



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

Modelación de transporte sedimentación en las cuencas de
los ríos Cuyolote y Achiguate

Pre y post temporada de lluvia 2019

Guatemala, Centroamérica



Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

Modelación de transporte sedimentación en las cuencas de
los ríos Coyolate y Achiguate
Pre y post temporada de lluvia 2019

Guatemala, Centroamérica

Elaborado por: Dulce González;ICC

Impreso: .

Guatemala, 2020

Tiraje: .

ISBN: .

CITA BIBLIOGRÁFICA

ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático) 2020. Modelación de transporte sedimentación en las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate. Proyecto PREP-IN. Guatemala. 29p.



RESUMEN

En los últimos años la actividad del volcán de Fuego, ha generado abundante desplazamiento de material volcánico en la parte alta de las cuencas del río Coyolate y Achiguatate, esto debido a las múltiples erupciones que se han registrado, principalmente los eventos que tuvieron lugar entre el año 2017 y la erupción del 3 de junio del 2018.

Esta importante acumulación de material, posee características como mala clasificación y consolidación que permiten que procesos como la erosión y el arrastre de material sean posible, este proceso recibe el nombre de lahares, que son productos secundarios de origen volcánico que inclusive se pueden generar durante varios años, después del depósito y acumulación del material.

El disparador principal de estos procesos es la lluvia, que inicia el arrastre del material con ayuda de la pendiente y lo conduce aguas abajo depositándolo en lugares donde la pendiente es menor. Reportes de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Riesgos de Desastres (CONRED), señalan que múltiples incidentes han tenido lugar debido a la acumulación de estos sedimentos en la costa sur del país.

El estudio de los fenómenos que dan lugar al proceso de transporte de sedimentos, debido a los hechos antes descritos se hace de suma importancia y la implementación de diversas técnicas que puedan ser útiles para su identificación son consideradas en tal sentido, como herramientas importantes que ayudan a las comunidades y empresas aguas abajo a la Gestión de Riesgo de Desastres.

La metodología desarrollada plantea una serie de procedimientos como el análisis de imágenes satelitales, evaluación de campo y simulaciones computacionales que, tras un análisis comparativo, señalan las zonas con mayor probabilidad a ser impactadas tanto por procesos de erosión como sedimentación. Este análisis ha sido discutido y ejecutado para tres zonas principales: la zona de erosión, la zona de transición y la zona de sedimentación.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

CONRED	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres
DEM	Digital Elevation Model
ICC	Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología, e Hidrología
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
SECONRED	Secretaría Ejecutiva de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres

Contenido

1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	1
2.1. OBJETIVO GENERAL	1
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	1
3. ANTECEDENTES	2
3.1 CUENCA DEL RÍO COYOLATE	2
3.2 CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE	2
3.3 SEDIMENTACIÓN Y EVENTOS GENERADOS POR SEDIMENTACIÓN EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS COYOLATE Y ACHIGUATE	3
4. METODOLOGÍA	4
4.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
4.1.1 MAPEO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES	4
4.1.2 CAUDALES	6
4.1.3 RUGOSIDAD	7
4.2 FASE DE CAMPO	7
4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL RECORRIDO	7
4.3 FASE DE GABINETE	10
4.3.1 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICAS DE LA CUENCA	10
4.4 FASE DE MODELAMIENTO EN IBER	14
4.4.1 PRE-PROCESO	14
4.4.2 CÁLCULO	17
4.4.3 POST-PROCESO	17
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
6. CONCLUSIONES	28
7. BIBLIOGRAFIA	29

Índice de figuras

Figura 1: División Hidrológica de Guatemala, Cuenca de los ríos Coyolate y Achiguate.....	3
Figura 2: Metodología para la investigación.....	4
Figura 3. Zona de afectación de sedimentos mapeado con imágenes satelitales del período del año 2018 al 2020.....	5
Figura 4: Evaluación de depósitos en la parte alta de las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate.....	8
Figura 5: Evaluación de depósitos en la parte media de las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate.....	9
Figura 6. Evaluación de depósitos en la parte baja de las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate.....	10
Figura 7: Caracterización geomorfológica promedio de la cuenca del río Coyolate.....	12
Figura 8: Caracterización geomorfológica promedio de la cuenca del río Achiguate.....	13
Figura 9: Creación de geometría en IBER.....	14
Figura 10: Creación de las condiciones de entrada en Iber.....	15
Figura 11: Menú de creación de la malla de trabajo.....	16
Figura 12: Proceso para asignar la elevación a la malla a través de un modelo de elevación digital del terreno.....	16
Figura 13: Proceso de definición de datos del problema.....	17
Figura 14: Menú para visualizar la ventana de resultados.....	18
Figura 15: Tratamiento de resultados en Sistemas de Información Geográfica.....	18
Figura 16: Evaluación de resultados generados en Iber.....	19
Figura 17: Cambios geomorfológicos principales basados en el mapeo de imágenes satelitales del año 2018 al 2020.....	20
Figura 18: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de erosión en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia en la cuenca del río Coyolate	22
Figura 19: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de transición en pre (izquierda) y post (derecha)temporada de lluvia en la cuenca del río Coyolate.....	23
Figura 20: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de sedimentación en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Coyolate.....	24
Figura 21: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de erosión en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Achiguate.....	25
Figura 22: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de transición en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Achiguate.....	26
Figura 23: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de deposición en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Achiguate.....	27

Índice de tablas

Tabla 1: Ubicación de estaciones y caudales utilizados para las simulaciones.....	6
Tabla 2: Valores de coeficiente de Manning propuestos para las simulaciones.....	7
Tabla 3: Resultados generados por Iber en la cuenca del río Coyolate y Achiguate.....	21

1. INTRODUCCION

La modelación de transporte y sedimentación en las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate parte de la necesidad de proyectar las áreas que pueden ser más afectadas por el transporte y la acumulación de sedimentos, estos, derivados de la actividad del volcán de Fuego que ha depositado un importante volumen de material volcánico en la cabecera de estas cuencas tras su etapa eruptiva del año 2015 al 2018.

El material volcánico en la parte alta de la cuenca, a la actualidad, se presenta como un material no consolidado por lo que condiciones externas como la lluvia o la misma gravedad generan su erosión con facilidad. Reportes de INSIVUMEH en los últimos años, principalmente en época lluviosa describen eventos volcánicos secundarios conocidos como lahares, que son correntadas de material volcánico muy erosivos debido a que transportan sedimentos tanto de fondo, como en suspensión.

La modelación que se presenta en este estudio se basa en la caracterización de datos geomorfológicos y sedimentológicos de las cuencas tras una evaluación de campo y la proyección de eventos hidráulicos en dos temporadas distintas, la etapa pre y post época lluviosa, generando a través del modelo numérico Iber.

Dentro de los resultados obtenidos tras la modelación se menciona el área de afectación, los valores máximos de erosión, los valores máximos de sedimentación y la carga de sedimentos transportados por el río, estos resultados descritos para ambas temporadas, así como la representación gráfica donde se exponen las áreas más susceptibles ubicadas durante las simulaciones contrarrestadas con imágenes satelitales y el recorrido de campo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Generar a través del mapeo de campo y simulaciones computacionales un mapa de estimación de depósito de sedimentos en las cuencas del río Coyolate y Achiguate.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Elaborar un mapeo geológico enfocado en la caracterización de las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate.
- ✓ Simular los depósitos de sedimentos en las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate Pre- y Post-temporada de lluvia.
- ✓ Caracterizar las zonas de depósito de sedimentos en las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate en diferentes temporadas.

3. ANTECEDENTES

EL INSIVUMEH en su página oficial menciona que las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate pertenecen a la Vertiente del Pacífico. Además, se menciona que, estos ríos poseen longitudes cortas; se originan en alturas medias de aproximadamente 3000 msnm, poseen pendientes fuertes entre 10% y 20% en la parte alta de la cuenca, cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera, creando grandes zonas susceptibles a inundación. Estas condiciones fisiográficas producen crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración, así como tiempos de propagación muy cortos. La precipitación en la vertiente del Pacífico tiene períodos de gran intensidad, típica de las zonas costeras con una precipitación media anual de 2200 mm.

Los grandes aportes de sedimentos en las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate es los últimos años han sido producto de la actividad volcánicas tan recurrente del volcán de Fuego que a partir del año 2015 genero alrededor de 47 eventos eruptivos aportando una importante cantidad de material volcánico que a la actualidad es transportado aguas abajo principalmente en época lluviosa generando cambios importantes en la geomorfología de ambas cuencas y afectando a poblaciones e infraestructura importante en la costa del océano Pacífico.

3.1 CUENCA DEL RÍO COYOLATE

Cuenta con una extensión territorial de 1 648 km², equivalente al 7% del total de la vertiente y el 1.5% a nivel nacional. Posee un caudal promedio de 69 m³/s (2006) en su punto de control. La cuenca se encuentra dentro de los departamentos de Chimaltenango, Suchitepéquez y Escuintla, desde su recorrido inicial hasta la desembocadura en el océano Pacífico, abarcando una totalidad de 10 municipios de los departamentos mencionados.

Se ubica dentro de la vertiente del Pacífico, entre las coordenadas W 670000 y 730000 y N 1650000, 1530000. Limita al norte con la cuenca del río Motagua, al oeste con la cuenca del río Madre Vieja, hacia el este con las cuencas de los ríos Acomé y Achiguate y hacia el sur con el Océano Pacífico. (Figura 1).

3.2 CUENCA DEL RÍO ACHIGUATE

Cuenta con una extensión territorial de 1 291 Km², que equivale al 5% del total de la vertiente y al 1,20% del total del país. Posee un caudal promedio de 50.23 m³/s (2006) en su punto de control. La cuenca se encuentra dentro de los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez y Escuintla, desde su recorrido inicial hasta su desembocadura en el océano Pacífico abarca una totalidad de 22 municipios de los departamentos mencionados.

Se ubica en la vertiente del Pacífico, entre las coordenadas UTM W 710000 y 760000 y N 1630000 y 1530000. Limita al norte con la cuenca del río Motagua, al oeste con las cuencas del río Acomé y Coyolate, hacia el este con la cuenca del río María Linda y al sur con el Océano Pacífico (Figura 1).

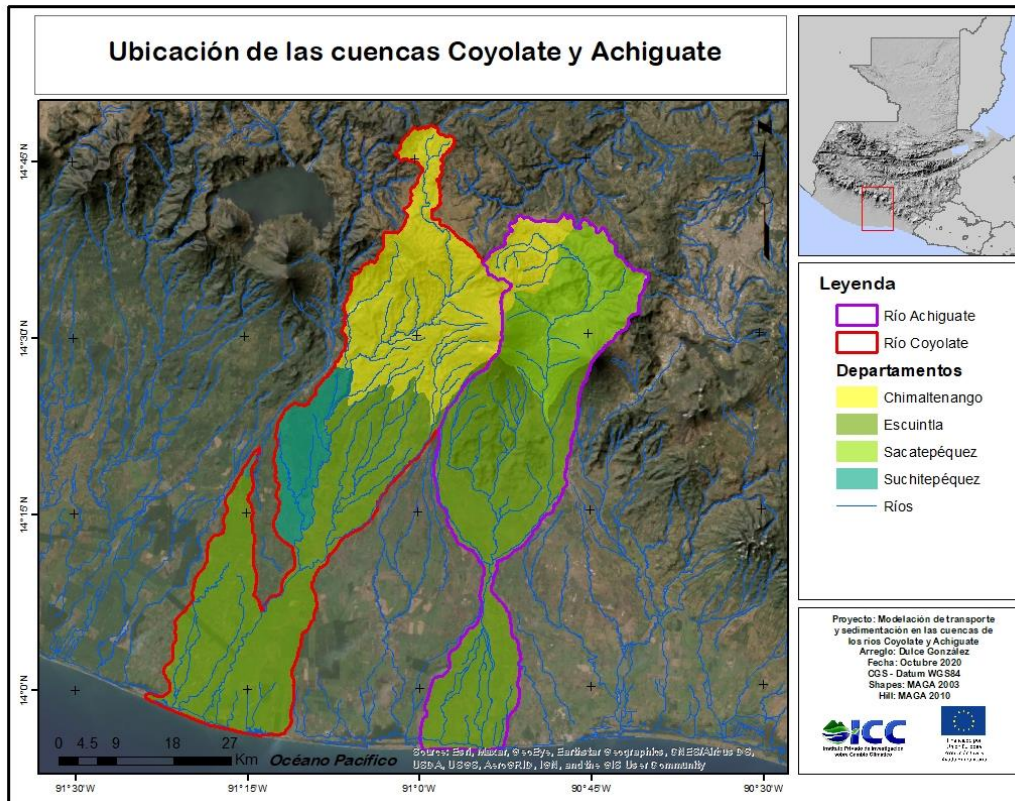


Figura 1: División Hidrológica de Guatemala, Cuenca de los ríos Coyolate y Achiguate.
Fuente IGN 2006.

3.3 SEDIMENTACIÓN Y EVENTOS GENERADOS POR SEDIMENTACIÓN EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS COYOLATE Y ACHIGUATE

La UNESCO en su estudio técnico titulado Procesos de erosión–sedimentación en cauces y cuencas, volumen I (2010), menciona que los factores que afectan la erosión y la sedimentación, están en función del tipo de erosión en cuestión. Sin embargo, como regla general, se puede decir que la erosión que ocurrirá en el suelo específico va a depender directamente de ciertas variables, entre ellas: Clima, vegetación, hojarasca, tipo de suelo, topografía, velocidad de flujo, uso de la tierra.

En tal sentido y derivado de la presencia de volcanes dentro de las cuencas de estudio es posible determinar que esta es la causa predominante de sedimentación aguas abajo. El aporte de material arrojado y depositado por el volcán de Fuego a partir del año 2015 consiste principalmente en corrientes de densidad piroclástica o PDC (Flujos piroclásticos), cenizas, flujos de lava y lahares, que conforman un gran abanico aluvial hacia el sur del volcán como resultado de procesos de erosión, transporte y sedimentación, cambiando gran parte de la morfología y comportamiento hidráulico en los ríos que alimenta.

Datos reportados por la CONRED a partir del año 1988, muestran que las inundaciones, generados por el alto transporte de sedimentos, han sido frecuentes en la parte baja de las cuencas, aunque la mayoría han sido asociados a eventos extremos de lluvia, el gran aporte de sedimentos genera una amenaza latente para las poblaciones ubicadas en las riberas de los ríos, así como sus sistemas productivos.

4. METODOLOGÍA

La metodología para la estimación de los modelos de transporte y sedimentación se divide en 3 etapas fundamentales. Este proceso se establece en la figura 2. La primera consiste en recopilar toda la información bibliográfica necesaria para generar los posibles escenarios de transporte y sedimentación. La segunda es evaluar en fase de campo las propiedades de las cuencas con el propósito de caracterizarlas. Finalmente, en la tercera fase se incorporó las fases anteriores a través de simulaciones, zonificando y cuantificando las áreas afectadas por erosión y sedimentación pre- y post- época lluviosa.

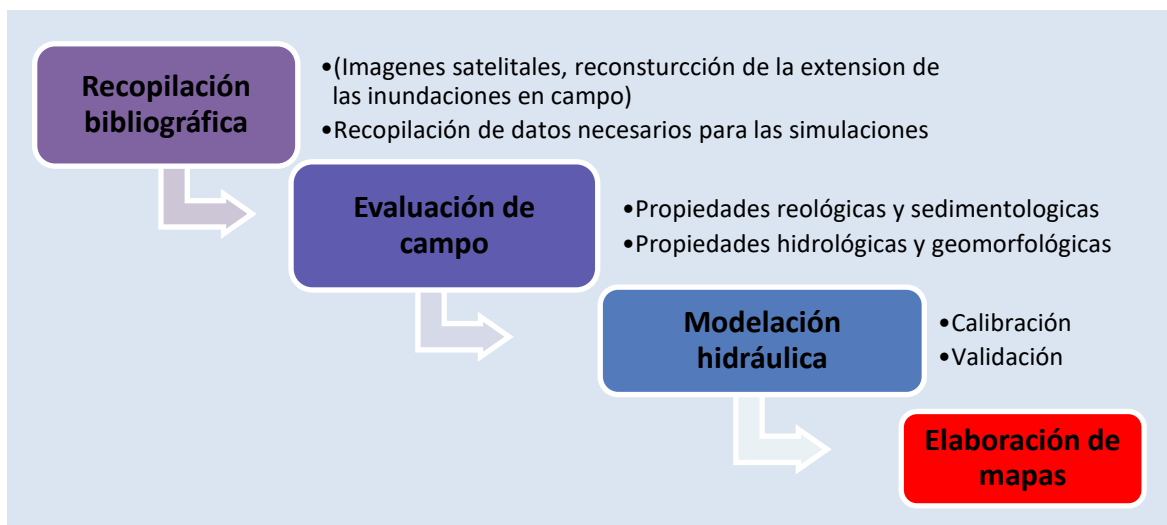


Figura 2: Metodología para la investigación

4.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

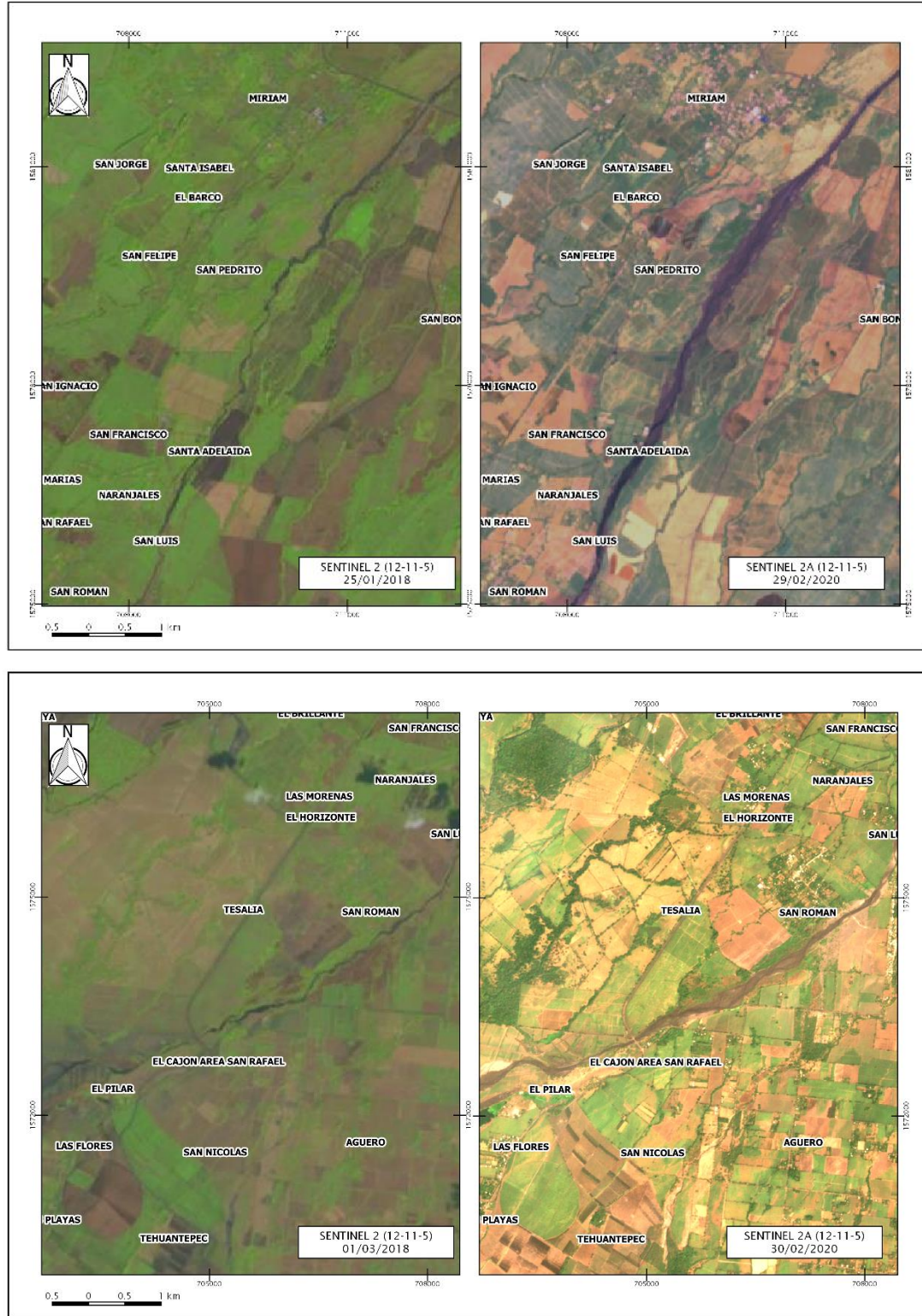
Durante esta fase se reunió toda la información necesaria para generar las simulaciones y los datos necesarios para realizar la verificación durante la fase de gabinete (simulaciones).

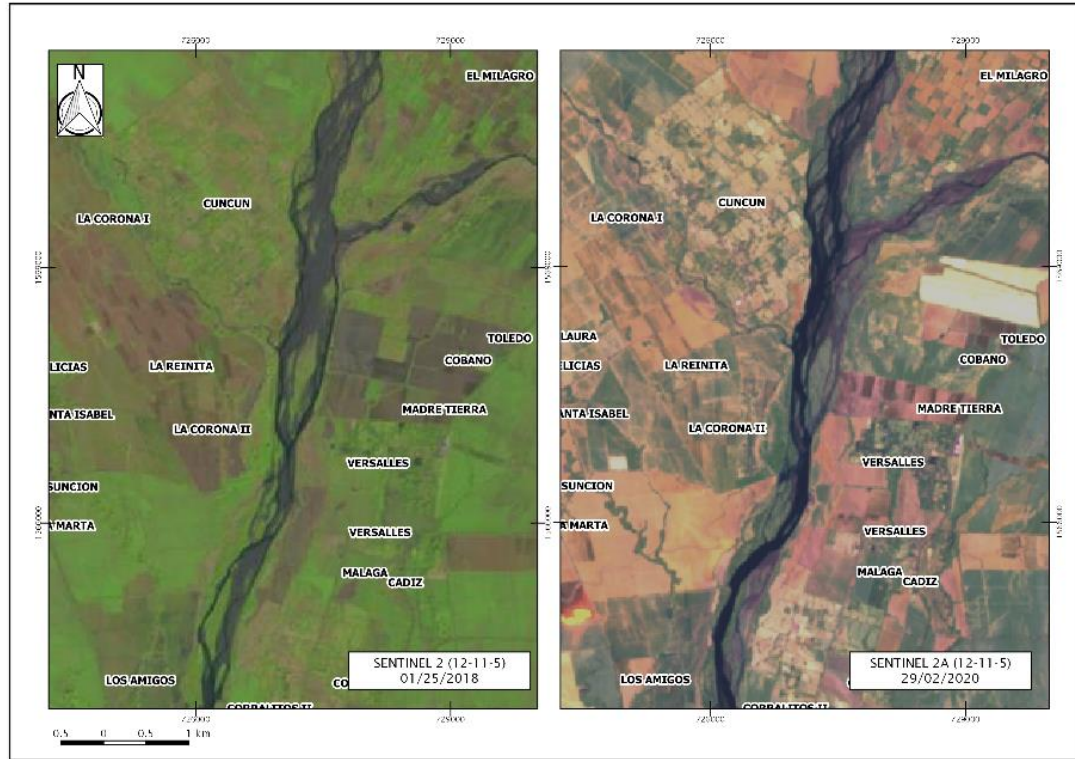
4.1.1 MAPEO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES

El análisis de imágenes satelitales consistió en la adquisición del área (formato .shp) donde se enmarcan todos aquellos eventos que han afectado las cuencas desde la parte alta en la zona del volcán de Fuego hasta su desembocadura en el océano Pacífico.

Debido a su resolución temporal y espacial se emplearon las imágenes Sentinel 2, descargadas de la página Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>); estas imágenes poseen una resolución espacial es de 20 m y un espaciamiento temporal de 5 días, las bandas empleadas para el análisis fueron 12, 11 y 5. Ejemplos de las zonas donde los procesos de sedimentación son mayores se observan en la figura 3, estas zonas representan ejemplos de ambas cuencas.

Figura 3. Zona de afectación de sedimentos mapeado con imágenes satelitales del período del año 2018 al 2020.





4.1.2 CAUDALES

Para la estimación de los modelos de transporte y sedimentación es necesario contar con parámetros hidráulicos que proyecten la capacidad de arrastre de un río. En este caso se utilizaron los caudales máximos medidos por las estaciones de INSIVUMEH durante los años 2010, 2018 y 2019 dividiéndolos en la etapa pre- y post- época lluviosa. La ubicación de las estaciones y los caudales utilizados durante las simulaciones se enumeran en la tabla 2.

Es importante mencionar que debido a que en la cuenca del río Achiguate, al igual que en el Coyolate en época lluviosa se generan lahares, debido a ello para las simulaciones se utilizó el valor máximo en etapa de post- época lluviosa de la estación Cristóbal.

Tabla 1: Ubicación de estaciones y caudales utilizados para las simulaciones

ESTACIÓN HIDROLÓGICA	UBICACIÓN		CAUDAL Q (M ³ /S)	
	X	Y	PRE- época lluviosa	POST-epoca lluviosa
Pantaleón	704823.5	1573039.3	3.682	
Cristóbal	701303.2	1571186.3		67.845
Cenizas II	726918.8	1578718.2	2.958	8.919

Fuente: INSIVUMEH, Año 2020.

4.1.3 RUGOSIDAD

Dentro de los valores necesarios para modelar el transporte y sedimentación se encuentran el parámetro de rugosidad o coeficiente de Manning (n). Para el presente estudio y debido a la morfología de la cuenca se utilizarán los valores siguientes.

Tabla 2: Valores de coeficiente de Manning propuestos para las simulaciones.

DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE	COEFICIENTE DE MANNING (N)
Cursos montañosos, cauces con cantos rodados con grandes rocas	0.040
Meandros con muchas piedras	0.050
Pasto alto	0.035
Escasos arbustos y pasto abundante	0.015
Zona de crecimiento de árboles	0.1

Fuente: Te Chow, Ven. (2004). Hidráulica de canales abiertos. Illinois, Estados Unidos.

4.2 FASE DE CAMPO

Para esta fase se realizó un recorrido por las cuencas desde la parte alta, hasta la zona de la desembocadura, con la finalidad de caracterizar las propiedades reológicas, sedimentológicas, hidráulicas y geomorfológicas de los depósitos.

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL RECORRIDO

La parte alta de las cuencas se caracteriza por ser una zona montañosa de alta pendiente, el ancho promedio de estos canales es de 10 m a 30 m y alturas de hasta 50 m. Estas características se observan en el área del Coyolate en la barranca Seca, río Mineral y barranca Taniluyá, mientras que en el Achiguato se observa en la parte alta del río Ceniza.

Dentro de estos canales se observa abundante material no consolidado (estratos de hasta 25 m), procedente de eventos eruptivos antiguos y recientes del volcán de Fuego (corrientes de densidad piroclástica, caída de tefra y lahares), que se remobilizan con facilidad por la influencia del caudal del río o por precipitación. Los estratos en su mayoría son pobremente sorteados, poseen clastos que van de 3 cm hasta bloques de 2 m, angulares a subangulares, contenidos dentro de una matriz de grano fino. En esta zona predomina el transporte de fondo y debido a la existencia de material fino muy suelto es posible observar transporte en suspensión que es más evidente cuando se generan lahares en el área.

Debido a que el material se encuentra no consolidado, en las paredes se puede observar derrumbes de diversos tamaños que aportan material de fácil movilización, estos movimientos en masa pueden ser generados por saturación del suelo, gravedad y la vibración generada por la presencia de lahares en esta zona.



Figura 4: Evaluación de depósitos en la parte alta de las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate.

A) Depósitos de distintos eventos volcánicos, donde se pueden observar procesos erosivos generados por movimientos en masa gravitacionales y por erosión hídrica (lahares). **B)** Depósitos de corrientes de densidad piroclásticas no consolidados, se observan deslizamientos de las paredes debido a la pendiente y a la precipitación. **C)** Paredes no consolidadas formadas por corrientes de densidad piroclástica, en ella se observan los clastos angulares de hasta 50 cm y transporte en el fondo del canal debido a la presencia de lahares en la zona.

En la parte media de la cuenca se observan pendientes menores, en esta zona se observa un equilibrio entre erosión y deposición. En la cuenca del río Coyolate esta zona se ubica desde el inicio del Pantaleón, mientras que, para el Achiguate esta se observa en el cauce del río Ceniza, aproximadamente en la cota 1455. El ancho de los cauces varía de 50 m a 70 m y alturas de 2 a 3 m.

En esta zona se observan depósitos de flujos piroclásticos y lahares de hasta 3 m. Debido a la interacción entre estos dos fenómenos los estratos están pobremente sorteados, los clastos van desde cm hasta bloques de 1 m, van de subangulares a sub redondeados por el transporte que algunos de ellos han sufrido, presencia de material orgánico, contenido dentro de una matriz de grano fino. En la base de algunos estratos se observa imbricación que representa la etapa lenta de deposición. En esta zona existe un balance entre el transporte de fondo y el transporte de sedimentos en suspensión.

En la zona media del canal se observan terrazas que presentan alturas de 30 cm hasta terrazas que alcanzan 1.30 m.



Figura 5: Evaluación de depósitos en la parte media de las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate. **En la parte media de la cuenca se observa el equilibrio entre erosión y deposición ya que es evidente la erosión generada por procesos como erosión hídrica en las paredes y arrastre y deposición de material en el medio del cauce.**

Las zonas más cercanas a la costa, se caracteriza por poseer pendientes muy bajas o nulas, por lo que el proceso de deposición es mayor al que el de erosión. Los canales poseen anchos de entre 75 m y 150 m, en el caso del Coyolate esta zona se ubica en la parte baja del río Pantaleón, mientras que para el Achiguate esta zona es más evidente en el puente del río Achiguate sobre la CA2.

Esta zona se caracteriza por presentar depósitos de bloques redondeados debido al transporte desde la parte alta en su mayoría observados en las paredes de los depósitos con granulometría desde cm hasta 1 m, contenidos en una matriz de grano fino. Los estratos poseen una altura que va de 1 a 2 m de altura. En esta zona predomina el transporte de sedimentos por suspensión.

Debido a que esta zona la sedimentación es mucho mayor existe mucha influencia antropogénica en las riveras de los ríos, esto es debido a las inundaciones que la alta tasa de sedimentación puede generar, principalmente en época lluviosa.



Figura 6. Evaluación de depósitos en la parte baja de las cuencas de los ríos Coyolate y Achiguate. Se observa como a medida que la pendiente puede disminuir la deposición de clastos disminuye y la deposición de la carga fina aumenta. La fotografía en la parte superior

4.3 FASE DE GABINETE

Esta fase consiste en reunir y procesar todos los datos recolectados durante las fases anteriores los cuales serán útiles para la realización, validación y caracterización de las simulaciones. Estos procesos son descritos a continuación.

4.3.1 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

Desde el punto de vista geomorfológico es posible considerar tres zonas claves en la dinámica de transporte y sedimentación, estas son: Zona de erosión, zona de transferencia y zona de deposición. Estas zonas se han caracterizado en el área de estudio en base a: la pendiente, observaciones de campo y geomorfología. Ejemplos promedios de la caracterización geomorfológica se observan en la figura 7 y 8.

4.3.1.1 ZONA DE EROSIÓN

La zona de erosión corresponde a la zona alta de la cuenca, posee pendientes abruptas y canales profundos (50 m), material no consolidado producto de erupciones volcánicas de fácil movilidad por procesos como hídricos o gravitacionales que aportan una importante cantidad de sedimentos al resto de la cuenca. Esta zona se caracteriza por presentar arrastre de sedimentos en el fondo del lecho y en suspensión principalmente cuando es afectada por lahares.

En el caso de la cuenca del río Coyolate se han considerado zonas de erosión los cauces de la barranca Seca, barranca Taniluyá y río Mineral a partir de la cota 1200 hacia la cota 900. Para la cuenca del río Achiguate se ha considerado zona de erosión el cauce del río Ceniza a partir de la cota 1200 hasta la cota 580.

4.3.1.2 ZONA DE TRANSICIÓN

La zona de transición corresponde a la zona media de la cuenca, las pendientes disminuyen manteniendo el equilibrio entre la zona de erosión y la zona de sedimentación. En esta zona los canales poseen profundidades entre 15 y 5 m. Existen depósitos de material producto de la actividad volcánica, pero a la vez depósitos resultantes de la actividad laharica se depositan en esta zona.

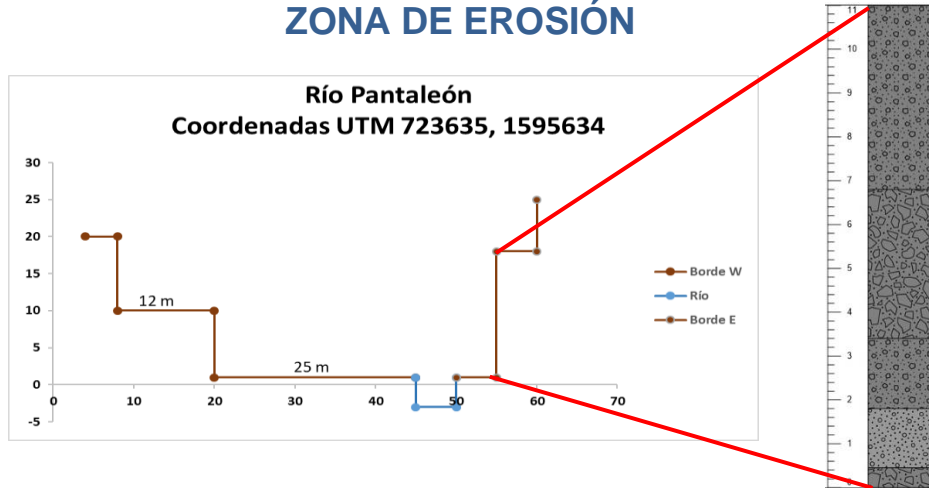
En el caso de la cuenca del río Coyolate se ha considerado como zona de transición el río Pantaleón desde la cota 1200 hacia la cota 560. Para el río Achiguate se considera como zona de transición el cauce del río Ceniza a partir de la cota 580 hacia la cota 340.

4.3.1.3 ZONA DE DEPOSICIÓN

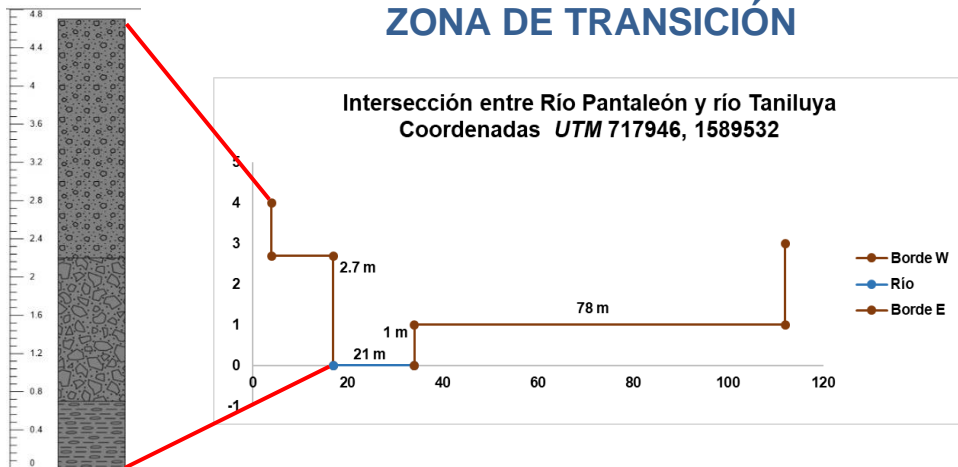
Esta zona corresponde a la zona baja de la cuenca, la pendiente en esta zona disminuye tanto que muy pocas veces se generan procesos de erosión. Esta zona recibe una importante cantidad de sedimentos de la parte alta de la cuenca formando depósitos algunas veces escalonados y cambiando la geomorfología de los ríos constantemente. Esta zona está altamente influenciada en las riberas por acción antrópica debido a que la sedimentación genera inundaciones que afectan las comunidades de la parte baja de la cuenca.

En el caso de la cuenca del río Coyolate se ha considerado como zona de deposición el río Pantaleón desde la cota 560 hasta la desembocadura en el mar, mientras que para la el Achiguate se ha considerado como zona de deposición a partir del cauce del río Ceniza en la cota 340 hasta su desembocadura en el mar.

ZONA DE EROSIÓN



ZONA DE TRANSICIÓN



ZONA DE DEPOSICIÓN

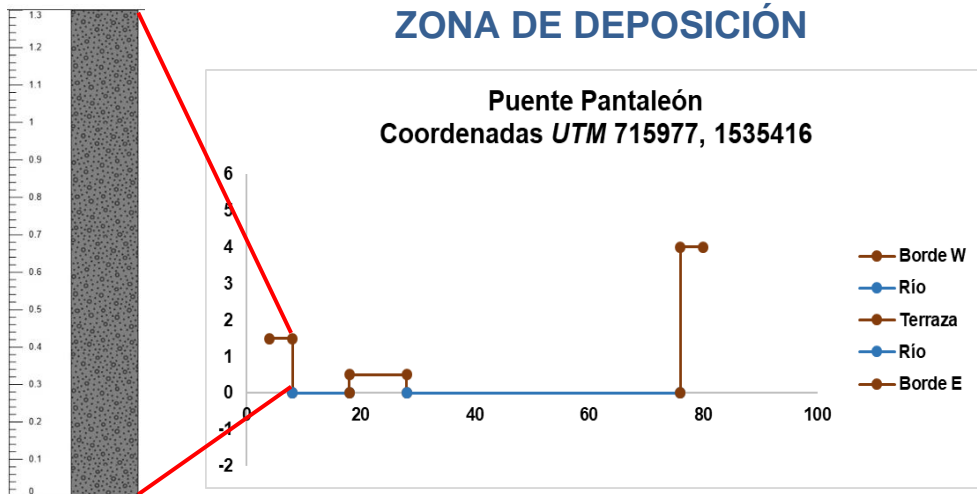


Figura 7: Caracterización geomorfológica promedio de la cuenca del río Coyolate.

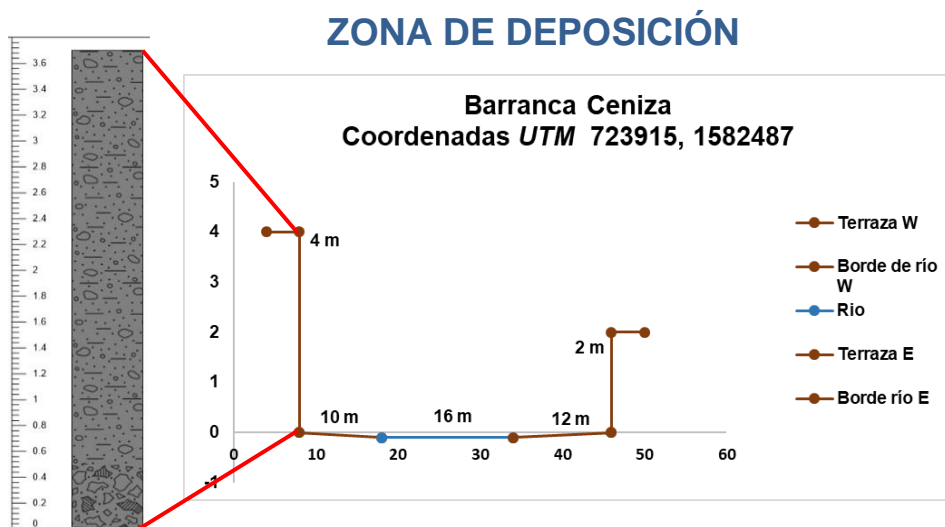
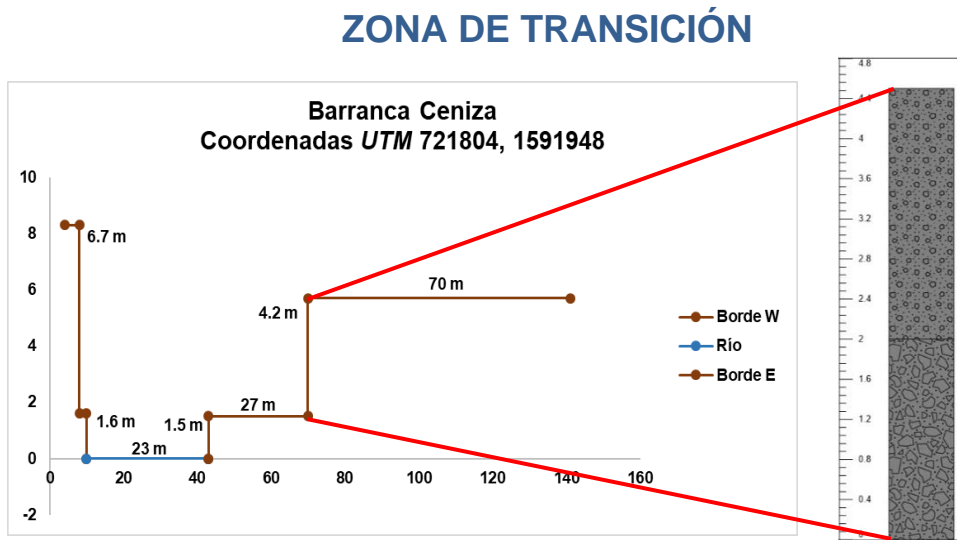
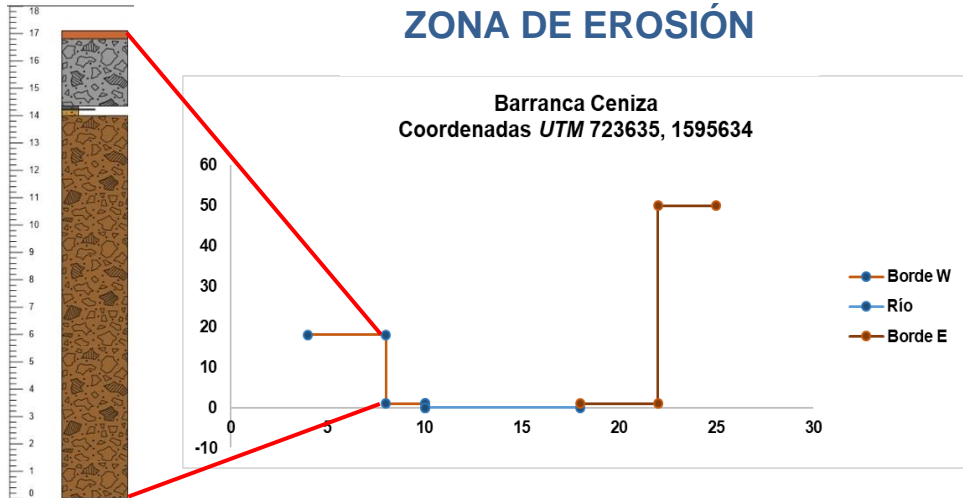


Figura 8: Caracterización geomorfológica promedio de la cuenca del río Achiguate.

4.4 FASE DE MODELAMIENTO EN IBER

Para la ejecución de esta fase se utilizó el programa de modelización hidráulica IBER. Este es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos de ríos y estuarios, consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí, incluyendo: módulo hidrodinámico, módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Se caracteriza por ser un modelo computacional libre.

Para construir el modelo del río y llevar a cabo una simulación con Iber se debe tomar en cuenta la ejecución de un pre-proceso, el cálculo y el post-proceso como se muestra a continuación.

4.4.1 PRE-PROCESO

Dentro de los aspectos que se consideran en el pre-proceso están, la creación de la geometría, las condiciones de entrada y la creación de la malla de cálculo.

Para la creación de la geometría, Iber permite importar una geometría preprocesada en Sistema de Información Geográfica (ArcGis o Qgis), como se observa en la figura 9:

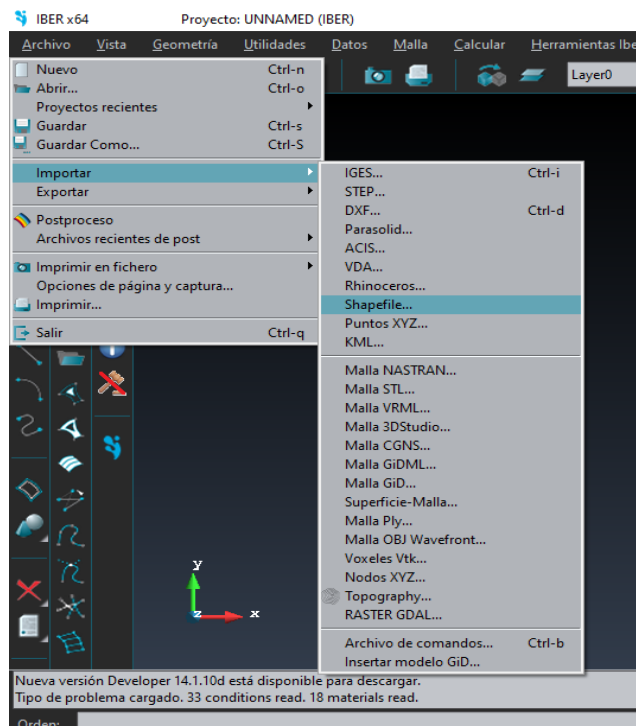


Figura 9: Creación de geometría en IBER.

Sobre la geometría importada es necesario establecer las condiciones de entrada que le darán forma a la simulación, las condiciones utilizadas para la elaboración de este proyecto han sido: hidrodinámicas, rugosidad, borde de transporte de sedimentos y condiciones de turbulencia. Para su ejecución se debe ingresar los valores de entrada a partir del menú datos como se muestra en la figura 10. Estos datos, según el software lo requiera se pueden ingresar desde las líneas de la geometría o desde la superficie de la geometría.

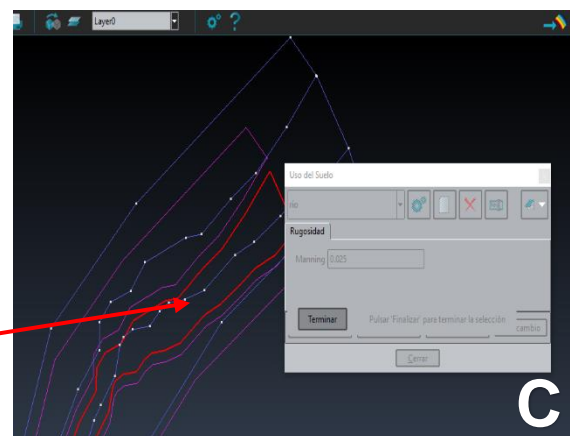
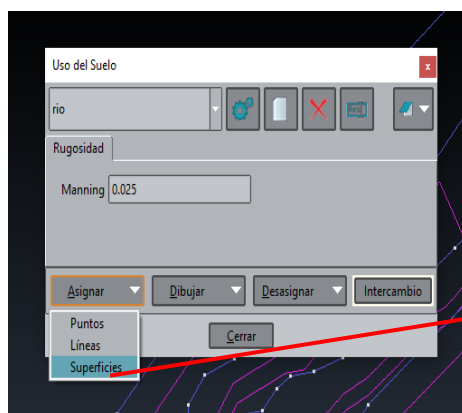
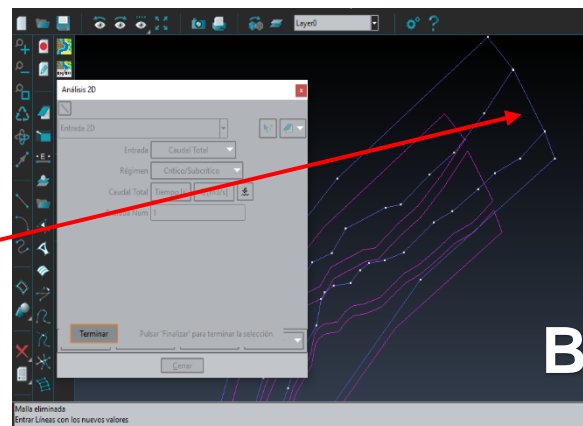
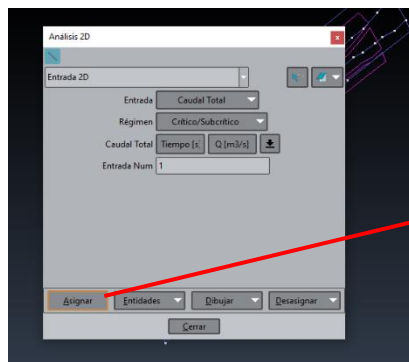


Figura 10: Creación de las condiciones de entrada en Iber.

A) Menú de datos de condiciones de entrada para las simulaciones. B) Ejemplo de asignación de valores de entrada, en este caso los valores de entrada del caudal, a partir de una línea. C) Ejemplo de asignación de valores, en este caso rugosidad, a través de la superficie.

Cuando se han ingresado las condiciones de entrada es necesario generar una malla de cálculo, diferenciando el área del canal del río y las áreas circundantes. La malla de cálculo se genera desde el menú malla como se muestra en la figura 10. En el área del canal se establece el valor de la malla como no estructurada asignándole un valor a la superficie (Figura 11A). Mientras que el área circundante del canal se genera a partir del menú generar malla (Figura 11B).

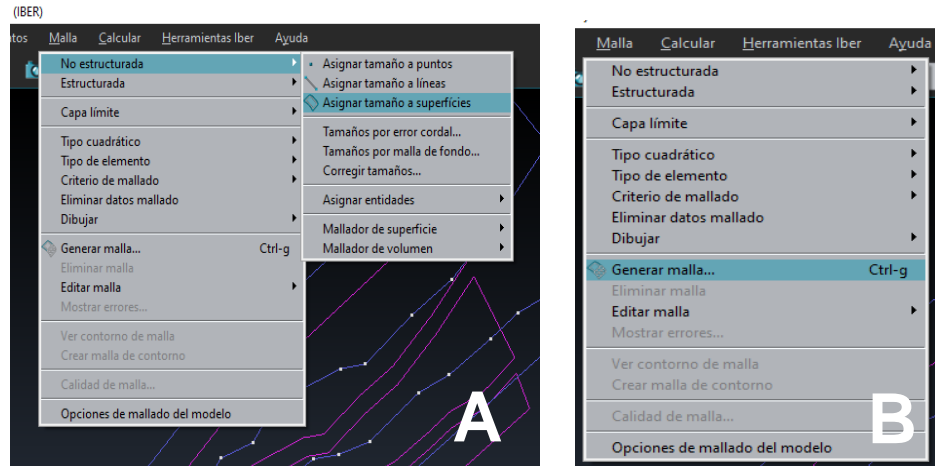


Figura 11: Menú de creación de la malla de trabajo.

Para esta malla es necesario considerar que el transporte de sedimentos depende en gran medida de la pendiente, por lo que es necesario asignarle la altura a cada uno de los puntos creados en la malla, para ello Iber permite asignarle a la geometría un DEM, en este caso en formato ASCII. La importación del DEM se realiza a través del menú Herramientas Iber como se observa en la figura 11. En la figura al fondo del área de trabajo es posible observar un ejemplo de la malla ya realizada, nótese que el área del canal posee una malla con puntos más definidos entre sí.

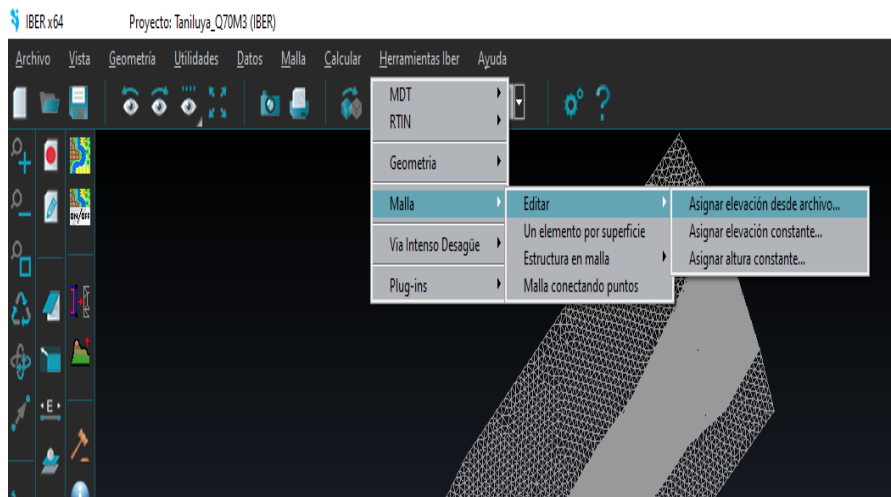


Figura 12: Proceso para asignar la elevación a la malla a través de un modelo de elevación digital del terreno.

Para este estudio se optó por utilizar el DEM de ALOS del año 2011 que posee una resolución espacial de 12.5 metros.

4.4.2 CÁLCULO

El cálculo representa las características del proceso computacional, en este entorno se delimita el tiempo de simulación, el orden de preferencia de la simulación, los productos a adquirir, el modelo de turbulencia a ejecutar y los modelos de sedimentación y el tiempo de inicio que se le dará a estos modelos, en este entorno es necesario recalcar la importancia de iniciar el modelo de sedimentación posterior al modelo hidráulico, cuando este último se encuentre estable. El menú necesario para la generación del cálculo se visualiza en la figura 13.

Para el modelo de sedimentos se utilizaron dos modelos en base a las observaciones de campo, el modelo de sedimentos en suspensión de Van Rijn y el de transporte de fondo de Meller-Peter&Müller.

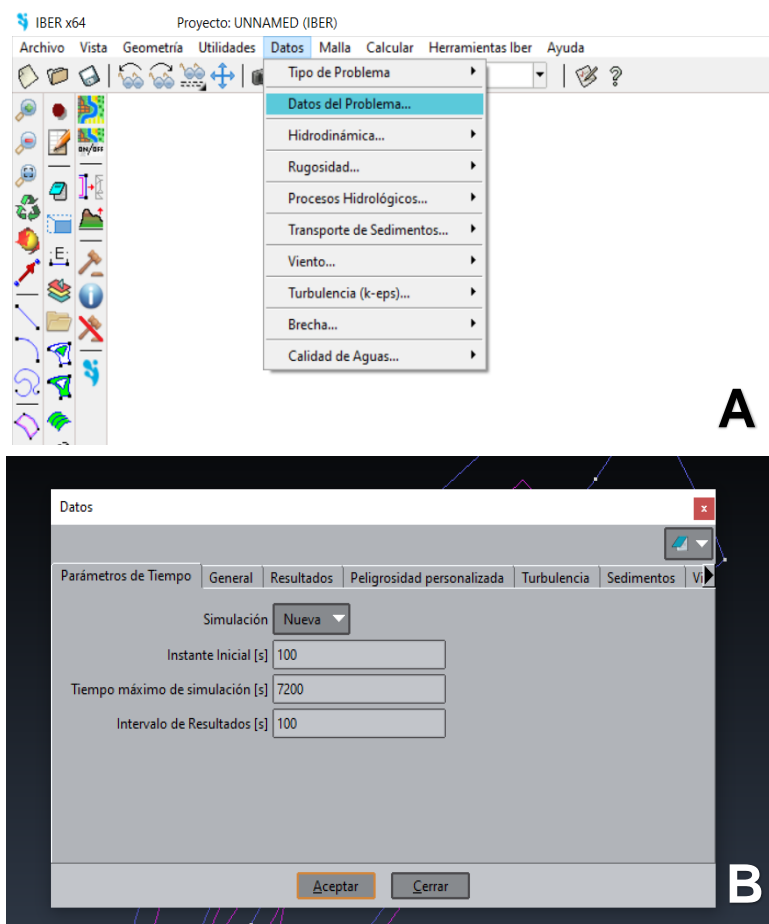


Figura 13: Proceso de definición de datos del problema.

A) Selección del menú. B) Ejemplo de pestañas de ingreso de datos para el problema.

4.4.3 POST-PROCESO

El post-proceso consiste en la visualización de todos los resultados adquiridos tras la generación de las simulaciones. En Iber podemos visualizar por defecto datos hidráulicos y parámetros de los sedimentos como carga de fondo, erosión, carga en suspensión, crear

valores promedio. Además, se pueden crear gráficos en puntos definidos o de valores en general. Para ingresar a la visualización de los resultados se hace a través del menú Ventana de Resultados como se observa en la figura 14.

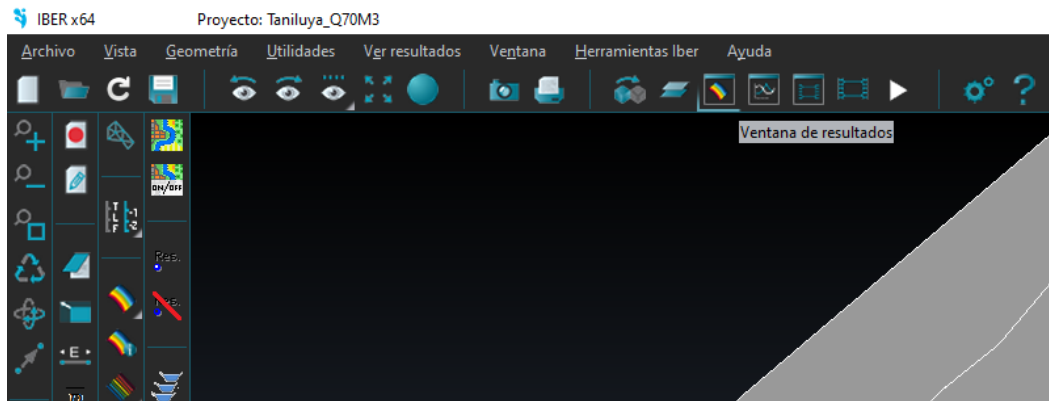


Figura 14: Menú para visualizar la ventana de resultados.

Los resultados pueden ser exportados en formato raster para ser visualizados y procesados en Sistemas de Información Geográfica (ArcGis o QGis) como se observa en la figura 15.

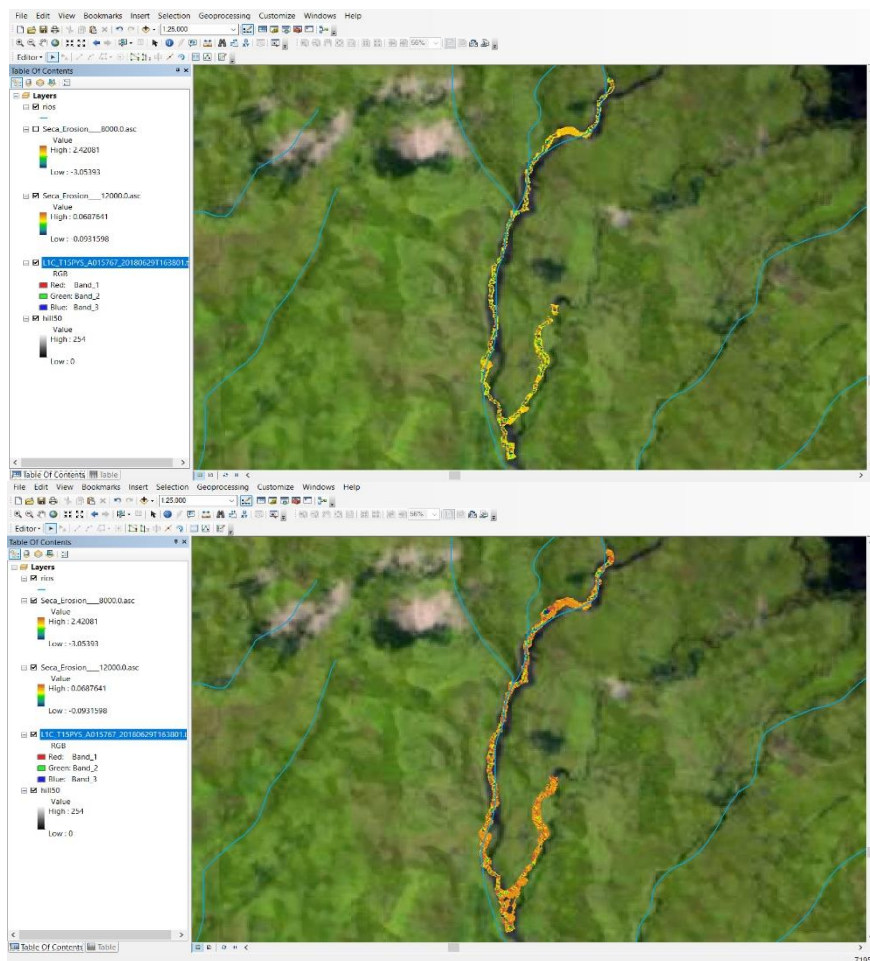


Figura 15: Tratamiento de resultados en Sistemas de Información Geográfica.

Se realizó una evaluación de las zonas donde se presentan los valores máximos de erosión y sedimentación calculados durante la simulación como se observa en la figura 16A. Iber genera una paleta de colores representando en máximos (colores rojizos) los valores de erosión y en mínimos (colores azules) los valores de sedimentación. Posterior a ellos con los datos extraídos se delimito una capa para ambas zonas (pre y post- temporada de lluvia), la cual servirá de base para registrar los cambios geomorfológicos máximos y espaciales que se pueden dar en la zona (figura 16B).

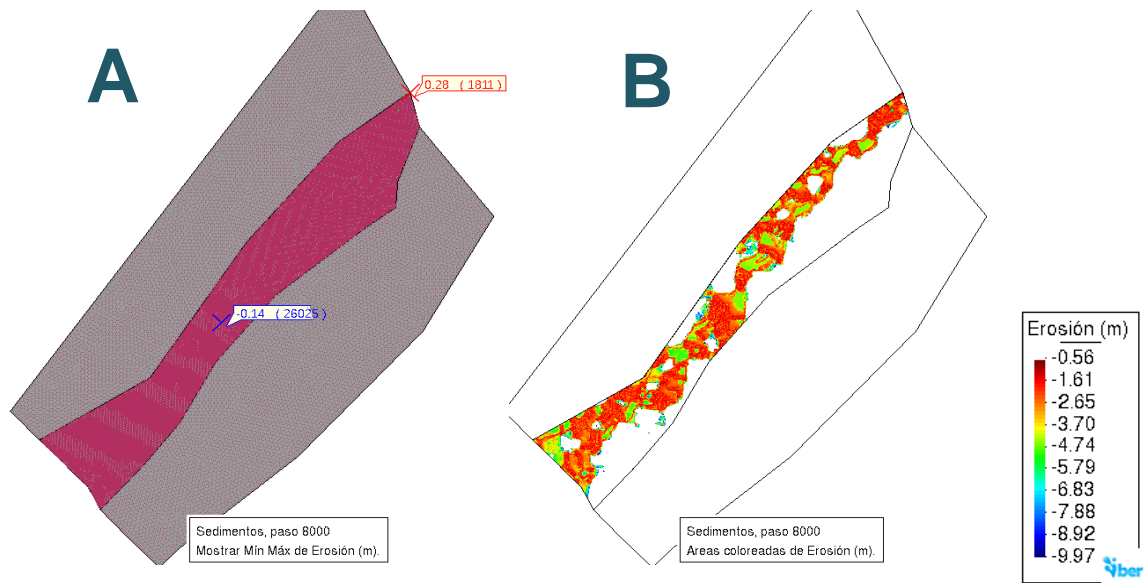


Figura 16: Evaluación de resultados generados en Iber.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación están basados en tres procesos: el mapeo de la zona de sedimentación generada tras el análisis de imágenes satelitales; una serie de simulaciones realizadas en Iber en dos etapas distintas, pre-temporada de lluvia (enero-marzo y noviembre-diciembre) y post- temporada de lluvia (abril-octubre); finalmente, el contraste de estas dos metodologías para generar un mapa de afectación por el transporte de sedimentos.

El resultado del análisis de las imágenes satelitales se presenta en la figura 17, en este se incluyen los cambios geomorfológicos generados por el transporte y la deposición de sedimentos para ambas cuencas (Coyolate y Achiguate), a través de este polígono se ha podido determinar el área de dichos cambios. Para el caso de la cuenca del río Coyolate el polígono mapeado posee un área de 4.68 Km², a partir del río Cristóbal, mientras que, para el caso del río Achiguate, este posee un área de 9.98 Km², a partir de la cota 340.

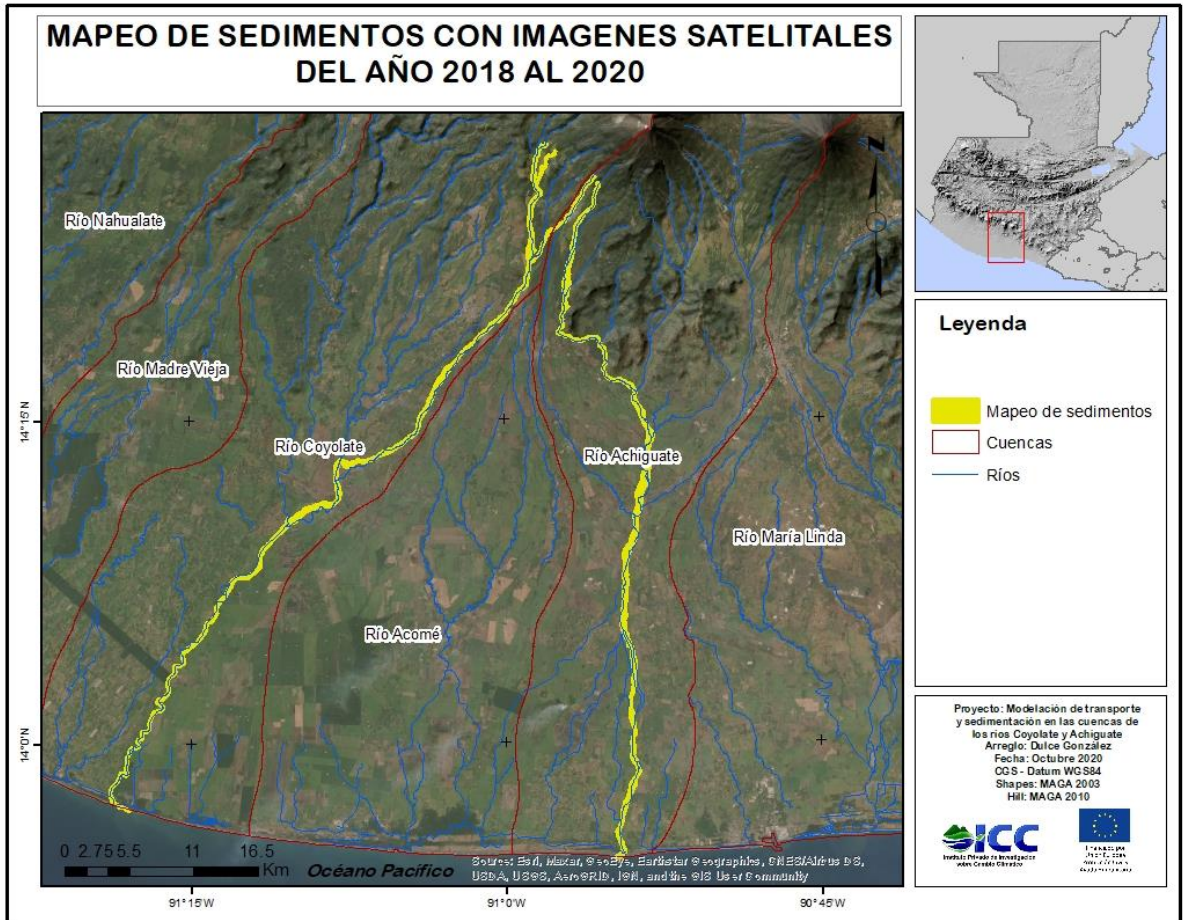


Figura 17: Cambios geomorfológicos principales basados en el mapeo de imágenes satelitales del año 2018 al 2020.

La tabla 3, muestra los resultados promedio de las simulaciones obtenidas en la cuenca del río Coyolate, entre ellos se menciona el área afectada por el proceso de erosión-sedimentación expresada en km^2 , los valores de erosión máximos de las zonas geomorfológicas expresados en m, los valores de sedimentación máxima expresados en metros y la carga de sedimentos transportados por el río expresados en g/l para ambas temporadas. Los resultados han sido proyectados para un conteo de 36 000 s de simulación.

Tabla 3: Resultados generados por Iber en la cuenca del río Coyolate y Achiguate

Cuenca del río Coyolate					
Resultados pre-temporada de lluvia					
Zona según la caracterización geomorfológica	Cauce	Área Km²	Erosión (m)	Sedimentación (m)	Sedimentos en suspensión (g/l)
Zona de erosión	Barranca Seca, barranca Taniluyá y río Mineral	0.588	0.982	0.1239	4.8530
Zona de transición	Parte alta del río Pantaleón	0.527	0.17035	0.2371	5.1099
Zona de sedimentación	Parte baja del río Pantaleón, río Cristóbal	2.952	0.5305	0.4297	5.5660
Resultados post-temporada de lluvia					
Zona de erosión	Barranca Seca, barranca Taniluyá y río Mineral	0.873	2.7145	3.0680	2.2877
Zona de transición	Parte alta del río Pantaleón	0.814	0.4135	0.3854	9.0519
Zona de sedimentación	Parte baja del río Pantaleón, río Cristóbal	5.036	1.1836	1.5170	14.9028
Cuenca del río Achiguate					
Resultados pre-temporada de lluvia					
Zona según la caracterización geomorfológica	Cauce	Área Km²	Erosión (m)	Sedimentación (m)	Sedimentos en suspensión (g/l)
Zona de erosión	Río Ceniza	0.274	0.12601	0.08755	5.9454
Zona de transición	Río Ceniza	0.684	0.06373	0.07992	7.1630
Zona de sedimentación	Río Ceniza y Achiguate	1.559	0.88983	0.78172	15.8243
Resultados post-temporada de lluvia					
Zona de erosión	Río Ceniza	0.418	1.4252	1.7230	2.3340
Zona de transición	Río Ceniza	1.127	0.2318	0.1918	9.3823
Zona de sedimentación	Río Ceniza y Achiguate	2.623	2.59677	1.3680	86.85

Las figuras 18 a 20, muestra la representación espacial de las zonas obtenidas durante las simulaciones, las cuales se han contrarrestado con imágenes satelitales mostrando los puntos que bajo las condiciones adecuadas pueden ser más susceptibles a procesos de erosión o sedimentación. Las comunidades que se señalan en las figuras únicamente son de referencia y la escala de color señala en rojo las zonas con procesos de sedimentación y en verde las zonas susceptibles a erosión.

En la zona de erosión de la cuenca del río Coyolate (figura 18), se han identificado 4 puntos en los cuales se pueden generar cambios relevantes por los procesos de transportes de sedimentos. La diferencia espacial entre eventos pre y post temporada de lluvia generada por las simulaciones es de 0.285 km².

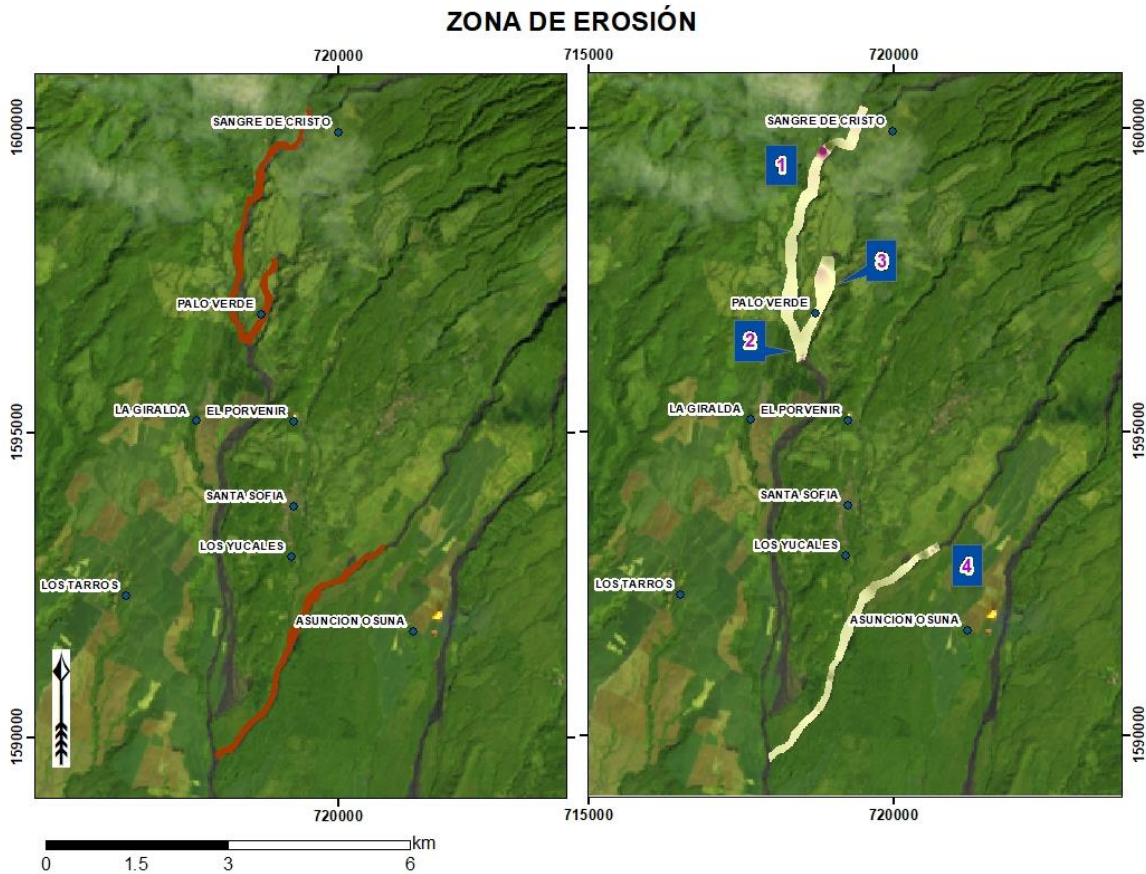


Figura 18: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de erosión en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia en la cuenca del río Coyolate.

La zona identificada como zona de transición (figura 19), muestra 3 puntos identificados como zonas de acumulación de sedimentos debido a la morfología, los análisis de imágenes satelitales han mostrado un cambio en el comportamiento del río posterior al punto 3 (meandro que se observa en la figura del lado izquierdo), esto es debido a la zona de acumulación que se origina en el punto 3 que ha cambiado a la actualidad el cauce del río. La diferencia espacial entre ambas zonas es de 0.287 km² según las simulaciones realizadas.

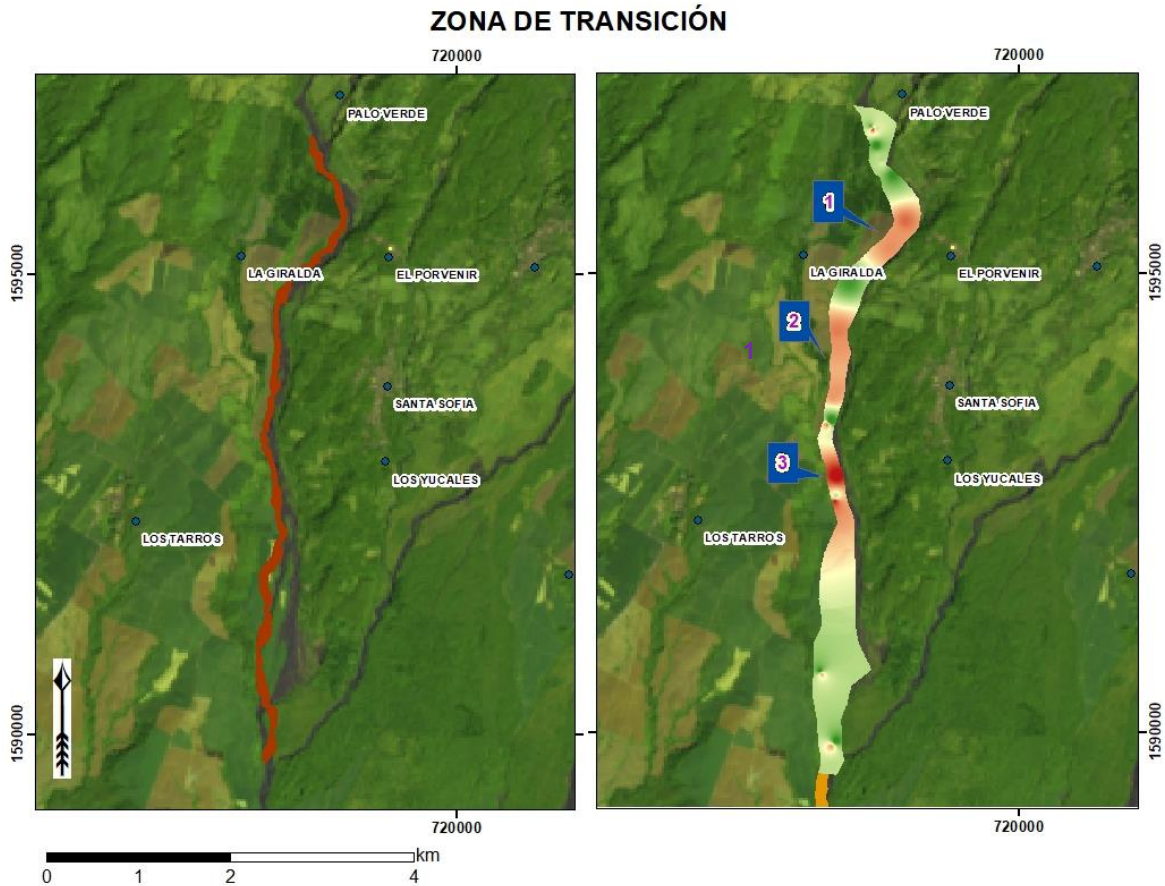


Figura 19: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de transición en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia en la cuenca del río Coyolate.

La zona identificada como zona de sedimentación de la cuenca del río Coyolate (figura 20), se ha determinado como la zona con mayor acumulación de material y transporte de sedimentos en suspensión como lo muestra la tabla 3, esta zona como lo evidencia el mapeo de campo y el contraste con fotografías satelitales en el último año ha generado incluso cambios en la trayectoria de los ríos, debido a que, los depósitos de sedimentos contienen importantes volúmenes de materia provenientes de la parte alta de la cuenca (zona de erosión y de transición). Es importante notar que el punto 4 ubicado en el río Cristóbal ha cambiado inclusive la morfología del río en los últimos años debido a la importante acumulación de sedimentos que se produce en esta zona, según las simulaciones esta acumulación puede alcanzar hasta 2 m de espesor. La diferencia espacial entre ambas temporadas es de 2.08 km² según las simulaciones realizadas.

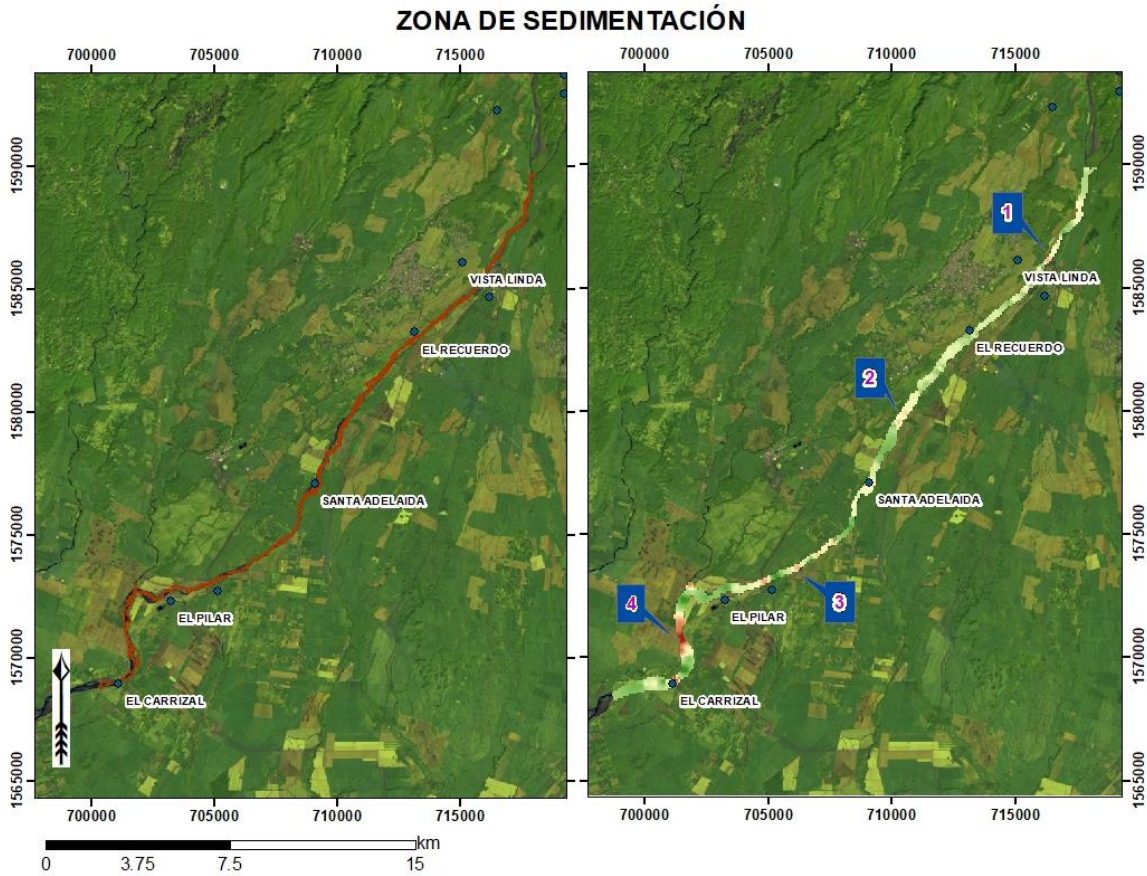


Figura 20: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de sedimentación en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Coyolate.

Los resultados obtenidos tras las simulaciones en el río Achiguate se enmarcados en la tabla 3, al igual que en el Coyolate estos resultados son: el área afectada por el proceso de erosión-sedimentación, los valores de erosión máximos, los valores de sedimentación máxima y la carga de sedimentos. Los resultados obtenidos fueron proyectados para un conteo de 36 000 s de simulación.

En la zona clasificada como zona de erosión en la cuenca del río Achiguate (figura 21), tras las simulaciones pre y post temporada se ha podido observar que la mayor parte de la cuenca está afectada por procesos de erosión, se han identificado tres puntos con procesos de sedimentación, pero no se consideran relevantes para el total de la zona analizada. La diferencia espacial entre ambas temporadas es de 0.144 km² según las simulaciones realizadas.

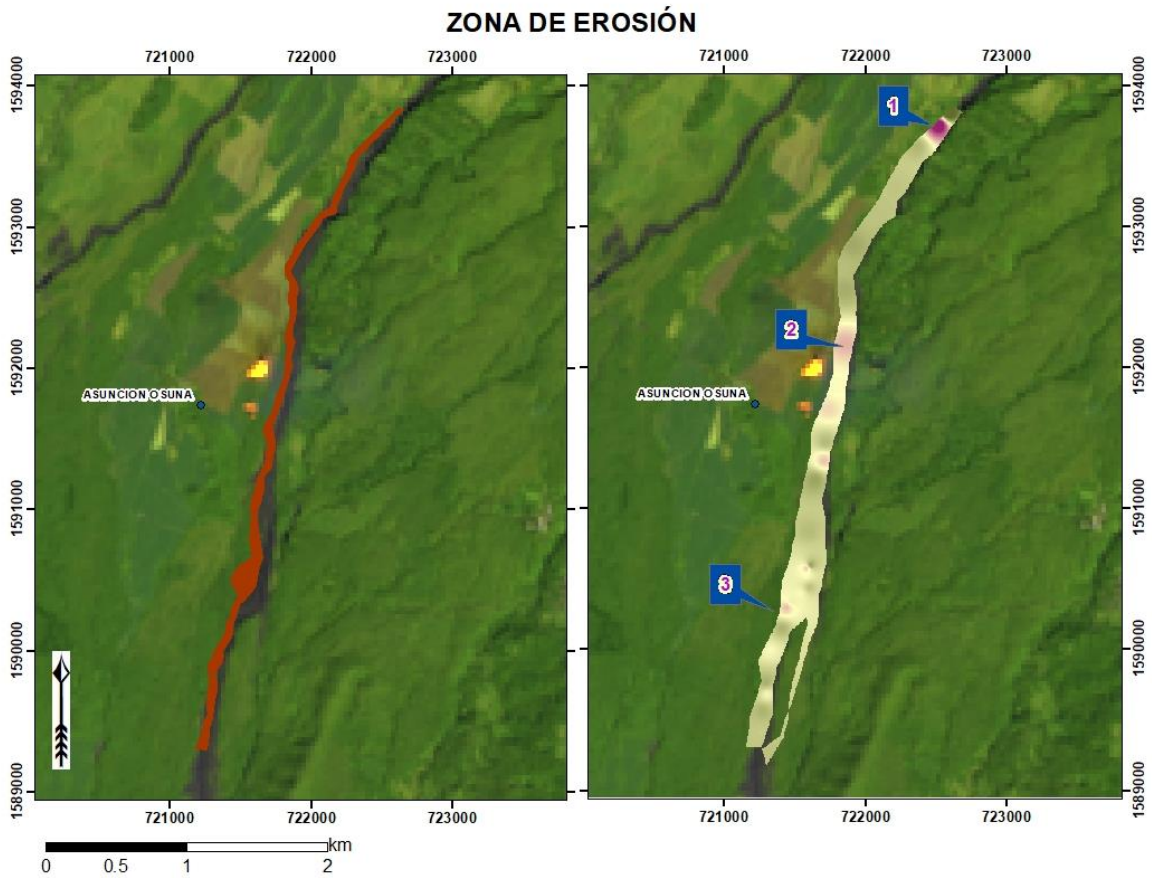


Figura 21: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de erosión en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Achiguate.

La zona de transición en relación con la cuenca del río Achiguate presenta variaciones significantes, como se observa en la figura 22 existen 3 zonas con aporte de sedimento significativo. Estos hechos han dado lugar a cambios de dirección en el cauce del río y generación de planicies de inundación, las simulaciones realizadas en este contexto se han podido contrastar con hechos históricos que inclusive han afectado infraestructura. La diferencia espacial en esta zona es de 0.44 km^2 según las simulaciones realizadas.

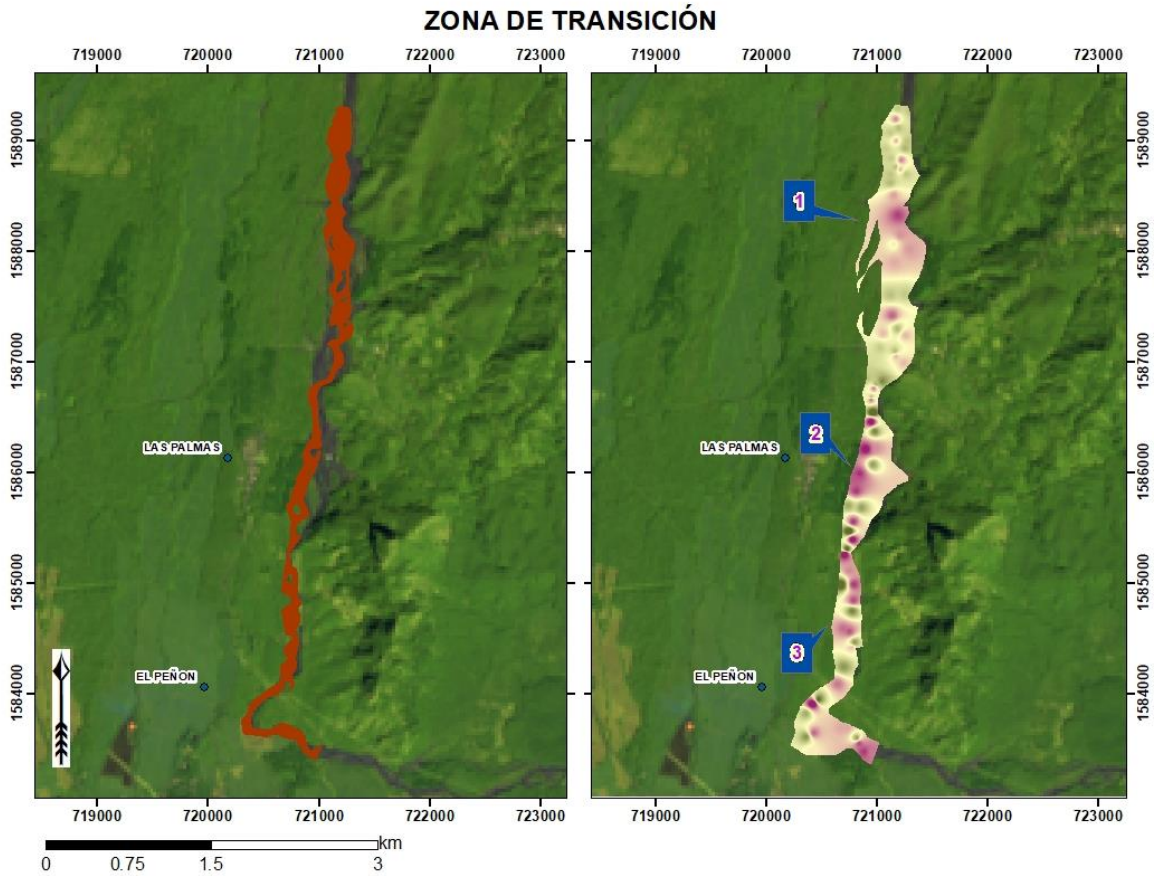


Figura 22: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de transición en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Achiguate.

Para la zona de sedimentación de la cuenca del río Achiguate los procesos son más evidentes como se observa en la figura 23. La diferencia espacial de la pre- y post-temporada de lluvia es de 1.063 km², según las simulaciones realizadas. Como se puede observar existen 3 áreas con mayor aporte de sedimentos, esto ha generado, según evidencia de campo, zonas de cambio de dirección de cauce, ensanchamiento de los cauces y cambios en el nivel de la topografía. Todos estos procesos, aunque ocupan la mayor parte del área de sedimentación simulada, son más evidentes en los puntos señalados del 1 al 3.



Figura 23: Diferencias espaciales ubicadas en la zona de deposición en pre (izquierda) y post (derecha) temporada de lluvia, en la cuenca del río Achiguate.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio nos plantea una cuantificación espacial en relación con las variaciones de transporte y sedimentación en las cuencas, el modelo que se ha generado incorpora una serie de procesos como lo son la evaluación de campo, el análisis de imágenes satelitales, la realización de simulaciones y la incorporación de datos reales que validan los resultados obtenidos tras las simulaciones.

La evidencia de campo nos ha permitido clasificar geomorfológicamente las cuencas objetivo de este estudio en 3 zonas: La zona de erosión que pertenece a la parte alta de la cuenca, posee volúmenes significantes de material volcánico, que debido a su poca consolidación y su mala clasificación permite el procesos de erosión con facilidad; la zona de transición que es una zona de equilibrio entre los procesos de erosión y sedimentación, posee material retrabajado y material volcánico depositado recientemente pero, con menor volumen, que en la zona de erosión; finalmente la zona de deposición o la zona de sedimentación que debido a la topografía permite que los sedimentos transportados desde la parte alta se depositen con facilidad generando importantes volúmenes de acumulación de sedimentos.

El análisis de imágenes satelitales ha constituido una parte importante en el análisis de las zonas de sedimentación de las cuencas ya que nos ha permitido cuantificar el área que enmarca los cambios geomorfológicos producidos por la sedimentación, en el caso del río Coyolate el área mapeada es de 4.98 km² y para el río Achiguate el área mapeada es de 9.98 km².

Los resultados de las simulaciones han sido planteados para dos escenarios, estos muestran que existe una diferencia significativa entre las distintas temporadas, en ambas cuencas. Para la cuenca del río Coyolate las variaciones más significativas se observan en la zona de sedimentación presentando una diferencia espacial de 2.08 km² entre ambas temporadas simuladas; mientras que, para la cuenca del río Achiguate se han observados diferencias importantes tanto en la zona de transición como en la zona de deposición, ya que las simulaciones han mostrado como la acumulación de material genera cambios en la geomorfología, la diferencia espacial entre las temporadas es de 0.44 km² en la zona de transición y de 1.063 km² para la zona de deposición.

La identificación geomorfológica de las cuencas ha sido muy útil para el análisis, debido a que, la diferencia de los valores resultantes de las simulaciones en cada una de las zonas es muy significativa y sin esta diferenciación no hubiese sido posible la identificación de los puntos de mayor vulnerabilidad.

La construcción de este modelo se ha realizado con un Modelo de Elevación Digital con una resolución de 12.5 m, lo que no ha permitido que las simulaciones se generen en el área total de la cuenca, por lo que se ha evaluado por tramos, pero se ha optado por ingresar los caudales finales obtenidos de cada simulación para continuar con los tramos siguientes.

Es preciso mencionar que debido a que, no se ha contado con valores de carga de sedimentos de la cuenca se ha optado por evaluar valores obtenidos de la literatura definidos para ríos con condiciones similares, los cuales han dado resultados validos a nivel cualitativo.

7. BIBLIOGRAFIA

Brea, J.D. y Balocchi, F. (2010). *Proceso de erosión – sedimentación en cauces y cuencas*. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. PHI-VII/ Documento Técnico No. 22. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Talca Chile.

Cea Gómez, Luis., Blandéi Castellet, E. B., Sanz Ramos, M., Bermúdez Pita, M., Mateos Alonso, A. (2019). *Iber application basic guide. Two-dimensional modelling of free surface shallow water flows*. Universidad da Coruña. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497>.

Copernicus Open Access Hub. Septiembre 2020. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Guerra, A., Liere, M.A., Yax, P., G. Alfaro, Gil, S., Blacutt, L. (2017). *Gestión de riesgo de inundaciones en el río Coyolate: ejemplo de adaptación al cambio climático en Guatemala*. Revista Yu'am 2(3): 27-37 pp.

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología. Meteorología e Hidrología. (2020). *Aforos en las cuencas de los Ríos Achiguate y Coyolate durante los años 2018, 2019 y 2020*.

Jaxa, Meti. (2011). *ALOS fill. DEM*. USGS. Earth Explorer.

Montoya Jaramillo, L. J. Montoya Ramírez, R.D. (2005). *Transporte de sedimentos en las corrientes del departameto de Antioquía*. Revistas Ingenierías, Universidad de Medellín. Colombia.

Salame Guillén, T. A. (2015). *Modelamiento bidimensional hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a través del río Calabí y obras hidráulicas*. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

Vargas Martínez, N. O. Verdugo Rodríguez, N., Albelaez Salazar, J. D., Caicedo Carrasca, F. M., Traiana García, J. V. (2017). *Guía Metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. Centro Nacional de Modelación. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Colombia.

Te Chow, V. (2004). *Hidraulica de canales abiertos*. McGraw-Hill. Illinois, Estados Unidos.



**Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático**