

# 1. Hidrología

Se describen las condiciones hidrológicas que presenta el río Sinú a partir de información primaria aportada por estaciones oficiales (IDEAM) y relacionadas con la información obtenida por el programa de monitoreo planteado por la central hidroeléctrica. Como complemento y a modo de sintetizar esta información, se adjunta una referencia cartográfica plegable que contiene la ubicación y caracterización general de las estaciones oficiales, al igual que los puntos de monitoreo de la red de control de la central hidroeléctrica. De manera simultánea se presentan las curvas de gasto construidas a partir del sistema de monitoreo de la central hidroeléctrica y los registros mensuales de las campañas de monitoreo desde diciembre de 1999, pudiendo comparar su comportamiento y estado de monitoreo a través del flujo del río.

Las mediciones de flujo sobre el cauce activo se diferencian entre cada programa de monitoreo por la resolución temporal en la toma de datos, de esta manera los registros IDEAM presentan series diarias, mientras el monitoreo de la central hidroeléctrica presenta datos puntuales de un solo día por mes. Los contenidos de las dos fuentes enriquecen el estudio sobre el río Sinú.

## 1.1 Series diarias de caudal

Las condiciones hidrológicas del río Sinú, no solo se encuentran monitoreadas a partir del sistema de control hidrológico e hidráulico de la central hidroeléctrica (ver capítulo 2, área de estudio, condiciones de monitoreo sobre el cauce activo), sino a través de puntos de medición oficiales del instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se encentraron 17 puntos sobre el área de influencia, de los cuales se descartaron cinco por su estado de suspendido desde 1991 y cinco más por el estado

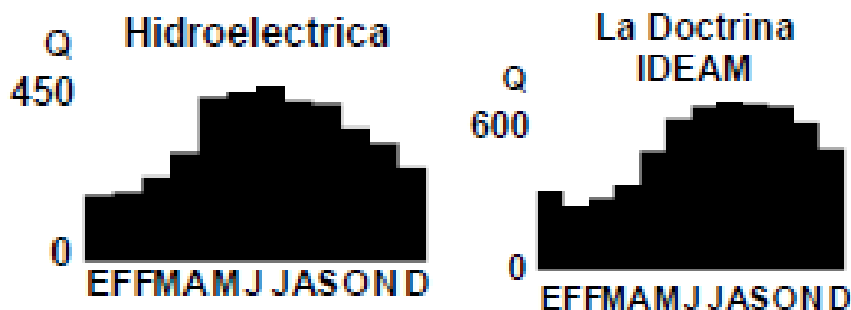
pobre y deficiente en la serie de datos. Siete son las estaciones apropiadas para describir los comportamientos hidrológicos del cauce activo a partir de la operación de la central hidroeléctrica. En la **Figura 1-2** Localización Estaciones IDEAM se presentan las estaciones oficiales seleccionadas sobre el cauce activo del río Sinú.

La primera serie obtenida sobre el cauce activo es la descarga por parte de la central hidroeléctrica, como medida directa el flujo aportado hacia el cauce activo. El régimen hidrológico se manifiesta con carácter monomodal al igual que las condiciones de precipitación expuestas anteriormente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), los datos de series diarias registran este comportamiento al igual que los medios mensuales multianuales obtenidos a partir de las mismas (ver referencia cartográfica del capítulo 3).

### 1.1.1 Régimen hidrológico

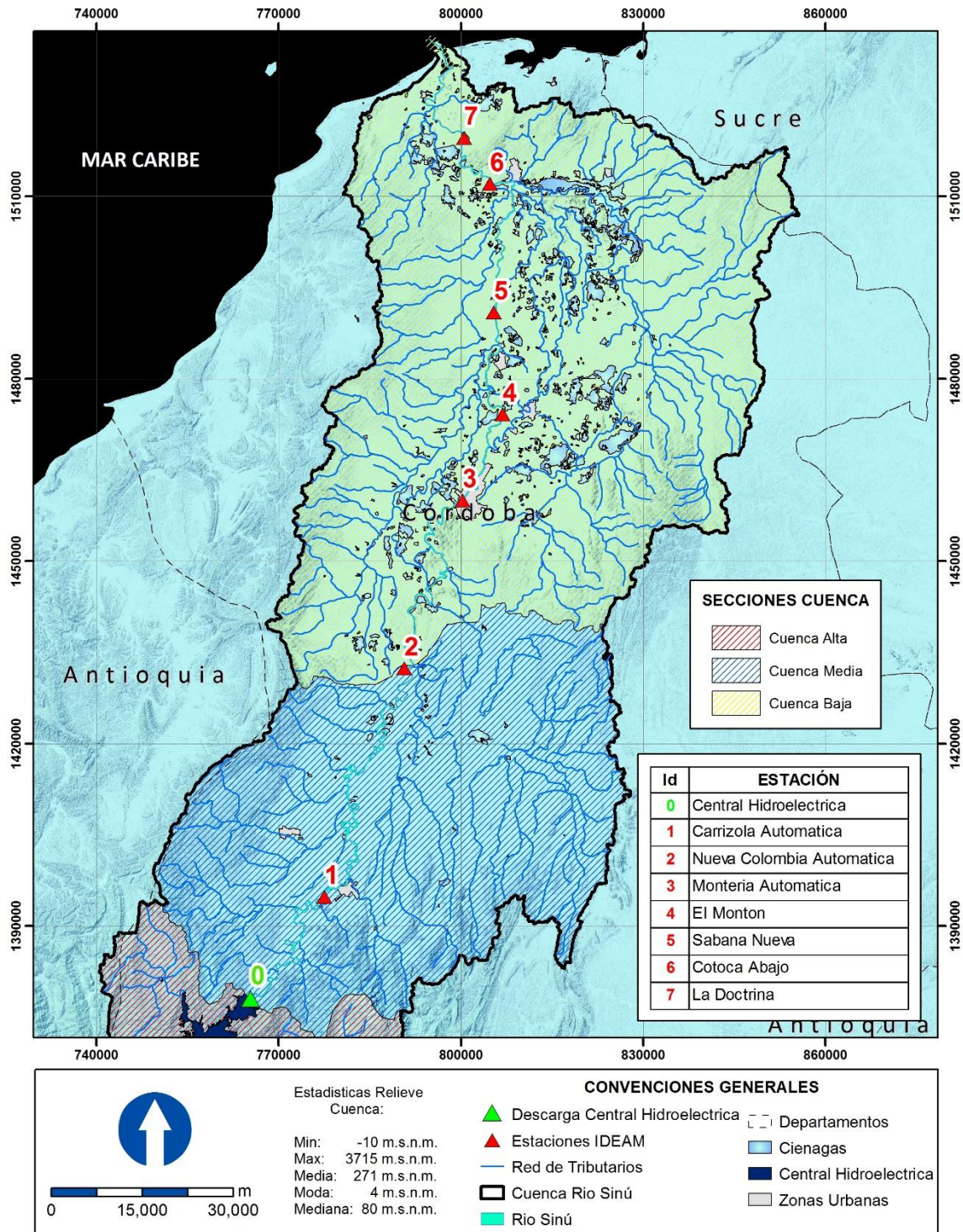
La transición del régimen mensual del caudal a través del cauce activo, no cambia su estructura monomodal, pero si aumenta los valores de flujo, pasando de 450 m<sup>3</sup>/s en su estado más alto en la central hidroeléctrica a un poco más de 600 me<sup>3</sup>/s en su delta (**Figura 1-1**, ver cartografía plegable anexa)

**Figura 1-1** Régimen mensual de caudales



Fuente: Autor

Figura 1-2 Localización Estaciones IDEAM



Fuente: Autor

Por su parte las series de flujo diario, permiten obtener el ciclo hidrológico o año hidrológico (The Nature Conservancy, 2009) de la corriente del cauce activo. Con periodo de sequía que se manifiesta más fuerte entre los meses de febrero a marzo y las condiciones de mayores flujos de junio a septiembre, tendencia compartida por el régimen mensual, pero bien evidenciada hacia la condición final del cauce en los registros de la estación Cotoca Abajo y La Doctrina (**Figura 1-1**, ver tendencia en cartografía plegable anexa).

### **1.1.2 Comportamiento de los datos y firmas espectrales de las series hidrológicas**

Las estaciones presentan registros homogéneos desde diciembre de 1999 hasta la actualidad, con diferentes condiciones de calidad para cada una de las estaciones seleccionadas, en la **Figura 1-3** se establecen las condiciones de homogeneidad y calidad de las estaciones utilizadas, en el recuadro rojo se estima el rango homogéneo de datos para la caracterización hidrológica. Se tomaron las variables de caudal medio diario, nivel medio diario, transporte diario de materiales en suspensión y concentración diaria de materiales en suspensión, estos últimos disponibles solo para dos estaciones de las seleccionadas: Montería automática y Cotoca abajo.

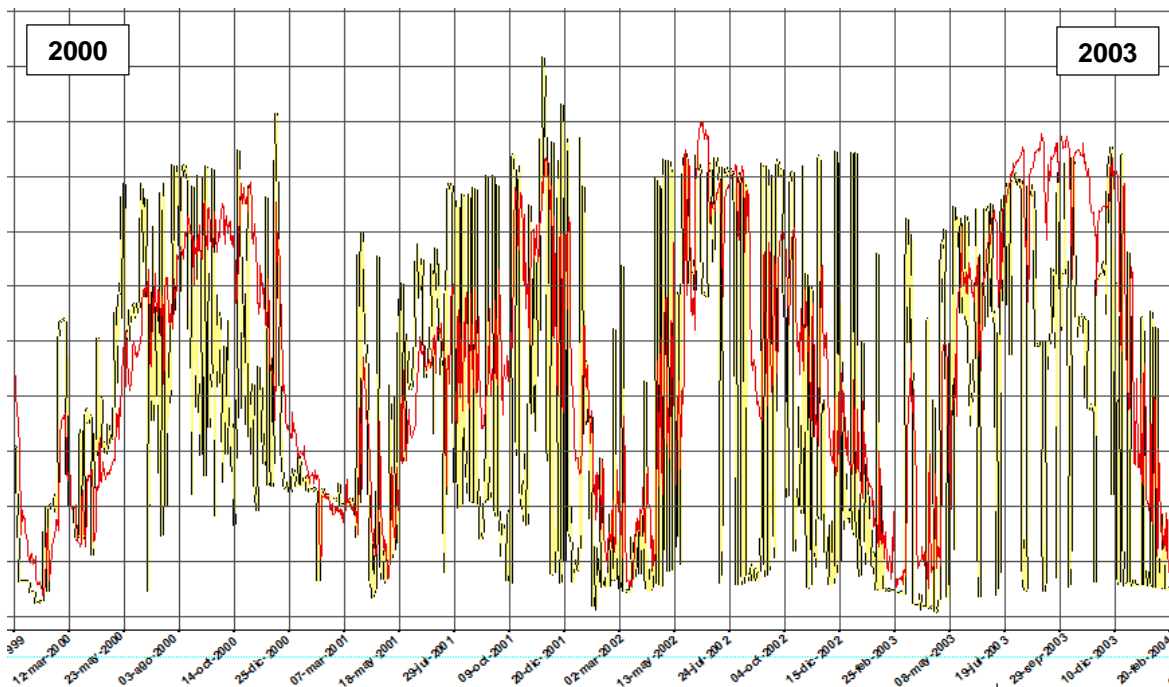
Las estaciones con mejor calidad de datos con respecto a su consistencia son: Montería automática y Cotoca abajo, que contienen series con años incompletos menores a dos meses, seguidos por las estaciones de Nueva Colombia automática, Sabana nueva y La Doctrina. Las estaciones que presentan una menor calidad son Carrizola automática y El Montón, sin embargo se pueden obtener datos y registros de las tendencias en sus series completadas. Las estaciones seleccionadas presentan registros anteriores a la operación de la central hidroeléctrica en el Río Sinú, desde el año 1963 para las estaciones Montería y Sabana nueva.

Los registros con mayor relación a los caudales y con la misma consistencia en su contenido son los niveles sobre cada sección, en los cuales se presentan calidades similares en los registros.



El transporte diario de material en suspensión y las medidas de concentración media diaria de sedimentos representan el ajuste sobre curvas calibradas de caudal sedimentos, con varias medidas de campo y las propiedades hidráulicas (estos ajustes se observan en el capítulo 4) .Aunque la menor calidad de aparición de datos sobre estas dos últimas variables la representa la concentración de sedimentos. A partir de los datos seleccionados y la reconstrucción de las series diarias se obtiene la firma espectral del comportamiento diario de caudales para cada una de las estaciones utilizadas, permitiendo diferenciar los periodos más relevantes y sobresalientes en el rango de tiempo utilizado. Se presenta como complemento a este capítulo las firmas espectrales de las estaciones utilizadas en modo plegable para mayor detalle. La firma espectral de la hidroeléctrica presenta descargas en condiciones más aleatorias desde el inicio de su operación hasta finales del 2006, donde regula su proceso de descarga sobre el cauce activo, sin embargo el proceso natural del hidrosistema regula este comportamiento con firmas más homogéneas y acordes al régimen monomodal del área de estudio, como se puede observar en la **Figura 1-4** para la firma final de la estación La Doctrina.

**Figura 1-4** Firma espectral periodo 2000 - 2003 de las series de caudal  
Hidroeléctrica – La Doctrina

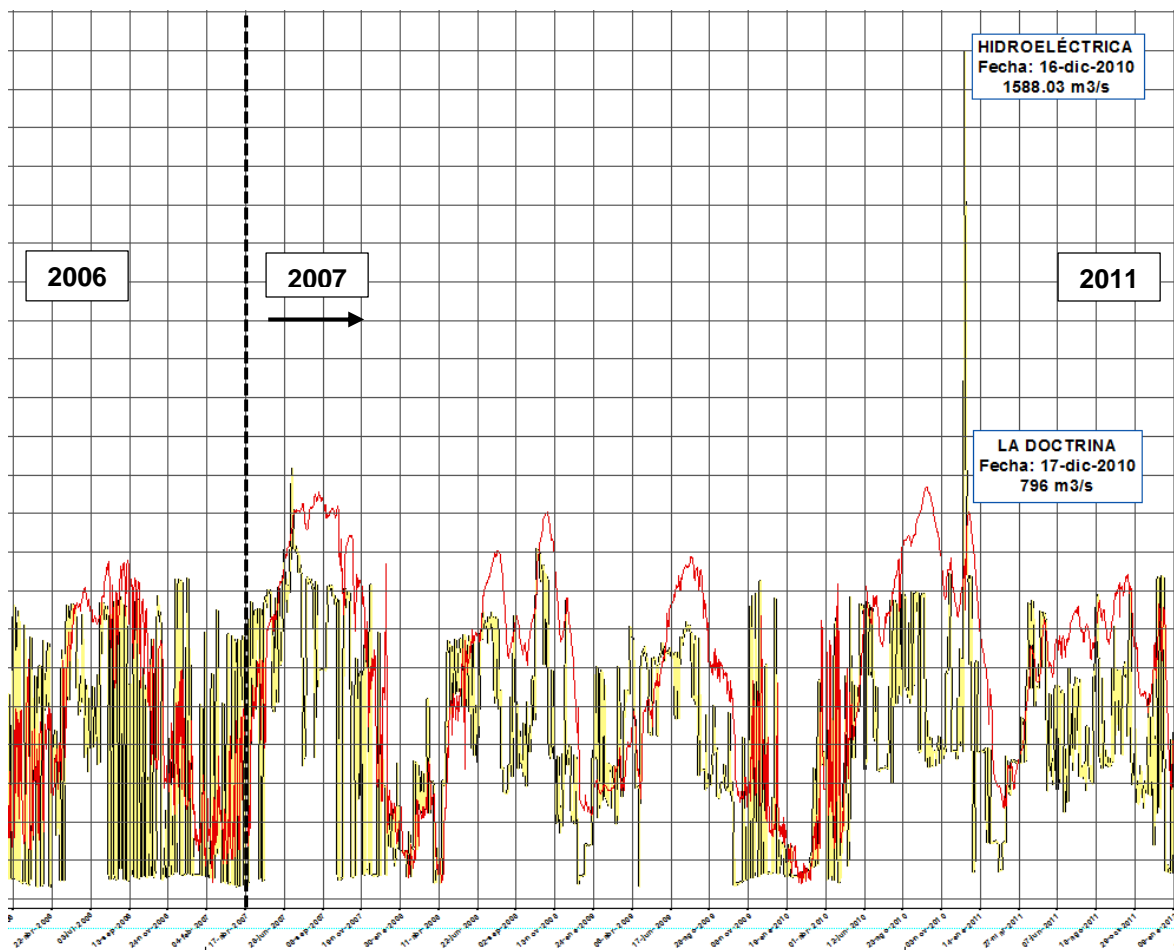


Fuente: Autor

Color Amarillo, firma: Central Hidroeléctrica, color rojo: La Doctrina

Para el comportamiento de descarga pasado el año 2006, se regulan las condiciones a un régimen más natural y acorde al monomodal, con resultados de incrementos evidentes sobre el final del recorrido en el flujo sobre el delta (estación La Doctrina). Con evidencias de un 'lag' de retardo debido al tránsito del caudal (**Figura 1-5**), con aproximadamente un día en el tiempo de transito de aguas arriba a la medición sobre el delta.

**Figura 1-5** Firma espectral periodo 2006 - 2011 de las series de caudal  
Hidroeléctrica - La Doctrina



Fuente: Autor

Color Amarillo, firma: Central Hidroeléctrica, color rojo: La Doctrina

Para finales del año 2010 se evidencia un pico extremo evidente sobre las condiciones hidrológicas naturales en el hidrosistema del río Sinú, debido a una alta descarga por parte

de la central hidroeléctrica, como resultado de la fuerte condición de precipitación en este periodo, generando nivel críticos sobre el embalse. Este evento fue regulado por el hidrosistema natural.

### 1.1.3 Curvas de duración

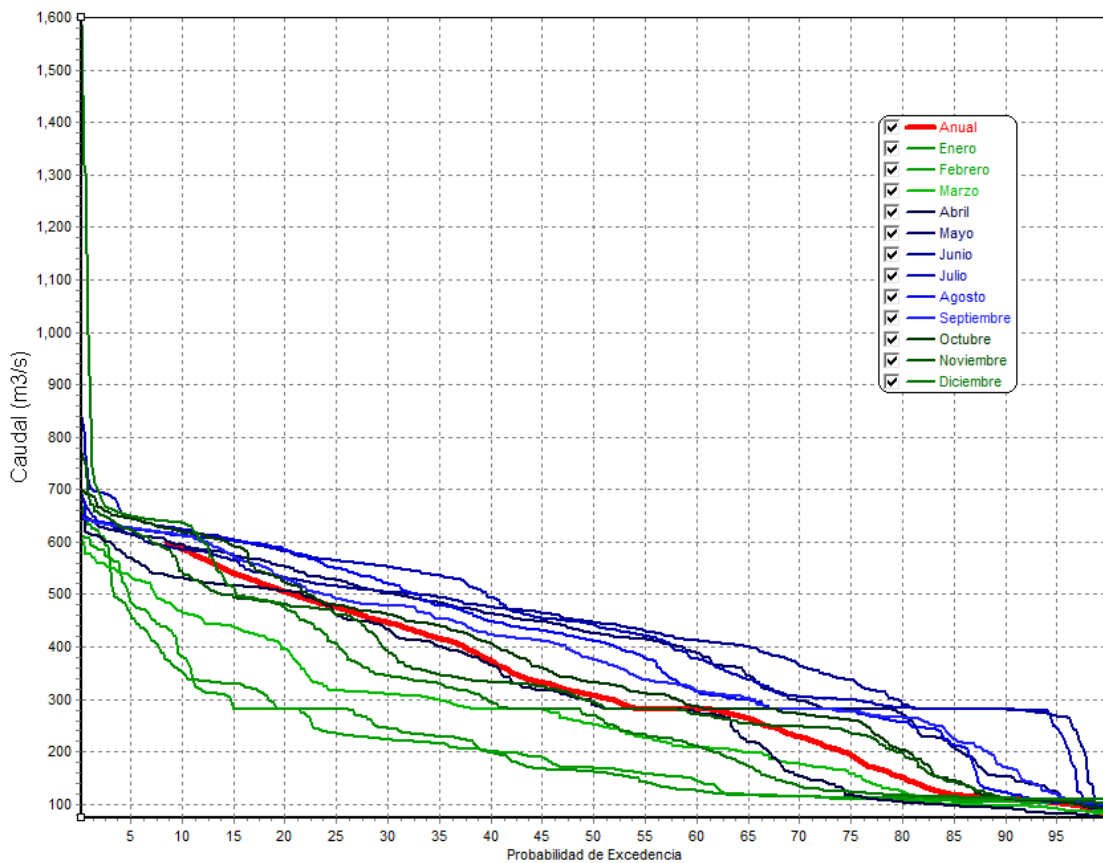
Las curvas de duración presentadas en este ítem, responden de manera ordenada a las estaciones que se relacionan sobre la cartografía plegable, anexa a este capítulo, construidas a partir de las series de datos diarias antes presentadas.

El caudal medio anual (50%), tiene un aumento progresivo de flujo a medida que se recorre el cauce activo, con valores de caudal que oscilan en los 320 m<sup>3</sup>/s de descarga en la central hidroeléctrica (**Figura 1-6**) y 400 m<sup>3</sup>/s en la formación del delta de la corriente (**Figura 1-13**). Con esto se puede inferir el aporte del hidrosistema a través de todo su recorrido, por las conexiones del sistema cenagoso y la escorrentía a través de las cuencas media y baja.

El comportamiento de la descarga en la central hidroeléctrica, se ve afectada por el pico en la curva de duración del mes de diciembre, donde se registró un dato extremo para el 16 de diciembre de 2010 (**Figura 1-5**), este único valor extremo en la serie presenta una probabilidad de excedencia menor al 1% (**Figura 1-6**). Para las curvas de duración mensual se observa el régimen monomodal general, donde los meses de octubre a marzo se encuentran por debajo de la condición anual, como el periodo seco, en los cuales enero y febrero son las condiciones de menor descarga. De abril a septiembre se registra el periodo húmedo, con los valores promedio más altos en los meses de abril y mayo.

La descarga en la central hidroeléctrica tiene un patrón marcado de umbral o límite, que se representa como un corte lineal en la curva de duración, como medida del manejo o caudal estándar para cada mes en su operación, de esta manera esta mediana anual tiene una probabilidad de excedencia del 55 al 60 %.



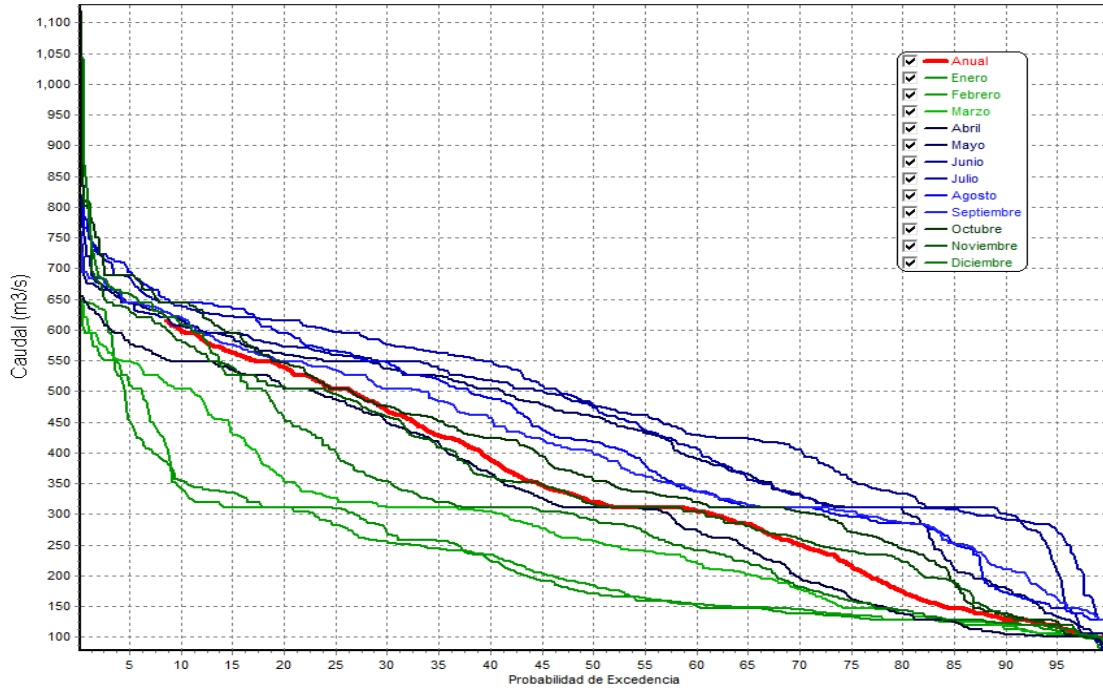
**Figura 1-6** Curva de duración Hidroeléctrica

Fuente: Autor

A medida que se avanza aguas abajo por el cauce activo, se va reduciendo el efecto de la descarga anómala durante diciembre de 2010, sin embargo las estaciones Carrizola Automática (K39+500) y Nueva Colombia (K111+500), registran el evento en sus curvas de duración para el mes de diciembre (**Figura 1-7** y **Figura 1-8**), con un alcance superior a los 110 kilómetros desde el momento de su descarga, este tránsito del caudal presenta una fuerte influencia instantánea sobre la cuenca media del área de estudio, registrando valores a los 1100 m<sup>3</sup>/s, en este instante anómalo de descarga.

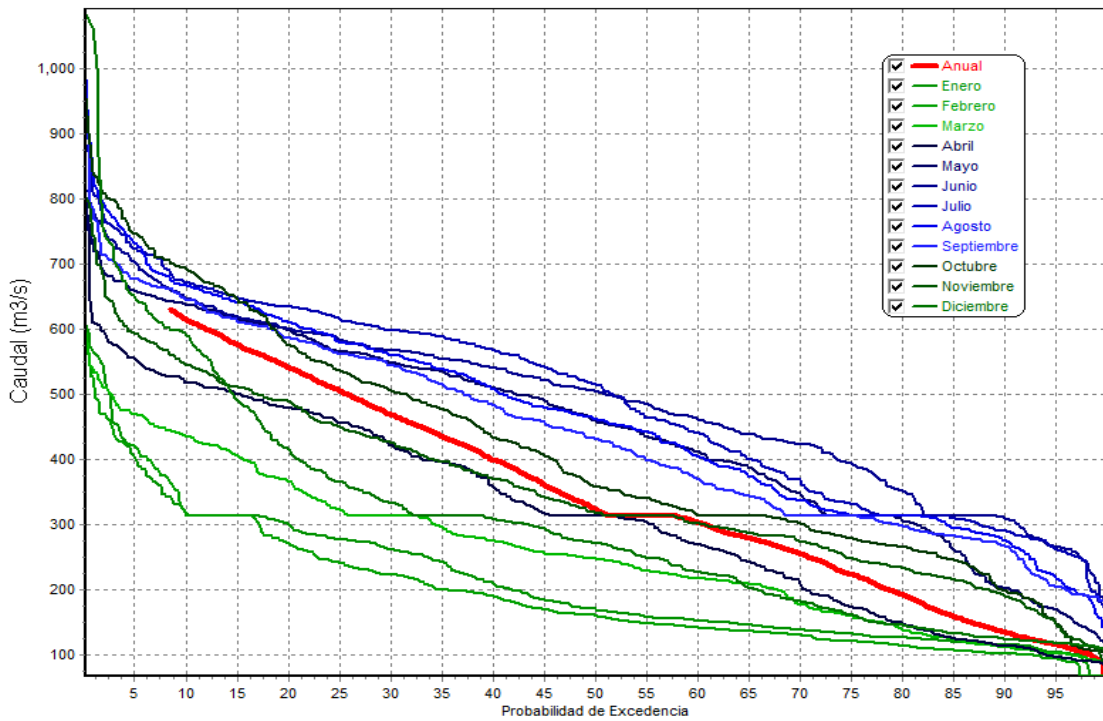
Sin embargo la tendencia y comportamiento medio de los caudales anuales se encuentran correlacionados en esta primera sección del río, manteniendo su caudal medio de 50% de excedencia en 320 m<sup>3</sup>/s, manteniendo este mismo valor de caudal como una moda durante el rango de excedencia de 50% al 60%.

**Figura 1-7** Curva de duración Carrizola Automática



Fuente: Autor

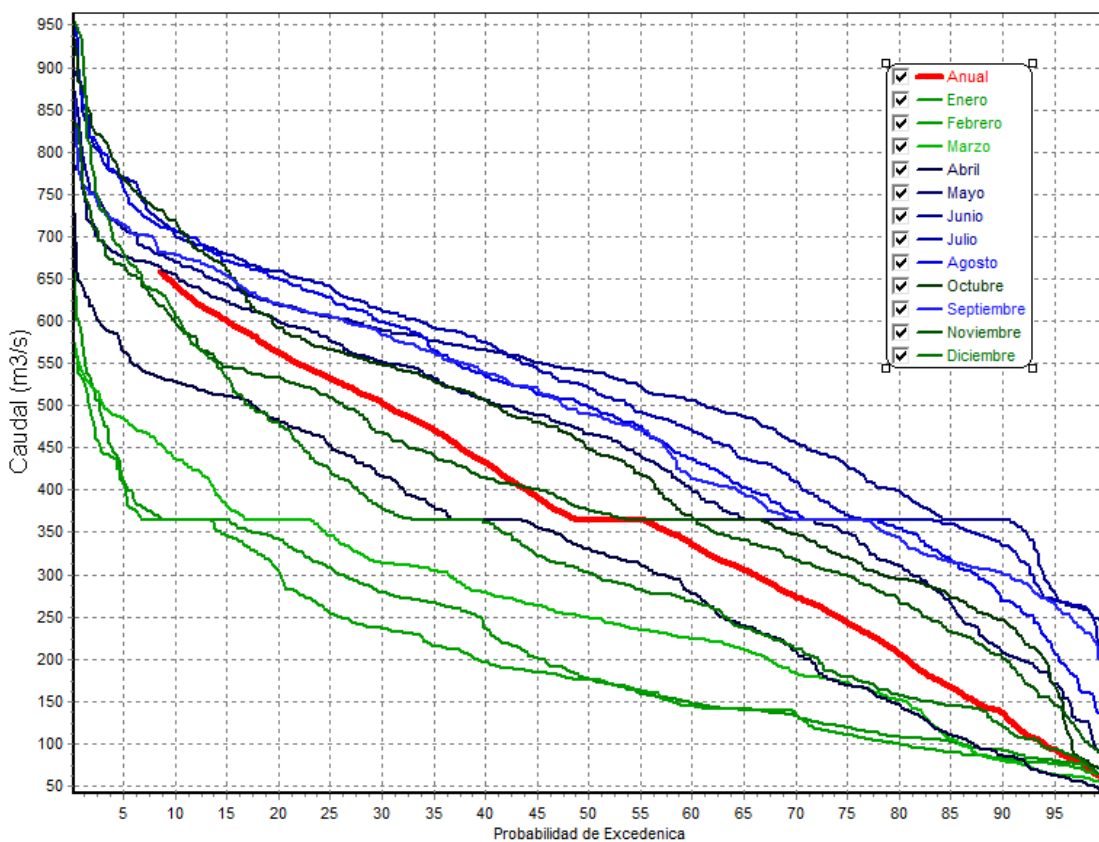
**Figura 1-8** Curva de duración Nueva Colombia Automática



Fuente: Autor

Las condiciones en la curva de duración de montería, ya se establecen sobre el límite entre la cuenca media a baja, con una respuesta en la curva de duración del mes de diciembre más regulada a las tres anteriores, esto se puede asimilar a la condición cenagosa que inicia sobre las medidas de la estación nueva Colombia (ver cartografía plegable anexa al capítulo).

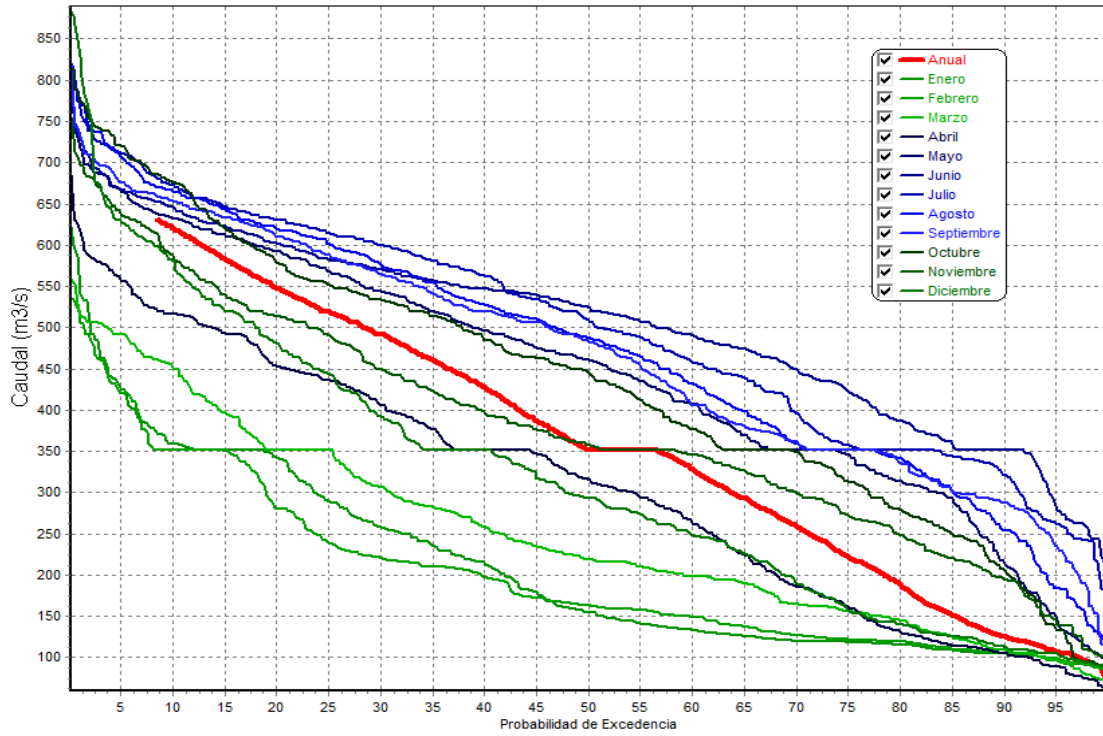
**Figura 1-9** Curva de duración Montería Automática



Fuente: Autor

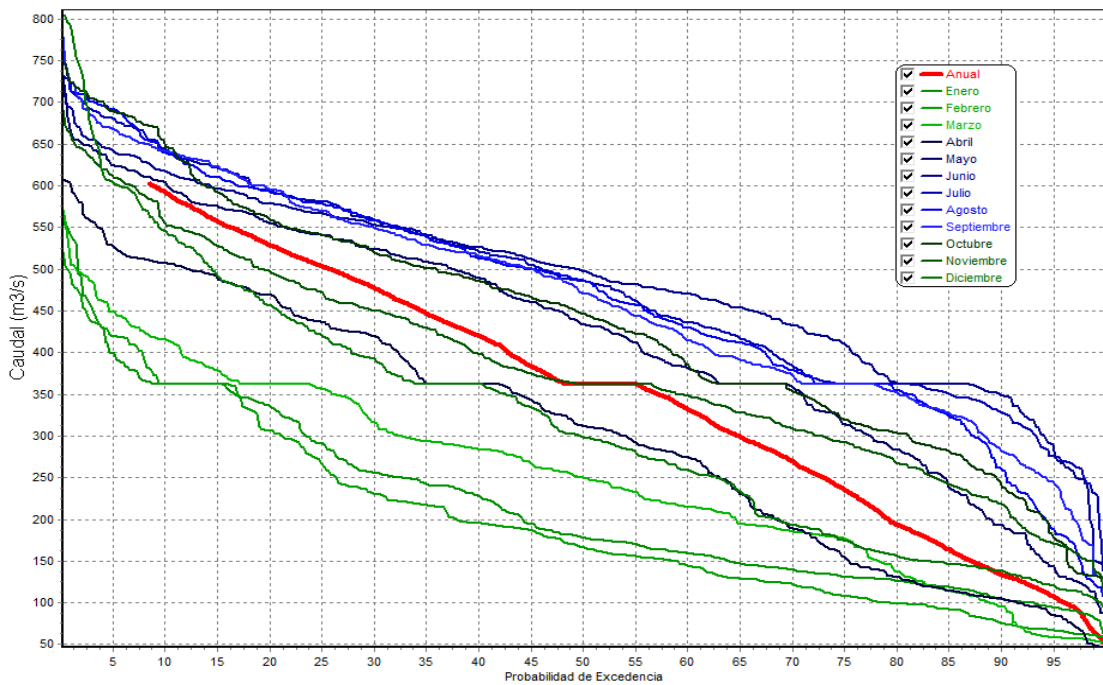
El valor de caudal medio aumenta a partir de la estación Montería Automática (**Figura 1-9**) a 350 m<sup>3</sup>/s, siguiendo con el patrón de frecuencia de la mediana que oscila en el mismo valor mencionado. Sobre la cuenca baja en las estaciones El Montón (**Figura 1-10**) y Sabana Nueva (**Figura 1-11**) se observa un periodo húmedo con mayor duración, incluyendo a noviembre por encima de la curva anual, asociado a los periodos de mayor rendimiento sobre el río. Sobre este tramo del río también se observa la mayor estabilidad

**Figura 1-10** Curva de duración El Montón



Fuente: Autor

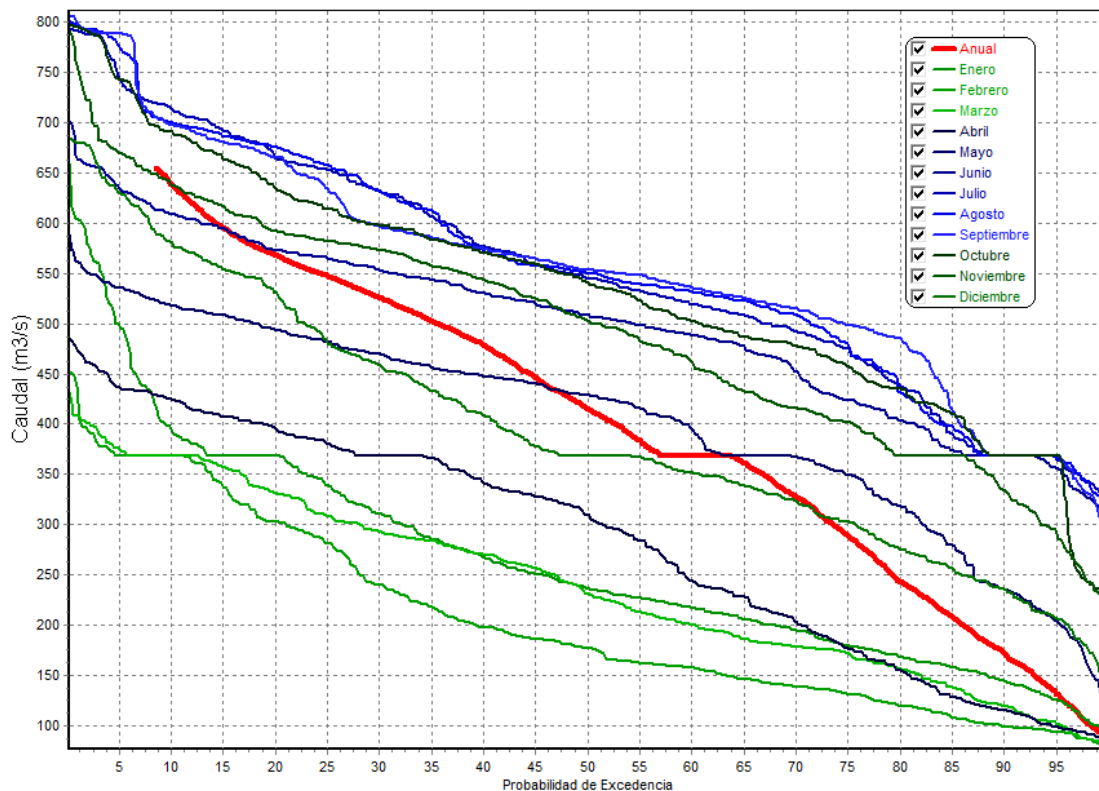
**Figura 1-11** Curva de duración Sabana Nueva



Fuente: Autor

del cauce activo con variaciones sobre la profundidad en los diferentes periodos del régimen natural.

**Figura 1-12** Curva de duración Cotoca Abajo



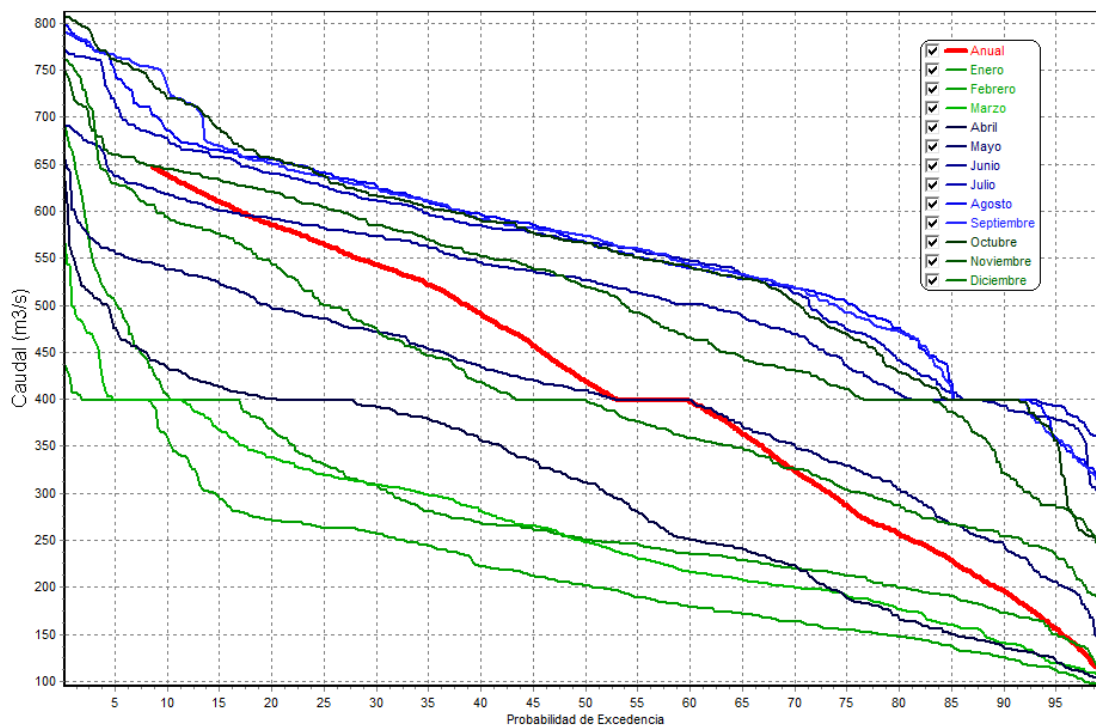
Fuente: Autor

Los caudales medios al 50% de la curva de duración anual, se encontraban asociados al patrón de altas frecuencias, sin embargo para la sección en el delta del Río Sinú, se desplaza el patrón de alta frecuencia a una condición de mayor probabilidad de excedencia por encima del 55% para la estación Cotoca Abajo (**Figura 1-12**), registrando un valor de caudal en su media de 420 m<sup>3</sup>/s, esto se asocia a las condiciones de mayor rendimiento por su cauce activo, encauzado y controlado por la formación de diques naturales en el sistema cenagoso que lo rodea.

Las lecturas sobre la estación La Doctrina (**Figura 1-13**) se acomodan al sistema de delta del Río Sinú con un valor promedio de 410 m<sup>3</sup>/s, este valor se vuelve a acercarse al patrón de alta frecuencia que se encuentra por encima del 52 al 53%.

Las curvas de duración de mayo a diciembre se evidencian mejor sobre las estaciones finales cerca al delta del Río Sinú, como las condiciones de mayor flujo y menor flujo respectivamente, construyendo la curva anual promedio del régimen en el conjunto de curvas de duración.

**Figura 1-13** Curva de duración La Doctrina



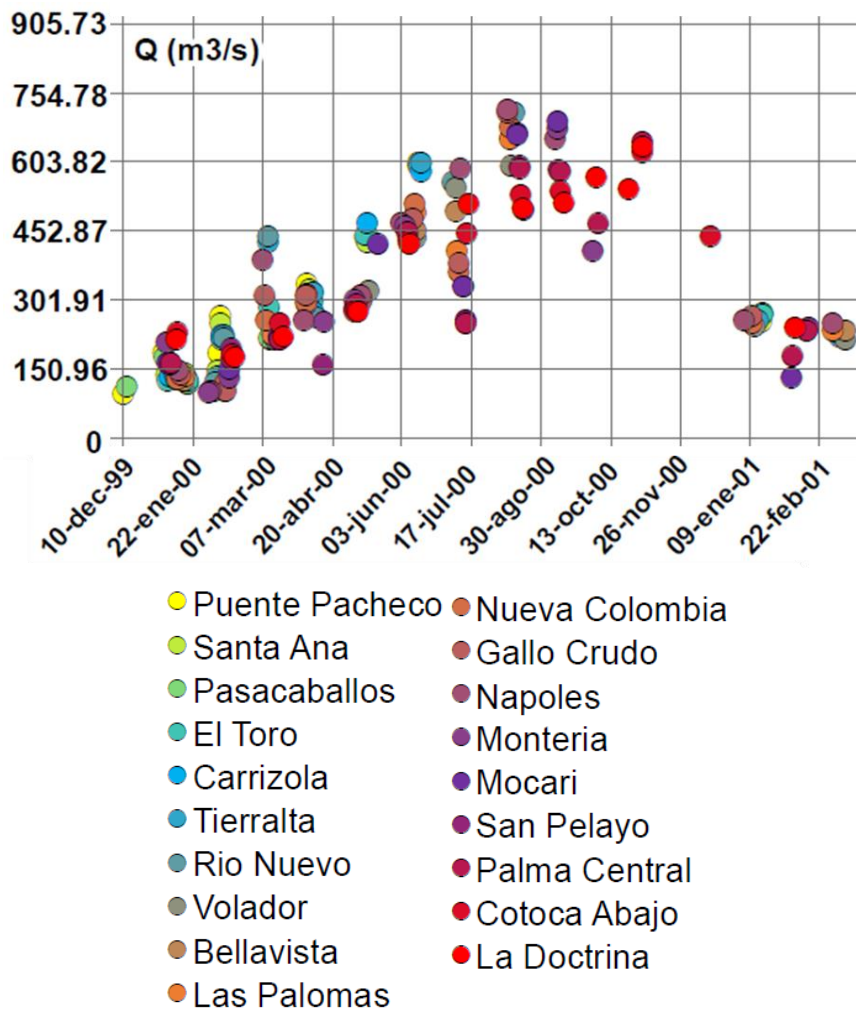
Fuente: Autor

## 1.2 Series de caudal campañas de monitoreo

Se registraron datos de caudal durante las campañas de medición de aforos sólidos y líquidos, en el programa planteado por la central hidroeléctrica. Estos registros se realizan

sobre el cauce activo en una medición puntual sobre un día específico. Las mediciones se han realizado sobre el régimen hidrológico evidenciando los cambios de temporada húmeda a seca al igual que en las curvas de duración. Para la cartografía plegable en este capítulo se presenta la serie completa de los datos tomados durante el programa de monitoreo, comparable con el régimen natural del río (**Figura 1-14**), donde los meses de diciembre a marzo muestran las condiciones de estiaje y de abril a noviembre el periodo húmedo monomodal característico.

**Figura 1-14** Serie de monitoreo mensual - Central Hidroeléctrica



Fuente: Autor

Las condiciones de monitoreo de caudal permitieron registrar los cambios durante los diecinueve puntos planteados por la central hidroeléctrica, calibrando las curvas de gasto para cada una de las secciones batimétricas registradas en los puntos. De esta manera se puede obtener el valor medio de caudal puntual sobre la sección con la altura de las regletas calibradas en la sección (**Fotografía 1-1** y **Fotografía 1-2**).

**Fotografía 1-1** Regletas sobre la estación  
La Doctrina



**Fotografía 1-2** Vista en profundidad de la  
sección La Doctrina



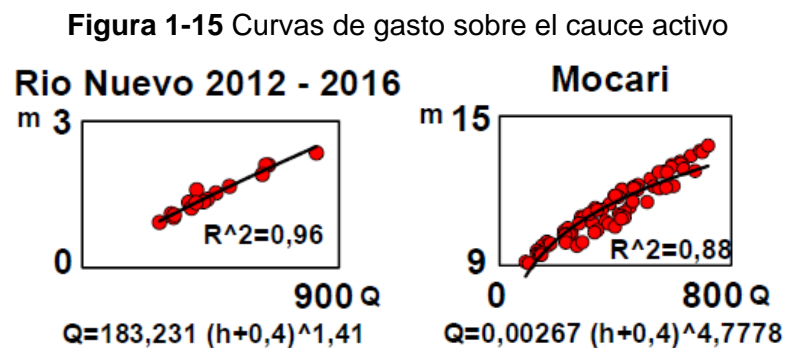
Para la descripción de las condiciones hidrológicas del cauce activo se han construido las curvas de gasto con la información monitoreada, obteniendo correlaciones superiores a 0.98 en su indicador 'R' de correlación. Sin embargo se presentan valores a partir de los 0.79 en la estación Volador y 0.88 en la estación Rio Nuevo, debido a la dinámica fluvial del cauce activo, obligando al cambio de la sección por destrucción o cambio de sus bancas. Los parámetros de relación obtenidos permiten describir con precisión los cambios en los flujos a través del cauce activo, influyendo de manera positiva sobre los procesos de modelación, propuestos en capítulos posteriores.

Como registro y síntesis de este trabajo realizado por la central hidroeléctrica, se relacionan las curvas de gasto para cada uno de los 19 puntos de monitoreo, en la cartografía plegable anexa, permitiendo la comparación y seguimiento espacial de las curvas en el recorrido por el cauce activo. Las curvas de gasto permiten relacionar las condiciones hidrológicas de mayor estabilidad con curvas de mayor pendiente positiva,



debido a la mayor profundidad de la sección, indicador indirecto de mayor estabilidad o control sobre el cauce activo (Curva estación Mocari, **Figura 1-15**).

Las estaciones con curvas de menor pendiente, menor valor de altura en caudales similares, establecen cauces más anchos de menor profundidad (Curva estación Río Nuevo, **Figura 1-15**), asociados a una mayor movilidad horizontal del cauce debido a la relación de las condiciones hidráulicas y de los materiales que componen las bancas del cauce activo.



Fuente: Autor

Información: Datos e informe técnicos de avance, plan de monitoreo hidrológico e hidráulico sobre el Río Sinú, URRRA (2016)

Con estas relaciones de flujo identificadas a partir de las curvas de gasto, se puede evidenciar como las menores profundidades se encuentran asociadas a la cuenca media antes de Montería y después de la descarga de la central hidroeléctrica, en el municipio de Tierralta, sin embargo se precisa de condiciones puntuales de profundidad media asociada a la cercanía de los centros poblados, por apoyo antrópico y control de las bancas del río.

En las condiciones de mayor control antrópico, a la salida de Montería en la estación Mocari, se resalta las lecturas con mayor profundidad del cauce, seguido por el tramo que registra la estación San Pelayo, estable y de condiciones rectilíneas para el cauce activo (ver relación en cartografía plegable anexa). En la formación del delta, monitoreada por la estación La Doctrina, la profundidad del cauce baja a 4m como en las estaciones de mayor

movilidad horizontal, patrón de dinámica compartida por esta última estación en la estructura geomorfológica del delta.

## 2. Sedimentología

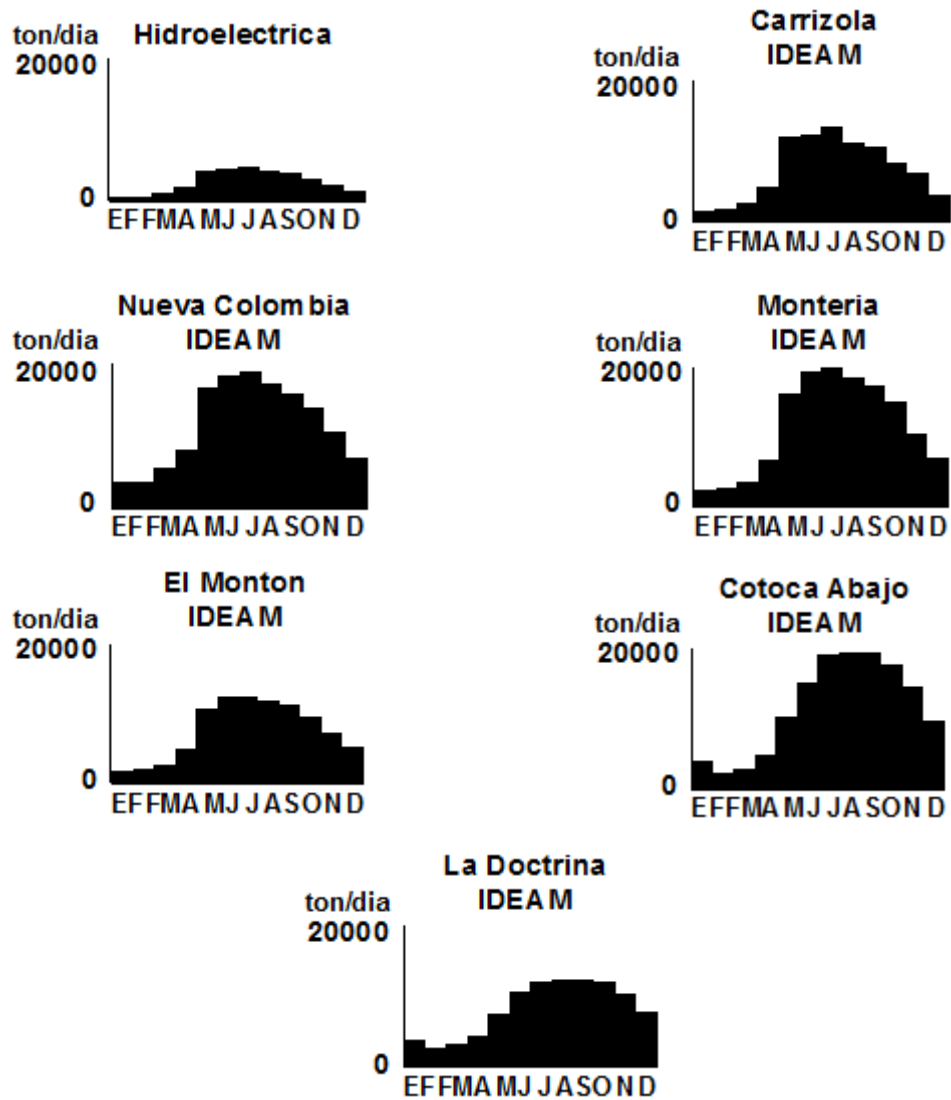
Las condiciones de sedimentos sobre el cauce activo del Río Sinú se describen en este capítulo, a partir de los puntos de monitoreo de las estaciones IDEAM seleccionadas y las secciones de control establecidas por la central hidroeléctrica (**Figura 1-2**). Se acompaña esta sección con cartografía plegable que presenta los puntos y secciones sobre el cauce activo y los diferentes resultados obtenidos a partir del monitoreo de la carga de sedimentos en el flujo. Las firmas de tiempo con valores de carga de sedimentos, se presenta bajo una gráfica plegable anexa, en la cual se observan los principales puntos y su comparación con los datos de las campañas de monitoreo realizados por la central hidroeléctrica

### 2.1 Régimen de sedimento

Las estaciones oficiales IDEAM, trabajan los valores de carga de sedimento a partir de curvas ajustadas, que relacionan esta carga en toneladas/día y el caudal promedio diario. Su comportamiento se expresa bajo una función potencial, debido a los cambios en carga de sedimentos con el aumento de flujo o caudal. Sin embargo, este comportamiento no es necesariamente relacional de esta manera y puede estar condicionado por diferentes factores como: lluvias localizadas en secciones diferenciales de la cuenca, aporte variable de sedimentos por variabilidad litológica en la cuenca, deforestación diferenciada y actividades antrópicas (Gutiérrez, 2008. Rodríguez, 2010).

El régimen mensual multianual, se obtuvo para cada una de las estaciones IDEAM, a partir de la series de datos disponibles. Ajustando de manera coherente a la tendencia monomodal del régimen hidrológico y climático regional del área de estudio (**Figura 2-1**).

**Figura 2-1** Régimen de comportamiento mensual multianual



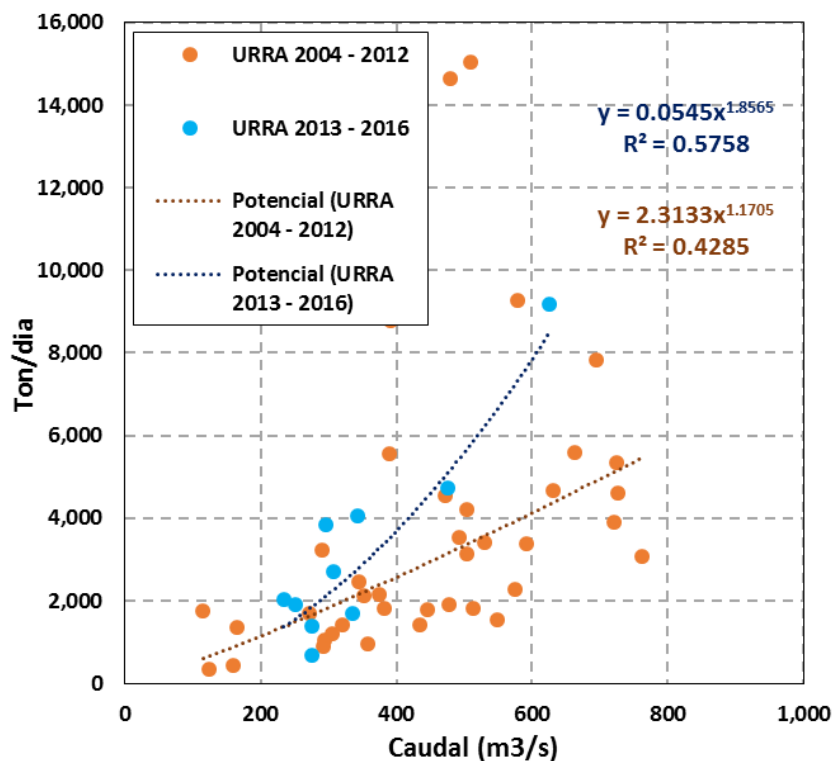
Fuente: Autor

Datos: Estaciones IDEAM seleccionadas y relación de descarga Central Hidroeléctrica

La estación sabana nueva, se encuentra presente entre los puntos oficiales seleccionados, pero no presenta información oficial de carga sedimentos, de esta manera no es tenida en cuenta durante este capítulo, para la descripción de esta variable.

Se encuentra diferencia en los valores medios de las estaciones a través del recorrido por el cauce activo (Verificar recorrido de las estaciones, sobre la cartografía plegable anexa). La descarga de la central hidroeléctrica presenta los valores más bajos de carga de sedimentos con sus máximos en el mes de julio con un valor promedio de 5001.21 ton/día, manteniendo el régimen monomodal natural de la corriente. El comportamiento de sedimentos para la descarga de la central hidroeléctrica se obtuvo a partir de la relación carga de sedimentos – caudal, medida por el punto de control Puente Pacheco (pertenece a la red de monitoreo de la central), que se ubica a K1+240 después de dicha descarga, ya que no se encuentra con una medida directa de estos valores (**Figura 2-2**). Sin embargo la relación de medidas de caudal de descarga y en el punto Puente Pacheco presentan una buena relación entre sus valores ( $r = 0.74$ ).

**Figura 2-2** Curva de Carga - Caudal Central Hidroeléctrica

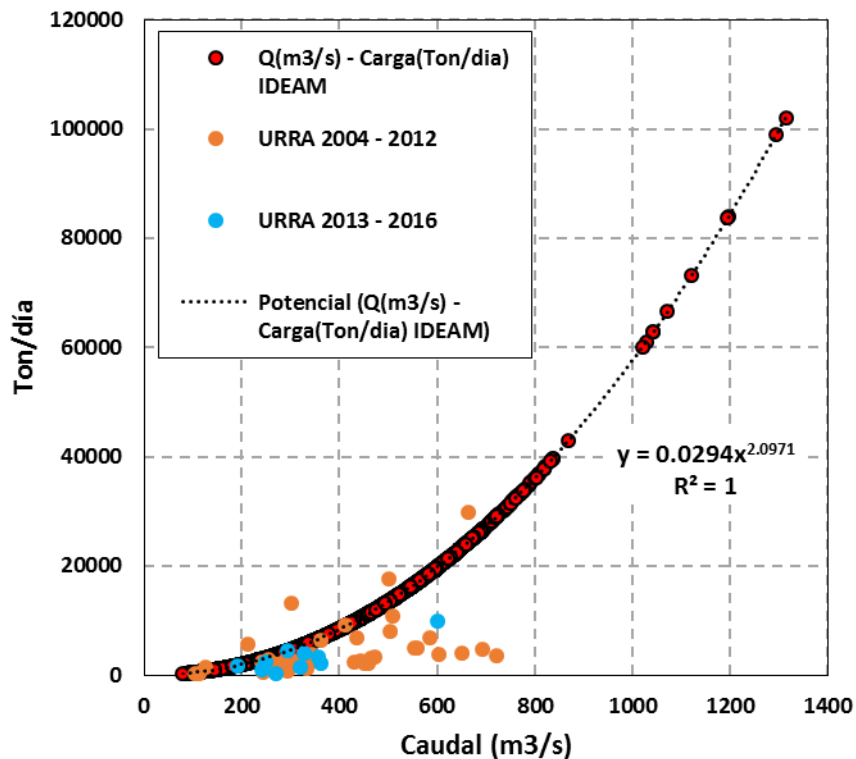


Fuente: Autor

Durante la toma de datos de caudales sólidos, por parte de la central hidroeléctrica, se encuentra una diferencia de metodologías en el muestreo y cálculo del caudal sólido durante los periodos del 2004 – 2012 y 2013 - 2016, que hace referencia a resultados diferentes durante estos dos periodos, de esta manera se aconseja tomar lo valores del 2013 en adelante (ver informe final de procesos erosivos, Construcción Consultoría Especializada l.t.d.a - URRRA S.A. E.S.P (2014)), datos comparables con la metodología estándar para el país y sus estaciones oficiales. De esta manera la relación potencial obtenida en la **Figura 2-2** para el periodo 2013 – 2016, es tenida en cuenta para la construcción de la serie de tiempo de carga de sedimentos durante la descarga.

Las demás estaciones oficiales del IDEAM establecen en sus resultados de carga de sedimentos, funciones potenciales ajustadas a su serie de caudal (En la **Figura 2-3** se observa la estación Carrizola Automática).

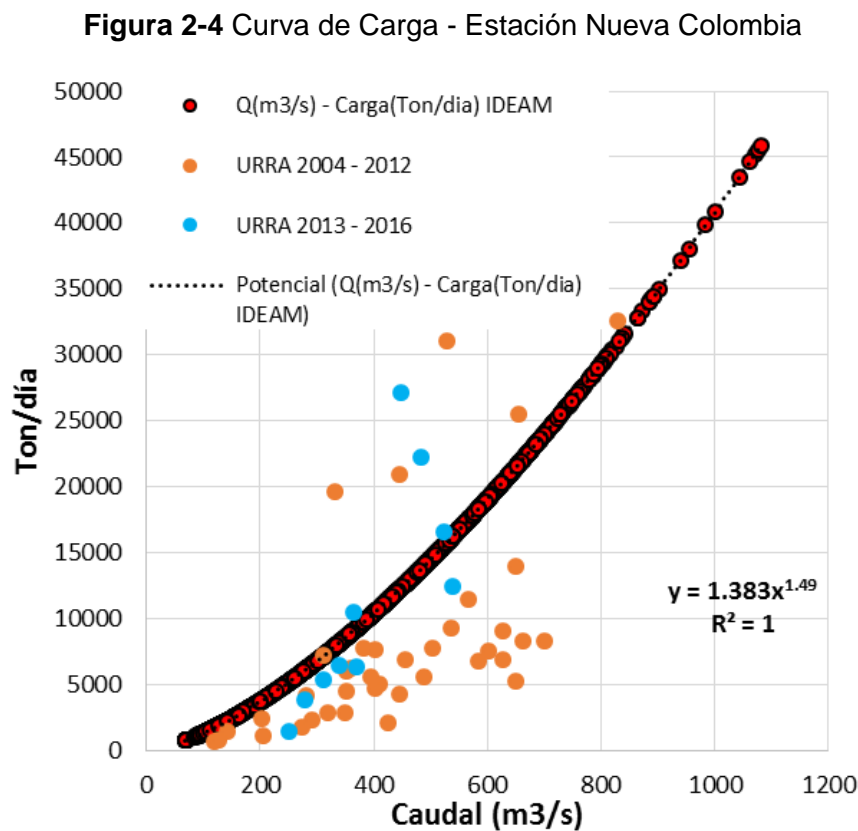
**Figura 2-3** Curva de Carga - Estación Carrizola Automática



Fuente: Autor

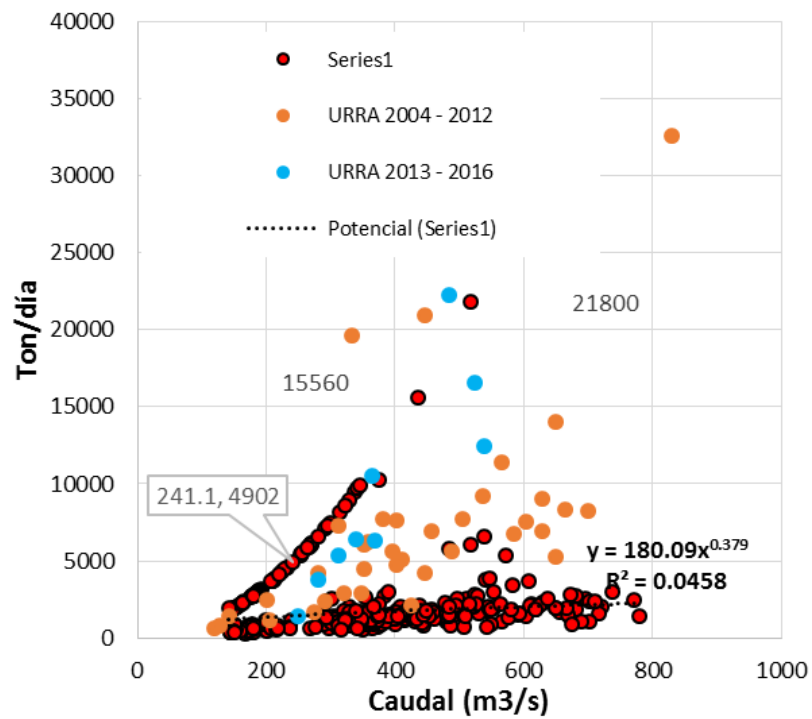
Cuando se realiza la comparación, de las curvas ajustadas IDEAM con los datos de monitoreo de la central hidroeléctrica, se encuentra mejor relación entre los datos del periodo 2013 – 2016, sin embargo no se registran valores de caudal mayores y por ende de sedimento, debido al periodo de análisis (posterior a la construcción y regulación de la central hidroeléctrica).

El comportamiento del sedimento a partir de las estaciones Carrizola en el río Sinú, son tomadas de las estaciones oficiales y controladas bajo las medidas directas observadas de los puntos control de la central hidroeléctrica. Las relaciones de carga se construyeron y manejaron de manera particular para cada estación involucrada, de esta manera se filtró la información con mejor ajuste al comportamiento natural de la corriente. Aunque la información presenta ajustes dispersos en muchas de las secciones oficiales, la información fue valiosa para el modelo de sedimentos construido.



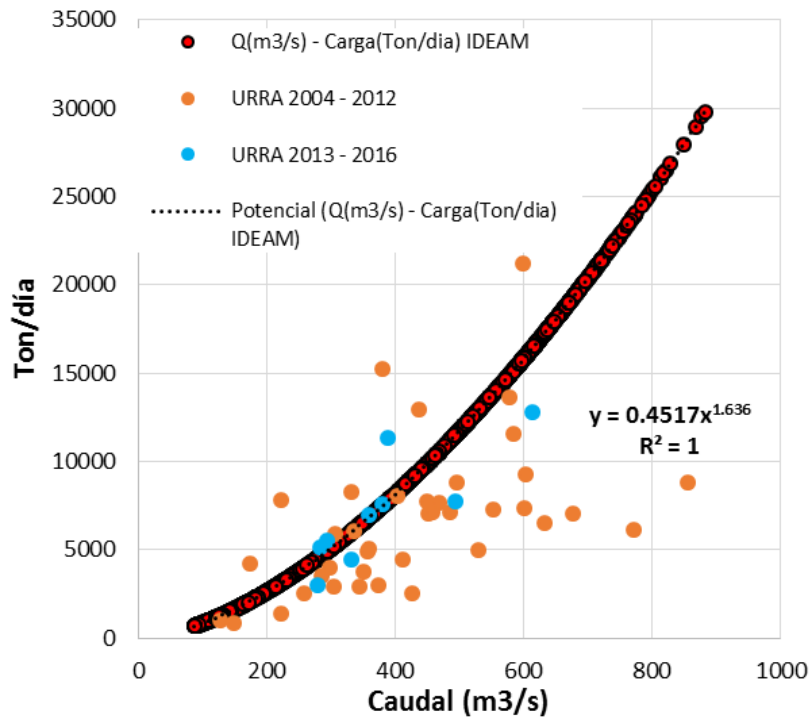
Fuente: Autor

Figura 2-5 Curva de Carga - Estación Montería



Fuente: Autor

Figura 2-6 Curva de Carga - Estación El Montón



Fuente: Autor

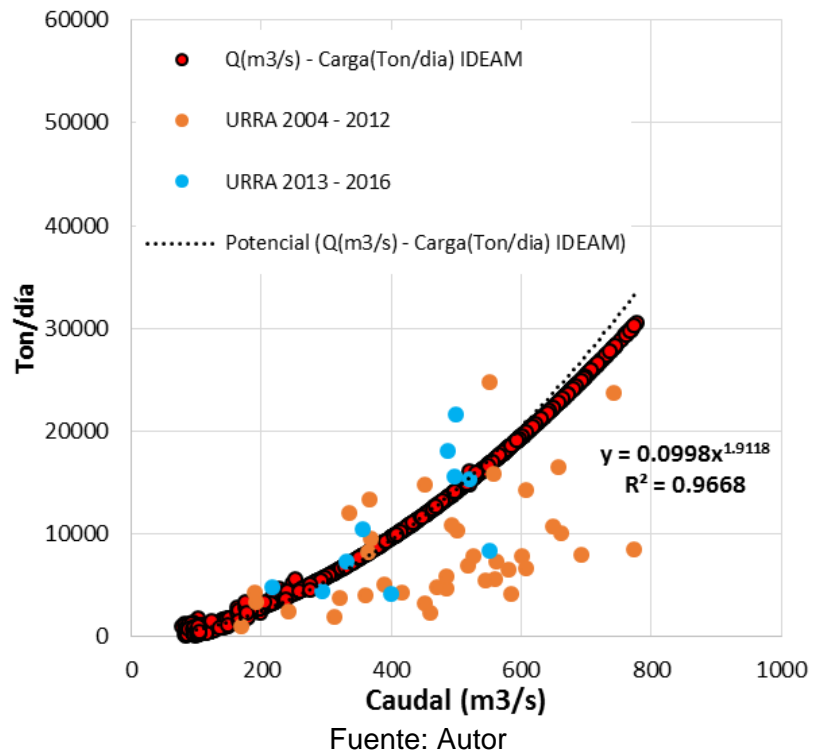
Las condiciones de carga de sedimentos en la estación Montería, presentaron los registros con menor balance de las estaciones oficiales, sin embargo se llevó una validación cruzada de cada uno de los datos diarios utilizados, reajustando a los datos reales de su comportamiento. Para este punto de control se encontraba información redundante de medidas, con las mismas fecha y hora, resultado de una mezcla en la base de datos entregada. Los datos finales obtenidos para la estación Montería ajustan de nuevo a una curva potencial con mayor acercamiento a la información monitoreada por la central hidroeléctrica a partir del año 2013.

La descarga por parte de la central hidroeléctrica presenta los valores más bajos de carga de sedimentos, a partir de la estación nueva Colombia se obtiene una regulación de esta carga a valores cercanos de 500.000 ton/día. El paso por la estación Carrizola Automática evidencia el proceso de regulación de carga de sedimento. De esta manera la regulación de la carga de sedimento se está realizando sobre las condiciones de mayor movilidad del cauce activo, con depósitos de alta movilidad y estados de alta sinuosidad de la corriente. Este comportamiento se ve reflejado sobre el movimiento continuo de orillas que se presenta en este mismo sector, reportado a través de las campañas de monitoreo que realiza la central hidroeléctrica para el río Sinú.

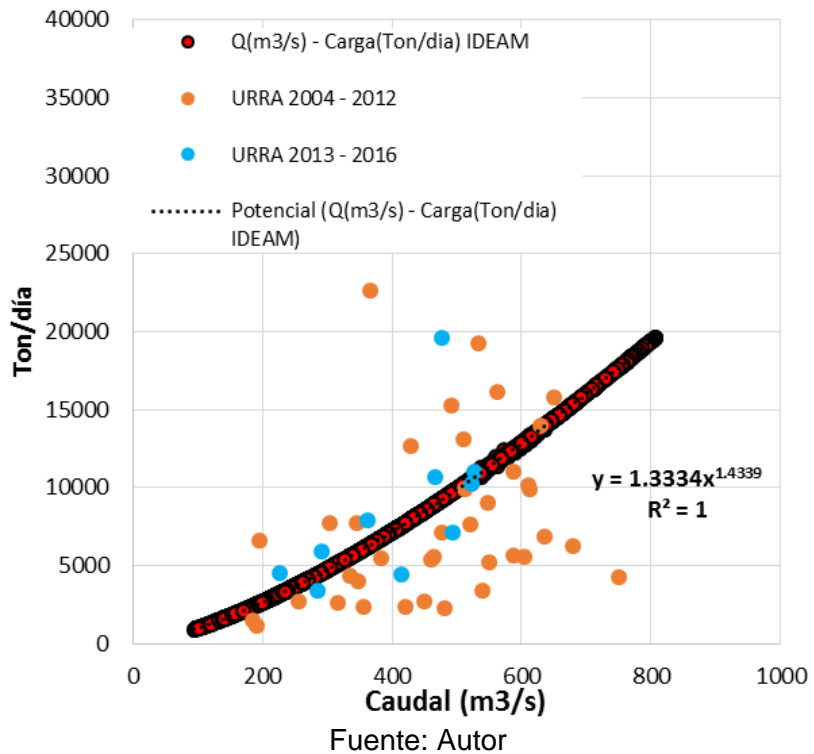
Condiciones importantes han trabajado conjuntamente sobre este sector del río Sinú, como el control de los caudales extremos por parte de la central, registren la movilidad de las orillas y cuentan con la condición litológica variada verticalmente de la planicie de sedimentos, donde los depósitos de menor consolidación cubren brechas no consolidadas de mayor compactación. De esta manera la regulación de un caudal por parte de la central obliga un altura estable el mayor tiempo posible, en contacto con la brecha estable de depósito. Sin embargo el régimen natural obliga a mayores caudales y mayores calados donde se activan los procesos de degradación sobre las márgenes, que se ven potenciados por el estado de regulación de carga de sedimentos que lleva la corriente. Con estos criterios trabajando juntos se presenta movilidad sobre el cauce activo del río Sinú, en menores grados a las condiciones naturales de picos extremos, pero bajo unos procesos de control de caudales y condiciones intrínsecas naturales del medio.



**Figura 2-7** Curva de Carga - Estación Cotoca Abajo



**Figura 2-8** Curva de Carga - Estación La Doctrina



### 3. Hidráulica

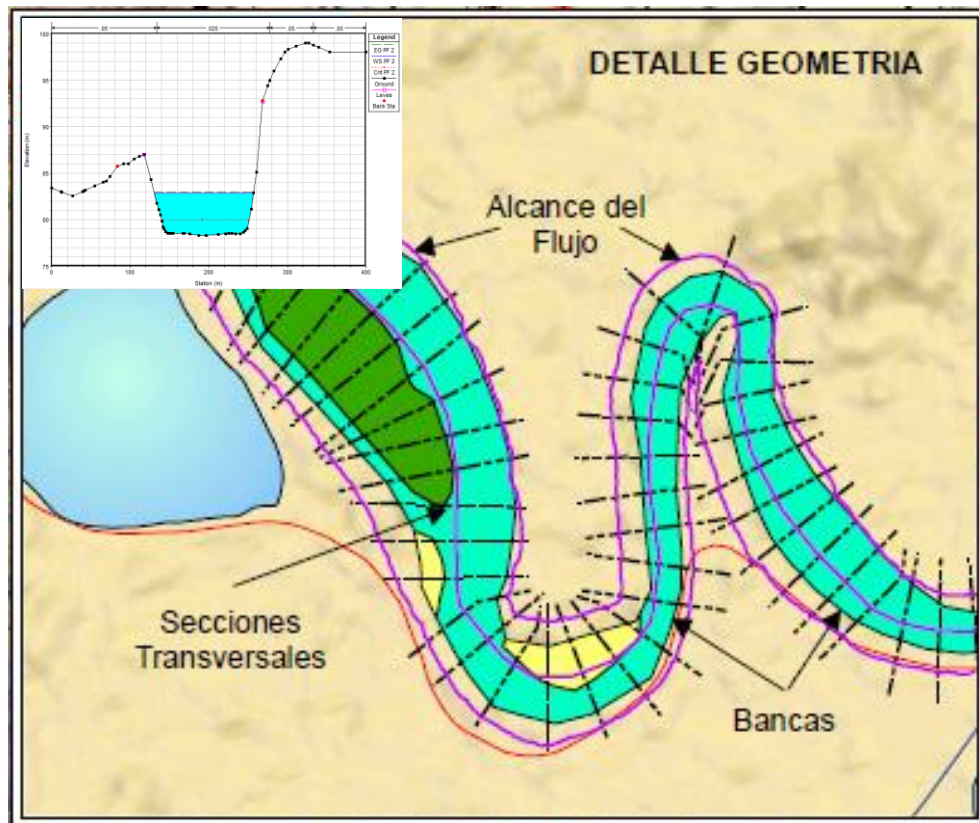
Se desarrolló el procedimiento hidráulico para el cauce activo del río Sinú, desde descarga en la central hidroeléctrica hasta la llegada a la formación del Delta. No se ha tendió en cuenta los procesos presentes en el Delta, debido a que no se cuenta con la información de nivel de oleaje y régimen de las condiciones de marítimas. Se ha contado con la información tipográfica de algunos sectores medidos sobre el cauce activo por parte de información oficial y trabajos adelantados en la central hidroeléctrica, sin embargo se contó con la información ALOS, información tomada con el sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar), la cual corresponde a un sensor activo (radar) con resolución espacial de 12.5m por pixel.

Las condiciones de mecánica del flujo, se desarrollaron bajo el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) 5.0.3. El cual lleva implementado el modelo HEC6 (HEC, 1993) de movilidad de lecho. La construcción de la geometría se llevó a cabo cada 100m con secciones reguladas. No se tuvo en cuenta las posibles zonas de inundación debido a la necesidad de solo evaluar la movilidad del lecho. Se contó con 2802 secciones ajustadas al cauce activo del río Sinú, Las cuales fueron reajustadas con las secciones actualizadas y monitoreadas por la central hidroeléctrica. Estas mismas secciones fueron utilizadas como puntos de control con base de las mediciones realizadas durante los planes de monitoreo.

En la **Figura 3-1** se presenta el trazado de las secciones sobre el cauce activo del río Sinú. En la cartografía plegable de manera anexa se presentan el trazado total der las secciones y el esquema de las secciones monitoreadas por la central hidroeléctrica a través del río.

La información de las curvas de gradación promedio fue utilizada para caracterizar el comportamiento del sedimento bajo los 16 años de análisis simulados.

**Figura 3-1** Geometría a través del río Sinú

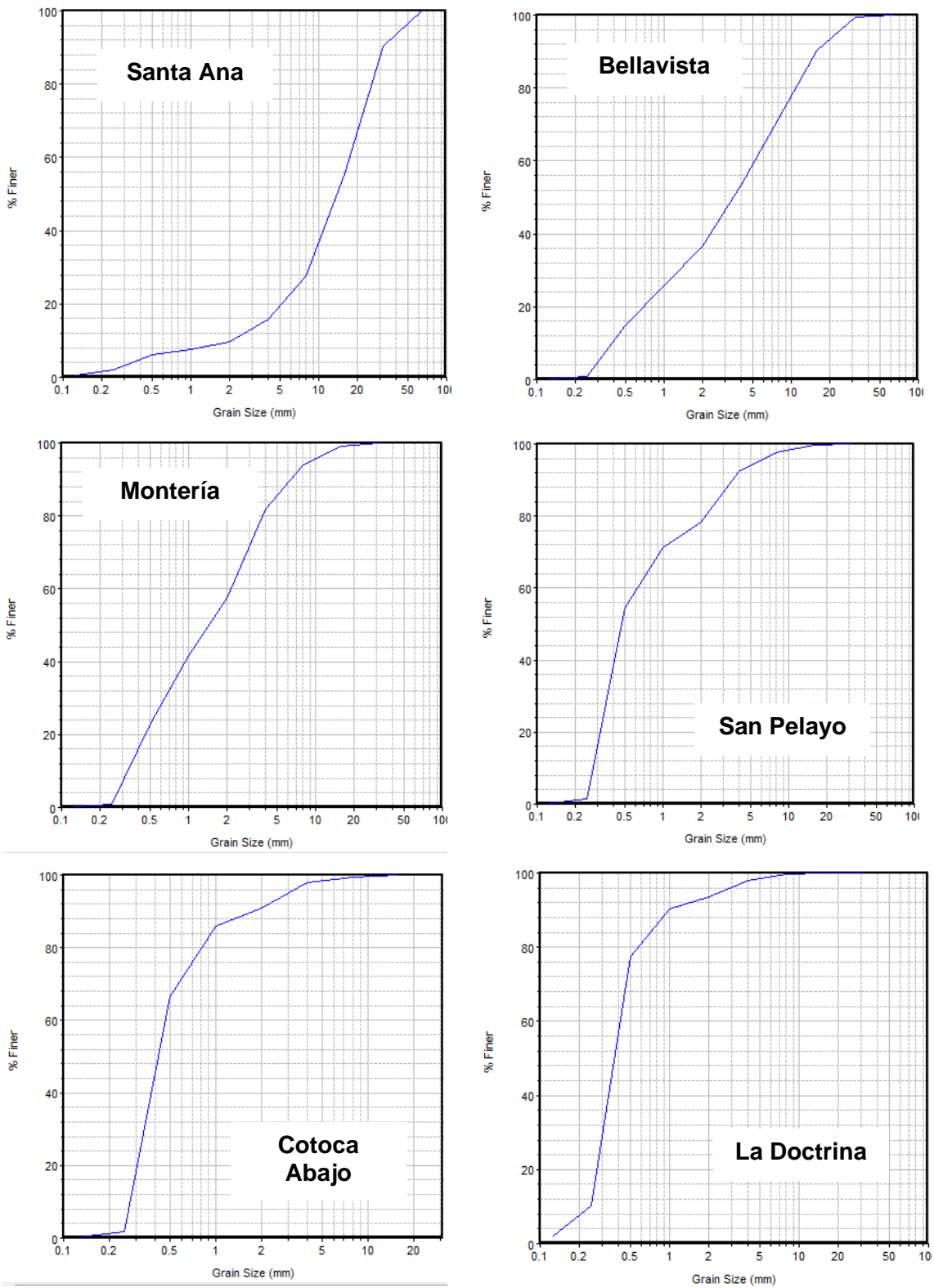


Fuente: Autor

Estas fueron ingresadas en frecuencia acumulada a través de todo el cauce activo y se interpolaron a través de las secciones intermedias entre los puntos de control. En la **Figura 3-2** se presentan las principales curvas de gradación y su cambio de comportamiento a través del cauce activo.

Los comportamientos de las curvas responden al régimen y tipo de material en el lecho del río, de esta manera en la medición del punto de control Santa Ana, cerca la central hidroeléctrica el  $d_{50}$  puede estar en promedio de 10 – 15mm. Este diámetro disminuye a medida que se avanza por la corriente, empezando su cambio significativo en la estación Bellavista con un  $d_{50}$  en 5mm.

**Figura 3-2** Curvas de gradación río Sinú



Esta estación marca el inicio de la sección de transición la cual manifiesta cambios importantes en el paisaje y formaciones alrededor, como la manifestación de ciénagas y disminución de las pendientes.

El paso por la estación en Montería y el punto de control San Pelayo ya estabilizan el cambio de  $d_{50}$ , estabilizando en un promedio de 0.5mm hasta las mediciones finales cerca al delta.

Los cálculos de caída de las partículas y fuerzas de suspensión y arrastre se utilizó la función de: Ackers-White, el método de organización de capas activas y la velocidad de caída de Ruby. Esto se encuentra basado en las condiciones de creación de las funciones de transporte. En la **Tabla 3-1** se presentan las principales funciones de transporte y sus rangos de tamaño.

**Tabla 3-1** Funciones de transporte para Colombia

<b>MODELOS</b>	<b>Rangos <math>d_{50}</math> (mm)</b>	<b>Rangos Tamaño</b>
Ackers & White (1973)	0.04 - 7.00	Gravas a arenas finas
Engelund & Hansen (1972)	0.19 - 0.93	Sistemas Arenosos
Laursen modificado por Copeland (1989)	0.011 - 29	Lechos graduados
Meyer-Peter & Muller (1948)	0.40 - 30.00	Arena y Grava
Toffaletti (1968)	0.062 - 4.00	Arenas
Yang (arenas 1973 y gravas 1984)	2.46 - 10.00	Arenas y gravas
Wilcock (2001)		Arenas y gravas

Fuente: Tomado y ajustado de Barbosa (2013)

Esta función de transporte fue la que mejor se ajustó a las condiciones de control que se tenían sobre los planes de medición del cauce activo. Al igual que los parámetros de calibración iniciales tomados de los avances realizados en Colombia (Barbosa 2013).

Las condiciones de borde para el transporte de sedimentos cuentan con las curvas de gradación individuales, tomadas de los datos primarios de las secciones de control, con las cuales se asocia su gradación acumulada al caudal medido en dicha sección. En la **Figura 3-3** se presenta diferentes curvas de gradación asociadas al caudal medido en la toma de las muestras.

**Figura 3-3** Condiciones de borde - Sedimentos

Total Load (tonnes/day)	670.8745	1379.027	1679.656	1902.07	2044.73	2694.874	3841.788	4059.389	4744.627	9178.581
Clay (0.002-0.004)										
VFM (0.004-0.008)										
FM (0.008-0.016)										
MM (0.016-0.032)										
CM (0.032-0.0625)										
VFS (0.0625-0.125)		0.0001	0.00549	0.0075	0.00059	0.00041	0.0187	0.00035	0.0009	0.01882
FS (0.125-0.25)	0.01376	0.00193	0.01271	0.01691	0.01	0.01023	0.04995	0.00534	0.00627	0.07202
MS (0.25-0.5)	0.03026	0.00784	0.03349	0.03561	0.07392	0.06981	0.07768	0.02312	0.02247	0.12444
CS (0.5-1)	0.03587	0.02021	0.01359	0.01736	0.08264	0.08901	0.01883	0.01622	0.06279	0.01865
VCS (1-2)	0.0394	0.01253	0.01877	0.01957	0.07765	0.08331	0.0377	0.0163	0.14947	0.02992
VFG (2-4)	0.07832	0.02183	0.07435	0.0208	0.04732	0.04498	0.04398	0.02816	0.06896	0.04315
FG (4-8)	0.08602	0.03257	0.07361	0.06796	0.12369	0.13187	0.0846	0.13124	0.09896	0.08648
MG (8-16)	0.23179	0.19987	0.27474	0.19607	0.24765	0.31816	0.25218	0.36118	0.26397	0.19008
CG (16-32)	0.26217	0.29005	0.3983	0.5085	0.26927	0.21507	0.27796	0.39295	0.27653	0.19693
VCG (32-64)	0.22242	0.41307	0.09495	0.10972	0.06728	0.03715	0.13842	0.02514	0.04968	0.21951
SC (64-128)										
LC (128-256)										
SB (256-512)										
MB (512-1024)										
LB (1024-2048)										

Fuente: Autor

Los flujos fueron ingresados a través de las series diarias medias de caudal a través de los 16 años de análisis, en flujo quasi-no estacionario, como se muestra en la **Figura 3-5** donde se calculó para cada año el comportamiento de los sedimentos y su asociación con el lecho.

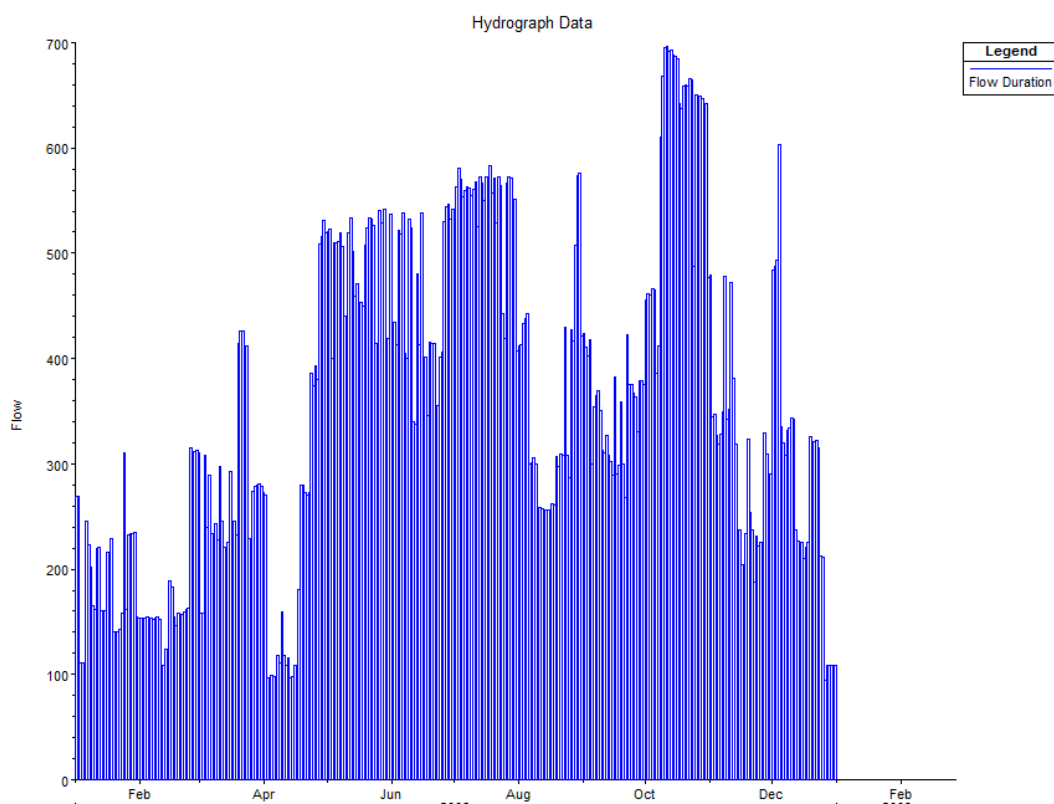
Las consideraciones de tolerancia se mantuvieron altas por defecto como las propone el software, sin embargo se garantizó el máximo de iteraciones para obtener aproximaciones adecuadas en los balances de energía (**Figura 3-4**).

Las condiciones de cálculos computacionales se variaron en función de los caudales, lo cual repercute en las modificaciones o valoraciones de sistema sobre el lecho. Esto permitió mejores precisiones en el modelo pero mayor tiempo de procesamiento. En promedio se utilizaron entre 6 a 8 horas de simulación por cada año simulado.

**Figura 3-4** Tolerancias de cálculo

Set Calculation Tolerances	
Water surface calculation tol. (.0001 - .1 m)	.003
Critical depth calculation tol. (.0001 - .1 m)	.003
Maximum number of iterations (3 - 40)	40
Maximum difference tolerance (.1 - 1.0 m)	.10
Flow tolerance factor (.0001 - .05)	.001
Maximum iteration in Split flow (3-60)	30
Flow tolerance factor in weir split flow (.0001 - .05)	.020
Max difference in junction split flow (.001 - .1 m)	.006

Fuente: Autor

**Figura 3-5** Series de flujo

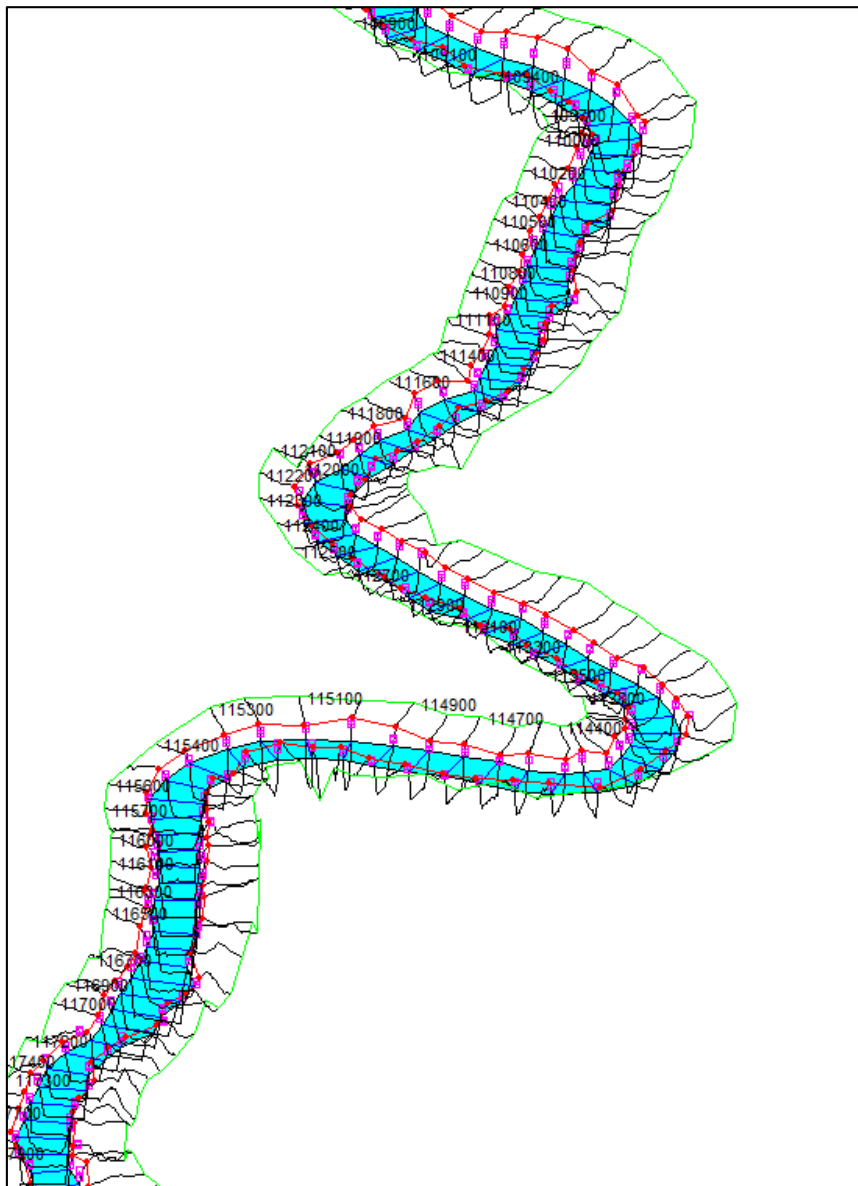
Fuente: Autor

Las condiciones de simulación hidrodinámicas, primero fueron ajustadas en régimen estacionario a partir de los caudales obtenidos en el régimen natural, aguas constantes,

bajas medias, altas y pequeños periodos de inundación obtenidas con las curvas de duración y el software complementario de alteración hidrológica IHA.

En la **Figura 3-6** se obtiene la simulación de ajuste a través del cauce activo y la geometría construida. Controlado a través del calado de las secciones de monitoreo que se tienen para todo el trazado del cauce activo.

**Figura 3-6** Ajuste de flujo a la geometría sobre el río Sinú



Fuente: Autor



Las condiciones de simulación permitieron evaluar los cambios en el lecho a través de diferentes series de caudal y sedimento obtenidas del trabajo continuo de monitoreo sobre la corriente del río Sinú. Sin embargo se presentan algunas limitaciones sobre el movimiento natural de la corriente en sus primeros 80K, como se mostró en esta investigación corresponde a la de mayor movilidad y su constante movimiento de bancas hace parte de su estado natural y potencial. En esos puntos el modelo sobre saturaba los lechos de la corriente (**Figura 3-7**), cuando realmente el movimiento debería ser lateral y no en el lecho.

**Figura 3-7** Cambios en el lecho de las secciones trazadas



Fuente: Autor