



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA HIDRAULICA

**MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO DE
APROXIMACIÓN A LA CAPTACIÓN PILATÓN, PROYECTO
HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
HIDRÁULICO**

AUTOR:

Steven Joshué Túquerres Panamá

TUTOR:

Ing. Yadira Araceli Herrera Martínez. MSc

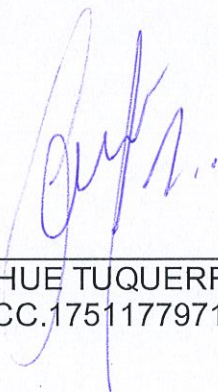
LATACUNGA, MARZO 2025

Latacunga, 21 de febrero de 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo **STEVEN JOSHUE TUQUERRES PANAMA** declaro ser autor (a) del proyecto de titulación "**MODELACION NUMERICA BIDIMENSIONAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO DE APROXIMACION A LA CAPTACION PILATÓN, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN**", siendo la Ing. **YADIRA ARACELI HERRERA MARTINEZ** tutora del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.



STEVEN JOSHUE TUQUERRES PANAMA
CC.1751177971

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **STEVEN JOSHUE TÚQUERRES PANAMÁ** identificado con cédula de ciudadanía No.175117797-1 de estado civil soltero , a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Hidráulica, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO DE APROXIMACIÓN A LA CAPTACION PILATÓN, PROYECTO HIDROELECTRICO TOACHI PILATON”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: mayo 2020 - septiembre 2020

Finalización de la carrera: octubre 2024 – marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 19 de febrero

Tutor: Ing. Yadira Araceli Herrera Martínez M.Sc

Tema: **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SUELO SOBRE EL MODELO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO QUINDIGUA, PROVINCIA DE COTOPAXI.”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los

siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.

G) La publicación del trabajo de grado.

h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.

i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

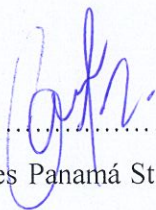
CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad.

El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 21 días del mes de febrero del 2025



.....
Túquerres Panamá Steven Joshué

EL CEDENTE

.....

Ing. Idalia Pacheco Tigselema Ph.D.

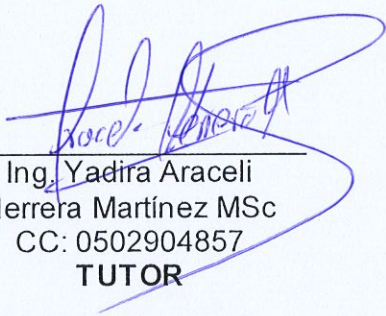
LA CESIONARIA

Latacunga, febrero 21 del 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO DE APROXIMACIÓN A LA CAPTACIÓN PILATÓN, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN.”, propuesto por el estudiante **STEVEN JOSHUE TUQUERRES PANAMA** de la Carrera de **INGENIERIA HIDRAULICA**, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Yadirá Araceli
Herrera Martínez MSc
CC: 0502904857
TUTOR

Latacunga, 21 febrero del 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título "**MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO DE APROXIMACIÓN A LA CAPTACIÓN PILATÓN, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN.**", propuesto por el estudiante **STEVEN JOSHUE TUQUERRES PANAMA** de la Carrera de **INGENIERIA HIDRAULICA**, me permito indicar que el estudiante ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la Modalidad de proyecto de Investigación virtud de lo cual el postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,

Lector 1 (presidente)
Ing. Andy miguel Giler
Ormaza. MSc
CC:1312820325

Lector 3
Ing. Marco Antonio Riofrio
Guevara MSc
CC: 1600682916

Lector 2
Ing. Xiomara Alejandra
Zambrano Navarrete MSc
CC: 1313058453

AGRADECIMIENTO

Quiero iniciar este trabajo expresando mi gratitud a Dios, fuente inagotable de inspiración y fortaleza, sin cuyo amparo este logro no hubiera sido posible.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a la Carrera de Ingeniería Hidráulica, por brindarme las herramientas y conocimientos que han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Deseo expresar mi gratitud a la Unidad de Negocio Hidrotoapi, por facilitar el acceso a la información técnica y los datos hidrológicos necesarios para la modelación numérica del transporte de sedimentos en el tramo de aproximación a la captación Pilatón, así como por el apoyo brindado durante las visitas técnicas.

A mi tutor, cuyo acompañamiento, orientación y paciencia fueron esenciales para consolidar este trabajo, mi más profundo reconocimiento.

Joshué Túquerres

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Ángel Túquerres y María Panamá, cuyo amor incondicional y ejemplo de vida han sido mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. A mi familia, por su constante apoyo y por creer en mis sueños, incluso en los momentos de duda. Este logro es un reflejo del esfuerzo colectivo, del sacrificio compartido y de la esperanza de un futuro lleno de posibilidades.

Asimismo, dedico este trabajo a mis amigos de carrera en la U: Davicho, Chino, Ney, Jeyson, Robayo, Pruna, Over y al Ing. David, quienes han compartido conmigo esta aventura académica, brindándome compañía, consejos y amistad. Gracias por su apoyo, por las risas y las palabras de ánimo que me impulsaron a seguir adelante.

Finalmente, rindo un homenaje especial al Ing. Edwin Casa, cuya orientación y ejemplo han sido una fuente constante de inspiración en cada etapa de este camino.

Joshué Túquerres

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TITULO: MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN EL TRAMO DE APROXIMACIÓN A LA CAPTACIÓN PILATÓN,
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN.**

Autor: Steven Joshué Túquerres Panamá

RESUMEN

La modelación numérica bidimensional del transporte de sedimentos en el tramo de aproximación a la captación Pilatón es fundamental para evaluar su impacto en la eficiencia del sistema hidroeléctrico Toachi-Pilatón. Este estudio empleó los programas HEC-RAS e Iber para analizar la dinámica sedimentaria y determinar patrones de erosión y deposición. Mediante un enfoque cuantitativo-numérico, se integraron datos hidrológicos, topográficos y geológicos a través de sistemas de información geográfica (SIG). Se establecieron condiciones de contorno e iniciales basadas en registros históricos de caudales líquidos y sólidos, incorporando parámetros sedimentológicos obtenidos a partir de granulometría de fondo y en suspensión. Para la calibración del modelo, se consideraron ecuaciones de transporte de sedimentos ampliamente aceptadas, como Meyer-Peter y Müller y Van Rijn. Los resultados de las simulaciones permitieron identificar variaciones en la velocidad del flujo, la tensión de fondo y la concentración de sedimentos en distintos escenarios hidrológicos. Se determinó que, bajo condiciones de caudales medios (330 m³/s), las velocidades oscilaron entre 4 y 6 m/s en los primeros 100 metros aguas arriba de la captación, favoreciendo la deposición de sedimentos en esta zona. En eventos de crecida (480 m³/s), se observó un aumento significativo de la socavación en la sección de aproximación, alcanzando profundidades de hasta 2.5 m, lo que compromete la estabilidad del lecho y la operatividad de la captación. La captación Pilatón requiere estrategias de gestión sedimentaria que incluyan estructuras disipadoras de energía y un esquema de limpieza periódica para minimizar la acumulación de sedimentos y optimizar la eficiencia del sistema.

Palabras clave: Modelación numérica, transporte de sedimentos, HEC-RAS, Iber, captación Pilatón, sedimentación, hidrodinámica, gestión sedimentaria.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES FACULTY

**TITULO: MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN EL TRAMO DE APROXIMACIÓN A LA CAPTACIÓN PILATÓN,
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN.**

Autor: Steven Joshué Túquerres Panamá

ABSTRAC.

Two-dimensional numerical modeling of sediment transport in the approach section to the Pilatón intake is essential to evaluate its impact on the efficiency of the Toachi-Pilatón hydroelectric system. This study used HEC-RAS and Iber software to analyze sediment dynamics and determine erosion and deposition patterns. Using a quantitative-numerical approach, hydrological, topographical, and geological data were integrated through Geographic Information Systems (GIS). Boundary and initial conditions were established based on historical records of liquid and solid flows, incorporating sedimentological parameters obtained from bottom and suspended load granulometry. For model calibration, widely accepted sediment transport equations, such as Meyer-Peter and Müller, and Van Rijn, were considered. The results of the simulations allowed the identification of variations in flow velocity, bottom stress and sediment concentration under different hydrological scenarios. It was determined that, under average flow conditions (330 m³/s), velocities ranged between 4 and 6 m/s in the first 100 meters upstream of the catchment, favoring sediment deposition in this zone. In flood events (480 m³/s), a significant increase in scour was observed in the approach section, reaching depths of up to 2.5 m, which compromises the stability of the bed and the operation of the catchment. The Pilatón catchment requires sediment management strategies that include energy-dissipating structures and a periodic cleaning scheme to minimize sediment accumulation and optimize system efficiency.

Keywords: Numerical modeling, sediment transport, HEC-RAS, Iber, Pilatón intake, sedimentation, hydrodynamics, sediment management.

ÍNDICE GENERAL

1	INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1	Informacion general.....	1
2	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1	Situación problemática	3
2.2	Formulación del problema.....	3
2.3	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	3
2.3.1	Objeto de Investigación: Proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón, embalse de la captación Pilatón.	3
2.3.2	Campo de Acción: 3305.15 Ingeniería Hidráulica.	3
2.4	BENEFICIARIOS	4
2.4.1	Directo	4
2.4.2	Indirectos	4
2.5	Justificación	4
2.6	OBJETIVOS.....	5
3	METODOS Y FUNDAMENTACION TEORICA.....	6
3.1	Antecedentes.....	6
3.2	Conceptos y definiciones.....	7
3.2.1	Hidráulica	7
3.2.2	Modelación Numérica	8
3.2.3	Regímenes de flujo	12
3.2.4	Modelo unidimensional	13
3.2.5	Modelo Bidimensional	14
3.2.6	Condiciones de contorno	14
3.3	Introducción a la modelación numérica para el transporte de sedimentos.....	15
3.3.1	Modelos de turbulencia	16

3.4	Transporte de sedimentos en suspensión.....	17
3.5	transporte de sedimentos de fondo	19
3.6	Software de Modelación.....	20
3.6.1	HEC-RAS	20
3.6.2	Iber.....	21
3.7	Ecuaciones transporte utilizados en softwares de simulación bidimensional.	21
3.7.1	Ecuación de Saint Venant.....	21
3.7.2	Ecuación de Navier-Stokes.....	22
3.7.3	Ecuación de Meyer Petter and Müller	22
3.7.4	Ecuación Ackers-White.....	23
3.7.5	Ecuación Engelund-Hansen.....	23
3.7.6	Ecuación Van Rijn.....	24
3.7.7	Modelo parabólico.....	25
3.7.8	Modelo de longitud de mezcla.....	25
3.7.9	Modelo k-e de Rastogi y Rodi.....	25
4	METODOS Y PROCEDIMIENTO	26
4.1	METODOLOGIA.....	26
4.2	zona de estudio.	28
4.3	Revisión de datos preliminares.....	29
4.4	Morfología del sitio de captación.	30
4.5	Concepción General del sitio de Captación.....	31
4.6	Información de Caudales	32
4.6.1	Caudales líquidos.....	32
4.6.2	Caudales sólidos	32
4.7	Métodos para la construcción del modelo numerico.....	34

4.7.1	Ecuaciones Hidrodinámicas	34
4.7.2	Fricción de fondo.....	36
4.7.3	Modelos de turbulencia	37
4.7.4	Viscosidad turbulenta constante.....	38
4.8	transporte de sedimentos.	39
4.8.1	Ajuste de la curva caudal vs sedimentos.	39
4.9	Modelación digital del terreno.....	40
4.9.1	Mallado.....	41
4.9.2	Software de ingeniería.....	41
4.10	Condiciones de Contornos.....	41
4.10.1	Condiciones iniciales del modelo numérico.....	41
4.10.2	Condiciones de contorno.....	42
4.10.3	Condiciones de contorno transporte de sedimentos.....	43
4.11	Calculo.....	43
4.11.1	Parámetros de tiempo.....	43
4.11.2	Configuración del modelo en HEC-RAS	45
4.11.3	Configuración del Modelo En Iber.....	46
4.12	Plan de simulaciones	46
4.12.1	Escenarios de simulación.....	48
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
5.	Resultados.....	51
5.1.1	Información Existente.....	51
5.1.2	Caudales Líquidos	52
5.1.3	Granulometría y sedimentología	56
5.1.4	Modelación digital del terreno.....	64

5.1.5	Parámetros de contornos.....	71
5.1.6	Escenario 1 periodo de retorno de 25 años caudal 330m ³ /s	81
5.1.7	Escenario 2 periodo de retorno de 500 años caudal 480m ³ /s.....	82
5.1.8	Escenarios de sedimentación Iber.....	83
5.1.9	Escenarios de sedimentación HEC-RAS.....	83
6.1	Analisis	84
6.1.1	Efectos de la Captación en el Transporte de Sedimentos.....	85
6.1.2	Cambios en la Velocidad y la Tensión de Fondo	85
6.1.3	Patrones de Flujo y Zonas de Recirculación	86
6.1.4	Comportamiento bajo Caudales Medios y Máximos	86
6.1.5	Validación de Resultados y Limitaciones del Modelo	87
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
7	REFERENCIAS	89

Índice de Figuras

Figura 1:Esquema del movimiento de partículas.	9
Figura 2 Clasificación de del flujo en canales abiertos según Ven Te Chow.	13
Figura 3 Esquema Metodológico.....	27
Figura 4: Delimitación de cuenca del Rio Pilatón, elaboración propia en Software GIS	29
Figura 5 Ubicación esquemática del Proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón.	31
Figura 6 creación de curva de caudal respecto al sedimento de transporte.....	40
Figura 7 Condiciones de contorno de la obra.....	42
Figura 8 información de cálculo desarrollado en software Iber.	45
Figura 9 Diagrama Metodología HEC-RAS	45
Figura 10 Diagrama de metodología Iber.....	46
Figura 11: Diagrama del plan de simulaciones.	47
Figura 12: Captación Pilatón vista en planta.	51
Figura 13: Hidrograma de caudales medios años 2001 a 2013	53
Figura 14: Hidrograma de caudales máximos años 2001-2013	54
Figura 15. histogramas de caudales de crecidas periodo de retorno hasta 1000 años.....	55
Figura 16 Hidrograma de caudales en simulación para Iber y HEC-RAS.....	55
Figura 17, Informe granulometría de fondo de la muestra 1.....	57
Figura 18: Informe de granulometría de solidos suspendidos de la muestra 1.....	58
Figura 19 granulometría sedimento de fondo, en base a la tabla 4	60
Figura 20: Recolección de sedimentos por tamizaje en el rio Pilatón, estación ESPERIE.....	61
Figura 21:La figura (a) se puede visualizar el montaje del muestreador en la tarabita de la estación ESPERIE, en la figura (b) se puede ver la forma de recolección de muestras en el rio Pilatón. ..	62
Figura 22: Histograma de solidos en suspensión	63
Figura 23:esquema general del área de trabajo vista en superficie.	64
Figura 24: Modelación 3D del área de trabajo.	65
Figura 25: Archivo TIN de superficie de trabajo.	66
Figura 26: DEM creado en el software GIS escala 1:5000	66
Figura 27: Ortofoto creada en el software GIS escala 1:5000.....	66
Figura 28 y 29 Mallado del punto de captación, el mallado en Iber a la izquierda y a la derecha ras-mapper.	67

Figura 29 perfil en corte del rio Pilatón en la estación la Esperie.....	68
Figura 30 Creación de superficie estación Esperie software Hec-Ras	68
Figura 31 Creación de superficie estación Esperie software Iber	69
Figura 32 Ubicación de puntos de control en el tramo de aproximación.....	70
Figura 33: Vista del perfil longitudinal, realizado en HEC-RAS.....	70
Figura 34 Perfil longitudinal del del embalse.....	71
Figura 35 evolución del Calado en el tramo del embalse.....	72
Figura 36 Distribución de las concentraciones de sedimentos en la sección próximas a la captación.	73
Figura 37 velocidades presentes en la modelación.....	75
Figura 38 tensiones de fondo en el embalse	76
Figura 39 perfil de ingreso al embalse.	76
Figura 40 Perfil de salida en el embalse.....	77
Figura 41 Perfiles de socavación en el tramo de aproximación al embalse.	78
Figura 42 Sección 1 de socavación para los distintos caudales.....	78
Figura 43 Sección 2 de socavación para los distintos caudales.....	79
Figura 44 Sección 3 de socavación para los distintos caudales.....	80
Figura 45 socavación Hec-Ras para el caudal 330m ³ /s	81
Figura 46 socavación Iber para el caudal 330m ³ /s.....	81
Figura 47 socavación Hec-Ras para el caudal 480m ³ /s	82
Figura 48 socavación Iber para el caudal 480m ³ /s.....	82
Figura 49 Concentración de sedimentos en el tramo de aproximación al embalse.....	84

Índice de Tablas.

Tabla 1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [2].....	1
Tabla 2 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO	4
Tabla 3 Equivalencia de mallas y aberturas	11
Tabla 4 Factores de ajuste de Cowan	37
Tabla 5 Tabla ajustada relación de caudal y concentración de sedimentos.....	43
Tabla 6 Plan de simulaciones para el proyecto de investigación.	48
Tabla 7 Escenario para la primera simulación.....	49
Tabla 8 Escenario para segunda simulación.....	49
Tabla 9 Escenario para la tercera simulación.	50
Tabla 10 Tiempos de retorno y Caudal de crecida establecida por Lombardi	52
Tabla 11 Recopilación de caudales medio de anuarios del INAMHI 2001-2013	53
Tabla 12 Caudal máximo anuarios del INAMHI 2001-2013	54
Tabla 13 Cálculo de porcentajes solidos de fondo muestra 1. Fuente: HIDROTOAPI	59
Tabla 14 Coordenadas de ubicación del punto de muestreo.	60
Tabla 15 Granulometría partículas en suspensión.....	63

1 INFORMACIÓN GENERAL

1.1 INFORMACION GENERAL

Tema del proyecto: Modelación numérica bidimensional del transporte de sedimentos en el tramo de aproximación a la captación Pilatón, proyecto hidroeléctrico Toachi Pilatón.

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Hidráulica.

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto: No aplica

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación: Steven Joshué Túquerres Panamá., Msc. Yadira Araceli Herrera Martínez y Msc. Edwin Patricio Casa Tipán.

Área de Conocimiento:

33. Ciencias tecnológicas	3305. Tecnología de la Construcción	3305.06 Ingeniería Civil
		3305.07 Presas
		3305.15 Ingeniería Hidráulica
		3308.09 Ingeniería Sanitaria

Tabla 1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [2].

Línea de investigación: Meteorología, hidrología, mecánica de fluidos, sistemas y obras hidráulicas.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Modelación experimental y Simulación Computacional de fluidos.

2 INTRODUCCIÓN

La problemática de los sedimentos, es poco conocida por la población global y también por los tomadores de decisiones. [1] En la actualidad la colmatación de embalses es un problema ambiental de primer orden, en particular en países como Ecuador donde la erosión potencial (y real) afecta con intensidad a un buen número de ríos regulados. [2] Comprender el comportamiento hidrodinámico de un río durante una crecida es esencial para identificar soluciones a los desafíos de la hidráulica fluvial. [3] Es importante tener en cuenta que la sedimentación en embalses puede reducir significativamente la vida útil de los mismos ya que esta depende de la cantidad de sedimentos que se retienen (volumen muerto). [4] La construcción de un embalse produce una modificación en las propiedades del escurrimiento de un cauce se reduce la capacidad de transporte del escurrimiento y aumenta la deposición de sedimentos en el fondo del embalse. [5]

Para este propósito, se pueden desarrollar tanto modelos físicos a escala como modelos numéricos, los cuales permiten analizar, predecir y controlar los procesos físicos que ocurren en el río. Además, estos modelos son fundamentales para estudiar el transporte de sedimentos y los procesos de erosión. A través de simulaciones, es posible anticipar el desempeño de las estructuras hidráulicas bajo diversas condiciones de diseño, operación y emergencia. Los resultados obtenidos no solo validarán e identificarán los parámetros de diseño de la obra, sino que también determinarán la necesidad de obras complementarias para garantizar su funcionamiento adecuado y la protección de las áreas contiguas [3].

La selección de un modelo numérico depende del caso de estudio específico y del nivel de precisión requerido. Aunque los modelos tridimensionales son actualmente aplicables para calcular el flujo en estructuras hidráulicas, su uso se ve limitado por el alto costo computacional, especialmente considerando la vasta extensión del dominio y la complejidad de las geometrías involucradas en la hidráulica fluvial. [6]. Existen varios modelos o prototipos para simular flujos de ríos, siendo los bidimensionales los que tienen más exactitud, por encima de los unidimensionales o los tridimensionales, debido que son más robustos y usan menor tiempo para su cómputo y datos para su calibración. [7] Empleando modelos de erosión y deposición que tienen en cuenta la interacción entre la corriente y los depósitos de sedimentos. [8] Estas ecuaciones bidimensionales son

derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes permiten representar el comportamiento del flujo a escalas de tramo de río. [9]

La generación de sedimentos y el transporte de estos en cuencas, no siempre ha sido un fenómeno que se ha contemplado en proyectos de obras hidráulicas, lo cual da como resultado diseños no adecuados en relación con los efectos de los procesos de sedimentación en embalses, en especial en cuencas que presentan altas tasas de erosión del material de fondo del lecho. [10]

este último como principal objetivo del aprovechamiento alrededor del mundo.

2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En la época de invierno existe una excesiva cantidad de sedimentos que llega al embalse Pilatón, lo que provoca paradas de la Central Sarapullo y dragados del embalse con elementos mecánicos por los menos unas dos veces en la época invernal, esta situación genera una pérdida en la producción de energía.

Por tal razón, se requiere determinar la cantidad de sedimento que llega al embalse Pilatón para los diferentes caudales de operación de la Central Sarapullo. En este estudio se propone determinar las características hidrodinámicas del flujo más sedimento en el tramo de aproximación al embalse de la captación Pilatón

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Analizar a través de un modelo bidimensional hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos en el embalse de la captación Pilatón.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de Investigación: Proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón, embalse de la captación Pilatón.

2.3.2 Campo de Acción: 3305.15 Ingeniería Hidráulica.

3305 tecnología de la Construcción	
3305.06	Ingeniería Civil
3305.07	Presas
3305.15	Ingeniería Hidráulica

Tabla 2 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directo

Directivos y técnicos del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón de la provincia de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi que podrán contar con información proporcionada por la investigación para mejorar la eficiencia de la central Sarapullo y Central Alluriquín de esta manera reducir los costos de operación y mantenimiento.

2.4.2 Indirectos

Gobierno del Ecuador: La investigación aportará información valiosa para la planificación y desarrollo de futuros proyectos hidroeléctricos en el país.

Comunidad local: La investigación permitirá conocer la cantidad de sedimentos que se descarga hacia aguas abajo cuando se realizan las operaciones de limpieza del embalse.

La investigación contribuirá al avance del conocimiento en el área de ingeniería hidráulica y ambiental.

2.5 JUSTIFICACIÓN

El transporte de sedimentos en ríos y zonas de captación de aguas es un tema que, aunque puede parecer técnico, tiene un impacto directo en la vida de las personas y en la sostenibilidad de proyectos como los es el Proyecto hidroeléctrico Toachi- Pilatón, las partículas de arena, grava y arcilla que arrastran los ríos, sea cumulan en las estructuras de captación de agua. Con el tiempo,

esto puede causar obstrucciones, reducir la eficiencia del proyecto y aumentar los costos de mantenimiento. Es importante entender como se mueven y depositan estos sedimentos, ya que al acumularse en zonas clave, pueden obstruir las estructuras de captación, reducir la capacidad de generación de energía y aumentar los costos de mantenimiento, además, la dinámica sedimentaria en este tramo influye directamente en la operación y vida útil del proyecto lo que hace indispensable su estudio detallado. Una modelación numérica bidimensional permite comprender con mayor precisión los patrones de flujo y de transporte de sedimentos en el tramo de aproximación, los que es esencial para identificar zonas críticas de erosión y deposición, nos facilita la evaluación de escenarios futuros bajo diferentes condiciones hidrológicas, lo que puede ayudar a prever problemas y diseñar medidas preventivas, un modelo bidimensional proporciona información valiosa para optimizar el diseño y la operación de la captación Pilatón, reduciendo costos operacionales y prolongando la vida útil de la infraestructura. A través de la implementación de un modelo numérico bidimensional que simule el flujo y el transporte de sedimentos en el tramo de aproximación. Este modelo se basará en datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos de la zona, y permitirá analizar variables clave como la velocidad del flujo, concentración de sedimentos y los patrones de erosión y deposición. Utilizando herramientas computacionales como lo es Iber y HEC-RAS, se podrán generar simulaciones que representen diferentes escenarios, desde condiciones normales hasta eventos extremos como crecidas o sequias, con esta información implementar sistemas de retención de sedimentos o la optimización de los protocolos de mantenimiento.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 General

Analizar el transporte de sedimentos en el tramo de aproximación al embalse Pilatón usando el paquete computacional HEC-RAS e Iber.

2.6.2 Específicos

1. Revisar la información técnica disponible y entregada por la Unidad de Negocio HIDROTOAPI.
2. Determinar las condiciones de contorno y los parámetros iniciales del modelo numérico.

3. Comparar resultados obtenidos del transporte de sedimentos obtenidos en el programa HEC-RAS e Iber.
4. Establecer alternativas de operación del embalse Pilatón con base en los resultados obtenidos.

3 METODOS Y FUNDAMENTACION TEORICA

3.1 ANTECEDENTES

Es de interés e importancia el estudio y la modelación numérica del transporte de sedimentos hacia aproximaciones de obras hidráulicas, debido a que el transporte de sedimentos puede afectar la operación de dichas obras hidráulicas. Por esta razón Software como HEC-RAS e Iber permiten simular y analizar procesos, proporcionando información de sumo interés para su gestión eficiente.

HEC-RAS e Iber se especializan en modelación numérica bidimensional, permitiendo una representación más detallada de los flujos complejos.

Según el estudio “Modelamiento Bidimensional hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a través del río Calabí y obras hidráulicas” se realizó modelación numérica para validar e identificar parámetros enfocándose en el análisis hidrodinámico y capacidad de transporte de sedimentos del río Calabí, con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo, los efectos que ocasiona en la fluviomorfología del río, la implantación de una obra hidráulica. Por esto se han utilizado modelos hidrodinámicos, modelos de transporte y modelos de turbulencia, junto a ecuaciones bidimensionales de Saint – Venant, la ecuación de Exner de continuidad de sedimentos, ecuación de Meyer – Peter & Müller para arrastre de fondo. Verificando las condiciones y el funcionamiento de la obra con relación a la presencia de problemáticas donde el modelo numérico aplicado ha sido IBER. [3]

Según el trabajo “Modelación numérica bidimensional de la dinámica sedimentaria del río Ebro en Castejón”, consiste en la construcción y calibración de un modelo numérico para la simulación de la dinámica sedimentaria del tramo del río Ebro, en el mismo se ha analizado mediante el modelo Iber la dinámica sedimentaria del tramo del río con datos recolectados de batimetrías. Al incorporar la geometría del cauce se simularon caudales circulantes de un período comprendido entre la realización de las batimetrías para así calibrar los parámetros del modelo. De esta manera se obtuvo

una herramienta útil para poder describir el comportamiento de otros tramos en la misma extensión del río. [11]

En el estudio “Caracterización y modelación del transporte de sedimentos en la cuenca alta del Río Bogotá tramo – Chingacio – Puente Santander”, se presentaron variables a utilizar en la sección del río estudiado realizando un análisis espacial con características de interés para un tiempo específico, generando imágenes que muestran el cambio de morfología del lecho de una sección transversal en diferentes momentos de tiempo. Este análisis espacial se realizó en base características hidráulicas de interés basándose en momentos para escoger el caudal presentando series de máximos, mínimos y promedios en base al caudal, del mismo modo, se evaluaron zonas del río donde ocurre una degradación o agravación para un cambio del lecho donde se encontró que en la entrada de una sección genera un aumento de la capacidad de transporte de sedimentos reflejando un déficit de carga pero calculado de duración corta, una vez la capacidad de transporte retorna a su valor original se presenta un exceso de sedimentos y esto genera deposición y agravación del lecho. [12]

3.2 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

3.2.1 Hidráulica

La hidráulica es una ciencia que trata las leyes de equilibrio y movimiento de los líquidos y la aplicación de ciertas leyes a la solución de problemas prácticos. [13] Así mismo se considera una rama de la física que se encarga del estudio de los líquidos en movimiento y en reposo. [14]. Así mismo, es conocido que la hidráulica se produce por la circulación de un fluido en una sección donde se permita calcular una cantidad de líquido denominado caudal (Q), una fuerza que lo impulse llamada presión (P) y, una sección definida sea regular o irregular. [15]. Dentro de la hidráulica podemos encontrar varios conceptos importantes como es el transporte de sedimentos en ríos donde existen criterios para clasificar el transporte de sedimentos: según el modo de transporte y según el origen del material transportado, de esta manera, el material puede ser transportado manteniéndose entre la masa del flujo debido a fenómenos producidos por turbulencia, por el fondo arrastrando el sedimento.

En un río siempre se presentan ambos tipos de transporte las cuales dependen de condiciones orográficas, geológicas, climatológicas o forestales de la cuenca. [16]

3.2.2 Modelación Numérica

Se considera una representación numérica de un río u otra vía fluvial que tiene como finalidad el análisis de la conducta hídrica de un sistema, donde dicha representación permite reproducir, estudiar y prever el comportamiento generado en una red de distribución, y se logren realizar pruebas, toma de decisiones y la generación de soluciones. [17]. Así mismo, un modelo numérico ofrece un camino para avanzar en el entendimiento hidráulico otorgando un carácter exploratorio y el acompañamiento para la creación de modelos conceptuales que proporcionen una estructura que logre sistematizar información de campo, responder preguntas e identificar áreas que requieran información adicional. [18]

3.2.2.1 Modelo del terreno

Un componente esencial en cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (MDT). Estos modelos son fundamentales para una amplia gama de aplicaciones en ciencias de la Tierra, medioambientales e ingenierías diversas. El término MDT se refiere a un conjunto de capas (usualmente en formato raster) que representan diferentes características de la superficie terrestre, derivadas de una capa de elevaciones conocida como Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Aunque algunas definiciones incluyen casi cualquier variable cuantitativa regionalizada dentro de los MDT, aquí se prefiere restringir el término a las capas derivadas del MDE [19].

3.2.2.2 Caudales Líquidos

El volumen de agua que fluye a través de la sección transversal de un curso de agua por unidad de tiempo se mide en caudales, los cuales se expresan en metros cúbicos por segundo (m^3/s) con tres cifras SIGNificativas (por ejemplo: 1,92 m^3/s , 19,2 m^3/s , 192 m^3/s) o en litros por segundo (l/s) para cursos de agua más pequeños. El banco nacional HYDRO recopila datos de altura del agua provenientes de 3.500 estaciones de medición, de las cuales 2.400 están en operación, permitiendo calcular caudales instantáneos, diarios y mensuales para un gran número de ríos en Francia. El caudal líquido y el caudal sólido representan las dos variables fundamentales de la dinámica fluvial [20].

3.2.2.3 Caudales Sólidos

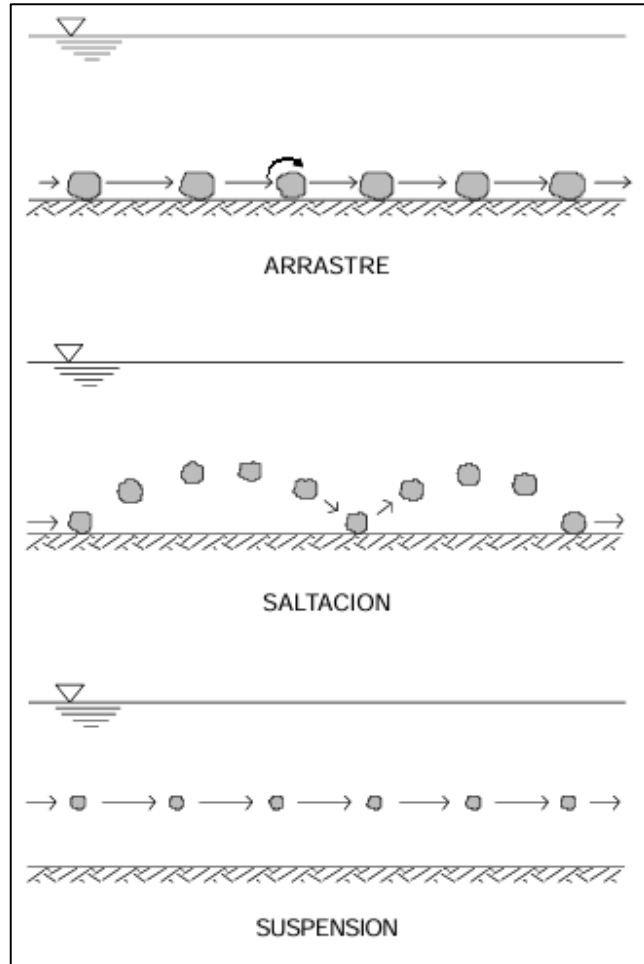


Figura 1: Esquema del movimiento de partículas.

El caudal sólido se refiere a la cantidad de materiales sólidos que atraviesan una sección determinada de un curso de agua por unidad de tiempo. Este caudal abarca tanto las sustancias disueltas como las suspendidas y los materiales que se encuentran en el fondo. Estos elementos se mueven a lo largo del lecho del río mediante distintos procesos de transporte, como el corrimiento, la suspensión o la saltación. Tanto el caudal sólido como el caudal líquido son variables esenciales en la dinámica de los sistemas fluviales [21].

3.2.2.4 Propiedades Física de los sólidos

Las principales propiedades físicas de las partículas sólidas que más nos interesan son: Tamaño y Forma, Composición Mineralógica, Peso Específico y Velocidad de Caída. Estas propiedades se

refieren a las partículas individuales y no al conjunto de ellas, como sería el caso de la porosidad o el peso específico aparente.

3.2.2.5 Tamaño y forma

El tamaño de los cantos rodados y guijarros se puede medir directamente. El de las gravas y arenas se mide mediante mallas, y el de limos y arcillas se determina por medio de sedimentación o con microscopio. Como en la tabla 3

Al realizar un análisis granulométrico por tamizado se obtiene la llamada curva de distribución granulométrica de la muestra

En el estudio del transporte de sólidos existen diferentes criterios para tomar o elegir un diámetro representativo de la muestra. Así, por ejemplo, es común tomar el diámetro que corresponde al 50% del porcentaje acumulado, denominándosele como d_{50} ; EINSTEIN, por ejemplo, toma el d_{65} y MEYER-PETER utiliza el llamado diámetro efectivo, que lo define como:

$$d_m = \sum \frac{d_i \Delta p}{100} \quad (3.1)$$

Donde:

Δp : Intervalo que se toma sobre el eje vertical de porcentajes.

d_i : Diámetro medio correspondiente al intervalo.

Malla	Abertura de Tamiz
N*	(mm)
3/8	9.53
4	4.75
10	2
16	1.18
30	0.5
40	0.43
45	0.36
60	0.25
70	0.21
100	0.15
140	0.11

170	0.09
200	0.08
230	0.06
270	0.05
325	0.05
400	0.04

Tabla 3 Equivalencia de mallas y aberturas

3.2.2.6 Peso Especifico

Se denomina Peso Específico Relativo γ_s / γ a la relación entre el peso específico de los sedimentos y el peso específico del agua.

Se denomina Peso Específico del material sólido sumergido a la expresión $\gamma_s - \gamma$. Se denomina Peso Específico Relativo del material sólido sumergido a la relación:

$$\Delta = (\gamma_s - \gamma) / \gamma \quad (3.2)$$

El Peso Específico del agua cargada de sedimentos es:

$$\gamma_{mezcla} = \frac{\gamma \gamma_s}{\gamma_s - C(\gamma_s - \gamma)} \quad (3.3)$$

Donde:

C: es la concentración en peso, en forma de fracción de material sólido en suspensión.

3.2.2.7 Velocidad de caída

Se denomina velocidad de caída a la velocidad con la que cae una partícula sólida (sedimento) en una masa fluida ilimitada y en reposo. La velocidad de caída es un parámetro descriptivo de primera importancia en el estudio de la interacción flujo-sedimento.

En principio, la velocidad de caída w_t varía con el tiempo. Al iniciarse la caída de una partícula su movimiento es acelerado. Si se tiene una partícula de una determinada forma cayendo en un fluido, su velocidad dependerá tanto de propiedades del fluido como de propiedades de la partícula, así como de la aceleración de la gravedad g .

$$w_t = \varphi(p, \mu, p_s, d, \gamma_s, t) \quad (3.4)$$

Donde:

μ : viscosidad

p : Densidad del fluido.

p_s : Densidad de la partícula.

d : Diámetro de la partícula.

3.2.3 Regímenes de flujo

Entendemos un régimen de flujo cuando un fluido se encuentra presente en el interior de una tubería, presenta comportamientos y propiedades que relacionan un tipo de régimen: laminar, turbulento o transición. Estas características tienen que ver según la cantidad de energía que pierde según el material de la sección por la cual se transporta un fluido. Es así como, la importancia del entendimiento y determinación de un número de Reynolds que permitan predecir ciertas características y comportamientos de un fluido. [22]

3.2.3.1 Flujo Permanente

Se dice que un flujo es permanente cuando en una sección del canal permanecen constantes con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc.), se asume que la velocidad en un punto cualquiera permanece constante al transcurrir el tiempo, la velocidad de las partículas fluidas al pasar por un punto dado es siempre la misma. La condición de este régimen también denominado estacionario presenta que la velocidad de las partículas fluidas está solo en función de coordenadas espaciales y no del tiempo. [23]

3.2.3.2 Flujo no Permanente

El llamado también flujo no estacionario presenta propiedades y características de un fluido las cuales serán distintas de un punto a otro dentro de un campo, estas características varían de un instante a otro esto produce la no permanencia del flujo, es decir, donde un parámetro se puede analizar si el flujo puede ser permanente o no, de acuerdo al observador. En canales abiertos es

importante estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes, sin embargo, se debe considerar el cambio de condición del flujo con respecto al tiempo. [24]

3.2.3.3 Flujo Uniforme

Se presenta cuando la velocidad media permanece constante en cualquier sección de un canal. Con una superficie libre, implica que la sección transversal y el tirante del mismo presenten condiciones constantes. El hecho que la velocidad media permanezca constante, se refiere al hecho que el flujo posea una velocidad constante en cada punto de la sección y a lo largo de un canal donde la distribución de velocidades no se ve alterada. [25]

3.2.3.4 Flujo no uniforme

También denominado como flujo variado se produce cuando la velocidad media tiene variaciones en las secciones de un canal, presentando características opuestas al flujo uniforme debido a los cambios que puede presentar como una variación de pendiente o por una estructura hidráulica tal como un vertedor o una compuerta interpuesta en la línea de flujo. Debido a esto, no se logra un estado ideal del flujo, aunque se presentan excepciones en canales rectores y largos donde se alcanza un flujo casi uniforme. [25].

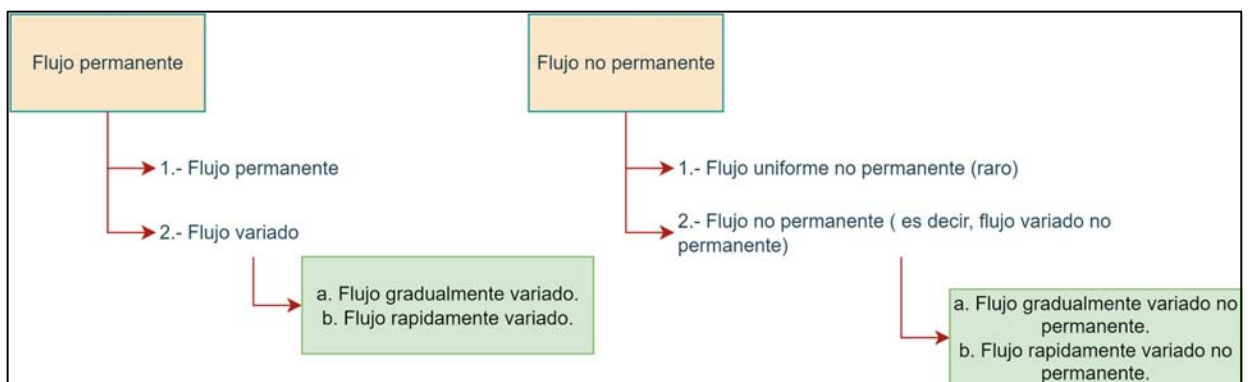


Figura 2 Clasificación de del flujo en canales abiertos según Ven Te Chow.

3.2.4 Modelo unidimensional

Los modelos unidimensionales aplicados en un cauce se consideran como una línea con una serie de secciones transversales donde se interpolan entre sí. [26], del mismo modo, permiten analizar el

comportamiento de un flujo de agua en un canal, río o sistema de drenaje a lo largo de una sección, por lo general se analiza a lo largo de la dirección del flujo. [27]. Este modelo se basa en la resolución de ecuaciones completas de Saint – Venant en una dimensión, donde se deducen a partir de las ecuaciones de Reynolds y a su vez de las ecuaciones de Navier – Stokes considerando variables medias en el tiempo. [28]

3.2.5 Modelo Bidimensional

Los modelos bidimensionales trabajan en base a una malla que representa la topografía del área de estudio [26]. Consideran variaciones existentes en las dimensiones del plano horizontal, donde las variaciones de velocidad u otra magnitud en el plano vertical del agua se obtienen mediante un promedio y se asumen como valor único, estos modelos resultan útiles en flujos de gran extensión como estuarios y lagos donde la variación vertical de velocidad es pequeña. Estos modelos no son aplicables en casos donde la variación vertical de velocidad es apreciable, por ejemplo, [29] el flujo sobre un vertedero.

3.2.6 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definen los parámetros que regulan el comportamiento de un modelo en sus límites. En una simulación o modelación hidráulica de un tramo fluvial, estas condiciones se aplican en dos puntos cruciales: el límite superior y el límite inferior del modelo. No obstante, en el campo de la hidráulica, es habitual emplear terminología relacionada con el agua, por lo que estos límites se conocen comúnmente como condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo [30].

3.2.6.1 Nivel de agua, Calado Crítico, Curva de Caudal y Calado Normal

Al tratar con modelizaciones en régimen permanente, es fundamental definir una de las cuatro posibles condiciones de contorno: nivel de agua, calado crítico, calado normal y curva de caudal. A continuación, se ofrece una guía sobre la aplicación de cada una [30]:

- **Nivel de agua:** Se emplea cuando se dispone de datos específicos sobre el calado en una sección, habitualmente proporcionados por un limnómetro. Es crucial ingresar el nivel, es decir, la elevación sobre el nivel del mar, y no el calado.

- **Calado crítico:** Esta condición se establece cuando la sección incluye un elemento de control de calado o caudal basado en el calado crítico, como vertederos, aforadores, presas o azudes. La ventaja es que el programa calcula automáticamente el calado crítico en la sección, sin necesidad de datos adicionales.
- **Curva de caudal:** Se utiliza cuando se tiene acceso a la curva de caudal de la sección, que relaciona el calado con el caudal. Es la opción indicada cuando se cuenta con datos de un aforador.
- **Calado normal:** En todos los demás casos, se debe optar por el calado normal como condición de contorno. Es la elección más común, ya que representa escenarios en los que el flujo es cercano al uniforme. Se debe ingresar la pendiente del tramo de influencia, expresada en términos de tanto por uno.

Respecto al "tramo de influencia," este término no se refiere a la pendiente del tramo de río en estudio, sino a la pendiente entre las dos secciones consecutivas más próximas. Por ejemplo, para la condición de contorno aguas abajo, se debe considerar la pendiente entre la sección más aguas abajo y su sección inmediatamente superior, aplicando el mismo principio para la condición de contorno aguas arriba.

3.3 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN NUMÉRICA PARA EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La modelación numérica para el transporte de sedimentos proporciona una visión general de cómo se utiliza la modelación numérica para estudiar y comprender el transporte de sedimentos en los ríos y otros cuerpos de agua, donde el cálculo de la pérdida de suelo a partir de la medida del movimiento de los sedimentos en las corrientes se mantiene con varias problemáticas al momento de realizar mediciones debido a esto se conoce que el movimiento de los sedimentos en corrientes y ríos presenta dos maneras.

Los sedimentos en suspensión se constituyen por partículas finas que se mantienen en suspensión por la corriente y, partículas de mayor tamaño son arrastradas a lo largo del lecho de la corriente y se conoce como arrastre de fondo. [31]

La modelación numérica puede tener numerosas ventajas, así como inconvenientes, pues esta está sujeta a limitaciones tales como la capacidad y rapidez de los computadores o estaciones de

cómputo, condiciones de contorno, la estabilidad y convergencia en la solución. Se pueden definir como ventajas de los modelos numéricos a: la posibilidad de análisis de varios escenarios, en tiempos relativamente cortos y a costos bajos, la consideración de problemas complejos con relativa simplicidad, a pesar de que el dominio no es continuo sino discreto, se tiene mayor detalle de los parámetros de flujo que en el caso de una simulación experimental en la que solo se realizan mediciones puntuales. Adicionalmente, la fuente de errores en el caso de las simulaciones numéricas es controlada, y a pesar de que no se puede eliminar, se puede reducir a valores despreciables, en contraste a los errores de las simulaciones experimentales que no son fácilmente detectables y menos aún factibles de eliminar (D. José María Carrillo Sánchez, 2014; Flow Science, 2014).

La aplicación de simulaciones numéricas como herramienta de soporte para la solución de problemas en ingeniería ha aumentado considerablemente en los últimos años debido al avance en las prestaciones de los sistemas computacionales

3.3.1 Modelos de turbulencia

La mayoría de los flujos a lámina libre presentan un régimen turbulento, caracterizado por la formación de remolinos que favorecen la mezcla y el transporte de sedimentos, así como de contaminantes. Para representar con precisión estos flujos, es indispensable incorporar los efectos de la turbulencia mediante modelos matemáticos adecuados. [3]

Aunque la turbulencia está presente en prácticamente todos los cauces naturales, su intensidad varía según las características del entorno. En ríos con geometrías uniformes y pendientes moderadas, la turbulencia puede ser menos intensa, con un impacto limitado en el campo de velocidades. No obstante, incluso en estas condiciones, la turbulencia es fundamental en los procesos de transporte de sedimentos y en la dinámica del flujo. [3]

Existen diferentes enfoques para modelar la turbulencia:

- **Simulación Numérica Directa (DNS):** Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sin simplificaciones, pero es computacionalmente muy costosa y se limita a casos simples. [32]

- **Simulación de Grandes Eddy (LES):** Resuelve las grandes estructuras turbulentas y modela las escalas más pequeñas, ofreciendo un buen equilibrio entre precisión y costo computacional. [32]
- **Modelo de Promedio de Reynolds (RANS):** Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, lo que permite obtener ecuaciones cerradas para las variables medias del flujo. Es el enfoque más común en ingeniería debido a su menor costo computacional. [32]

3.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

Se conoce por sedimentos a las partículas procedentes de rocas o suelos no consolidados, estos son transportados por el agua o por el viento, después de cierto acarreo son depositados a lo largo del cauce de ríos, lagos, lagunas, en el mar y partes bajas de una cuenca.

Un parámetro muy utilizado en la práctica es la tasa de transporte de sedimento, la cual indica una cantidad de sedimentos que atraviesan un plano vertical de ancho unitario, de manera perpendicular a la dirección del flujo, por unidad de tiempo. Esta tasa se maneja y representa en toneladas por metro por día, también conocida como tasa de transporte másica, y también como tasa volumétrica de transporte. [33]

En este caso las partículas sedimentarias se dicen que están en suspensión y el modelo de transporte se denomina transporte en suspensión o carga suspendida. A la combinación de las partículas sedimentarias y el fluido se le suele conocer como la mezcla (mezcla de agua y sedimentos), que se caracteriza por una concentración volumétrica c y cuya densidad viene dada por

$$p = p_o + c (p_s - p_o) \quad (3.5)$$

Ecuación de transporte para la concentración volumétrica del material sedimentario.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (3.6)$$

Tomando en cuenta la ecuación y la conservación de la masa.

$$h \frac{\partial c}{\partial t} + hu \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (3.7)$$

Ecuación de carga en suspensión.

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} = 0 \quad (3.8)$$

Ecuación para intercambio de Sáciense los procesos de erosión del fondo y el depósito.

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} = \Phi_b \quad (3.9)$$

La Φ_b mide el flujo de erosión y el depósito y suele definirse como:

$$\Phi_b = F_e - F_d \quad (3.10)$$

Así, un sistema que tiene en cuenta el transporte por fondo y suspensión puede formularse como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = \frac{\Phi_b}{1 - \psi'} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = -gh \left(\frac{\partial b}{\partial x} + S_f \right) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} = \Phi_b \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{1}{1 - \psi} \frac{\partial q_b}{\partial x} = - \frac{\Phi_b}{1 - \psi} \quad (3.14)$$

Donde:

h : es la altura del agua.

u : es el promedio en la columna de agua de la velocidad horizontal.

c : es la concentración volumétrica promediada en la vertical.

b : es la altura del fondo de sedimento.

S_f : es el término de fricción.

q_b : es el flujo del transporte de fondo.

g : es la gravedad.

ψ : es porosidad.

F_e : flujo de erosión.

F_d : flujo de depósito.

3.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO

El transporte de fondo es el modo de transporte de sedimentos donde las partículas sedimentarias se deslizan, ruedan o viajan en una sucesión de pequeños saltos, denominado saltación, pero siempre cerca del fondo.

Este tipo de transporte usualmente se modela usando un sistema acoplado que contiene una componente hidrodinámica, que describe el comportamiento del fluido y una componente morfodinámica, que describe la evolución del fondo. A este tipo de sistema se le conoce como sistema tipo Exner para el transporte de sedimentos. La componente hidrodinámica se modela utilizando las ecuaciones de las aguas someras o ecuaciones de Saint-Vena

y la componente morfodinámica se modela a través de la ecuación de Exner. La cual sostiene que la variación temporal de un cierto volumen de la capa de sedimento se debe a la variación temporal de un cierto volumen de la capa de sedimentos se debe a la variación neta del transporte del sólido a través de las fronteras del volumen.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = -gh \left(\frac{\partial b}{\partial x} + s_f \right) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{1}{1-\psi} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (3.17)$$

Donde:

h : representa la altura del agua

u : promedio de la velocidad del fluido.

b : es la altura del fondo sedimentado.

g : es la aceleración de gravedad.

q_b : mide la tasa por unidad de tiempo del transporte por carga de fondo.

ψ : es la porosidad del fondo sedimentado.

3.6 SOFTWARE DE MODELACIÓN

3.6.1 HEC-RAS

HEC-RAS nos permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua, donde también podemos concluir en un modelo la existencia de obras hidráulicas como puentes, conducciones, presas, etc., por esto su objetivo se basa en realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas inundables. [34]

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 4 tipos de análisis en ríos:

- Modelización de flujo en régimen permanente
- Modelización de flujo en régimen no permanente
- Modelización del transporte de sedimentos
- Análisis de calidad de aguas.

Se compone de una serie de procedimientos, herramientas y utilidades diseñadas para procesar datos georreferenciados los cuales permiten realizar la preparación de datos geométricos con la posibilidad de importarlos hacia el software. Podemos recoger datos de la geometría del terreno incluyendo el cauce del río, secciones transversales, líneas de flujo, etc. [35]

HEC – RAS tiene capacidades para enrutar sedimentos y ajustar secciones de corte en respuesta a una dinámica de sedimentos, se puede acoplar para flujos inestables como para flujos casi inestables. Adicional a problemáticas de sedimentos. [36]

3.6.2 Iber

Iber es un modelo matemático bidimensional, que incluye un módulo hidrodinámico para la simulación de flujos de ríos, canales y cauces naturales, permitiendo así el cálculo de avenidas e inundaciones y la delimitación de zonas inundables. [37]

Este software está dividido internamente en módulos, denominándose módulo a cada una de las porciones del programa, que dotan al programa de diferentes funcionalidades y aplicaciones.

- Estabilidad de los sedimentos del lecho del río.
- Procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular.

El uso de un modelo bidimensional presenta grandes ventajas respecto al cálculo sea de régimen variable o régimen permanente ofreciendo una mayor estabilidad y convergencia, además son capaces de simular con un mayor ajuste todas las situaciones en que un flujo no es unidireccional. [38]

3.7 ECUACIONES TRANSPORTE UTILIZADOS EN SOFTWARES DE SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL.

3.7.1 Ecuación de Saint Venant

Las ecuaciones de Saint - Venant son un conjunto de ecuaciones diferenciales, que permiten modelar los cambios de un caudal y el nivel de un líquido en un espacio unidimensional y el tiempo de manera no permanente como en un canal a superficie libre.

Este conjunto de ecuaciones puede ser utilizado en múltiples requerimientos como la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca para luego ser trasladada por una corriente de agua como un río, también puede ser utilizada para transitar flujos de aguas someras como en los sistemas de irrigación a través de canales o ríos.

Dentro del desarrollo de estas ecuaciones se mantiene en cuenta ciertas suposiciones para el uso:

- El flujo es unidimensional e incomprensible, es decir, mantiene una densidad constante. El tirante hidráulico y la velocidad del flujo presenta variaciones sólo en la dirección del eje longitudinal del canal, así mismo, la velocidad es uniforme y la superficie libre es horizontal a través de cualquier sección perpendicular al eje.

- La resistencia puede ser calculada a partir de los modelos de flujo uniforme permanente.
- Las líneas de flujo no tienen curvatura pronunciada, Significa que el flujo varía gradualmente a lo largo del canal, de forma que las aceleraciones verticales se puedan mostrar como despreciables. [39]

3.7.2 Ecuación de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes se basan en aplicar los principios de conservación de masa, movimiento y energía a un fluido. El movimiento de un fluido se puede describir mediante las ecuaciones de Navier – Stokes, las cuales permiten determinar el movimiento futuro del fluido a partir de su estado inicial. Sin embargo, a pesar de los notables esfuerzos que se han realizado en esta dirección por más de un siglo, no se ha conseguido demostrar matemáticamente este determinismo, ni tampoco desmentirlo. [40] esta ecuación expresa matemáticamente la conservación del momento y la conservación de la masa para los fluidos Newtonianos.

Aplica los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido se obtiene la llamada de formulación integral de las ecuaciones, donde para llegar a su formulación diferencial, son sumamente importantes debido a que su resolución implica un conocimiento absoluto de cómo un fluido se comportará partiendo desde condiciones iniciales y uno de sus usos aplica en la exactitud de previsiones meteorológicas. Es necesario reconocer que el movimiento de un fluido se describe de manera tan caótica que las ecuaciones adquieren un grado alto de complejidad para su resolución donde solo puede resolverse mediante modelos numéricos o analíticos por medio de simplificaciones e idealizaciones del fluido [41].

3.7.3 Ecuación de Meyer Petter and Müller

Fue una de las ecuaciones inicialmente desarrolladas y es aún una de las más usadas. Es una relación de exceso de corte. Es estrictamente una ecuación de carga de fondo desarrollada con experimentos en canales de arena y grava en condiciones de lecho plano. La mayor parte de los datos se desarrollaron para substratos de grava relativamente uniformes. La ecuación es aplicada con mayor éxito en el rango de las gravas. Tiene a predecir por debajo el transporte de materiales más finos.

$$\phi = 8(\gamma * 0.047)^{\frac{3}{2}} \quad (3.18)$$

Donde:

ϕ y γ son parámetros de transporte y movilidad adimensionales respectivamente.

3.7.4 Ecuación Ackers-White

Es una función de carga total que se desarrolló con datos de canales, para gradaciones relativamente uniformes en el rango comprendido entre arena y grava fina. Las condiciones hidrodinámicas se seleccionaron para cubrir el rango de configuraciones del lecho incluyendo ondulaciones, dinas y lecho plano. El sedimento suspendido es función de la velocidad de corte mientras que la carga de fondo es una función del esfuerzo cortantes.

$$x = \frac{G_{gr} s d}{D \left(\frac{\mu_*}{V} \right)^n} \quad (3.19)$$

Donde:

s : gravedad específica de sedimento.

d : Tamaño de partícula medio.

D : Profundidad efectiva.

μ : Velocidad de corte (t)^{1/2}.

V : Velocidad media del canal.

n : Exponente de transición (según el tamaño del sedimento)

G_{gr} : Parámetro de transporte.

3.7.5 Ecuación Engelund-Hansen

Es una ecuación de transporte de carga total desarrollada con datos decanales. Se usaron tamaños de grano relativamente uniformes, entre 0.19mm y 0.93mm. Es una función relativamente simple, función de la velocidad del canal, corte del fondo, y el valor de (d50) del material. Su aplicación se restringe a sistemas de arena.

$$g_s = V^2 \left(\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} = V^2 (\tau^*)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \quad (3.20)$$

Donde

g_s : Transporte de sedimentos por unidad de ancho.

γ : Peso unitario del agua.

γ_s : Peso unitario de sedimento.

V: Velocidad promedio del canal.

τ_b : Esfuerzo cortante del lecho.

τ^* : Numero de escudos adimensional.

d_{50} : Tamaño de partícula medio.

3.7.6 Ecuación Van Rijn

La ecuación de Van Rijn para el transporte de sedimentos en el fondo se basa en el esfuerzo cortante que el flujo de agua ejerce sobre el lecho del río o canal, y se ajusta para incluir el diámetro medio del sedimento, la densidad del flujo, y otras variables hidrodinámicas.

$$q_b = AD_{50}^2 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right)^n \quad (3.21)$$

Donde:

q_b : Tasa de transporte de fondo (por unidad de ancho).

A: Coeficiente empírico.

D_{50} : Diámetro medio de las partículas de sedimento (m).

τ_b : Esfuerzo cortante del lecho (N/m²).

τ_{cr} : Esfuerzo cortante crítico, es decir, el mínimo esfuerzo requerido para iniciar el movimiento de las partículas de sedimento.

n : Exponente empírico (generalmente igual a 1.5).

3.7.7 Modelo parabólico

Este modelo asume que la viscosidad turbulenta sigue un perfil parabólico, cuya magnitud está determinada por el calado, la velocidad media del flujo y el coeficiente de Manning. Aunque esta aproximación simplifica el comportamiento real de la viscosidad turbulenta, cabe destacar que su distribución puede ser más compleja y depender de las condiciones específicas del flujo y las características del lecho. No obstante, este enfoque constituye una herramienta valiosa para analizar los efectos de la turbulencia en el flujo y el transporte de sedimentos.

3.7.8 Modelo de longitud de mezcla

En este estudio, se exploraron diferentes modelos para calcular la viscosidad turbulenta. Inicialmente, se evaluó el modelo de Prandtl, que establece una relación simple entre la viscosidad turbulenta y las escalas características del flujo. Sin embargo, este modelo presenta limitaciones significativas, ya que no considera los efectos de la convección y la disipación de la turbulencia.

3.7.9 Modelo k-ε de Rastogi y Rodi

El modelo k-ε se utiliza para simular el campo de turbulencia en el flujo y sus efectos sobre el transporte de sedimentos en el tramo de aproximación al embalse Pilatón. Esto incluye la evaluación de los patrones de sedimentación y erosión, así como su impacto en la operación de la captación. La implementación en los softwares **HEC-RAS** e **Iber** permite resolver las ecuaciones de flujo y transporte de manera acoplada, considerando las características específicas del sistema estudiado.

4 METODOS Y PROCEDIMIENTO

4.1 METODOLOGIA

La metodología a utilizar para este proyecto de investigación es Cuantitativa- Numérica o también conocido como método indirecto, ya que nos ayuda al entendimiento de distintos fenómenos físicos mediante algoritmos con los cuales es posible formular y solucionar problemas matemáticos usando operaciones aritméticas menos complejas [42].

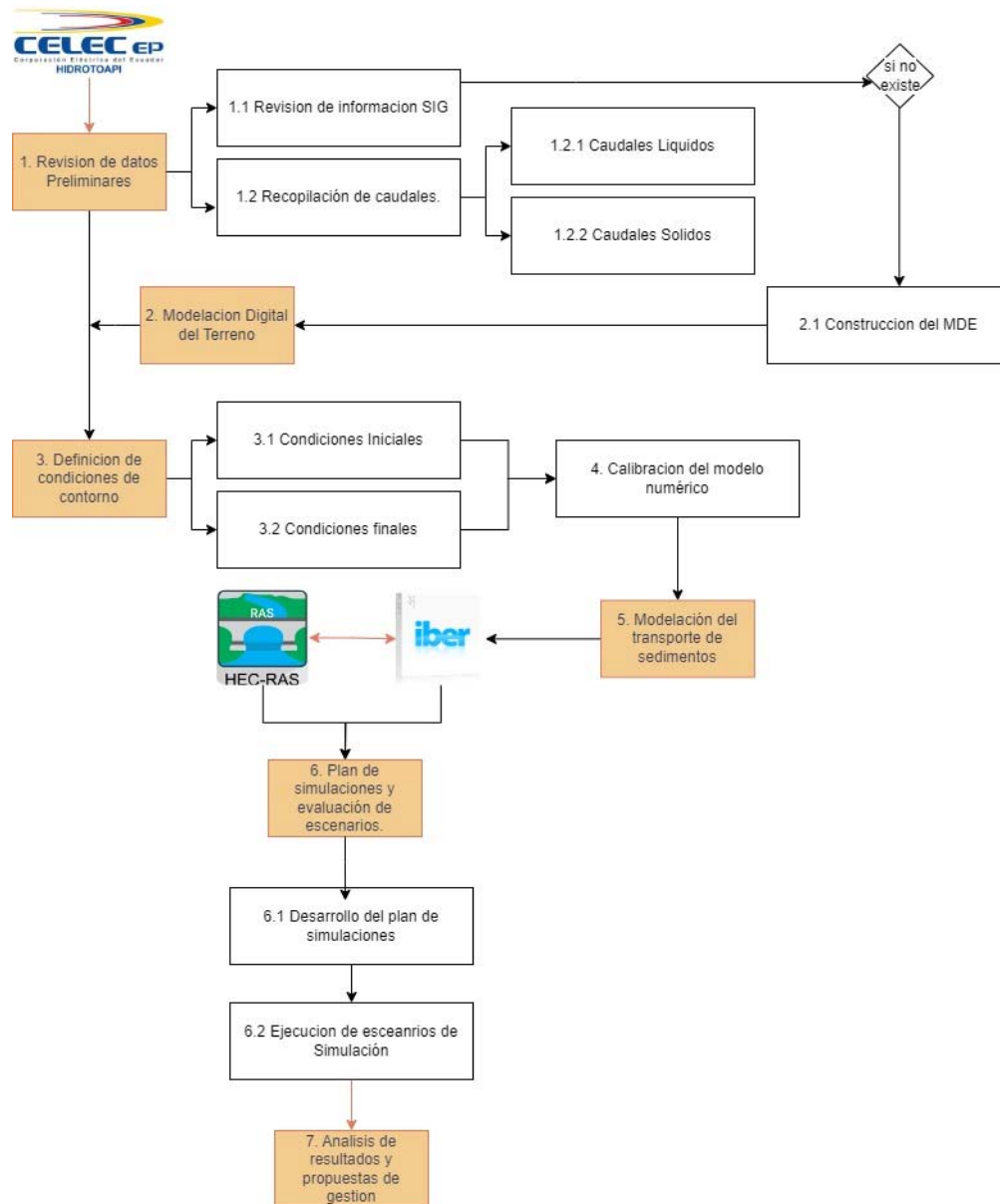


Figura 3 Esquema Metodológico

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se estableció la siguiente metodología:

Revisión de información y datos preliminares otorgados por la unidad de negocio HIDROTOAPI, recolección y análisis de datos geo espaciales relevantes utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Obtención de mapas topográficos, geológicos e hidrológicos de la cuenca del río Pilatón.

Recolección de información de caudales, en caudales líquidos una revisión de registros históricos de caudales proporcionados por estaciones locales, en caudales sólidos revisión de datos sobre el transporte de sedimentos, incluyendo concentraciones y volúmenes transportados.

Definición de condiciones de contorno en condiciones iniciales se establecen los niveles de agua, velocidad de flujo y concentraciones de sedimentos al inicio del periodo de simulación, en condiciones finales serán las esperadas del periodo de simulación.

Modelación del transporte de sedimentos se realizará a mediante el uso de los programas HEC-RAS e Iber para simular el flujo de agua y el transporte de sedimentos en dos dimensiones, para la configuración del modelo numérico se ingresarán los parámetros iniciales ya establecidos y condiciones de contorno en los programas seleccionados realizar simulaciones preliminares para ajustar y calibrar el modelo.

Para ajustar el modelo con los parámetros físico se implementará y se hará uso de la ecuación de transporte de fondo y la ecuación de transporte en suspensión en el modelo. En los tipos de simulación se realizarán simulaciones bajo diferentes condiciones de flujo, incluyendo escenarios de flujo constante y variable.

Plan de simulaciones y evaluación de escenarios: Se diseñará un plan detallado que incluya diversos escenarios para evaluar el comportamiento del transporte de sedimentos. Llegando a ejecutar la simulación para diferentes escenarios de caudal y condiciones de sedimentos. Se analizará los resultados y posteriormente se compararán los escenarios en los distintos softwares.

En análisis de resultados y propuestas de gestión: Análisis de resultados obtenidos de las simulaciones en HEC-RAS e Iber, evaluación de la precisión y consistencia de los resultados, por consiguiente, se hará una propuesta de alternativas de operación del embalse Pilatón basadas en los resultados de las simulaciones. Y hacer recomendaciones para la gestión y mitigación de impactos de sedimentación. Revisión de información SIG.

4.2 ZONA DE ESTUDIO.

La Cuenca del río Pilatón tiene una dirección este- oeste y se forma en las laderas occidentales de la cordillera Occidental, cerros El Corazón y Atacazo (4455 msnm), tiene un área de 514km², la longitud del cauce principal es de 42.5 km, la pendiente media representa 42.7% [36].

En el tramo de ubicación de la captación del río Pilatón fluye siguiendo una dirección este-oeste. Considerando las coordenadas establecidas por las coordenadas UTM 9961596.57N, 737983.61E. como se ve en la Figura 4.

El curso del río está dirigido y dominado por barreras y espolones de roca que forman parcialmente el fondo y los flancos del valle. La roca en el cauce se encuentra cubierta por un depósito grueso de material aluvial.

En la margen izquierda, la carretera Alóag-Santo Domingo está cortada en la roca en un tramo de 125m. En la margen derecha se tiene una terraza aluvial de unos 80m con una pendiente suave del terreno.

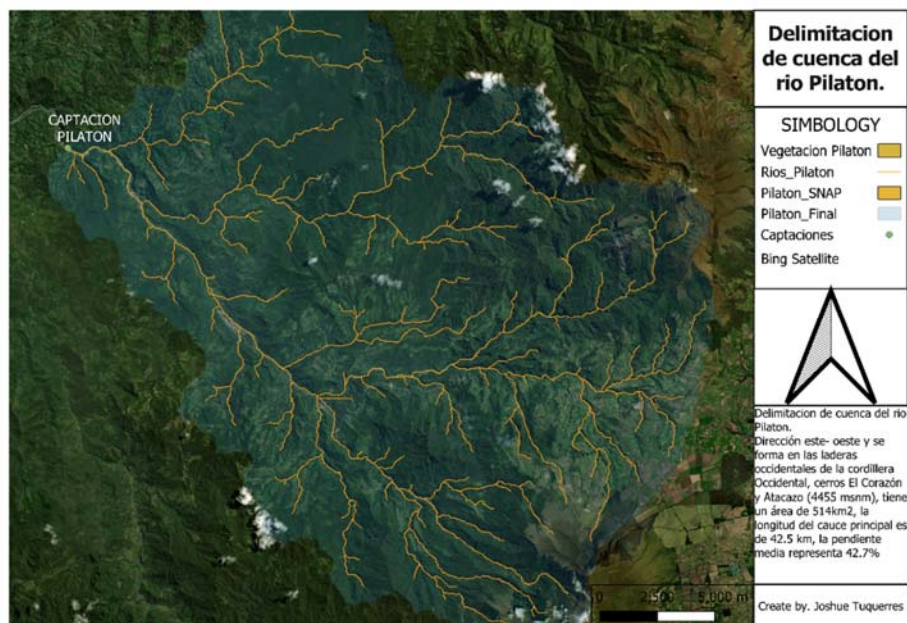


Figura 4: Delimitación de cuenca del Río Pilatón, elaboración propia en Software GIS

4.3 REVISIÓN DE DATOS PRELIMINARES

Se procedió a la recopilación de información existente y de libre acceso, en sitios webs de igual manera en artículos científicos, anuarios hidrometeorológicos, libros, normativas, proyectos de investigación (Tesis) y modelos matemáticos e hidrodinámicos más utilizados.

- Planos generales de la captación Pilatón.
- Planos de detalle de la estructura de la captación.

- Topografía del tramo Pilatón aguas arriba de la captación.
- Memoria de Cálculo de la estructura de estructura de la captación.
- Estudios hidrológicos del proyecto Toachi-Pilatón.
- Estudios geotécnicos del terreno donde se encuentra la captación.
- Registro de caudales líquidos en la Estación hidrológica ESPERIE.
- Registro de caudales solidos en la Estación hidrológica ESPERIE.
- Datos meteorológicos de la estación meteorológica TANDAPI.
- Capacidad del embalse Pilatón.
- Caudales máximos de diseño de la captación.
- Estudio de operación de los componentes de la captación.

De igual realizaron las siguientes actividades para reconocimiento del área de estudio, el objetivo principal es familiarizarse con las características geográficas y geomorfológicas de la zona de estudio, observar las condiciones actuales del Rio Pilatón a su vez recolección de obtención de datos históricos de HIDROTOAPI:

- Visita y reconocimiento de la zona de estudio.
- Revisión y recopilación de información de informes de aforos para caudales líquidos como sólidos y a su vez entregada por CELEP EP.
- Revisión y recopilación de información de informes de análisis granulométrico y mineralógico de sedimentos en suspensión y de fondo.

4.4 MORFOLOGÍA DEL SITIO DE CAPTACIÓN.

El proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón está ubicado al noroccidente de la provincia de Pichincha, en las estribaciones de la cordillera de los Andes, al sur oeste de la ciudad de Quito, en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi y comunicado por la carretera Alóag-Santo Domingo (E20), importante arteria vial del país. Lugar de captación el cual está ubicado en coordenadas UTM 9961596.57N, 737983.61E.

Como lugar de muestreo principal tenemos la Estación Hidrométrica Pilatón A.J Chiota (ESPERIE) ubicada a 900m aguas arriba desde el punto de captación. Las características que

reúnen para la evaluación de sedimentación total en el presente estudio del punto de captación Pilatón – Criterio de Selección Por Inclusión.



Figura 5 Ubicación esquemática del Proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón.

Desde el punto de captación existe un tramo de 100m aguas arriba que es donde empieza el embalse, 240m aguas arriba se ha determinado el cambio de pendiente que se tiene en el río que en este caso es moderada del 1.2% que llega a una curva en S en donde el río tiene una mayor pendiente de 2.4% este es considerado como segundo tramo, aguas arriba 250m más arriba del tramo 2 se encuentra el tramo 3 con una pendiente del 1.5% y por último se encuentra el tramo 4 con una pendiente de 2.67% entre todos los tramos y el embalse suman un total de 1320m de longitud.

4.5 CONCEPCIÓN GENERAL DEL SITIO DE CAPTACIÓN

La descripción detallada de estas obras es esencial para la modelación numérica bidimensional del transporte de sedimentos, ya que cada estructura influye en el comportamiento hidráulico y sedimentológico del río Pilatón en el tramo de aproximación. Por ejemplo, el azud y la rejilla lateral modifican los patrones de flujo, mientras que el desarenador y el canal de purga afectan la dinámica de los sedimentos.

Las obras de derivación y captación del río Pilatón están conformadas principalmente por el azud de derivación controlado por clapetas y compuertas; canal y estructura de purga; escalera de peces, la estructura de captación; desarenador; tanque de carga; la caseta de control y las obras anexas.

Las obras de derivación son de tipo convencional con un azud controlado por compuertas, rejilla lateral, lo suficientemente elevada sobre el cauce y canal de purga.

4.6 INFORMACIÓN DE CAUDALES

Para la modelación numérica del transporte de sedimentos en el tramo de aproximación a la captación Pilatón, se utilizarán diferentes caudales líquidos que representan condiciones hidrológicas variadas. Estos caudales se seleccionaron con base en la disponibilidad de datos y su relevancia para el análisis del comportamiento hidráulico y sedimentológico del río.

4.6.1 Caudales líquidos

Se emplearán los caudales máximos y medios mensuales registrados entre los años 2001 y 2012. Este período fue seleccionado debido a que corresponde a los años con mayor cantidad de registros diarios disponibles en la estación hidrometeorológica Pilatón D.J Chiota (ESPERIE). La información fue obtenida de los anuarios y registros proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), lo que garantiza la confiabilidad y representatividad de los datos utilizados.

Adicionalmente, se incorporará un caudal de crecida de 480 m³/s, con un tiempo de retorno de 500 años, el cual fue proporcionado por los estudios realizados por LOMBARDI. Este caudal es de especial importancia, ya que fue utilizado como referencia para el cálculo y diseño del embalse de captación del proyecto Pilatón. Su inclusión en la modelación permitirá evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones extremas, lo que es fundamental para garantizar la robustez del diseño y la seguridad de las estructuras.

4.6.2 Caudales sólidos

La determinación del caudal sólido en el río Pilatón se basó en información proporcionada por HIDROTOAPI, correspondiente a un período de 4 meses del 2024. Sin embargo, debido a la dispersión y limitada disponibilidad de datos en los anuarios hidrométricos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para la estación ESPERIE, fue necesario complementar esta información con cálculos adicionales.

Para estimar el caudal sólido, se procedió a calcular los valores mensuales correspondientes a los meses en los que se disponía de información de caudal líquido. Estos cálculos se realizaron

utilizando datos sedimentológicos del río Pilatón, los cuales indican que el material transportado por el río está compuesto principalmente por grava, gravilla, arena gruesa, arena fina y limos. Esta composición sedimentaria fue fundamental para establecer relaciones entre el caudal líquido y el caudal sólido, permitiendo estimar la carga de sedimentos en el tramo de estudio.

Para estimar el caudal sólido (Q_s), se emplearon metodologías basadas en ecuaciones empíricas y relaciones hidro sedimentológicas. Entre las ecuaciones más utilizadas se encuentran:

La Ecuación general de transporte de sedimentos (4.1). A su vez también se utilizará las ecuaciones de Meyer Petter and Müller (4.2) y la ecuación de Van Rijn (4.3) debido a que en los softwares a utilizar comparten estas ecuaciones como básicas para el cálculo de transporte de sedimento.

$$Q_s = C * Q \quad (4.1)$$

Donde:

Q_s : Caudal sólido (ton/día o kg/s).

C: Concentración de sedimentos en suspensión (kg/m³).

Q: Caudal líquido (m³/s).

$$Q_s = 8 * (\gamma * \gamma_c)^{\frac{3}{2}} \quad (4.2)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante en el fondo (N/m²).

τ_c : Esfuerzo cortante crítico para el inicio del movimiento de sedimentos (N/m²).

$$q_b = AD_{50}^2 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right)^n \quad (4.3)$$

Donde:

q_b : Tasa de transporte de fondo (por unidad de ancho).

A: Coeficiente empírico.

D_{50} : Diámetro medio de las partículas de sedimento (m).

τ_b : Esfuerzo cortante del lecho (N/m²).

τ_{cr} : Esfuerzo cortante crítico, es decir, el mínimo esfuerzo requerido para iniciar el movimiento de las partículas de sedimento.

n : Exponente empírico (generalmente igual a 1.5).

4.7 MÉTODOS PARA LA CONTRUCCION DEL MODELO NUMERICO

La modelación hidrodinámica, basada en las ecuaciones de Saint-Venant, permite calcular los niveles de agua a lo largo del tramo para los diferentes caudales analizado. Para evaluar la capacidad de transporte de sedimentos, es necesario incorporar modelos de turbulencia, ya que esta influye directamente en la mezcla y movimiento de partículas sólidas. A continuación, se detallan las ecuaciones y formulaciones utilizadas para construir el modelo numérico del río.

4.7.1 Ecuaciones Hidrodinámicas

La modelación hidrodinámica de flujos superficiales poco profundos, caracterizados por una relación profundidad-ancho del cauce pequeña, es fundamental en numerosos estudios de ingeniería hidráulica. Para simular estos flujos en ríos, se recurre a las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant, obtenidas mediante el promedio vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes y bajo ciertas hipótesis simplificadoras [43]. Para ello es necesario asumir que la velocidad no varía en profundidad y que además las aceleraciones verticales son despreciables. Además, se asume una pendiente de fondo suave, presión hidrostática y movimiento horizontal de las partículas. [44]

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de fluidos newtonianos (como el agua) y se derivan de los principios de conservación de masa, momentum y energía. En su forma general, para un flujo incompresible, se expresan como: Ecuación de continuidad (conservación de masa) (4.4) y ecuaciones de momentum en dirección en x (4.5) al igual que en el eje y (4.6).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

Donde:

u,v,w: Componentes de la velocidad en las direcciones x,y,z (m/s).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (4.7)$$

Donde:

ρ : Densidad del agua (1000 kg/m³ 1000kg/m³).

p : Presión (Pa).

ν : Viscosidad cinemática del agua ($\approx 1 \times 10^{-6}$ m²/s $\approx 1 \times 10^{-6}$ m²/s).

f_x, f_y, f_z : Componentes de las fuerzas externas (como la gravedad) en las direcciones x,y,z.

Las ecuaciones de Saint-Venant son especialmente útiles para este caso porque permiten modelar el flujo en el tramo de aproximación a la captación de manera eficiente, considerando la interacción entre el flujo de agua y el fondo del río. Estas ecuaciones de continuidad (4.8) y de momentum en y (4.9), en x (4.10) se acoplan con modelos de transporte de sedimentos para simular la erosión, transporte y deposición de sedimentos en el sistema.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hU_x)}{\partial x} + \frac{\partial (hU_y)}{\partial y} = 0 \quad (4.8)$$

Donde:

h : Profundidad del agua (m).

u, v : Componentes de la velocidad en las direcciones x,y (m/s).

$$\frac{\partial}{\partial t} (hU_x) + \frac{\partial}{\partial x} (hU_x^2) + \frac{\partial}{\partial y} (hU_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - \frac{\tau b_x}{\rho} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (hU_y) + \frac{\partial}{\partial x} (hU_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} (hU_y^2) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - \frac{\tau b_y}{\rho} \quad (4.10)$$

Donde:

g : Aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s² 9.81m/s²).

z_b : Elevación del fondo (m).

τ_{bx}, τ_{by} : Esfuerzos cortantes en el fondo en las direcciones x,y (N/m²).

Los términos fuentes que se incluyen en las ecuaciones hidrodinámicas son: Presión hidrostática, pendiente de fondo tensiones tangenciales viscosas y turbulentas, rozamiento del fondo, rozamiento superficial por el viento, precipitación e infiltración. De igual forma se han de modelar los frentes seco-mojado estacionarios así como no estacionarios. Estos frentes son de gran importancia para la modelación de zonas inundables tanto en ríos como en estuarios. [43]

4.7.2 Fricción de fondo

La fricción de fondo en el tramo de aproximación a la captación Pilatón se calcula utilizando la ecuación de Manning-Strickler (4.11), una relación empírica ampliamente utilizada en hidráulica de canales abiertos. Esta ecuación permite estimar la resistencia al flujo causada por la rugosidad del lecho, la cual está influenciada por el tamaño de los sedimentos (grava, arena, limos) y la presencia de irregularidades topográficas.

$$U = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{1/2} \quad (4.11)$$

Donde:

U: Velocidad media del flujo (m/s).

n: Coeficiente de rugosidad de Manning (s/m^{1/3}).

R: Radio hidráulico (m), definido como $R=A/P$, donde A es el área de la sección transversal y P el perímetro mojado.

S: Pendiente del cauce (adimensional).

En sistemas fluviales con lechos de grava o arena, el coeficiente n puede estimarse mediante la fórmula de Strickler (4.12), que relaciona la rugosidad con el tamaño característico de los sedimentos (d_{50}):

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{K} \quad (4.12)$$

Donde:

d_{50} : Diámetro medio de los sedimentos (m).

K: Constante empírica, típicamente $K=21.1$ para unidades SI.

Para la determinación del número de Manning. Por primera vez se realizará la integración de la ecuación de Cowan(4.13) con Manning-Strickler para proporcionar un enfoque robusto al estimar n en el río Pilatón, considerando no solo el tamaño de los sedimentos, sino también irregularidades, obstáculos y vegetación. Este método será fundamental para calibrar el modelo numérico y garantizar resultados confiables en la simulación del transporte de sedimentos. Los valores estimados en la Tabla 4.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (4.13)$$

Donde:

n_b : Coeficiente base de rugosidad, asociado al tamaño de los sedimentos del lecho.

n_1 : Incremento por irregularidad superficial del lecho.

n_2 : Incremento por variaciones en la sección transversal.

n_3 : Incremento por presencia de obstáculos (ej. rocas, troncos).

n_4 : Incremento por vegetación en el cauce.

m : Factor de corrección por sinuosidad del cauce.

Factores de ajuste de Cowan (valores típicos).		
Factor	Descripción	Valor típico (n_i)
n_1	Irregularidad superficial	0.000 (suave) – 0.020 (muy irregular)
n_2	Variación de sección transversal	0.000 (uniforme) – 0.015 (muy variable)
n_3	Obstáculos en el cauce	0.000 (ninguno) – 0.030 (abundantes)
n_4	Vegetación	0.000 (sin vegetación) – 0.050 (densa)
m	Sinuosidad	1.0 (recto) – 1.3 (muy sinuoso)

Tabla 4 Factores de ajuste de Cowan

4.7.3 Modelos de turbulencia

En particular, el modelo RANS logran un buen acuerdo con LES y DNS en la predicción de la velocidad y la energía cinética de la turbulencia. Mencionando también que DNS y LES

actualmente no son prácticos para aplicaciones de ingeniería, pero se pueden utilizar como sustituto de datos experimentales [32]

En la modelación numérica de flujos turbulentos, como los que ocurren en el río Pilatón, es necesario considerar los efectos de la turbulencia para obtener resultados precisos. El modelo de turbulencia k-ε de Rastogi y Rodi es una herramienta eficaz para simular estos fenómenos, ya que permite calcular la energía cinética turbulenta (k) (4.14) y su tasa de disipación (ϵ) (4.15), que son fundamentales para describir el comportamiento del flujo.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \epsilon \quad (4.14)$$

Donde:

k : Energía cinética turbulenta (m^2/s^2).

u_j : Componentes de la velocidad en la dirección j (m/s).

v_t : Viscosidad turbulenta (m^2/s).

σ_k : Número de Prandtl turbulento para k (adimensional, típicamente $\sigma_k=1.0$).

P_k : Producción de energía cinética turbulenta debido al esfuerzo cortante.

ϵ : Tasa de disipación de energía cinética turbulenta (m^2/s^3).

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{V_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4.15)$$

Donde:

σ_ϵ : Número de Prandtl turbulento para ϵ (adimensional, típicamente $\sigma_\epsilon=1.3$).

$C_{1\epsilon}$ y $C_{2\epsilon}$: Constantes del modelo (típicamente $C_{1\epsilon}=1.44$ y $C_{2\epsilon}=1.92$).

4.7.4 Viscosidad turbulenta constante

En una primera aproximación, se podría considerar utilizar un valor constante para la viscosidad turbulenta, tal como se sugiere en algunos estudios. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones significativas, ya que la turbulencia es un fenómeno altamente variable en el espacio. Como consecuencia, la asignación de un valor constante puede conducir a resultados imprecisos,

especialmente en regiones donde la turbulencia es intensa o presenta grandes gradientes. Por esta razón, en este trabajo se empleará un modelo de turbulencia más sofisticado, como el modelo k- ϵ , que permite representar la variabilidad espacial de la viscosidad turbulenta (4.16) y obtener resultados más realistas.

$$V_t = C_u \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.16)$$

Donde:

C_u : Constante del modelo (típicamente $C_u=0.09$).

4.8 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

La velocidad de sedimentación se puede aproximar en función de su diámetro característico o partir de gráficos realizado en distintas investigaciones como el desarrollo en el laboratorio de hidráulica de Zúrich.

Para este trabajo se asume una velocidad de caída de $0.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ para los sedimentos puestos en suspensión.

4.8.1 Ajuste de la curva caudal vs sedimentos.

Se debe realizar un ajuste en base a nuestras concentraciones de sedimentos en base al caudal para establecer una concentración de sedimentos esperada en el cauce en función al caudal a modelar.

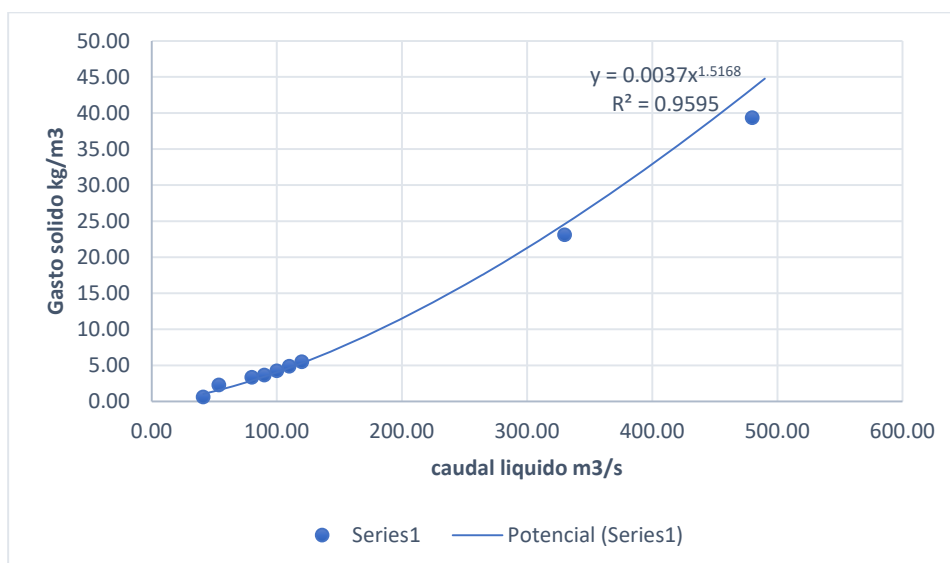


Figura 6 creación de curva de caudal respecto al sedimento de transporte

En este caso la ecuación a utilizar es:

$$y = 0.0037x^{1.5368} \quad (4.17)$$

Donde

Se representa la concentración de sedimento en kilogramos/metro cubico se representa con la letra (y) para el caudal en metros cúbicos/segundo el eje x

4.9 MODELACIÓN DIGITAL DEL TERRENO

Para construir la geometría del tramo de estudio correspondiente al río Pilatón, se utilizó información topográfica previamente procesada en formato ASCII. Esta información fue importada al software Iber, empleando una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN). La metodología RTIN fue seleccionada porque discretiza el terreno en una malla no estructurada, lo que permite adaptarse de manera más eficiente a las condiciones complejas de la hidráulica fluvial. En Iber, esta funcionalidad se encuentra en el menú "Herramientas", bajo el submenú "Crear RTIN". El proceso requiere especificar una longitud mínima y máxima para los lados de los triángulos, así como una tolerancia que representa la diferencia vertical máxima permitida entre el modelo digital del terreno (MDT) y la geometría generada. Este valor de tolerancia debe coincidir con la precisión altimétrica del MDT.

Dado el alto costo computacional de los modelos numéricos que incluyen simulaciones de turbulencia, se diseñaron dos geometrías con diferentes niveles de precisión:

Este modelo abarca un tramo de 3,5 kilómetros para simular el comportamiento del río en condiciones naturales e incorporar la obra de captación bajo un caudal medio promedio del comportamiento de los caudales medios anuales encontrados. El objetivo es analizar el desempeño general de la obra en funcionamiento para este caso lo conoceremos como Escenario 1 del cual se explicará a fondo en los escenarios de simulación.

Con el fin de modelar caudales de períodos de retorno específicos y caracterizar el comportamiento del río bajo diferentes eventos hidrológicos, se generó un modelo más detallado que abarca un tramo de 1000 metros. Mallado.

4.9.1 Mallado.

Para el primer caso, se establecieron parámetros de discretización con un tamaño máximo de 100 metros, un tamaño mínimo de 1 metro y una tolerancia de 0.3 metros.

Para el segundo caso con un tamaño máximo de 5 metros, un tamaño mínimo de 1 metro y una tolerancia de 0.5 metros.

En este caso, la geometría de la captación se importó como un archivo shapefile desde el menú "Archivo" -> "Importar". A diferencia del modelo RTIN, esta importación incluyó líneas georreferenciadas que conservan mejor los detalles de la estructura. Posteriormente, se realizó el colapso del modelo para garantizar su continuidad, y se incorporó esta geometría al terreno, convirtiéndola en superficie mediante las herramientas de creación de puntos, líneas y superficies de Iber. Este enfoque permitió una mayor precisión en las simulaciones, sin comprometer la eficiencia computacional.

4.9.2 Software de ingeniería.

Los softwares que se usaran en el desarrollo de esta investigación son los Siguyentes

- Software CAD
- Software GIS
- HEC -RAS
- Iber

4.10 CONDICIONES DE CONTORNOS

Para asignar las rugosidades al terreno se dispone de un archivo de usos de suelo generado anteriormente en formato ASCII que contiene la distribución de los coeficientes de rugosidad. Es importante ingresar condiciones iniciales y de contorno para ejecutar el módulo hidrodinámico.

4.10.1 Condiciones iniciales del modelo numérico.

Para iniciar la simulación, se estableció una condición inicial que representa un estado de equilibrio del sistema. Se asignó un calado uniforme a todo el dominio, correspondiente a un caudal bajo. Esta condición inicial permitió evaluar la respuesta del sistema a un evento de inundación

repentino, simulado mediante la imposición de un hidrograma de entrada en la sección de control aguas arriba.

4.10.2 Condiciones de contorno.

Es fundamental definir las condiciones en los límites de la malla, asignando diferentes tipos de restricciones según las necesidades del modelo. Específicamente, se deben establecer condiciones de contorno tanto en los puntos de entrada como en los de salida del flujo, garantizando así una correcta representación del sistema hidráulico.

4.10.2.1 Condiciones de contorno de entrada

Para el caso de estudio se asumió régimen crítico/subcrítico, utilizando un Hidrograma anual promediado.

4.10.2.2 Condiciones de contorno de salida

Para el caso de estudio se asumió régimen supercrítico/crítico y se establecieron 2 salidas la que deriva a los desarenadores como caudal captado para el Proyecto y la salida de la captación que se produce aguas abajo del punto de captación.

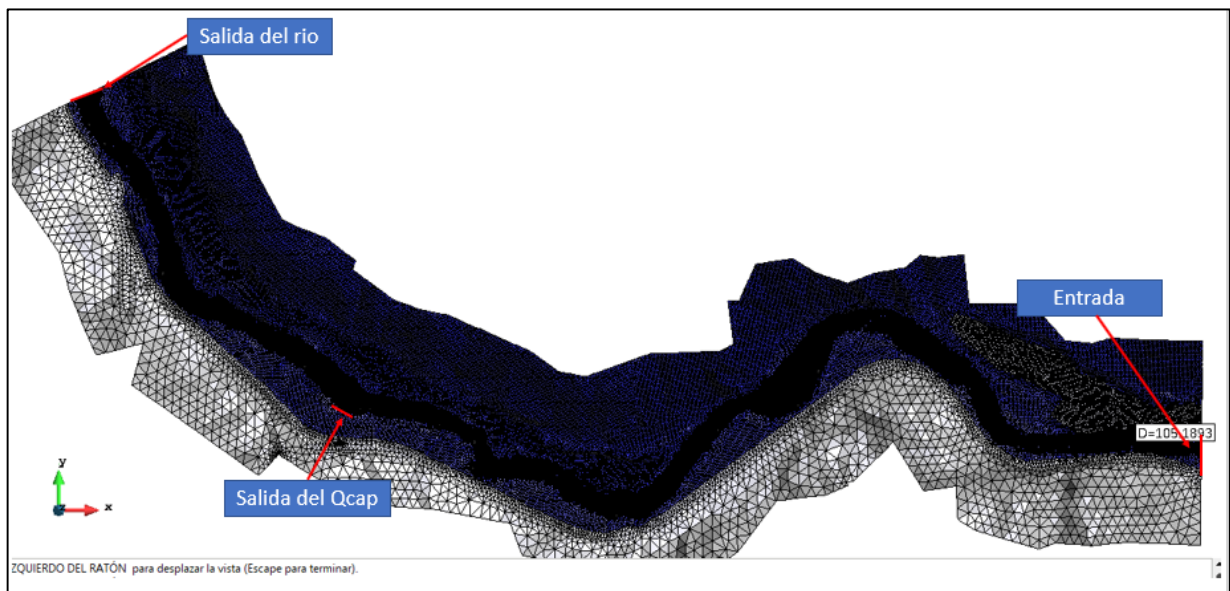


Figura 7 Condiciones de contorno de la obra

4.10.3 Condiciones de contorno transporte de sedimentos.

4.10.3.1 Condición inicial de los sedimentos en suspensión

Como mencionamos para obtener las concentraciones de sedimentos utilizamos la ecuación 4.17 presentada en la sección de transporte de sedimentos, de esta manera las concentraciones a ingresar son para los periodos de retorno de 25 años y 500 años:

Gasto liquido	Concentración Media
m ³ /s	kg/m ³
41.17	0.60
53.75	2.28
80.04	3.31
90.00	3.65
100.00	4.24
110.00	4.85
120.00	5.49
330.00	23.10
480.00	39.34

Tabla 5 Tabla ajustada relación de caudal y concentración de sedimentos.

4.10.3.2 Transporte por arrastre de fondo

En base a los resultados de la primera modelación se pretende fijar una cota o profundidad a los siguientes modelos a la cual ya no habrá erosión en el lecho. Esta condición interactúa con el transporte en suspensión y por arrastre de fondo.

4.11 CALCULO.

4.11.1 Parámetros de tiempo.

En esta sección se establecen los parámetros relacionados con la integración temporal de las ecuaciones de Saint-Venant, así como la configuración para la salida de resultados. Estos valores son esenciales para garantizar la estabilidad y precisión del modelo numérico.

Antes de iniciar el cálculo, es necesario definir valores temporales clave que están directamente vinculados a las condiciones de contorno, las características de la malla, y las capacidades del equipo computacional. Entre estos parámetros se incluyen:

Tiempo inicial: El instante desde el cual comienza la simulación, definido en este caso como cero.

Tiempo máximo de simulación: Representa el tiempo total que cubrirá la simulación.

Intervalo de almacenamiento: La frecuencia con la que se guardan los resultados durante la simulación.

El software Iber y HEC-RAS ajustan automáticamente el incremento de tiempo máximo en función de la condición de Courant, asegurando que el modelo permanezca numéricamente estable durante todo el proceso.

Para el modelo basado en los hidrogramas de caudales medios, se estableció un tiempo máximo de simulación de 7200 segundos, el cual corresponde al doble de la duración del caudal de entrada. Este tiempo fue considerado suficiente para que el modelo alcance la convergencia, garantizando resultados confiables.

En el caso del modelo recortado, utilizado para simular eventos en una zona específica, la simulación requirió menos tiempo. El cálculo se detuvo una vez que se alcanzó un equilibrio entre los caudales de entrada y salida, optimizando así el tiempo de procesamiento y los recursos computacionales.

Para ambos modelos, se configuró un intervalo de almacenamiento de resultados de 20 segundos, asegurando un nivel de detalle adecuado en los datos obtenidos. Esta parametrización permitió realizar simulaciones eficientes y ajustadas a los requerimientos del tramo de aproximación al embalse Pilatón.

ID	Value	Timestamp	Value 1	Value 2
6840.009	0.02240	12:00:43:79	13.288	13.331
6860.011	0.02240	12:02:31:01	13.288	13.341
6880.015	0.02240	12:04:23:36	13.288	13.352
6900.019	0.02240	12:06:20:48	13.288	13.355
6920.001	0.02240	12:08:13:89	13.288	13.398
6940.007	0.02240	12:10:09:09	13.288	13.389
6960.013	0.02240	12:12:05:54	13.288	13.337
6980.021	0.02240	12:14:00:72	13.288	13.344
7000.006	0.02241	12:15:51:29	13.288	13.369
7020.015	0.02241	12:17:38:59	13.288	13.341
7040.003	0.02241	12:19:26:86	13.288	13.349
7060.013	0.02241	12:21:14:89	13.288	13.356
7080.002	0.02241	12:23:02:13	13.288	13.323
7100.013	0.02241	12:24:53:20	13.288	13.310
7120.003	0.02241	12:26:40:50	13.288	13.293
7140.017	0.02241	12:28:45:11	13.288	13.349
7160.008	0.02241	12:30:38:19	13.288	13.289
7180.001	0.02241	12:32:48:75	13.288	13.286
7200.016	0.02241	12:34:48:10	13.288	13.293

COMPUTATION FINISHED SUCCESSFULLY!

11:01:2025
12:34:48

Log tiempo real Cerrar

Figura 8 información de cálculo desarrollado en software Iber.

Como ya mencionamos en capítulos anteriores Meyer Petter and Müller y Van Rinjin

4.11.2 Configuración del modelo en HEC-RAS

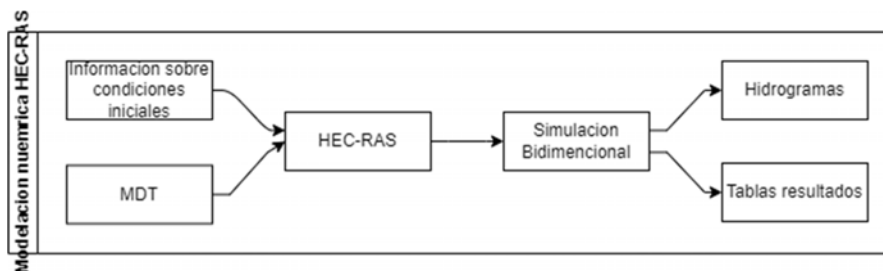


Figura 9 Diagrama Metodología HEC-RAS

Creamos nuestro proyecto nuevo en el cual:

- Configuración del sistema del computador a trabajar en Región y formato de Estados Unidos, para evitar problemas de simulación, en el software de HEC-RAS configuramos al Sistema Internacional de medidas.
- Importamos el modelo de elevación digital y procedemos a definir la geometría del río Pilatón.
- Establecemos las condiciones iniciales de Caudales y nivel de agua inicial establecemos la granulometría con que vamos a trabajar y las capas de sedimento que deseamos.

- Configuramos las condiciones de Contorno es decir definimos el hidrograma de entrada y las condiciones que queremos en salida.
- Seleccionamos los parámetros de simulación.

Cabe recalcar que es un modelo comparativo entre HEC-RAS e Iber Por lo cual buscaremos establecer parámetros similares para el transporte de sedimento y les ecuaciones a trabajar en los softwares.

Se busca un tipo de ecuaciones por dos razones: la primera es que los dos softwares comparten estas ecuaciones para sus procesos de iteraciones para la simulación de transporte de sedimentos y la segunda es que las dos ecuaciones trabajan con el tipo de partículas encontradas en los informes de laboratorio los cuales van desde grava, gravilla, arena fina y gruesa hasta limos.

4.11.3 Configuración del Modelo En Iber

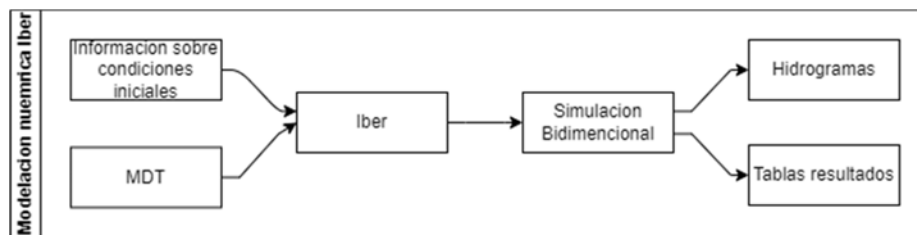


Figura 10 Diagrama de metodología Iber

Creamos un nuevo proyecto en el software de Iber para1:

- Definir el dominio de simulación.
- Importar el modelo topográfico del Rio Pilatón ya sea en archivo TIN o Tif.
- Al igual que en modelo de HEC-RAS definimos las condiciones iniciales es decir caudales y niveles de aguas estos datos de igual manera se trabajará entorno a los caudales medios y caudales máximos
- Configuramos las condiciones de contorno es decir datos de entrada y condiciones de salida
- Establecemos parámetros similares a Los de HEC-RAS.
- Des pues de esto se realizará una comparativa entre los escenarios establecidos.

4.12 PLAN DE SIMULACIONES

En la Siguiete diagrama se presenta el plan de simulaciones para los distintos softwares como se puede ver en Figura 11.

El plan de simulaciones consta de tres escenarios, el primero está diseñado para la calibración del modelo en los distintos softwares es decir se probará con distintas ecuaciones de transporte de sedimentos para establecer la más óptima entre las ecuaciones Meyer Peter and Müller y Van Rijn esto debido a que HEC-RAS como Iber comparten estas ecuaciones de transporte, el segundo escenario trabajara con caudales medios y con la ecuación de transporte ya definida para la modelación, con esto se busca tener una idea del comportamiento del rio Pilatón en condiciones diarias y normales, mientras que en el tercer escenario trabajara con caudales máximos para estimar el comportamiento del rio con respecto al transporte de sedimentos en condiciones críticas o máximas.

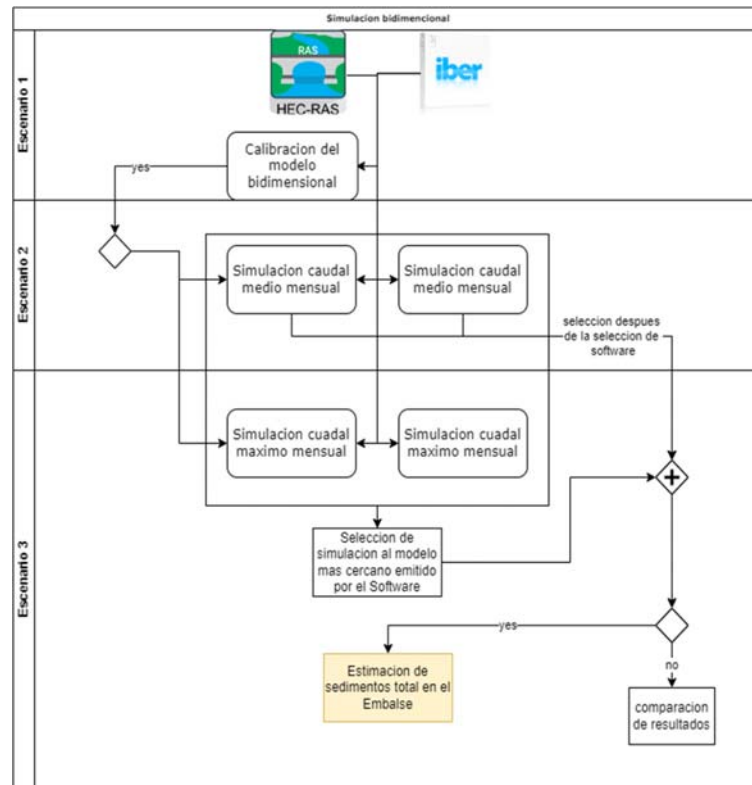


Figura 11: Diagrama del plan de simulaciones.

En los escenarios a excepción del primer escenario se realizará una comparación entre los mismos escenarios, pero con los distintos softwares para establecer relación y similitud con el perfil transversal al del Rio Pilatón para de esta manera presentar simulaciones más próximas o reales al comportamiento del Rio Pilatón.

Plan de simulaciones			
software	Primer escenario	segundo escenario	Tercer escenario
HEC-RAS	Calibración del modelo de simulaciones en base a hidrogramas	Q=330m ³ /s	Q=480m ³ /s
Iber	Calibración del modelo de simulaciones en base a hidrogramas	Q=330m ³ /s	Q=480m ³ /s

Tabla 6 Plan de simulaciones para el proyecto de investigación.

Por último, se presentarán análisis e interpretaciones del segundo escenario del software elegido debido a que en este escenario se simula las condiciones del comportamiento del Rio Pilatón.

4.12.1 Escenarios de simulación

Las condiciones establecidas para las simulaciones son los Sigüientes se utilizarán los mismos escenarios para HEC-RAS e Iber:

Se establecerá el cálculo para el uso correcto del número de Courant, para posteriormente utilizarlo en las simulaciones bidimensionales.

El número de Courant es un concepto fundamental en el campo de la dinámica de fluidos computacional (DFC) y, por extensión, de la hidráulica computacional. El número conecta efectivamente las propiedades físicas y numéricas de un esquema dado, con aplicación específica al problema de convección, es decir, la advección de la mecánica de fluidos.

$$C = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (4.18)$$

Donde:

v: Velocidad del flujo (m/s).

Δt : Paso de tiempo (s).

Δx : Tamaño de celda o distancia espacial (m).

4.1.1 Escenario uno

En este escenario se buscará la calibración del modelo es decir se busca la ecuación de transporte óptima para la simulación del Rio Pilatón.

Escenario 1		
Parámetros	Valor	Unidad
Caudal inicial	Hidrograma Qmed	m ³ /s
Concentración de sedimentos	-	mg/l
Rugosidad de Manning	-	
Cota Sección aguas arriba	1129	msnm
Cota Sección aguas abajo	1099	msnm
Cobertura Vegetal	Moderada vegetación baja	
Pendiente de rio	2.8	%

Tabla 7 Escenario para la primera simulación.

4.1.2 Escenario dos

Para la configuración de simulación y modelación, se utilizará la ecuación de transporte seleccionada en el primer escenario, en la parte de partículas sedimentadas se trabajará con un promedio del tamaño de partículas en suspensión y las de fondo, encontradas en el rio por el informe de Laboratorio.

Escenario 2		
Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	330	m ³ /s
Concentración de sedimentos	-	mg/l
Rugosidad de Manning rio	0.045	
Rugosidad de Manning rio contornos	0.04	
Cota Sección aguas arriba	1117	msnm
Cota Sección aguas abajo	1099	msnm
Cobertura Vegetal	Moderada vegetación baja	
Pendiente de rio	2.8	%
Diámetro sedimento en suspensión	0.049	mm
Porosidad	0.5	
D ₅₀	16.8	mm
Porosidad	0.35	

Tabla 8 Escenario para segunda simulación.

4.1.3 Escenario tres

Escenario 2		
Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	480	m ³ /s
Concentración de sedimentos	-	mg/l
Rugosidad de Manning rio	0.045	
Rugosidad de Manning rio contornos	0.04	
Cota Sección aguas arriba	1117	msnm
Cota Sección aguas abajo	1099	msnm
Cobertura Vegetal	Moderada vegetación baja	
Pendiente de rio	2.8	%
Diámetro sedimento en suspensión	0.049	mm
Porosidad	0.5	
D ₅₀	16.8	mm
Porosidad	0.35	

Tabla 9 Escenario para la tercera simulación.

También se consiguió información el de la cota y cantidad de cámaras desarenadoras con las cuales se puede eliminar el los sedimentos que encontramos en suspensión.

5.1.3 Información GIS.

Se encontró información GIS sobre la cuenca del Rio Pilatón, pero no se encontró información de interés sobre el tramo de aproximación a la Captación como modelos de elevación digital, razón por la cual se procedió a modelar el área del tramo a trabajar.

5.1.2 Caudales Líquidos

La revisión de datos de los anuarios Hidrométricos del INAMHI se encontraron caudales mínimos, medios y máximos de que van desde el año 2001 hasta el 2013

Se logro determinar el comportamiento de rio a través del caudal medio del rio Pilatón recolectando datos de los periodos mensuales como se ve en la Tabla 11 con su respectivo hidrograma visto en la Figura 13 cabe mencionar que de estos caudales solo se trabajó con el caudal medio para la calibración del modelo del terreno. Esto quiere decir que serán utilizados para determinar las cotas de agua y de terreno y establecer el comportamiento del Rio

El caudal de crecidas fue proporcionado por el estudio de LOMBARDI Tabla 10, este caudal será utilizado para determinar el comportamiento para nuestro caso de estudio e interés que comprenden en el tiempo de retorno de 25 años con un caudal de crecida de 330 m³/s para el caso de estudio y de igual manera para el tiempo en el que está calculada la obra que es un periodo de retorno de 500 años con un caudal de crecida de 480 m³/s

T	Q crecida Pilatón			
(años)	(m ³ /s)			
2	190			
5	253			
10	292			
25	332	aproximado=	330	m ³ /s
50	373			
100	405			
500	478	aproximado=	480	m ³ /s
1000	508			

Tabla 10 Tiempos de retorno y Caudal de crecida establecida por Lombardi

Q med m ³ /s, Estación hidrométrica Pilatón A.J Chitoa ESPERIE.													
FECHAS	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
ENE	28.253	20.918	38.603	30.976	19.781	19.797	38.327	49.154	66.083	26.223	61.779	50.536	46.438
FEB	35.813	33.375	43.85	12.811	44.389		29.399	77.401	93.523	39.316	87.401	73.7	65.133
MAR	42.753	53.533	45.453	19.869	34.216	44.088	47.098	60.161	66.505	29.461	60.082	72.829	110.154
ABR	28.192	53.533	59.677	37.129	36.81	53.82	45.241	55.817	41.591	54.034	65.566	44.79	38.762
MAY	27.503	55.206	40.313	36.412	13.112	34.197	42.729	43.83	35.273	28.091	16.609	28.354	21.422
JUN		29.03	20.79	21.886	11.183	18.825	24.481	27.917	19.441	18.204	14.604	16.733	21.422
JUL		15.525	14.741	10.218	7.936	11.199	14.891	18.617	14.011	15.078	13.236	11.899	13.752
AGO		10.415	9.388	8.641	6.821	9.836	12.163	14.057	14.81	7.574		9.361	10.912
SEP		7.096	9.543	8.872	5.76	17.917	11.409	14.775	20.929	6.964	9.689	8.245	10.025
OCT	7.033	9.186	11.382	11.014	5.584	26.538	11.335	21.566	9.191	5.573	15.273	9.389	12.428
NOV	8.925	11.927	13.334	12.022	8.114	32.187	16.293	22.335	9.191	8.23	9.159	11.295	16.903
DIC	20.743	21.902	19.959	20.155	12.968	31.558	21.621	30.341	30.912	31.177	11.581	12.134	13.288

Tabla 11 Recopilación de caudales medio de anuarios del INAMHI 2001-2013

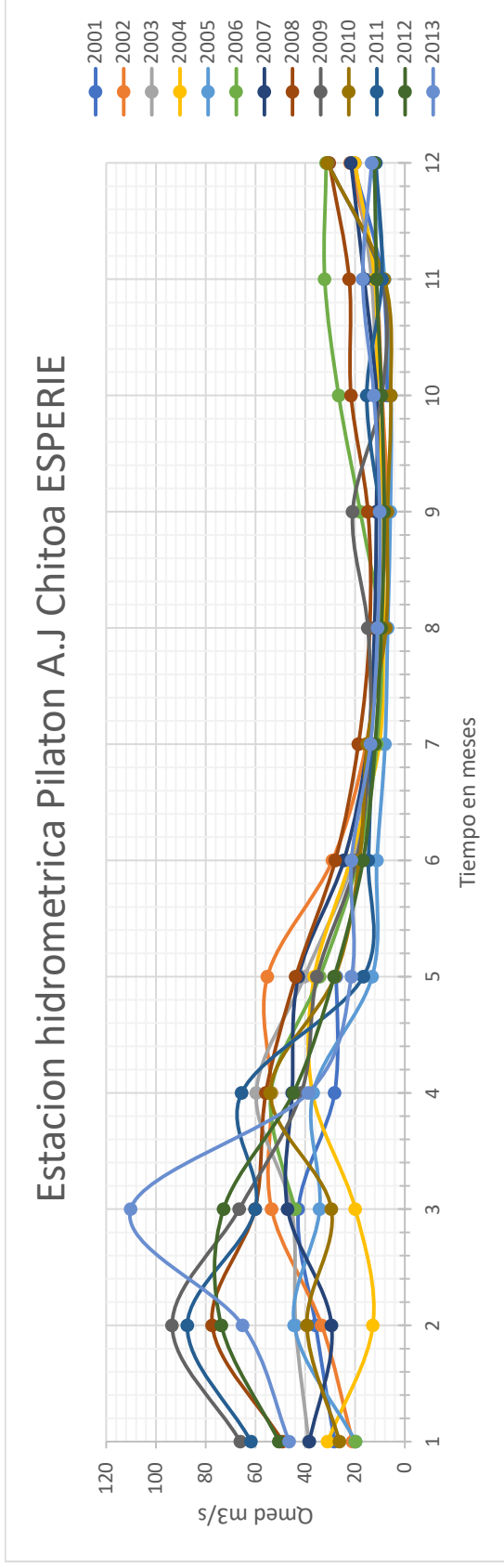


Figura 13: Hidrograma de caudales medios años 2001 a 2013

Q máx. m3/s, Estación hidrométrica Pilatón A.J Chiota ESPERIE.													
FECHAS	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
ENE	76.064	40.486	57.381	81.325	47.49	31.382	111.489	11.489	167.971		129.162	129.162	77.35
FEB	111.189	74.787	52.272	19.542	127.312		57.381	262.634	311.233	111.489	206.423	148.7	92.599
MAR	83.074	11.489	57.381	31.382	81.325	68.626	11.489	297.707	170.214	68.626	120.099	111.489	211.625
ABR	47.49	111.489	103.32	52.272	95.578	120.099	129.161	95.578	146.66	170.214		81.325	78.664
MAY	35.732	120.099	68.626	148.701	57.381	129.161	11.489	95.578	129.161	38.856	19.542	31.381	111.489
JUN		52.272	24.975	39.665	14.994	43.022	41.319	47.49	30.694	30.694	14.994	24.389	43.891
JUL		22.69	19.542	14.994	11.241	13.023	19.049	24.975	20.044			14.994	14.182
AGO		11.241	13.023	11.241	8.2	10.579	14.584	18.564	35.732			11.241	12.653
SEP		8.2	19.542	11.24	7.67		31.382	23.813	35.732	7.2	11.241	10.907	10.907
OCT			14.994	14.182	6.222	30.018	18.089	57.381	13.023		57.38	11.241	32.788
NOV	19.542	14.994	24.975	14.994	14.182	68.626	47.49	44.72	19.049	22.143	11.241	13.402	31.381
DIC	57.381	28.051	81.325	39.665	33.508	68.626	47.49	170.214	170.214		17.163	24.975	17.163

Tabla 12 Caudal máximo anuarios del INAMHI 2001-2013

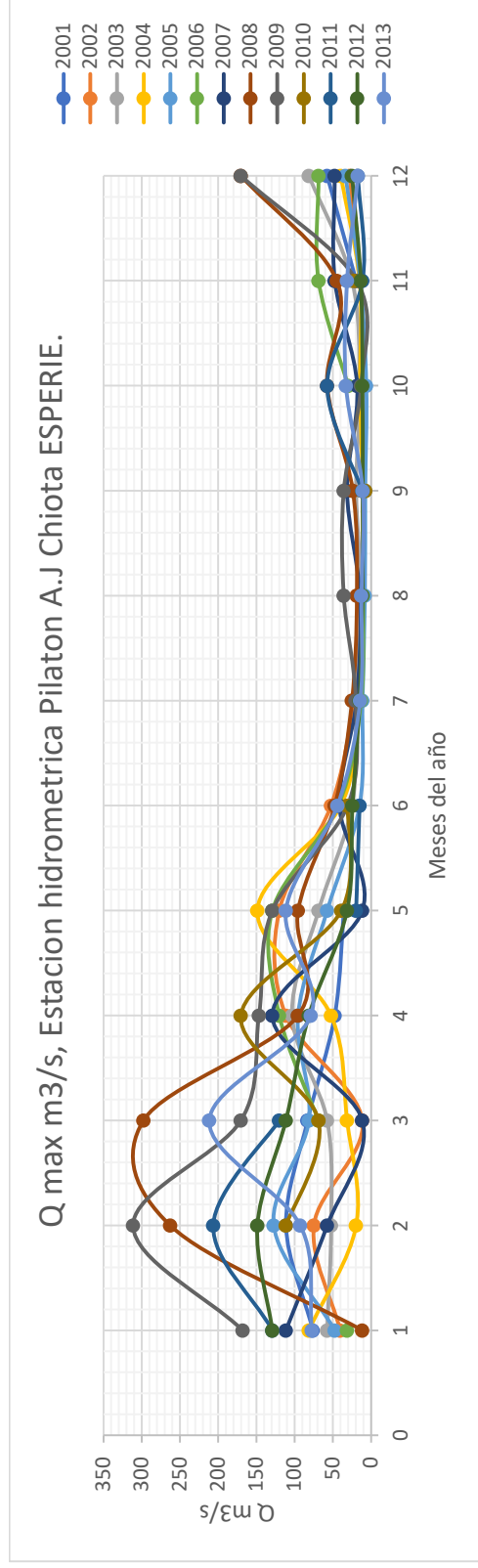


Figura 14: Hidrograma de caudales máximos años 2001-2013

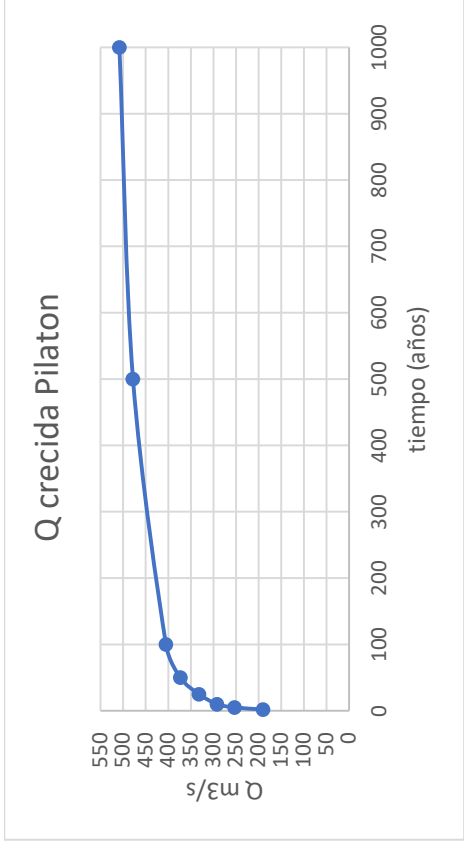


Figura 15. histogramas de caudales de crecidas periodo de retorno hasta 1000 años.

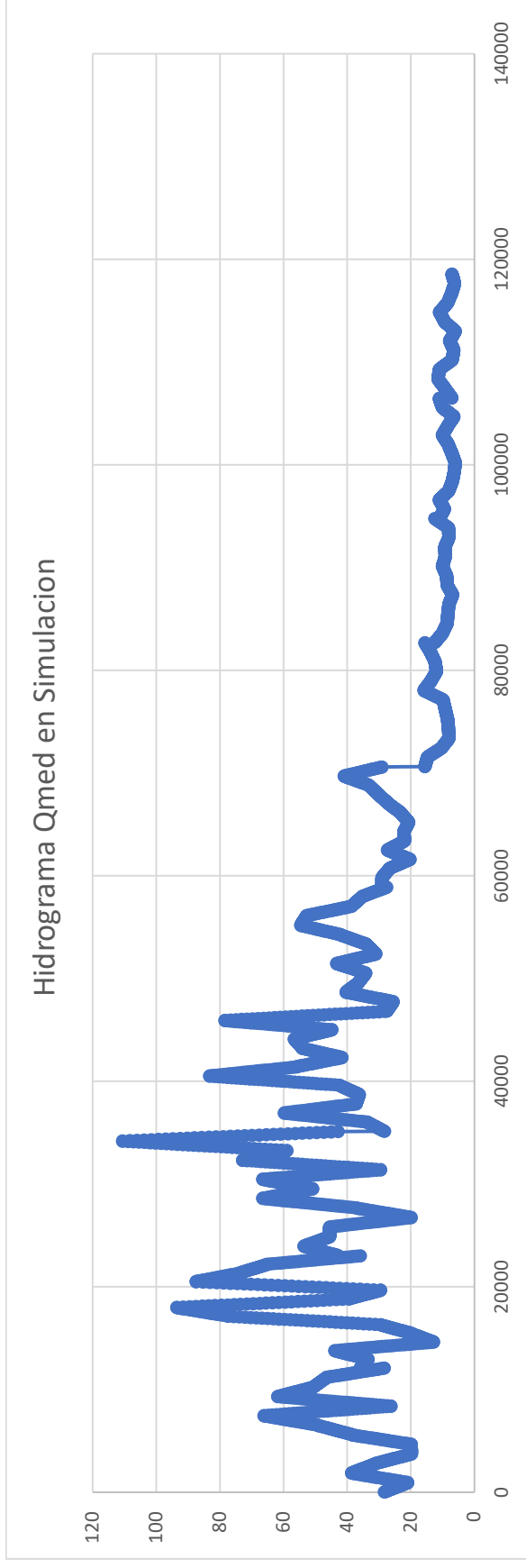


Figura 16 Hidrograma de caudales en simulación para Iber y HEC-RAS.

Del análisis de la serie de caudales presentados en la Figura 13 y Figura 14 se pueden concluir los siguientes puntos de interés.

- Los caudales máximos ocurren en los meses de febrero y marzo, siendo su valor máximo registrado en Q_{\max} de $311.233 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Los caudales menores, tanto en caudales medios se producen en el segundo semestre del año es decir comprenden los meses de junio hasta diciembre con un valor mínimo registrado en la serie de Q_{\min} $5.75 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.1.3 Granulometría y sedimentología

A su vez también informes de granulometría, mineralogía, difracción por rayos x entregadas por el consultor Msc. Rodrigo Pambosa. A la unidad de Negocio HIDROTOAPI. Estos informes para mayor detalle se encuentran en la parte de anexos.

Según las normativas de establecidas por la Unidad de Negocio HIDROTOAPI, la participación directa en las prácticas de medición y aforo de caudales líquidos y sólidos está restringida. Esta medida esta implementada con el fin de garantizar la seguridad operativa y la precisión en la recolección de datos, así como para asegurar que dichas actividades sean realizadas exclusivamente por el personal debidamente capacitado y autorizado en este caso el Msc. Rodrigo Pambosa, por esta razón solo se permite estar como veedor.

La metodología por el consultor es tomar muestras del lecho del río Pilatón mediante un muestreador por arrastre, en el laboratorio LANCAS (Laboratorio Nacional de Aguas y Sedimentos) ubicado en el INAMHI en donde se realizaron los ensayos mediante tamizado y para los elementos más finos se utilizó el hidrómetro.

Como datos fueron proporcionados por informes de seis muestras se procedió a la tabulación, en el caso de granulometría de fondo en base al tamiz en mm y el porcentaje que pasa por el tamiz estos de cada muestra en este caso 6 a cada muestra se las designo con el indicativo de M referente a la muestra y un numero en orden ascendente para su identificación, ejemplo M1 (muestra número 1). Estos datos fueron utilizados para la calibración de sedimentología en HEC-RAS e Iber de igual manera se procedió a calcular el promedio que se tiene de porcentaje que pasa por cada tamiz para establecer una relación e interpretar que tipo de fracción o partículas tenemos en el rio Pilatón.



**INFORME DE ANALISIS DE SEDIMENTO DE FONDO
(GRANULOMETRIA DE FONDO)**

No. 24-056
Pág. 1 de 1

INFORMACIÓN DEL USUARIO:

USUARIO:	Juan Rodrigo Pombosa Lora		
PERSONA DE CONTACTO:	Rodrigo Pombosa		
DIRECCIÓN:	La Armeria		
TELÉFONO / CELULAR:	0998236151	Email:	pombosa1@yahoo.es
MÉTODO DE MUESTREO:	NA		

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA:

FECHA Y HORA RECEPCIÓN DE LAS MUESTRAS:	12/03/2024	16:00	Orden de Trabajo:	OT-24-017
LUGAR DE ANÁLISIS:	LANCAS: Nuez de Vela N36-15 y Correa			
FECHAS DE ANÁLISIS DEL:	12/03/2024	AL:	04/04/2024	
FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME:	05/04/2024			

Código del laboratorio	Matriz	Identificación o Código	Lugar de toma de muestra	Fecha de toma de muestra	Hora de toma de muestra	Coordenadas
M-24-056-A	Sedimentos	Río Pilón - Fondo Grueso	La Espera	06/03/2024	9:00	NR

GRANULOMETRÍA - CÁLCULO DE PORCENTAJES

TAMIZ N°	ABERTURA DE TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (g.)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g.)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE PASA (%)
3/8"	9,53	270,9	270,9	54,19	45,81
4	4,75	25,7	296,6	5,14	40,67
10	2,00	8,2	304,8	1,64	39,03
16	1,18	2,6	307,4	0,52	38,51
30	0,60	12,3	319,7	2,46	36,05
40	0,43	20,9	340,6	4,18	31,87
45	0,36	15,7	356,3	3,14	28,73
60	0,25	49,0	405,3	9,80	18,92
70	0,21	20,8	425,9	4,12	14,80
100	0,15	42,7	468,6	8,54	6,26
140	0,11	20,8	489,2	4,12	2,14
170	0,09	4,5	493,7	0,90	1,24
200	0,08	3,2	496,9	0,64	0,60
230	0,06	1,4	498,3	0,28	0,32
270	0,05	0,7	499,0	0,14	0,18
325	0,05	0,4	499,4	0,08	0,10
400	0,04	0,1	499,5	0,02	0,08
PAN		0,4	499,9	0,08	0,00
TOTAL		499,90		100,00	

PESO TOTAL DE LA MUESTRA:	500,3 g
---------------------------	---------

CÁLCULOS:	
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (C _u) =	372,48
COEFICIENTE DE CONCAVIDAD (C _c) =	0,01
MEDIANA =	15,80

Figura 17, Informe granulometría de fondo de la muestra 1.



INFORME DE GRANULOMETRIA DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

No. 24-056
Pág 1 de 1

INFORMACIÓN DEL USUARIO:

USUARIO:	Juan Rodrigo Pombosa Loza		
PERSONA DE CONTACTO:	Rodrigo Pombosa		
DIRECCIÓN:	La Armenia		
TELÉFONO / CELULAR:	0998235151	Email:	rpombosa1@yambo.es
MÉTODO DE MUESTREO:	NA		

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA:

FECHA Y HORA RECEPCIÓN DE LAS MUESTRAS:	12/03/2024	16:00	Orden de Trabajo:	OT-24-017
LUGAR DE ANÁLISIS:	LANCAS: Nuñez de Vela N36-15 y Corea			
FECHAS DE ANÁLISIS DE:	27/03/2024	AL:	28/03/2024	
FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME:	04/04/2024			

Código del laboratorio	Matriz	Identificación o Código	Lugar de toma de muestra	Fecha de toma de muestra	Hora de toma de muestra	Coordenadas
M-24-056-B	Sedimentos	Rio Pilatón -Suspensión Gruesa	La Esperie	05/03/2024	9:00	NR

GRANULOMETRIA POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO

Peso de la muestra (g):	50.0268
Gravedad específica de los sólidos (g/cm ³):	2.70
Coefficiente de Gravedad específica:	0.9887

Constantes K:	
K ₁₂₀₀ :	0.01378
K ₂₀₀ :	0.01381

HORA	Tiempo transcurrido (t) (min)	Lectura Real de Hidrómetro	Temperatura (°C)	Corrección por temperatura (Ct)	Corrección por menisco (Cm)	Profundidad Efectiva L (cm)	Dámetro de partículas (mm)	% Porcentaje más Fino
8H33	1	20	18	-0.5	21.00	12.90	0.049	43.479
8H35	2	11	18	-0.5	12.00	14.30	0.037	23.716
8H40	5	9	18	-0.5	10.00	14.70	0.024	17.787
8H55	15	7	19	-0.3	8.00	15.00	0.014	12.253
9H25	30	7	19	-0.3	8.00	15.00	0.010	10.277
10H25	60	7	19	-0.3	8.00	15.00	0.007	8.301
12H25	120	6	19	-0.3	7.00	15.20	0.005	4.348
18H25	240	6	19	-0.3	7.00	15.20	0.003	2.372
8H33	1440	6	18	-0.5	7.00	15.20	0.001	0.000

Figura 18: Informe de granulometría de sólidos suspendidos de la muestra 1.

5.1.4 Granulometría partículas de fondo

En la Tabla 13 se recolecta la información de las diversas muestras los diferentes porcentajes de partículas que pasan por diferentes tamices, estos resultados varían de acuerdo al método empleado al momento de recolección de datos es decir en momentos de crecidas o condiciones naturales del río.

En la todas las muestras utilizando la clasificación de suelos Atterber o también conocido como Sistema Internacional para la determinación fracción de acuerdo a la dimensión de la partícula, podemos determinar el porcentaje de la fracción gruesa (gravas) mediante el tamiz o 2mm es decir todas las fracciones de partículas que pasen hasta el tamiz de 2mm de abertura.

Granulometría Material del lecho Rio Pilatón.							
Class	Size (mm)	% Finer					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Clay	0.004						
VFM	0.008						
FM	0.016						
MM	0.032	0.30	1.00		1.00		0.61
CM	0.0625	3.21	4.31		4.31		4.68
VFS	0.125	16.86	22.92	0.56	22.92	6.67	40.00
FS	0.25	30.30	52.57	9.46	52.57	42.98	75.75
MS	0.5	36.05	77.92		77.92		91.66
CS	1	36.51	93.72	17.63	93.72	57.93	98.56
VCS	2	38.51	99.66	22.03	99.66	67.69	99.94
VFG	4	39.03	100.00	22.44	100.00	71.58	100.00
FG	8	40.57	100.00	22.54	99.90	74.14	100.00
MG	16	45.81	100.00	22.73	100.00	79.27	100.00
CG	32	100.00		55.87		96.21	
VCG	64			100.00		100.00	
SC	128						
LC	256						
SB	512						
MB	1024						
LB	2048						

Tabla 13 Cálculo de porcentajes solidos de fondo muestra 1. Fuente: HIDROTOAPI

El porcentaje de arena gruesa es el comprendido entre toda la fracción de partículas que lleguen hasta el tamiz de 0.5mm de abertura. El porcentaje de arena fina se determina toda fracción que llegue hasta el tamiz de 0.05mm de abertura. Y por último se encuentran los limos que pasan por el tamiz de hasta 0.005mm de abertura, de forma análoga podemos determinar el porcentaje de cada tamaño de partículas.

Punto de aforo del caudal sólido.

Curva granulométrica	Sección Transversal	Coordenadas UTM
M1	1+000	17 M
M2		
M3		738788.18 m E
M4		
M5		
M6		9961498.54 m S

Tabla 14 Coordenadas de ubicación del punto de muestreo.

Se presenta la curva granulométrica presente en las muestras:

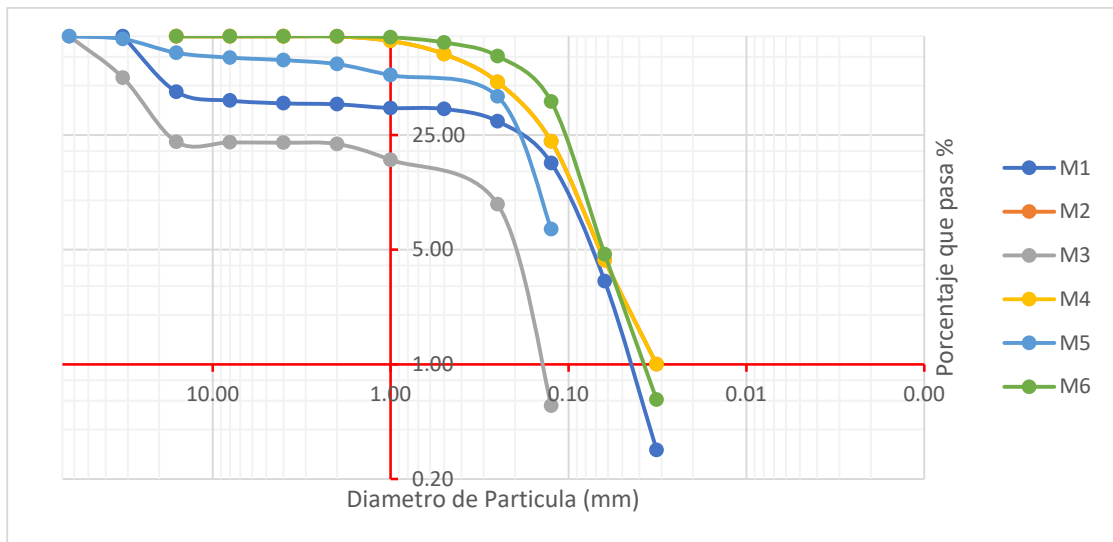


Figura 19 granulometría sedimento de fondo, en base a la tabla 4

En la Figura 19, la grisimetría indica que el material transportado mayormente arena media y fina, lo que sugiere que el régimen de flujo es lo suficiente mente energético para movilizar sedimentos en suspensión. La presencia de fracciones finas en las muestras M1, M2, M3, M4 y M6 indica que, en condiciones de baja velocidad de flujo, estos sedimentos podrían depositarse progresivamente, afectando la eficiencia de la captación.

La curva de la muestra M5 se diferencia del resto, presentando una mayor proporción de material grueso y una menor cantidad de finos. Esto sugiere que proviene de una zona con mayor energía hidráulica, donde las partículas finas han sido removidas o no han podido depositarse



Figura 20: Recolección de sedimentos por tamizaje en el río Pilatón, estación ESPERIE.

5.1.5 Granulometría partículas en suspensión

El ensayo granulométrico por higrómetro es fundamental para estimar la distribución de tamaños de partículas pasantes por el tamiz #200 a partir de esta prueba, es posible determinar la proporción de limos y arcillas en una muestra de suelo, información de suma importancia para predecir el comportamiento del terreno

Al igual que la información de granulometría de fondo se obtuvo la información de 6 muestras las cuales se procedió a su tabulación las cuales se representan de manera independiente a continuación:

En la tabla 6 recolecta la información de las diversas muestras los diferentes porcentajes de partículas más finas encontrados en los informes del laboratorio de LANCAS, estos informes están enfocados principalmente en la fracción de limo y arcilla del sedimento utilizando de igual manera la clasificación de suelos de Atterberg, el cual nos enfoca el tiempo de decantación de las partículas de 0.045mm hasta 0.005mm y arcillas las muestras con los diámetros de 0.003mm y 0.001mm. De igual manera se promediaron los diámetros y porcentaje de partículas decantadas de acuerdo al tiempo.

De igual manera se logró desarrollar una visita de campo a los aforos de caudal para la recolección de muestras en el río Pilatón para su envío a laboratorio de LANCAS.



Figura 21: La figura (a) se puede visualizar el montaje del muestreador en la tarabita de la estación ESPERIE, en la figura (b) se puede ver la forma de recolección de muestras en el río Pilatón.

Para la recolección de muestras de sedimentos en suspensión se utilizó un muestreador US Dh74: el cual está fabricado en metal resistente a la corrosión (generalmente aluminio o acero inoxidable). Posee una forma aerodinámica para minimizar la interferencia con el flujo de agua. Tiene un peso estándar de alrededor de 14 kg (sin incluir la botella de muestreo). Este peso le permite mantenerse estable en corrientes con velocidades moderadas. Diseñado para contener botellas de muestreo estándar (usualmente de vidrio o plástico) con una capacidad de 0,5 a 1 litro.

Tiempo transcurrido	M1		M2		M3		M4		M5		M6		Promedio de partículas	Promedio de diámetro de partículas
	Diámetro de Partículas	Porcentaje más fino	Diámetro de Partículas	Porcentaje más fino	Diámetro de Partículas	Porcentaje más fino	Diámetro de Partículas	Porcentaje más fino	Diámetro de Partículas	Porcentaje más fino	Diámetro de Partículas	Porcentaje más fino		
Mins	mm	%	mm	%	Mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	Mm	%
1	0.049	43.479	0.048	39.467	0.049	45.291	0.049	45.193	0.045	55.299	0.045	55.299	0.048	47.34
2	0.037	23.716	0.036	20.673	0.036	35.445	0.036	33.404	0.034	36.361	0.034	36.361	0.036	30.99
5	0.024	17.767	0.023	15.035	0.023	25.599	0.023	25.544	0.022	19.317	0.022	19.317	0.023	20.43
15	0.014	12.253	0.013	11.652	0.014	19.692	0.013	19.649	0.013	13.635	0.013	13.635	0.013	15.09
30	0.01	10.277	0.009	9.773	0.01	15.753	0.01	11.79	0.009	11.742	0.009	11.742	0.010	11.85
60	0.007	8.301	0.007	6.014	0.007	11.815	0.007	7.86	0.007	9.848	0.007	9.848	0.007	8.95
120	0.005	4.348	0.005	4.698	0.005	7.877	0.005	5.895	0.005	6.06	0.005	6.06	0.005	5.82
240	0.003	2.372	0.003	2.255	0.003	5.514	0.003	3.537	0.003	4.734	0.003	4.734	0.003	3.86
1140	0.001	0	0.001	0	0.001	3.938	0.001	1.965	0.001	1.894	0.001	1.894	0.001	1.62

Tabla 15 Granulometría partículas en suspensión

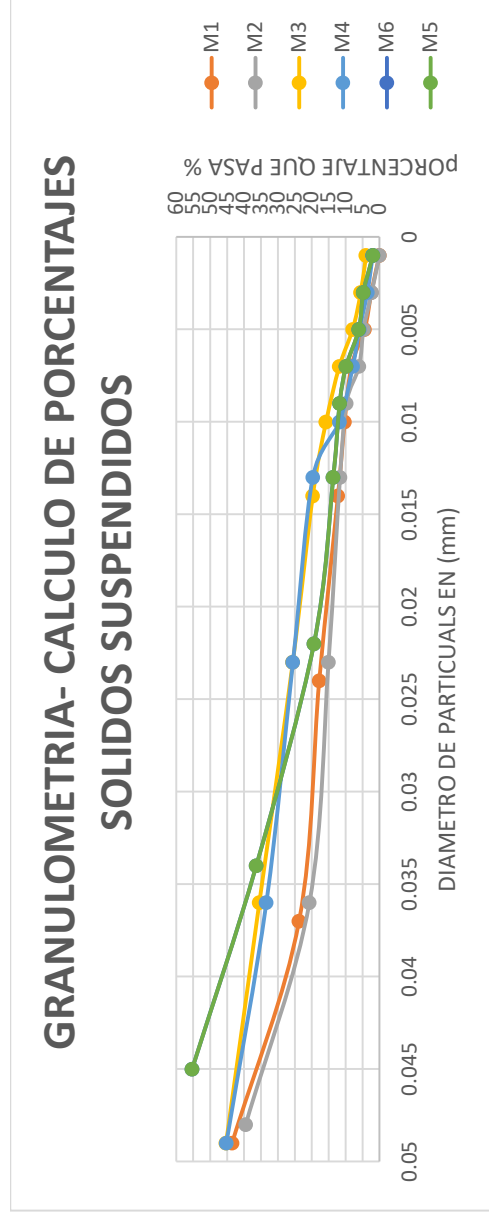


Figura 22: Histograma de solidos en suspensión

En los primeros minutos de (1-5 min), los diámetros de partículas son relativamente grandes (0.049mm-0.024mm), lo que indica que las partículas más gruesas aún están en suspensión, a partir de 10-30 minutos, se observa una reducción significativa de partícula, indicando que las partículas mas grandes han sedimentado y las finas permanecen en la columna de agua, en tiempos largos 120-1140 minutos solo quedan partículas muy finas (<0.005mm, limo y arcillas) lo que confirma que la sedimentación de partículas gruesas ocurre en las fases.

La presencia predominante de partículas menores a 0.05 mm sugiere que los sedimentos en suspensión están influenciados por el régimen de flujo y pueden ser transportados a grandes distancias antes de depositarse. Esto es especialmente importante en la captación Pilatón, donde la acumulación de limos y arcillas podría reducir la eficiencia hidráulica de la infraestructura.

5.1.4 Modelación digital del terreno

5.1.6 CAD

Se delimito el área a trabajar de 2657705 m² y se procedió a crear una superficie. Conforme a las curvas de nivel y batimetrías presentadas zona de muestreo se ha evaluado desde el embalse de la Captación en las Siguietes coordenadas UTM 9961596.57N, 737983.61E.

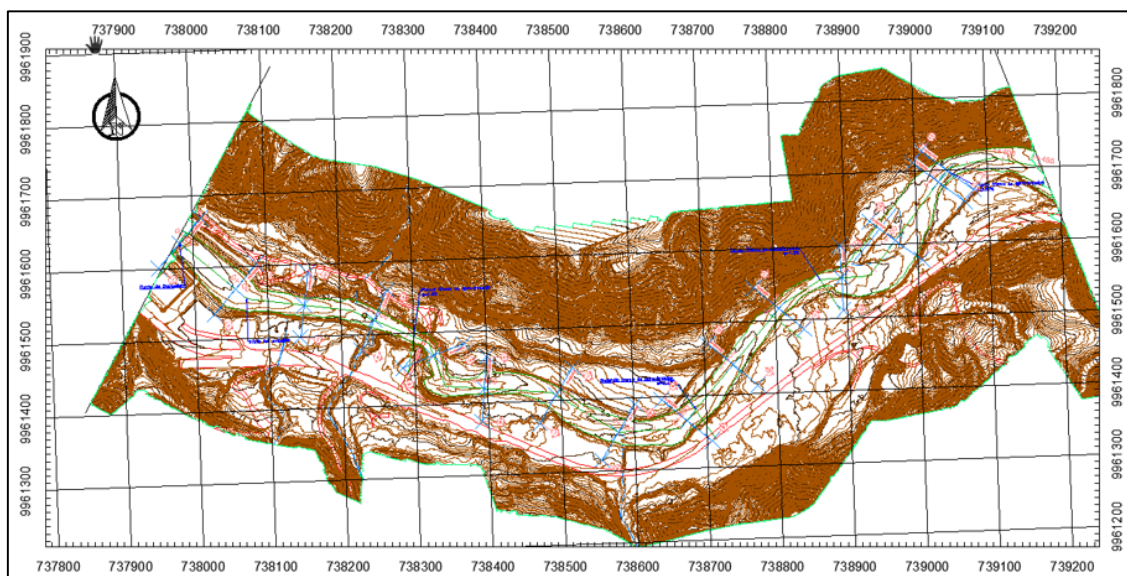


Figura 23:esquema general del área de trabajo vista en superficie.

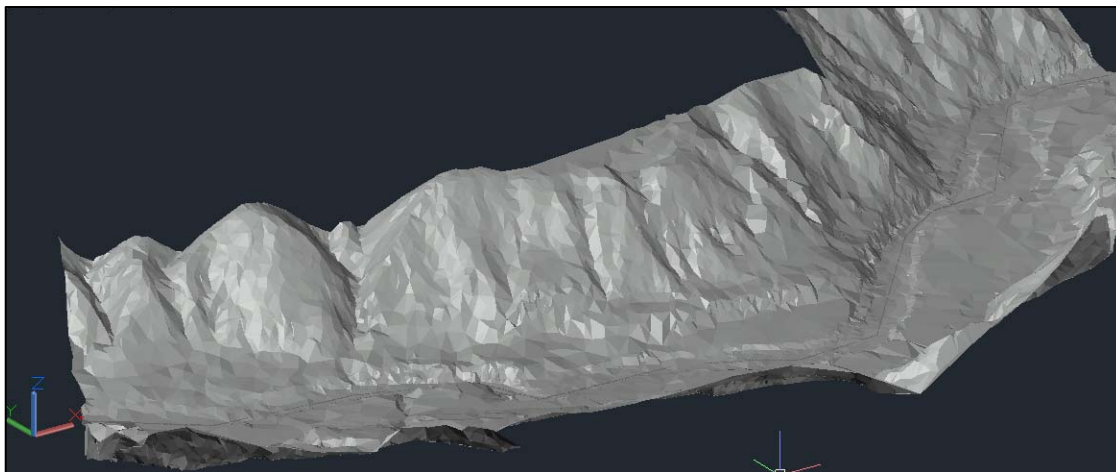


Figura 24: Modelación 3D del área de trabajo.

En la Figura 23 se puede visualizar toda la superficie de trabajo ya extraída de las batimetrías y curvas de nivel proporcionadas por HIDROTOAPI y en Figura 24 la creación de la superficie lista para trabajar en diversos softwares. Se recomienda trabajar directamente con curvas de nivel y usar el comando `map_export` para evitar la pérdida de información al convertirla en otro archivo y poder trabajarla en GIS este comando transforma las curvas de nivel en un archivo Shapefile.

5.1.7 GIS

Tras crear en el software CAD el archivo shapefile se procedió a trabajar en el Software GIS, con la herramienta `create_to_Tin` creamos nuestro modelo de superficie digital (MDT) crea como se puede visualizar en la Figura 25 este procedimiento es recomendable por la triangulación, es decir representa con precisión estructuras geométricas abruptas, como canales, bordes de ríos, y cambios de pendiente pronunciados, es útil si se necesita analizar micro topografía que influya en la dirección del flujo y la deposición de sedimentos. El archivo creado es (.TIN).

A continuación, creamos nuestro ráster con la herramienta: `conversion>From_TIN_to_Raster` en el cual nuestra conversión ideal de celda es de 0.5 por la razón que se genera superficie en base al formato TIN que ya está representando en la celda en variaciones del 0.5 y 1 la superficie creada con el Formato TIN.

En el mismo software Gis trabajamos dibujando las áreas y asignamos los diferentes usos de suelo

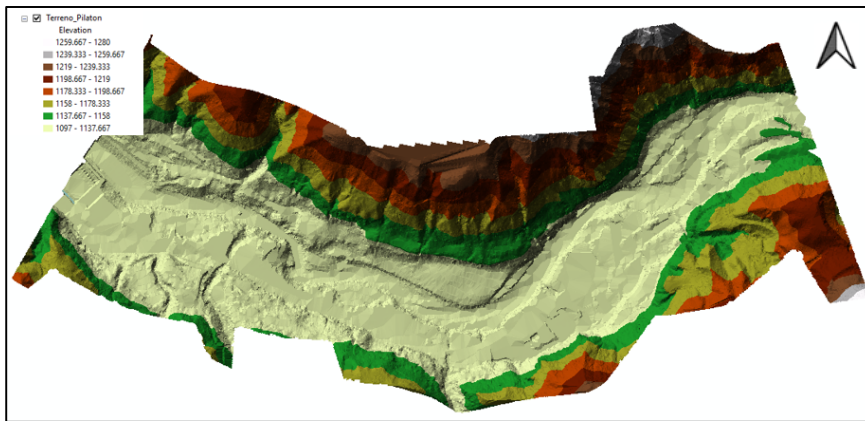


Figura 25: Archivo TIN de superficie de trabajo.

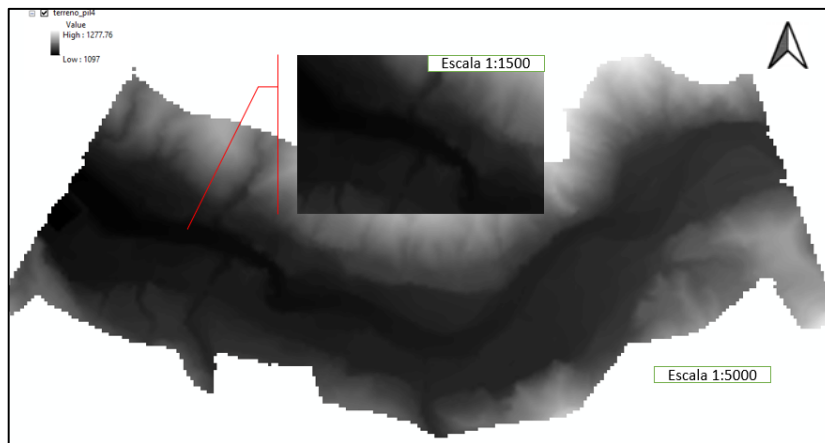


Figura 26: DEM creado en el software GIS escala 1:5000

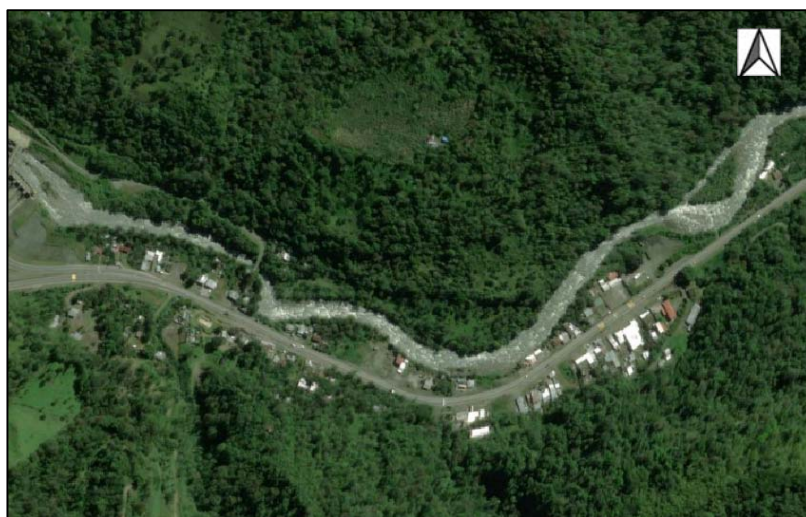


Figura 27: Ortofoto creada en el software GIS escala 1:5000

Se generó una ortofoto, para la georreferenciación de la zona de estudio, la ortofoto de la Figura 27 se consiguió de archivos satelitales en este caso se trabajó con Bing satélite debido a que presenta una mayor resolución de imagen en nuestra zona de estudio, permitiendo de esta manera tener información más real a la zona de estudio.

Es importante georreferenciar todos nuestros archivos para poder trabajar en los distintos softwares de modelación en este caso se utilizó la zona: WGS_1984_UTM_Zone_17S

5.1.8 Calibración de modelos

5.1.4.1 Mallado

Para el mallado de la para la simulación se consideraron tres aspectos el costo computacional que requiera para cada simulación, áreas de interés y el tiempo de simulación. Considerando una malla híbrida combinando mallas estructuradas y no estructuradas.

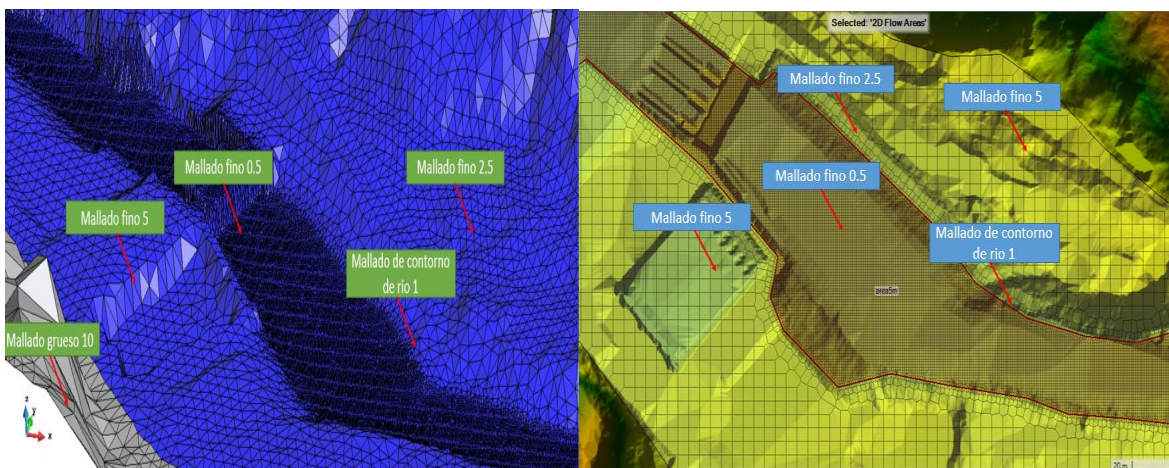


Figura 28 y 29 Mallado del punto de captación, el mallado en Iber a la izquierda y a la derecha ras-mapper.

El mallado consta de la siguiente manera puesto a representar la menor cantidad de pérdida de datos: fino 0.5 para el río, 1 para bordes de río, 2.5 para los contornos, 5 para áreas aledañas al río y 10 para montañas.

5.1.4.2 HEC-RAS

Para la calibración de datos en el sistema se cómo se mencionaba en capítulos anteriores se trabajó utilizando el hidrograma de caudal medio, con esto logramos determinar de manera constante el comportamiento del río durante días normales y nos da un resultado aproximado de velocidades y

calados en todo nuestro trayecto incluyendo nuestras ares de interés. En este caso son tres perfiles transversales en los que se van a trabajar:

- Perfil de control es el lugar en donde establecemos la relación y semejanza del modelo con el perfil entregado por parte de Hidrotopi es decir en la estación Esperie que se ubica a 900m aguas arriba del punto de captación.

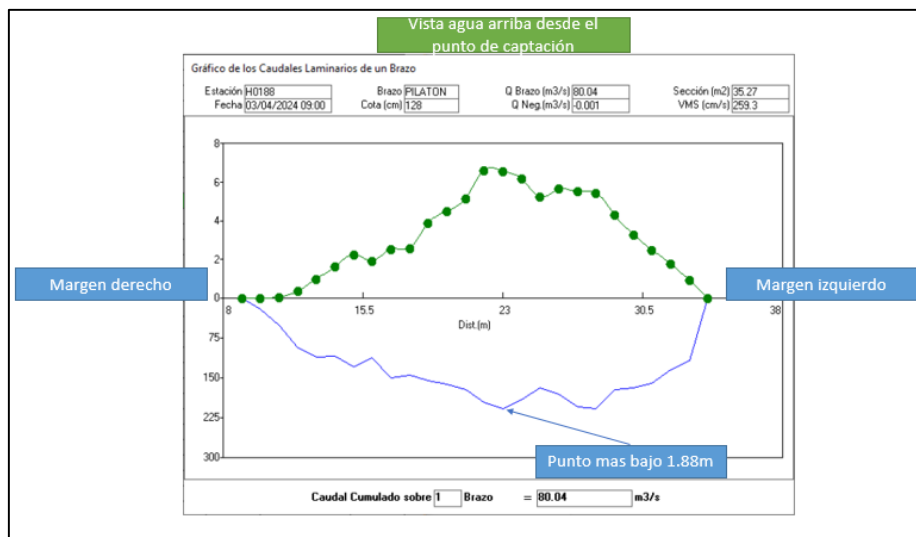


Figura 29 perfil en corte del rio Pilatón en la estación la Esperie.

El punto más bajo encontrado en el perfil de corte se encuentra a una altura de 1.88m

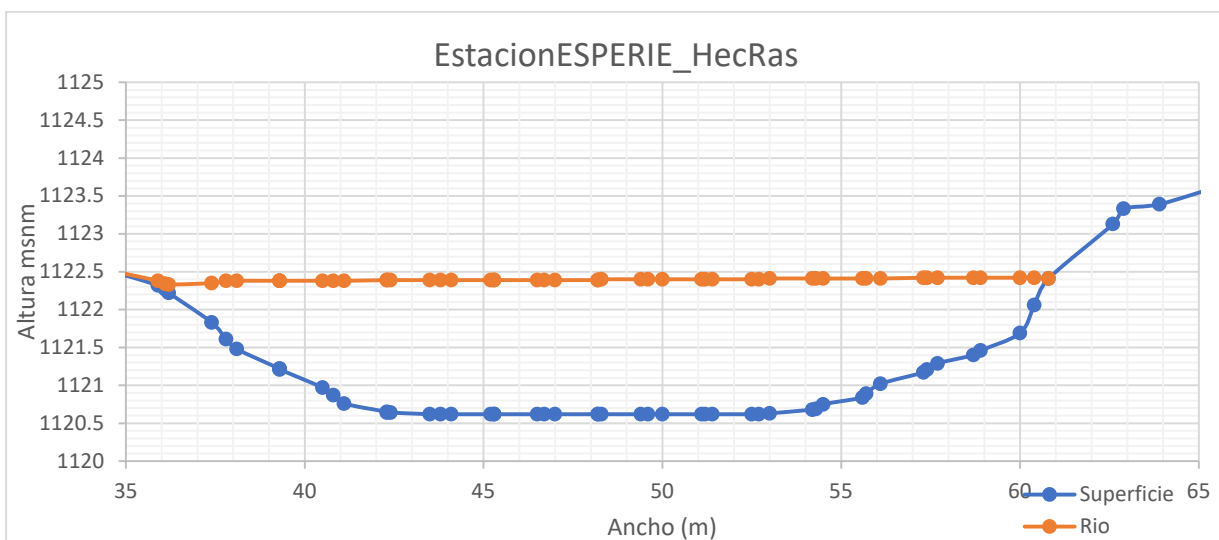


Figura 30 Creación de superficie estación Esperie software Hec-Ras

En el software de Hec-Ras la superficie de fondo se ubica en la cota 1120.62 msnm, el espejo de agua posee una longitud de 26m de igual los valores varían, pero por promedio se ubican en la cota 1122.39 msnm con un caldo de 1.77m.

5.1.4.3 Iber primera

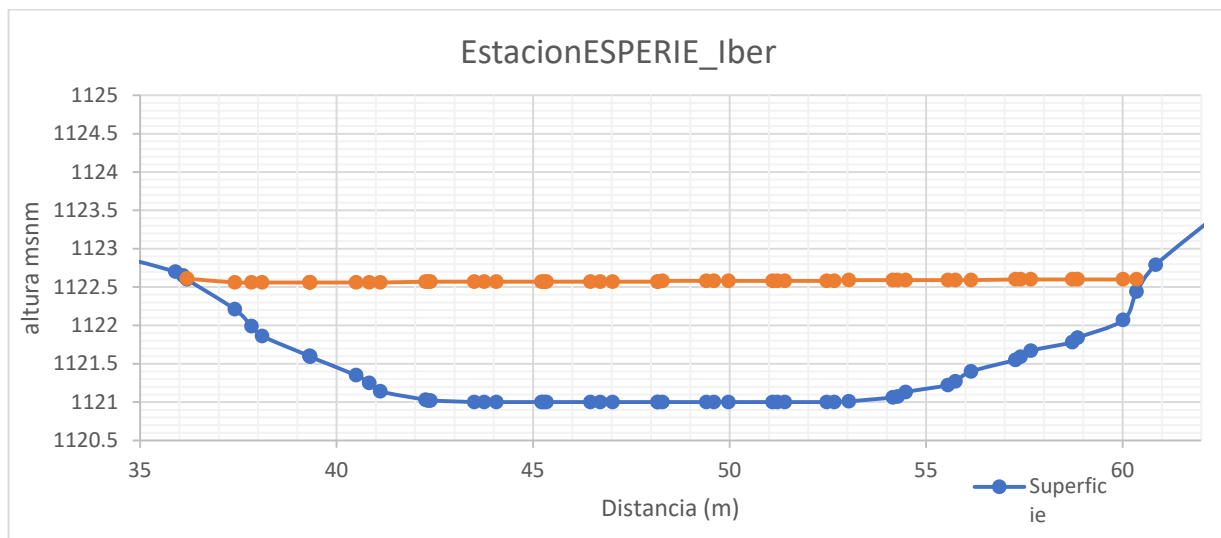


Figura 31 Creación de superficie estación Esperie software Iber

En la modelación de Iber los resultados de la primera simulación nos refleja el punto más bajo de la superficie de terreno se encuentra en la cota 1120.77 msnm y el espejo de agua de 24.1m de longitud y se ubica en la cota 1122.57msnm como resultado un calado de 1.80 m.

- Nuestro segundo punto de control se encuentra aproximadamente a 150m aguas arriba del punto de captación. Se considera el área del embalse de 100m y 50m para el desarrollo de cálculos próximos
- El tercer punto de control es 1m agua arriba del punto de captación es decir el embalse debido a que se considera el punto de llegada de sedimentos.

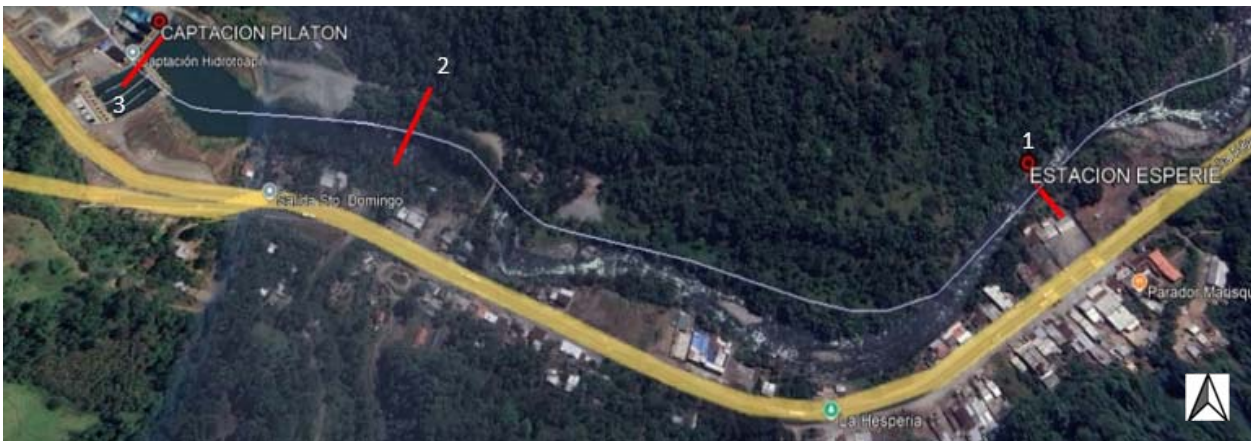


Figura 32 Ubicación de puntos de control en el tramo de aproximación.

Tras la primera simulación o modelo de calibración se establecen que el área principal se puede refinar la malla para mejorar los cálculos, pero eso si el consumo computacional será sumamente alto de esta manera se justifica el uso de un área más corta para un nuevo mallado y donde se hará los cálculos de sedimentación y de caudal.

En el software de Hec-Ras tras representar el perfil longitudinal una pendiente media 2.71% y en el software de Iber una pendiente media de 2.84% los cuales son próximos a la pendiente dibujada y calculada en el software CAD de 2.775%.

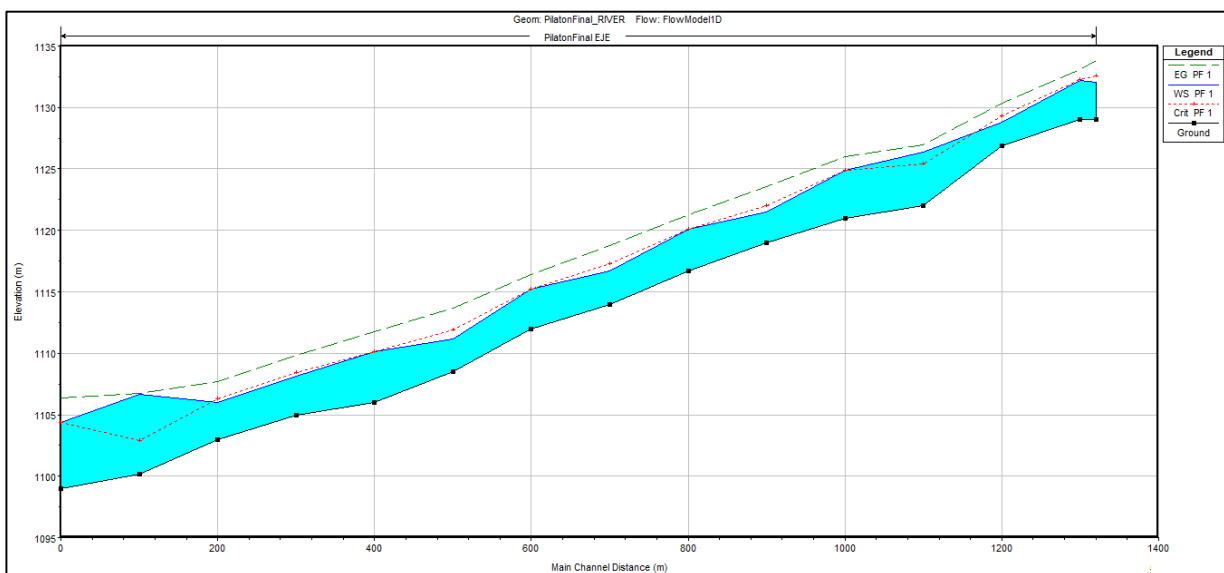


Figura 33: Vista del perfil longitudinal, realizado en HEC-RAS.

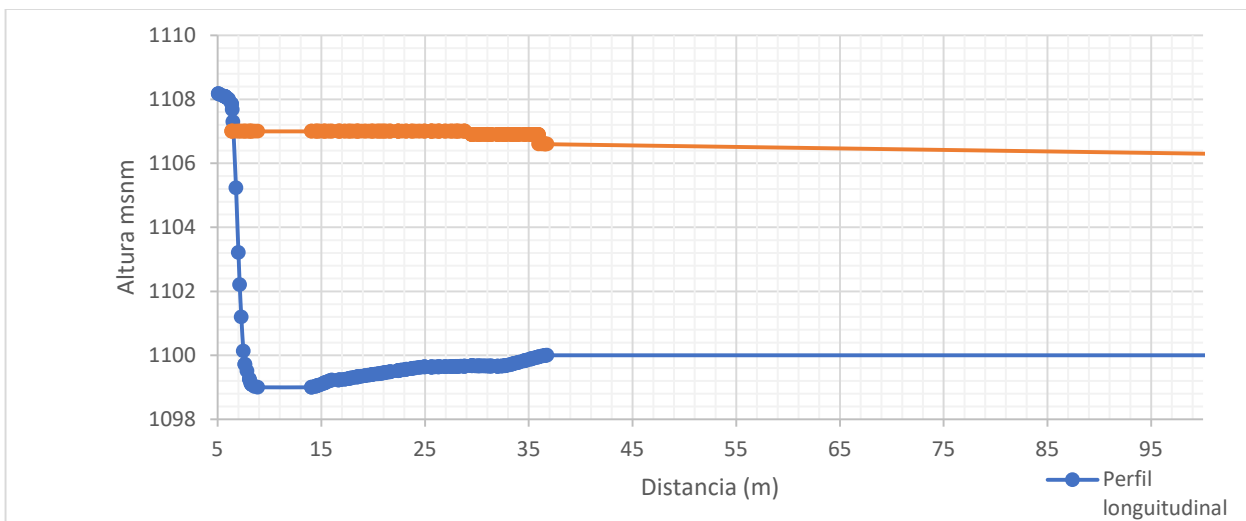


Figura 34 Perfil longitudinal del del embalse

5.1.5 Parámetros de contornos

Para los parámetros faltantes de utilización de información como son pendiente se utilizó el software CAD, el cual nos brinda una pendiente de 2.78% pero para efectos de simulaciones se trabajó con el 2.8%, también como coeficiente de Manning se sugiere trabajar con el propuesto por LOMBARDI que es de 0.045 para el río y 0.04 para las orillas del río pero como parte del cálculo para ajustar el Coeficiente de Manning del Río y que el modelo este lo más próximo a las condiciones naturales a las que se enfrenta se establecieron los siguientes datos:

- Material del lecho: grava $n_b=0.025n$
- Irregularidades moderadas $n_1=0.005n$.
- Variaciones moderadas en la sección transversal $n_2=0.005n$.
- Vegetación ligera $n_3=0.010n$
- Sin condiciones especiales $n_4=0.000n$
- Sinuosidad leve $m=1.1$

$$n = (0.025 + 0.005 + 0.005 + 0.010 + 0.000) \cdot 1.1 = 0.045 \cdot 1.1 = 0.0495$$

Con este número de Manning se procedió a trabajar en el lecho del río, y se utilizaron los coeficientes de Rugosidad para las diferentes áreas con relación a los tipos de suelo que posee nuestro modelo numérico.

Para el cálculo del número de Courant se determina que en el esquema hacia adelante en el tiempo y hacia atrás en el espacio se dice tiene que ser menor a 1 para que el esquema sea estable y mayor a 1 el esquema será inestable.

Como se menciona antes nuestro tamaño de celda tiene un valor de 0.5m con los caudales medios se establece un caudal promedio de 27.0754 m³/s si analizamos el área de la sección transversal se tiene que:

$$A = B \cdot h = 26.0 \cdot 1.3 \approx 33.8m^2$$

Calculamos la velocidad del flujo.

$$v = \frac{A}{Q} = \frac{27.0754}{33.8} \approx 0.801m/s$$

Ajustamos el paso del tiempo para C=1.

$$\Delta t = \frac{C \cdot \Delta x}{v} = \frac{1 \cdot 0.5}{0.801} \approx 0.624s$$

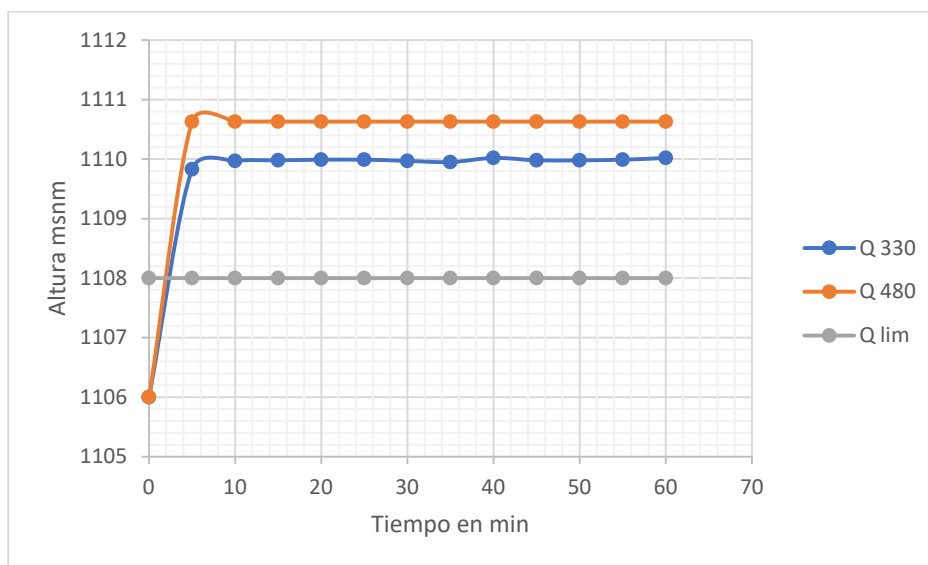
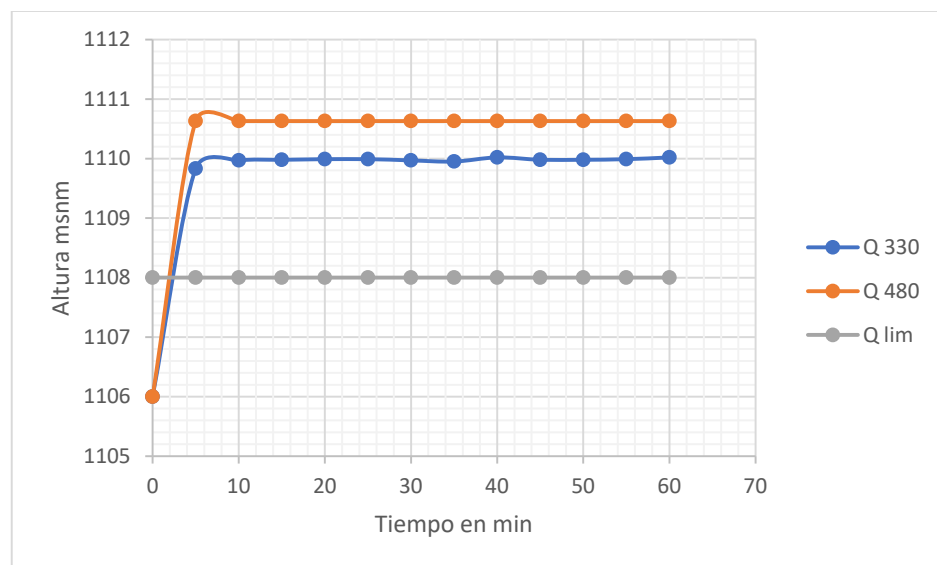


Figura 35 evolución del Calado en el tramo del embalse



En el gráfico de la Figura 35 se logra observar el tiempo en el que el modelo se estabiliza, así como obtener una altura promedio en los puntos de interés en el tramo de aproximación al embalse.

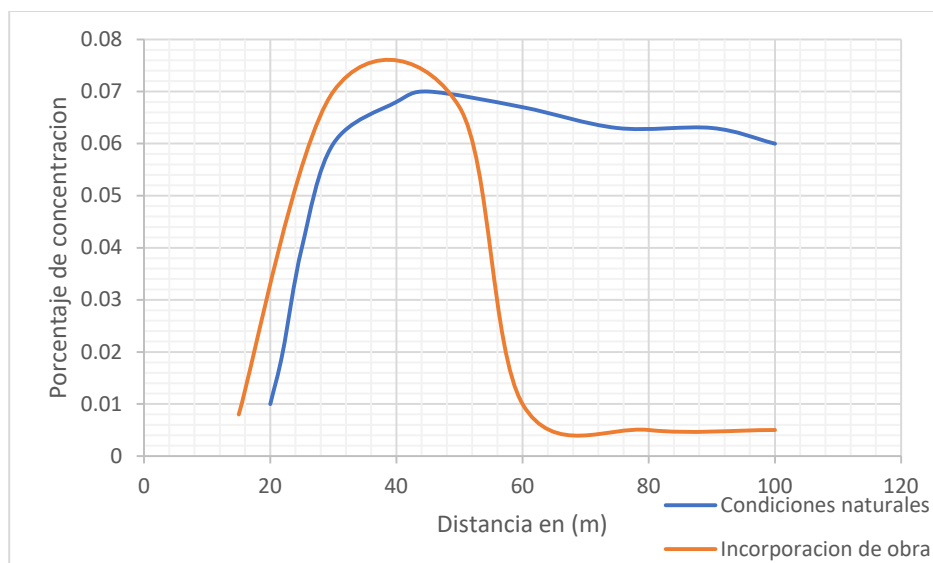
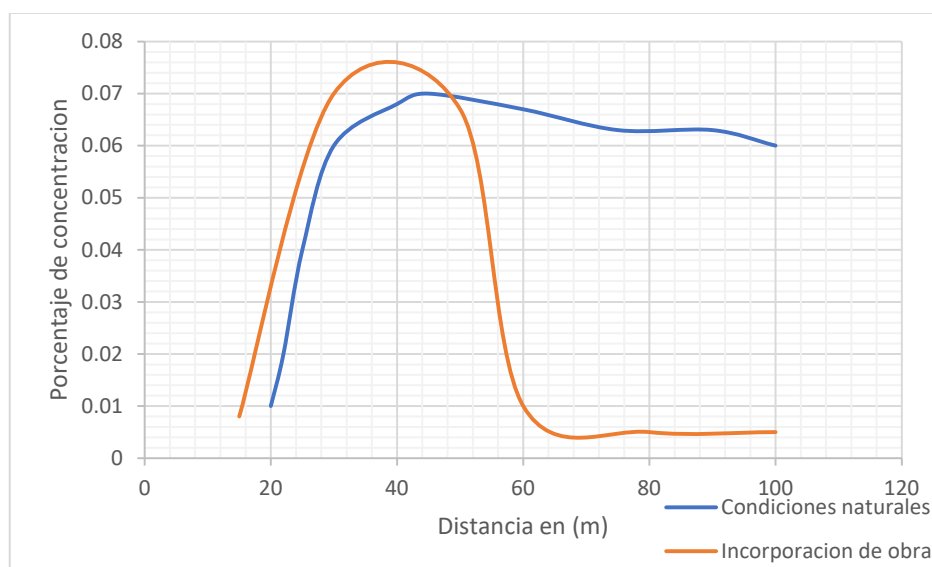


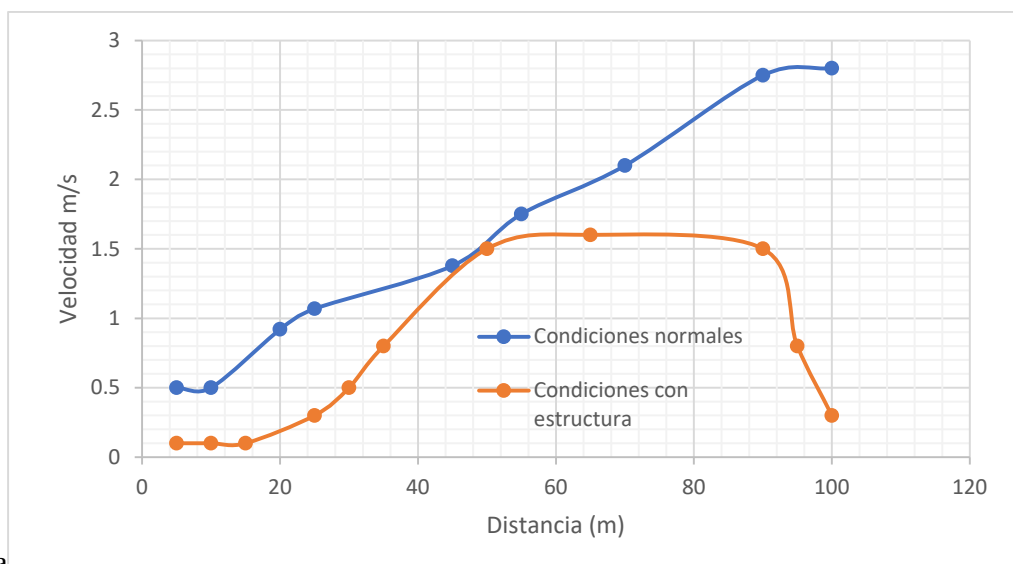
Figura 36 Distribución de las concentraciones de sedimentos en la sección próximas a la captación.



En la

Figura 36 podemos determinar en condiciones naturales, la concentración de sedimentos aumenta hasta alcanzar un pico cerca de los 50 m y luego desciende lentamente. Con la incorporación de la obra, la concentración de sedimentos también crece hasta los 50 m, pero luego cae abruptamente cerca de los 60 m, manteniéndose casi en cero después.

Se observa que la obra provoca una reducción drástica de la concentración de sedimentos después del pico. Esto indica que la obra podría estar actuando como un mecanismo de retención o sedimentación, disminuyendo la cantidad de material en suspensión aguas abajo.



En la

Figura 37 la distribución de velocidades en el embalse con la estructura se logra a estabilizar cerca

del 1.5 m/s y logra una reducción de velocidad de 0.5 m/s y en condiciones normales se va regularizando poco a poco esto sucede en los dos softwares

La estructura provoca una reducción significativa de la velocidad y favorece la sedimentación, lo que sugiere que está funcionando como un mecanismo de control de sedimentos. Sin embargo, es importante verificar si genera zonas de acumulación excesiva que podrían requerir mantenimiento frecuente.

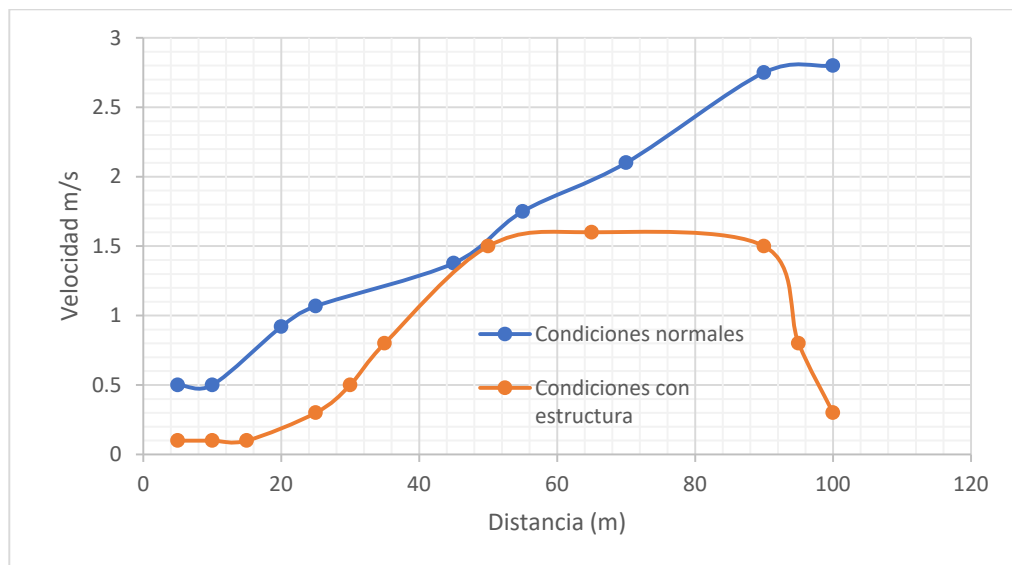


Figura 37 velocidades presentes en la modelación.

La grafica de la Figura 38 tiene por objetivo evaluar la variación de la tensión de fondo a lo largo de todo el embalse. En condiciones normales, la tensión de fondo aumenta hasta alcanzar un pico cercano a 45 unidades alrededor de los 50 m, para luego disminuir gradualmente.

Sin la obra de captación, la tensión de fondo se mantiene significativamente más baja, con un pico máximo de aproximadamente 15 unidades, antes de descender en la última parte del tramo.

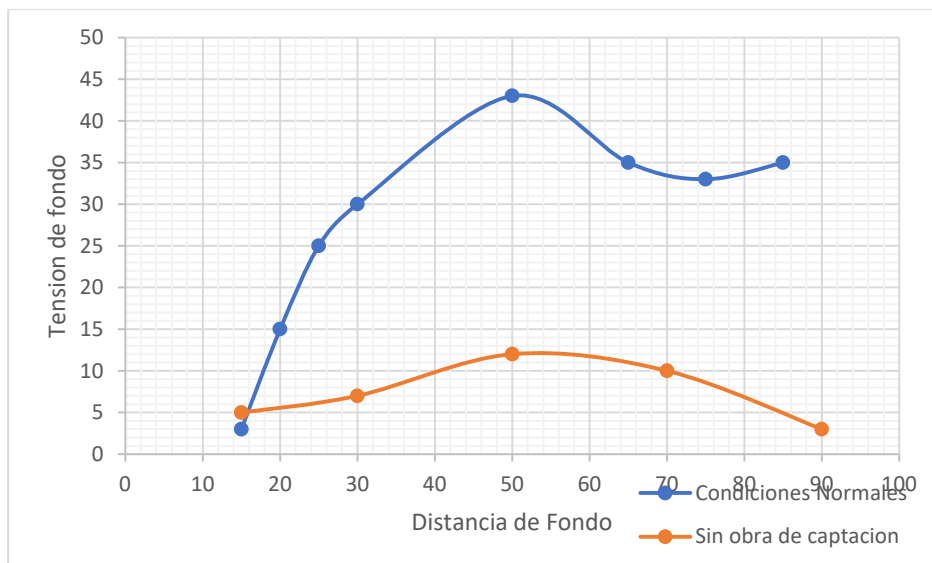


Figura 38 tensiones de fondo en el embalse

La presencia de la obra de captación incrementa notablemente la tensión de fondo en la mayor parte del tramo, esto indica que hay una mayor fuerza sobre el lecho del cauce, lo que puede estar relacionado con una mayor velocidad del flujo y una mayor capacidad de arrastre de sedimentos.

De igual manera tenemos en la figura 38 la variación de profundidad de agua en la sección transversal de ingreso como la de salida en la figura 39.

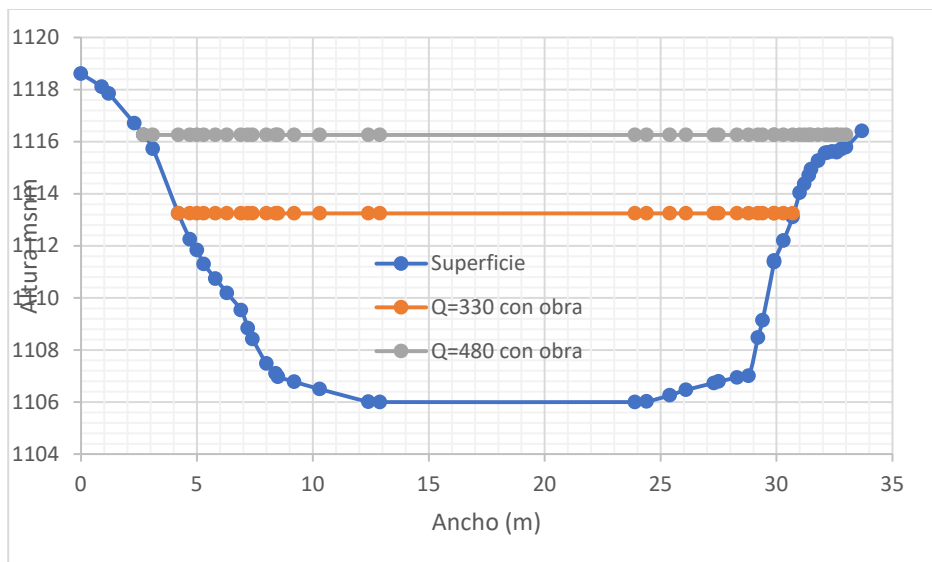


Figura 39 perfil de ingreso al embalse.

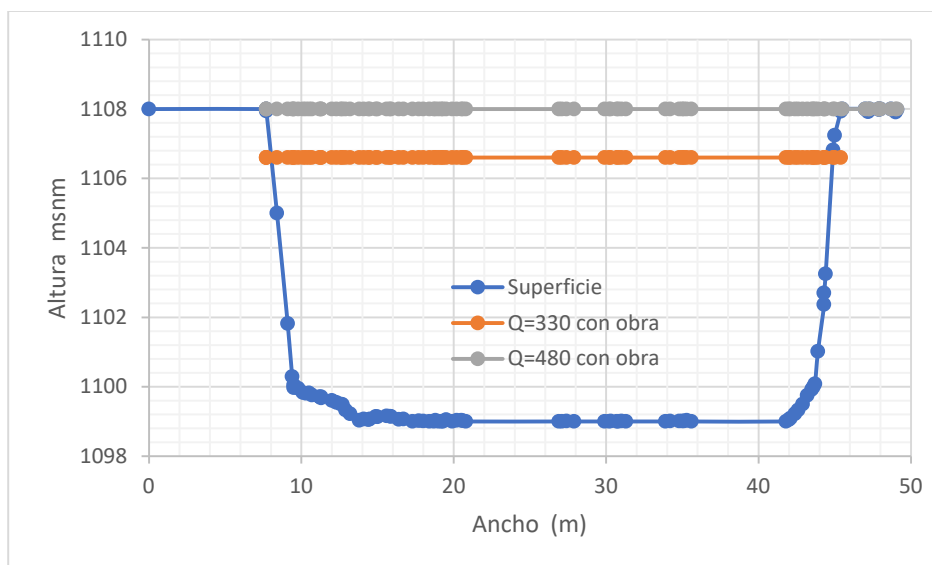
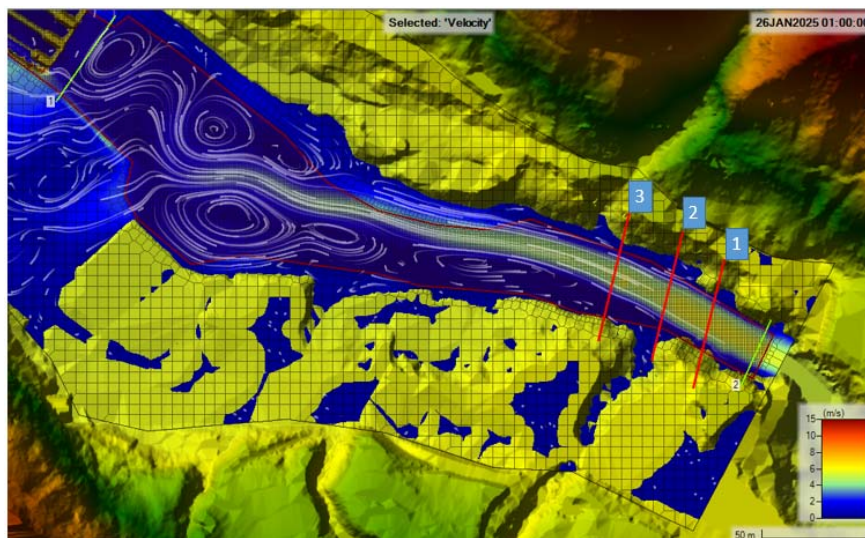


Figura 40 Perfil de salida en el embalse



En la

Figura 41 representan a las secciones transversales 1,2 y 3 como posibles profundidades de socavación de acuerdo a que son zonas con la mayor velocidad de entre 4m/s a 8m/s lo cual se considera como velocidades idóneas para producir una socavación.

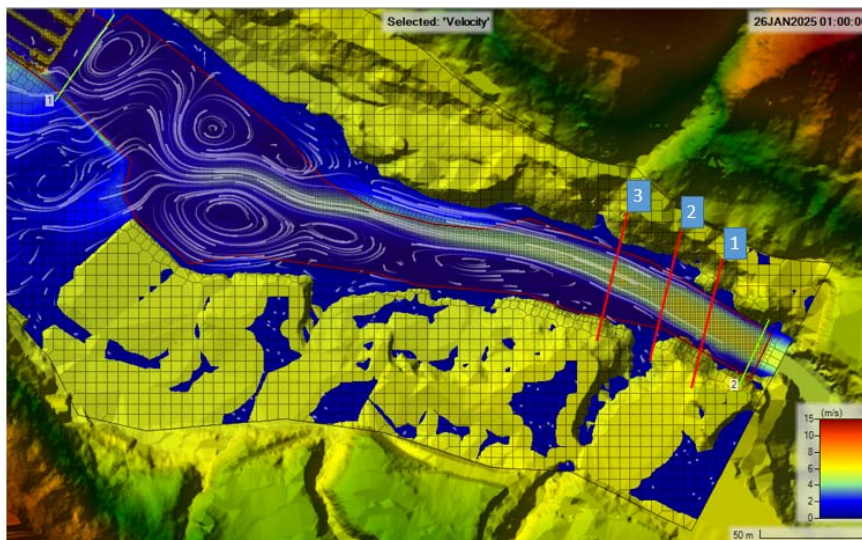


Figura 41 Perfiles de socavación en el tramo de aproximación al embalse.

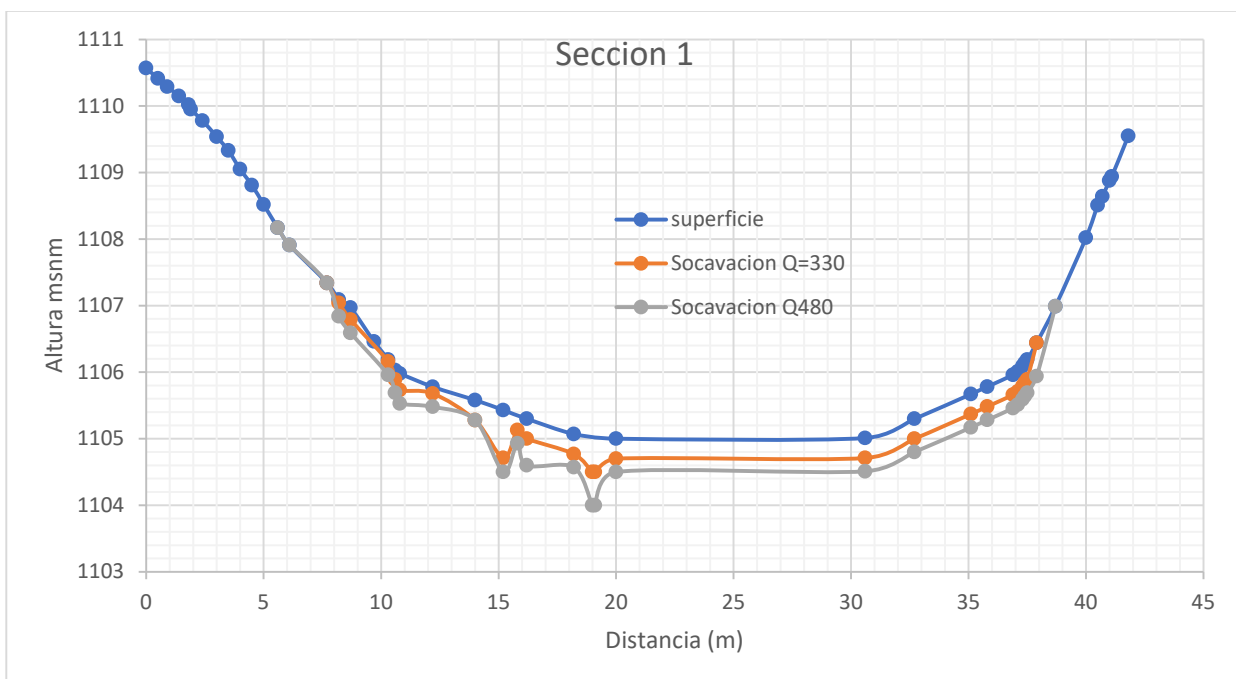


Figura 42 Sección 1 de socavación para los distintos caudales.

La socavación aumenta progresivamente con el caudal. Para el caudal de $330 \text{ m}^3/\text{s}$ (periodo de retorno de 25 años), la profundidad de socavación alcanza $\sim 1.8 \text{ m}$, mientras que para $480 \text{ m}^3/\text{s}$ (periodo de retorno de 500 años), supera los 2.5 m . La alta velocidad del flujo ($4\text{--}8 \text{ m/s}$) en esta zona genera esfuerzos cortantes significativos, lo que moviliza partículas gruesas (gravas y arenas) del lecho. La pendiente local (2.8%) y la ausencia de estructuras de disipación agravan el fenómeno.

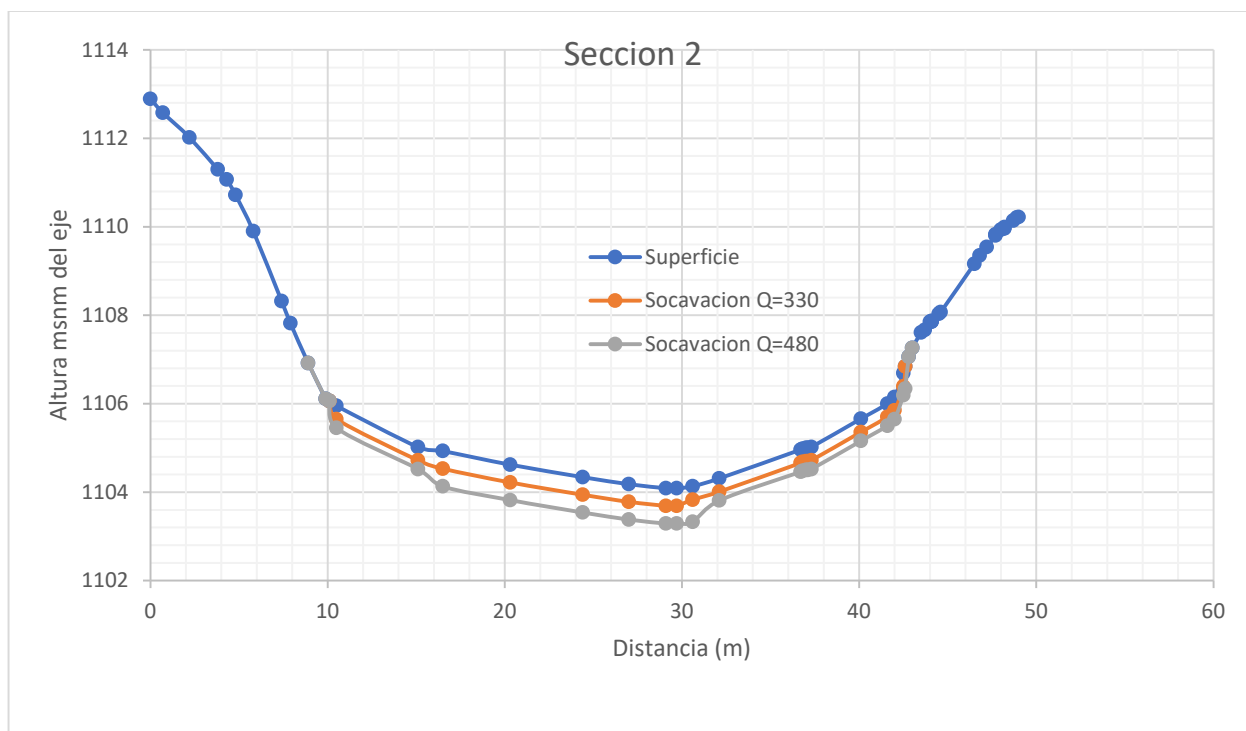


Figura 43 Sección 2 de socavación para los distintos caudales.

La socavación es menos pronunciada que en la Sección 1, con valores máximos de ~ 1.5 m para 480 m^3/s . La geometría más estable del cauce y la presencia de material cohesivo (limos) reducen la erosión. Además, la velocidad disminuye debido a la ampliación del ancho del río en este tramo.

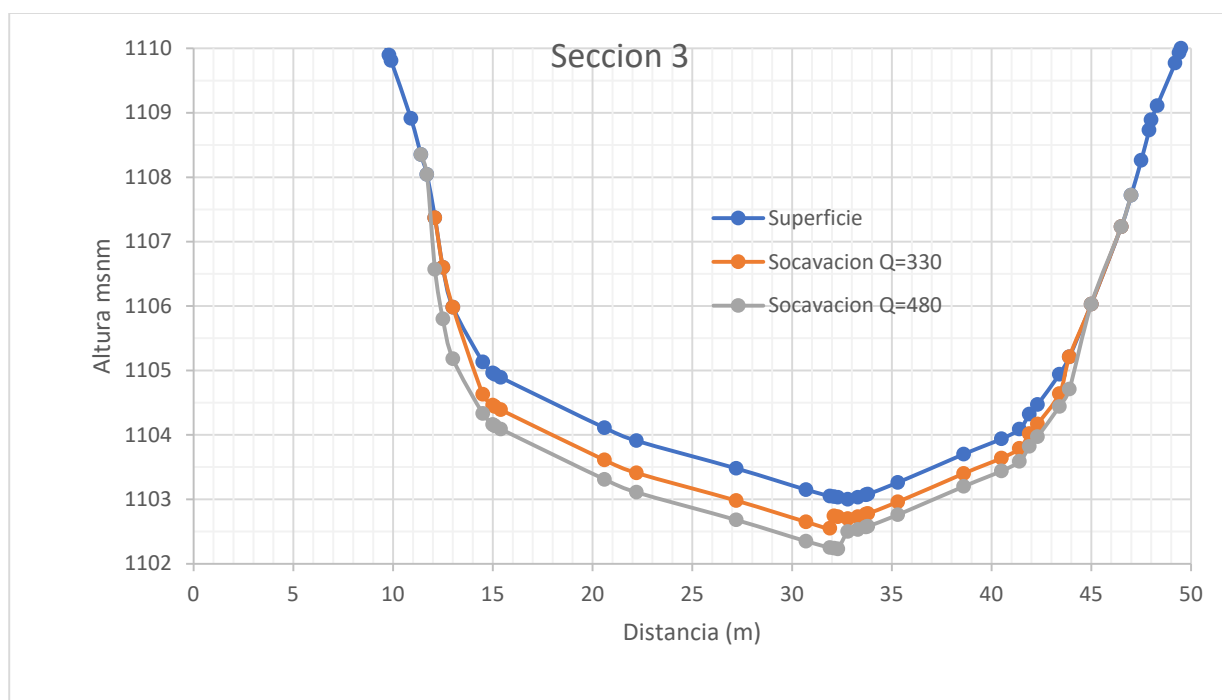


Figura 44 Sección 3 de socavación para los distintos caudales.

La socavación es mínima (<0.5 m incluso para 480 m³/s). El lecho está compuesto por roca fracturada y gravas cementadas, que ofrecen mayor resistencia a la erosión. Además, la velocidad del flujo disminuye por la menor pendiente (1.5%). Esta zona no representa un riesgo inmediato, pero su estabilidad sugiere que los sedimentos erosionados aguas arriba podrían acumularse aquí a largo plazo.

5.1.6 Escenario 1 periodo de retorno de 25 años caudal 330m³/s

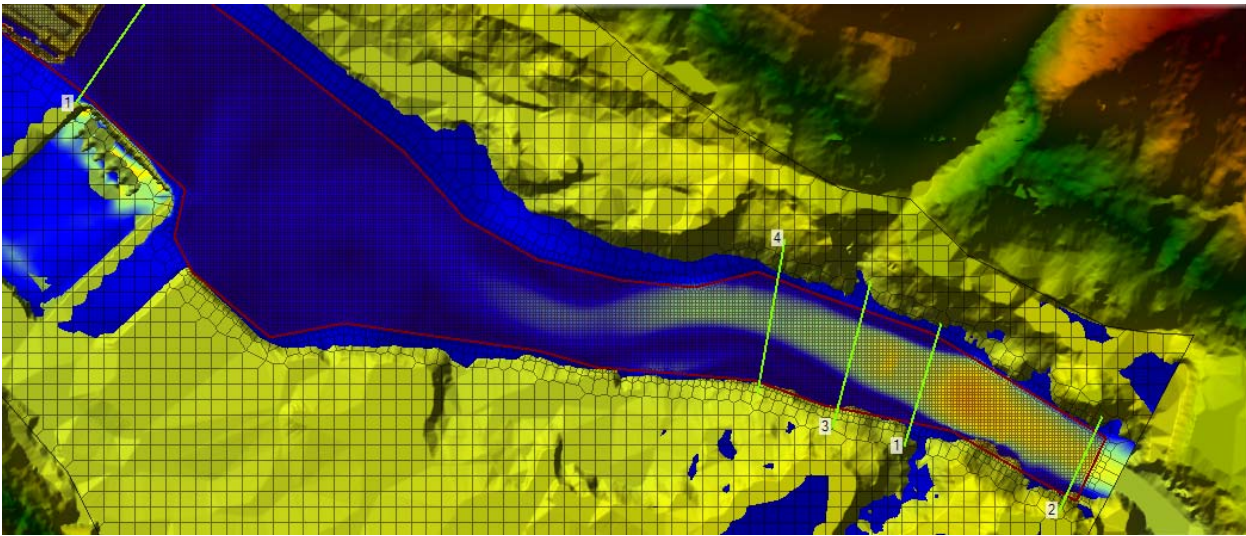


Figura 45 socavación Hec-Ras para el caudal 330m³/s

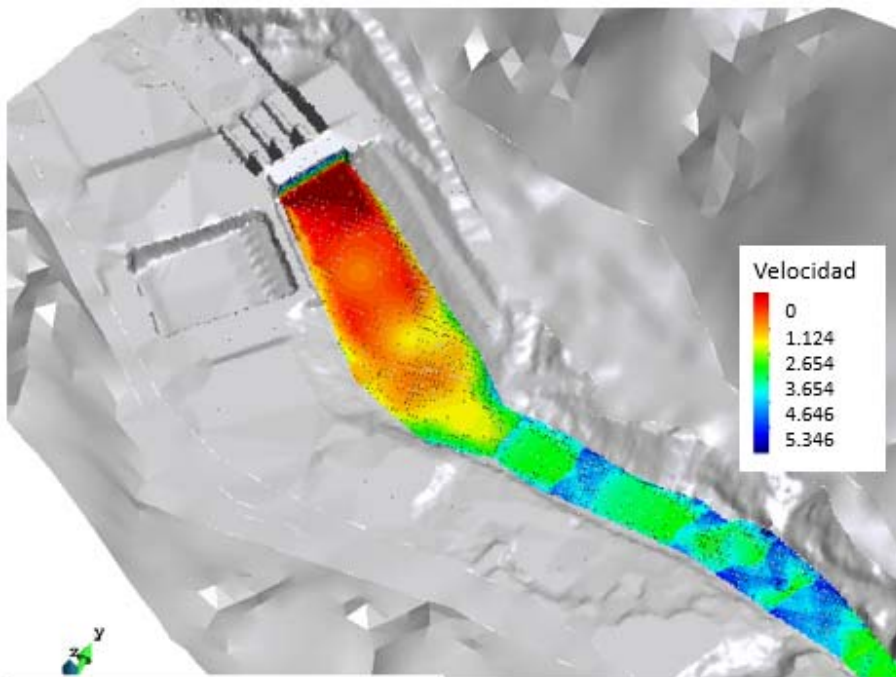


Figura 46 socavación Iber para el caudal 330m³/s

Las velocidades oscilan entre 4–6 m/s en la Sección 1, disminuyendo a 2–4 m/s en las Secciones 2 y 3. Estas velocidades son suficientes para movilizar sedimentos gruesos (gravas y arenas) en la Sección 1, pero no en las otras.

Aunque la socavación es moderada, la acumulación de sedimentos en el embalse podría ser significativa a largo plazo, especialmente si no se implementan medidas de mitigación.

5.1.7 Escenario 2 periodo de retorno de 500 años caudal 480m³/s

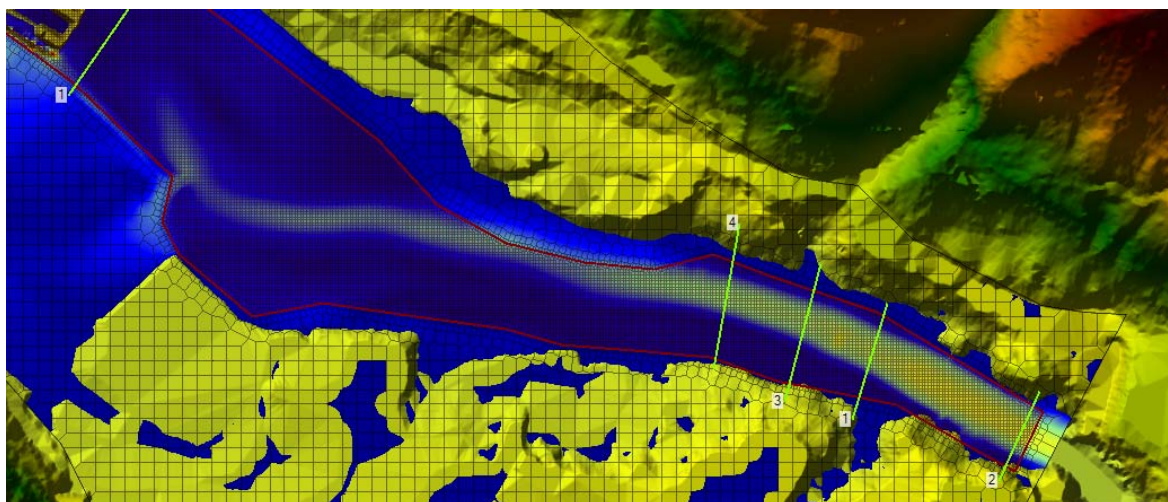


Figura 47 socavación Hec-Ras para el caudal 480m³/s

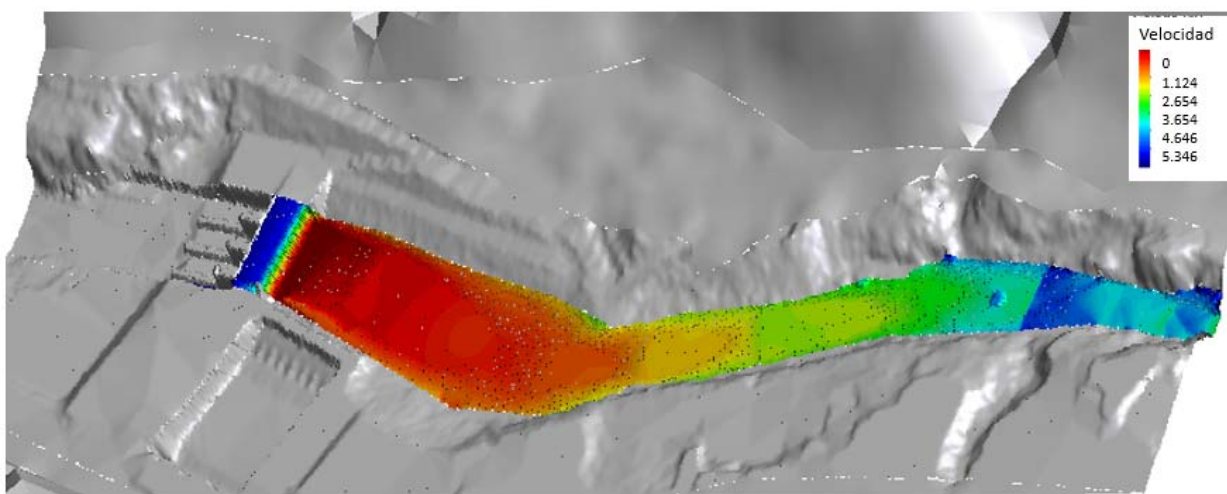
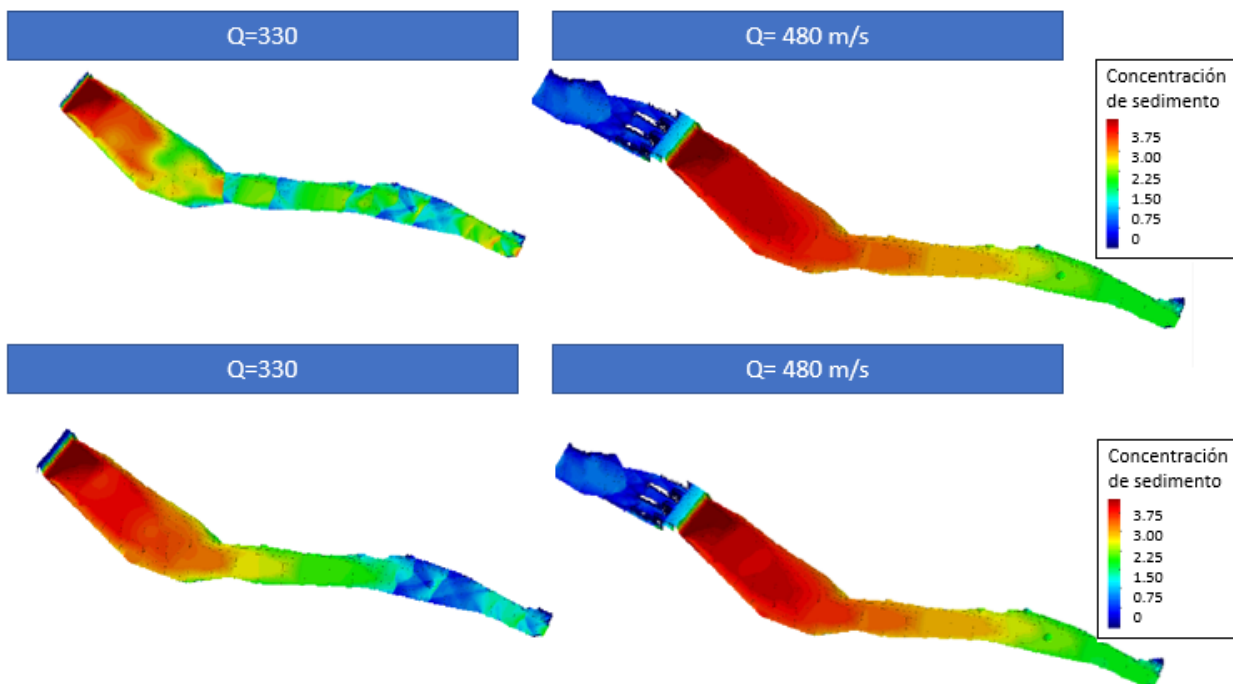


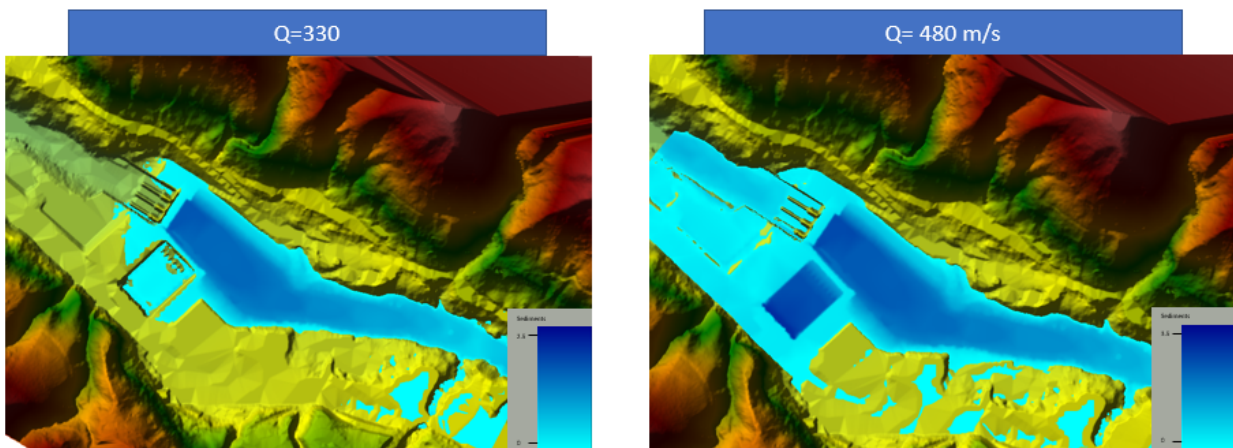
Figura 48 socavación Iber para el caudal 480m³/s

Las velocidades aumentan a 6–8 m/s en la Sección 1 y 4–6 m/s en la Sección 2. Este incremento explica la mayor erosión observada, especialmente en la Sección 1, donde el flujo es más turbulento y energético. La socavación extrema en la Sección 1 representa un riesgo inmediato para la operación del embalse. Los sedimentos movilizados podrían colmatar rápidamente la captación, reduciendo su capacidad de almacenamiento y generación de energía.

5.1.8 Escenarios de sedimentación Iber.



5.1.9 Escenarios de sedimentación HEC-RAS.



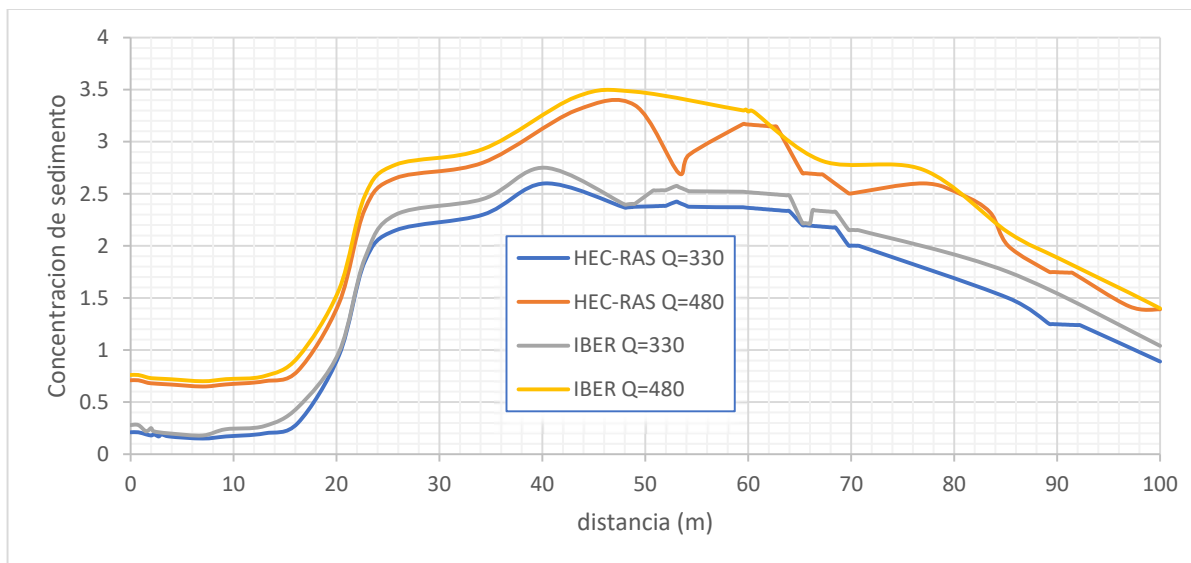


Figura 49 Concentración de sedimentos en el tramo de aproximación al embalse

La zona de máxima concentración (aprox. 40-60 m) se puede asociar con cambios en la pendiente o la sección transversal del cauce, que favorecen la acumulación temporal de sedimentos antes de que el flujo pierda velocidad cerca del embalse.

El descenso de la concentración hacia el punto 0 (embalse) sugiere que, a medida que el flujo se acerca al embalse y pierde energía, parte de la carga sedimentaria se deposita, reduciendo la concentración en suspensión.

Las diferencias entre los modelos pueden deberse a las distintas formulaciones numéricas (ecuaciones de transporte, cierre turbulento, entre otros) y a la forma en que cada uno maneja la interacción entre el flujo y el sedimento (arrastre, deposición, erosión).

6.1 ANALISIS

El transporte de sedimentos en el tramo de aproximación a la captación Pilatón, correspondiente al proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón, ha sido modelado utilizando herramientas numéricas bidimensionales que permitieron un análisis detallado de la dinámica de sedimentos en este sector. Las simulaciones, realizadas con los programas HEC-RAS e Iber, han proporcionado información valiosa sobre cómo los sedimentos interactúan con las estructuras hidráulicas de la captación, permitiendo identificar zonas críticas de acumulación, erosión y transporte.

6.1.1 Efectos de la Captación en el Transporte de Sedimentos

Uno de los aspectos más relevantes observados en las simulaciones es la redistribución de los sedimentos aguas arriba de la captación. La captación, como es natural en este tipo de estructuras hidráulicas, genera un cambio en las líneas de flujo del río. Este cambio provoca una disminución de la velocidad del flujo en ciertas zonas del cauce, lo que favorece la sedimentación. En este caso, se identificaron áreas de acumulación de sedimentos en el sector inmediato aguas arriba de la captación, donde las concentraciones promedio de sedimentos alcanzaron valores de hasta 3.41 gramos/litro para caudales altos ($Q = 480 \text{ m}^3/\text{s}$, periodo de retorno de 500 años) y 2.675 gramos/litro para ($Q = 330 \text{ m}^3/\text{s}$, periodo de retorno de 500 años).

Este fenómeno no solo es previsible, sino que también es común en proyectos hidroeléctricos que incluyen estructuras de derivación. Sin embargo, su magnitud debe ser monitoreada cuidadosamente para evitar problemas de colmatación que puedan comprometer la operación eficiente del sistema. Los resultados también muestran que los sedimentos tienden a acumularse de manera más significativa en la margen derecha del cauce, lo que podría estar asociado a la geometría del río y las características específicas del flujo en este tramo.

6.1.2 Cambios en la Velocidad y la Tensión de Fondo

Otro resultado destacado de las simulaciones es el efecto que la captación tiene sobre los parámetros hidráulicos del río, específicamente sobre la velocidad y la tensión de fondo. Las simulaciones muestran que, en las inmediaciones del canal de captación, se produce un incremento en estos dos parámetros, lo que se traduce en un transporte más eficiente de partículas gruesas hacia aguas abajo. Esto es un efecto beneficioso, ya que reduce el riesgo de obstrucción en la entrada del canal de captación.

Por otro lado, aguas abajo de la captación, se observa una reducción significativa tanto en la velocidad del flujo como en la tensión de fondo. Esto se debe a la disminución del caudal remanente, ya que una parte del caudal es derivada hacia el canal de captación. Esta disminución en los valores hidráulicos favorece la deposición de sedimentos en ciertas áreas del cauce aguas abajo, lo que podría conducir a la formación de bancos de sedimentos si no se implementan medidas correctivas.

6.1.3 Patrones de Flujo y Zonas de Recirculación

Las simulaciones también han permitido identificar patrones de flujo característicos, incluyendo la formación de zonas de recirculación cerca del ingreso del canal de captación. Estas zonas son áreas donde las velocidades del flujo son bajas, lo que favorece la sedimentación localizada y la formación de zonas muertas en el flujo. Este comportamiento puede ser perjudicial, ya que el estancamiento del flujo no solo afecta la calidad del agua, sino que también puede generar problemas de acumulación de sedimentos que, con el tiempo, podrían dificultar la operación del sistema.

Es importante destacar que estos patrones de flujo son influenciados por las características geomorfológicas del río, así como por el diseño de la estructura de captación. En este caso, los resultados sugieren que la incorporación de estructuras auxiliares, como espigones o deflectores, podría ser una medida efectiva para reducir las zonas de recirculación y mejorar el transporte de sedimentos en el tramo de aproximación.

6.1.4 Comportamiento bajo Caudales Medios y Máximos

El análisis de los diferentes escenarios de caudal modelados ha revelado comportamientos específicos del río Pilatón en función de las condiciones hidráulicas. Para los caudales correspondientes al periodo de retorno de 25 años ($Q = 330 \text{ m}^3/\text{s}$), el río mantiene un transporte estable de sedimentos, con concentraciones que no representan un riesgo significativo para la operación de la captación. Sin embargo, durante caudales correspondientes al periodo de retorno de 500 años ($Q = 480 \text{ m}^3/\text{s}$), se observan incrementos notables en las concentraciones de sedimentos en suspensión, así como en la magnitud del transporte de fondo. Este aumento en el transporte de sedimentos está directamente relacionado con las mayores velocidades y tensiones de fondo generadas por los caudales altos.

En estos escenarios, es crucial garantizar que la estructura de captación y los sistemas de purga asociados sean capaces de manejar la mayor carga sedimentaria sin comprometer su funcionalidad. Las simulaciones realizadas indican que, aunque la captación puede operar de manera eficiente bajo estas condiciones, será necesario implementar un monitoreo continuo y posiblemente realizar ajustes operativos durante eventos de caudales extremos.

6.1.5 Validación de Resultados y Limitaciones del Modelo

Es importante mencionar que, aunque los modelos bidimensionales utilizados en este estudio han proporcionado resultados valiosos, también presentan ciertas limitaciones que deben ser consideradas. Por ejemplo, las condiciones de borde establecidas para las simulaciones, como los hidrogramas de entrada y las condiciones de salida, pueden introducir errores que afectan la precisión de los resultados, especialmente en los extremos del dominio modelado. Esto se traduce en incertidumbres en las predicciones relacionadas con las concentraciones de sedimentos y los patrones de flujo en las zonas más alejadas de la captación.

Adicionalmente, la modelación numérica depende en gran medida de la calidad de los datos de entrada, como la información topográfica, hidrológica y sedimentológica. En este caso, aunque se contó con datos detallados proporcionados por HIDROTOAPI, la falta de información más reciente o más específica en ciertos aspectos podría haber limitado la capacidad del modelo para capturar con precisión todos los fenómenos observados en el río Pilatón.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- HEC-RAS con un error medio de 0.13% respecto a las mediciones de campo, HEC-RAS demuestra una alta precisión en la predicción de perfiles transversales de sedimentos. Esto lo convierte en una herramienta altamente confiable para estudios detallados de ingeniería, donde se requiere una alta precisión en la estimación de los flujos y sedimentación.
- Aunque Iber presenta un error medio de 0.8%, mayor que HEC-RAS, Sigue siendo una herramienta útil en escenarios donde se necesita una estimación rápida y menos detallada del transporte de sedimentos. Su precisión es aceptable para estudios preliminares y evaluaciones de impacto iniciales.
- Los caudales correspondientes al periodo de retorno de 25 años ($Q = 330 \text{ m}^3/\text{s}$) no generan impactos significativos en la dinámica de sedimentos, manteniéndose condiciones operativas estables. En contraste, los caudales extremos ($Q = 480 \text{ m}^3/\text{s}$, periodo de retorno de 500 años) intensifican los procesos de erosión y sedimentación, especialmente en zonas vulnerables del cauce.
- Ambos softwares presentan limitaciones que deben tenerse en cuenta. La precisión de los modelos está fuertemente influenciada por la calidad de los datos de entrada y la calibración del modelo. Por lo tanto, es crucial realizar una validación y calibración adecuada para asegurar que los resultados del software reflejen con precisión las condiciones reales del río o canal.
- Aunque los modelos bidimensionales utilizados demostraron ser herramientas eficaces, se observaron limitaciones relacionadas con la representación de condiciones de borde y el ajuste de algunos parámetros hidráulicos. Esto sugiere que los resultados obtenidos deben ser validados mediante simulaciones adicionales o complementarse con estudios físicos.
- La integración de datos de campo con los resultados de simulación es esencial para mejorar la precisión y confiabilidad de los modelos. Las mediciones de campo, como las batimetrías, proporcionan un punto de referencia crucial para validar y ajustar los modelos, garantizando que las predicciones del software sean representativas de las condiciones reales.
- La estructura de captación Pilatón, en su ubicación actual, demuestra un diseño eficiente para caudales medios, logrando derivar un caudal significativo sin afectar considerablemente el

transporte natural de sedimentos hacia aguas abajo. No obstante, las condiciones extremas requerirán monitoreo constante para evitar problemas de colmatación o erosión local.

- Se recomienda realizar simulaciones adicionales con tiempos máximos mayores, especialmente en escenarios con alta variabilidad hidráulica o cuando se evalúan caudales de retorno prolongados. Asimismo, ajustar los intervalos de almacenamiento según la escala temporal de los fenómenos permite equilibrar detalle y eficiencia.
- Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real, que incluya sensores de sedimentos y velocidad del flujo, para validar los resultados numéricos y ajustar las operaciones de la captación según las condiciones hidráulicas observadas.
- Establecer un plan periódico de limpieza de sedimentos en las zonas de acumulación aguas arriba de la captación. Esto permitirá garantizar el flujo continuo hacia el canal de derivación, evitando interrupciones en la operación.
- Realizar simulaciones adicionales para caudales extremos, utilizando modelos tridimensionales o extendiendo el dominio del modelo bidimensional para capturar fenómenos complejos no representados completamente en este estudio.

7. REFERENCIAS

Trabajos citados

- [1] Á. F. M. Romero, «Gestión de la sedimentación en los embalses,» *REVISTA CIENTIFICA DOMINIO DE LAS CIENCIAS*, vol. 8, nº 1, pp. 1303-1312, Enero - Marzo 2022.
- [2] A. P. Ybars, «LA SEDIMENTACIÓN EN EMBALSES,» *DYNA*, vol. 4, nº 1, p. 5, Octubre 2004.
- [3] T. A. Salamea Guillén, «Modelamiento bidimensional hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a través del río Calabí y obras hidráulicas,» Universidad de Cuenca, 2015.
- [4] J. T. R. V. Camia Andrea Adarme Orejuela, Estimacion de la Sedimentacion en un embalse usando el modelo hidraulico Hec-Ras, Bucaramanga: Universidad Pntifincia Bolivariana Facultad de ingenieria Civil., 2018.

- [5] J. E. Balboltin Beltran, «MODELACIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE RAPEL: DELTA Y CORRIENTE DE TURBIDEZ,» 2013. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114629>. [Último acceso: Enero 2025].
- [6] T. A. S. Guillén, «UNIVERSIDAD DE CUENCA,» Octubre 2015. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23116/1/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf>.
- [7] Ing. Civil Germán Becerra e Ing. Civil William Alarcón de AES CHIVOR, «“MODELACIÓN Y MEDICIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES TUNJITA Y LA ESMERALDA,» *IngeSOCIOS*, vol. 0413, p. 3, 2011.
- [8] H. L. S. E. T. M. S.-R. Marti Sanchez-Juny, «Modelización de corrientes de turbiedad en embalses. Caso de estudio: Embalse Amaluza (Ecuador),» *Ingenieria del Agua*, vol. 27, nº 10.4995, pp. 253-268, 2023/10/31.
- [9] L. D. Santana, Modelación numérica bidimensional de la socavación local en pilas de puente incluyendo efectos de flujo secundario, Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2021175, 2021.
- [10] L. Flores Díaz y I. Jáuregui Nares, GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE REQUISITOS DEL ESTÁNDAR ISO 50001:2018, CDMX: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE, 2018.
- [11] M. Ribé Forn, E. Bladé Castellet y J. Dolz Ripollès, «Modelación numérica bidimensional de la dinámica sedimentaria del río Ebro en Castejón,» Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2017.
- [12] A. Navas Alonso, «Caracterización y modelación del transporte de sedimentos en la cuenca alta del Río Bogotá tramo - Chingacio - Puente Santander,» Universidad de los Andes, 2014.
- [13] T. Ochoa Rubio, «Hidráulica de ríos y procesos morfológicos,» ECOE Ediciones, 2015.

- [14] J. J. G. V. O. A. C. E. Lozano David, Manual de Apuntes de la Experiencia Educativa Hidráulica Básica, Veracruz: Creative Commons México, 2013.
- [15] U. d. Salamanca, CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA, Salamanca: Grupo Editorial OCEANO, 2014.
- [16] P. Puig Jimenez, «Conceptos básicos de hidráulica fluvial,» Universitat Politècnica de Catalunya , Catalunya, 2006.
- [17] F. Cruz, «KRAL Consultores,» Noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.kralconsultores.cl/insights/modelacion-hidraulica-que-es-y-cuales-son-sus-beneficios/>.
- [18] T. Betancur y C. Palacio, «LA MODELACION NUMERICA COMO HERRAMIENTA PARA LA EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS CONCEPTUALES,» DYNA, Medellín, 2009.
- [19] O. Portilla, C. Leiva, M. Luna y I. González, «Evaluación de los modelos digitales de terreno y geopotenciales en el Ecuador,» *LA GRANJA: REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA*, vol. Vol. 2, n° 38, p. 23, 2023.
- [20] OFB (Oficina Francesa de la Biodiversidad, en Francia), «Glossaire Eau, Milien marín & Biodiversité,» 26 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/es/concept/caudal-l%C3%ADquido#:~:text=Volumen%20de%20agua%20que%20atraviesa,para%20cursos%20de%20agua%20peque%C3%B1os..>
- [21] OFB (Oficina Francesa de la Biodiversidad, en Francia), «Glossaire Eau, Milien marín & Biodiversité,» 26 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/es/concept/caudal-s%C3%B3lido>.
- [22] J. Muñoz y A. Penagos, «Regímenes de flujo y visualización del flujo alrededor de formas simples,» Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2020.

- [23] N. Orozco, «Flujo Uniforme y Flujo No Uniforme en canales abiertos,» Universidad de Occidente, Managua, 2022.
- [24] A. Paiz, «Flujo Permanente y No Permanente,» 2012.
- [25] G. Sotelo Avila, Apuntes de HIDRÁULICA II, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [26] M. J. Navas Muñoz, C. Matovelle Bustos, A. Vélez Arcentales y F. Córdova, «Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña,» *Alfa Publicaciones*, pp. 3-4, 2022.
- [27] E. Ingenieros, 2024. [En línea]. Available: <https://www.edic.cl/hidmodela.html#:~:text=Los%20modelos%20hidr%C3%A1ulicos%20unidimensionales%20permiten,de%20la%20direcci%C3%B3n%20del%20flujo..>
- [28] C. K. Guarniz Muñoz, «Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC - RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis de rotura de presas de materiales sueltos; y aplicación a la presa Palo Redondo,» Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, 2014.
- [29] J. A. Vásquez Ojeda, «Modelación numérica en Hidráulica,» 2003.
- [30] HidrojING, «HidrojING,» 25 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.hidrojing.com/condiciones-de-contorno-en-hec-ras/#:~:text=Se%20entiende%20por%20condiciones%20de,superior%20e%20inferior%20del%20modelo.>
- [31] FAO, «Transporte de Sedimentos,» Food and Agriculture Organization, 2018.
- [32] A. B. J. L. Y.Q. Yu, «Numerical simulation of involute-plate research reactor flow behavior using RANS, LES and DNS,» *Annals of Nuclear Energy*, vol. 207, n° 110709, 2024.
- [33] V. Chávez Cerón, «Determinación Experimental del Inicio de Arrastre de Arenas del Estado de Quintana Roo, México,» DSpace Repository, 2012.

- [34] R. Benayas Polo, «GEASIG,» 19 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.geasig.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>.
- [35] «TYC GIS Formación,» 11 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>.
- [36] S. Montoya, «Modelamiento de Transporte de Sedimentos mediante el Método BSTEM en HEC-RAS,» Gidahatari , 2018.
- [37] «Imasgal,» 09 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://imasgal.com/que-es-iber/#:~:text=Iber%20es%20un%20modelo%20matem%C3%A1tico,la%20delimitaci%C3%B3n%20de%20zonas%20inundables..>
- [38] «Blog del Agua,» 10 Octubre 2013. [En línea]. Available: <https://blogdelagua.com/actualidad/iber-potente-software-libre-agua/>.
- [39] J. L. Kepler, «Scribd,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/document/378749503/Ecuaciones-de-Saint-Venant>.
- [40] X. Mora, «Las Ecuaciones de Navier - Stokes,» Méthode Science Studies Journal, Valencia, 2017.
- [41] L. Yopez, «Ingeniería Básica,» 04 Diciembre 2021. [En línea]. Available: https://ingenieriabasica.es/las-ecuaciones-de-navier-stokes/#Ecuaciones_de_Navier-Stokes.
- [42] E. Araujo, «ESSS,» 30 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.esss.com/es/blog/metodos-numericos-para-simulacion-en-la-ingenieria/#:~:text=Los%20m%C3%A9todos%20num%C3%A9ricos%20son%20aplicaciones,se%20conocen%20como%20m%C3%A9todos%20indirectos..>
- [43] L. C. G. C. E. E. P. E. V.-c. J. D. A. C. E. Bladéa, «Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 30, nº 1, pp. 1-10, marzo 2014.
- [44] R. H. Martinez Canto, «Modelización de inundaciones fluviales con IBER. Caso practico de santiago de Molinillo,» *Revista de ciencias GEomáticas*, vol. 34, nº 12, p. 7, 27/10/2016.

- [45] G. D. ECUADOR, CONSTITUCION DEL ECUADOR 2008, Quito: Asamblea Constituyente, 2008.
- [46] *SENTENCIA No. 2-14-EI/21*, 2021.
- [48] B. E. A. Almeida, «UNIVERSIDAD DE CUENCA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL,» Octubre 2017. [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28549/1/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf.
- [49] A. R. Felices, «Capítulo 7 Gasto Sólido de Fondo,» de *Introducción a la Hidráulica Fluvial*, Perú, Facultad de Ingeniería Civil Universidad Nacional de Ingeniería , 1998, p. 286.
- [50] J. C. Pullupaxi Masabanda y S. R. Villarreal Jaramillo, «Incertidumbre en la modelación hidrológica de ceuncas y propagación de crecidas en causes,» Repositorio Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2013.