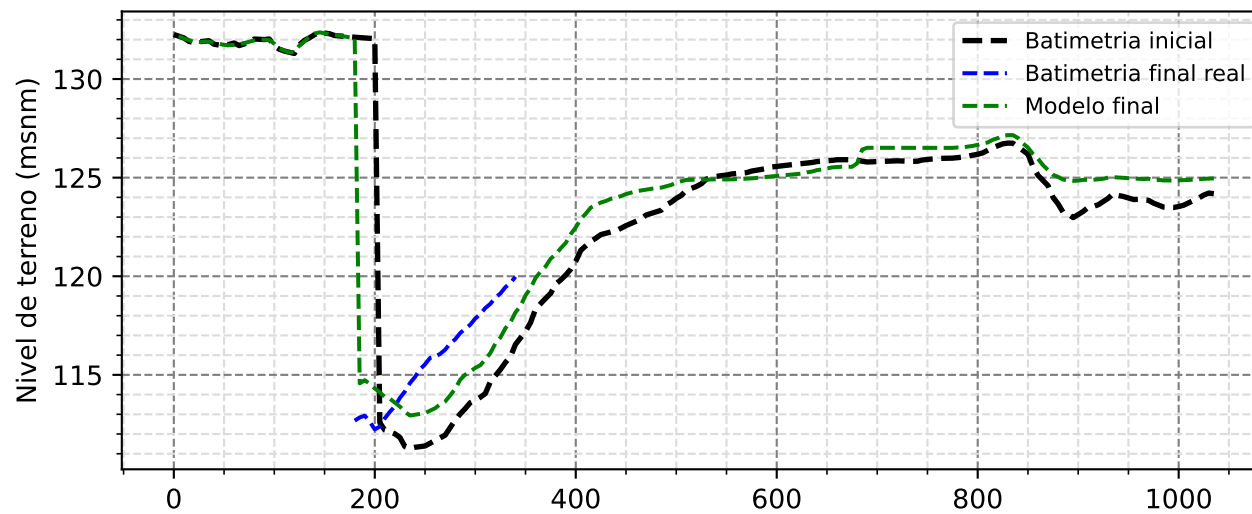
Seccion 61+020 Km



Vista en planta



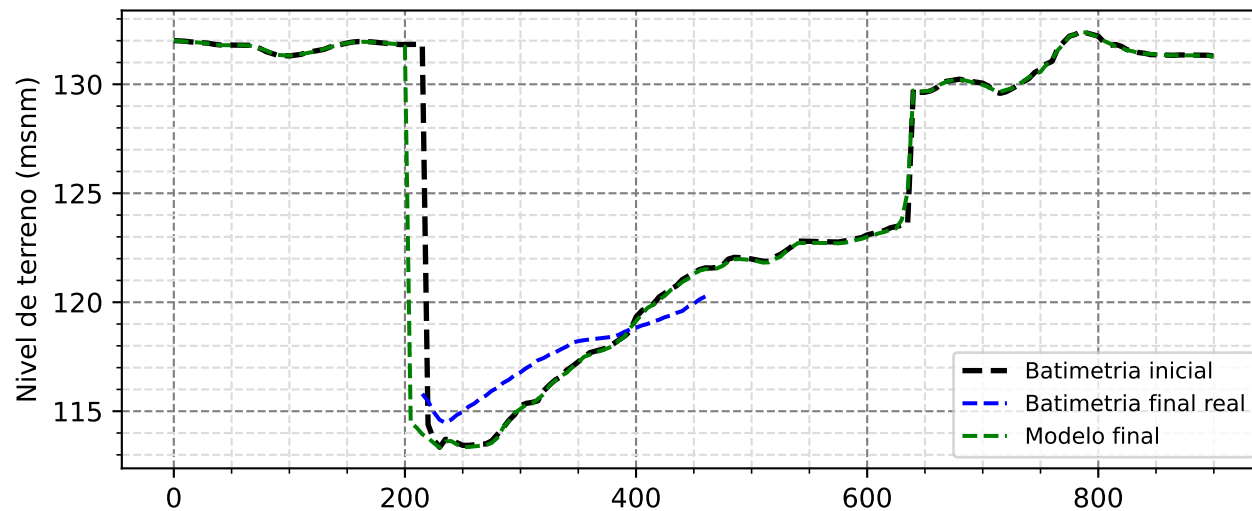
Seccion 62+920 Km



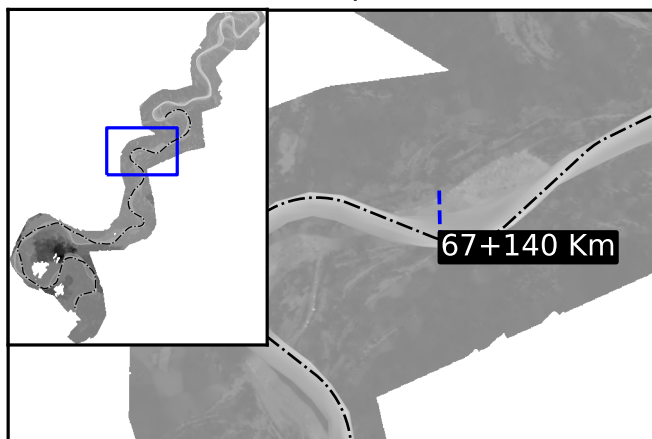
Vista en planta



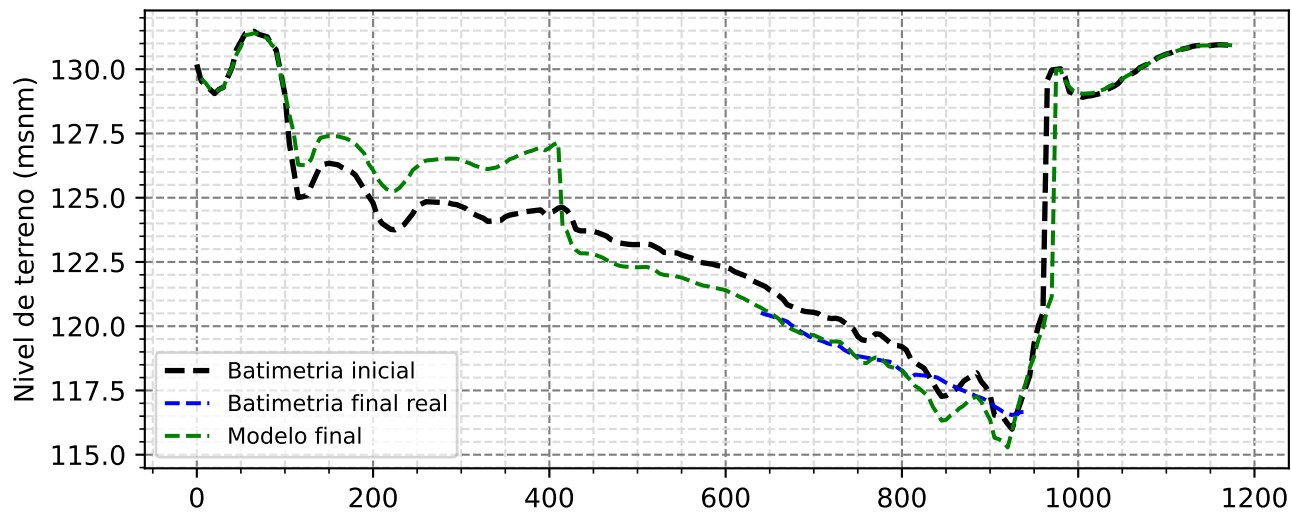
Seccion 65+130 Km



Vista en planta



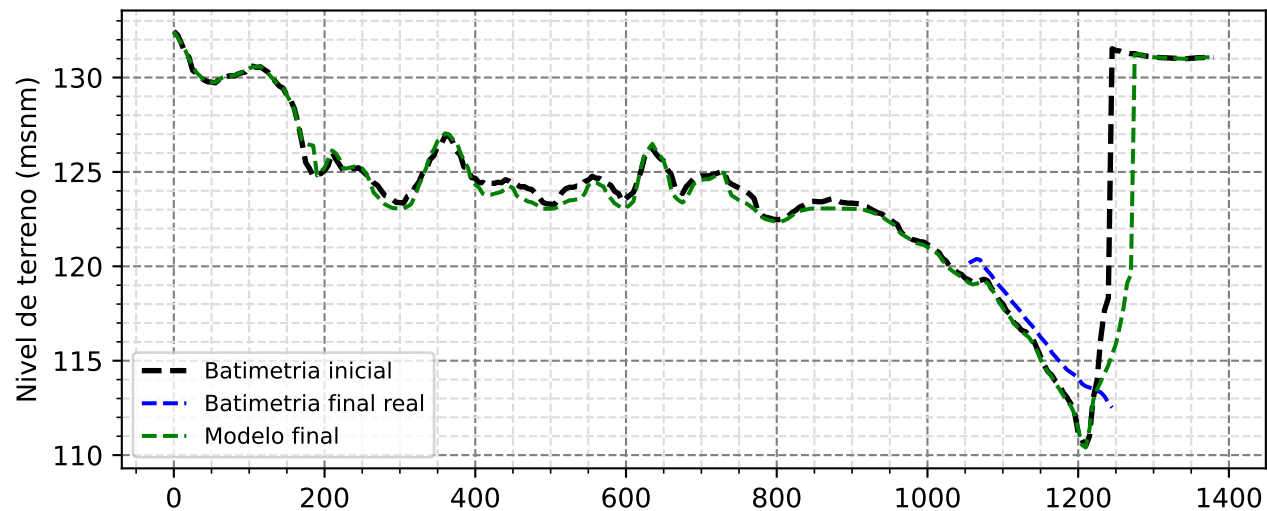
Seccion 67+140 Km



Vista en planta



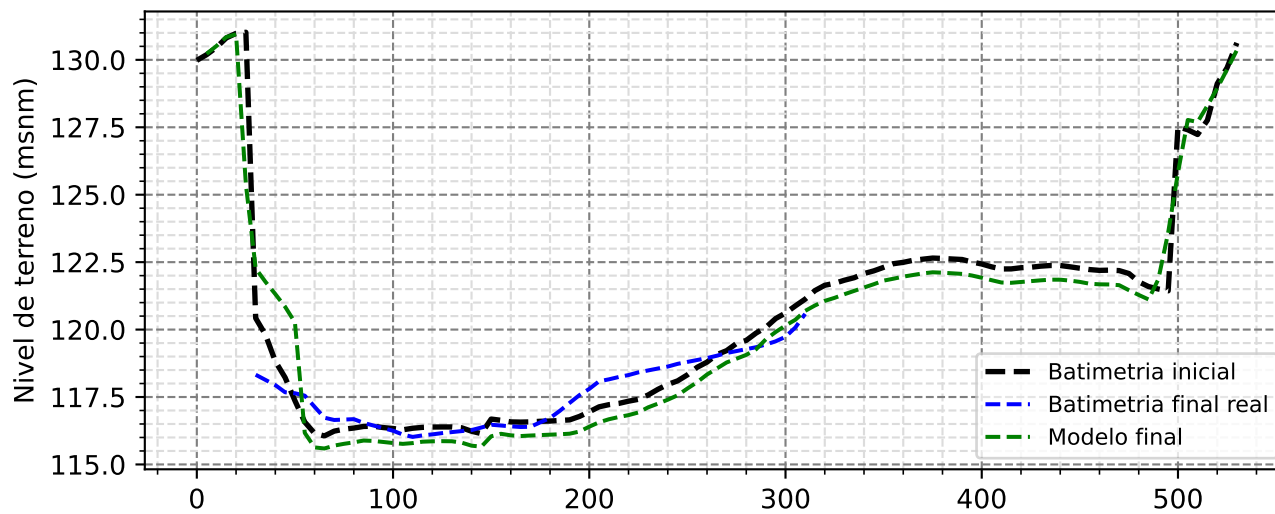
Seccion 68+520 Km



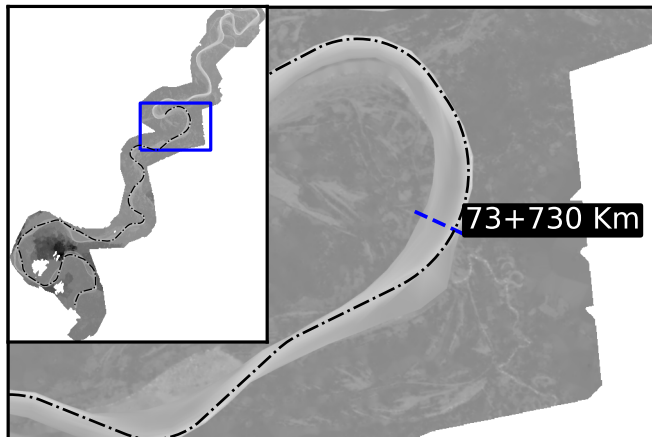
Vista en planta



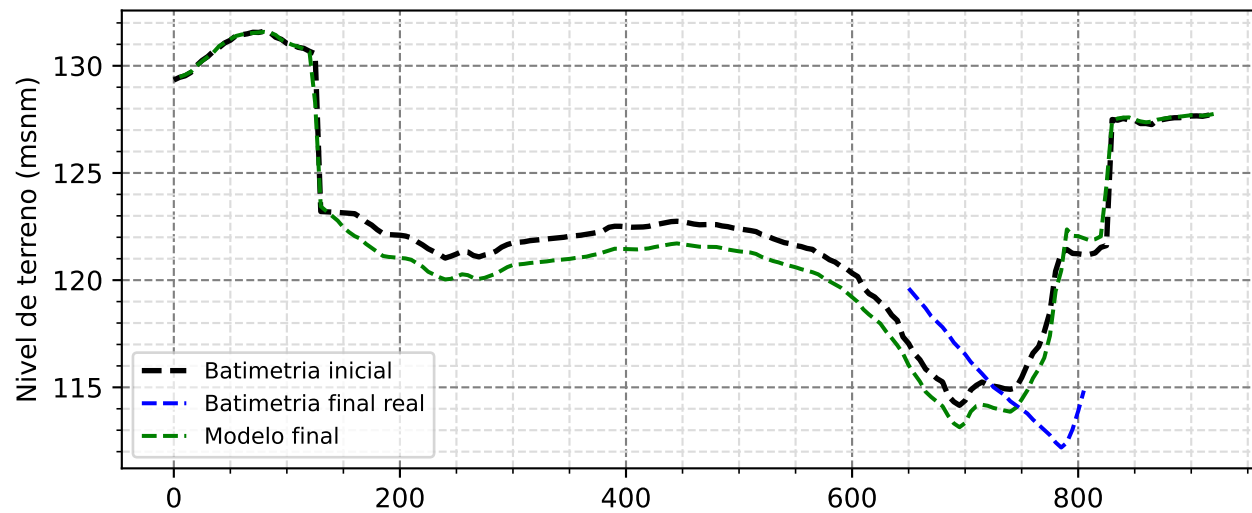
Seccion 71+100 Km



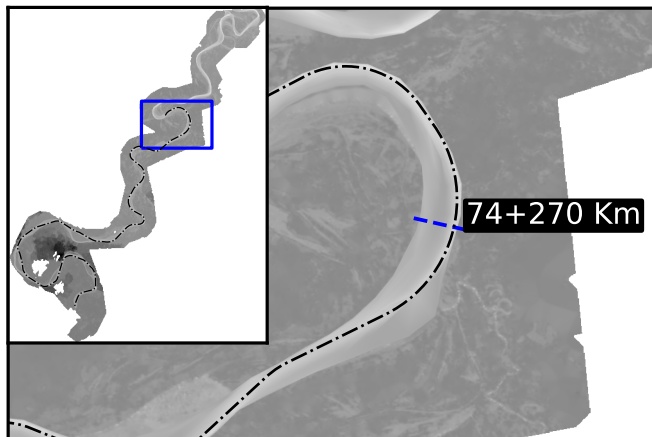
Vista en planta



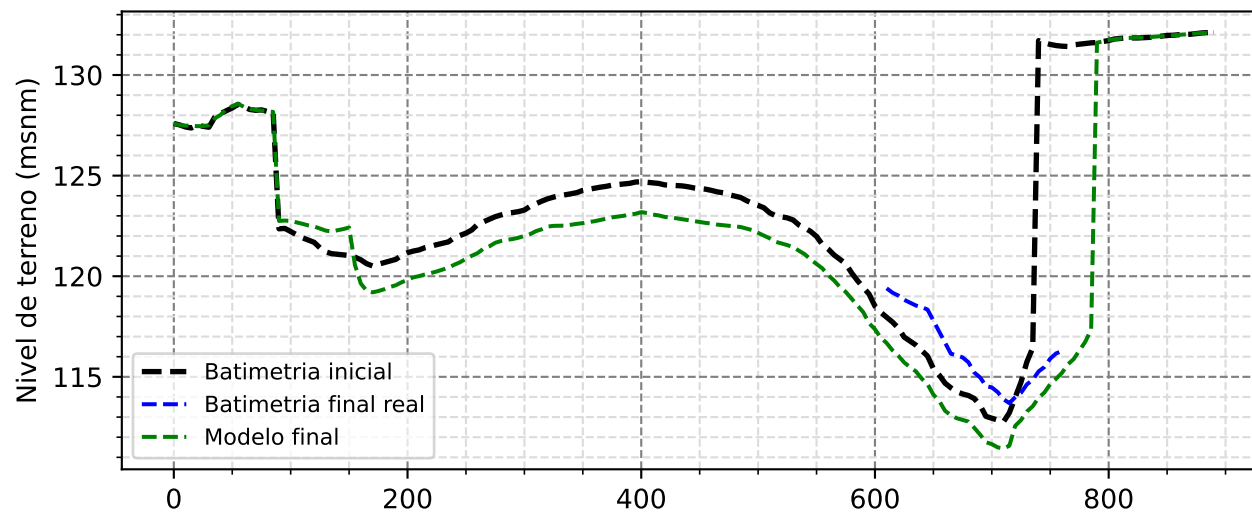
Seccion 73+730 Km



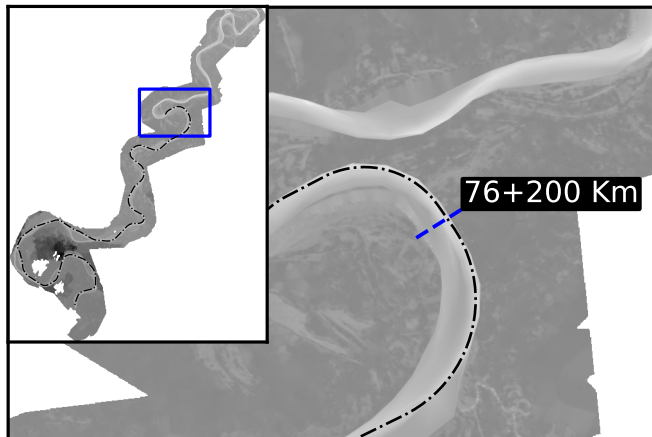
Vista en planta



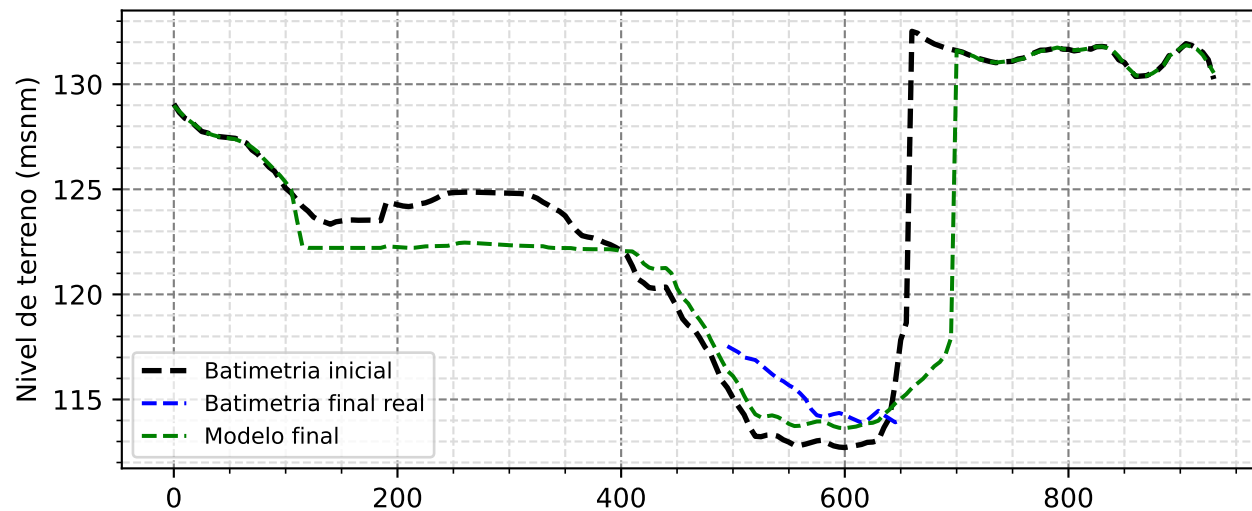
Seccion 74+270 Km



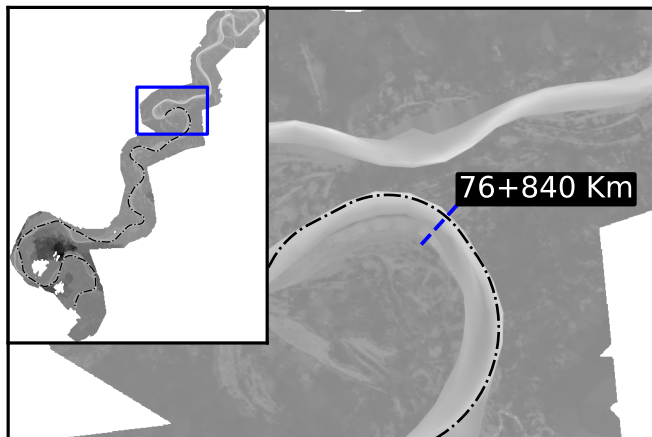
Vista en planta



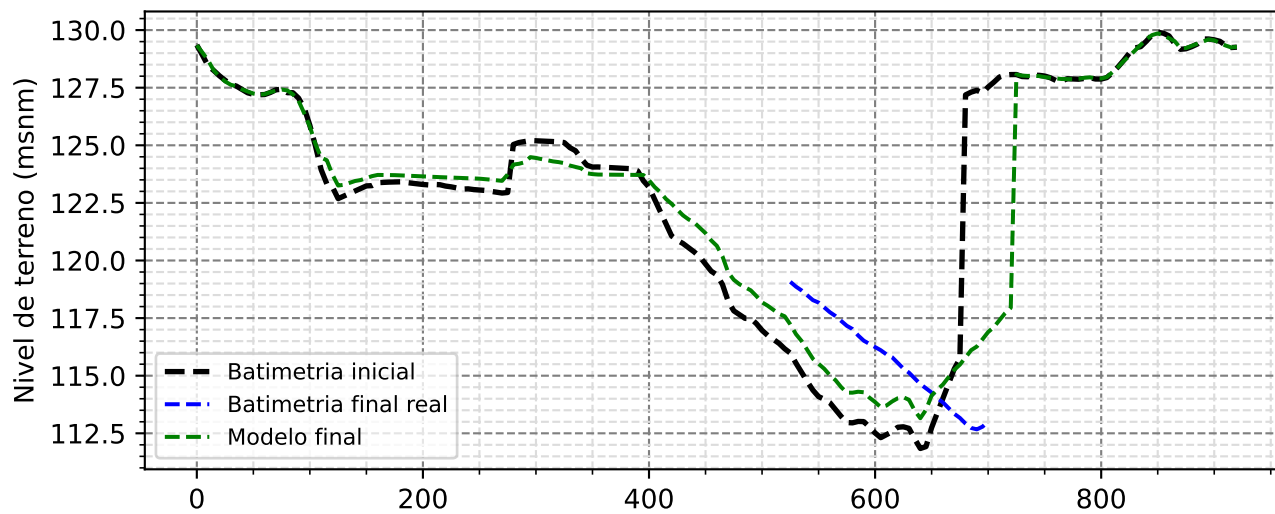
Seccion 76+200 Km



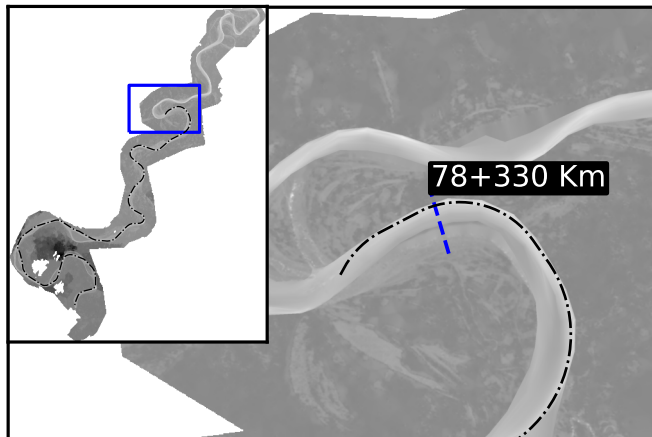
Vista en planta



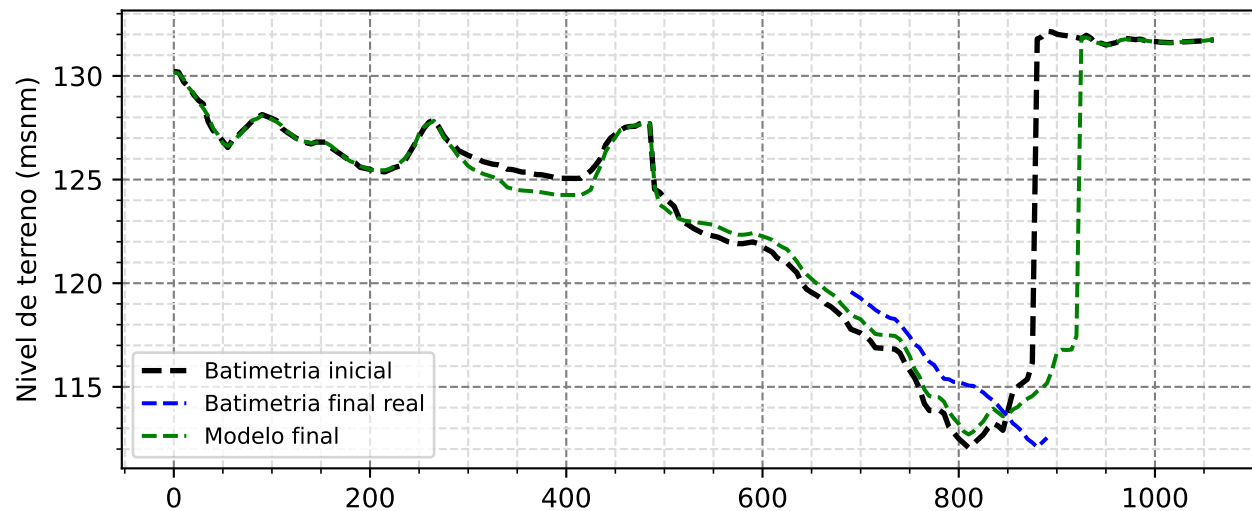
Seccion 76+840 Km



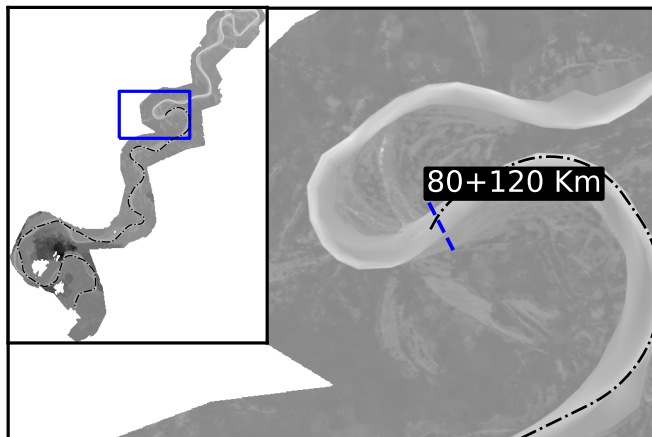
Vista en planta



Seccion 78+330 Km



Vista en planta



Seccion 80+120 Km

