

1. Generalidades

La aplicabilidad de la investigación, su alcance, objetivos y marco conceptual son presentados en este capítulo, estableciendo las condiciones en las que se basa el desarrollo del trabajo y los resultados obtenidos con el mismo.

1.1 Planteamiento del problema

El estudio de los sistemas naturales, es abordado comúnmente a partir de las condiciones individuales que las componen (Andreoli *et al* 2002, Béjar *et al* 2014), de esta manera los sistemas fluviales se pueden observar desde diferentes puntos de vista, como su comportamiento geomorfológico, a través de sus ambientes genéticos y formas actuales (Gutiérrez 2012), de igual forma por la cuantificación de los movimientos y cambios en sus formas dinámicas, como el cauce activo en función del transporte (Freire & Siegle, 2010). Por otra parte se realizan estudios de los sistemas fluviales a partir del comportamiento del flujo que llevan sus principales corrientes y condiciones como su profundidad y las fuerzas actuantes en este movimiento (Bladé *et al* 2009). Es necesario resaltar que los últimos estudios mencionados representa el mayor detalle sobre el sistema fluvial y representan los más frecuentes, por sus resultados en decisiones puntuales de infraestructura, control y atención de sus cauces.

Estas condiciones permiten establecer preguntas de investigación en torno al estudio de los sistemas fluviales, que traten de aportar en el entendimiento integral de sus condiciones, involucrando las diferentes escalas de análisis que se pueden encontrar en los sistemas. Un ejemplo de ellos se desarrolla en torno al río Sinú, río sinuoso de planicie. Esta arteria hídrica fundamental para el departamento de Córdoba, soporte de la ciudad

capital de Montería (Acosta, 2013). Cuerpo hídrico que se encuentra controlado a partir de finales de 1999 con la construcción del embalse de URRÁ. Los estudios planteados sobre el flujo principal de esta corriente involucran esfuerzos separados en su análisis, desde el control y administración del embalse, pasando a los controles de movilidad de sus orillas y finalmente un plan de monitoreo de sus caudales y sedimentos desde la planeación del proyecto hidroeléctrico.

Los resultados de estos esfuerzos presentan conclusiones desde el punto de vista de cada tema estudiado, sin embargo la recopilación de datos se vuelve una función común que caracterizan estos seguimientos. La necesidad de entender y relacionar el sistema fluvial a diferentes escalas para poder administrar, dirigir y orientar se convierte en un pilar de estudio e investigación.

1.2 Justificación

Las síntesis de las variables implicadas en los sistemas fluviales, como el río Sinú y su característica sinuosa de planicie, establecen gran dificultad para representar y apropiar de manera adecuada las relaciones que se presentan en dinámica fluvial, variabilidad morfométrica, condiciones de estabilidad y el comportamiento del flujo, llevando acercamientos sobre estos componentes del sistema siempre desde un punto a parte de cada disciplina. Esta condición fue presentada y expresada como problema fundamental durante la reunión de expertos de la mesa de sedimentos y geomorfología fluvial: llevada a cabo el 14 de Junio del 2016 en la ciudad de Bogotá por The Nature Conservancy, donde se presentaron varias de las iniciativas y estudios llevados a cabo por diferentes instituciones en el país sobre el río Magdalena como principal afluente del territorio colombiano, mostrando la necesidad puntual de un mecanismo de interacción entre los trabajos realizados dinámica fluvial, variabilidad en los procesos de sedimentos, hidrodinámica, comportamiento de flujo y caja de herramientas. Esta necesidad de integralidad ha sido manifestada a través de otros países como lo muestra Andreoli *et al* (2012), para Chile en su discusión sobre: La necesidad de un enfoque hidromorfológico para la gestión de los ríos chilenos.

Por otra parte con la necesidad de fortalecer el sistema de Gestión del Riesgo en el territorio colombiano se publicó la Ley 1523 de 2012: “*Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*”, con lo cual se especifica con mayor claridad los alcances de las administraciones y las definiciones que este componente debe tener para el país. Finalmente, basados en esta nueva ley se establece el Decreto 1807 de 2014 con el cual se establece la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial, en este punto de inflexión se observa un incremento en el desarrollo y preparación de los municipios para los futuros eventos naturales que sus condiciones intrínsecas les muestra (NGRD, 2015). Esta necesidad nacional requiere de mecanismos de integración adecuados, que parten de elementos multiescalares que puedan ser involucrados en la planeación del territorio. Esta investigación aporta mecanismos de análisis alternos que pueden ser integrados en los análisis de gestión de riesgo, incorporando procesos como inundaciones periódicas y extremas.

Bajo esta descripción, la presente investigación aporta sobre la necesidad de mecanismos de análisis y de conocimiento sobre los sistemas fluviales que presentan diferentes niveles de estudio, que por separado no reflejan las condiciones propias de la estructura y comportamientos de este sistema. Buscando apoyar de manera directa las condiciones técnicas sobre el diseño, gestión y preparación de diferentes obras de ingeniería a nivel local y regional, como a los análisis de ordenamiento sobre el territorio y las poblaciones que lo habitan.

1.3 Objetivo General

Determinar la geomorfología y condiciones hidráulicas del sistema fluvial del Río Sinú, para orientar la integración multiescalar desde 1945 al 2016.

1.4 Objetivos Específicos

- Precisar y caracterizar las unidades geológicas y geomorfológicas del área de estudio, con énfasis en los depósitos asociados al río Sinú y las formaciones de material rocoso involucrados.
- Relacionar las condiciones geológicas y geomorfológicas para la zonificación de la resistencia hídrica fluvial en el río Sinú.
- Caracterizar y evaluar la dinámica fluvial del río Sinú, con carácter multitemporal desde 1945 al 2016.
- Caracterizar y analizar las condiciones hidráulicas y sedimentológicas desde 1945 al 2016.
- Explorar y definir las categorías que integran el comportamiento del sistema fluvial del río Sinú. Comparando el sistema fluvial antes de la operación del embalse y después de este.

1.5 Estado de Arte

Estos antecedentes no pretenden en ninguna medida cubrir una revisión total sobre la materia expuesta, complementan y dan claridad al desarrollo científico de la tesis de investigación, realizando un recorrido sobre los conocimientos y principales aportes en los cuales se cimienta los resultados y aportes de este trabajo.

Los análisis y estudios de los Hidrosistemas fluviales desde el punto de vista de corrientes hídricas naturales son abordados desde dos enfoques principales, en cuanto su dinámica fluvial (visión geomorfológica, geomorfométrica) y las condiciones de hidrodinámica (hidráulica fluvial) que el cauce principal presenta, estos dos enfoques son analizados en función del cambio temporal del sistema.

Cuando se abordada la dinámica fluvial en su contexto de estructura morfométrica, evidenciando la posición, forma y elementos de composición de los Hidrosistemas

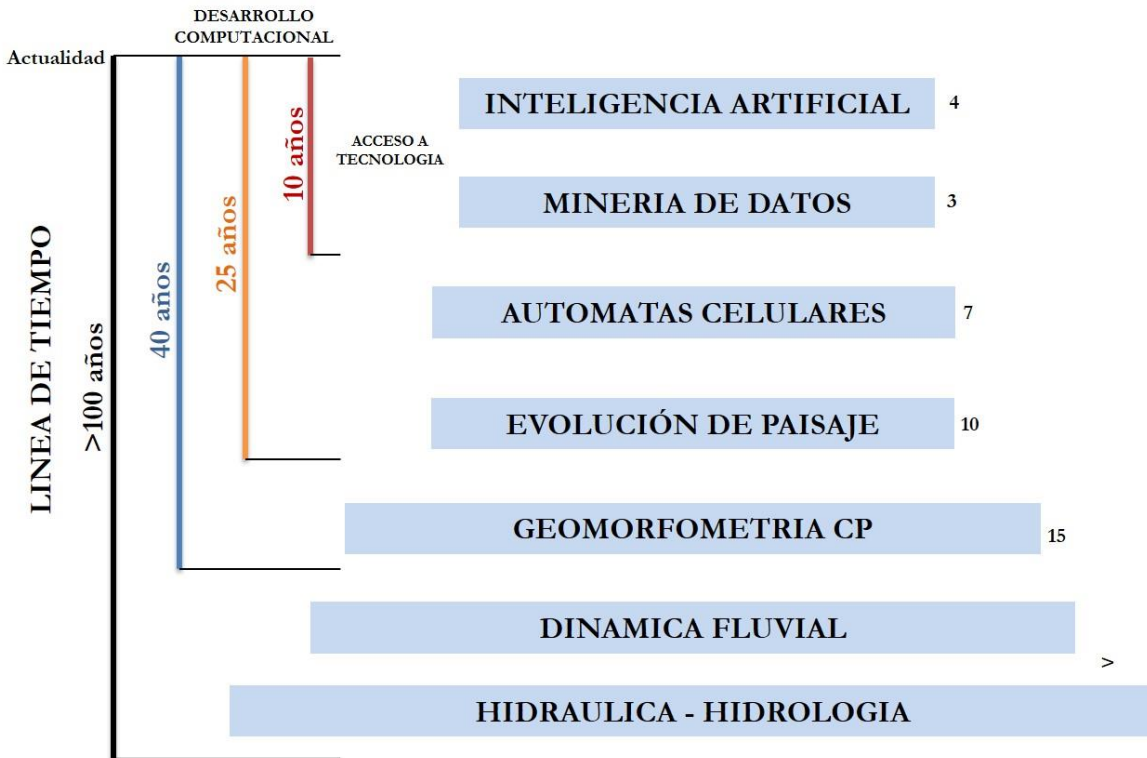
fluviales, se debe hacer referencia a uno de los mayores tratados de alto impacto en este tema, en el cual se reúnen los trabajos realizados durante los años anteriores a su aparición, *Fluvial Processes in Geomorphology* por Leopold *et al* (1964) donde se describe y compila con claridad los análisis del sistema fluvial que hasta el momento se llevaban desde un punto científico y cuantitativo. El progreso de las investigaciones y estudios sobre dinámica fluvial y formas resultantes, se evidencia sobre los sistemas fluviales plasmados por Schumm (1985) en su trabajo de *Patterns of Alluvial Rivers*, donde se describen con claridad las consideraciones para la clasificación y diferenciación de cauces activos, al igual que las premisas de cambio de escala tienen sobre las áreas de interés o de estudio. Para este mismo año el Instituto de Geografía de Bucharest (Rumania), en dirección del profesor Ion Zavoianu publicó: *Morphometry of Drainage Basins* (1985), un largo y preciso trabajo sobre los elementos cuantitativos y medibles sobre los sistemas de drenajes, incluyendo grandes sistemas fluviales. Esta muestra de desarrollos para la descripción y análisis de dinámica fluvial durante los años 80's y 90's es precisada y ahondada por Gutiérrez (2009) en su obra: *Geomorfología*, donde discrimina con claridad los aportes propios de cada década desde la Geología y Geografía a la dinámica fluvial.

Los cambios en ciencias de la computación marcaron avances muy importantes en los medios y formas de análisis sobre las Geociencias, permitiendo mayor procesamiento de información y visiones más complejas de los sistemas y procesos de la superficie terrestre (Delgado, 2003), en este contexto la hidrología (Rocha, 2010), la hidráulica y la dinámica fluvial han tenido beneficios y avances en el campo de la hidroinformática, llevando a cabo los análisis y procedimientos en estos campos a desarrollos más amplios eficaces y rápidos (Olaya, 2004). Los trabajos de dinámica fluvial y la caracterización estructural de los hidrosistemas se han focalizado sobre los cambios temporales de forma, posición y movimientos de flujo y condiciones de sedimento (Freire & Siegle, 2010). Con ello se establecen trabajos que profundizan en el trazado cronológico y de formación de los hidrosistemas fluviales, como el trabajo presentado por Jáuregui *et al* (2016) sobre la dinámica fluvial en el Cuaternario sobre el Río Ebro, estableciendo los procesos y patrones de formación que dan forma al flujo actual, ayudando de esta manera a construir las tendencias que podrían desarrollar con los cambios futuros sobre el Hidrosistema, calculando impactos y cambios por las diferentes actividades antrópicas presentes.

Trabajos de carácter similar con descripciones de los sistemas fluviales son presentados en la provincia de Córdoba Argentina (Degiovanni, Villegas, & Ulla, 2013), el Nor-Este de China (Yu *et al*, 2016), Oeste de China (Gao, Zongmeng, Pan, Liu, & Liu, 2016). Resaltando el trabajo de Ghinassi M, Lelpi A, Aldinucci M & M Fustic (2016) llamado: “*Downstream-migrating fluvial point bars in the rock record*” con el cual detallan a gran precisión los cambios morfométricos de barras en grandes hidrosistemas fluviales a través de ejemplos en diferentes partes del mundo (USA, Europa, Canadá, Turquía, Bolivia, Argentina, Asia), reconociendo un proceso activo y dinámico en los sistemas.

Bajo el mismo contexto del desarrollo computacional se presenta en la **Figura 1-1** una abstracción del desarrollo y avance de los estudios del hidrosistema fluvial y la influencia recibida por los avances en procesamiento y sinapsis digital. Donde se destaca en su base piramidal los estudios de dinámica e hidráulica fluvial, estudios elaborados desde hace varios años con diferentes grados de complejidad, el avance del desarrollo computacional ha permitido disminuir los tiempos en cálculos de estos mismos estudios y ahondar en el estudio de los nuevos procesos geomorfológicos (Geomorfometría), relaciones biológicas, estimación y predicción de cambios. De igual forma grandes avances se han encontrado en la simulación de situaciones teóricas o eventos futuros de cambio climático (Autómatas Celulares), tendencias sobre los sistemas evaluados y patrones (Minería de Datos e inteligencia Artificial) antes no tenidos en cuenta (Coulthard & Van de Wiel, 2006). Inclusive a la creación de sistemas inteligentes a la dinámica propia de los sistemas (Obregón, N & F, Frágala 2002. Villegas *et al* 2009).

Figura 1-1: Esquema de Implicaciones del desarrollo computacional en los estudios de dinámica e hidráulica fluvial



Fuente: Autor

Los principios geomorfométricos de cauces activos y sistemas de drenajes son conjugados con diversos tipos de modelamiento numérico con el cual se busca comprobar, ajustar y validar estos conceptos morfométricos, la mayoría se lleva a cabo para las simulaciones de flujo y con ello transporte de sedimentos que cambian y modifican el cauce activo, barras, diques e islas fluviales en el Hidrosistema fluvial.

Algunos trabajos se enfocan sobre análisis morfométricos que explican el origen y tendencia de formación de los sistemas de corrientes y su estructura actual, para ello Valla, G; Van der Beek, P & D, Lague (2010) realizan una simulación numérica del estado de formación he incisión del perfil longitudinal del lecho de varias corrientes, con el fin de calibrar y demostrar las tasas de erosión he incisión que tuvieron que sufrir en el tiempo para su desarrollo actual.

Para Colombia se distinguen trabajos puntuales en el desarrollo y explicación de los hidrosistemas fluviales. Como los presentados por el profesor Vargas, G (2008a y 2008b) *“Dinámica de Cuerpos de Agua y Zonas Inundables”* y *“Geología y Geomorfología Aplicada a Ríos”* respectivamente, enfocados sobre el Río Magdalena su navegabilidad marítima y fluvial. En la misma línea el profesor Ordoñez, J (2010) realiza un importante aporte con su trabajo: *“El régimen del flujo y la morfología de los cauces aluviales”*, describiendo el comportamiento de los grandes afluentes en nuestro territorio a partir del número de Froude. En este mismo contexto Vargas, G (2012) presenta un primer trabajo sobre la relación de la Geología, Geomorfología y Dinámica Fluvial aplicada en la Hidráulica de Ríos.

En el contexto del área de aplicación de esta investigación, Florez & Suavita (1997) en su trabajo: *“Génesis y manifestación de las inundaciones en Colombia”* establecen con claridad la posición, desarrollo y comportamiento de los principales hidrosistemas fluviales, realizando una aproximación muy clara sobre el Río Sinú en su condición de desbordamiento de valle aluvial, partida fundamental en el caso de aplicación de la presente investigación. En esta misma publicación se esboza los primeros escenarios de amenaza sobre el Río Sinú que años anteriores fueron trabajados por Robertson (1984), y enfocados sobre la Avulsión de esta misma corriente en la formación de su delta (1987). La dinámica fluvial y susceptibilidad a la erosión del Río Sinú fue abordada por Vargas, G (2005) en su trabajo: *“Geología, Geomorfología, Zonificación de la Resistencia de los Materiales a la Erosión Fluvial Dinámica Fluvial y Zonificación de la Susceptibilidad a La erosión, Río Sinú, Sector Presa de Urrá – Tierralta, Córdoba”*, para el estudio y diseños de obra de ingeniería para la protección contra la erosión lateral. En este estudio se destaca el alto movimiento lateral y frontal del cauce activo del Río Sinú en el sector de Tierralta.

Cuando se abordan los hidrosistemas a partir de la hidráulica fluvial, se presentan estudios, investigaciones y aportes científicos sobre el flujo de cauce activo y sus propiedades. Para este tema no se puede dejar de lado el trabajo de Chow, V (1994) y su libro sobre *“Hidráulica de Canales Abiertos”*, traducido al español en Colombia y utilizado en la mayoría de clases en cuanto a esta materia se refiere. De igual forma se rescatan numerosos trabajos y acercamientos sobre este tema en diferentes centros investigativos de nuestro país, rescatando los aportes de Rodríguez, H (2010) en su trabajo de: *“Hidráulica Fluvial, Fundamentos y Aplicaciones - Socavación”* en los cuales se hace una

referencia detallada de los análisis necesarios para entender, estudiar y aplicar los cálculos sobre flujos en río, haciendo aplicaciones específicas sobre los efectos que diferentes obras ejercen sobre el cauce activo. Los estudios en ingeniería para el desarrollo de diferentes actividades de control, mantenimiento, conectividad sobre el cauce activo y el sistema fluvial son las principales características de descripciones en el flujo natural (U.S. Army Corps of Engineers, 1993. Blade, E *et al* 2009. Ceballos, D. 2011. Valbuena, D 2015. Valbuena, D 2016), con ello también las propiedades del flujo para los análisis de amenaza por desbordamiento en diferentes periodo de retorno (AVR-CAR, 2015. Valbuena, D 2016.). Muchos de estos trabajos en hidráulica fluvial representan documentos técnicos privados en el desarrollo de las obras pertinentes a ser utilizados.

Sin embargo los hidrosistemas fluviales no solo se encuentran influenciados sobre su estructura morfométrica o propiedades de flujo, como respuesta a la variabilidad climática y diferentes alteraciones que se tengan sobre su sistema. Fuertes implicaciones ejercen las actividades locales a pequeña, mediana y gran escala asociada a los recursos de explotación que sobre sus cauces se puede producir, cambios en su velocidad comportamientos naturales y respuestas a las inundaciones son fuertes problemas que se presentan (Vericat *et al*, 2014), debido a ello también se evidencian modificaciones importantes sobre los ecosistemas, variabilidad en sus comunidades y poblaciones (Béjar *et al*, 2014), la influencia de los hidrosistemas sobre su dimensión horizontal (planicies de inundación) y vertical (Niveles freáticos) con el cambio y desarrollo de ecosistemas riparios son esquemas estudiados y modelados en la actualidad por su importancia en el desarrollo de actividades ecológicas, recuperación y planificación de hidrosistemas (Camporeale, Perucca, Ridolfi, & Gurnell, 2013); (Henshaw, Gurnell, Bertoldi, & Drake, 2013) ; (Corenblit *et al*, 2014).

1.6 Marco Teórico

Esta investigación se enmarca sobre el concepto de Hidrosistema, el cual recoge en un solo espacio definido los componentes individuales que son estudiados y abordados para cumplir el objetivo principal. En este ítem se presentan las definiciones y el marco conceptual en el que se desenvuelven los métodos desarrollados.

1.6.1 Sistema Fluvial

El concepto de Hidrosistema explicado posteriormente yace sobre las bases y fundamentos del uso de la teoría de sistemas (Bertalanffy, L 1976) y su utilización en ciencias, este se puede definir como la relación en conjunto de varios elementos que hacen parte de un todo complejo y deseado a entender. Estas relaciones reflejan conexiones, interrelaciones y transferencias de energía como de materia entre sus elementos de composición (Gutiérrez, M 2008).

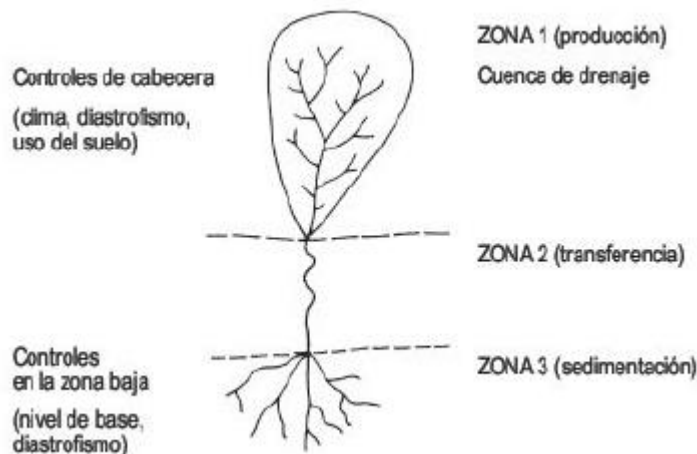
El sistema fluvial (**Figura 1-2**) planteado en los primeros inicios del análisis hídrico, hidráulico y geomorfológico presentado por Schumm (1977), permite entender el comportamiento de los procesos predominantes en la constitución hídrica, el conjunto de redes de drenaje y los procesos de lavado y sedimentación presentes. Esto enmarcado en un proceso de cambio temporal que responde a la variabilidad climática, cambio climático, tectónica y actividades antropogénicas sobre dicho sistema (Gutiérrez, M 2008).

En este contexto se describen tres zonas principales con procesos predominantes en cada una de ellas.

- **Producción:** Se describe como la zona superior de la cuenca en donde las primeras corrientes son formadas y predomina el proceso de escorrentía y producción de sedimentos.

- **Transferencia:** Se encuentra en la parte central de la cuenca y de sus corrientes, enfatizando sobre la transferencia de la escorrentía generada en la zona superior al igual que en el avance de los sedimentos, con pendientes menores a las de la primera zona donde se inicia el escurrimiento.

Figura 1-2: Sistema Fluvial Idealizado (Schumm, 1977)



Fuente: Tomado de Gutiérrez, 2008

- **Sedimentación:** Se ubica sobre la parte inferior de la cuenca y se caracteriza por sus menores pendientes y procesos de sedimentación, llevando a la formación de diferentes geoformas de deposición como llanuras de inundación, abanicos aluviales y los deltas finales.

1.6.2 Geomorfología Fluvial

Esta se puede definir como la relación entre procesos físicos de flujo en el lecho móvil, la mecánica de su transporte y el cambio de la forma de sus canales (Gutiérrez, 2008). Evaluando los agentes de cambio, sus tasas y formas.

Las formas de los canales es uno de los principales estudios de la geomorfología fluvial. Como lo plantean Schumm & Strahler (1977) para la diferenciación de canales rectos y meandriiformes basados en su índice de sinuosidad

$$S = \frac{Lc}{Lv}$$

Donde:

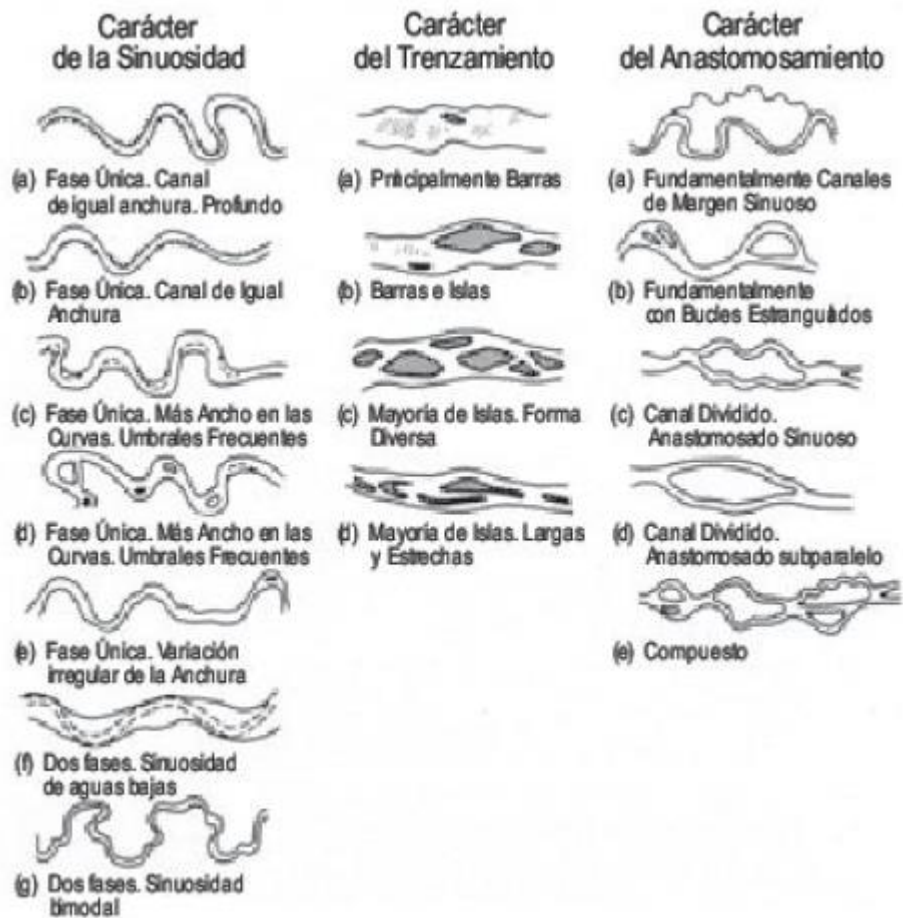
S= Sinuosidad

Lc= Longitud del canal

Lv= Longitud del valle

El comportamiento de sinuosidad puede tener una variada clasificación en función de los grados de curvatura (**Figura 1-3**).

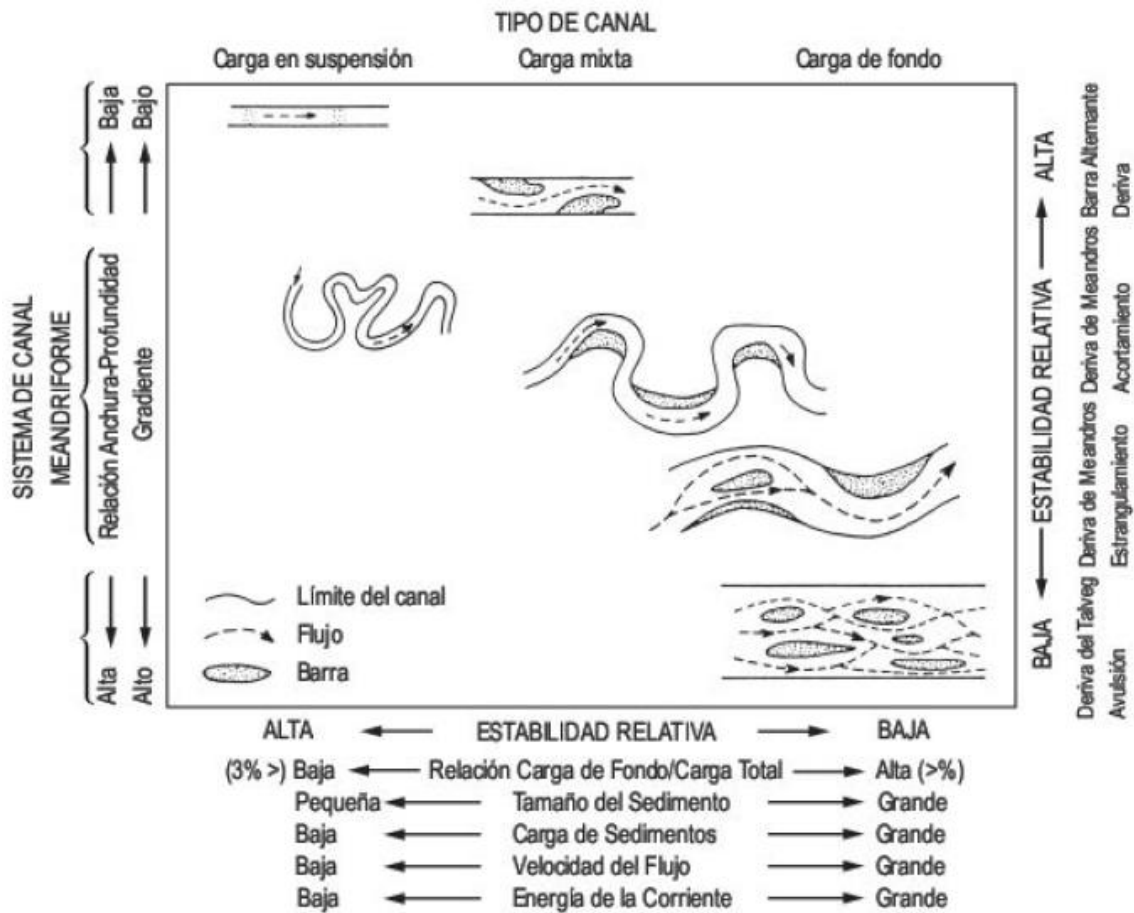
Figura 1-3 Clasificación de canales fluviales



Fuente: Nanson y Knightón, 1996 (Referenciado por Gutiérrez, 2008)

Además de las unidades de clasificación se pueden observar los tipos de cambio su desarrollo a través de análisis multitemporales, en donde la estabilidad del canal es evaluada a partir del cambio o la modificación del cauce activo. En la fig... se presenta el esquema general planteado por Schumm (1981).

Figura 1-4 Clasificación genética de los canales Fluviales



Fuente: Gutiérrez, 2008

1.6.3 Hidráulica Fluvial

La morfología de los canales fluviales depende de la interacción entre el flujo y los materiales erosionables en el límite del canal. Estas interacciones son variables y por esto

el canal se ajusta a la actuación de diferentes fuerzas para mantener una estructura coherente. Las dos fuerzas principales que actúan sobre el flujo del agua en un canal son la gravedad y la pendiente del canal, con la fricción oponiéndose al movimiento del agua. El flujo puede ser laminar o turbulento. El primero se da cuando el agua fluye por un canal recto y liso a velocidades muy bajas. Por lo tanto, el flujo es uniforme y estacionario y la velocidad media es de caudal constante, esto teniendo en cuenta que el agua es un fluido que no resiste esfuerzo, por lo que cualquier esfuerzo produce movimiento. En este tipo de flujo, cada movimiento se realiza a través de trayectorias específicas, sin mezcla significativa con las capas adyacentes. Sin embargo, es muy raro encontrarlo en los cursos de agua, solo es posible en aguas muy tranquilas.

Cuando la velocidad o la profundidad se hacen críticas el flujo laminar se hace inestable y se convierte en un flujo turbulento. Este tipo de flujo se caracteriza por numerosos movimientos caóticos. Los factores que afectan el flujo laminar y lo hacen flujo turbulento son la viscosidad, la densidad del fluido, la profundidad del agua y la rugosidad del lecho del canal. La rugosidad depende del tamaño y forma de los materiales del lecho, de la forma del canal y de la sinuosidad del mismo. Si la sinuosidad aumenta, también aumenta la rugosidad.

Para distinguir entre flujo laminar y turbulento se usa la expresión denominada Número de Reynolds (Ecuación $NR = \rho \frac{VR}{\mu}$ (1-1)).

$$NR = \rho \frac{VR}{\mu} \quad (1-1)$$

en la que ρ es la densidad; V , la velocidad media, R el radio Hidráulico y μ la viscosidad. Los valores bajos corresponden a flujo laminar y los altos a flujo turbulento. El número de Froude también distingue el flujo laminar del turbulento, pero diferenciando las fuerzas de inercia con las de gravedad ($F_r = \frac{V}{gd}$ (1-2)).

$$F_r = \frac{V}{gd} \quad (1-2)$$

donde V es velocidad; g la gravedad y d la profundidad

$F_r = 1$ flujo crítico

$F_r = < 1$ flujo laminar

$F_r = > 1$ flujo turbulento

La velocidad es una de las variables más sensibles y se modifica en función de la distancia al lecho fluvial. Para calcularla, se debe considerar la magnitud y el sentido. La variación de la velocidad en un río se puede dividir en dos capas, la primera, una capa interna entre el 10 % y el 20% del lecho, donde la velocidad varía semilogarítmicamente con la profundidad y una capa externa que ocupa entre el 80% y 90% que es de gran turbulencia y que se aleja de la forma semilogarítmica. La velocidad aumenta hacia el centro del curso fluvial debido a la disminución de la fricción sobre el lecho y sus paredes (**Figura 1-5**).

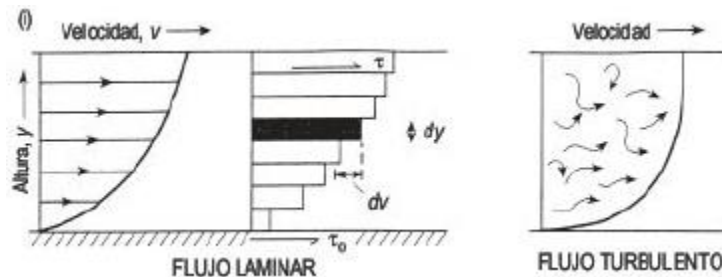
Ya que la velocidad se relaciona con la resistencia al flujo, esta resistencia debe ser calculada. La ecuación más referenciada y utilizada para hacerlo es la de Manning (Ecuación

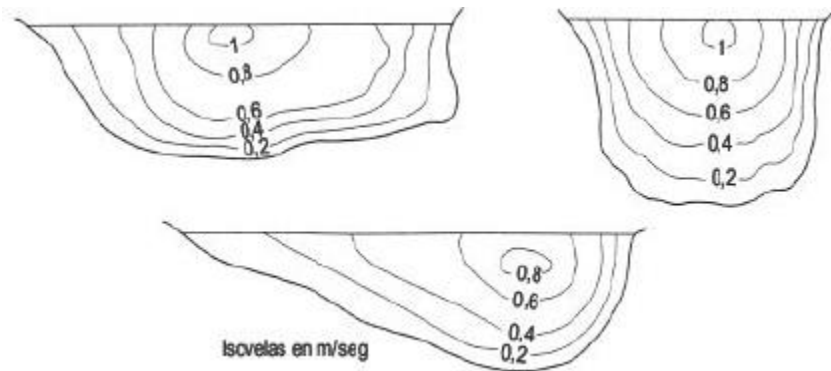
$$V = \frac{1}{\pi} R^2 \pi^3 S^1 \pi^2 \quad (1-3)$$

$$V = \frac{1}{\pi} R^2 \pi^3 S^1 \pi^2 \quad (1-3)$$

donde π es la rugosidad, R es el radio hidráulico, S la gradiente de la corriente y V la velocidad media (m/seg).

Figura 1-5 Variaciones de Velocidad en el Flujo Fluvial

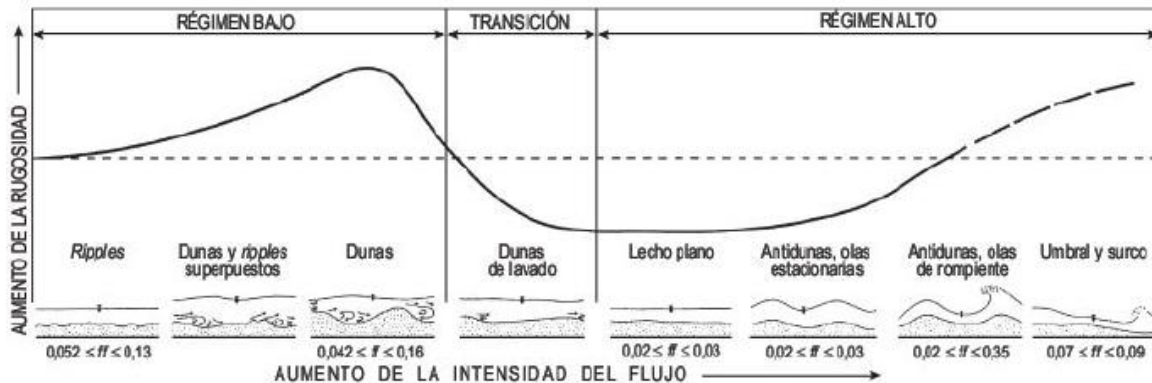




Fuente: Figuras de Gutiérrez, 2008

En el sistema fluvial se distinguen dos tipos de energía: potencial y cinética. La energía potencial se convierte aguas abajo en cinética y luego se pierde en forma de calor por la fricción. Esta pérdida depende de factores como la rugosidad, la sección transversal del curso, la sinuosidad y la cantidad de cizallamiento generado por los remolinos. La energía que no se disipa en calor, se emplea por la erosión y el transporte y se emplea para transportar los sedimentos a través del canal. El cálculo de las variaciones en la energía se ha utilizado para definir la presencia de umbrales y surcos, para precisar la forma del lecho y para explicar los cambios de sistemas de canal. También en la clasificación de los sistemas fluviales se ha tenido en cuenta la energía de la corriente, que se relaciona con la sinuosidad.

El lecho sufre modificaciones en su configuración que dependen del movimiento de las partículas depositadas en el fondo y de las condiciones del flujo. Estas modificaciones son un mecanismo autorregulador de la interface flujo-lecho. El flujo y la vegetación también interactúan y este es un problema complejo en hidráulica fluvial ya que la vegetación tiene efectos directos en el transporte de sedimentos y en la forma en planta del canal. La obstrucción produce la separación del flujo lo que termina en el incremento tanto en el número de canales, como en el grado de trenzamiento (**Figura 1-6**).

Figura 1-6 Variaciones en las formas del lecho en función de la intensidad del flujo

Fuente: Figuras de Gutiérrez, 2008

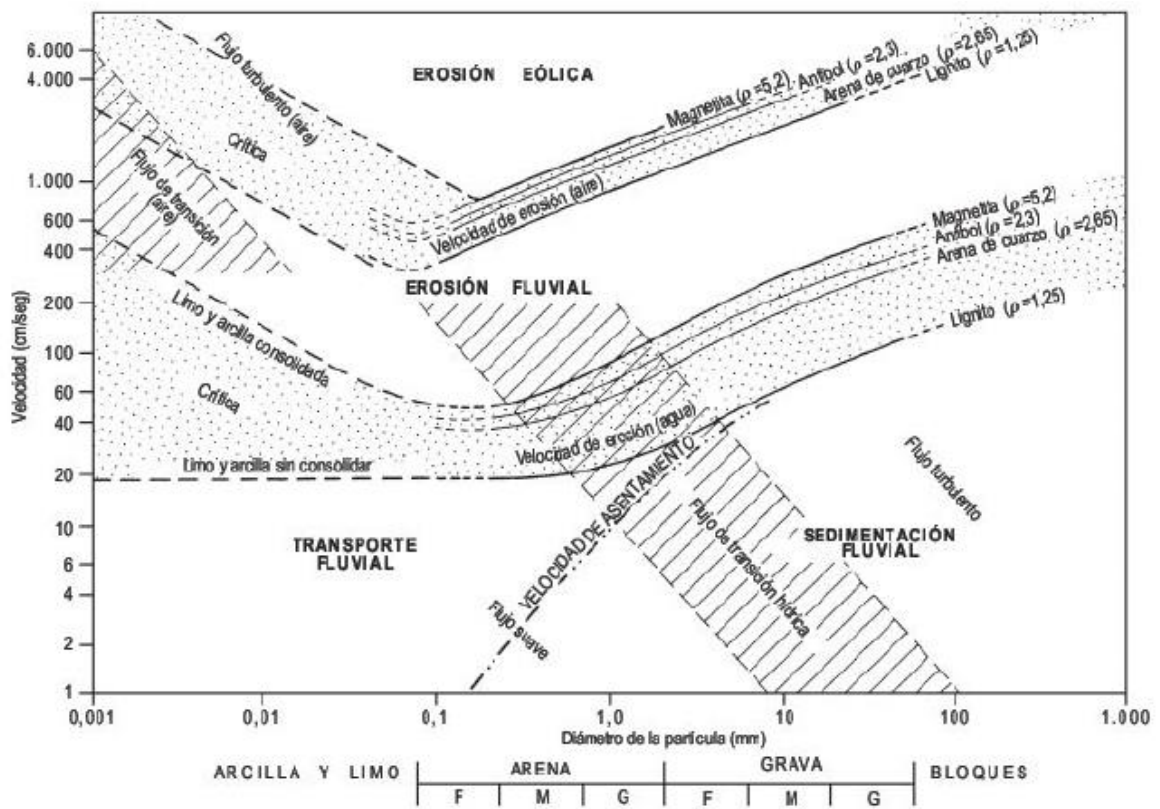
ff = Factor de fricción (Darcy – Weisbach)

- Transporte de Sedimentos

La carga en disolución de un canal comprende los iones y moléculas que proceden de la meteorización química de materia inorgánica. Esta composición cambia de acuerdo a factores ambientales. Se puede distinguir entre la carga en suspensión y la carga de fondo. La carga en suspensión se compone de partículas de tamaño limo y arcilla que pueden movilizarse por turbulencia en las aguas de los ríos. La fracción fina se mueve en todo el canal y se distribuye uniformemente a través de la columna de agua y las arenas tienden a concentrarse cerca del lecho. La carga de fondo, constituida por gravillas, cantos y bloques se moviliza por rodadura o arrastre a lo largo del lecho del canal.

De acuerdo a estudios experimentales la movilidad de las partículas es mayor para pequeñas partículas. Así, los bancos de un río están compuestos por sedimentos finos como arena fina, limo y arcilla y el lecho está compuesto por arenas y gravas con pocas cantidades de limo y arcilla. Estos tipos de sedimentos son diferentes en su tamaño y también en sus propiedades físicas, los más finos son cohesivos y difíciles de erosionar y para las partículas gruesas el arranque se alcanza cuando la velocidad es suficiente para el transporte mientras que para arrancar los materiales finos es necesaria una velocidad muy superior a la de transporte. En la **Figura 1-7** se presenta un diagrama clásico de flujo, que fue elaborado por Sunborg en 1956, (referenciado por Gutiérrez, 2008)

Figura 1-7 Relación tamaño de grano con la velocidad de erosión crítica fluvial y eólica para materiales uniformes



Fuente: Figuras de Gutiérrez, 2008

La velocidad de erosión fluvial crítica se refiere a una altura de 1 m por encima del lecho fluvial

La cohesión en los materiales es mayor, en tanto sean de menor diámetro los sedimentos, de esta manera necesitan mayor velocidad para ser elevadas sobre el flujo, pero una vez elevadas por la corriente pueden ser transportadas por una corriente de menor fuerza.

- **Movimiento del sedimento**

Este fenómeno se presenta por los procesos de corrosión, corrasión y cavitación. La corrosión es cualquier proceso químico que resulta de la meteorización del lecho y de las paredes del curso fluvial. La corrasión o abrasión es el desgaste mecánico por impacto entre las partículas transportadas y la erosión mecánica del cauce; la evorsión es un tipo de corrosión en la que el flujo del agua suaviza el lecho sin ayuda de las partículas y la

cavitación solo se produce a grandes velocidades como en las provocadas por cascadas y cataratas.

Los flujos fluviales pueden erosionar su lecho y sus paredes. El movimiento del lecho (erosión de lecho) se denomina erosión vertical y ocurre cuando la carga desgasta el lecho y provoca la progresión de la incisión. El movimiento lateral (erosión lateral), se produce cuando las paredes del canal se desgastan o socavan y llevan al ensanchamiento del canal. La escorrentía es una de las principales causas de estos movimientos o erosión, existen dos tipos. El primero se da cuando la intensidad de la precipitación es mayor que la velocidad de la infiltración y el segundo, también llamado escorrentía subsuperficial, cuando disminuye la permeabilidad hacia abajo del perfil de suelo, por lo que el agua fluye lateralmente o también ocurre, si existe un horizonte B impermeable, al saturarse el horizonte A.

1.6.4 Inteligencia Artificial (IA) y Minería de Datos (MD)

La inteligencia artificial se define como una rama de las ciencias computacionales que se ocupa de los símbolos y métodos no algorítmicos para la solución de problemas (Ponce, 2012). Este se centra sobre los temas de sistemas expertos, procesamiento de lenguaje natural, reconocimiento de modelos, aprendizaje de máquinas, lógica e incertidumbre.

Por su parte la minería de datos es el proceso secundario de análisis de bases de datos, encontrando relaciones o patrones no vistos a simple vista, que son de interés a los creadores o administradores de dichas bases de datos (Hand, 1998).

Estas dos disciplinas se encuentran muy cerca y entrelazadas en el planteamiento de solución de problemas, en la primera se plantean mecanismo y herramientas para la inferencia de problemas de manera analógica al razonamiento y pensamiento humano. En la segunda se realiza la búsqueda de patrones, valores o enlaces que no se encuentran por el amplio volumen de datos en bases de datos, a partir de las herramientas y mecanismos que se encuentran en la IA y la estadística (Aluja, 2001).

1.7 Metodología

En este acápite se presenta la secuencia metodología y pasos desarrollados para el alcance de los objetivos específicos de la presente investigación y la culminación de su objetivo principal. Se presenta la conceptualización metodológica general a partir de la inclusión del marco conceptual y el desarrollo metodológico específico.

1.7.1 Metodología General

En la presentación de esta metodología se identifican tres puntos principales, primero, las características y mediciones tomadas del sistema para su caracterización y análisis. Segundo los análisis que se desarrollan con la información recopilada y por último el punto de aporte en la complejidad del sistema y donde se centra el problema de investigación.

- Características y mediciones

Se contemplan las principales variables obtenidas mediante interpretación de sensores remotos, información secundaria y primaria. En este ítem también se contempla los procesos de medición sobre el sistema fluvial, como el programa de monitoreo en campo por parte de los puntos de muestreo de la Estación Hidroeléctrica URRRA y los puntos de monitoreo permanentes oficiales del IDEAM.

Los datos sedimentológicos y la geomorfología se contemplan en la interacción del componente longitudinal y lateral, debido a los cambios a través del cauce activo por el desplazamiento de sedimentos, cambios de forma y alteraciones de la estructura de manera longitudinal. Por su parte en el componente lateral se pueden identificar los cambios en cone-xiones hídricas, hidráulicas y de geoformas, realizando afectaciones sobre las actividades existentes alrededor del sistema.

- Análisis

Geomorfología fluvial, en este aspecto se describe la estructura fluvial y su comportamiento multitemporal a través de las diferentes condiciones que presenta el cauce activo. Se

describieron las unidades geomorfológicas presentes y su relación geológica, teniendo como principal característica su resistencia al esfuerzo cortante.

En este mismo aspecto se describen las principales características cuantitativas, como la sinuosidad, dinámicas de orillas y ancho de bancas.

Hidráulica Fluvial, representa las principales condiciones mecánicas del movimiento del flujo a través del cauce activo y sus geoformas asociadas. Con lo cual se valora la velocidad de flujo, la profundidad y el esfuerzo cortante producido por el movimiento mecánico del fluido.

Las condiciones de monitoreo sobre el Río Sinú, permitieron tener datos de control sobre la carga de sedimentos, con lo cual se reprodujo un análisis y modelamiento complementario de sedimentos, asociado a la hidrodinámica propia de la corriente y las propiedades intrínsecas de la granulometría muestreada. El proceso de monitoreo y reconstrucción de las series históricas se realiza desde finales del año 1999 cuando se produjo la construcción puesta en funcionamiento de la Central Hidroeléctrica URRÁ. Sin embargo se encuentran monitoreos continuos sobre puntos oficiales IDEAM de caudales y sedimentos que complementan las mediciones de monitoreo por la Central.

1.7.2 Metodología Específica

Se presenta el esquema metodológico específico y los diferentes pasos y actividades llevados a cabo durante el proceso de investigación. Se describen los principales elementos utilizados, sus procedimientos de análisis y los resultados tanto intermedios como finales (**Figura 1-8**). En el desarrollo de los siguientes capítulos se realizara una descripción detallada de la información utilizada para la obtención de los resultados.

- Plan de Monitoreo central Hidroeléctrica Urrá I

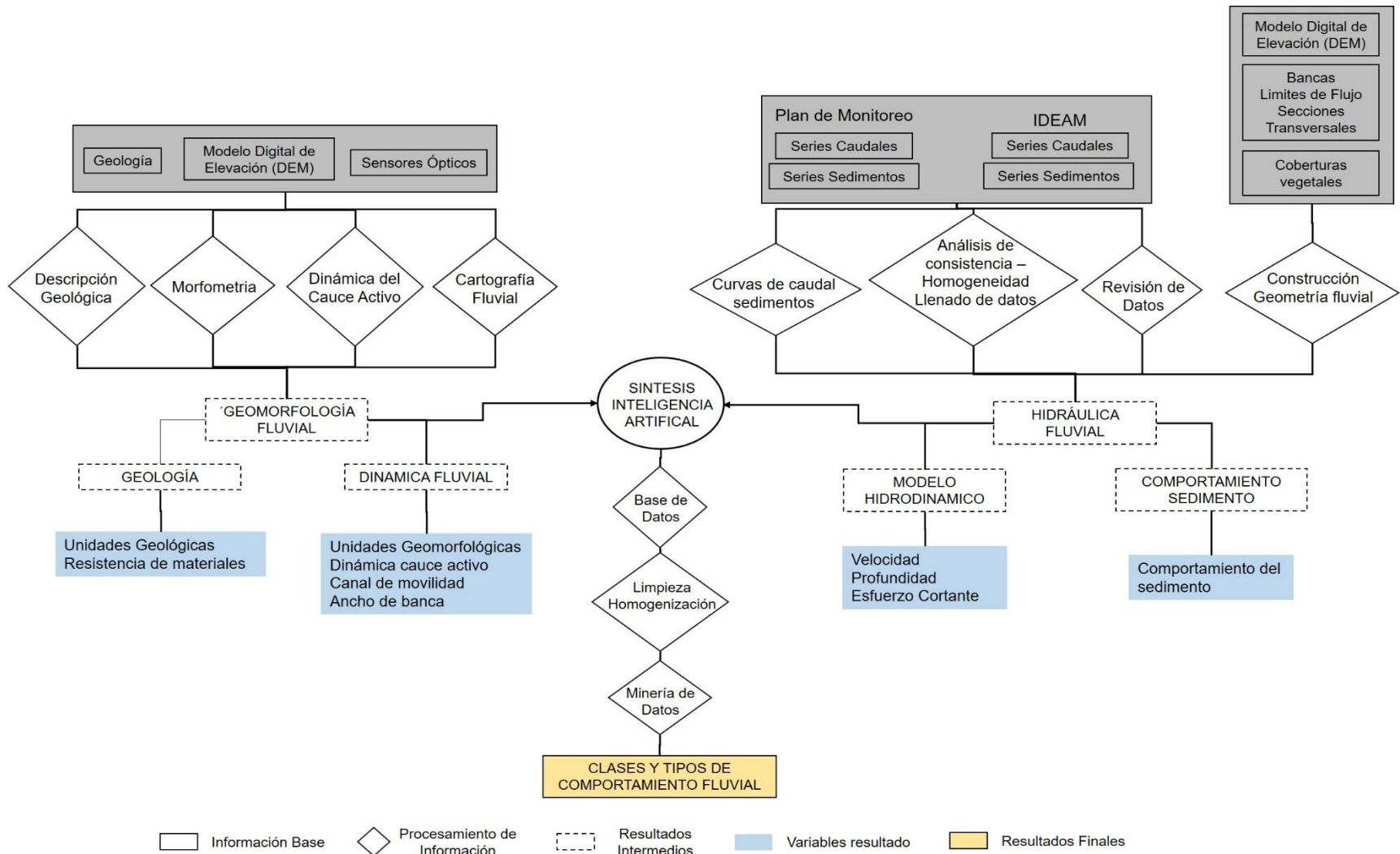
Se encuentra planteado por la central hidroeléctrica URRÁ, como respuesta al requerimiento por parte de la autoridad ambiental ANLA, donde se requiere monitoreo permanente del cauce activo del Río Sinú desde la entrada en operación de la central en el año 2000 (Resolución 838 y 965 de 1999 – Consultoría B & G 2016). En este plan de monitoreo se contempla la medición de caudales líquidos puntuales sobre las estaciones

de monitoreo seleccionadas, intercalando con campañas de monitoreo de caudales sólidos sobre los mismos puntos.

Aforos líquidos, estos son llevados sobre dieciocho secciones o puntos de control fijos sobre el cauce activo del Río Sinú y seis sobre los principales caños afluentes del hidrosistema fluvial. En las campañas de campo es usada la metodología de los cinco puntos (Marbello R, 2005), donde se toma la velocidad en superficie al 20%, 60% y el 80% de la profundidad del punto seleccionado por cada sección. Para cada una de las campañas de monitoreo es asociado el caudal calculado al nivel de la corriente en ese puntos, con lo cual se han obtenido curvas de rendimiento (Caudal – Altura, ver **Figura 1-9**) calibradas para cada uno de dichos puntos (Consultoría B & G 2016).

Aforos sólidos, en estas campañas se contemplan la medición de aforos sólidos por el método de aforo integrado, sobre las muestras realizadas en la vertical para material suspendido o carga de lavado. También se toman muestras de material del lecho para determinar las características del material de arrastre.

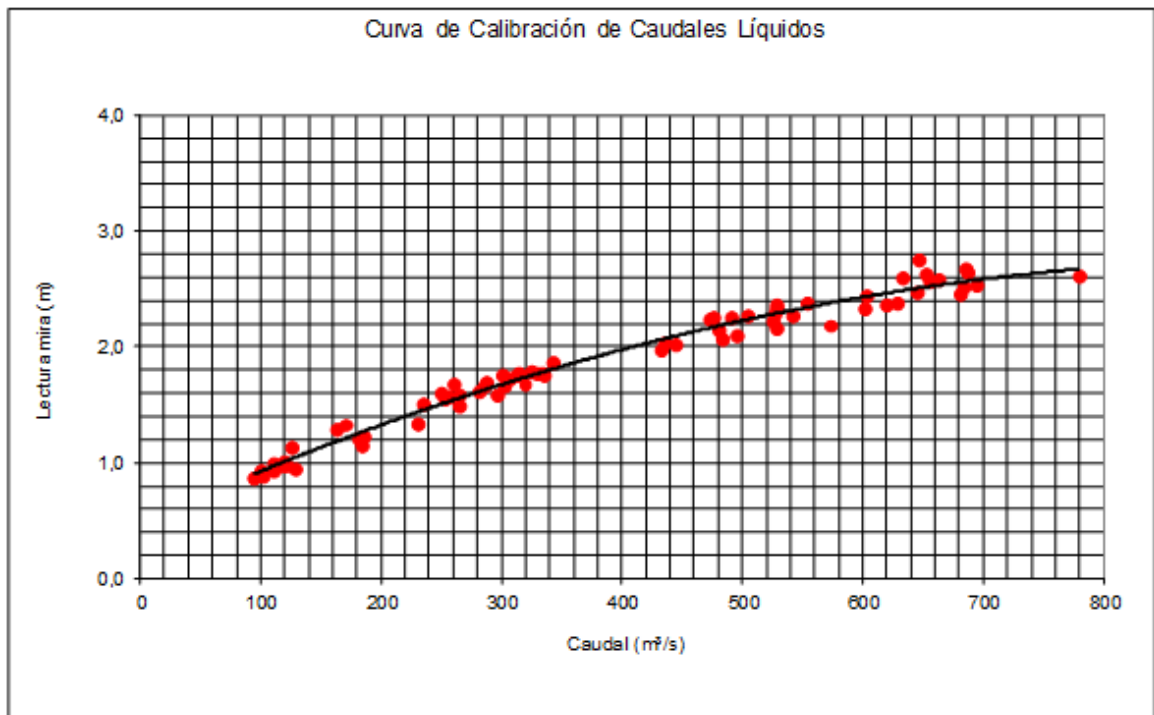
Figura 1-8 Metodología Específica



Fuente: Autor

De estas campañas de monitoreo se cuenta con una base de datos de caudal sólido y curvas granulométricas de los últimos 17 años. En la **Figura 1-10** se presenta un ejemplo de las curvas granulométricas obtenidas a partir de las campañas de monitoreo.

Figura 1-9 Curva Calibración – Estación Punteo Pacheco, Actualizada Diciembre de 2016



- : Última actualización Diciembre 7 de 2016.
- Valores teóricos obtenidos de la ecuación que presenta mejor correlación.
- * Valores extrapolados.
- Caudales calculados con la fórmula $Q=62,88 (h+0,35)^2,2064$ $R^2=0,983$
- Válido para valores $0,7 < h < 3,2$

Fuente: Ejemplo tomado del informe final del año 2016, para el plan de monitoreo relacionado a los componentes hidrológicos e hidráulicos contemplados en la licencia ambiental para la Central Hidroeléctrica Urrá I.

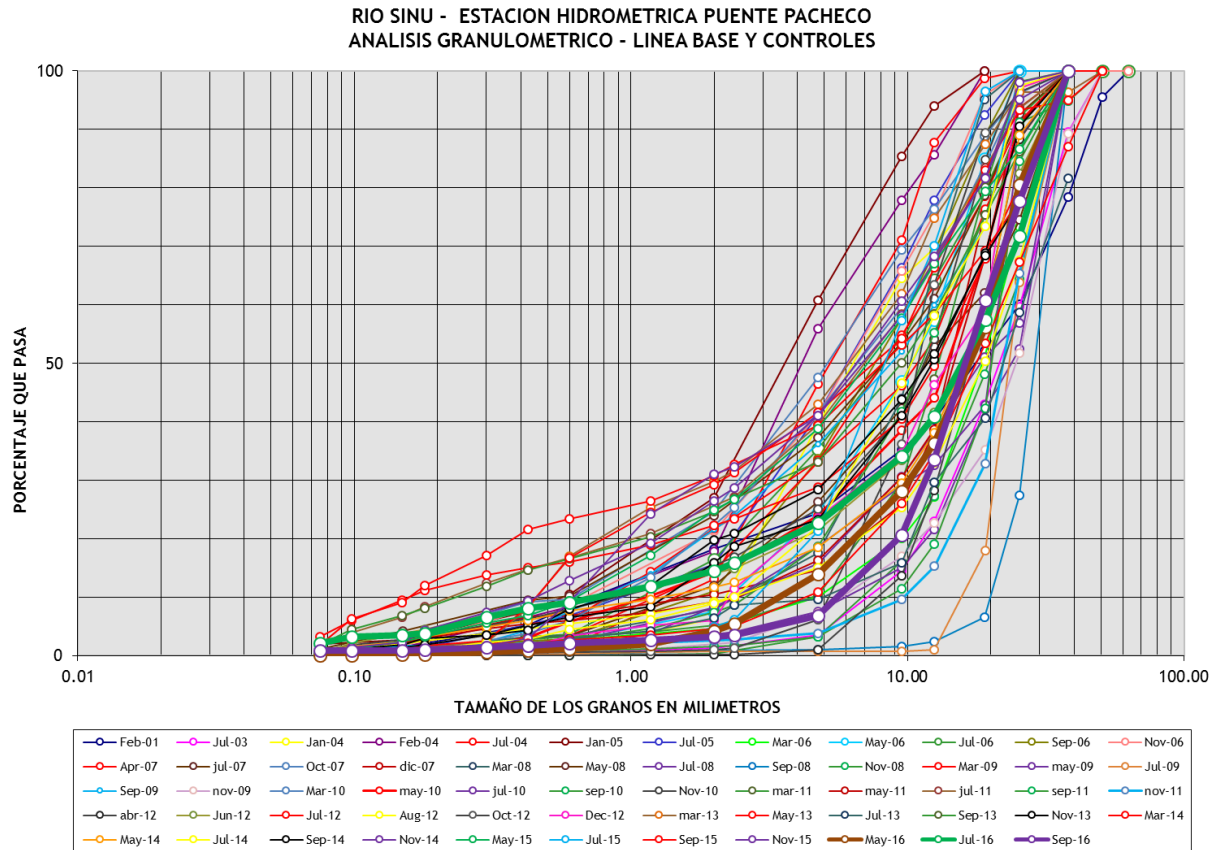
- Estaciones de monitoreo de carácter nacional - IDEAM

Sobre el cauce activo del Río Sinú se encuentran siete estaciones monitoreadas permanentemente por parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en las cuales se registran valores diarios de caudales medios y se

encuentran mediciones de aforos sólidos, con ellos se han construido curvas de calibración de carga de sedimento – caudales oficiales entregadas por el instituto.

Las series hidrológicas presentan un registro de datos desde 1999 y algunas fechas anteriores, cuando entro en operación la central hidroeléctrica. Para el proceso de la investigación se han tomado los registros desde diciembre de 1999 hasta la actualidad (Figura 1-11).

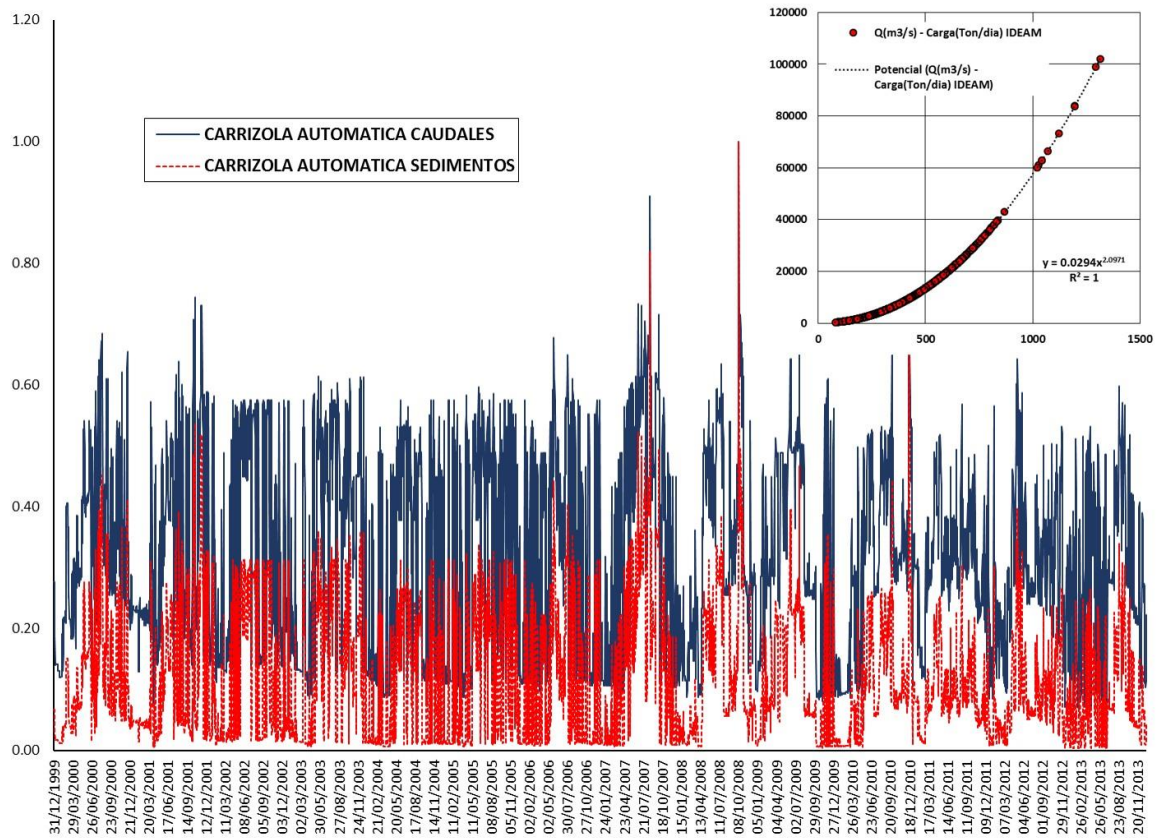
Figura 1-10 Curvas Granulométricas - Estación Puente Pacheco. Cambio a través de las diferentes campañas de monitoreo



Fuente: Ejemplo tomado del informe de avance No 5, del año 2016, para el plan de monitoreo relacionado a los componentes hidrológicos e hidráulicos contemplados en la licencia ambiental para la Central Hidroeléctrica Urrá I.

Las curvas ajustadas de caudal – sedimentos se encuentran construidas a partir de las mediciones propias del IDEAM, los datos obtenidos responden de manera clara a un comportamiento potencial natural de este proceso. En la **Figura 1-11** se presenta el ejemplo de comportamiento de la serie de caudales sobre la estación Carrizola Automática y la carga de sedimentos relacionada por su curva ajustada.

Figura 1-11 Serie Temporal de Caudales, estación Carrizola Automática



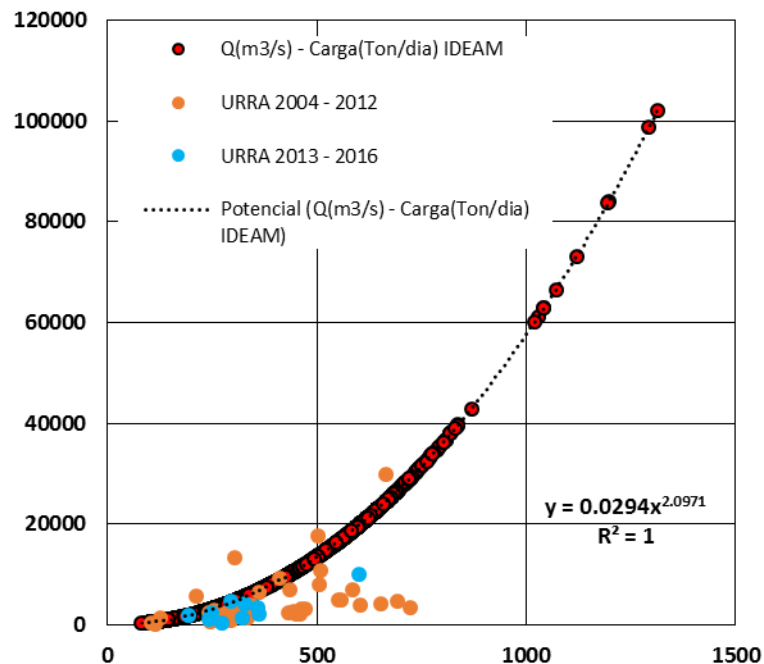
Fuente: Autor, los valores en las series de caudales y carga de sedimentos fueron normalizados para poder ser graficados de manera simultanea

La respuesta de la carga de sedimentos en estas series, presentan un claro ajuste a la variabilidad de caudales por su curva de relación caudales – sedimentos.

- Curvas de Caudal – Sedimento

Se han tomado las curvas de caudal – sedimento proporcionadas para los puntos oficiales de datos IDEAM, por su mayor cantidad de datos, debido a que las series tienen resolución temporal diaria, sobre estas curvas se ha verificado los datos tomados durante el programa de monitoreo que lleva a cabo la central hidroeléctrica. En la **Figura 1-12** se expresa el comportamiento de la curva de caudal – sedimento para la estación Carrizola Automática, comparando las campañas de monitoreo de 1999 al 2012 y de 2013 en adelante.

Figura 1-12 Curva Caudal - Carga de Sedimentos, Estación Carrizola Automática



Fuente: Autor

La comparación de los datos del programa de monitoreo en diferentes fechas, es llevado a cabo por la sugerencia presentada en el informe final de monitoreo de procesos erosivos del Río Sinú (Construcción & Consultoría Especializada l.t.d.a. URRRA, 2014) donde se describe la diferencia en metodologías de muestreo antes del 2013 y después de esta fecha, haciendo comparables con los datos IDEAM los datos tomados durante las campañas de monitoreo posteriores a la fecha mencionada.

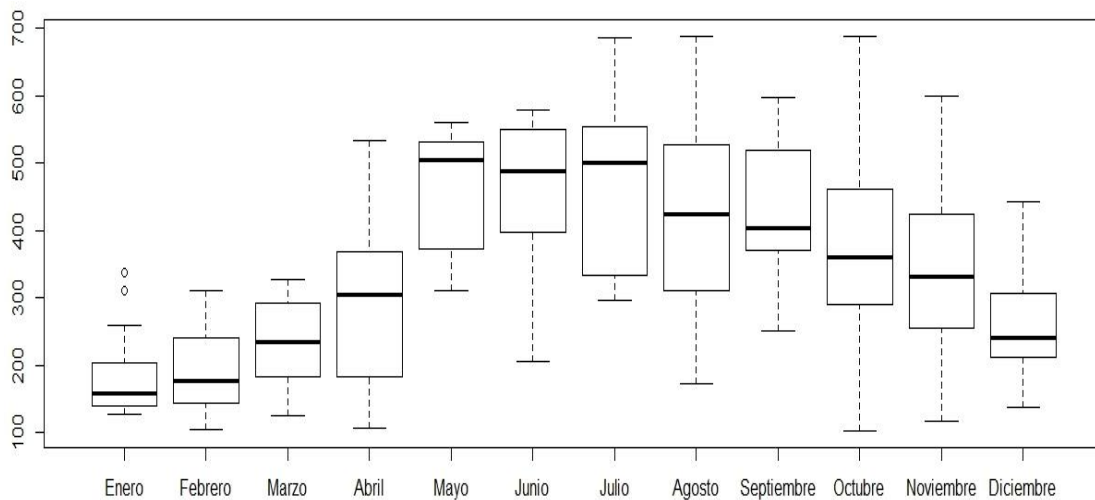
De esta manera se han utilizado las curvas de caudal - sedimentos, registradas por el IDEAM, para obtener las series de caudal diarias sobre los puntos monitoreados a través del cauce activo en el Río Sinú.

- Análisis de Consistencia, homogeneidad y llenado de datos faltantes

Sobre las series de caudal diarias del IDEAM se han tomado medidas de análisis de la información suministrada, para verificar su comportamiento natural y un comportamiento completo y homogéneo en datos a través de las estaciones medidas en el cauce activo.

Las series de datos presentan registros homogéneos en su rango temporal, presentando datos desde diciembre de 1999 hasta la actualidad. Por su parte se registran variabilidades coherentes a las respuestas naturales de datos, como respuesta a los fenómenos regionales climáticos de niño y niña (En la **Figura 1-13** Variabilidad mensual multianual - Estación Carrizola Automática se presentan las condiciones para la estación Carrizola Automática).

Figura 1-13 Variabilidad mensual multianual - Estación Carrizola Automática

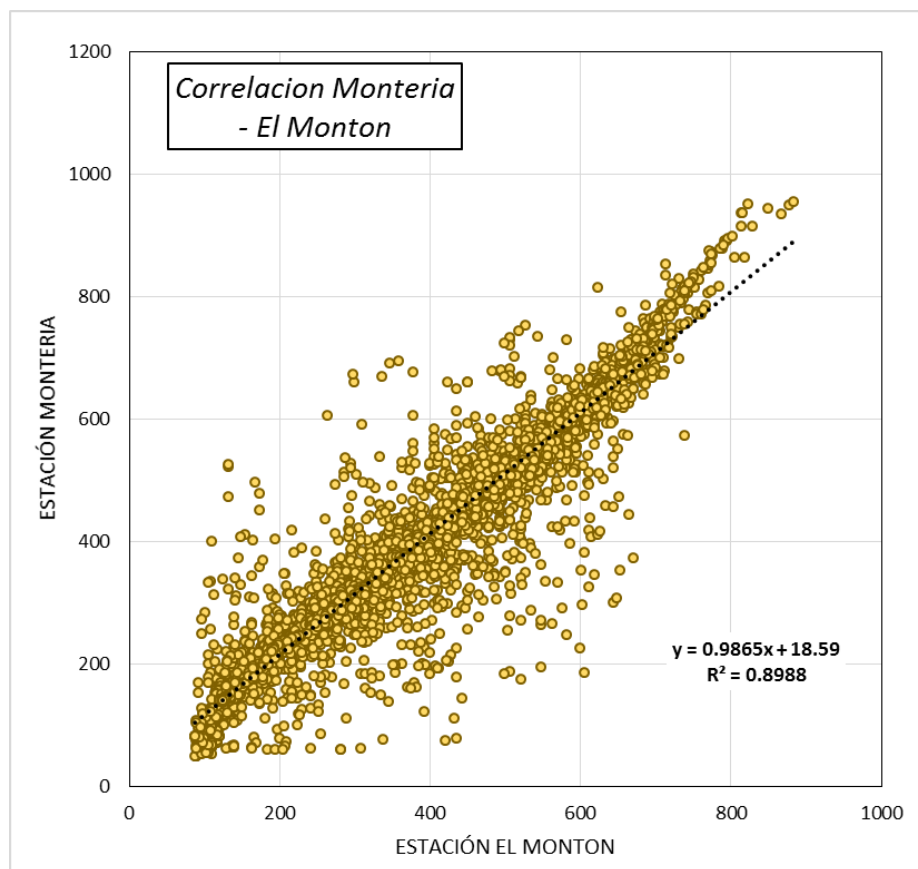


Fuente: Autor

A través de la evaluación de datos anómalos se mantiene la tendencia monomodal natural de la corriente a través de todo el recorrido del cauce activo.

El llenado de datos se ha realizado, correlacionando las estaciones presentes a través del cauce activo del Río Sinú, con lo cual se encontró un buen ajuste y resultado debido a que los puntos se encuentran sobre la misma corriente sin cambios de flujo fuerte entre cada uno de ellos. En la **Figura 1-14** Correlación Estación Montería Automática y El Montón se observa el ejemplo para la estación Montería Automática y El Montón.

Figura 1-14 Correlación Estación Montería Automática y El Montón



Fuente: Autor

- Revisión de datos

En este procedimiento se analizaron las series de caudal y carga de sedimentos obtenidas para las estaciones oficiales IDEAM. En ellas se avaluó la coherencia de la información en los rangos estadísticos básicos suministrados por los datos primarios de cada uno de los puntos de monitoreo (Ver **Figura 1-15** Estadísticos Descriptivos Estaciones IDEAM - Datos

de Caudales estadísticos de caudales y **Figura 1-16** Estadísticos Descriptivos Estaciones IDEAM - Datos de Carga de Sedimentos estadísticos de carga de sedimentos).

Figura 1-15 Estadísticos Descriptivos Estaciones IDEAM - Datos de Caudales

HIDROELECTRICA	CARRIZOLA. AUTOMATICA	NUEVA. COLOMBIA. AUTOMATICA
Min. : 73.78	Min. : 78.22	Min. : 68.04
1st Qu.: 171.68	1st Qu.: 199.50	1st Qu.: 214.85
Median : 321.76	Median : 336.52	Median : 347.80
Mean : 339.14	Mean : 360.86	Mean : 369.68
3rd Qu.: 483.08	3rd Qu.: 515.50	3rd Qu.: 516.75
Max. : 1588.03	Max. : 1121.00	Max. : 1082.00

MONTERIA. AUTOMATICA	EL. MONTON	SABANA. NUEVA
Min. : 41.25	Min. : 59.86	Min. : 46.82
1st Qu.: 231.40	1st Qu.: 213.05	1st Qu.: 222.70
Median : 377.00	Median : 375.60	Median : 372.80
Mean : 388.76	Mean : 376.49	Mean : 370.23
3rd Qu.: 541.20	3rd Qu.: 527.15	3rd Qu.: 511.65
Max. : 956.00	Max. : 882.80	Max. : 804.90

COTOCA. ABAJO	LA. DOCTRINA
Min. : 77.08	Min. : 94.92
1st Qu.: 275.10	1st Qu.: 272.65
Median : 434.40	Median : 443.50
Mean : 419.55	Mean : 429.92
3rd Qu.: 552.95	3rd Qu.: 572.70
Max. : 805.00	Max. : 806.00

Fuente: Autor

Figura 1-16 Estadísticos Descriptivos Estaciones IDEAM - Datos de Carga de Sedimentos

HIDROELECTRICA	CARRIZOLA. AUTOMATICA	NUEVA. COLOMBIA. AUTOMATICA
Min. : 160.0	Min. : 274.7	Min. : 744.1
1st Qu.: 767.6	1st Qu.: 1956.8	1st Qu.: 4127.7
Median : 2463.9	Median : 5857.8	Median : 8460.6
Mean : 3304.4	Mean : 8683.5	Mean : 10105.8
3rd Qu.: 5239.4	3rd Qu.: 14327.2	3rd Qu.: 15262.0
Max. : 47729.9	Max. : 73059.3	Max. : 45900.9

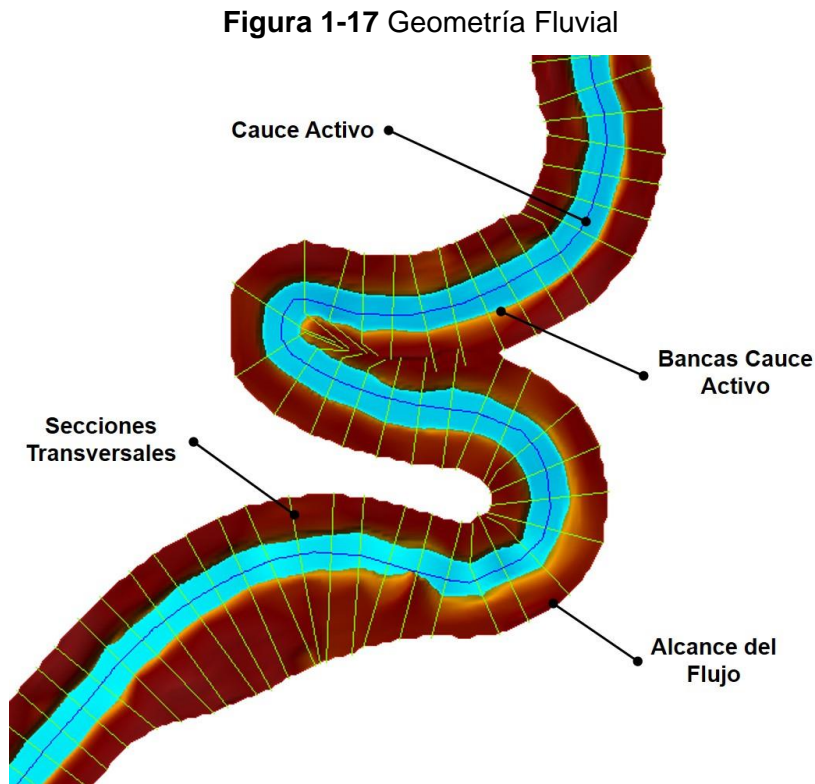
MONTERIA. AUTOMATICA	EL. MONTON	SABANA. NUEVA
Min. : 142.2	Min. : 365	Min. : 21.86
1st Qu.: 3889.2	1st Qu.: 2912	1st Qu.: 3336.51
Median : 9920.8	Median : 7364	Median : 17566.32
Mean : 12824.4	Mean : 8331	Mean : 30742.84
3rd Qu.: 19851.2	3rd Qu.: 12821	3rd Qu.: 48749.64
Max. : 59136.2	Max. : 29804	Max. : 210065.38

COTOCA. ABAJO	LA. DOCTRINA
Min. : 404.2	Min. : 912.6
1st Qu.: 4602.0	1st Qu.: 4143.6
Median : 11021.7	Median : 8324.2
Mean : 11901.8	Mean : 8373.1
3rd Qu.: 17482.2	3rd Qu.: 12010.3
Max. : 35845.2	Max. : 19604.4

Fuente: Autor

- Construcción Geometría Fluvial

Se realizó la construcción y trazado de la geometría fluvial necesaria para el desarrollo de las condiciones de hidrodinámica. Para esta investigación se utiliza un modelo 1D, calculado bajo el software HEC-RAS (Brunner, 2016), en donde se tienen en cuenta, el trazado de sus bancas, el alcance del flujo superficial y las secciones que caracterizan el cauce activo. En la **Figura 1-17** Geometría Fluvial se presentan los componentes básicos de la geometría trazada sobre el cauce activo del Río Sinú.



Fuente: Autor

Las bancas fueron definidas a partir de las imágenes de sensores ópticos presentes en el área, donde se puede evidenciar el trazado del cauce activo con facilidad.

El alcance del flujo se definió de igual forma sobre el cauce activo teniendo medidas a cada lado de las bancas entre 100m a 600m dependiendo del comportamiento geomorfológico y de sinuosidad de la corriente.

Se trazaron 2802 secciones principales a través del cauce activo con una distancia uniforme de 100m entre cada una. En ellas se establecen sus principales propiedades, como rugosidad de maning, bancas, pequeños diques que prioricen el flujo primariamente por el canal y las condiciones de expansión.

- Hidráulica Fluvial

Se describe el comportamiento del flujo hidrológico a través del modelo hidrodinámico planteado y el cambio del lecho a través del resultado de cambios del modelo de sedimentos.

El modelo hidrodinámico expresa las principales variables resultado del flujo mecánico del fluido a través del cauce principal. Se presenta la velocidad, profundidad, fuerza y esfuerzo cortante sobre el cauce activo.

Se desarrolló un modelo de flujo estacionario en el cual se calibraron las principales condiciones sobre el modelo hidrodinámico. Se utilizan los valores de entrada de flujo basados en la curvas de duración de cada una de las estaciones IDEAM y fueron contrastadas con los valores de campo cercanos medidos durante las campañas de monitoreo que se llevan a cabo por la central hidroeléctrica. En la **Tabla 1-1** se presentan los valores de caudal de entrada para los diferentes escenarios modelados.

Tabla 1-1 Valores de caudal de entrada sobre cada una de las estaciones

HEC-RAS	%	HIDROELECTRICA	CARRIZOLA AUTOMATICA	NUEVA COLOMBIA AUTOMATICA	MONTERIA AUTOMATICA	EL MONTO N	SABANA NUEVA	COTOCA ABAJO	LA DOCTRINA
PF 1	PI	654.1	721	781.9	785.5	735.6	696.7	674.7	676
PF 2	2	644.14	684.1	733	758.4	709.4	683.24	744.4	754
PF 3	25	475	504.6	505.9	532.3	519.8	503.6	548	565.2
PF 4	50	306.724	320	323.8	364.95	351.1	362	414.6	419
PF 5	75	193.015	214.5	223.8	242.9	221.9	235.8	288.6	286.5
PF 6	90	109.2 1	128.2	135.3	136	125.3	133.21	172.2	196.6
PF 7	98	92.89	101.7	102.2	74.35	95.34	80.3	102.1	126.8

PF = Identificador de perfil simulado

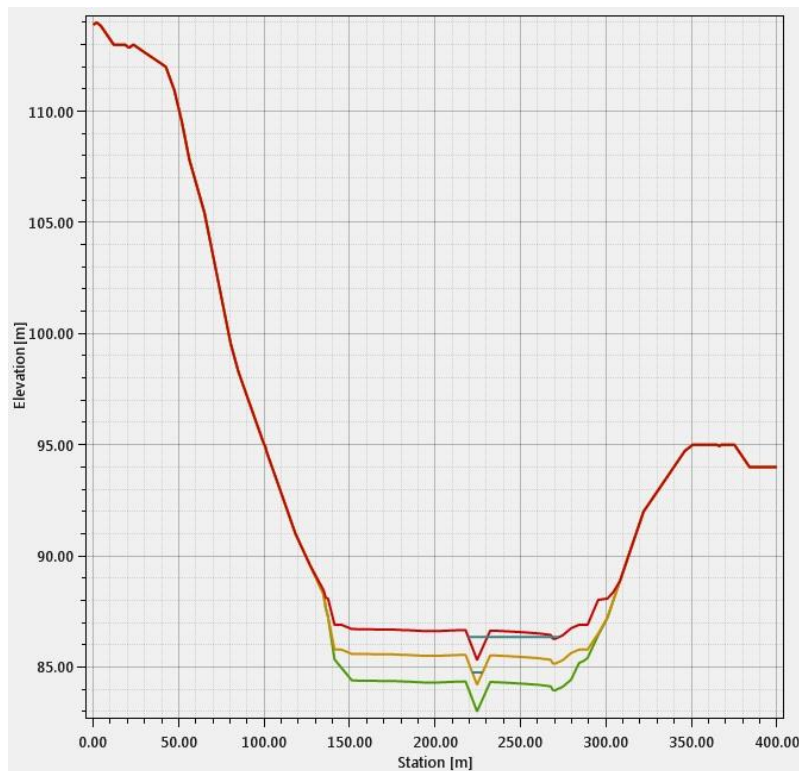
PI = Pico mínimo de pequeñas inundaciones

% = Porcentaje de Excedencia curva de duración

El adecuado ajuste de las condiciones hidrodinámicas permitió valorar el comportamiento sedimentológico del cauce activo, año por año, con el modelo de socavación de lecho HEC-6 (HEC, 1993), integrado en HEC-RAS, ajustado a las condiciones hidrodinámicas calculadas de este último (Gibson *et al* 2006). Fueron integradas las condiciones granulométricas obtenidas a partir del programa de monitoreo en los 18 puntos priorizados por la central hidroeléctrica (**Figura 1-10**).

Con estas simulaciones se obtuvieron los diferentes cambios de remoción o depósito de material a través del recorrido del cauce activo (**Figura 1-18**) y la caracterización de los diferentes movimientos por tipo de grano identificado en el río.

Figura 1-18 Ejemplo de dinámica del lecho



Fuente: autor

- Geología

Se evaluó las condiciones geológicas del hidrosistema fluvial a partir de las planchas 43, 50, 51, 60, 61, 70, 71, y 80 escala 1:100.000, elaboradas por el Ingeominas, actual Servicio Geológico Colombiano (SGC). Esta información fue llevada digitalmente a la base de datos espacial donde se conformó sus propiedades y atributos. Se precisaron las unidades mediante la interpretación de las imágenes de satélite disponibles.

- Morfometría

Se realizó la interpretación del grado de pendientes para la estructura geomorfológica identificada, al igual que el perfil longitudinal del cauce activo y se comportamiento en pendiente a través de todo su recorrido, acompañado por las marcas de abscisas de aguas arriba hasta su desembocadura.

- Dinámica de Orillas (Cauce Activo)

Se caracterizó la dinámica del cauce activo a través del tiempo, iniciando en 1973 y culminando en el año 2016, con periodos intermedios entre 1990, 1997, 2002, 2007, 2011, 2013 y 2015. Se comparó la dinámica fluvial en los puntos más importantes y de mayor dinámica antes de la entrada en operación (año 2000) de la central hidroeléctrica y después de ello.

De manera complementaria se contó con la información elaborada por Vargas (2005), en el estudio Geomorfológico y dinámica fluvial en Tierralta. Generando un análisis más enriquecido de la dinámica de orillas. En la diferenciación del cauce activo se identifican barras e islas fluviales que caracterizan el comportamiento intrínseco del cauce activo.

Complementario a la identificación del cauce activo se caracterizaron las propiedades de sinuosidad de la corriente a través del eje central para cada una de los cauces identificados multitemporalmente.

- Cartografía Fluvial

Las unidades identificadas y el trazado de identificación multitemporal del cauce activo se presentan en la cartografía geomorfológica técnica para el sistema fluvial del Río Sinú En

el cual se presenta el trazado a partir de un absisado con intervalos de 1km (1km+0.000), iniciando desde la descarga de la central hidroeléctrica hasta la desembocadura en el mar.

- Geomorfología Fluvial

Se definieron las unidades finales que se presentan en el Hidrosistema Fluvial, limitadas por el lecho mayor y las planicies de inundación. Se caracterizan por las unidades geológicas y la propia dinámica antes explicada.

- Exploración de patrones y categorización

Se sintetizó los resultados expresados en los acápites anteriores bajo un modelo de base de datos espacial, que permite tanto la representación cartográfica como los análisis computacionales propuestos, bajo algoritmos de inteligencia artificial y minería de datos. Con esto, se parte de la información recopilada y su integración para el uso de los algoritmos de búsqueda (K-Means, EM) y clasificación (J48) del comportamiento del Hidrosistema. En la **Figura 1-19** se contempla el esquema general de síntesis y de uso de la inteligencia artificial para el procesamiento final de la información obtenida a través de los pasos anteriores.

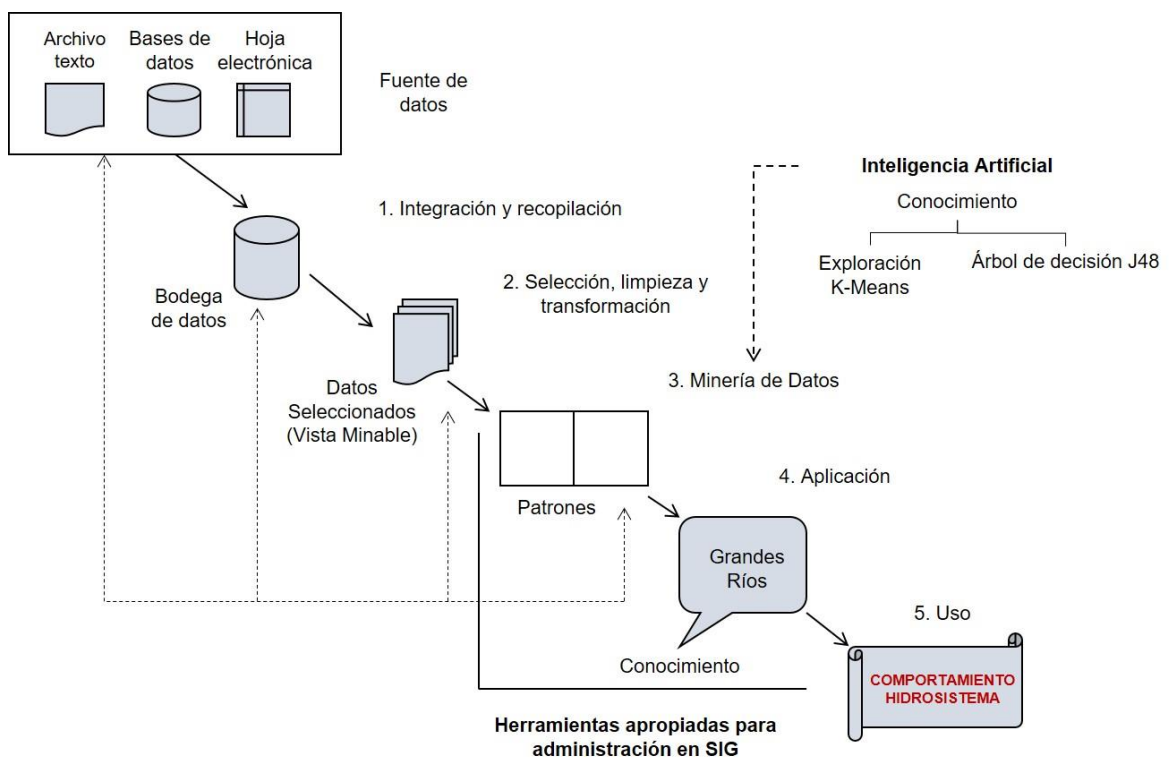
Se desarrolló una bodega de datos espaciales y alfanuméricos, que contienen la información necesaria del sistema fluvial del río Sinú. Permitiendo la exploración no supervisada y supervisada de patrones, para la construcción de las categorías.

Esta bodega de datos se encuentra referenciada en el sistema Magna Sirgas Colombia Bogotá, como coordenadas planas, permitiendo ser homologable con cualquier base de datos espacial y cartografía existente en el país.

La información recopilada fue ajustada sobre el alcance geomorfológico espacial máximo de todo el sistema fluvial, permitiendo homologar y normalizar espacialmente la información utilizada. Se obtuvo una caracterización del comportamiento fluvial a partir del conocimiento obtenido en los análisis anteriores, con lo cual se identifican los principales tipos y formas del sistema fluvial.

Sobre la información almacenada y constituida de manera organizada en una base de datos (Bodega de datos), se realizaron las pruebas de patrones muestra sobre áreas seleccionadas de alta dinámica, media dinámica y baja dinámica, para entrenar y consolidar el aprendizaje y construir el árbol de decisión planteado.

Figura 1-19 Análisis de la Información. Síntesis



Fuente: Esquema general adaptado de Rodríguez, 2010

Se compararon los tipos y formas del comportamiento fluvial caracterizados a partir de la información base del estudio, con los resultados arrojados por la exploración de datos y la clasificación del árbol de decisión en la valoración del sistema fluvial de manera completa.

La integración de la base de datos o bodega de datos con el algoritmo J48 se desarrolló a partir de código computacional en lenguaje Python 2.7, que se encuentra integrado con las herramientas de administración de información espacial de ArcGIS 10.4. Con esto se

obtuvo una caja de herramientas complementaria para el análisis de sistema Fluvial. Sin embargo la exploración de patrones y la clasificación supervisada se realizó mediante el software WEKA versión 3.8.1.

1.7.3 Información base – recursos tecnológicos

Se utilizaron diferentes fuentes de información y recursos tecnológicos para el desarrollo de esta investigación.

- Información, cartografía y estudios técnicos de referencia

Se contó con la información del Plan de Monitoreo Relacionado con el Componente Hidrológico e Hidráulico Contemplado en la Licencia Ambiental para la Central Hidroeléctrica Urrá I y sus anexos de recolección de información numérica de caudales sólidos y líquidos, registrados desde diciembre de 1999 hasta la actualidad.

Información de caudales de resolución diaria para las estaciones IDEAM presentes en el área del hidrosistema del Río Sinú.

Curvas de calibración de caudal carga de sedimentos oficiales suministradas por el IDEAM para los mismos puntos de las series de caudal.

Estudios y diseños de las obras de ingeniería para la protección contra la erosión lateral causada por el Río Sinú en Tierralta, Córdoba. Elaborado por German Vargas Cuervo (2005). Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS).

Cartografía Geológica escala 1:100.000 del año 1999. Elaborada por INGEOMINAS actual Servicio Geológico Colombiano (SGC). Las planchas utilizadas fueron referenciadas y unificadas en un solo territorio continuo, y vectorizando sus unidades de información intrínseca.

Cartografía Básica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), escala 1:25000 y 1:100000 para todo el hidrosistema estudiado.

- Sensores remotos

La caracterización temática de geomorfología fluvial se desarrolló con imágenes ópticas de diferentes sensores, por el rango temporal (43 años) del análisis. Implicando sensores de diferentes características espaciales, radiométricas y espectrales.

- Landsat MSS, con siete bandas, resolución espacial de 60m pixel, representa el año de 1973 el más antiguo evaluado para este ejercicio.
- Landsat TM, siete bandas de resolución espectral, 30m pixel de resolución espacial, fue tomada para una temporada seca (Enero) de 1990.
- Landsat OLI-TIRS, once bandas como solución espectral, con resolución de 30m pixel, representan los años 2015 y 2016 (En proceso de actualización).
- SPOT 4, cinco bandas espectrales, con resolución espacial de 20m pixel, representa el año de 1990, complementando la información del sensor Landsat TM.
- SPOT 5, Cinco bandas espectrales, con mejor resolución espacial (10m pixel), con lo que se complementó los restantes años de análisis: 1997, 2002, 2007, 2011, 2013 y 2014.
- Sentinel-2, Cuenta con 13 bandas espectrales, que pasan por los 10m de resolución espacial a 60m por pixel en las de menor resolución. Esta imagen fue utilizada para el levantamiento del hidrosistema en el año 2016.
- ALOS PALSAR, este es un radar de apertura sintética de banda L (SAR), basado en interferometría de paso repetido. ALOS fue una una misión de contribución en los campos de la cartografía, cobertura de la tierra y monitoreo de desastres por parte de la agencia de exploración aeroespacial de Japón (JAXA). Los resultados utilizados fueron de terreno corregidos radiométricamente, con valores en punto flotante y una resolución espacial de 12.5m por pixel horizontal.

- Recursos tecnológicos

Para la administración de la información espacial se utilizó ArcGIS 10.4, al igual que la constitución y ensamblaje de la Geodatabase. Con esta misma herramienta se hicieron las producciones cartográficas y figuras cartográficas.

El desarrollo del modelo hidrodinámico y su valoración de socavación de lecho, fueron ejecutadas en HEC-RAS 5.0.3. Con sus módulos complementarios de RASMapper y salidas de curvas de datos.

Se utilizó el software de ambientes estadístico y gráfico R, para la descripción y valoración de las series de tiempo utilizadas en el proyecto. De igual forma la administración numérica de datos se desarrolló bajo Microsoft Excel 2013.

La integración de las variables en el algoritmo de Red Neuronal, fue ejecutada en código de programación Python 2.7, con el cual se permite la administración de la información espacial almacenada a través del módulo de conexión ArcPy con ArcGIS.

Para la exploración de patrones y la clasificación supervisada se utilizó el ambiente de exploración de conocimiento WEKA 3.8.1 de la universidad de Waikato. Nueva Zelanda.

1.7.4 Trabajo de campo

Durante los meses de septiembre a octubre de 2015 se acompañó el monitoreo de caudales sólidos, sobre el cauce activo del Río Sinú. Como actividad propuesta en el programa de monitoreo relacionado con los componentes hidrológico e hidráulico contemplados en la licencia ambiental para la Central Hidroeléctrica (Resolución 838 y 965 de 1999, Ministerio del Medio Ambiente).

Se realizó un recorrido completo a través del cauce activo del río, desde San Bernardo del Viento hasta la infraestructura de la Central Hidroeléctrica aguas arriba. En este recorrido

se realizaron 18 paradas sobre el cauce activo del Río Sinú y cinco adicionales sobre los principales caños con conexión hidráulica entre el río y las ciénagas presentes.

En estas paradas se recolecto información de carga total en suspensión y se realizó muestreos del lecho del río. La metodología de recolección de sedimentos consiste en el aforo integrado desde la superficie hasta el fondo en varios perfiles de la sección seleccionada, en esta misma sección se mide el caudal instantáneo del cauce (**Fotografía 1-2**), como complemento se realizan curvas granulométricas de la información recolectada para cada una de las secciones (Ver informe técnico, Consultoría B & G – URRRA, 2016). Además se procedió a tomar muestras de sedimento adicional de las bancas del cauce activo en cada una de las paradas.

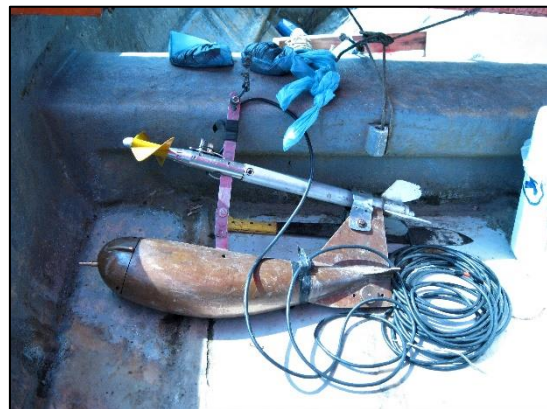
Se completó una ficha de geomorfología fluvial para cada sección de monitoreo, teniendo en cuenta las principales condiciones de cambio sobre el cauce activo, geomorfometria aledaña y zonas de interés como bancas caídas o desbordamientos evidentes (**Fotografía 1-1**).

El seguimiento al recorrido de campo se puede evidenciar en la cartografía complementaria del capítulo 2, descripción del área de estudio. En ella se resalta el recorrido y se hace una apreciación fotográfica de cada uno de los puntos identificaos y muestreados.

Fotografía 1-1 Cauce Activo Río Sinú



Fotografía 1-2 Muestreo Sólidos en Suspensión - USD49, USDH48



Fuente: Autor