

**Metodología para la simulación de la distribución de sedimentos, en el embalse de  
Bucaramanga, a través del software “*HEC RAS*”**

**Jesús Alberto Sierra Cancino**

**Trabajo presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**Andrés Almeyda Ortiz**

**Magíster en Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2018**

### Dedicatoria

Ahora que se da por terminada esta importante etapa de mi vida, y que trae consigo un gran triunfo, quisiera agradecer:

A mis padres, Jesús y Yohanna, que, con su apoyo, y sus palabras de aliento, supieron indicarme el camino idóneo para la realización de mis sueños, siendo un gran ejemplo del constante compromiso y esfuerzo que son necesarios para lograr cumplir las metas que nos proponemos.

A Dios por ser mi guía y mi mano protectora y dotarme de la sabiduría y la fuerza para luchar por mis sueños.

A mi familia, la cual ha estado presente a lo largo de mi formación, brindándome su colaboración y palabras de alientos en los momentos necesarios.

A mi director de proyecto y maestro, Andrés Almeyda, por su innumerable colaboración en la realización de este proyecto, por ser mi guía académica y ejemplo que seguir.

A los docentes que han estado presentes a lo largo de mi formación académica, por su compromiso con impartir los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

A mis amigos que desde siempre han estado, y a aquellos que conocí en el transcurso de mi formación profesional, por el apoyo brindado, estar siempre a mi lado y demostrarme que la amistad verdadera se sobrepone ante cualquier adversidad que la vida nos presenté.

A todos, infinitas gracias.

*Jesús Alberto Sierra Cancino*

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Fundamentos teóricos .....	15
1.1 Marco Conceptual .....	16
1.1.1 Erosión .....	16
1.1.2 El Fenómeno de la Sedimentación.....	17
1.1.3 Tipos de Partículas .....	18
1.1.4 Patrones Longitudinales del Depósito de Sedimentos .....	19
1.1.5 Transporte de los Sedimentos .....	21
1.1.6 Clasificación del Transporte de Sedimentos .....	22
1.1.7 Lecho Móvil.....	23
1.1.8 Capacidad de transporte del rio.....	23
1.2 Fundamentos Básicos en la Modelación del Transporte de Sedimentos .....	24
1.2.1 Flujo Casi no Permanente .....	24
1.2.2 Duración de flujo .....	24
1.2.3 Incremento de Cálculo .....	25
2. <i>HEC RAS</i> .....	25
2.1 Evolución del Software.....	26
2.2 Interfaz del Software.....	27

2.3 Capacidades y Ventajas de la Modelización de Sedimentos con *HEC RAS 5.0*..... 29

2.4 Limitaciones del Modelamiento en *HEC RAS 5.0*..... 30

2.5 Métodos de Cálculo para Estimar la Distribución y Transporte de Sedimentos en *HEC RAS 5.0*..... 31

2.5.1 Funciones de Transporte de Sedimentos..... 31

2.5.2 Funciones de Velocidad de Caída de Partículas ..... 34

3. Análisis de las variables de entrada requeridas para la simulación del transporte de sedimentos, a través de *HEC RAS 5.0*..... 36

3.1 Parámetros de Entrada ..... 37

3.2 Modelamiento del transporte de sedimentos mediante *HEC RAS 5.0* ..... 40

3.2.1 Información Geográfica ..... 40

3.2.2 Flujo Quasi-No Permanente..... 43

3.2.3 Archivo de Sedimentos ..... 46

3.2.4 Definición del Plan para el Análisis de Sedimentos ..... 54

3.3 Visualización de Resultados ..... 54

3.4 Organigrama para la Implementación del Modelo de Transporte de Sedimentos a través de *HEC RAS 5.0*..... 57

4. Desarrollo de la metodología..... 58

4.1 Análisis y Discusión de la Información Actual Necesaria para el Modelamiento de Sedimentos en el Embalse de Bucaramanga..... 58

4.1.1 Descripción de la Zona de Estudio ..... 59

4.1.2 Topografía del Embalse ..... 61

4.1.3 Datos de Flujo del río Tona ..... 62

---

4.1.4 Archivo de Sedimentos del Embalse .....	64
4.2 Guía para la Modelación del Transporte de Sedimentos en el Embalse de Bucaramanga a través de <i>HEC RAS 5.0</i> .....	70
5. Recomendaciones .....	71
6. Conclusiones .....	73
Referencias bibliográficas.....	76

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Relación de países consultados, según su aporte en la investigación. ....	15
<i>Figura 2.</i> Clasificación del material sedimentable por su tamaño, según <i>HEC RAS 5.0.</i> ....	19
<i>Figura 3.</i> Patrones de depósito de sedimentos.....	21
<i>Figura 4.</i> Interfaz primera versión <i>HECR RAS 1995.</i> ....	27
<i>Figura 5.</i> Evolución de la interfaz de <i>HEC RAS</i> a lo largo de sus diferentes versiones.....	28
<i>Figura 6.</i> Interfaz del software <i>HEC RAS 5.0.</i> (Última versión).....	28
<i>Figura 7.</i> Procedimiento para la modelación de sedimentos en <i>HEC-RAS 5.0.</i> .....	37
<i>Figura 8.</i> Parámetros de entrada para la simulación del transporte de sedimentos en <i>HEC-RAS 5.0.</i> .....	38
<i>Figura 9.</i> Archivos necesarios para modelo de Sedimentos.....	40
<i>Figura 10.</i> Menú de atributos de capas <i>Hec-GeoRas.</i> ....	42
<i>Figura 11.</i> Ingreso de datos de la presa. ....	43
<i>Figura 12.</i> Editor de flujo Quasi-No permanente.....	44
<i>Figura 13.</i> Editor de Secciones para asignar Flujo.....	44
<i>Figura 14.</i> Editor de Series de Flujo.....	45
<i>Figura 15.</i> Editor de Archivo de Sedimentos .....	48
<i>Figura 16.</i> Editor de curvas Granulométricas.....	51
<i>Figura 17.</i> Editor Serie de Descarga de Sedimentos.....	52
<i>Figura 18.</i> Editor de Serie de Carga de Sedimentos.....	53

<i>Figura 19.</i> Editor de Plan de Análisis de Sedimentos .....	54
<i>Figura 20.</i> Acumulación y socavación en el cauce del embalse. ....	55
<i>Figura 21.</i> Visualizador gráfico de perfil. A .....	56
<i>Figura 22.</i> Diagrama de cambio en la sección transversal. ....	57
<i>Figura 23.</i> Metodología de Desarrollo .....	58
<i>Figura 24.</i> Organigrama para la Implementación de la Simulación del Transporte de Sedimentos, a través de <i>HEC RAS 5.0</i> .....	60
<i>Figura 25.</i> Fotografía satelital de localización del embalse de Bucaramanga. ....	61
<i>Figura 26.</i> Curvas de nivel del Embalse de Bucaramanga. ....	62
<i>Figura 27.</i> Caudales medios mensuales de la estación limnimétrica Puente Tona. ....	63
<i>Figura 28.</i> Datos de Caudal y Profundidad para la creación de la Curva de Descarga. Estación Cola del Embalse. ....	64
<i>Figura 29.</i> Datos de Caudal y Profundidad para la creación de la Curva de Descarga. Estación Puente Tona. ....	64
<i>Figura 30.</i> Caracterización de las partículas de Sedimento. Estación Cola del Embalse.....	67
<i>Figura 31.</i> Caracterización de las partículas de Sedimento. Estación Puente Tona. ....	67
<i>Imagen 32.</i> Curvas granulométricas de material de lecho y suspensión en la estación Cola del Embalse.....	68
<i>Imagen 33.</i> Curvas granulométricas de material de lecho y suspensión en la estación Puente Tona. ....	68
<i>Imagen 34.</i> Curva Granulométrica Eje de la Presa. ....	69
<i>Figura 35.</i> Información del embalse de Bucaramanga disponible para la simulación del transporte de sedimentos en <i>HEC RAS 5.0</i> . ....	70

**Lista de apéndices**

Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Guía para la modelación del transporte de sedimentos en el embalse de Bucaramanga a través de *HEC RAS 5.0*

Apéndice B. Curvas de nivel

Apéndice C. Series de flujo, series de temperatura y curva de descarga

Apéndice D. Series de caudales medios diarios

Apéndice E. Caracterización de los sedimentos

Apéndice F. Curvas granulométricas para estación Puente Tona, cola del embalse y eje del embalse

Apéndice G. Curva de descarga de sedimentos para el periodo comprendido entre los años 2006 y 2010

## Resumen

**Título:** Metodología para la simulación de la distribución de sedimentos, en el embalse de Bucaramanga, a través del software “*HEC RAS*”\*

**Autor:** Jesús Alberto Sierra Cancino\*\*

**Palabras clave:** HEC-RAS, Metodología, Simulación, Sedimentos, Embalse.

### Descripción

La implementación de *HEC RAS* permite conocer cómo se distribuyen los sedimentos dentro del vaso de un embalse. Por esta razón, el siguiente proyecto presenta una metodología para la modelación de la distribución y transporte de sedimentos dentro del embalse de Bucaramanga, mediante el software *HEC RAS 5.0*. en donde se establecieron los parámetros de entradas requeridos por el software, asociado a su respectivo proceso de modelación y la visualización de resultados.

A partir de la investigación, se logró consolidar información pertinente respecto a los fenómenos de la sedimentación, junto con una reseña histórica del software, donde se presentan sus características, ventajas y desventajas en cuanto a la modelación de sedimentos. Se logró identificar los cuatro archivos indispensables para la modelación de sedimentos, los cuales corresponden a un archivo geométrico, de flujo, de sedimentos y un archivo de plan de análisis de sedimentos.

Asimismo, mediante la revisión literaria académica, acoplada al manual de usuario de *HEC RAS 5.0*, se desarrolló una guía útil para la simulación de la distribución de sedimentos dentro de un embalse, la cual junto con la investigación que arroja los parámetros de entrada y la información brindada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, alusiva al embalse (topografía, series de caudales, sedimentación entre otros), se desarrolló un diagnóstico respecto a la implementación del modelo de distribución de sedimentos en *HEC RAS 5.0*, donde se encontró que existe ausencia de información necesaria para la ejecución del modelo.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Magíster en Ingeniería Civil

### Abstract

**Title:** Methodology for the simulation of sediment distribution, in the Bucaramanga reservoir, through the software "HEC RAS"

**Author:** Jesús Alberto Sierra Cancino\*\*

**Keywords:** HEC-RAS, Methodology, Simulation, Sediments, Reservoir.

### Description

The implementation of HEC RAS allows to know how the sediments are distributed inside the reservoir vessel. For this reason, the following project presents a methodology for modeling the distribution and transport of sediments within the Bucaramanga reservoir, using the HEC RAS 5.0 software. where the parameters of inputs required by the software were established, associated with their respective modeling process and the visualization of results.

From the research, it was possible to consolidate pertinent information regarding the phenomena of sedimentation, together with a historical review of the software, where its characteristics, advantages and disadvantages in terms of sediment modeling are presented. It was possible to identify the four indispensable files for the modeling of sediments, which correspond to a geometric, flow, sediment and sediment analysis plan file.

Also, through the academic literary review, coupled with the user manual of HEC RAS 5.0, a useful guide was developed for the simulation of the distribution of sediments within a reservoir, which together with the research that gave the input parameters and the information provided by the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga, alluding to the reservoir (topography, flow series, sedimentation among others), a diagnosis was developed regarding the implementation of the sediment distribution model in HEC RAS 5.0, where it was found that there is an absence of information necessary for the model implementation

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Master in Civil Engineering

## Introducción

Uno de los grandes problemas, a los cuales se ven sometidos los ingenieros, a la hora de la construcción de embalses y presas, es la erosión, que afecta directamente a las montañas que rodean el cauce de dichas estructuras (eólica), o la producida por la degradación del suelo (fluvial). La erosión, bien sea eólica o fluvial, puede generar materiales sólidos, los cuales quedan disueltos en el agua, o se depositan en el fondo, según su densidad y tamaño. Eventualmente, este material sólido, conocido como sedimentos, será arrastrado por las corrientes de agua y se acumulará dentro del vaso del embalse (García & Maza, 1996, págs. 5-100). Actualmente, una de las herramientas más utilizadas, para describir modelos de distribución de sedimentos en ríos es el software *HEC-RAS*, debido a que permite, de forma sencilla y eficaz, poder modelar el cauce de estudio, brindando información valiosa y veraz, de modo que se pueda utilizar con eficacia en la toma de decisiones, a fin de mitigar el problema de los sedimentos (Navas, Valero, & Machin, 2018, págs. 1-2)

La versión de *HEC-RAS 5.0* permite simular el flujo de agua combinando modelos en una y dos dimensiones y basa su aplicación en las ecuaciones de Onda Difusa y Saint Venant, según especificaciones del usuario, las cuales, a través de algoritmos de volúmenes finitos, logra dar solución a las problemáticas planteadas (Llueca, 2015, pág. 13). Sumado a las ventajas del software, se cuenta con que *HEC-RAS* es un programa de uso libre, totalmente gratis, disponible en la página oficial *U.S Army Corps of Engineers* (Velandia, sf, págs. 29-33). En contraparte, una desventaja de *HEC-RAS 5.0* es que no permite ejecutar simulaciones de distribución de sedimentos, debido a la erosión o deposición, dentro de un área 2D. (Llueca, 2015, pág. 13), (Velandia, sf, págs. 29-33)

El siguiente proyecto estableció una estrategia de desarrollo de la metodología necesaria para la ejecución de un modelo digital, a través del software libre *HEC RAS 5.0*, de la distribución de sedimentos dentro del embalse de Bucaramanga, identificando los parámetros de entrada requeridos por el software como lo son datos geométricos de secciones transversales, datos de flujo (series de caudales y temperatura, paso de cómputo y condiciones de frontera) y finalmente datos de sedimentos (granulometría, curva de carga y descarga de sedimentos, profundidad máxima o elevación mínima de erosión y propiedades de los sedimentos). Presenta también un análisis de la información disponible actualmente por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, relacionado con los parámetros de entrada, requeridos por el software, con lo que se planteó un diagnóstico acerca de la viabilidad de simular la distribución de sedimentos dentro del embalse, con la información disponible en la actualidad.

Finalmente, propone una guía pertinente para la modelación de la distribución de sedimentos, a través de *HEC RAS 5.0*, dejando con esto una pauta preestablecida para la realización futura de modelos que sirvan como agentes mitigantes de la problemática que genera la colmatación en los embalses, esto en pro del mejoramiento de la vida útil del embalse de Bucaramanga.

## 1. Fundamentos teóricos

Para la recopilación de la información pertinente a los procesos de sedimentación en embalses y la implementación de *HEC RAS 5.0* en este proceso, resultó útil la investigación en las bases de datos académicas como Science direct, Acces Engineering, Dialnet, además de tesis desarrolladas en universidades como la Universidad Industrial de Santander, la Universidad Nacional de Colombia, Universidad Politécnica de Cartagena, entre otras.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo (*Tabla 1*), donde se exponen los países de los cuales se sustrajo información (documentos), y su participación (en porcentajes) en el desarrollo del presente proyecto.

BASES DE DATOS CONSULTADAS		
PAÍS	CANTIDAD	PORCENTAJE
COLOMBIA	6	27,27
ESPAÑA	4	18,18
MÉXICO	3	13,64
ECUADOR	3	13,64
EE UU	3	13,64
PERÚ	1	4,55
REINO UNIDO	1	4,55
AUSTRALIA	1	4,55
TOTAL	22	100

*Figura 1.* Relación de países consultados, según su aporte en la investigación.

A continuación, se presenta la información recopilada, la cual fue seleccionada en función de su aporte al tema de la sedimentación y la modelación del transporte de sedimentos en *HEC ARS 5.0*.

## 1.1 Marco Conceptual

La sedimentación producida en los ríos afecta directamente a los embalses que se alimentan de estos, debido a que las partículas, producto de su transporte, pueden llenar o colmar los embalses con arenas, gravas limos y arcillas, reduciendo considerablemente su vida útil y dejándolos inservibles en un menor tiempo, respecto al de diseño. (Navas, Valero, & Machin, 2018), (Velandia, sf, págs. 29-33) El problema de la producción de sedimentos incide directamente en los costos de diseño y mantenimiento de los embalses, al exigir mayores alturas de presas para albergar espacios muertos destinados a los sedimentos que difícilmente pueden ser removidos. (Velandia, sf, págs. 29-33)

**1.1.1 Erosión.** El termino erosión, se refiere específicamente a la remoción mecánica de partículas de suelo, en una zona.

Es el conjunto de procesos de disgregación, movilización transporte y sedimentación de partículas de suelo o roca, en los que suelen inferir la acción de las lluvias, el viento, el movimiento de los cuerpos de agua, o la simple acción de la gravedad, generando la reubicación o eliminación de una parte del material que lo conforma (Dyhouse, Hatchett, & Benn, sf, pág. 84)

Se puede decir que la alteración de la cubierta vegetal se debe en gran parte, a la intervención antrópica, debido a que son las actividades del hombre, las que aportan un aumento significativo en las tasas de erosión y transferencia de sedimentos. La erosión acelerada de los suelos representa un gran problema para la sociedad, y se debe, en general, al uso deficiente del territorio, esto es, la deforestación, cultivos en pendiente, sistemas inadecuados de riego, entre otros. (Dyhouse,

Hatchett, & Benn, sf, pág. 84)

En los embalses, la acumulación de sedimentos, productos de la erosión, altera la capacidad de almacenamiento, de manera que se reduce considerablemente, lo que conlleva a la reducción de la su vida útil. Sumado a esto, el proceso de erosión puede afectar negativamente la calidad del agua almacenada, debido al aumento de la turbidez, que incide en el deterioro de los ecosistemas fluviales. Esto podría traducirse en la necesidad de tratamientos más costosos para la potabilización del agua almacenada (Dyhouse, Hatchett, & Benn, sf, pág. 84) Por tanto, el estudio de la producción de sedimentos en un embalse adquiere un interés que va más allá del valor teórico, ya que constituye un punto de partida imprescindible para la gestión sostenible de los embalses y, por consiguiente, de los recursos hídricos. (Dyhouse, Hatchett, & Benn, sf, pág. 84)

**1.1.2 El Fenómeno de la Sedimentación.** Para el sentido del flujo, la presa se convierte en un obstáculo, y para sobrepasarla, esta debe acumularse, aumentando su profundidad, pero disminuyendo considerablemente su velocidad. Como resultado de esto, el abastecimiento de sedimentos resulta mayor a la capacidad de transporte y es por esta razón que los sedimentos más pesados, empiezan a acumularse en el fondo del embalse, de forma directa. Este fenómeno, ocurre aproximadamente en la línea del nivel de aguas máximas, dependiendo de la forma del embalse, creando lo que se conoce como depósito delta (Velandia, sf, págs. 29-33), mientras que los sedimentos más finos, son transportados más hacia adentro del embalse. Los embalses se convierten entonces en trampas de sedimentos muy eficientes, haciendo inevitable que ocurra la sedimentación.

La mayoría de los sedimentos al interior del embalse ocurren por tres procesos: (Velandia, sf, págs. 29-33)

**I.** Transporte de material grueso cuya deposición forma un delta en la cabecera que avanza en la medida que continua la deposición.

**II.** Transporte de material fino en corrientes de turbidez o densidad. La corriente de turbidez ocurre cuando la masa del agua con sedimentos ingresa en un embalse; la corriente de densidad es un movimiento inducido por gravedad de un fluido a través o bajo otro fluido, causado por las diferencias en densidad de los fluidos. (Navas, Valero, & Machin, 2018, págs. 1-2), (Velandia, sf, págs. 29-33)

**III.** Transporte de material fino por flujos no estratificados. En algunas áreas del embalse, pueden formarse depósitos masivos de material fino, debido a las pendientes pronunciadas, esto, puede generar una resuspensión del sedimento, poniendo nuevamente en suspensión, partículas que ya se han depositado en el fondo. (Velandia, sf, págs. 29-33)

**1.1.3 Tipos de Partículas.** *HEC RAS 5.0.* divide el material sedimentable en diferentes tipos de partículas. Las dimensiones del material de sedimentos que se puede transportar esta entre los 0.002 mm y los 2048 mm, y a su vez, los agrupa en 20 tipos de partículas, según su diámetro (*Tabla 2*). (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016, pág. 171)

Grain Classes		Lower Bound	Upper Bound	Mean Diameter	Geometric Mean
Clay	Clay	0.002	0.004	0.003	0.00283
Very Fine Silt	VFM	0.004	0.008	0.006	0.00566
Fine Silt	FM	0.008	0.016	0.011	0.0113
Medium Silt	MM	0.016	0.032	0.023	0.0226
Coarse Silt	CM	0.032	0.0625	0.045	0.0447
Very Fine Sand	VFS	0.0625	0.125	0.088	0.0884
Fine Sand	FS	0.125	0.25	0.177	0.177
Medium Sand	MS	0.25	0.5	0.354	0.354
Course Sand	CS	0.5	1	0.707	0.707
Very Course Sand	VCS	1	2	1.41	1.41
Very Fine Gravel	VFG	2	4	2.83	2.83
Fine Gravel	FG	4	8	5.66	5.66
Medium Gravel	MG	8	16	11.3	11.3
Coarse Gravel	CG	16	32	22.6	22.6
Very Coarse Gravel	VCG	32	64	45.3	45.3
Small Cobbles	SC	64	128	90.5	90.5
Large Cobbles	LC	128	256	181	181
Small Boulders	SB	256	512	362	362
Medium Boulders	MB	512	1024	724	724
Large Boulders	LB	1024	2048	1448	1450

Figura 2. Clasificación del material sedimentable por su tamaño, según *HEC RAS 5.0*. Adaptado de HEC-RAS River Analysis Sistem, (2016). 2D Modeling user´s. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers. p, 171

A medida que las partículas se sedimentan dentro de un embalse, éstas suelen generar una distribución longitudinal, la cual se puede asociar a diferentes formas geométricas. Dicha distribución obedece directamente a la composición y diámetro de la carga de sedimentos, la cantidad de carga sedimentológica, respecto a la capacidad de almacenamiento del embalse, y a la geometría y modo de operación del embalse.

**1.1.4 Patrones Longitudinales del Depósito de Sedimentos.** Tras múltiples análisis en diferentes embalses, la Organización Meteorológica Mundial (WMO), reporto cuatro tipos de perfiles longitudinales, de la manera como se depositan los sedimentos a lo largo de los embalses, las cuales dependen básicamente de tres factores: la composición y carga de sedimentos, la cantidad de carga de sedimentos que ingresa con respecto a la capacidad de almacenamiento, y

finalmente, la geometría y modo de operación del embalse. Dichos perfiles longitudinales se definieron de la siguiente manera. (Velandia, sf, págs. 29-33)

- Un **delta** se forma en los embalses en los que la relación de la capacidad de almacenamiento  $V$  con respecto a la esorrentía anual entrante  $R$  ( $V/R$ ) es grande, el nivel de operación del embalse se mantiene alto y la carga de sedimentos que entra al embalse es relativamente gruesa, generando que se depositen rápidamente en la entrada de este (*Figura 1.a*). (Navas, Valero, & Machin, 2018, págs. 1-2), (Velandia, sf, págs. 29-33)

- Una **cuña**, a diferencia de un **delta**, se forma en los embalses tipo garganta, en los que la relación ( $V/R$ ) es pequeña. El tamaño del sedimento que ingresa es relativamente fino, y el nivel de operación fluctúa ampliamente, como se da generalmente en embalses pequeños con gran afluencia de sedimentos o embalses grandes operados en nivel bajo durante eventos de inundación. Es un patrón típicamente causado por transporte de finos en corrientes de turbidez (*Figura 1.b*) (Navas, Valero, & Machin, 2018, págs. 1-2), (Velandia, sf, págs. 29-33)

- Una **barra estrecha**, puede formarse en los embalses tipo garganta, en los que la relación ( $V/R$ ) es grande, el sedimento es relativamente fino y el nivel de operación fluctúa permanentemente. Estos depósitos engrosan progresivamente moviéndose hacia la presa (*Figura 1.c*) (Velandia, sf, págs. 29-33)

- Los **depósitos uniformes** son poco usuales, pero pueden ocurrir en embalses estrechos con fluctuaciones son permanentes y cargas pequeñas de sedimentos finos (*Figura 1.d*) (Velandia, sf, págs. 29-33).

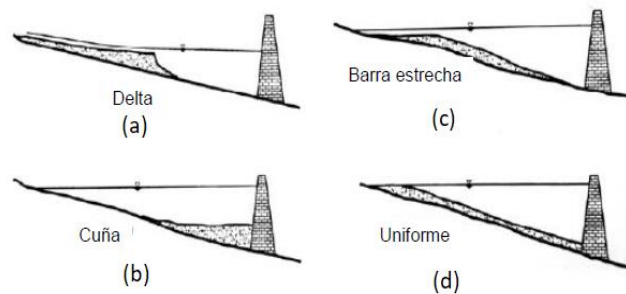


Figura 3. Patrones de depósito de sedimentos. Adaptado de Velandia, Y. (sf). Análisis comparativo de metodologías para la predicción de la acomodación de los sedimentos gruesos en embalses colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. p 29-33

**1.1.5 Transporte de los Sedimentos.** En general, los sedimentos suelen ser transportados por las corrientes de agua, en diferentes maneras. Las partículas granulares que constituyen el sedimento, se pueden trasladar por saltos, rodadura, deslizamiento, sobre el fondo o cerca de él, o pueden ser arrastradas fuera de su lugar y quedar en suspensión. El tipo de movimiento experimentado por las partículas dependerá entonces de sus características físicas (peso específico, forma, tamaño) de la composición granular del sedimento y de las condiciones de corriente (profundidad, pendiente de las superficies, velocidades) (Beguería S. , 2010, págs. 16-18). Después de haber iniciado el movimiento, las partículas pueden quedar suspendidas en el fluido, o ser arrastradas aguas abajo donde posteriormente, gracias a las fuerzas que actúan sobre ellas, se sedimentarán nuevamente en el fondo. Las partículas, caracterizadas por su finura y menor diámetro, suelen ser más susceptibles a permanecer siempre en suspensión, originando lo que se conoce como *carga de lavado*. Paralelo a esto, las partículas, que, en sus características físicas, presentan mayor diámetro y peso específico, serán susceptibles al transporte de fondo, en forma de rodadura o pequeños saltos.

Los sedimentos pueden moverse en un cauce natural, como *sedimentos en suspensión* en el flujo (partículas finas) o como *arrastre de fondo* (partículas más gruesas) que se desliza o rueda a lo largo del cauce. Normalmente, se presentan estos dos tipos de transporte de los sedimentos conjuntamente, y las proporciones entre uno y otro, dependerán esencialmente de las condiciones topográficas, geológicas, meteorológicas o forestales con que cuente la cuenca. (García R. , pág. 22)

**1.1.6 Clasificación del Transporte de Sedimentos.** El Transporte de sedimentos, puede clasificarse de acuerdo con dos parámetros: Mecanismo de transporte y origen del material. (García R. , pág. 22)

De acuerdo con el mecanismo de transporte, se pueden distinguir dos formas.

**a) Carga de Lecho:** Es el movimiento que presentan las partículas en contacto con el lecho, las cuales ruedan, se deslizan o saltan

**b) Carga en Suspensión:** Se refiere al movimiento de las partículas dentro del agua. La tendencia de asentamiento de la partícula se compensa, de manera continua, por la acción difusiva del campo de flujo turbulento.

De acuerdo con el origen del material de transporte, se realiza la siguiente distinción.

**a) Transporte de material de Fondo:** Tiene su origen en el lecho, esto es, el transporte es determinado por las condiciones del lecho y el caudal (puede consistir en carga de fondo y carga en suspensión).

**b) Carga de Lavado:** Hace referencia al material del lecho, cuyas partículas de sedimento son

tan pequeñas que tienen a considerarse nulas. El material es suministrado por fuentes externas y no depende directamente de las condiciones locales existentes (Generalmente es material fino de diámetro menos a 50  $\mu\text{m}$ ).

**1.1.7 Lecho Móvil.** Se refiere al fondo de un río, en el cual su morfología no depende de los medios climáticos, sino de la dinámica fluvial. Su geometría suele cambiar con rapidez durante los periodos de crecidas debido a que el aumento en la velocidad y el caudal genera erosión en el lecho del cauce. Asimismo, en los periodos de estiaje, el caudal disminuye considerablemente, y se producen fenómenos de deposición (García R. , pág. 22)

**1.1.8 Capacidad de transporte del río.** Existen dos procedimientos para determinar cuál es la capacidad que tienen las corrientes naturales para transportar los sedimentos de fondo y en suspensión. Uno es el método analítico por medio de fórmulas empíricas y otro el de mediciones con aparatos normalizados. Las fórmulas empíricas permiten calcular las capacidades máximas de transporte si las corrientes tuvieran suficientes sedimentos disponibles.

Desde el punto de vista analítico las fórmulas empíricas para cálculo de carga de fondo han tenido un desarrollo más completo que las de sedimentos en suspensión. Sin embargo, los resultados prácticos siguen siendo inciertos. (Ghomeshi, 2018), (Bravo, López, & Osterkamp, sf)

Los medidores normalizados de sedimentos en suspensión para realizar aforos sólidos son ampliamente utilizados en el mundo y su confiabilidad es adecuada para obtener información aceptable en estudios hidrométricos. No se ha tenido la misma fortuna con los medidores de carga de fondo y por esta razón es de uso corriente medir solamente los sedimentos en suspensión y asignar a la carga de fondo un porcentaje de lo que se obtuvo en suspensión. (Bravo, López, &

Osterkamp, sf).

## 1.2 Fundamentos Básicos en la Modelación del Transporte de Sedimentos

Los inconvenientes que se presentan en la hidráulica fluvial, es que los parámetros característicos de un cauce no son constantes. El caudal puede variar según varía el régimen hidrológico, las secciones no son fijas y la rugosidad es quizá, uno de los parámetros más difíciles de definir. Estas variaciones hacen que los cálculos hidráulicos no sean del todo precisos. No obstante, *HEC RAS 5.0* dispone de una herramienta con la cual se pueden realizar movimientos del lecho y modelación del transporte de sedimentos. (García R. , pág. 22), (Bravo, López, & Osterkamp, sf)

**1.2.1 Flujo Casi no Permanente.** El flujo casi no permanente se aproxima a un hidrograma continuo con perfiles de flujo. Para cada registro de las series de flujo, el caudal permanece constante durante un tiempo específico. Cada discretización de flujo permanente es dividida, y posteriormente subdividida en tiempos cada vez más pequeños, necesarios para el cálculo del transporte de sedimentos. *HEC RAS 5.0* utiliza dos subdivisiones, siendo a su vez, cada una, una subdivisión de la anterior, las cuales son *duración de flujo e incremento de cálculo*. (Chacon & Pazmino, 2010)

**1.2.2 Duración de flujo.** Para aproximar un hidrograma de flujo casi no permanente, a series de flujo constante, cada serie deberá poseer una duración determinada, la cual representa el tiempo para el cual el caudal se considere constante. La duración de flujo, esta dividida en incrementos de

cálculo, siendo estos tiempos necesarios para actualizar adecuadamente los datos de la geometría del lecho. (Chacon & Pazmino, 2010), (Barbosa, sf, págs. 69-70)

**1.2.3 Incremento de Cálculo.** Representa la subdivisión de la duración de flujo. Aunque el caudal sigue siendo el mismo durante la duración de flujo, la geometría del cauce y sus propiedades hidráulicas se actualizan con cada incremento de cálculo. Si el incremento de cálculo es demasiado grande, el modelo puede presentar una inestabilidad, debido a que las secciones transversales no se actualizarán constante y correctamente, lo cual generará una variación visible en los resultados. Se recomienda entonces, que el incremento de cálculo sea relativamente corto, de la magnitud de segundos. (Chacon & Pazmino, 2010)

## 2. HEC RAS

*HEC-RAS*, es un software de libre distribución, elaborado por el *HIDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC)* de la *US Army Corps of Engineers (USACE)*, cuya finalidad, desde su primera versión, *HEC RAS 1.0*, lanzada en agosto de 1995, se encuentra el modelamiento de calidad del agua, transporte de sedimentos a lo largo de un cauce, y modelamiento de inundaciones, a través del concepto de flujo estable e inestable. Actualmente cuenta con una versión mejorada, *HEC-RAS 5.0*. desde su última actualización en septiembre de 2016. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016) Es capaz de desarrollar cálculos en una y dos dimensiones de sistemas hídricos, para lo cual cuenta con cuatro módulos de aplicación: *simulación de perfiles de flujo permanente*, *simulación*

*de flujo no permanente, cálculo de transporte de sedimentos y calidad de aguas.* (Geo-Innova, 2018).

En el módulo de *flujo no permanente*, soluciona las ecuaciones de conservación de masa y momentum, mediante un esquema implícito de diferencias finitas. En el módulo de *transporte de sedimentos*, logra realizar un análisis, mediante el uso de diferentes métodos, para distintas condiciones de concentración, distribución de granos y velocidad de caída, las cuales pueden ser definidas por el usuario. Las variaciones que se producen en el lecho se calculan mediante la ecuación de continuidad de sedimentos. (Barbosa, sf, págs. 69-70), (Geo-Innova, 2018)

## 2.1 Evolución del Software

*HEC RAS*, ha desarrollado un proceso evolutivo, el cual incluye nuevas herramientas de trabajo para el análisis de flujo en diferentes condiciones. Esta evolución va desde el mejoramiento de su primera versión, en donde se consideraba un complejo grado de limitantes para conocer la manera un tanto más precisa del comportamiento del flujo. Se hacía aún más notable cuando no se ajustaba de manera correcta a la topografía y forma del terreno por donde circula el agua. En la versión actual *HEC RAS 5.0*. se adecua la modelización del flujo en una y dos dimensiones para condiciones permanentes y no permanentes, simulación y análisis del transporte de sedimentos en una dimensión (ya que *HEC-RAS* no es capaz de reproducir la erosión regresiva del sedimento), además del análisis de la calidad del agua, todo esto dentro de un régimen de flujo crítico, subcrítico o mixto. (Chacon & Pazmino, 2010), (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)

## 2.2 Interfaz del Software

El enfoque principal en el diseño de la interfaz fue facilitar el uso del software, manteniendo un alto nivel de eficiencia para el usuario (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016). Respecto a versiones anteriores, *HEC RAS 5.0*. presenta una interfaz cada vez más gráfica, conservando en esencia la estructura inicial, cuya finalidad es brindar una interfaz amigable para el usuario, permitiendo tener al alcance los iconos representativos de las herramientas necesarias para la realización de una tarea específica (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016).

Además de esto, las versiones cada vez más avanzadas del software, han incluido cambios respecto a las funciones y capacidades del software, respecto al tiempo, lo que convierte a *HEC RAS* en un software idóneo para la modelación y análisis del flujo, en tiempos reales. Gráficamente, la evolución de la interfaz de cada versión se presentará en la figura 2, 3 y 4. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016).

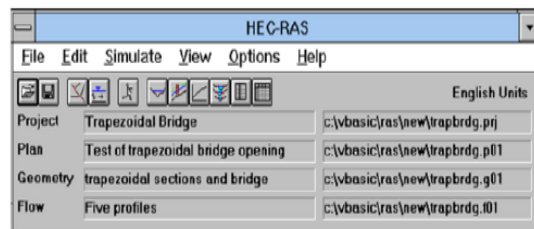


Figura 4. Interfaz primera versión *HECR RAS* 1995. Adaptado de Lluen, W. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales de flujo de agua en ríos. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. p 13

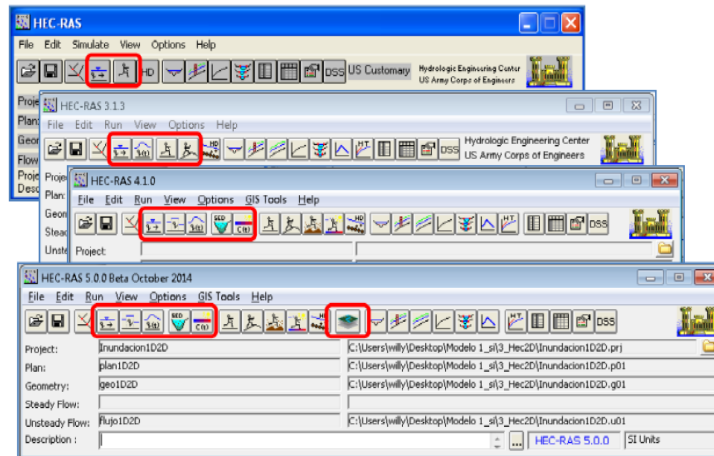


Figura 5. Evolución de la interfaz de *HEC RAS* a lo largo de sus diferentes versiones. Adaptado de Lluen, W. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales de flujo de agua en ríos. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. p 13

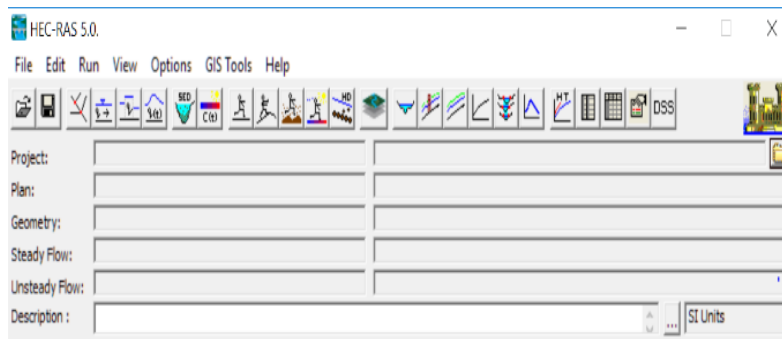


Figura 6. Interfaz del software *HEC RAS* 5.0. (Última versión). Adaptado de Lluen, W. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales de flujo de agua en ríos. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. p

### 2.3 Capacidades y Ventajas de la Modelización de Sedimentos con *HEC RAS 5.0*.

En *HEC RAS 5.0*. resulta novedoso la simulación y análisis en dos dimensiones, herramienta con la cual no se contaba antes. Este tipo de modelación ha permitido el software desarrolle nuevas capacidades. De igual manera, resulta apropiado la modelación en una dimensión, en dos dimensiones, o en una combinación de ambas. (Beguería S. , 2010, págs. 30-35)

- **La interfaz de usuario** permite un manejo amigable. De esta manera, pretende elevar el rendimiento y aumentar la eficiencia en el uso del software. (Lluen, 2015, pág. 13), (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)
- **Los efectos causados en el cauce** por presencia de obras hidráulicas, como lo son vertederos, puentes, alcantarillas, entre otros, pueden ser considerados en el cálculo. (Beguería S. , 2010, págs. 30-35)
- **En el caso de flujos no permanentes**, el sistema permite modelar el flujo por medio de una serie de canales abiertos. (Beguería S. , 2010, págs. 30-35)
- **En cuanto al transporte de sedimentos**, se pueden calcular los ensanchamientos o las reducciones, producidas por la erosión y socavación. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016), (Beguería S. , 2010, págs. 30-35)
- **Puede interpolar las secciones transversales**, proporcionando un número considerable de estas, con lo cual se puede conseguir mayor estabilidad en el modelo. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)
- **Cuenta con una herramienta que permite la simulación del transporte de los sedimentos de manera unidimensional**, además de los límites móviles resultantes de la deposición a lo largo del

cauce, en largos periodos de tiempo. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)

- Posee una extensión en ArcGIS, denominada Hec-GeoRas, que permite procesar datos georreferenciados en doble dirección. (Geo-Innova, 2018)

Estas son solo algunas de las ventajas que ofrece *HEC RAS 5.0*. Dependerá del uso que se le quiera dar al software, las ventajas que se pueden obtener de éste.

#### **2.4 Limitaciones del Modelamiento en *HEC RAS 5.0*.**

Se debe comprender que una solución calculada a través del software HEC-RAS no es una única solución real, por el contrario, solo se trata de un posible resultado.

Dicho esto, se ha encontrado que el software cuenta con una serie de limitantes, las cuales impiden que sea útil en algunos casos. Tales limitaciones se mencionan a continuación (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016):

- No es posible modelar el transporte de sedimentos erosión/deposición en áreas de flujo 2D (Geo-Innova, 2018)

- La ecuación de la energía supone siempre distribuciones hidrostáticas de presiones. Entonces, la solución es una simplificación, y será adecuada cuando la distribución de presiones se acerque mucho de la hidrostática. (Beguería S. , 2010, págs. 30-35)

- No permite el modelamiento en cauces con pendientes superiores al 10%. En caso de contar con pendientes superiores, los perfiles de flujo se deben conseguir dividiendo por tramos el cauce, hasta obtener pendientes menores o iguales al 10%. (Barbosa, sf, págs. 69-70), (Geo-Innova, 2018)

## 2.5 Métodos de Cálculo para Estimar la Distribución y Transporte de Sedimentos en *HEC RAS 5.0*.

Las ecuaciones utilizadas para determinar la distribución y transporte de sedimentos, tratan de cuantificar el caudal sólido de una corriente, en función de las características hidráulicas, geométricas y granulométricas del cauce. Suelen clasificarse en modelos físicos (basados en fundamentos hidráulicos a partir de las leyes de conservación de la energía), y modelos empíricos (basados en la probabilidad y estadística, regresiones y otras hipótesis particulares). (Bravo, López, & Osterkamp, sf), (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)

**2.5.1 Funciones de Transporte de Sedimentos.** Las ecuaciones empíricas que logran describir el movimiento de las partículas dentro del lecho de un fluido se basan en la premisa determinística, la cual parte de la afirmación que existe únicamente una relación directa entre las variables dependientes e independientes, siendo las variables dependientes, en este caso, el transporte de sedimentos, y las independientes, el caudal, la velocidad, el esfuerzo cortante, las pérdidas de energía y la potencia de flujo. Las funciones empleadas por el software *HEC-RAS 5.0* en la modelación de sedimentos son las siguientes. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016):

- **Función de transporte de Ackers & White**

Es una función de carga total que fue desarrollada con datos obtenidos de un aforador para sustratos que van desde el orden de las arenas a gravas finas. La hidrodinámica fue seleccionada para cubrir un rango de configuración del lecho, el cual incluye dunas, ondas y condiciones de lechos planos. El sedimento suspendido es función de la velocidad de corte, mientras que la carga

del lecho es función del esfuerzo cortante. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)

- **Función de Engelund & Hansen**

Aplicando el concepto de conservación de energía, desarrollaron una ecuación de carga total de transporte, mediante datos obtenidos de un aforador. Se usaron arenas relativamente uniformes de diámetros entre los 0.19 mm y 0.93 mm. Es, en esencia, una función relativamente simple de: la velocidad del canal, la fuerza cortante del lecho, y el material de gradación  $d_{50}$  (Diámetro del tamiz por el cual pasa aproximadamente la mitad de la masa del material de gradación). Debe aplicarse estrictamente a sistemas arenosos y fondos con forma de dunas, de acuerdo con el principio de similitud. (Crespo, sf, págs. 44-47)

- **Función de Meyer, Peter & Müller (1948)**

Fue una de las primeras ecuaciones desarrolladas y es quizá, la más utilizada y con más continuidad en el campo de la ingeniería fluvial, para el cálculo de transporte de sedimentos. Esta ecuación de transporte de carga de fondo es útil en ríos con sedimentos relativamente gruesos. En su mayoría, las pruebas fueron realizadas utilizando sustratos uniformes de grava. Es de resaltar que esta función tiende a ignorar el transporte de material fino, por lo cual, solo se hace útil cuando se trabaja con material de fondo, relativamente grande (partículas con diámetro máximo  $d_{90}$ ). (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016), (Crespo, sf, págs. 44-47)

- **Función de transporte Toffaleti**

Desarrolló una función de carga total, principalmente para partículas del tamaño promedio de las arenas, considerando ríos de gran longitud de cauce. Sus supuestos se basaban en que debía

considerarse la descarga de sedimentos, del ancho del canal, igual al de un canal rectangular de ancho  $B$  y profundidad  $R$ , siendo  $R$  el radio hidráulico del canal de estudio. Esta función no está directamente influenciada por la velocidad de corte ni el esfuerzo cortante en el lecho. En contraste, fue formulada con base a regresiones de temperatura y un exponente empírico que describe la relación entre los sedimentos y las características hidráulicas. (HEC-RAS River Analysis System, 2016), (Crespo, sf, págs. 44-47)

- **Función de transporte Yang**

Yang, revisó los supuestos usados en la deducción de las ecuaciones del transporte de sedimentos y concluyó que los supuestos de la tasa de transportes de sedimentos, que pueden ser determinados por la descarga de agua, la velocidad media del flujo, la pendiente de energía o el cortante de fondo, son cuestionables. Por lo que sugirió una ecuación de carga total de transporte de sedimentos. Básicamente la ecuación está en función de dos relaciones separadas de transporte, de arenas y gravas. La transición entre arena y grava es suavizada con el objetivo de no tener grandes discontinuidades.

La ecuación de Yang tiende a ser muy sensible a la velocidad de corriente y más sensible aún, a la velocidad de caída, comparada con las ecuaciones planteadas por otros autores. (Crespo, sf, págs. 44-47)

- **Función de transporte Wilcock**

Wilcock planteó una ecuación de carga sobre el lecho, diseñada para superficies gradadas que contengan tanto arenas como gravas. Se basa en la teoría de que el movimiento de los sedimentos depende principalmente del material en contacto directo con el flujo (HEC-RAS River Analysis

Sistem, 2016). La teoría central de Wilcock se basa en considerar que el potencial de transporte de la grava aumenta, conforme aumenta el contenido de arena, esto es, si el contenido de arena incrementa, disminuirá el esfuerzo cortante, por tanto, el exceso de corte del lecho se incrementa y el transporte total incrementa. (Crespo, sf, págs. 44-47)

Las partículas sedimentables suelen ser sometidas a las fuerzas hidrodinámicas de flujo. Si la resultante entre las fuerzas de arrastre es mayor que la resultante de las fuerzas de equilibrio, la partícula iniciará su movimiento. Posteriormente, debido al balance entre las fuerzas de arrastre y las de equilibrio, las partículas procederán a sedimentarse. A continuación, se presentan las funciones de velocidad de caída, utilizadas por el software *HEC RAS 5.0*. (Hec-GeoRAS GIS, págs. 47-95)

**2.5.2 Funciones de Velocidad de Caída de Partículas.** Cuando las partículas están en movimiento, resulta complejo aplicar ecuaciones que describan exactamente la velocidad de caída, pues ésta depende del coeficiente de arrastre “Cd” el cual a su vez es función del número de Reynolds “Re”. Es por esto, que, una solución aproximada solo puede resultar de procesos iterativos. Algunos procesos iterativos con los que trabaja el software *HEC RAS 5.0*. a la hora de modelar la velocidad de caída de las partículas son (Quispe, 2013, págs. 86-88):

- **Función de Velocidad Rubey (Ruby)**

Rubey (1933), desarrolló una relación analítica entre las velocidades de caída de las partículas, las propiedades del sedimento y el fluido, basándose en la combinación de la ley de Stokes (únicamente para partículas finas sujetas a la resistencia viscosa) y una fórmula de impacto para partículas fuera del alcance de Stokes. Rubey señala que, las partículas con gravedad específica

aproximada a 2.65, son las más apropiadas para el uso de esta ecuación, ya que el resto de las partículas con gravedad específica diferente, tiende a caer antes de que se pueda determinar los resultados de su velocidad de caída. (Beguería S. , 2010, págs. 30-35), (Quispe, 2013, págs. 86-88)

- **Función de Velocidad Toffaleti**

Toffaleti (1968), presenta una tabla de velocidades de caída con un factor de forma de 0.9 y gravedad específica de 2.65. diferentes velocidades de caída están asociadas para rangos de temperatura y tamaños de partículas, clasificándolas desde arenas muy finas hasta gravas medias. (Quispe, 2013, págs. 86-88)

- **Función de Velocidad Van Rijn**

Van Rijn (1993), aproxima las curvas de velocidad de caída del Comité Institucional de Recursos de agua de Estados Unidos, para partículas que no sean esféricas o presenten poca esfericidad, con un factor de forma aproximado a 0.7 y una temperatura del agua que este alrededor de los 20 °C. (Beguería S. , 2010, págs. 30-35), (Quispe, 2013, págs. 86-88)

El fundamento teórico de estas funciones se basa en la velocidad de caída de las partículas sedimentables, cayendo a través de una columna de agua, lo que está estrechamente relacionada con el balance entre la fuerza gravitacional y la fuerza de arrastre en una partícula. (Beguería S. , 2010, págs. 30-35)

### **3. Análisis de las variables de entrada requeridas para la simulación del transporte de sedimentos, a través de *HEC RAS 5.0*.**

*HEC-RAS*, cuenta con la capacidad de modelar cambios en el lecho con base en el equilibrio entre la capacidad de transporte del río y la cantidad de sedimentos disponibles en el río (Beguería S. , 2010, págs. 30-35). Los pasos necesarios en la implementación de la modelación del transporte de sedimentos, en *HEC RAS 5.0*. inician con la determinación de la información, tal como, información geográfica o modelos digitales de terreno y su gestión, información del flujo estudiado y finalmente información alusiva a los procesos de erosión y sedimentación de la zona de estudio. (Crespo, sf, págs. 44-47)

Una vez se cuenta con la información, se procederá a desarrollar un plan para el análisis del transporte de sedimentos. Será necesario desarrollar entonces con 4 elementos fundamentales: Un ***plan de análisis de sedimentos***, un ***archivo geométrico***, un ***archivo de flujo Quasi-No permanente*** y, finalmente, un ***archivo de sedimentos*** (*Figura 5*). (Crespo, sf, págs. 44-47)

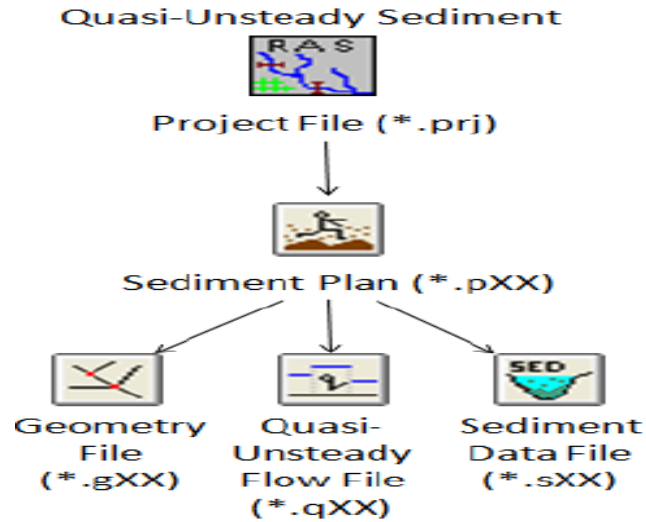


Figura 7. Procedimiento para la modelación de sedimentos en *HEC-RAS 5.0*. Adaptado de: HEC-RAS River Analysis Sistem. (2016). 2D Modeling user's. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers.

### 3.1 Parámetros de Entrada

Haciendo uso del manual de usuario de *HEC-RAS 5.0*, disponible en la página web del *U.S. Army Corps of Engineers* (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016), además de la búsqueda en base de datos de universidades y en proyectos de investigación relacionados con el tema de la simulación del transporte de sedimentos, se logró hacer un análisis de los parámetros de entrada necesarios para la correcta simulación del transporte de sedimentos a lo largo de un embalse (Ver Tabla 3).

Para hacer uso idóneo del software y obtener los resultados que más se ajusten a nuestras necesidades, es necesario contar con la geometría del terreno, bien sea a través de secciones transversales del embalse, o mediante un archivo que contenga la descripción detallada de la superficie del terreno. Para esto se puede desarrollar un modelo en *HEC-GeoRAS* en su versión

4.2. la cual es una extensión del software *ArcGIS*, que, a su vez, permite digitalizar sistemas de información geográfica, el cual describirá de manera precisa la morfología del terreno, y posteriormente, se podrá exportar a *HEC-RAS 5.0*. (Geo-Innova, 2018)

Módulo de HEC RAS	Datos de entrada
Geometría	Secciones Transversales
Flujo	Series de Flujo Paso de Cómputo Series de Temperatura Profundidad Normal
Sedimentos	Granulometría del Lecho Límites de Erosión Condiciones de Borde Ecuaciones de Transporte de Sedimentos Ecuaciones de Velocidad de Caída Método de Selección

*Figura 8.* Parámetros de entrada para la simulación del transporte de sedimentos en HEC-RAS 5.0. Adaptado de Crespo, L. Simulación de la sedimentación de la presa Mazar (Ecuador). Tesis de Maestría. Quito, Ecuador. p. 44-47

Si bien, *HEC-RAS*, dentro de sus funciones, permite el modelamiento digital del terreno, se debe entender que su objetivo principal es realizar estudios de inundación y determinar las zonas inundables, esto quiere decir que no es un software desarrollado para la generación de modelos digitales del terreno (*MDT*), por consiguiente, las herramientas con las que cuenta no son tan avanzadas como las que posee un software especializado en *MDT*. Sumado a esto, está el hecho de que *HEC-RAS* no se encuentra en la capacidad de seleccionar el tirante crítico en secciones complejas (Geo-Innova, 2018) [14]. *HEC-GeoRAS 4.2*. servirá, por tanto, para elaborar la cartografía base que describirán los elementos territoriales de la zona de estudio. (Geo-Innova, 2018)

En cuanto a los parámetros de entrada de flujo, es necesario contar con la pendiente media del cauce del embalse, condiciones de frontera, series de caudales, con sus respectivas duraciones, y series de temperatura (la velocidad de caída de las partículas y algunas ecuaciones de transporte de sedimentos suelen ser sensibles a la viscosidad del agua, por tanto, los análisis de transporte de sedimentos requieren datos de temperatura). *HEC-RAS* permite que los usuarios ingresen valores de temperatura cuando los datos de temperatura son insuficientes para crear series de tiempo. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016), (Geo-Innova, 2018), (Crespo, sf, págs. 44-47)

Juntamente, los parámetros de entrada referentes a los archivos de sedimentos deben incluir la curva granulométrica (en cada tramo o sección transversal del embalse), límites de erosión con que cuenta el embalse, las condiciones de frontera, y las ecuaciones pertinentes a el transporte de sedimentos y velocidad de caída. Estas ecuaciones son de suma importancia, pues de estas dependerán los resultados que se puedan obtener con el software (*ver figura 6*). Finalmente, se hará necesario contar con el tiempo para el cual se va a desarrollar la simulación del transporte de sedimentos dentro del embalse. (Chacon & Pazmino, 2010), (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)

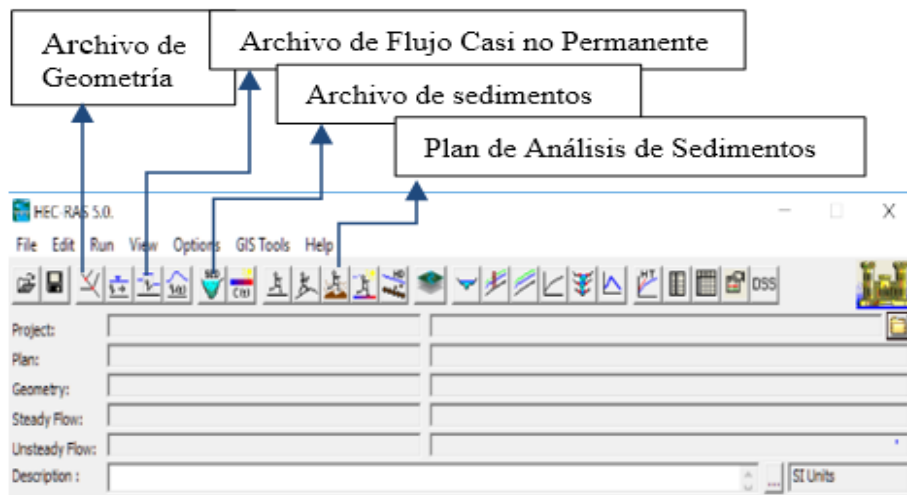


Figura 9. Archivos necesarios para modelo de Sedimentos

Durante el transcurso de estudio, el usuario podrá formular varios planes, los cuales representaran un conjunto específico de datos geométricos y de flujo. Después de realizar las simulaciones para los diferentes planes, se podrá comparar los resultados simultáneamente, a través de las tablas y las gráficas, las cuales son las salidas de la simulación.

### 3.2 Modelamiento del transporte de sedimentos mediante *HEC RAS 5.0*

**3.2.1 Información Geográfica.** Conocidas las condiciones topográficas del embalse, es posible lograr la modelación del transporte de sedimentos. Esto, debido a que se podrá conocer las características de los tirantes críticos, donde las secciones transversales son más complejas. Se hace imperativo una visita en campo bien planificada, aún más, cuando dentro de la zona de estudio existan estructuras, bien sea de protección, de paso o de regulación, que requieran de instrumentos de medida para determinar su geometría, la cual, posteriormente será requerida en el proceso de análisis y que deberá ser introducida de forma manual al software. Una vez obtenida toda la

información pertinente en campo, se procederá a integrar y almacenar dicha información en un SIG (Sistema de Información Geográfica), el cual, para este caso se ha *elegido Hec GeoRas 4.2*, debido a sus ventajas para el cual está diseñado para procesar datos georreferenciados y que posteriormente pueden ser exportados a *HEC-RAS 5.0*.

**3.2.1.1 Hec-Geo RAS 4.2:** *Hec-GeoRAS 4.2* es una extensión de *ArcMAP*, la cual permite el procesamiento de datos georreferenciados, cuya importancia radica en los procesos de análisis de una adecuada y precisa geometría, o en los procesos de toma de decisiones de forma ordenada de los datos abstraídos en campo (*Hec-GeoRAS GIS*, págs. 47-95). Un archivo creado con *Hec-GeoRas* puede contener un gran número de información, tales como secciones transversales del cauce, trazado del río, límites entre el cauce principal y llanuras de inundación, entre otras, tantas, como capas de información se puedan introducir en el archivo SIG (*Geo-Innova*, 2018). Es por esta razón que *Hec-GeoRAS* se convierte en una herramienta complementaria, capaz de aprovechar toda la información georreferenciada disponible, y así, generar de manera óptima y eficaz, geometrías para modelos hidráulicos, sin omitir detalles de forma, contorno o elevación. (*HidrojING*, 2018).

Para el correcto funcionamiento de *Hec-GeoRas*, se requiere un modelo digital de terreno (*MDT*) en formato *TIN* (Triangular Irregular Network) o *GRID* (o formato Ráster), el cual no puede presentar espacios de información vacío; en caso de poseer, se deben rellenar con información. Para la correcta modelación del terreno, será necesario seguir los siguientes pasos (*Cameron*, 2012):

- I. Crear un archivo en ArcMap.
- II. Añadir o crear un modelo digital del terreno (MDT).
- III. Crear capas que contengan información específica.
  - a. Stream centerline: Delimitación del talweg.
  - b. Orillas del cauce principal (Banks Lines).
  - c. Líneas de corte transversal.
  - d. Puentes/Alcantarillas
  - e. Áreas ineficaces y obstrucciones de bloqueo  
Uso del suelo.

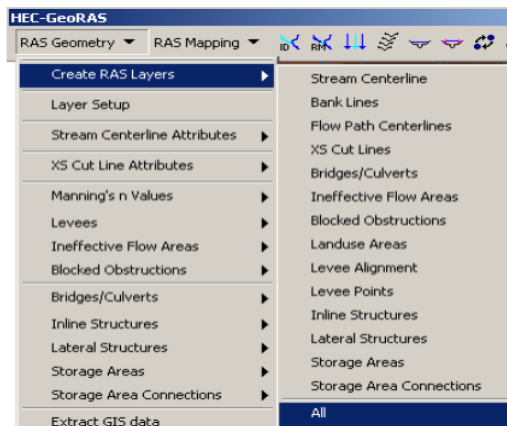


Figura 10. Menú de atributos de capas Hec-GeoRas. Adaptado de García, R. (sf). Análisis y evaluación del transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas. Tesis de pregrado en Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia. p, 22

**3.2.1.2 Geometría de la Presa:** Al finalizar la edición de los datos geométricos en *Hec Geo-Ras*, se debe exportar este archivo al software *HEC RAS 5.0* (**Ver Anexo A**). Dentro de *HEC RAS 5.0* se procede a completar el archivo geométrico, creando la presa mediante la función **Inline**

**Structure.** Aquí se puede definir su forma, y posición, así como todos los componentes tales como vertederos y desagües de fondo. (Crespo, sf, págs. 44-47), (Quispe, 2013, págs. 86-88)

	Distance	Width	Weir Coef
	0	12	1.4

Clear Del Row Ins Row Filter...

Edit Station and Elevation coordinates

	Station	Elevation
2	395.	21.66.
3	395.	21.53.
4	430.	21.53.
5	430.	21.66.
6	434.	21.66.
7	434.	21.53.
8	459.	21.53.
9	459.	21.66.

U.S. Embankment SS: 0 D.S. Embankment SS: 0

Weir Data  
Weir Crest Shape  
 Broad Crested  
 Ogee

OK Cancel

Enter distance between upstream cross section and deck/roadway. (m)

*Figura 11.* Ingreso de datos de la presa. Adaptado de Crespo, L. (sf). Simulación de la sedimentación de la presa Mazar (Ecuador). Tesis de Maestría. Quito, Ecuador. p. 44-47

**3.2.2 Flujo Quasi-No Permanente.** Su enfoque se puede aproximar a un hidrograma de flujo, a través de una serie de perfiles de flujo constante asociado con su correspondiente duración. *HEC-RAS 5.0* incluye tres opciones para establecer condiciones de contorno aguas abajo Quasi-No permanentes: Etapa de Series de flujo, series de temperatura y Profundidad normal (*Figura 9 y 10*). (Crespo, sf, págs. 44-47)

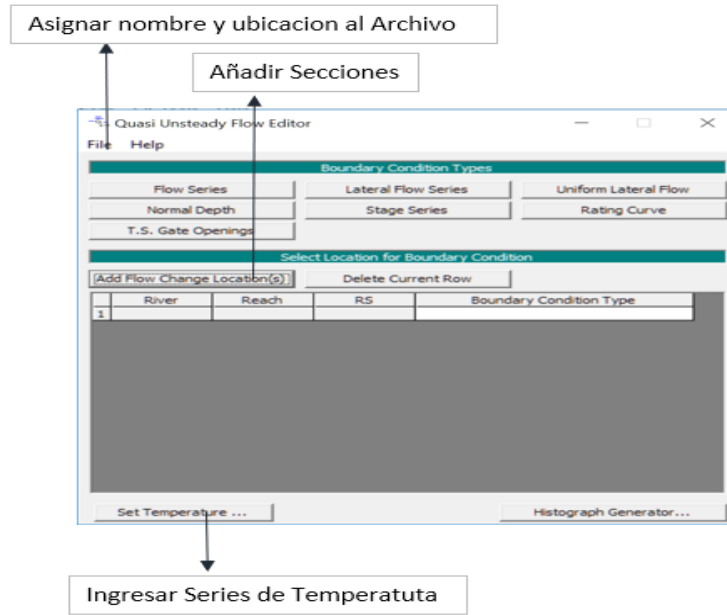


Figura 12. Editor de flujo Quasi-No permanente

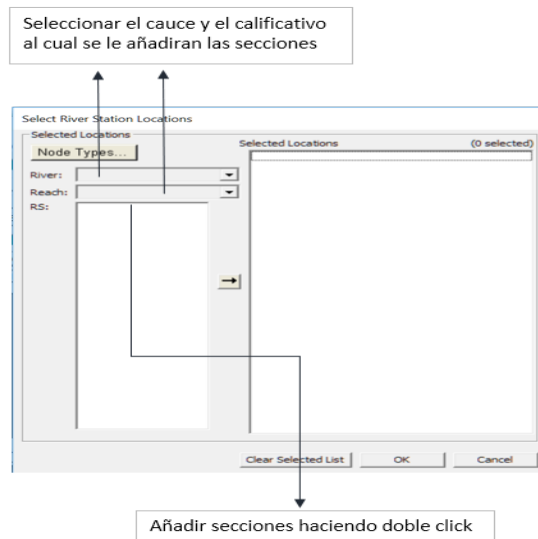


Figura 13. Editor de Secciones para asignar Flujo

3.2.2.1 *Series de Flujo:* HEC-RAS 5.0 solo permite introducir series de flujo en la última sección transversal aguas arriba, por lo que el usuario debe introducir manualmente las series de flujo mediante el editor de series de flujo. Una vez allí, será necesario que el usuario introduzca los datos de forma manual, referentes a la duración de flujo (en horas), incremento del cálculo (en horas) y finalmente el caudal (en m<sup>3</sup>/s) (Crespo, sf, págs. 44-47). El flujo Quasi-No permanente puede manejar pasos de tiempo irregulares, permitiendo pasos de tiempo largo, durante transporte de sedimento cuyas partículas tiene menor densidad y peso, y pasos de tiempo corto, durante flujos grandes que transportan la mayor parte de los sedimentos. Dicho esto, cada flujo tendrá dos pasos de tiempo: una duración de flujo y un incremento del cálculo. (Quispe, 2013, págs. 86-88)

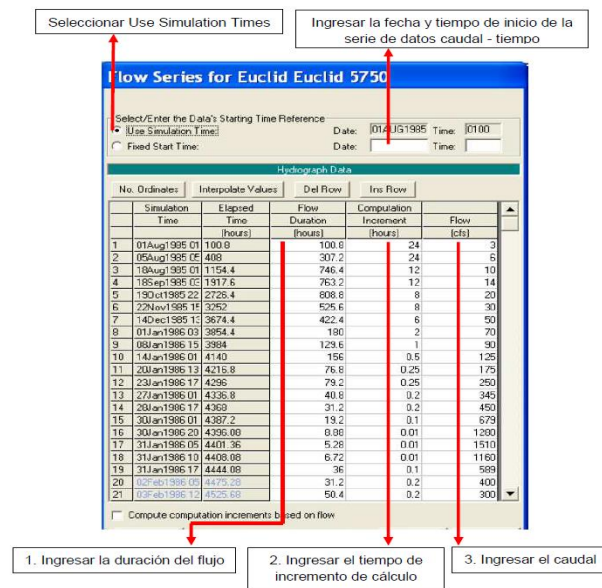


Figura 14. Editor de Series de Flujo. Adaptado de Crespo, L. (sf). Simulación de la sedimentación de la presa Mazar (Ecuador). Tesis de Maestría. Quito, Ecuador. p. 44-47

**3.2.2.2 Profundidad Normal:** El principio activo con el que trabaja la profundidad normal es la pendiente de fricción, la cual representa la pendiente de la línea de energía y puede calcularse previamente midiendo la pendiente del lecho. Con la pendiente de fricción, el flujo, el coeficiente de fricción  $n$  de Manning y la forma de la sección transversal, *HEC-RAS 5.0* podrá calcular la profundidad normal, mediante la ecuación de Manning. Se debe tener en cuenta la premisa que la pendiente es inmutable y que los procesos de erosión y deposición se producen a una velocidad constante, por tanto, la profundidad normal en ocasiones puede ser una frontera mal planteada, a menos que el límite aguas abajo se encuentre en un lugar donde la corriente se encuentre en equilibrio como es el caso de un embalse (Quispe, 2013, págs. 86-88)

**3.2.2.3 Series de Temperatura:** La velocidad de caída de las partículas y algunas ecuaciones de transporte de sedimentos suelen ser sensibles a la viscosidad del agua, por tanto, los análisis de transporte de sedimentos requieren datos de temperatura. *HEC-RAS 5.0* permite que los usuarios ingresen valores de temperatura por paso de tiempo, para todo el modelo. (Crespo, sf, págs. 44-47), (Quispe, 2013, págs. 86-88)

**3.2.3 Archivo de Sedimentos.** Para el transporte de sedimentos, el usuario tiene dos opciones. La primera, trabajar un modelo que simula una secuencia de condiciones permanentes, a esto se le conoce como un modelo Quasi No-permanente. En este caso se resuelven las ecuaciones de flujo gradualmente variado y se cambian las condiciones con el tiempo en periodos de días, semanas o meses. La estabilidad del modelo suele ser mayor debido a que cada cálculo es individual. La segunda opción, trabajar un modelo de flujo No-permanente en el cual se considera el flujo variando continuamente respecto al tiempo. En este caso se resuelven las ecuaciones con los

componentes dinámicos (Quispe, 2013, págs. 86-88). Para el análisis de transporte de sedimentos, el modelo requiere de cuatro archivos. Estos son archivos de caudales, archivo con la granulometría del cauce, datos de sedimentos y un archivo especificando el plan, que es una combinación de cada uno de los elementos anteriores. Es de resaltar que si los datos geométricos cambian, los datos de sedimentos necesitaran actualizaciones antes de ejecutarse el programa, ya que los resultados de sedimentos suelen ser muy sensibles a los resultados hidráulicos, por lo que se recomienda, que antes de ingresar datos de sedimentos, probar el modelo hidráulico sobre el rango esperado de flujos utilizando la opción de flujo constante de *HEC-RAS 5.0*, calibrando los valores  $n$  de Manning para varios flujos, identificando áreas de flujo ineficaz y evaluar el espaciamiento de la sección transversal. (Crespo, sf, págs. 44-47), (Quispe, 2013, págs. 86-88)

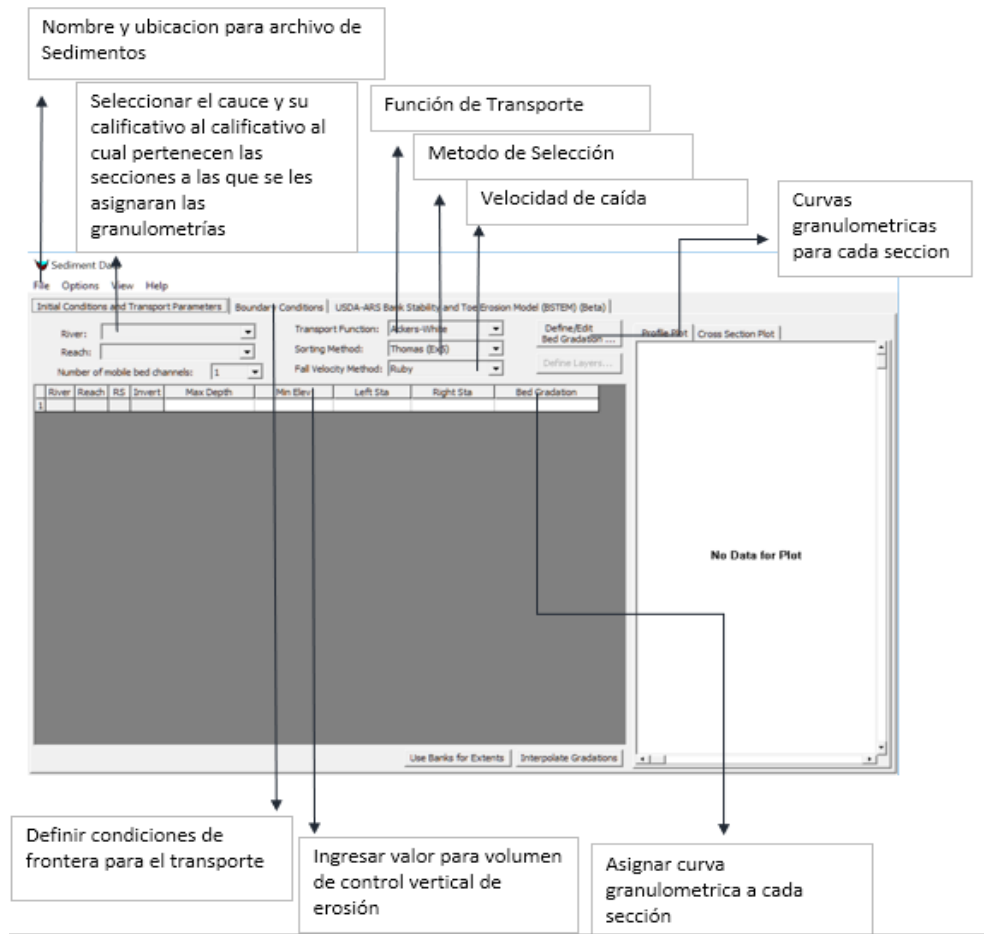


Figura 15. Editor de Archivo de Sedimentos

### 3.2.3.1 Condiciones Iniciales y Parámetros de Transporte de Sedimentos.

#### a) Función de Transporte

Para definir la función de transporte que mejor se adapte al tipo de sedimentos se manejará (Crespo, sf, págs. 44-47).

- Función del Transporte de Ackers & White
- Aproximación de Engelund & Hansen

- Meyer, Peter & Müller (1948)
- Yang (1973, 1984)
- WilcoCK (2001)

#### **b) Método de Clasificación**

Cuando se habla del método de clasificación, se hace referencia al espesor del lecho móvil, y su seguimiento vertical. En su última versión, *HEC-RAS 5.0* nos presenta una serie de opciones, las cuales se adaptan a las necesidades propias de cada simulación. (Quispe, 2013, págs. 86-88)

- **Thomas (Ex5):** Es un modelo que cuenta con tres capas, el cual incluye la capacidad de formar un estrato colindante con la erosión del material, en las profundidades, en las cuales, por la existencia de material más resistente, se produce un armado de lecho natural. (Quispe, 2013, págs. 86-88)

- **Copeland (Ex7):** Este método resulta útil en ríos con lechos de arena, ya que forma capas de armado lentamente. (Quispe, 2013, págs. 86-88)

- **Capa Activa:** Presenta, de manera simplificada, un lecho con dos capas. Esta opción permite que el espesor de la capa activa sea igual al diámetro  $d_{90}$ , convirtiéndose en un método valioso únicamente para lechos de grava y destinados en particular, para el uso de la función de transporte de Wilcock. (Quispe, 2013, págs. 86-88)

#### **c) Método de la Velocidad de Caída**

*HEC-RAS 5.0* presenta una serie de métodos, los cuales se adaptan a las necesidades de los usuarios. Estos métodos pueden ser: (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016), (Quispe, 2013,

págs. 86-88)

- Rubey (Ruby)
- Toffaleti
- Van Rijn

#### **d) Profundidad Máxima o Elevación Mínima**

El editor de los datos de sedimentos presenta una tabla dinámica, en la cual se encontrará una serie de columnas referente a las características de cada una de las secciones transversales. Será necesario que el usuario especifique la dimensión vertical del volumen de control (profundidad máxima y elevación mínima del lecho móvil), sin embargo, el software solo aceptará una de estas dimensiones por sección, eliminando automáticamente el primer parámetro si el usuario especifica los dos. (Crespo, sf, págs. 44-47), (Quispe, 2013, págs. 86-88)

#### **e) Límites de Sección Transversal Móvil**

Finalmente, cada volumen de control de sedimentos requiere un ancho. Por lo que el software cuenta con la opción “límites de lecho móvil” en el cual el usuario podrá delimitar el cauce principal, respecto de la llanura de inundación. (Crespo, sf, págs. 44-47)

#### **f) Granulometría del Lecho**

Cada sección transversal requiere datos iniciales de gradación del lecho. El usuario podrá definir gradaciones de sedimentos en una base de datos, para después asociarla con cada sección transversal apropiada. Para lograrlo, es necesario crear curvas granulométricas, las cuales

corresponden a muestras individuales tomadas en campo. (Crespo, sf, págs. 44-47)

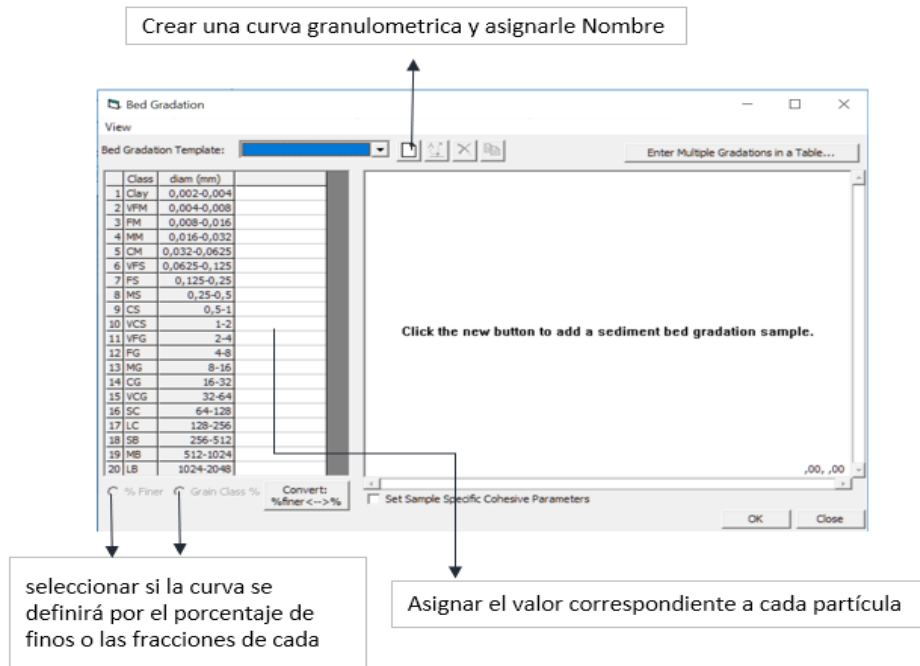


Figura 16. Editor de curvas Granulométricas.

**3.2.3.2 Condiciones de Borde:** En la segunda pestaña del editor de datos de sedimentos se podrá definir las condiciones de borde de los sedimentos. *HEC-RAS 5.0* requiere datos de sedimentos en cada frontera del modelo (*carga de equilibrio y series de carga y descarga de sedimento*), aguas arriba, y puede incluir cargas de sedimentos opcionales, locales y laterales, cuando lo considere necesario. El software enumerará automáticamente, de manera consecutiva.

**a) Curva de Descarga de Sedimentos**

La curva de descarga, *Rating Curve*, permite calcular la carga de los sedimentos en función del aumento del caudal. El incremento del caudal está asociado a las variaciones que pueden modificar

las secciones transversales aguas arriba, debido a incrementos o reducciones laterales del cauce del embalse.

Esta opción presenta una ventana de edición referente a la curva de descarga, en la cual cada columna tiene una correlación de caudal y carga total de sedimentos la cual debe ser ingresada en unidades de masa sobre tiempo (ton/día). *HEC-RAS 5.0* no permite espacios en blancos, por lo cual, la carga de sedimentos de cada tipo de partícula debe ser especificada mediante una fracción de porcentaje o fracciones decimales, no acumulativas. Una vez ingresados los porcentajes o fracciones de cada partícula, el total deberá sumar 100% o 1.0 respectivamente, de lo contrario, *HEC-RAS 5.0* normalizará el total durante los cálculos. (Crespo, sf, págs. 44-47)

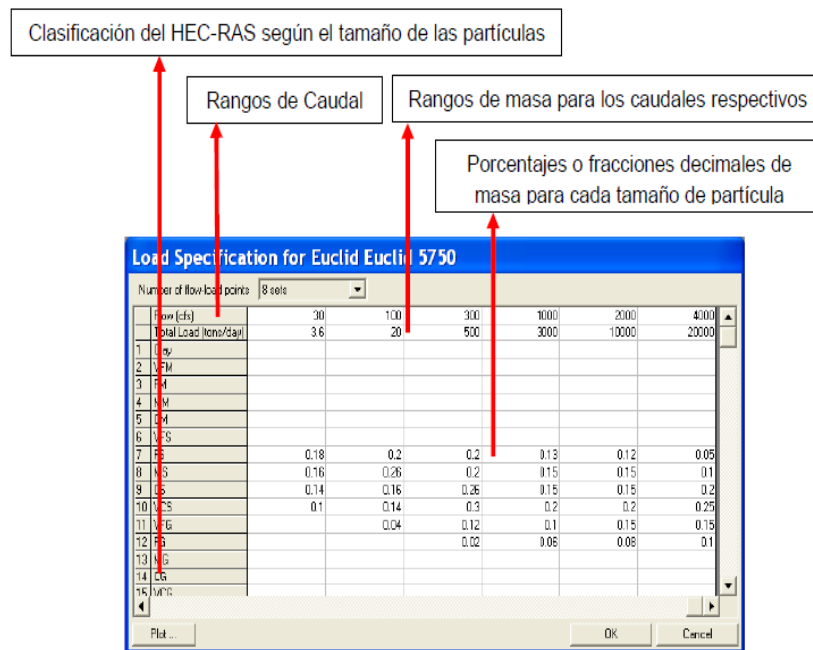


Figura 17. Editor Serie de Descarga de Sedimentos. Adaptado de Chacón, J.; Pazmino, E. (2010). Análisis de flujo gradualmente variado no permanente y transporte de sedimentos con el modelo *HEC-RAS*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador

**b) Series de Carga de Sedimentos**

Cuando el incremento de la carga de sedimentos no se puede acoplar al incremento del flujo, será necesario incluirla como una serie de carga de sedimentos en cualquier sección transversal, salvo por la sección limite aguas abajo, como una serie de carga total durante una duración definida. En este caso se debe ingresar como una porción de la masa total sobre el numero horas a analizar (ton/hora). *HEC-RAS 5.0* requiere de todos los datos de sedimentos por tipo de grano, por lo tanto, será necesario contar con la serie de gradación de los granos, además de la serie de carga de sedimentos. Al igual que en la curva de descarga, se debe ingresar los valores como fracciones o porcentajes individuales y nunca una curva de gradación acumulativa.

Al tratarse del transporte de sedimentos en masa por día, estas gradaciones serán útiles solo si corresponden a un periodo de 24 horas. (Crespo, sf, págs. 44-47)

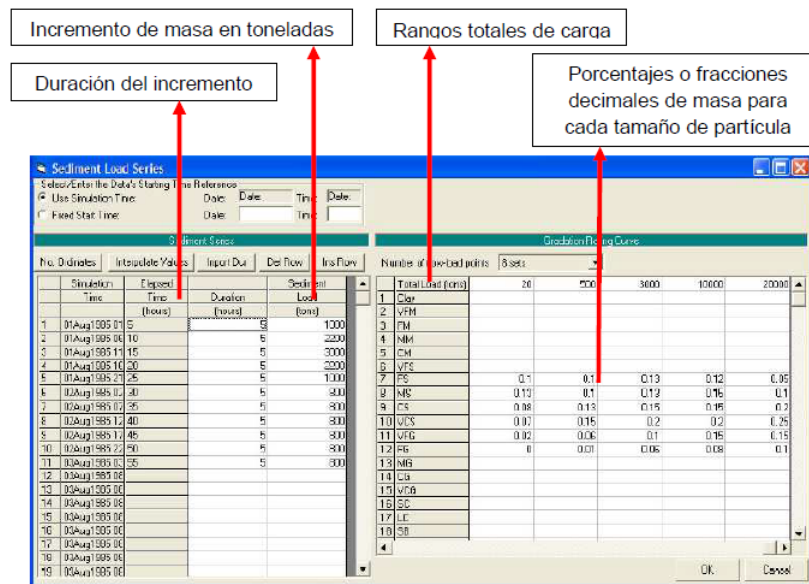


Figura 18. Editor de Serie de Carga de Sedimentos. Adaptado de Chacón, J.; Pazmino, E. (2010). Análisis de flujo gradualmente variado no permanente y transporte de sedimentos con el modelo *HEC-RAS*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador

**3.2.4 Definición del Plan para el Análisis de Sedimentos.** Si bien *HEC-RAS 5.0* permite la simulación de diferentes escenarios hidrológicos, es el usuario el que debe definir un plan de acción, que permita la realización de los cálculos deseados. Así mismo, para los cálculos referentes al transporte de sedimentos, será necesario crear un plan, el cual contenga un archivo de geometría, uno de sedimentación y uno de flujo Quasi-No permanente, además de unos datos adicionales requeridos para la ejecución del plan. (Crespo, sf, págs. 44-47)

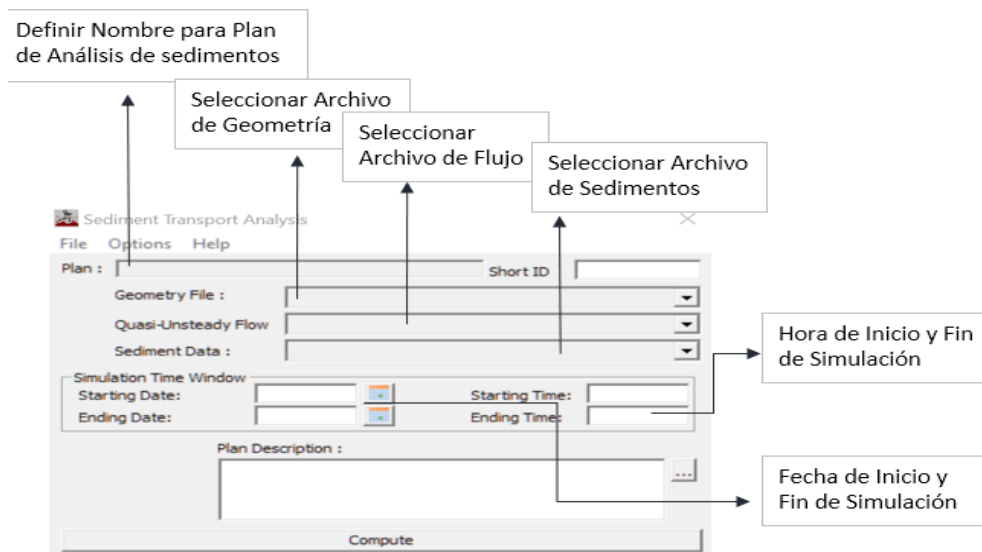


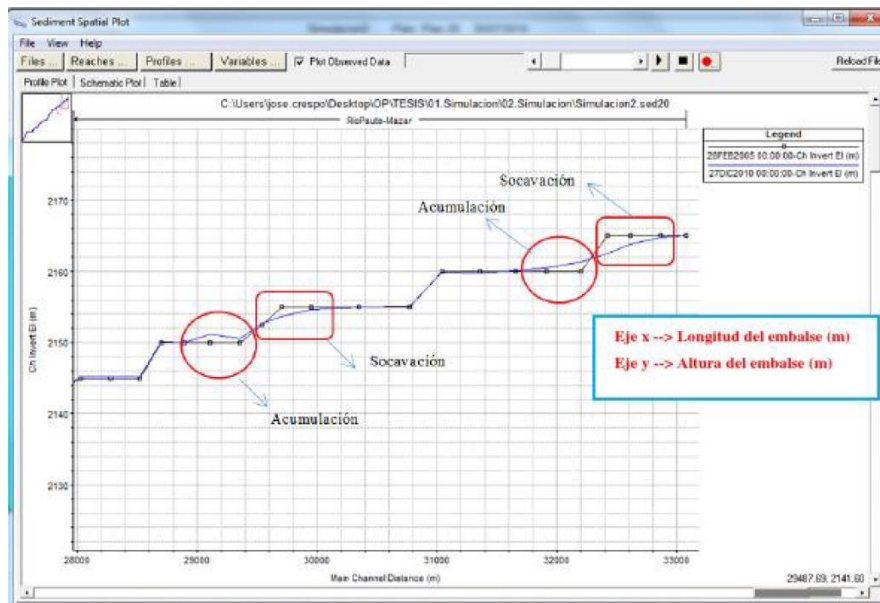
Figura 19. Editor de Plan de Análisis de Sedimentos

### 3.3 Visualización de Resultados

Una vez ejecutado el plan de análisis, *HEC-RAS 5.0* presenta dos maneras de visualizar los resultados, esto es, por medio de gráficos dinámicos y tablas en formatos espaciales, temporales o de secciones transversales. El nuevo visor de sedimentos lee el archivo *HDF5* (formato jerárquico de archivos de datos por lo que son el formato de archivo estándar para el almacenamiento de datos

científicos), permitiendo la lectura de archivos más grandes. (Quispe, 2013, págs. 86-88)

En su última versión, *HEC-RAS 5.0* permite la visualización de las gráficas. Es así como se puede extraer información y analizar la distribución de los sedimentos a lo largo del vaso del embalse, mediante las gráficas de perfiles longitudinales (*Figura 17 y 18*) y de secciones transversales (*Figura 19*), en las cuales se puede observar los procesos de deposición, socavación o acumulación a lo largo del cauce del embalse. (Crespo, sf, págs. 44-47), (Quispe, 2013, págs. 86-88)



*Figura 20.* Acumulación y socavación en el cauce del embalse. Adaptado de Crespo, L. Simulación de la sedimentación de la presa Mazar (Ecuador). Tesis de Maestría. Quito, Ecuador. p. 44-47

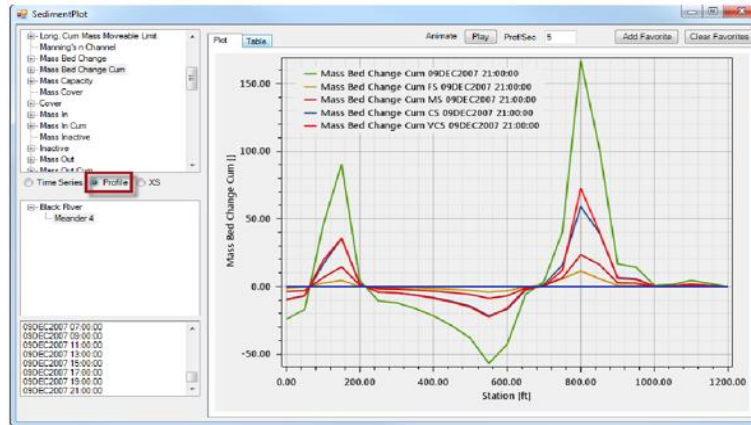


Figura 21. Visualizador gráfico de perfil. Adaptado de HEC-RAS River Analysis System. (2016). 2D Modeling user's. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers

- **Diagramas de Cambio de Sección Transversal**

El cambio de las secciones transversales es sin duda una de las características principales a analizar en un modelo de transporte de sedimentos. Es necesario revisar el cambio de la sección transversal, ya que es una de las maneras más fáciles de identificar artefactos numéricos y consecuencias no deseadas de las opciones de modelado [11]. *HEC-RAS 5.0* puede crear nuevos archivos de geometría a partir de las secciones transversales modificadas en cualquier paso de tiempo de transporte de sedimentos (Chacon & Pazmino, 2010).

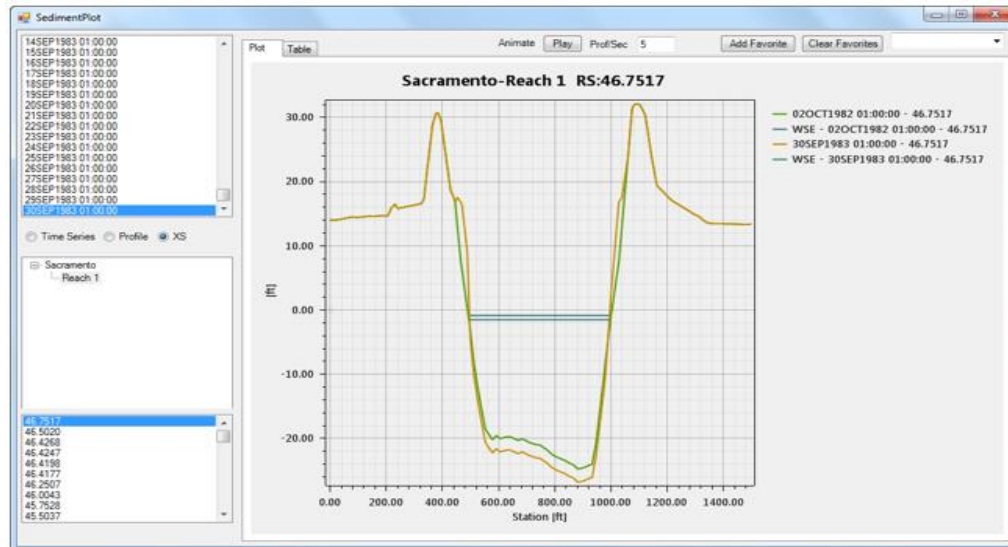


Figura 22. Diagrama de cambio en la sección transversal. Adaptado de HEC-RAS River Analysis System. (2016). 2D Modeling user's. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers

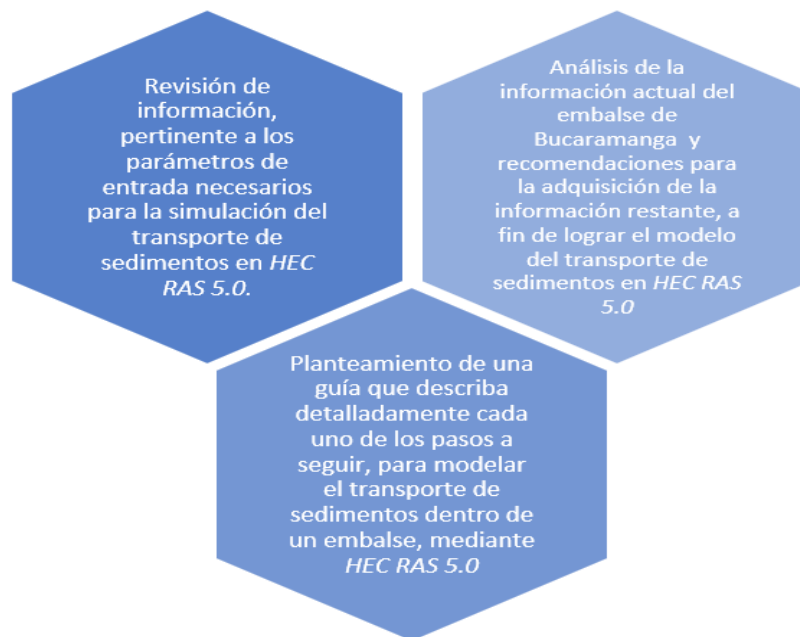
### 3.4 Organigrama para la Implementación del Modelo de Transporte de Sedimentos a través de HEC RAS 5.0

Los pasos necesarios para la implementación del modelo del transporte de sedimentos se presentan en el desarrollo esquemático de la metodología que se propone para la simulación del transporte de sedimentos, mediante el software *HEC RAS 5.0*.

En la *figura 20*, se muestra el diagrama de flujo para la creación del modelo de sedimentos en *HEC RAS 5.0*

#### 4. Desarrollo de la metodología.

En la *Figura 21*, se estableció el procedimiento a seguir, para el desarrollo de la investigación del presente proyecto.



*Figura 23.* Metodología de Desarrollo

#### 4.1 Análisis y Discusión de la Información Actual Necesaria para el Modelamiento de Sedimentos en el Embalse de Bucaramanga

En la recolección de los datos, fue necesario recurrir a los memorandos técnicos alusivos al diseño del embalse de Bucaramanga, los cuales fueron proporcionados por el Acueducto metropolitano de Bucaramanga, de donde se sustrajo la siguiente información:

**4.1.1 Descripción de la Zona de Estudio.** La cuenca del río Tona se encuentra ubicada al noroeste de Bucaramanga, Santander (*Figura 22*). Dicha cuenca desemboca en el río Suratá en confluencia con el río Lebrija; sus afluentes son las quebradas Arnanía, Carrizal y Golondrinas. El río Tona cuenta con una pendiente media del cauce de 12%. La climatología de esta zona se caracteriza por tener una temperatura media de 23°C, humedad relativa de 82,5%, evaporación anual promedio de 1.288 mm y una precipitación media multianual de 1.317 mm, siendo febrero el mes más seco y octubre el más lluvioso. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, Julio de 2015)

El embalse de Bucaramanga, inicio sus obras en septiembre del año 2010, y culmina su construcción con el primer llenado el 28 de agosto de 2015, posee una longitud de 2,1 Km, una presa tipo enrocado con cara de concreto, un volumen total de 17.6 Hm<sup>3</sup> con un volumen muerto de 3.0 Hm<sup>3</sup> y un volumen útil de 14.6 Hm<sup>3</sup>. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, Julio de 2015)

Su estructura de captación cuenta con tres niveles de toma de agua a las elevaciones de 866.41 msnm, 851.46 msnm y 836.51msnm, respectivamente, cada una con la capacidad de captar la totalidad del caudal de diseño de 3.2 m<sup>3</sup>/s (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, Julio de 2015). La presa cuenta con una altura de 103.6 m, en la cual, la elevación del lecho del río en su eje es de 785 msnm y la elevación mínima de operación es de 841 msnm, ya que en este nivel se encuentra la compuerta de captación más baja, la cual está completamente sumergida, logrando que la tubería trabaje a presión. La presa cuenta con un vertedero de excesos el cual se encuentra a un nivel máximo de operación normal de 885,75 msnm (cota de vertedero de excesos) y un nivel máximo de operación extraordinario de 891.6 msnm (cota máxima sobre el labio del vertedero) donde el área del espejo de agua es de 51.5 Ha y 53.9 Ha, respectivamente. (Acueducto

Metropolitano de Bucaramanga, Julio de 2015)

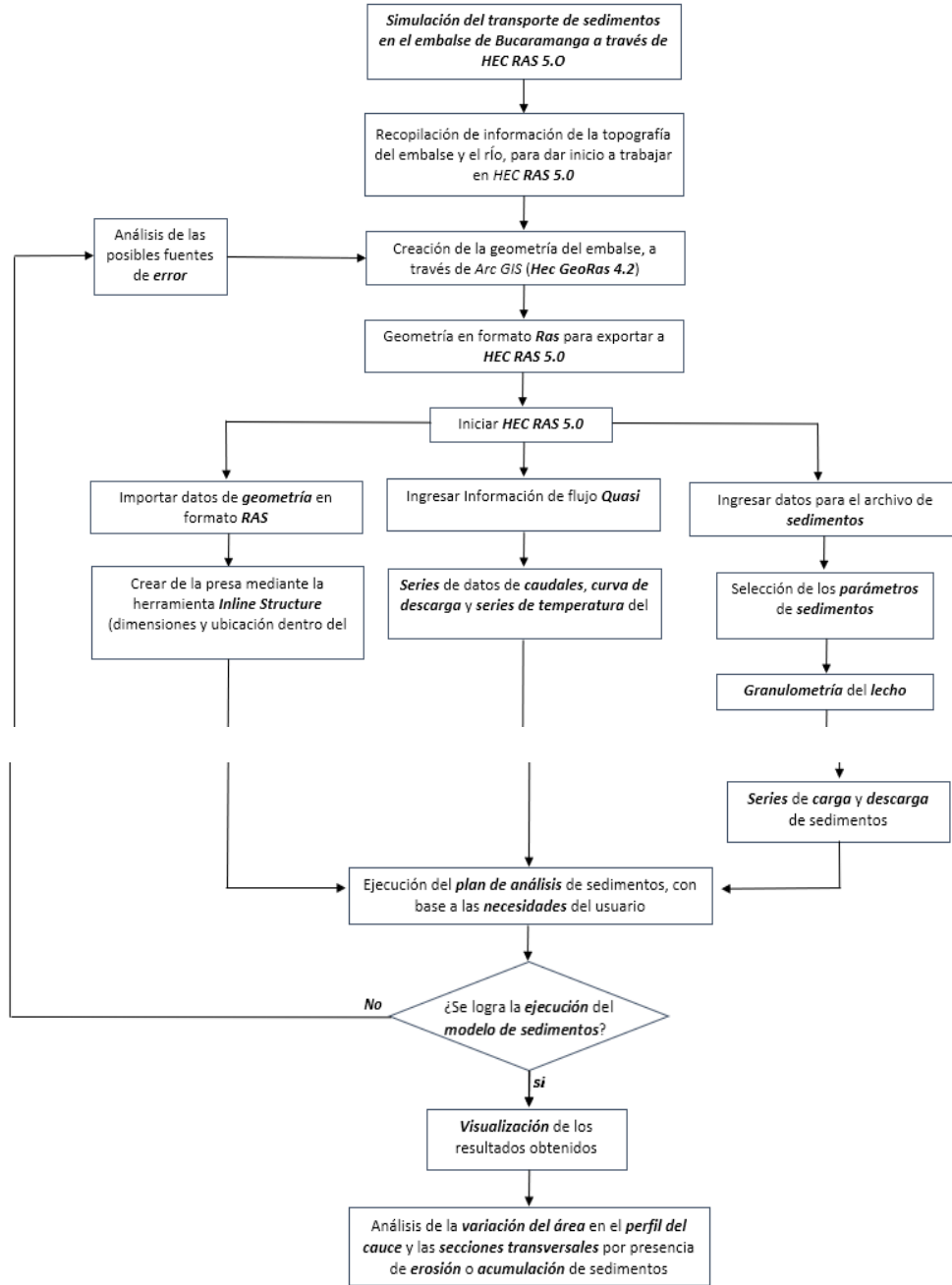


Figura 24. Organigrama para la Implementación de la Simulación del Transporte de Sedimentos, a través de HEC RAS 5.0

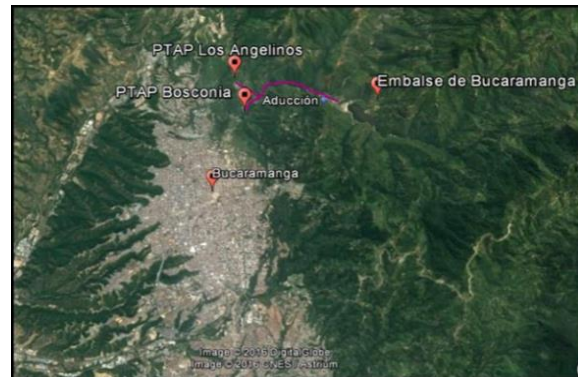


Figura 25. Fotografía satelital de localización del embalse de Bucaramanga. Adaptado de Google Earth

**4.1.2 Topografía del Embalse.** Como punto de partida, se analizó la información pertinente a la topografía del embalse, de donde se encontró datos de cartografía, geodesia y topografía del embalse, de donde se pudo extraer la información alusiva a las curvas de nivel y secciones transversales. Además, se cuenta con el plano general del embalse, el cuál es de gran utilidad para el trazado de las líneas que delimitan los cauces, *Ver Anexo B*, con lo cual, se puede conseguir un archivo geométrico del embalse (Integral Ingenieros Consultores, 2011). Las secciones transversales se definen a intervalos relativamente cortos sobre la longitud total del embalse, de tal manera que permitan representar de manera óptima, el desarrollo del cauce, las características geométricas, físicas e hidráulicas. Junto a cada sección transversal, se tiene previamente las abscisas de los márgenes del cauce del embalse, las cuales están en los extremos (izquierda y derecha) y en el centro del cauce.

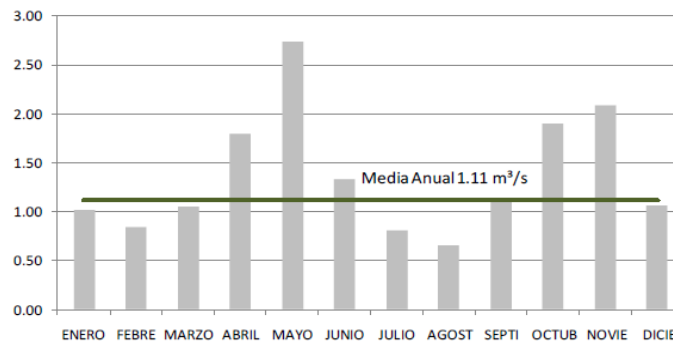


Figura 26. Curvas de nivel del Embalse de Bucaramanga. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2011). Memorando Técnico 01 – Cartografía, Geodesia y Topografía

Adicional a esto, se requiere los valores de coeficientes de rugosidad de Manning para cada sección ingresada, con lo cual el programa puede determinar las ecuaciones de pérdida de energía y la variación de su geometría (Crespo, sf, págs. 44-47) [16]. Esta información está disponible en (Integral Ingenieros Consultores, 2012), en la página 20, donde indica que los coeficientes de rugosidad de Manning a lo largo del embalse son de  $n = 0,030$ , y en las llanuras de inundación puede variar desde  $n = 0,060$  hasta  $n = 0,100$ .

**4.1.3 Datos de Flujo del río Tona.** Para realizar una correcta simulación de la distribución de los sedimentos, es necesario contar con un archivo de flujo Quasi no permanente, que contenga las condiciones de frontera en todos los límites extremos del sistema (*series de flujo, series de temperatura y/o curva de descarga*) junto con las condiciones iniciales del flujo, Ver Anexo C, disponibles en el memorando técnico número 03 (Integral Ingenieros Consultores, 2012). Aun cuando la información actual de *series Flujo*, está representada en valores promedios mensuales,

y el software requiere que las duraciones estén disponibles en horas, se pueden ingresar los valores de series de caudales y temperaturas mensuales iguales, variando el paso de las horas, debido a que dicho caudal, es un estimado promedio mensual. La cuenca del río Tona, en el embalse de Bucaramanga, registra caudales medios diarios de la estación limnimétrica Puente Tona, ubicada en cercanías al lugar de estudio, cuya serie de caudales de promedios diarios se presentan en el *Anexo D*. (Integral Ingenieros Consultores, 2012)



*Figura 27.* Caudales medios mensuales de la estación limnimétrica Puente Tona. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 - Anexo 4

En cuanto a las *series de temperatura*, No se dispone con información pertinente a la temperatura del agua dentro y fuera del embalse.

### **Curva de Descarga de Flujo**

Si se desea trabajar con una curva de descarga (*relación entre el caudal y la profundidad del agua en la sección*) como condición de borde aguas abajo, se debe comprender que ésta es una relación estimada (Crespo, sf, págs. 44-47). Respecto a la información pertinente a la curva de descarga, se cuenta con la información disponible en el memorando técnico número 03, en el Anexo 4, del

grupo Integral Ingenieros Consultores, para las estaciones de Cola del embalse y Puente Tona, de donde se pueden extraer los valores de caudales y su respectiva profundidad, en cada campaña. (Integral Ingenieros Consultores, 2011).

Datos/Campaña	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	-	6,6	4,8	3,7	2,8	1,7	1,7	1,8	1,5	6,6	4,8	3,7
Velocidad media (m/s)	-	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,9	0,8	0,8
Profundidad normal (m)	-	1,2	1,0	0,9	0,9	0,7	0,6	0,6	0,5	1,2	1,0	0,9

Figura 28. Datos de Caudal y Profundidad para la creación de la Curva de Descarga. Estación Cola del Embalse. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03

- Anexo 4

Datos/Campaña	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	-	5,9	10,1	-	6,5	4,1	3,7	3,0	2,0	1,8	1,9	1,6
Velocidad media (m/s)	-	1,0	1,2	-	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,7	0,6
Profundidad normal (m)	-	0,5	0,8	-	0,6	0,5	0,6	0,4	0,4	0,2	0,4	0,3

Figura 29. Datos de Caudal y Profundidad para la creación de la Curva de Descarga. Estación Puente Tona. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 -

Anexo 4

**4.1.4 Archivo de Sedimentos del Embalse.** Para generar el archivo de sedimentos, se debe tener en cuenta que consta de dos partes. La primera, donde se especifican las condiciones establecidas del archivo (*función de transporte, método de clasificación, método de velocidad de caída y volumen de control de sedimentos*) y la segunda, donde se define la granulometría de cada

sección transversal. (Crespo, sf, págs. 44-47), (Quispe, 2013, págs. 86-88)

*La función de transporte* debe elegirse en base a las características físicas de los sedimentos. La caracterización de los sedimentos, disponible en (Integral Ingenieros Consultores, 2012), presenta una distribución de tamaños de sedimentos, tanto suspendidos, como de fondo, donde los sedimentos en suspensión (*limos y arenas muy finas, siendo el material arenoso el predominante*) predominan sobre los de fondo (*arenas, gravas y grandes bolones de roca*) **Anexo E**. Para el caso del embalse de Bucaramanga, debido a la predominancia de arenas y de sólidos suspendidos, la aproximación de **Engelund & Hansen** es la que mejor se ajusta.

*El método de calificación* se rige en el espesor del lecho móvil y el seguimiento vertical del lecho (Crespo, sf, págs. 44-47), (Quispe, 2013, págs. 86-88). Nuevamente, como el material de sedimento predominante es la arena, y como se explicó en el capítulo II, el método de clasificación que mejor puede adaptarse para el embalse de Bucaramanga es **Copeland (Ex7)**. Este método resulta útil en cauces con lechos de arena, ya que forma capas de armado lentamente. (HEC-RAS River Analysis Sistem, 2016)

Aunque existen varias opciones para determinar la *velocidad de caída* de las partículas, es necesario determinar las características físicas de las partículas sedimentables para seleccionar la que mejor se ajuste a estas. Para el caso del embalse de Bucaramanga, no se cuenta con información que avale las propiedades de las partículas, relacionadas a gravedad específica, esfericidad o factor de forma. Por esta razón, no se puede determinar la velocidad de caída de las partículas, dentro del vaso del embalse.

### **Profundidad Máxima o Elevación Mínima del Lecho Móvil**

Se hace necesario contar con datos de profundidad máxima o elevación mínima, para el cálculo del volumen de control, ya que esto le permite al software, medir la distancia mínima en la cual el cauce puede erosionarse, y con esto controlar el volumen de erosión. Dentro de la información disponible, no se encontraron datos que puedan aportar a estos lineamientos, con lo que ya se presentará un error dentro de la modelación, debido a que estos parámetros son requeridos por *HEC RAS 5.0*.

### **Granulometría del Lecho.**

Definir la granulometría del embalse puede resultar un trabajo tedioso, debido a que cada sección ingresada, previamente, debe tener su propia curva granulométrica del material presente en ella. No obstante, cuando se trata de un embalse, este se comporta como un gran sedimentador, debido a que el flujo permanece estático. Por lo que no es necesario tener una curva granulométrica para cada sección, debido a que la granulometría no va a variar de manera considerable entre una y otra. Dicho esto, contando con la información disponible en (Integral Ingenieros Consultores, 2012), se puede extraer las curvas granulométricas del embalse para tres zonas de gran relevancia de este, esto es, en la entrada del embalse (*Estación Cola Embalse*), en la salida del embalse (*Estación Puente Tona*) y en el eje del embalse. **Anexo F**. Sin embargo, esta información no está completa, pues no se cuenta con lo referente a la granulometría del lecho del río Tona, en un tramo representativo de la cuenca. Esta limitación repercute en la simulación del transporte de sedimentos en el embalse, ya que éste se encuentra en la parte final de la cuenca del río Tona y recibe el aporte de sedimentos de toda el área de la cuenca.

Rangos de Tamaño (mm)	Campañas (t/día)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,001-0,0625	-	10,94	-	-	23,57	18,00	11,70	2,83	2,59	1,07	2,96	1,38
0,0625-0,125	-	8,22	-	-	16,55	13,00	9,05	2,48	2,66	1,21	2,63	1,51
0,125-0,25	-	0,56	-	-	0,80	0,16	0,72	0,04	0,06	0,42	0,23	0,20
0,25-0,5	-	2,78	-	-	3,10	4,08	7,77	1,38	3,51	3,24	2,81	2,77
0,5-1,0	-	7,45	-	-	8,22	9,70	12,79	3,42	10,89	8,32	9,12	9,11
1,0-2,0	-	18,84	-	-	20,71	16,86	2,97	5,60	13,08	8,50	11,07	11,09
2,0-4,0	-	10,66	-	-	12,78	4,91	0,00	0,75	3,53	3,14	2,93	2,94
4,0-8,0	-	0,53	-	-	0,99	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
8,0-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0	59,97	-	-	86,72	66,75	45,00	16,50	36,32	25,92	31,74	29,00
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	3,51	6,49	-	-	6,62	4,77	3,71	2,81	1,74	1,67	1,79	1,54

Figura 30. Caracterización de las partículas de Sedimento. Estación Cola del Embalse. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 - Anexo 4

Rangos de Tamaño (mm)	Campañas (t/día)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,001-0,0625	-	3,42	1205,56	-	16,39	20,81	16,01	3,9	1,82	3,46	1,65	1,13
0,0625-0,125	-	4,65	179,93	-	16,39	24,01	19,84	4,42	1,82	1,98	1,65	1,13
0,125-0,25	-	2,23	59,18	-	59,18	146,7	26,08	15,46	4,79	0,73	0,00	0,00
0,25-0,5	-	3,03	34,59	-	14,14	1186,44	66,07	21,59	27,17	1,4	0,00	0,00
0,5-1,0	-	1,47	90,99	-	28,59	907,71	33,07	13,61	24,21	1,65	1,65	0,00
1,0-2,0	-	3,65	161,9	-	104,39	1789,23	59,62	33,5	72,18	1,38	0,00	0,00
2,0-4,0	-	23,17	100,16	-	775,76	943,55	23,73	24,69	11,24	0	0,00	0,00
4,0-8,0	-	41,75	41,75	-	41,75	41,75	41,75	41,75	41,75	41,75	41,75	41,75
8,0-16	-	0,27	0,27	-	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
16-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-	83,64	1874,33	-	1056,86	5060,47	286,44	159,19	185,25	52,62	46,97	44,28
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	-	83,64	1874,33	-	6,5	4,1	3,7	3,0	2,0	1,8	1,9	1,6

Figura 31. Caracterización de las partículas de Sedimento. Estación Puente Tona. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 - Anexo 4

### Curva de Descarga de Sedimentos

Para obtener la curva de descarga de sedimentos, se cuenta con las ecuaciones obtenidas mediante los registros históricos de 2006 a 2010 de la concentración superficial de sedimentos en suspensión, disponible en (Integral Ingenieros Consultores, 2012). Junto con esta información, se cuenta con las gráficas de *Ver Anexo G*, de donde se pueden extraer los datos referentes a caudales

y el transporte de sedimentos suspendidos en toneladas/año. Es importante recalcar que dicha concentración de sedimentos corresponde a concentraciones superficiales, tomadas cerca de las orillas, donde típicamente se presenta menos concentración de sedimentos. Sin embargo, no se cuenta con la información referente a la curva de descarga de sedimentos de fondo, lo que significa que la exactitud del modelo se verá alterada negativamente por carencia de información.

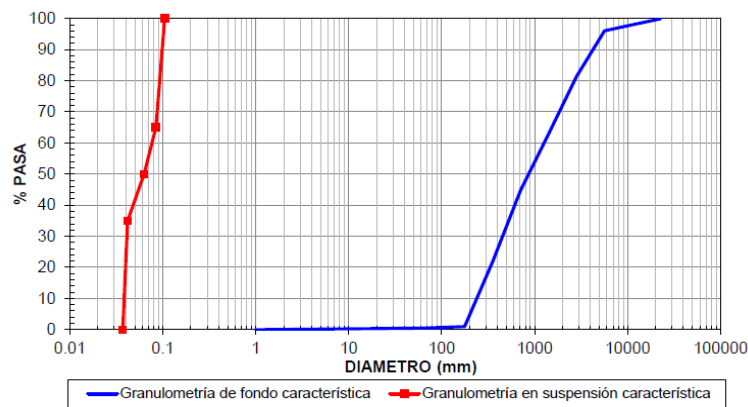


Imagen 32. Curvas granulométricas de material de lecho y suspensión en la estación Cola del Embalse. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 - Anexo 4

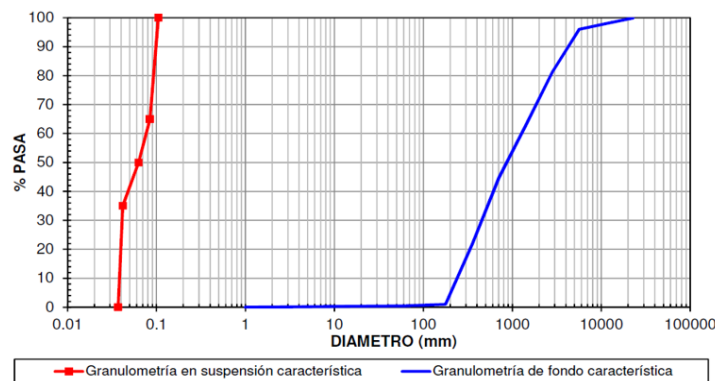


Imagen 33. Curvas granulométricas de material de lecho y suspensión en la estación Puente Tona. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 - Anexo 4

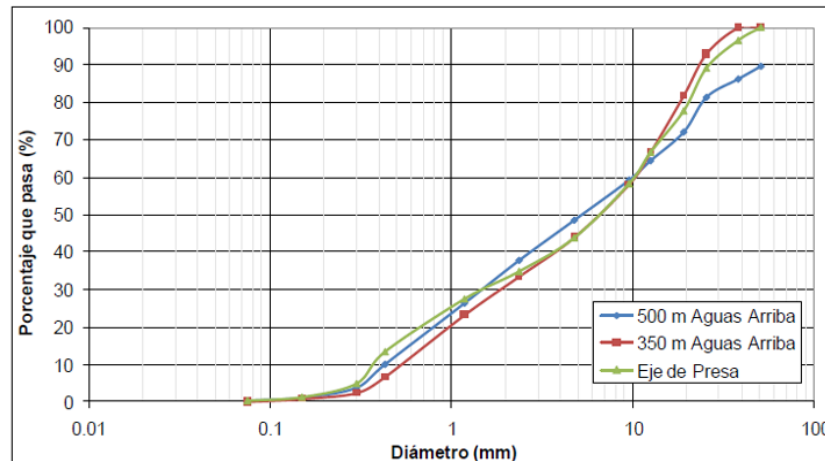


Imagen 34. Curva Granulométrica Eje de la Presa. Adaptado de Integral Ingenieros Consultores.

(2012). Memorando Técnico 03 - Anexo 4

### Serie de Carga de los Sedimentos Externos

Hace referencia al incremento de sedimentos que no están asociado al incremento de flujo, esto es la carga de sedimentos en peso que aporta el embalse debido a los procesos erosivos que este presenta, tales como deslizamientos de laderas, derrumbes entre otros. Dentro de la información suministrada, no se encontraron datos que aporten al tema de la carga de sedimentos.

### Propiedades del Sedimento

El último parámetro para la simulación del transporte de sedimentos en *HEC-RAS 5.0* hace referencia a las propiedades de los sedimentos predominantes. Para esto se debe contar con las características físicas de las partículas tales como la gravedad específica, el factor de forma y finalmente las unidades de peso/densidad de las partículas sedimentarias que se depositan dentro del embalse. Actualmente, el amb, no cuenta con esta información, por lo cual el archivo de sedimentos queda incompleto debido a la falta de información pertinente a las condiciones de

borde de los sedimentos.

Finalmente, se puede asociar la información encontrada (*disponible actualmente*) referente a los parámetros de entrada, necesarios para la simulación de la distribución y transporte de sedimentos dentro del embalse de Bucaramanga, a través de *HEC RAS 5.0* y se representan en la *tabla 4*.

	Parámetro	Disponible	No Disponible
Geometría	Topografía del Embalse (Secciones Transversales)	×	
	Series de Flujo	×	
Flujo	Series de Temperatura		×
	Series de Descarga	×	
Sedimentos	Parámetros de Transporte	×	
	Profundidad Máxima / Elevación Mínima (del Lecho)		×
	Curva de Descarga de sedimentos	×	
	Propiedades de los Sedimentos		×

*Figura 35.* Información del embalse de Bucaramanga disponible para la simulación del transporte de sedimentos en *HEC RAS 5.0*.

#### 4.2 Guía para la Modelación del Transporte de Sedimentos en el Embalse de Bucaramanga a través de *HEC RAS 5.0*

Como objetivo de esta investigación, se trazó proponer una estrategia para el desarrollo de la simulación del transporte de sedimentos y la forma en cómo se depositan dentro del embalse. Es por esto, que se espera que el lector encuentre una guía detallada para desarrollar la simulación del transporte de sedimentos en embalses, con lo que se establecieron una serie de pasos secuenciales, los cuales se pueden desarrollar en el *Anexo A*.

A diferencia con el manual de usuario de *HEC RAS 5.0*, esta guía se desarrolla específicamente para la modelación del transporte de sedimentos en *embalses*, esto hace de esta guía, un complemento en la simulación, con la cual se puede obtener resultados específicos para los embalses y presas.

## 5. Recomendaciones

A continuación, se recomiendan algunos métodos para obtener la información restante con la cual se podrá lograr adecuadamente la simulación del transporte de sedimentos en *HEC RAS 5.0*.

- ✓ Dentro de la información pertinente a la curva de descarga de sedimentos, únicamente se cuenta con datos de sedimentos suspendidos tomados en las orillas. Si bien esta carga puede ser representativa, es recomendable tomar muestras en toda la sección transversal y a profundidad del cauce del río, esto con el fin de estimar la concentración de sedimentos que más se ajuste a la realidad.
- ✓ La forma más sencilla de tomar muestras de sedimentos en suspensión consiste en sumergir un recipiente en la corriente, en un punto donde se considere este bien mezclada, y posteriormente filtrar el sedimento, secarlo y pesarlo. De esta manera se obtendrá una medida de concentración de sedimentos, el cual, al combinarlo con el caudal de muestra, se llega a la tasa de descarga de sedimentos suspendidos. (Bathurst, sf)
- ✓ Las muestras deberán ser obtenidas aguas arriba de zonas de aguas quietas o de muy baja

velocidad, ya que estas pueden actuar como trampas de sedimentos. Las muestras captadas deben permitir representar la distribución del material en suspensión a lo ancho de la sección, lo que se puede conseguir tomando muestras en diferentes puntos dentro de la misma. (Bathurst, sf)

✓ Por otra parte, no se encontró información alusiva a la descarga de fondo que ingresa al embalse, con lo que el archivo no se encuentra completo pues se está omitiendo datos relevantes para la modelación del transporte de sedimentos. Se hace imperativo, la cuantificación de la carga de sedimentos de fondo que ingresan al embalse, a través de la toma de muestras continuas en campo, mediante estructuras fijas o equipos portátiles. Dicho aforo puede realizarse con correntómetros y de esta manera determinar el caudal en cada punto. Adicionalmente, se deberá tomar muestras de material en los puntos de aforo para obtener información de los sedimentos relacionada al caudal en cada punto de muestreo. Esto, con el fin de tener una muestra representativa de los sedimentos que ingresan al embalse.

✓ Para determinar la tasa de sedimentos de fondo, se recomienda el uso de un muestreador de diferencia de presiones, con el fin de capturar los sedimentos que se depositan en el fondo, en diferentes puntos del embalse. Cabe resaltar que el material que se toma con estos muestreadores es una porción mínima, debido a que interfiere con la corriente, no obstante, es una muestra representativa del material de fondo, con lo cual se puede obtener la tasa de descarga de sedimentos de fondo. (Bathurst, sf)

✓ Otro método para obtener la tasa de sedimentos de fondo que ingresa al embalse es mediante una trampa de carga de fondo, la cual consiste en una trinchera excavada en el fondo del río. El material atrapado en ella es removido, secado, pesado y posteriormente asociado a un caudal el cual se debe medir previamente. Se recomienda hacerlo en diferentes temporadas del año, debido a que la alteración meteorológica de la región puede cambiar la tasa de sedimentos de fondo que

se pueden obtener. Este tipo de captación proporciona un valor global de la producción de sedimentos de fondo para intervalos de tiempo específicos asociado a su respectivo caudal. (Bathurst, sf), (Bravo, López, & Osterkamp, sf)

✓ La carga total de sedimentos puede variar considerablemente para un mismo caudal, de acuerdo a la variación de los mecanismos de suministro de sedimentos (aporte por deslizamiento de taludes, escurrimiento por laderas de montaña). Algunas partes de la cuenca pueden ser más prolíferas a que se presente estas condiciones, por esto se recomienda la cuantificación de sedimentos dentro del embalse mediante levantamientos topográficos para determinar el nivel de los sedimentos. El levantamiento se puede determinar por medio de un sondeo de control o de una sonda acústica y, posteriormente, tomar muestras de los sedimentos de fondo y determinar su densidad. De esta manera se puede calcular el peso de la medición a partir del volumen. (Bravo, López, & Osterkamp, sf)

✓ La toma de muestras de sedimentos, tanto suspendidos como de fondo, deberá realizarse en diferentes puntos del río a lo largo de toda la cuenca y del embalse (extremos y medios), tantas veces sea necesario hasta que las muestras obtenidas en cada punto sean consideradas relativamente de la misma magnitud. (Bravo, López, & Osterkamp, sf)

## 6. Conclusiones

✓ Si bien existe gran cantidad de literatura asociada a la modelación del transporte de sedimentos, ésta se debe depurar minuciosamente para su posterior desarrollo, de tal manera que se pueda

extraer de ella los datos necesarios para la modelación de sedimentos en embalses a través de *HEC RAS 5.0*. Es así como se logró concretar los parámetros de entrada para la simulación del transporte de sedimentos en embalses, los cuales corresponden a datos de geometría, flujo, sedimentos y plan de análisis de sedimentos.

✓ Dentro de la modelación con *HEC RAS 5.0* se puede destacar la interfaz gráfica que este presenta, facilitando la interacción con el usuario y el ingreso de datos. Asimismo, es de resaltar que el software permite complementarse con otros programas como *Arc Gis*, *Hec GeoRAS*, *AutoCad*, *Excel*, entre otros

✓ Si bien el software *HEC RAS 5.0* presenta una herramienta para la simulación del transporte de sedimentos, se requiere de pericia, experiencia y criterios ingenieriles, por parte del usuario, para obtener resultados que se adapten a la realidad.

✓ Los métodos empleados para calcular el transporte de sedimentos se basan en ecuaciones empíricas, las cuales se desarrollaron para situaciones específicas. Es por esto que los resultados obtenidos con el software *HEC RAS 5.0* no deben asumirse como absolutos.

✓ Se pueden realizar algunos supuestos, como las distancias de profundidad máxima/elevación mínima de erosión del lecho, las propiedades físicas de los sedimentos, asociadas a las unidades de peso/densidad, así como aceptar que no existe entrada de carga de sedimento al embalse (deslizamientos de las laderas y/o escurrimiento de montañas) esto con el fin de lograr una simulación del transporte de sedimentos. Sin embargo, este modelo no sería representativo de la realidad, debido a los supuestos que se admitirían.

✓ En vista de la ausencia de algunos datos de entrada requeridos para la modelación, y la carencia de información representativa, no es posible la realización del modelo del transporte de sedimentos en el embalse de Bucaramanga a través de *HEC RAS 5.0*, con la información disponible

actualmente.

✓ Finalmente, se planteó una guía para la simulación del transporte de sedimentos en embalses, en la cual se describe detalladamente los pasos necesarios y el orden de ejecución, para conseguir una simulación exitosa, de la distribución y el transporte de sedimentos, a lo largo de un embalse.

### Referencias bibliográficas

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (Julio 2015). Resumen ejecutivo avance del proyecto. Bucaramanga.
- Barbosa, L. (sf). Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas). Tesis de maestría en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp, 69-70.
- Bathurst, J.C. (sf). Medición del transporte de sedimentos y curvas de carga y descarga de sedimentos. Universidad de Newcastle upon Tyne. Reino Unido.
- Beguiría, S. (2010). Erosión y fuentes de sedimentos en la cuenca del embalse de Yesa (Pirineo Occidental): ensayo de una metodología basada en teledetección y análisis SIG. CSIC-Instituto Pirenaico de Ecología. pp 16-18
- Beguiría, S. (2010). Erosión y fuentes de sedimentos en la cuenca del embalse de Yesa (Pirineo Occidental): ensayo de una metodología basada en teledetección y análisis SIG. CSIC-Instituto Pirenaico de Ecología. pp 30-35
- Bravo, E.; López, V.; Osterkamp, W. (sf). Transporte de sedimentos en cauces naturales: Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos. Centro Nacional de Investigación para la Producción Sostenible. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Morelia, México.
- Bravo, M. Osterkamp, W. y López, V. (julio-septiembre 2004). Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión técnica de adecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo. Terra Latinoamérica, vol. 22, núm. 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia

del Suelo. México.

Cameron, T. y Ackerman, P. (2012). Hec-GeoRAS GIS. Tools Support of HEC-RAS. Décima Edición. US Army Corps of Engineers.

Chacón, J.; Pazmino, E. (2010). Análisis de flujo gradualmente variado no permanente y transporte de sedimentos con el modelo *HEC-RAS*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Crespo, L. Simulación de la sedimentación de la presa Mazar (Ecuador). Tesis de Maestría. Quito, Ecuador. pp, 44-47.

Dyhouse, G.; Hatchett, J.; Benn, J. (sf). Floodplain Modeling Using HEC-RAS. First Edition. Waterbury, CT, United States of America. p. 84

Ecuador. pp, 30-47.

García, M.; Maza, J.A. (1996). Orígenes y propiedades de los sedimentos. Manual de Ríos. Universidad Nacional de México. México. pp 5-100.

García, R. (sf). Análisis y evaluación del transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas. Tesis de pregrado en Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia. p, 22

Geo-Innova. (sf). Diferencias entre Hec-RAS y Hec-GeoRAS [En Línea]. (Recuperado el 21 de junio de 2018) Disponible en <https://geoinnova.org/blog-territorio/diferencias-hec-ras-hec-georas/>

Ghomeshi, M. (June 27, 2018). Reservoir sedimentation modeling. Doctor of philosophy Thesis. Department on Civil and Mining Engineering. University of Wollongong. 1995. [On Line]. Available in <http://ro.uow.edu.au/theses/1261>

Hec-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS Using ArcGIS. U.S. Army Corps of Engineers. pp 47-95.

- HEC-RAS River Analysis Sistem, (2016). 2D Modeling user´s. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers. p, 171
- HEC-RAS River Analysis Sistem. (2016). 2D Modeling user´s. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers.
- HidroJING. Curso de Hec-GeoRAS y RAS Mapper. [En Línea]. (Recuperado el 21 de junio de 2018). Disponible en <http://www.hidrojing.com/recursos/formaciones-y-cursos/curso-de-hec-georas-y-ras-mapper/>
- Integral Ingenieros Consultores. (2011). Memorando Técnico 01 – Cartografía, Geodesia y Topografía.
- Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 - Anexo 4.
- Integral Ingenieros Consultores. (2012). Memorando Técnico 03 Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse.
- Lluen, W. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales de flujo de agua en ríos. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. p 13.
- Navas, A.; Valero, B.; Machin, J. y Walling, D. (2018). Los sedimentos del embalse de Joaquín Costa y la historia de su depósito. Universidad de Exeter, Reino Unido. pp 1-2
- Quispe, J. (2013). Determinación del transporte de sedimentos en el flujo gradualmente variado no permanente con el modelo *HEC-RAS* en el río Ilave, tramo Puente Antiguo-Alquijs. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú. pp 86-88
- Velandia, Y. (sf). Análisis comparativo de metodologías para la predicción de la acomodación de los sedimentos gruesos en embalses colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. pp 29-33