

**MARINA DE GUERRA DEL PERÚ
ESCUELA SUPERIOR DE GUERRA NAVAL**



**Trabajo de investigación para Obtener la Segunda Especialidad
Profesional en Hidrografía Y Navegación**

**“Viabilidad de implementar el modelamiento numérico para determinar la
dinámica fluvial del río Amazonas en las cercanía de la ciudad de Iquitos”**

Presentado por:

A. de F. Felipe De La Cruz Querevalú

Lic. Carmen Francia
Asesor Metodológico

C. de F. Jorge VIZCARRA Figueroa
Asesor Técnico-Especialista

La Punta, 2015

A mis padres:

Jorge De La Cruz Flores y Socorro Querevalú Velásquez sobre todas las cosas, por su inagotable amor y por su perseverante apoyo durante toda mi vida.

Este trabajo representa la culminación de una etapa en mi vida, una etapa que sin su sacrificio y dedicación no estaría completa.

Son tan parte de mí como yo lo soy de ustedes, pues todo cuanto soy es producto de sus enseñanzas.

¡Con todo mi corazón, Gracias!

Agradecimientos

A Dios, nuestro creador, por darme la vida, las fuerzas y ha hecho posible que concluya satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

A mis padres y a mis hermanos por su paciencia brindada y su apoyo incondicional, por tener fe en mí y darme su aliento día a día.

A la Dirección de Hidrografía y Navegación por darme los conocimientos necesarios para poder desempeñarme como futuro Oficial Hidrógrafo.

Al Señor Capitán de Fragata Jorge Vizcarra, Al Dr. Jorge Abad, Al Ing. Eduardo Choque por todo su apoyo y orientación para poder llevar a cabo este Trabajo de Investigación.

A los profesores y el personal técnico de la Dirección de Hidrografía y Navegación que me otorgaron con paciencia su conocimiento para poder culminar este año de estudios.

A mis compañeros y amigos quienes nunca dejaron de alentarme a culminar este proceso.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Justificación de la investigación.....	4
1.2.1 Alcance para la Dirección.....	4
1.2.2 Alcance para el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía.....	5
1.2.3 Alcance para el Departamento de Cartografía y Geomática.....	5
1.3. Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4. Metodología empleada.....	6
1.5. Antecedentes.....	6
1.6. Definiciones conceptuales.....	7
1.7. Sistema de hipótesis.....	9
1.7.1. Hipótesis general.....	9
1.7.2. Hipótesis específicas.....	9
CAPITULO II: DINÁMICA FLUVIAL DE LOS RÍOS AMAZÓNICO.....	10
2.1. Movimiento del fluido.....	11
2.2. Dinámica fluvial de la plataforma.....	11
2.3. Transporte de sedimentos.....	12
2.4. Morfología del fondo.....	13
CAPÍTULO III: EL MODELAMIENTO NUMÉRICO.....	16
3.1. Bases científicas.....	16
3.2. Programas de modelamiento numérico fluvial.....	18
3.2.1. El modelo numérico bidimensional CCHE2D.....	19
3.3.2. El modelo numérico unidimensional HEC-RAS.....	22
CAPÍTULO IV: DATOS HIDROGRÁFICOS.....	28
4.1. Datos requeridos para el modelo numérico CCHE2D.....	28
4.2. Datos requeridos para el modelo numérico HEC-RAS.....	28
4.3. Levantamientos hidrográficos.....	29
4.3.1 Geodesia.....	30
4.3.2 Topografía.....	30
4.3.3 Batimetría.....	33
4.3.4 Granulometría.....	34
4.3.5 Aforos líquidos y sólidos.....	35

CAPÍTULO V: EQUIPOS TÉCNICOS HIDROGRÁFICOS.....	36
5.1 Equipos usados para la obtención de datos para los modelos CCHE2D y HEC-RAS.....	36
5.1.1 Geodesia y Topografía.....	36
5.1.2 Granulometría	39
5.1.3 Aforos líquidos y sólidos	40
5.1.4 Batimetría.....	41
CONCLUSIONES.....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Movimiento del fluido de los ríos Amazónicos.....	11
Figura 2. Dinámica de la plataforma de los ríos.....	12
Figura 3. Dinámica de la plataforma del río Amazonas.....	12
Figura 4. Fotografía transversal del fondo de los ríos.....	13
Figura 5. Número de Froude, utilizado para determinar la morfología de los fondos.....	14
Figura 6. Esquema de diferentes tipos de formas de fondo.....	15
Figura 7. Aproximación del río Amazonas al río Itaya en el sector Muyuy.....	17
Figura 8. Clasificación del material de sedimento por su tamaño según el Hec-Ras.....	26
Figura 9. Ejemplo sobre el posicionamiento geodésico de un hito determinado en el caserío Villa Belén – Iquitos.....	30
Figura 10. Ejemplo de una nivelación diferencial.....	31
Figura 11. Ejemplo de un levantamiento batimétrico en el río Itaya – Iquitos.....	34
Figura 12. Ejemplo de una medición de caudal en el río Amazonas – Iquitos.....	35
Figura 13. Imagen del Equipo Gps Trimble 5700.....	37
Figura 14. Estación Total Leica TS 06 Plus.....	38
Figura 15. Ejemplo de una draga.....	39
Figura 16. Perfilador de Velocidad de Sonido ADCP RD Instruments.....	40
Figura 17. Ecosonda Monohaz Bathy-500.....	42
Figura 18. Imagen del equipo DGPS Omnistar modelo 3100LR12D.....	44
Figura 19. Imagen del Equipo Gps Trimble 5700.....	45
Figura 20. Imagen del Equipo Gps Trimble 5700.....	47

LISTA DE ACRÓNIMOS

CCHE2D: Centro Nacional de Cálculo e Ingeniería Hidráulica 2D.

DHN: Dirección de Hidrografía y Navegación.

GPS: Sistema de Posicionamiento Global.

HEC-RAS: Centro de Ingeniería Hidrológica – Sistema de Análisis de ríos.

IGP: Instituto Geofísico del Perú.

IMARPE: Instituto del Mar del Perú.

IRD: Instituto de Investigación para el Desarrollo.

MGP: Marina de Guerra del Perú.

RTK: Cinemática en Tiempo Real.

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

SHNA: Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación para optar la especialidad de Hidrografía establece como tema el modelamiento numérico fluvial, herramienta que nos permitirá predecir el movimiento de los cauces de los ríos en especial del río Amazonas en la cercanía de la ciudad de Iquitos, permitiendo de este modo una mejor toma de decisiones para la futura construcción de obras ribereñas, así como tomar las medidas necesarias ante el posible impacto del cauce del río en obras y/o comunidades ribereñas, contribuyendo de este modo, con la línea de investigación de contribución al desarrollo, así como determinar con la debida anticipación el nivel de vaciantes y crecientes de los ríos, que permitan un adecuado manejo de las actividades fluviales.

La idea central de la investigación pretende explicar que parámetros son los necesarios para poder implementar los modelos numéricos por ello las hipótesis se plantean tratando de describir los requerimientos de los modelos numéricos para analizar si la Dirección de Hidrografía y Navegación está en la capacidad de poder implementarlos.

En el primer capítulo se desarrolla el marco teórico, en el que se describe y plantea el problema, así como la justificación de la investigación realizada, además se verán los objetivos de la investigación que permitirán describir los componentes que requieren los modelos numéricos para que se pueda evaluar si la Dirección de Hidrografía y Navegación se encuentra en la capacidad o no de implementarlos.

En el capítulo II, se desarrollan y describen las principales características de los ríos Amazónicos como el movimiento del fluido, la dinámica de la plataforma, el

transporte de sedimentos y la morfología del fondo; para poder entender y comprender cómo es la dinámica fluvial de los cauces de los ríos Amazónicos.

Posteriormente, en el capítulo III se describen los modelos numéricos que pueden ser implementados y se analizan ambos, de acuerdo a los manuales y trabajos relacionados de otros autores aplicados en otros ríos, así mismo se describen los trabajos que requiere cada uno de ellos para la obtención de datos.

En el capítulo IV se describen los trabajos hidrográficos que se realizarían de acuerdo a los requerimientos de ambos modelos numéricos para que puedan ser implementados.

En el capítulo V se describen cuáles son los equipos hidrográficos que se utilizan en los trabajos necesarios mencionados en el capítulo IV, para poder evaluar si la Dirección de Hidrografía y Navegación se encuentra en la capacidad de poder implementar los modelos numéricos. Finalmente se establecen las conclusiones y recomendaciones.

En cuanto a las fortalezas de la investigación se puede indicar que para poder describir las características de los ríos Amazónicos se contó con la posibilidad de tener el curso de Ingeniería de ríos llevado en el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía, dictado por el Dr. Jorge Abad, por quien recibí información valiosa para poder describir las características principales de los ríos Amazónicos y entender la dinámica fluvial de los mismos.

Por otro lado, en cuanto a las debilidades del trabajo, se puede señalar que es el factor tiempo, porque debido a las actividades realizadas en el curso de segunda especialidad profesional, el tiempo con el que se cuenta es limitado; y factor lugar en cuanto a no estar mayor cantidad de tiempo posible en la ciudad de Iquitos para poder complementar el trabajo.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. Planteamiento del problema

La Dirección de Hidrografía y Navegación tiene como misión investigar las actividades relacionadas con las ciencias del ambiente en el ámbito acuático, con el fin de contribuir al desarrollo nacional, siendo uno de los ámbitos de estudio, los ríos de la Amazonía Peruana.

Estos ríos, poseen una considerable dinámica fluvial, debido a su gran caudal que desplazan, asociados a la alta tasa de transporte de sedimentos tanto de suspensión como de fondo, lo que origina una modificación y/o migración del cauce del río a través de la denominada llanura aluvial, migración que puede ser mayor o menor debido a múltiples factores, dentro de los que destaca principalmente el nivel de vaciantes y crecientes del río.

Estas modificaciones en el cauce del río, genera graves impactos en el poblador amazónico, debido a que el principal medio de comunicación en la Amazonía, es el transporte fluvial, por lo que se han dado algunos casos en la que la variación del río ha generado serios inconveniente al poblador amazónicos, ya sea por la formación de algún meandro (caso Genaro Herrera en el río Ucayali), o por el alejamiento del río (caso Puerto de Pucallpa o Puerto de Leticia), o lo que en algunos casos es peor, la erosión de la ribera que afecta directamente a las viviendas de los pobladores (caso localidad de San Lorenzo).

Por ello, es de gran importancia diseñar mecanismos que nos permitan predecir el comportamiento de los ríos en un corto, mediano y largo plazo, en áreas de interés, que nos permita analizar las posibles implicancias que tendrían estas modificaciones en las poblaciones ribereñas.

Una de estas herramientas de predicción, que ha sido utilizada exitosamente por la Dirección de Hidrografía y Navegación en el litoral peruano, son los modelos numéricos, los mismos que en base a una entrada, se generan resultados predictivos que van siendo ajustados y mejorados con el transcurrir del tiempo, siendo de gran importancia para la toma de decisiones sobre todo en instalaciones acuáticas portuarias en el litoral.

Es por lo expuesto anteriormente que la Dirección de Hidrografía y Navegación necesita evaluar la viabilidad de implementar modelos numéricos para los ríos amazónicos para ello plantea el siguiente problema. ¿Cómo implementar el modelo numérico para determinar la dinámica fluvial del río Amazonas en la cercanía de la ciudad de Iquitos? En este sentido este trabajo de investigación pretende evaluar la viabilidad de implementar modelos numéricos para los ríos amazónicos.

1.2 Justificación de investigación.

La investigación a desarrollar esta plenamente justificada, dado que mediante la implementación de modelos numéricos fluviales, se podrá determinar los impactos que generarían en un futuro, las posibles variaciones del cauce de los ríos producto de su gran dinámica fluvial, poniendo especial énfasis en el río Amazonas e Itaya en las cercanías de la ciudad de Iquitos.

1.2.1 Alcance para la Dirección:

El desarrollo del presente trabajo de investigación será de importancia para la Dirección de Hidrografía y Navegación, ya que como órgano encargado de los estudios del medio acuático tanto en el aspecto marítimo, fluvial y lacustre, le permitirá contar con una nueva herramienta para poder predecir los cambios que

pueda ocasionar el río Amazonas e Itaya en la cercanía de la ciudad de Iquitos, así como posteriormente poder aplicarlos a otras regiones amazónicas.

1.2.2 Alcance para el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía:

Será de suma importancia para el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía contar con esta herramienta porque se podrá conocer con exactitud cuándo se deben de cambiar o actualizar las cartas de practica para proporcionar seguridad a los navegantes en general; así como de poder conocer cuáles serán las zonas y/o poblados más afectados por las vaciantes y crecientes extremas con la debida anticipación posible.

1.2.3 Alcance para los departamentos de Oceanografía y Geomática:

La importancia para los departamentos de Oceanografía y Geomática radica en que al contar con modelos numéricos aplicados en los ríos amazónicos, se podrá estudiar y monitorear de una manera más eficiente los mismos.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Analizar la viabilidad de implementar modelos numéricos fluviales para determinar la tendencia de variación del cauce y niveles de los río Amazonas e Itaya en las cercanías de la ciudad de Iquitos.

1.3.2 Objetivo específico

Determinar que modelos numéricos fluviales se pueden implementar para la Dirección de Hidrografía y Navegación.

Analizar los datos hidrográficos necesarios para la implementación de los modelos numéricos fluviales.

Establecer los equipos que se requieren para implementar los modelos numéricos fluviales.

1.4 Metodología empleada

El tipo de investigación que se emplea corresponde al explicativo, pues se trata de profundizar, analizar y describir la viabilidad de proyectar la dinámica fluvial del río Amazonas en la ciudad de Iquitos empleando el modelamiento numérico.

1.5 Antecedentes

Dentro del balance historiográfico sobre el presente problema de investigación se encuentran los siguientes artículos:

Duan y Julien (2010), en donde señalan en su artículo de “Numerical simulation of meandering evolution” (“Evolución de la simulación numérica de los meandros”), de la revista “Journal of Hydrology” (“Revista de Hidrología”), de que en un modelo numérico sencillo bidimensional es una herramienta eficaz para estudiar el mecanismo de evolución de los meandros planteándose que la geometría y variaciones en la cama batimétrica causaron la redistribución del flujo de impulso y en consecuencia la migración de canales.

Ceballos (2011) en donde realizó los procesos de erosión y sedimentación en cauces aluviales tomando como caso de estudio tres tramos del cauce de la quebrada La Marinilla para conocer su movilidad, condicionada por la intervención antrópica y las fluctuaciones del nivel base (río Negro). Esta movilidad es evaluada en diferentes escenarios en un periodo de 17 años y a través del modelo numérico CCHE2D el cual

permite simular los procesos de agradecimiento y degradación del canal y los cambios morfológicos del mismo.

Villón (2009), que proporciona en su libro “HEC-RAS” a los usuarios los conocimientos sobre la modelación hidráulica en los ríos empleando el programa Hec Ras para realizar una interfaz gráfica que permite al usuario introducir la información necesaria para una simulación, manejando los componentes hidráulicos a través de modelos integrados. Así mismo facilita el cálculo de perfiles de agua y de los parámetros hidráulicos del cauce, con la finalidad de predecir cuáles son las áreas de inundación y mitigación del mismo en un río o sistema de ríos para diferentes periodos de retorno. Por otro lado, determina las variables hidráulicas para el diseño de estructuras hidráulicas en los ríos como puentes, alcantarillas, cuencas, etc. Determinación de la altura óptima en el diseño de una carretera que pueda ser afectada por el río.

García, Turmero, Páez y Simoza (2011), desarrollan en su artículo “El Modelado Fluvial” que el relieve que genera un río concreto depende no sólo de las características de la corriente, o el caudal; sino que también depende de la cantidad y tamaño de los sedimentos que arrastre. Incluso estiman que el 95% de la energía potencial de un río se usa para salvar la fricción en el lecho y en los márgenes del cauce, sin dejar de lado la fricción interna del agua y la resistencia del aire sobre la superficie.

1.6 Definiciones conceptuales

- **CAUCE ALUVIAL:** el río fluye en un canal cuyo fondo y márgenes están constituidas por material transportado por el río bajo las condiciones actuales de

flujo. En este caso hay libertad para ajustar dimensiones, forma, patrón y pendiente del cauce en respuesta a cambios.

- **COCHA:** También conocida como tipishca; son brazos del río que han quedado cortados, formando una pequeña laguna.
- **DINÁMICA FLUVIAL:** Es el conjunto de procesos complejos activos y metamorfosis de los sistemas fluviales tanto en su componente espacial como en su evolución temporal.
- **EROSIÓN:** es el arrastre de partículas constituyentes del suelo por la acción del agua en movimiento o por la acción del viento.
- **HIDROGRAFÍA:** es la parte de la geografía que se encarga de la descripción de las aguas del planeta Tierra. El concepto se utiliza también para nombrar al conjunto de las aguas de una región o de un país.
- **LLANURA ALUVIAL:** Son superficies más o menos planas generadas por la acción de los ríos. Las llanuras aluviales son formas de acumulación o sedimentación fluvial a diferencia de las peneplanicies que constituyen formas de degradación o erosión fluvial.
- **MEANDRO:** es cada una de las curvas que describe el curso de un río.
- **MODELAMIENTO NUMÉRICO:** Un modelo científico es una representación teórica de un fenómeno natural, típicamente expresado en forma matemática, que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento. Así mismo, es utilizada en muchos campos de estudio desde los años 60 para validar o refutar modelos conceptuales propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores.
- **SEDIMENTOS:** Son las partículas procedentes de las rocas o suelos y que son acarreadas por las aguas que escurren. Todos estos materiales, después de cierto

acarreo finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces, en lagos, en presas de almacenamiento, en la planicie y hasta el mar.

- **SEDIMENTACIÓN:** Es el proceso natural por el cual las partículas más pesadas del agua, que se encuentran en su seno en suspensión, son removidas por la acción de la gravedad.

1.7 Formulación de hipótesis

1.7.1 Hipótesis general

Es viable la aplicación de modelos numéricos fluviales para determinar la tendencia de variación del cauce y niveles del río Amazonas e Itaya en las cercanías de la ciudad de Iquitos.

1.7.2 Hipótesis específicas

La Dirección de Hidrografía y Navegación puede implementar el modelamiento numérico fluvial para la predicción de cauce de río y nivel de río.

Si se identifican los datos hidrográficos se pueden implementar los modelos numéricos fluviales.

Si se identifican los equipos técnicos se pueden implementar los modelos numéricos fluviales.

CAPÍTULO II: DINÁMICA FLUVIAL DE LOS RÍOS AMAZÓNICOS

Dando respuesta a la hipótesis general acerca de que es viable la aplicación del modelamiento numérico para determinar la tendencia de variación del cauce y niveles del río Amazonas e Itaya en las cercanías de la ciudad de Iquitos, en el presente capítulo se describirán cuáles son los factores que intervienen con mayor fuerza para la migración de cauces aluviales, ya que conociendo la naturaleza de los ríos amazónicos, se podrá realizar el análisis correspondiente.

Dos reconocidos ingenieros sobre ingeniería civil e ingeniería ambiental de Estados Unidos, Jennifer G. Duan y Pierre Y. Julien respectivamente, establecieron en el año 2010 que la evolución de los canales de los meandros envuelve una compleja interacción de dinámica de los fluidos, transporte de sedimentos y erosión de las riberas. Determinan de manera general acerca de las causas acerca de la variación de los meandros. Sin embargo, es necesario conocer y comprender el movimiento de los cauces del río Amazonas, ya que este es conocido por ser el más y no se puede comparar con los demás ríos del mundo y establecer un patrón general ya que todos tienen características diferentes.

Por otro lado, Jorge D. Abad, Director académico del Centro de Investigación y Educación de la Selva Amazónica en Agosto del 2015 hace referencia en el curso de Ingeniería de ríos llevado en el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía, que específicamente para el río Amazonas los factores más determinantes era el tipo de movimiento de fluido que tienen los ríos de la Amazonía, la dinámica fluvial de la plataforma, la morfología del fondo y el transporte de sedimentos. Es por ello que se desarrollarán a continuación:

2.1 Movimiento del fluido:

La dinámica del fluido en los ríos de la Amazonía se caracteriza por tener un curso en forma de espiral siguiendo la dirección del río, haciendo que los sedimentos que se encuentran en suspensión golpeen la base de la base del fondo así como los costados.

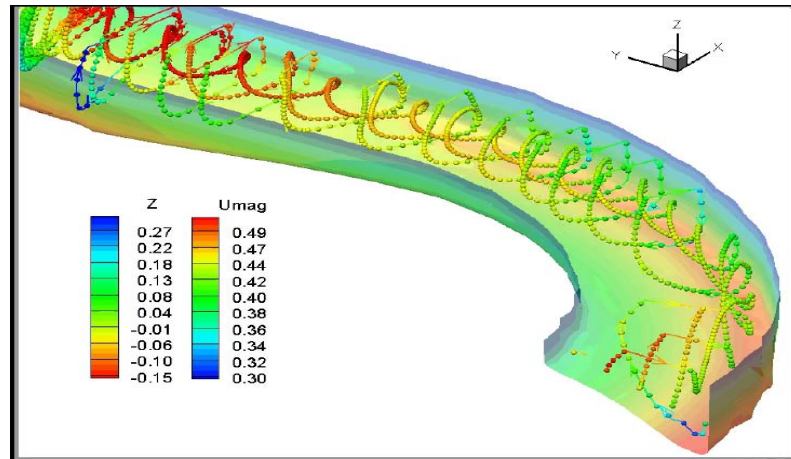


Figura 1: Movimiento del fluido de los ríos Amazónicos. Imagen obtenida del curso de Ingeniería de ríos.

2.2 Dinámica fluvial de la plataforma:

El comportamiento de los ríos, su morfodinámica y la variación de los cauces, está sujeto a la disponibilidad del terreno o al tipo de llanura aluvial que le ofrezca el espacio geográfico, esto quiere decir que el comportamiento de los cauces de los ríos depende de la morfología del terreno.

Por ejemplo, el tipo de río que se encuentra dentro de un valle con pendientes muy pronunciadas entre ribera y ribera ocasionará que el río sea menos dinámico y en épocas de vaciante y creciente probablemente sólo aumente el nivel medio del río, mas no que cambie de forma muy evidente el curso del mismo. (Ver figura 2). Estos ríos normalmente se encuentran ubicados en zonas de ceja de selva o en partes cercanas a la cordillera, como por ejemplo los ríos Ocopa, el río Ene y el río Apurímac.

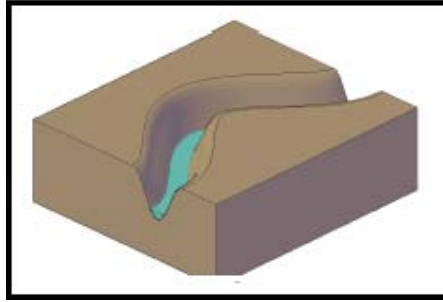


Figura 2: Dinámica de la plataforma de los ríos. Figura obtenida del curso de ingeniería de ríos.

El valle del río Amazonas, no ofrece estas condiciones; no contando con pendientes considerables y por sí mismo tiene una sinuosidad compleja y al tener una llanura aluvial bastante amplia, ocasionará que el río pueda desplazarse con facilidad y sólo dependerá de la dureza del terreno que se encuentre en las inmediaciones del río para poder determinar la variación de sus cauces. (Ver Figura 3).

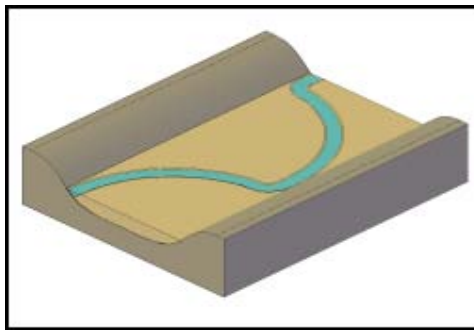


Figura 3: Dinámica de la plataforma del río Amazonas. Figura obtenida del curso de ingeniería de ríos.

2.3 Transporte de sedimentos:

La naturaleza de la dinámica de los ríos amazónicos busca siempre encontrar su propio equilibrio. La partícula de sedimento en el fondo de un río aluvial es perturbado siempre y cuando la resultante de las fuerzas desestabilizadoras; es decir la fuerza de arrastre y el alzamiento hidrodinámico, son mayores a las fuerzas estabilizadoras que resisten al movimiento como por ejemplo la de la gravedad. La

razón principal de la dinámica fluvial se debe a la existencia de los sedimentos. En el fondo aluvial podemos clasificar a los sedimentos por dos criterios; la primera que podía ser el modo de transporte y la segunda de acuerdo al origen del material. En la primera clasificación tenemos dos tipos de sedimentos que son transportados por estas fuerzas desestabilizadoras, los cuales son los sedimentos de fondo (transportados por el fondo, rodando o saltando) y los sedimentos de suspensión (soportada por la turbulencia del flujo). Estos se clasifican de esa forma por el tamaño de los mismos y por la fuerza por la que pueden ser impulsados, por lo que tendrán diferentes velocidades y diferentes lugares a ser depositados, siendo los sedimentos de fondo los que definen la morfología y el cauce de los ríos.

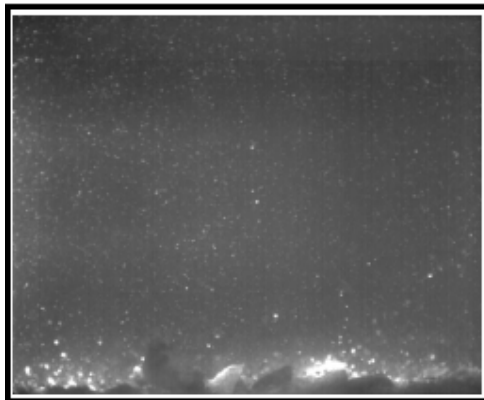


Figura 4: Fotografía transversal del fondo de los ríos. Fotografía obtenida del curso de ingeniería de ríos.

De acuerdo a la página web del SHNA (Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía), se obtiene que la tasa de estimaciones de transporte de sedimentos del río Amazonas son 4'000,000 toneladas por día en épocas de creciente y 150,000 toneladas por día en épocas de vaciante.

2.4 Morfología del fondo:

Para determinar la morfología del fondo se necesita determinar la cantidad de caudal que transportan los ríos, puesto que, si se compara en épocas de creciente o de

vaciante, se obtendrá que no es la misma cantidad de sedimentos que se van depositando en el fondo de los ríos. Siendo de esta forma, en épocas de creciente cuando el río tiene mayor caudal haciendo que el río se comporte de una forma más inestable, produciendo que se transporten la mayor cantidad de sedimentos en el fondo de los ríos, mientras que en la época de vaciante se da lo contrario, provocando que el río se comporte de una manera más estable. Esto no quiere decir, que el depósito de sedimentos y los efectos que estos puedan ocasionar como la erosión no sean en todo el año, sino que si se compara la cantidad de sedimentos que se transporta se tendrán los resultados anteriormente mencionados. El río Amazonas, se caracteriza por ser un río con gran caudal casi todo el año, ocasionando que los efectos producidos por el transporte de sedimentos se hagan de una manera más constante, siendo este un factor muy determinante para el movimiento de cauces aluviales.

El número de Froude, es utilizado para determinar la morfología del fondo; relacionando los efectos de las fuerzas de inercia con las fuerzas de la gravedad.

Nro. de Froude
(forma del fondo: supercrítico, crítico, subcrítico)

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{gD_H}}$$

Compara fuerzas inerciales con fuerzas gravitacionales

v: velocidad del fluido
g: aceleración de la gravedad
Dh: profundidad hidraulica

Figura 5: Número de Froude, utilizado para determinar la morfología de los fondos. Imagen obtenida del curso de ingeniería de ríos.

Dependiendo del resultado (del número de Froude), para determinar si es que el flujo es subcrítico ($Fr < 1$), crítico ($Fr = 1$) y supercrítico ($Fr > 1$)

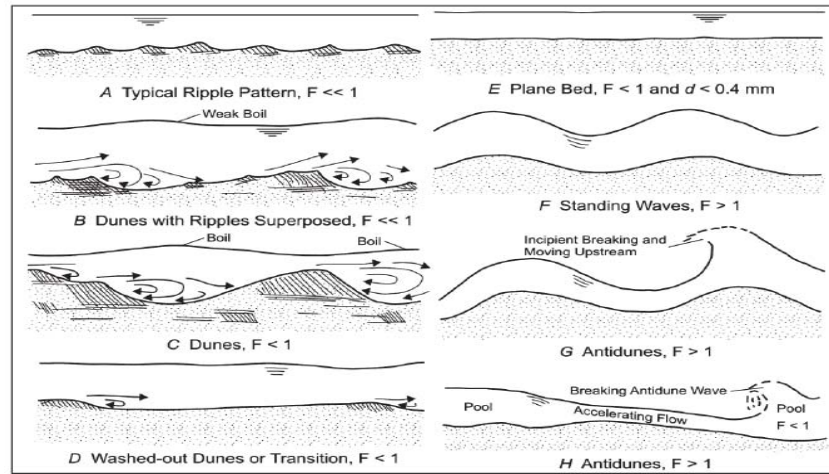


Fig. 2-36. Schematic of different bedforms. Note: F = Froude number; d = sediment size.

Figura 6: Esquema de diferentes tipos de formas de fondo. Imagen obtenida del curso de ingeniería de ríos.

CAPÍTULO III: EL MODELAMIENTO NUMÉRICO

3.1 Bases científicas:

Según lo expuesto por el ingeniero Emanuel Guzmán Zorrilla en el artículo “Modelos Numéricos: una herramienta para el estudio de los procesos oceánicos y costeros” en la revista Bitácora Hidrográfica de fecha diciembre 2006 N°02, en donde se aprecia la importancia de la implementación de la modelación numérica para poder predecir los cambios en la morfología de la costa por el transporte de sedimentos que podrían ocasionar la erosión o sedimentación; o para predecir con la debida anticipación la ocurrencia de un fenómeno natural.

La modelación numérico en la Dirección de Hidrografía y Navegación, es una herramienta implementada recientemente, que data desde el año 1999, en respuesta del proyecto presentado por el IMARPE, SENAMHI, IGP y la DHN titulado “Mejoramiento de la capacidad de pronósticos y evaluación del Fenómeno El Niño para la prevención y mitigación de desastres en el Perú”, en donde señalan que la implementación de la modelación numérica es de suma importancia porque permite predecir fenómenos naturales y cambios morfológicos para así evitar sus consecuencias y que no contar con ello hace que dichas entidades tengan limitantes por la falta de softwares, equipos y personal capacitado para poder contrarrestar las consecuencias de manera oportuna.

Es por eso que a partir de este estudio, la Dirección de Hidrografía y Navegación cuenta con la capacidad de poder desarrollar la modelación numérica para elaborar cartas de inundación y modelo numérico de olas, es decir en costa.

Sin embargo, la elevada dinámica fluvial, la formación de nuevos cauces amazónicos por el movimiento de los mismos, han ocasionado que trabajos e investigaciones se desarrollen para que todos estos fenómenos se puedan predecir con

anticipación para poder contrarrestar de alguna u otra forma los efectos que podrían ocasionar para cada área o lugar.

Específicamente para la ciudad de Iquitos, sería de mucha importancia conocer cuál será la tendencia de variación del cauce del río Amazonas en el sector Muyuy (Ver Figura 8.- Aproximación del río Amazonas al río Itaya en el sector Muyuy.) Puesto que, los cauces del río Amazonas y el río Itaya han congruido hace mucho tiempo, y esto se sabe porque el cauce del río Itaya cambia de ser meándrico a ser rectilíneo y esto es porque el caudal que tiene el río Amazonas ha hecho que cambie la morfología del terreno. Por ende, como ya hace mucho tiempo los cauces ya dejaron de concluir, la ciudad de Iquitos y en especial la Zona Baja de Belén, no están preparadas para poder soportar este cambio, lo que ocasionaría que muchas personas se vieran afectadas así como terrenos destinados para la agricultura y ganadería.

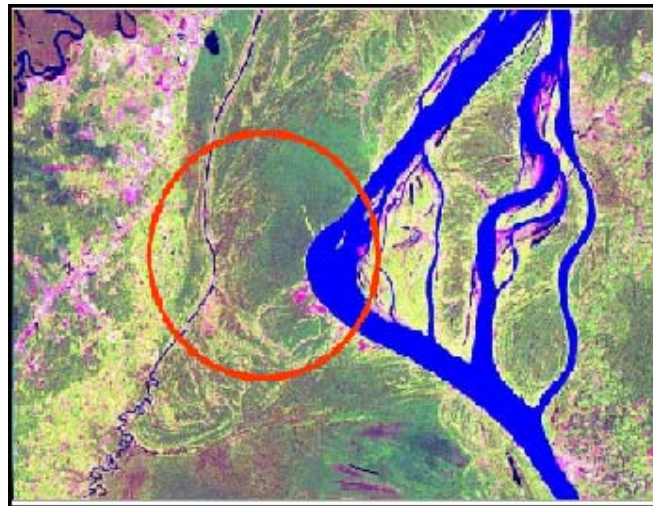


Figura 7: Aproximación del río Amazonas al río Itaya en el sector

Muyuy.www.dhn.mil.pe

Para ello, se plantea en el siguiente trabajo evaluar la viabilidad de implementar dos tipos de modelos numéricos que permitan medir la tendencia de variación de los cauces de los ríos Amazónicos, y otro que nos permita predecir el nivel de los ríos

para poder alertar con anticipación las próximas vaciantes y crecientes propias por la misma naturaleza del entorno.

3.2 Programas de modelamiento numérico fluvial:

Se plantea implementar el modelo numérico para predecir la modificación de los cauces de los ríos, el cuál sería un modelo para largo plazo y sería de mucha utilidad tanto para la Dirección de Hidrografía y Navegación como para el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía porque le permitiría alertar a la población con la debida anticipación, como es el caso del poblado de Bajo Belén en Iquitos, para evitar impactos sociales y económicos; así como pérdida de muchas vidas humanas.

Por otro lado el planteamiento para la implementación del modelo numérico para predecir el nivel del río, es un modelo de corto plazo, porque con estaciones ubicadas en los afluentes de un río principal, se podrá conocer de una manera rápida y eficiente cuando puede variar el nivel del río o cuando ocurren las próximas vaciantes y crecientes extremas.

Para realizar la predicción de las tendencias de evolución morfológica de cauces aluviales y para la predicción de los niveles de los ríos, se han encontrado varios modelos numéricos con los que se podría implementar la modelación numérica. Sin embargo, se ha optado por el CCHE2D y el HEC-RAS que son programas para la simulación y análisis de los flujos de superficie libre, el transporte de sedimentos y procesos morfológicos, como el caso del CCHE2D y para conocer hasta donde llegaría el agua si el caudal del río si el caudal agarrara cierto valor en el caso de HEC-RAS y son programas que cumplen con las ecuaciones principales para la predicción de cada uno de los casos.

3.2.1 El modelo numérico bidimensional CCHE2D:

CCHE2D es un paquete de software creada en el año del 2005 por Wang, Jia y San en el Centro Nacional de Cálculo e Ingeniería Hidráulica (NCCHE), bajo la supervisión de la Universidad de Mississippi en Estados Unidos. Este es un modelo hidráulico bidimensional que ha sido creado para la simulación y análisis de las corrientes hidráulicas, transporte de sedimentos, y procesos de morfología en flujos abiertos. El modelo utiliza el promedio de las ecuaciones de Reynolds para resolver el área de flujo en la profundidad. La grilla o malla que se utiliza en este modelo es curva y no ortogonal. Este flujo es usado tanto para flujos permanente y no permanente.

Amir Abbas Kamanbedast, Reza Nasrollahpour, Mahdi Mashal, en su artículo “Estimation of Sediment Transport in Rivers Using CCHE2D Model” (Febrero del 2013), sostienen que este paquete de software comprende dos partes importantes: la primera que es el generador de mallas y la segunda que es el usuario de interfaz gráfica. El generador de mallas, permite al usuario introducir las condiciones geométricas y la estructura del medio ambiente en la que se encuentra el río, dentro del modelo para posteriormente proceder a crear la red de la estructura. Después de esto, usando la interfaz de usuario gráfica, se puede observar los parámetros hidráulicos de flujo, sedimentos, condiciones de frontera, los parámetros necesarios para la simulación y también los resultados de salida.

Yaoxin Zhang de la Universidad de Mississippi, sostiene que este programa ofrece un paquete integrado para la simulación de y análisis de flujos de superficie libre, transporte de sedimentos y procesos morfológicos que incluye dos categorías importantes: un generador de malla (CCHE2D), que permite la rápida creación de sistemas de mallas estructuradas y complejas para el modelo CCHE2D; y un interfaz

de usuario gráfico (CCHE2D GUI), que incluye cuatro funciones principales: preparación de las condiciones principales y condiciones del contorno, la preparación de los parámetros del modelo, ejecutar simulaciones numéricas y la visualización de los resultados de los modelos.

Señala, que un modelo numérico es una aproximación de los procesos físicos del mundo real, aunque sea por problemas sencillos físicos, las cantidades simuladas tales como velocidades de flujo y elevación de la superficie del agua es limitada. Se tiene que entender y esperar que los errores debido a aproximación matemática (promedio de Reynolds, los errores de profundidad a la media, y de truncamiento, etc.) y aproximaciones físicas (aceleración del flujo vertical es despreciable, el cierre turbulento, esquemas, etc.) envuelven la formulación de un modelamiento numérico. Los errores debido al cálculo son inevitables.

Cuando se aplica un modelo numérico a un estudio de un campo determinado, este debe ser calibrado con los datos obtenidos del campo, debido a que la resistencia que ofrece un flujo que pasa por un lugar determinado, está representado con el coeficiente de rugosidad que varía con las propiedades propias del sedimento, la forma del fondo del río, la geometría del canal y la vegetación. Esta información tiene que ser introducida y ajustada en el modelo para poder lograr calibrarlo.

Dentro de las ecuaciones matemáticas con las que trabaja el modelo numérico CCHE2D para el flujo y sedimentos en canales y ríos abiertos son los siguientes: la ecuación de continuidad y la ecuación de momento.

Ecuación de continuidad (superior) y de movimiento (inferior):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Donde “x” es la distancia a lo largo del conducto “t” es tiempo, “A” es el área de sección transversal, “Q” es la descarga de flujo, “h” es la profundidad de flujo, “S₀” es la empinada del lecho del río, “b” es el factor de corrección del factor momento, “g” es la gravedad, “q” es la descarga de la unidad de anchura, y “S_f” es la fricción empinada.

En el método de la onda dinámica, se utiliza la ecuación de momento completo, donde ésta con la ecuación de continuidad sólo podrán ser resueltos con métodos numéricos. Así mismo, para el modelo de propagación de la onda se utiliza la ecuación de momento y la ecuación de transporte de sedimento.

Ecuaciones de momento (superior) y de transporte de sedimentos (inferior).

$$\frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_0 = 0$$

$$\frac{\partial (Ac_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial Q_{tk}}{\partial x} + \frac{1}{L_s} (Q_{tk} - Q_{t \cdot k}) = q_{lk}$$

Donde “C_{tk}” es la media o promedio de densidad de sedimentos para el tamaño de “k” unidades, “Q_{tk}” es la tasa de aluviones realizadas reales para el tamaño de “k” unidades, “Q_{t*k}” es la capacidad de sedimentos que se transportan, L_s la longitud de la distancia que los sedimentos llevan instantemente y “q_{lk}” es el ancho de la unidad de descarga o salida.

El procedimiento general para usar el modelo bidimensional CCHE2D según Yaoxin Zhang de la Universidad de Mississipi, establece que los usuarios deben proporcionar las condiciones iniciales y las condiciones de contorno para poder basarse en las ecuaciones de Navier-Stokes y son: la generación de malla, las especificaciones de las condiciones de frontera, los ajustes de parámetros, los ajustes

de parámetros, la simulación y finalmente los resultados de la visualización e interpretación.

Variables del modelo CCHE2D:

De acuerdo a lo que sostiene Julián Ceballos en su trabajo de Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la quebrada la marinilla, los trabajos requeridos para poder aplicar el modelo numérico CCHE2D son:

- . Topografía de la cuenca del río a modelarse.
- . Geometría del cauce a través de secciones batimétricas.
- . Datos de caudal a través de la curva de calibración de caudales o niveles.
- . Composición del material del lecho a través de la granulometría de las muestras.
- . Caudales sólidos que son los datos de transporte de sedimentos de fondo o de suspensión o la distribución granulométrica.

3.2.2 El modelo numérico unidimensional HEC-RAS:

HEC (Centro de Ingeniería Hidrológica) RAS (Sistema de Análisis de Ríos) es un paquete integrado de programas de análisis hidráulicas en el que el usuario interactúa con el sistema el uso de la Interfase Gráfica de Usuario (GUI) unidimensional desarrollado por el Gobierno Federal de los Estados Unidos capaz de realizar cálculos de perfiles de superficies de agua de flujos estables e inestables e incluye en sus últimas versiones transporte de sedimentos y varios otros cálculos de diseño hidráulico.

La agradación y degradación en canales aluviales son descritas matemáticamente por las ecuaciones gobernantes de flujo de agua y la ecuación de continuidad de sedimento. Los parámetros necesarios para describir el transporte de sedimento en un canal son: la profundidad de agua, la velocidad de caudal en el cauce y la descarga de sedimentos. Los primeros dos parámetros se obtienen mediante la solución de las

ecuaciones de Saint Venant, la ecuación de la continuidad de sedimento sirve para estimar el cambio de la elevación en el fondo del canal.

La ecuación de Saint Venant es conocida como el conjunto formado por las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento para un flujo unidimensional.

La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + D \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{q_s}{B} = 0$$

Donde “V” es la velocidad promedio de flujo, “y” la profundidad de agua, “B” el ancho de la superficie de canal, “D” la profundidad hidráulica $D=A/B$, donde A=área de la sección transversal del canal, “x” es la longitud a lo largo del canal en dirección del flujo, “q1” es el caudal del flujo que entra o sale del sistema por unidad de longitud del canal.

Ecuación de la conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} + y \right) = g(S_0 - S_f)$$

Donde “g” es la aceleración de la gravedad, “So” es la pendiente del fondo del canal, “Sf” es la pendiente de energía calculada con la ecuación de Maninng.

Transporte de sedimentos:

Los datos que son recolectados en el campo, que son utilizados para predecir cambios en el lecho son fundamentalmente inciertos. Sin embargo, con los datos apropiados, un modelador cualificado puede utilizar un modelo calibrado de transporte de sedimentos que puedan ser empleados como una herramienta con la cual se puedan realizar movimientos del lecho y modelación de transporte de sedimentos.

Antes que se deba calcular el transporte de sedimentos con el programa HEC-RAS, la hidráulica del río debe ser determinada. Los tres pasos de tiempo que utiliza el HEC-RAS son la Duración del flujo, el Incremento de Cálculo y el paso de Tiempo Mezclado.

La duración de flujo es el mayor intervalo de tiempo, la cual representa el intervalo de tiempo a lo largo del cual el caudal, sus características, la temperatura y la carga de sedimentos se asumen como constantes.

El incremento de cálculo, es luego subdivida en un incremento de cálculo, a pesar de que el caudal siga siendo el mismo durante la duración del flujo, la geometría del lecho y la hidrodinámica del río son actualizadas después de cada incremento de cálculo. La estabilidad del modelo puede ser muy sensible a esta subdivisión de tiempo. Cuando el incremento de cálculo es demasiado largo, la geometría del lecho no es actualizada correctamente y los resultados pueden variar.

Posteriormente, el incremento de cálculo es subdividido en el tiempo de mezclado del lecho. Durante cada tiempo de mezclado, en un incremento de cálculo, la batimetría, los parámetros hidráulicos y el potencial de transporte para cada tamaño de partícula permanecen constante. Sin embargo los cálculos de erosión y sedimentación ocurren en este periodo de tiempo y pueden causar cambios en la composición de las capas de mezclado en el lecho. El perfil de gradación vertical es reordenado debido a la adición o remoción de material. Desde que se activan los cambios en la capa de gradación durante el tiempo de mezclado, la capacidad de transporte de sedimentos cambia aun cuando la hidrodinámica y el potencial del transporte permanecen constante.

La ecuación de caudal de sedimentos, demuestra que los cambios en el volumen de sedimentos en un volumen de control es igual a la diferencia entre los incrementos y

pérdidas de carga. La continuidad de sedimentos es resuelta calculando la capacidad de transporte de sedimentos a través del volumen de control asociado con cada sección transversal. Esta capacidad es comparada con todo el suministro de sedimentos ingresado para el volumen de control. Si esta capacidad es mayor que el suministro hay una deficiencia de sedimentos la misma que se satisface erosionando el lecho. Si el suministro es mayor que la capacidad hay un superávit de sedimentos causando que el material transportado se deposite en el lecho.

Una de las partes principales de la ecuación de continuidad es el gradiente de sedimentos a través del volumen de control, comparando el incremento con las pérdidas de sedimentos. El incremento de sedimentos es simplemente el sedimento que entra en el volumen de control aguas arriba y de cualquier fuente local. La máxima cantidad de sedimentos que pueden salir del volumen de control, sin embargo, es función de la cantidad de sedimento que el agua puede mover. Esto es lo que se llama la capacidad de transporte, y es calculado para cada volumen de control en cada tiempo de mezclado.

El HEC-RAS divide el material de sedimento en múltiples tipos de partículas. El rango de material transportable, entre 0.002 mm y 2048 mm está dividido en 20 tipos de partículas.

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 8: Clasificación del material de sedimento por su tamaño según el Hec-Ras. www.Hec-ras.com

El potencial de transporte de sedimentos es la medida en cuánto material de una determinada clase de partícula puede transportar una condición hidrodinámica. En este programa, el Potencial de Transporte de Sedimentos es calculado a partir de ecuaciones que fueron desarrolladas para ser usadas con un solo tamaño de partículas o, como máximo dos tipos de partículas, la ecuación es aplicada independiente para cada clase de partícula presente en el sistema. Este valor calculado para cada tipo de partícula a pesar de su prevalencia en el lecho se llama el Potencial de Transporte.

Una vez que la capacidad de transporte de sedimento es calculada para cada tipo de partícula un total e individual transporte representativo de la graduación del sistema actual debe ser calculado.

Variables del modelo HEC-RAS:

De acuerdo a lo establecido por Juan Chacón y Eduardo Pazmiño de la Escuela Politécnica Nacional de Ingeniería Civil y Ambiental de Ecuador en su artículo “Análisis de flujo gradualmente variado no permanente y transporte de sedimentos

con el modelo HEC-RAS” (2010), sostienen que para realizar la modelación de un río se requieren datos topográficos, geológicos, hidráulicos e hidrológicos como:

.Topografía de la cuenca del río a modelarse.

.Granulometría del material presente en cada sección.

.Aforos de nivel, velocidad y caudal en una sección de control tanto aguas abajo como aguas arriba.

.Registro de caudales.

CAPÍTULO IV: DATOS HIDROGRÁFICOS

Se definen los datos hidrográficos como la información técnica necesaria que debe ser introducida o deben reemplazar las variables de los modelos o programas de modelación numéricos o para la calibración de los mismos, mencionados en el Capítulo III de Modelamiento Numérico, que debe ser recolectada al momento que se realiza el reconocimiento del área realizado por una Brigada compuesta por personal técnico de la Dirección de Hidrografía Navegación o del Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía.

4.1 Datos requeridos para el modelo numérico CCHE2D:

Los datos requeridos para el modelo numérico CCHE2D, son datos que serán obtenidos en levantamientos batimétricos e hidrográficos que serán obtenidos de los siguientes trabajos son:

- . Topografía de la cuenca del río a modelarse. (Geodesia y Topografía).
- . Geometría del cauce a través de secciones batimétricas. (Batimetría).
- . Composición del material del lecho a través de la granulometría de las muestras. (Granulometría).
- . Datos de caudal a través de la curva de calibración de caudales o niveles. (Aforos de caudales sólidos y líquidos).
- . Caudales sólidos que son los datos de transporte de sedimentos de fondo o de suspensión o la distribución granulométrica. (Aforos de caudales sólidos y líquidos).

4.2 Datos requeridos para el modelo numérico HEC-RAS:

Los datos que serán obtenidos en los levantamientos batimétricos e hidrográficos que serán introducidos en los modelos numéricos, se obtendrán de los siguientes trabajos:

- .Topografía de la cuenca del río a modelarse (Geodesia y Topografía).
- .Granulometría del material presente en cada sección (Granulometría).
- .Aforos de nivel, velocidad y caudal en una sección de control tanto aguas abajo como aguas arriba. (Aforo de caudales líquidos).
- .Registro de caudales. (Aforo de caudales líquidos).

4.3 Levantamientos hidrográficos:

Para poder recolectar los datos de campo para los dos tipos de modelo que se podrían implementar, se tiene que empezar con solucionar el problema de la posición, por lo que se recurre a la Geodesia.

4.3.1 Geodesia:

Cuyo objetivo es referenciar el levantamiento horizontalmente al Datum WGS-84 y verticalmente a la altura geoidal usando el modelo EGM96.

Uno de los métodos usados por personal de la Dirección de Hidrografía y Navegación para el uso de las estaciones geodésicas es mediante el método estático, que consiste en utilizar un receptor GPS (master) en una estación base con posición conocida (como el trabajo está enfocado a la viabilidad de implementar un modelo numérico de los ríos Amazonas e Itaya en las cercanías de la ciudad de Iquitos, se puede tomar como punto conocido, uno ubicado dentro del Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía) otro receptor GPS (remoto) en cada uno de los puntos que se desea medir.

Para obtener las posiciones de las estaciones geodésicas medidas, se emplearon simultáneamente los DOS (2) receptores GPS por un lapso de tiempo superior a las DOS (2) horas, con el objetivo de lograr una precisión aceptable altitudinalmente.



Figura 9: Ejemplo sobre el posicionamiento geodésico de un hito determinado en el caserío Villa Belén – Iquitos. Imagen tomada del Informe Técnico sobre el Levantamiento del río Itaya – DHN.

4.3.2 Topografía:

Según la Norma Técnica Hidrográfica Nro. 29 de la Dirección de Hidrografía y Navegación los levantamientos topográficos son las operaciones necesarias para determinar geoméricamente todos los puntos necesarios y suficientes del terreno, considerando todos los detalles, tanto naturales como los creados por el hombre y representarlos finalmente en un plano.

.Control Horizontal:

En el campo hidrográfico, el levantamiento topográfico, establecido para enmarcar geográficamente el territorio costero o para crear las marcas del terreno para el levantamiento hidrográfico, se lleva a cabo comenzando desde estaciones topográficas establecidos anteriormente con coordenadas ya determinadas por las operaciones de levantamiento geodésico.

.Control Vertical:

Según el Alférez de fragata Giacomo Morote (2011), en su trabajo de investigación “Establecimiento de procedimientos para el flujo y archivo de información de campo de levantamientos hidrográficos”, determina que los trabajos topográficos están relacionados especialmente con la determinación de ángulos y distancias sobre el terreno o superficie terrestre para cual existen una serie de métodos los cuales se adaptan de acuerdo a la morfología y situación en la que se encuentra una brigada que realiza un levantamiento topográfico los cuales son explicados a continuación:

La nivelación geométrica es una operación que permite medir la diferencia de las alturas ortométricas (o elevaciones del geoide) entre puntos o su diferencia en elevación.



Figura 10: Ejemplo de una nivelación diferencial. Imagen tomada del Informe Técnico sobre el Levantamiento del río Itaya – DHN.

La nivelación trigonométrica está basada en el uso del teodolito, nivel topográfico o la estación total de acuerdo a la disponibilidad para las medidas de ángulos cenitales. Es empleada para cualquier distancia, es desde algunos metros hasta llegar a por encima de los 10 km. Es usualmente utilizada para la determinación de las elevaciones de posiciones en la triangulación, también es aplicada en otros casos,

como cuando se conoce la distancia entre los puntos cuya diferencia de elevación se busca.

En cada caso, para las distancias inferiores o alrededor de 400 metros, el uso de una superficie plana de referencia implica errores despreciables y los resultados en los cálculos simplificados con los errores promedio en el orden de los 5 cm, en este caso la nivelación se llamaría “eclimétrica”.

La altimetría con GPS genera los componentes de línea-base entre las posiciones de medición, desde que las coordenadas geocéntricas XYZ se obtienen en el sistema de referencia WGS-84. Las coordenadas elipsoidales ϕ , λ y h se obtienen con la fórmula de transformación.

Sin embargo, en cartografía las alturas ortométricas H se relacionan a la superficie del Geoide y no al elipsoide. Por lo tanto es importante conocer la ondulación del Geoide o la diferencia entre H y h en puntos conocidos. Sólo en áreas pequeñas o menores a 10 km y para propósitos cartográficos, se puede aproximar el Geoide al plano horizontal. Para áreas más grandes es necesario usar los modelos globales del geoide como el OSU91A o el EGM96 que están disponibles en el software de procesado de datos GPS en los receptores.

.Taquimetría:

Según la Norma Técnica Hidrográfica Nro. 29 de la Dirección de Hidrografía y Navegación la taquimetría es la disciplina topográfica que comprende todos los procesos destinados a determinar simultáneamente la situación de los puntos en el terreno tanto proyección en un plano horizontal, lo que vendrá reflejado en las coordenadas (X,Y) así como su distancia a un plano horizontal de comparación, lo que determinará su coordenada (Z).

4.3.3 Batimetría:

La determinación de una profundidad es una tarea fundamental para un hidrógrafo, lo cual requiere del conocimiento específico del medio, de la acústica submarina, de la variedad de los dispositivos disponibles para la medición de la profundidad.

La razón por la cual se realiza la batimetría es para obtener profundidades a lo largo y ancho del cauce de un río determinado con la finalidad de determinar la ubicación del canal navegable (talweg), la identificación de los lugares donde existen mayores restricciones para la navegación, o para determinar el perfil de una sección transversal.

En los últimos años la medición del fondo y la obtención de este mismo con mayor precisión ha ido mejorando en los últimos años. Los sistemas acústicos de haz simple, derivados de los sonares militares, fueron un desarrollo importante y han sido usados en los levantamientos hidrográficos desde mediados de 1900. La última tecnología en equipos de medición de profundidades fue evaluado por el grupo de trabajo del S-44 [OHI, 1998] como sigue:

“Las sondas de haz simple han alcanzado una precisión sub-decimétrica en aguas poco profundas. El mercado ofrece una variedad de equipos con diferentes frecuencias, ritmos de pulsos, etc.; y es posible satisfacer las necesidades de la mayoría de los usuarios y, en particular, las de los hidrógrafos. (...)

De acuerdo a la Norma Técnica Hidrográfica Nro. 27 de la Dirección de Hidrografía y Navegación, la batimetría conforma parte del proceso de un levantamiento hidrográfico el cual al contemplar los trabajos de batimetría.

En la Dirección de hidrografía y Navegación, los levantamientos batimétricos se pueden realizar con ecosondas Monohaz y ecosondas multihaz de acuerdo al tipo de levantamiento o de trabajo que se vaya a realizar.



Figura 11: Ejemplo de un levantamiento batimétrico en el río Itaya – Iquitos. Imagen tomada del Informe Técnico sobre el Levantamiento del río Itaya – DHN.

4.3.4 Granulometría:

Según la Norma Técnica Hidrográfica Nro. 10 de la Dirección de Hidrografía y Navegación el estudio de la calidad de fondo tiene como objetivo el caracterizar componentes del fondo marino del área, en donde se pueden considerar algunos puntos para determinar el tipo de fondo que correspondería al área en donde se requiera aplicar un modelo numérico para determinar el tamaño (milímetros) de donde se podría considerar lo siguiente:

.Para poder ver el tipo de fondo se pueden utilizar una draga convencional que es para tener los sedimentos o el tipo de fondo de manera superficial de un área determinada.

. La escala a utilizar para el análisis granulométrico será la de Wentworth (1922).

Las muestras del fondo marino se pueden obtener con unos equipos denominados dragas o sacatestigos (corer), que mediante técnicas permiten conocer los tipos de sedimentos que conforman el fondo y el subfondo marino, así como su distribución vertical, que es para ver cómo han ido variando a lo largo del tiempo.

4.3.5 Aforos líquidos y sólidos:

El objetivo de los aforos líquidos y sólidos en suspensión es medir la cantidad de agua que discurre por una determinada sección transversal, el cual es de mucha utilidad para realizar balances hídricos así como el modelamiento del espejo de agua para la correcta reducción de sondajes.

La función principal del aforo es para medir la cantidad de agua que pasa por una sección transversal determinada de un canal, también se le conoce como descarga o caudal líquido, es directamente proporcional al área de la sección transversal y de la velocidad media del agua que la atraviesa.



Figura 12: Ejemplo de una medición de caudal en el río Amazonas – Iquitos. Imagen tomada del Informe Técnico sobre el Levantamiento del río Itaya – DHN.

CAPÍTULO V: EQUIPOS TÉCNICOS HIDROGRÁFICOS

Dándole respuesta a la tercera hipótesis específica del presente trabajo, “Si se determinan los equipos que intervienen en el modelamiento numérico que permiten medir la variación de los cauces del río Amazonas entonces se podría demostrar su viabilidad”, es necesario definir cuáles son los equipos técnicos que se utilizan en los levantamientos hidrográficos porque de esta forma se demuestra la viabilidad del mismo.

5.1 Equipos usados para la obtención de datos para el modelo CCHE2D y HEC-RAS:

Los equipos hidrográficos con los que cuenta la Dirección de Hidrografía y Navegación que se utilizan para los diferentes tipos de levantamientos mencionados en el capítulo anterior para poder recolectar los datos necesarios para el modelo Hec-Ras son:

5.1.1 Geodesia y Topografía:

Los equipos principales utilizados para los levantamientos Topográficos son:

. Gps geodésico de doble frecuencia trimble 5700:

Según el Manual del Usuario del Gps Trimble 5700/5800, este equipo rastrea satélites GPS para proporcionar datos de posición.



Figura 13: Imagen del Equipo Gps Trimble 5700.

www.dhn.mil.pe

Entre las características principales de este equipo se encuentran el posicionamiento centimétrico en tiempo real RTK con datos y posiciones de hasta 10 Hz, posicionamiento submétrico en tiempo real usando correcciones de pseudodistancia, posee puerto USB para la transferencia de datos, tiene la Tarjeta Compact Flash Tipo I para Almacenamiento de datos.

La memoria Compact Flash Tipo I, puede almacenar más de 8900 horas de captura de datos L1/L2 continua en intervalos de 15 segundos de promedio.

.Estación Total Leica TS 06 Plus:

De acuerdo al Manual del Usuario de la Estación Total Leica TS 06 Plus por la empresa Leica, sostiene que la estación total electrónica TS 06 Plus pertenece a una nueva generación de instrumentos topográficos. Su diseño constructivo y las modernas funciones contribuyen a facilitar considerablemente las labores topográficas. Este equipo es muy adecuado para ser utilizado en diferentes trabajos de campo, llámese topografía catastral y de ingeniería, construcción subterránea o de edificios, especialmente en levantamientos taquimétricos y replanteos. La sencilla operatividad del taquímetro contribuye a que el profesional aprenda a utilizarlo en forma práctica y sencilla.



Figura 14: Estación Total Leica TS 06 Plus. www.google.com

Así mismo, dispone de un teclado alfa numérico completo, conexión USB, memoria interna de gran capacidad y tecnología inalámbrica Bluetooth.

Entre los componentes principales de la Estación Total Leica TS 06 Plus tenemos el cable de datos, ocular o de visual inclinado, contrapeso para el ocular de visual inclinada, base nivelante inamovible, cargador y accesorios, juego de Llaves Allen, Juego de clavijas, Batería GEB111, Filtro solar, batería GEB121, adaptador de red para cargador, espaciador GHT 196 para medidor de la altura del producto, medidor de la altura del producto GHM 007, minibastón de reflector, taquímetro, miniprisma y soporte, minitablilla, manual de empleo, protección contra la lluvia / parasol y la punta para bastón de reflector.

Entre las principales aplicaciones incluidas en el equipo está la Topografía, Estacionamiento, Replanteo (inversa, inversa local, inversa Helnert, orientación con ángulos y coordenadas, transferencia de cota, área, MDT Cálculo de volumen, distancia entre puntos, altura remota, puntos ocultos, comprobación de orientación, línea de referencia, arco de referencia, plano de referencia y carreteras 2D. Así mismo aplicaciones extras como Carreteras 3D y Poligonal.

5.1.2 Granulometría:

Para determinar el tipo de fondo o el tamaño de sedimentos que tiene el fondo marino o el fondo del río en este caso es la draga.

De acuerdo a lo establecido en la Norma Técnica Hidrográfica Nro 10, de la Dirección de Hidrografía y Navegación, el uso de estos equipos es para la obtención de sedimentos pero que se encuentran sólo en superficie. La draga consiste en dos muelas o también llamadas cucharas que se encuentran suspendidas por un cable y que éstas permanecen abiertas mientras no se encuentre al nivel del fondo marino. Una vez que toca fondo, las muelas o cucharas toman el sedimento superficial y toman este sedimento.



Figura 15: Ejemplo de una draga. www.dhn.mil.pe

Este método era usado desde épocas remotas del siglo XIX, para la obtención de los fondos marinos. En la actualidad se sigue utilizando este método ya que tienen la ventaja de ofrecer una primera visión del tipo de sedimento y procesos sedimentarios que caracterizan los ambientes sedimentarios.

Por otro lado los sacatestigos como el Boxcorer y el Multicorer, son equipos para estudiar los sedimentos pero, como no se requiere un análisis más profundo para determinar el tipo de fondo que presenta un río determinado no es necesario utilizar

estos equipos. Además la draga es más maniobrable que el Boxcorer o el Multicorer que son equipos mucho más pesados.

5.1.3 Aforos:

Para poder determinar los aforos líquidos y sólidos se utiliza el ADCP RD-Instruments.

.Perfilador de Velocidad de sonido ADCP RD:

El ADCP o Perfilador de Velocidad de Sonido, es un equipo de medición de la velocidad corriente que transmite señales de alta frecuencia, que mide velocidades media de columna de agua en contenedores verticales. La corriente se determina mediante un desplazamiento Doppler en el eco de retrodispersión de plancton, sedimento en suspensión, y las burbujas, todo supone que se mueve pasivamente con la velocidad media del agua.

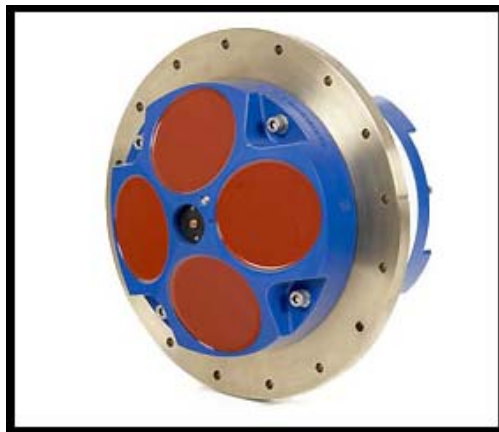


Figura 16: Perfilador de Velocidad de Sonido ADCP RD

Instruments. www.google.com

El ADCP consta de cuatro transductores acústicos, levemente inclinado con respecto al plano horizontal. Cuando se combina con la inclinación del instrumento y dirección de la brújula, el desplazamiento Doppler medida a lo largo de cada eje del haz proporciona una estimación de las tres direcciones actuales primarias: U (este), V

(norte) y W (hacia arriba). Al segmentar la señal recibida en las ventanas de tiempo-gated, se obtiene una estimación de la velocidad en los contenedores separados verticalmente por encima de la ADCP.

Cuando se trazan contra profundidad, estas lecturas forman un perfil de velocidad. Un perfil de velocidad se obtiene para cada mesa de ping acústica, que puede ser programado para repetir cada pocos segundos (0,5-2 Hz). Promediando los perfiles de muchos pings proporciona un perfil de conjunto más preciso de las corrientes oceánicas. Trazado de perfiles sucesivos muestra la variación de las corrientes en cada profundidad en el tiempo.

De acuerdo al tipo de frecuencia se pueden clasificar en 150 KHz. y 300 KHz. El ADCP de 150 KHz tiene las características principales de trabajo como versatilidad, porque ofrece rangos de trabajo hasta de 300 metros y tiene hasta 4 haces de transmisión, que constituye una redundante fuente de datos en caso de que un haz se encuentre bloqueado o dañado, así como una medida de error independiente conocida como velocidad de error de asegurar la calidad de los datos obtenidos.

5.1.4 Batimetría:

Para los levantamientos batimétricos se puede utilizar la Ecosonda Monohaz Digital Syqwest Bathy-500 y la ecosonda multihaz Reson Seabat 7107 según se requiera:

.Ecosonda Digital Syqwest Bathy-500:

Según la Norma Técnica hidrográfica La ecosonda Bathy 500MF es un equipo para realizar levantamientos batimétricos que proporciona un registro continuo y preciso. Es un equipo de doble frecuencia (puede trabajar con 33, 40, 50 y 200 KHz), cuyo objetivo es determinar, partiendo del cálculo de la velocidad del sonido, los valores de

las profundidades del fondo marino a través de la realización de levantamientos batimétricos. Asimismo, proporciona un registro continuo y preciso del relieve submarino.



Figura 17: Ecosonda Monohaz Bathy-500. www.google.com

El software para el levantamiento hidrográfico es compatible con el software Hypack, el cual es usado en la Dirección de Hidrografía y Navegación para la recolección, procesamiento y edición de datos batimétricos. Tiene un alcance máximo de 160 metros (con frecuencia de trabajo de 200 Khz) y es utilizada para determinar profundidades en aguas someras.

Entre las principales características del equipo resaltan que la velocidad del papel del ecograma es controlada electrónicamente, el tipo de papel del ecograma es papel termal de alto contraste, su alimentación es de 11-30 Voltios DC.

El principio de operación de este equipo es calculando el tiempo que tardan las ondas de sonido en ir y regresar al transductor una vez tocado el fondo marino. Se tiene que tener especial cuidado con las burbujas producidas por la propia embarcación, cardúmenes de peces, algas marinas, relieve submarino irregular y niveles diferentes de temperatura que necesitarán de una observación y estudio más minucioso del ecograma para tratar de reducir al máximo los errores y determinar de una manera más precisa la profundidad del medio acuático.

Este equipo es usado en el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía para realizar levantamientos hidrográficos en los ríos y la producción de cartas de practica, debido a que es un equipo que trabaja en aguas someras; es decir, tiene un alcance máximo de 160 metros. Así mismo, es muy maniobrable por lo que es pequeño y puede ser instalado en embarcaciones menores en general.

Consta de 4 componentes principales los cuales son el transductor, cuya función principal es convertir la energía eléctrica en energía sonora y viceversa (para la emisión y la recepción de la señal) y es un dispositivo o sensor que proporciona una salida de datos utilizable en respuesta a una magnitud física; el registrador, que es la unidad principal de la ecosonda que una vez que la señal es transmitida, el receptor la recibe de vuelta, la amplifica y la envía con pequeño voltaje (DC) al cabezal electrónico para ser procesado y registrado en el papel. Así mismo, posee tres funciones principales distintas como la transmisión recepción y registro. El tercer componente principal son los cables datos y energía que son cables muy sensibles por lo que no podrán ser sometidos a estiramientos y compresión. Por último se tiene los controles de operación, en donde el operador de la ecosonda planifica y ejecuta de acuerdo al tipo de levantamiento hidrográfico, en donde tendrá las opciones como rango, profundidad, ganancia, alarma, etc.

.DGPS Omnistar modelo 3100LR12D:

Este equipo es empleado junto con la Ecosonda Digital Syqwest Bathy-500, para solucionar el problema de la posición para los sondajes obtenidos en el levantamiento hidrográficos.



Figura 18: Imagen del equipo DGPS Omnistar modelo 3100LR12D.

www.google.com

De acuerdo a lo que sostiene la Guía del Usuario de este equipo de la empresa Fugro, este es un equipo diseñado para trabajar con la señal diferencial del servicio mundial Omnistar, contiene el receptor satelital RF (conexión de antena convencional) y los componentes para el procesamiento de la señal.

Los componentes principales de este equipo son el receptor, los cables de datos para la transferencia de datos a la PC, el cable de energía de 12 voltios, el cable RF o cable de señal del GPS al receptor, la Antena GPS, la batería de 12 voltios que proporciona suministro de energía al equipo y la computadora portátil con el programa de levantamiento Hypack 2010 instalado.

.Ecosonda Multihaz Reson Seabat 7107:

La Dirección de Hidrografía y Navegación cuenta con una ecosonda multihaz instalada a bordo de la embarcación hidrográfica A.E.H. - 174 "MACHA", con la capacidad de realizar únicamente levantamientos batimétricos desde el veril de los nueve (09) metros (por el tamaño del transductor), hasta los cuatrocientos (400) metros de profundidad aproximadamente. En tal sentido, se vio necesaria la adquisición de una ecosonda multihaz destinada a la recolección de datos en aguas

someras (profundidades menores a los nueve (09) metros), motivo por el cual se adquirió la ecosonda multihaz Reson modelo Seabat 7101.

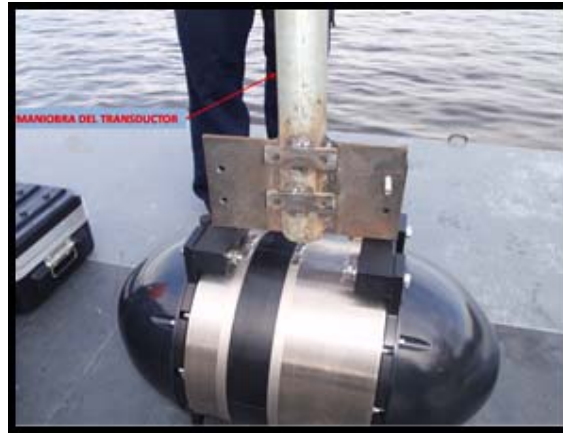


Figura 19: Imagen del transductor de la Ecosonda Multihaz Reson Seabat 7107. www.dhn.mil.pe

El sistema multihaz es una tecnología avanzada utilizada para realizar levantamientos batimétricos que cumplen con las especificaciones técnicas de la Organización Hidrográfica Internacional (SP44 5ta edición 2008), y se caracteriza por proporcionar un conocimiento completo de la profundidad y morfología del fondo marino con datos de gran precisión y calidad, de acuerdo a la instalación.

Empleando una frecuencia de operación de 240 Khz, la ecosonda multihaz Reson modelo Seabat 7101 opera con un ángulo máximo de barrido de 150°. Su alta resolución y dispositivo de corrección de movimientos en tiempo real (cabeceo, balance y guiñada) permiten una recolección de datos altamente confiable. Es una herramienta ideal y ventajosa para la exploración de fondos marinos, reconocimientos arqueológicos, etc.

Consta de 6 componentes principales los cuales son 01 sensor de movimiento (MRU), que es un dispositivo que mide los movimientos de la embarcación como el balance, cabeceo, guiñada y movimiento vertical. Así mismo determina valores que los compensan y los aplica a los datos medidos por el sistema multihaz. En segundo

lugar, están las 02 antenas trimble SPS MSK, que son dispositivos que posicionan a la embarcación, determinan su rumbo bajo el principio de corte de ángulo y georeferencian los datos recolectados. En tercer lugar, están el procesador del sensor de movimiento Applanix (POS-MV), que es un dispositivo que registra información del sensor de movimiento, la georeferencia con la información que recibe de las antenas GPS y la transmite, en tiempo real, al procesador de la ecosonda multihaz. Tenemos al Transductor Reson 7107, que es un dispositivo que consta de 511 haces que barren la superficie del fondo marino con un ángulo de barrido de 150°. Un quinto componente que es el perfilador de velocidad de sonido SV Probe-71, que es un dispositivo acoplado al transductor con la finalidad de registrar, en tiempo real, la variabilidad de la velocidad del sonido en la profundidad del transductor durante un levantamiento batimétrico. El sexto y último componente principal es el perfilador de velocidad del sonido SV Profiler-15, que es un dispositivo que registra la variabilidad de la velocidad del sonido en la columna de agua (desde la superficie hasta el fondo).

.Limnógrafo automático:

De acuerdo a lo establecido en la presentación de la Ingeniera Gladis Chamorro del Senamhi, en su presentación Guía de Hidrometría de Aguas superficiales – Medición del Nivel del Agua, para la predicción de las crecidas (máximas alturas de aguas), se tiene que recurrir a la medición de los niveles de agua de los ríos o lagos. Para ello se empleando los limnógrafos, que son instrumentos diseñados para ello, y que a través de ondas radáricas, permite registrar el nivel del río en los limnigramas.



Figura 20: Imagen de la Estación Automática Satelital

Meteorológica y Limnigráfica en la Amazonía

peruana. www.dhn.mil.pe

CONCLUSIONES

- a. La Dirección de Hidrografía y Navegación sí está en la capacidad de poder desarrollar e implementar un modelo para calcular la tendencia de variación de los cauces de los ríos Amazónicos para el futuro, así como un modelo para predecir el comportamiento del nivel del río sobre áreas de interés, porque cuenta con los equipos adecuados para la recolección de los datos que requieren los modelos numéricos para que sean implementados.
- b. Los modelos numéricos que se plantean sí cumplen con las ecuaciones básicas para poder realizar un modelo numérico en general como son las ecuaciones de movimiento, ecuaciones de continuidad y la ecuación de transporte de sedimentos; además son modelos que han sido implementados en ríos de otros países de diferentes partes del mundo.
- c. Los datos hidrográficos que requieren los modelos numéricos son datos obtenidos durante los levantamientos hidrográficos, por lo que se puede demostrar la viabilidad de los mismos.
- d. La Dirección de Hidrografía y Navegación sí cuenta con los equipos para poder realizar los levantamientos necesarios para la recolección de datos hidrográficos que requieran los modelos numéricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Auge (2009). *Hidrogeología de llanuras*. Recuperado de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/HidrogeoLlanuras.pdf>
- Ceballos (2011). *Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la quebrada la marinilla*. (Trabajo para optar un título). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/30475/2/29299-163554-1-PB.html>
- Cerbuna 12. *Dinámica Fluvial*. Recuperado de <http://www.unizar.es/forojovent/downloads/curso/pdfs/5.pdf>
- Chamorro (2008). *Guía de Hidrometría de aguas superficiales – Medición del nivel del agua*. Callao. Recuperado de http://www.senamhi.gob.pe/pdf/aprendiendo_hidrometria.pdf
- Compañía Fugro (2005). *Manual del Usuario GPS Omnistar 3100LR12D*. Recuperado de http://www.omnistar.com/Portals/0/downloads/receivers/omnistar/3000-3100/3100LR12D-doc-user_manual.pdf
- Dirección de hidrografía y Navegación (2013). *Norma Técnica Hidrográfica Nro. 13 “Normas técnicas para el procedimiento de muestreo y análisis de agua de mar y sedimento marino”*. Callao.
- Dirección de hidrografía y Navegación (2010). *Norma Técnica Hidrográfica Nro. 29 “Manual de procedimientos para mediciones topográficas”*. Callao.
- Duan y Julien (2010). *Journal of Hydrology. Numerical Simulation of meandering evolution*. (pág. 34 - 46). Recuperado de http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/Paperspdf/Duan-Julien-JHydro.%202010.pdf
- Escuela colombiana de Ingeniería. *Hidráulica Fluvial*. Colombia. Recuperado de http://transportesedimentos.tripod.com/esp/pagina_nueva_13.htm

García, Turnero, Páez y Simosa (2011). *El modelado Fluvial*. Recuperado de
<http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/modelo-fluvial/modelo-fluvial.shtml>

Ibañez. *Sedimentos*. Recuperado de
http://www.chapingo.mx/irrigacion/planest/documentos/apuntes/hidrologia_sup/SEDIMENTOS.pdf

Kamanbedast, Nasrollahpour y Mashal (2013). *Estimation of Sediment Transport in Rivers Using CCHE2D Model (Case Study: Karkheh River)*. Recuperado de
<http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/viewFile/30592/26511>

Sánchez (2007). *Manual Introductorio del Hec-Ras*. Recuperado de
http://hidrologia.usal.es/Complementos/manual_HEC-RAS.pdf

Sánchez y Pazmiño (2010). Análisis de flujo gradualmente variado no permanente y transporte de sedimentos con el modelo Hec-Ras. Recuperado de
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1724/1/CD-2757.pdf>

Villón (2009). *Hec-Ras Ejemplos*. Lima, Perú: Maxsoft (pág. 15)

Zhang (2005). *CCHE2D-GUI – Graphical User Interface for the CCHE2D Model User's Manual – Version 2.2*. Recuperado de
http://www.ncche.olemiss.edu/sites/default/files/files/docs/cche2d/CCHE2D_2.2_User's_Manual.pdf