



PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

DIVISIÓN DE INGENIERIA

**ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE
SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN EL RÍO MAGDALENA
K5-K38 USANDO MEDICIONES DEL PERFILADOR DE
CORRIENTE ADCP**

**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL ENFASIS EN RECURSOS
HÍDRICOS**

**AUTOR:
KARINA SOFIA DÍAZ MARTINEZ**

BARRANQUILLA

2015

Dios, padre, madre, hermana y sobrino, son
mi mayor motivación y apoyo, gracias.

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Humberto Ávila, Manuel Alvarado y German Rivillas quienes me acompañaron en mi proceso de formación y desarrollo de la investigación.

Al Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales (IDEHA) de la Universidad del Norte y CORMAGDALENA por la información ADCP del río Magdalena 2006 – 2014, proporcionada para el desarrollo de la investigación.

A mis colegas Roberto Castro, Ignacio De la Hoz, Guillermo Acuña y Stephanie Díaz por su colaboración y puntos de vista.

A los demás compañeros del grupo IDEHA, al personal técnico y administrativo de la División de Ingeniería.

Jurado Asignado:

Coordinador de la maestría: Dr. Julián Arellana

1er. Jurado: Dr. German Rivillas

2do. Jurado: MSc. Augusto Sisa

Lugar donde se realizó la tesis:

División de Ingeniería, UNINORTE.

TUTOR DE LA TESIS:

Dr. Humberto Ávila Rangel

RESUMEN

Este trabajo tiene como objeto realizar una estimación de la concentración media de sedimentos en suspensión, aplicando un modelo teórico estadístico basado en la ecuación del Sonar Simplificada y simulación de Montecarlo, usando mediciones del Perfilador de Corriente ADCP. Con lo cual se logra determinar el transporte de sedimento en suspensión en el río Magdalena a partir de la reconstrucción histórica de la concentración media de sedimentos en suspensión para el sector de estudio Puerto de Barranquilla a PIMSA (K5 – K38) desde el año 2006 al 2014.

En las últimas décadas se han incrementado, para la estimación de parámetros físicos en diferentes sistemas naturales, las mediciones intrusivas con tecnologías acústicas, láser y dispositivos ópticos. En el caso particular de los ríos, y dada la escasez de información sedimentológica se han utilizado las mediciones acústicas del Perfilador de Corriente ADCP para la estimación de la concentración de sedimentos en suspensión (SSC).

En el presente documento se realiza una descripción de las diferentes metodologías desarrolladas, aplicadas en otros sistemas naturales, para estimar la SSC. También se describen las ecuaciones explícitas utilizada para convertir la señal del ADCP en concentración en suspensión. Y propone una nueva metodología basada en la ecuación del Sonar simplificada (Urick, 1983), la cual fue utilizada para corregir la señal retorno del ADCP, analizando los efectos de dispersión geométrica y absorción del fluido. Sin embargo para el caso de estudio, río Magdalena K5- K38, no se realizó corrección por atenuación del sedimento puesto que no se contaban con mediciones al tiempo de ADCP y de concentración de sedimento en suspensión con métodos tradicionales. Este modelo fue calibrado utilizando el método estadístico de simulación de Montecarlo con las 51 mediciones hidrosedimentológicas del río Magdalena en el sector Calamar (K120) a Bocas de Ceniza (K0), realizadas por el IDEAM (1982 – 1998) y el LEHLF (1989 – 2005), y los promedios mensuales de transporte de sedimentos entre 1972 – 2012 entregados oficialmente por el IDEAM para la estación de Calamar.

Finalmente fue posible determinar los parámetros A y B de la ecuación del Sonar Simplificada y reconstruir así la serie histórica de concentración media y transporte total de sedimentos en suspensión para el río Magdalena entre el K5 y K38 desde el 2006 al 2014, con un promedio multianual de 732 mg/L y 198 Mton/año, respectivamente. Con los resultados encontrados se puede afirmar que no existe evidencia que sustente que la concentración de sedimentos ha aumentado o disminuido en el río Magdalena, ya que la concentración de sedimentos en suspensión no registra un aumento apreciable, con tendencia a permanecer aproximadamente constante.

LISTADO DE SÍMBOLOS

SSC	Concentración másica total de sedimentos en suspensión
ABS	Acoustic Backscatter o señal corregida
RL	Señal cruda de retorno del ADCP
$2Tl$	Corrección por pérdidas de transmisión
B	Intercepto o constante empírica
K_2	Constante empírica
A	Pendiente o constante empírica
P_0	Presión de referencia en el rango r_0
r	Distancia desde el transductor
a_s	Radio de la partícula
a_t	Radio del transductor
τc	Longitud del pulso
τ	Duración del pulso
c	Velocidad del sonido en agua
ρ_s	Densidad de la partícula
k	Número de onda
λ	Longitud de onda acústica
f	Frecuencia de trabajo
f_s	Función que describe las propiedades de dispersión de la partícula
ψ	Corrección por campo cercano del transductor
α	Coefficiente de atenuación para pérdidas de transmisión debidas al fluido y al sedimento en suspensión.
H_B	Tamaño del bin.
S_a	Función de salinidad
A	Constante del proceso de relajamiento iónico en agua de mar
P	Presión del agua
f_T	Frecuencia de relajación dependiente de la temperatura
T	Temperatura
α_f	Coefficiente de absorción acústica por el agua
α_s	Coefficiente de atenuación del sedimento en suspensión

SSC_V	Concentración adimensional volumétrica del sedimento
ρ_s	Densidad específica
k	Número de onda
λ	Longitud de onda en cm
γ	Gravedad específica
D_{50}	Diámetro medio de las partículas
a_s	Radio del sedimento medio en cm
ω	Frecuencia angular
ν	Viscosidad cinemática del agua en Stokes
ABS_{prom}	Acoustic Backscatter promedio
SSC_{ABS}	Concentración media de sedimentos en suspensión a partir de datos ABS
Q_{st}	Caudal sólido o transporte total de sedimentos en suspensión
CSS	Concentración media de sedimentos en suspensión
Q_l	Caudal líquido
k	Coefficiente basado en la unidad de medida del caudal
$Q_{st\ ABS}$	Caudal sólido calculado a partir del ABS_{prom}
Q_{total}	Caudal líquido medido por el ADCP

CONTENIDO		
INTRODUCCIÓN		1
OBJETIVOS		2
JUSTIFICACIÓN		2
1 MARCO DE REFERENCIA		3
1.1 ESTADO DEL ARTE		3
1.2 MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SEDIAMENTOS EN SUSPENSIÓN EN RÍOS TROPICALES		11
2 METODOLOGIA		19
3 APLICACIÓN DE METODOLOGIA Y RESULTADOS		26
3.1 AREA DE ESTUDIO		26
3.2 METODOLOGIA APLICADA AL CASO DE ESTUDIO		29
3.3 ORGANIZACIÓN DE BASE DE DATOS DE LAS MEDICIONES CON ADCP		31
3.4 ANALISIS DE LAS MEDICIONES CON ADCP		34
3.5 EXTRACCIÓN DE LAS VARIABLES MEDIDAS POR EL ADCP		39
3.6 CALCULO DEL ACOUSTIC BACKSCATTER PROMEDIO - ABS _{prom}		40
3.7 ANALISIS DEL ACOUSTIC BACKSCATTER PROMEDIO - ABS _{prom}		41
3.8 ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN A PARTIR DEL ACOUSTIC BACKSCATTER DEL ADCP UTILIZANDO MONTECARLO		44
3.9 RECONSTRUCCION DE LA SERIE 2006-2014 DE CONCENTRACIÓN MEDIA Y TRANSPORTE TOTAL DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN DEL RIO MAGDALENA K5-K38		64
4 CONCLUSIONES		71
5 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN		73
BIBLIOGRAFÍA		74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1. Estimación estadística de los sólidos totales suspendidos, Bahía de San Francisco. Fuente: Gartner & Cheng, 2001..... 4

Tabla 1-2. Coeficientes de la regresión entre estimaciones de sólidos suspendidos a partir ADCP y OBS. Fuente: Gartner, 2004..... 5

Tabla 1-3. Características de los grandes ríos del mundo. Fuente: Schumm – Winkley, *The variability of large alluvial rivers*, ASCE, 1994. 9

Tabla 1-4. Relación entre transporte de sedimentos y caudal medio. Fuente: Schumm – Winkley, *op. cit.*..... 9

Tabla 2-1. Información visualizada en la interfaz de Winriver II..... 20

Tabla 2-2. Variables a utilizar y plantilla. 21

Tabla 3-1. Secciones levantadas, aforos sólidos realizados el 27 de Febrero de 2011.... 32

Tabla 3-2. Base de datos, mediciones con ADCP 2006-2014, Río Magdalena K0-K38. Medición 1 – 42. 33

Tabla 3-3. Número de mediciones con ADCP por año. Fuente: Elaboración propia 34

Tabla 3-4. Número de mediciones ADCP por sectores desde el 2006 – 2014 35

Tabla 3-5. Resumen estadístico. Aforos líquidos (m³/s) con ADCP por secciones. Río Magdalena 2006-2014 entre el K0 – K38..... 38

Tabla 3-6. Prueba de Normalidad. 44

Tabla 3-7. Resumen Estadístico para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día) 46

Tabla 3-8. Resumen Estadístico para Qst LEH-LF 1989-2005 (Ton/día) 48

Tabla 3-9. Resumen Estadístico de los datos de transporte total en suspensión (Ton/día) del IDEAM 1982 – 1998 y LEH-LF 1989-2005. 51

Tabla 3-10. Comparación de desviaciones estándar..... 52

Tabla 3-11. ANOVA 55

Tabla 3-12. Resumen Estadístico para Qst IDEAM 1972 – 2012 (Ton/día)..... 58

Tabla 3-13. Parámetros A y B para las diferentes calibraciones 61

Tabla 3-14. Resumen Estadístico para SSC_ABS (mg/L). Río Magdalena K5 – K38. Años 2006 – 2014..... 65

Tabla 3-15. Resumen Estadístico para Qst_ABS (Ton/día). Río Magdalena K5 – K38. Años 2006 – 2014..... 68

Tabla 3-16. Promedios de concentración y transporte total de sedimentos anual en el río Magdalena 2006 – 2014 a partir de mediciones ADCP..... 70

Tabla 4-1. Resumen de resultados de calibración de equipos ADCP, para diferentes sistemas hídricos. Fuente: Elaboración propia..... 72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. USP 61. Fuente: USGS, 2006. 11

Figura 1-2. ADCP – Río Grande de 600 kHz. Fuente: Teledyne RD Instruments, 2008... 12

Figura 1-3. Ráfagas de sonido, echoes y backscattereres. Fuente: Simpson, 2001. 13

Figura 1-4. Medición de un perfil de velocidad desde una embarcación en movimiento con ADCP. Fuente: TELEDYNE RD INSTRUMENTS, 2007..... 13

Figura 1-5. Zona de mediciones en la columna de agua. Fuente: TELEDYNE RD INSTRUMENTS, 2007..... 14

Figura 1-6. Esquema vertical de la sección de un río que muestra la zona de toma de datos del ADCP. Fuente: USGS, 2006. 14

Figura 2-1. Metodología. Fuente: Elaboración propia..... 19

Figura 2-2. Software utilizado, WinRiver II. a) Visualización del archivo cargado y plantillas. b) Perfil de velocidad (m/s) de la sección transversal c) Perfil del Average Backscatter (dB) d) Intensidad de cada beam e) Vectores de velocidad promedio por vertical. f) y g) Datos de medición del caudal: caudal medido y total..... 21

Figura 3-1. Representación Cuenca Río Magdalena en Colombia. Fuente IDEAM..... 26

Figura 3-2. Caudales generado por la HQ Calmar (K120), años 2006 - 2014. Fuente: UNINORTE, 2014. 27

Figura 3-3. Correlación Nivel – Caudal Estación Calamar. Fuente: Uninorte, 2014. 27

Figura 3-4. Localización del sector de estudio. Fuente: Google Earth..... 28

Figura 3-5. Metodología aplicada al caso de estudio. Fuente: Elaboración propia. 30

Figura 3-6. Carteras de Campo 2006 – 2010..... 31

Figura 3-7. Equipo ADCP instalado en el bote, río Magdalena. Foto tomada el 27 de Febrero 2013. 32

Figura 3-8. Aforos líquidos con ADCP, Río Magdalena K0 – K38 e islas Rondón (K22) - Cabica (K30), entre los años 2006 – 2014. 34

Figura 3-9. Grafica de caja y bigotes, y resumen estadístico de los 1468 aforos líquidos con ADCP 2006 -2014. Río Magdalena K0 – K38, sin incluir Isla Rondón y Cabica..... 35

Figura 3-10. Grafica de Bigotes aforos líquidos con ADCP por secciones. Río Magdalena 2006-2014 entre el K0 – K38, sin incluir Islas. 36

Figura 3-11. Serie de aforos líquidos con ADCP 2006 - 2014. Río Magdalena K5 – K38. 37

Figura 3-12. Grafica de caja y bigotes, y resumen estadístico de los aforos líquidos (m³/s) con ADCP 2006 -2014. Río Magdalena K0 – K38. 37

Figura 3-13. Grafica de Bigotes aforos líquidos (m³/s) con ADCP por secciones. Río Magdalena 2006-2014 entre el K0 – K38..... 38

Figura 3-14. Matriz ABS y Velocidad de una sección tipo. 39

Figura 3-15. Resultados del cálculo del ABSprom vs. Caudal total del ADCP. 40

Figura 3-16. Qmeasured por el ADCP vs. Qbin calculado. 41

Figura 3-17. ABSprom (dB) de los años 2006 a 2014. Río Magdalena, K0 – K38..... 42

Figura 3-18. Comparación del ABSprom y Qtotal del 2006 – 2014. Río Magdalena, K5 – K38. 42

Figura 3-19. Grafica de aberrantes con Limites Sigma para ABSprom (dB)..... 43

Figura 3-20. Grafica de Probabilidad Normal para ABSprom (dB). 44

Figura 3-21. Transporte de sedimentos en suspensión, Río Magdalena – Sector Calamar (K120) a Bocas de Ceniza (K0). LEH – LF 1989 – 2005 y IDEAM 1982 – 1998. Fuente: LEHLF, 2005. 45

Figura 3-22. Transporte de sedimentos en suspensión, Río Magdalena – Estación Calamar (K120). IDEAM 1972 – 2012..... 46

Figura 3-23. Grafica de Caja y Bigotes para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día)..... 47

Figura 3-24. Grafica de aberrantes con Limites Sigma para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día).....	48
Figura 3-25. Grafica de Probabilidad normal para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día).....	48
Figura 3-26. Grafica de Caja y Bigotes para Qst LEH-LF 1989 - 2005.....	49
Figura 3-27. Grafica de aberrantes con Limites Sigma para Qst LEH-LF 1989 - 2005 (Ton/día).....	50
Figura 3-28. Grafica de Probabilidad normal para Qst LEH-LF 1989 - 2005 (Ton/día).....	50
Figura 3-29. Grafica Caja y Bigotes de las dos muestras Qst IDEAM 1982-1998 y Qst LEH-LF 1989-2005.....	51
Figura 3-30. Grafica de densidades suavizadas de las dos muestras Qst IDEAM 1982-1998 y Qst LEH-LF 1989-2005.....	51
Figura 3-31. Grafica de Cuantiles de las dos muestras.....	54
Figura 3-32. Regresión potencial de datos IDEAM – LEH-LF. R2 = 0.67.....	55
Figura 3-33. Normalidad de los residuos.....	56
Figura 3-34. Residuos Estudentizados vs. Predicho Qst (Ton/día).	57
Figura 3-35. Residuos Estudentizados vs. Número de fila.....	57
Figura 3-36. Grafica de Caja y Bigotes para Qst IDEAM 1972 - 2012.....	58
Figura 3-37. Grafica de aberrantes con Limites Sigma para Qst IDEAM 1972-2012(Ton/día).....	59
Figura 3-38. Grafica de Probabilidad normal para Qst IDEAM 1972-2012 (Ton/día).....	59
Figura 3-39. Concentración de sedimentos en suspensión – Estación Calamar 1972 – 2012. Curvas de Calibración para máximos, medios y mínimos.	60
Figura 3-40. Concentración media de sedimentos en suspensión, Rio Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom con mediciones 2006-2014, y Curvas de Calibración de los datos de referencia.....	62
Figura 3-41. Concentración de sedimentos en suspensión a partir del ABSprom del ADCP 2006 -2014. Rio Magdalena K5 – K8.	62
Figura 3-42. Concentración media de sedimentos en suspensión a partir del ABSprom del ADCP, Rio Magdalena K5 – K38, entre 2006 – 2014. Mediciones históricas y de referencia.....	63
Figura 3-43. Relación entre $SSC_{max-IDEAM}$ VS. SSC_{ABS2}	63
Figura 3-44. Serie 2006 – 2014 de concentración media de sedimentos en suspensión, rio Magdalena K5 – K38.	64
Figura 3-45. Gráfica de cajas y Bigotes para la Concentración de Sedimentos en suspensión 2006 – 2014, para el rio Magdalena K5 – K38.	65
Figura 3-46. Transporte total de sedimentos en suspensión, Rio Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom del ADCP.	66
Figura 3-47. Transporte total de sedimentos en suspensión, rio Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom del ADCP. Y mediciones IDEAM y LEHLF.	66
Figura 3-48. Serie 2006 – 2014 de Transporte total de sedimentos en suspensión, rio Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom del ADCP.	67
Figura 3-49. Gráfica de cajas y Bigotes para el Transporte Total de Sedimentos en suspensión determinada a partir del ABS del ADCP, 2006 – 2014, para el Rio Magdalena K5 – K38.....	68
Figura 3-50. Serie de caudales del Rio Magdalena 2006 – 2014, Calamar (K120), comparada con la SSC_{ABS} del ADCP (sector K5 – K38) y de la regresión del IDEAM.	69
Figura 3-51. Serie de caudales del Rio Magdalena 2006 – 2014, Calamar (K120), comparada con el Qst_{ABS} del ADCP (sector K5 – K38) y de la regresión del IDEAM.....	70

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han incrementado, para la estimación de parámetros físicos en diferentes sistemas naturales, las mediciones intrusivas con tecnologías acústicas, láser y dispositivos ópticos. En el caso particular de los ríos, y dada la escasez de información sedimentológica se han utilizado las mediciones acústicas del Perfilador de Corriente (ADCP) para la estimación de la concentración de sedimentos en suspensión (SSC). Esto se debe a que los métodos tradicionales (muestreadores puntuales e integradores), si bien han demostrado ser métodos precisos, consumen más tiempo en la toma y procesamiento de muestras, y costos. Mientras que, estas nuevas tecnologías ofrecen una mejor resolución espacial del fenómeno físico, reducción del tiempo de medición y optimización durante el procesamiento de la información una vez se encuentre calibrado el equipo ADCP.

El río Magdalena (Colombia) se encuentra clasificado entre los primeros 30 sistemas fluviales del mundo en función del caudal; y en el listado de los 10 primeros por su concentración de sedimentos en suspensión. Las entidades oficiales encargadas de su monitoreo hidrosedimentológico son la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). En el tramo final de su desembocadura K0 a K120 (Calamar), CORGMAGDALENA a través de Laboratorio de Estudios Hidráulicos de Las Flores, operado por la Universidad del Norte, realizó entre 1989 y 2005 aforos sólidos con el muestreador puntual USP-61 y los aforos líquidos con un correntómetro A-OTT modelo C-31. El IDEAM también realizó entre 1982 y 1998 aforos sólidos y líquidos con botella plegable y correntómetro A-OTT modelo C-31, respectivamente. A partir del 2006 CORMAGDALENA ha continuado las mediciones sólo con ADCP - Río Grande de 600 kHz.

Este documento contiene los resultados de la investigación enfocada aplicar un modelo teórico estadístico para estimación de la concentración media de sedimentos en suspensión, a partir de mediciones del Perfilador de Corriente ADCP, en el sector K5 al K38 del río Magdalena realizadas entre el 2006 al 2014.

El modelo teórico aplicado se basa en la ecuación del Sonar simplificada (Urlick, 1983) la cual fue utilizada para corregir la señal retorno del ADCP, analizando los efectos de dispersión geométrica y absorción del fluido. Sin embargo para el caso de estudio, río Magdalena K5- K38, no se realizó corrección por atenuación del sedimento puesto que no se contaban con mediciones al tiempo de ADCP y de concentración de sedimento en suspensión con métodos tradicionales. Este modelo fue calibrado utilizando el método estadístico de simulación de Montecarlo con las 51 mediciones hidrosedimentológicas del río Magdalena en el sector Calamar (K120) a Bocas de Ceniza (K0), realizadas por el IDEAM (1982 – 1998) y el LEHLF (1989 – 2005), y los promedios mensuales de transporte de sedimentos entre 1972 – 2012 entregados oficialmente por el IDEAM para la estación de Calamar.

Esta investigación propone una metodología para la estimación de los sedimentos en suspensión a partir de información obtenida con equipos Doppler (ADCP) utilizando simulación de Montecarlo, aplicando modelos explícitos para estimar mediante análisis de señales acústicas la concentración del sedimento en cualquier sección transversal. Con lo cual ha sido posible reconstruir las condiciones hidrosedimentológicas del río Magdalena entre 2006 y 2014.

OBJETIVOS

- Estimar la concentración media de sedimentos en suspensión, aplicando un modelo teórico estadístico basado en la ecuación del Sonar Simplificada y simulación de Montecarlo, usando mediciones del Perfilador de Corriente ADCP.
- Determinar el transporte de sedimento en suspensión en el río Magdalena a partir de la reconstrucción histórica de la concentración media de sedimentos en suspensión utilizando el modelo teórico estadístico, descrito en el objetivo anterior, para el sector de estudio Puerto de Barranquilla a PIMSA (K5 – K38) desde el año 2006 al 2014.

JUSTIFICACIÓN

Entre 1982 y 2005 el IDEAM y CORMAGDALENA realizaron mediciones hidrosedimentológicas desde Calmar (K120) hasta Bocas (K0). A partir del 2006 se realizaron sólo aforos líquidos con ADCP Río Grande de 600 kHz, dejándose de realizar los aforos sólidos. Entre los años 2006 a 2014 se realizaron un total de 1602 aforos líquidos con ADCP en diferentes secciones del río Magdalena, entre Bocas de Ceniza y PIMSA (K0 – K38), cubriendo un período de registro de nueve años de mediciones. Estas mediciones cubren tres escenarios asociados al comportamiento hidrológico e hidráulico del río: niveles máximos, medios y bajos del flujo. En virtud de lo anterior, esta investigación propone aplicar un modelo teórico estadístico, que utiliza la ecuación del Sonar Simplificada y simulación de Montecarlo, con el fin de aprovechar los registros ADCP disponible del 2006 - 2014 y calibrar con las mediciones históricas con métodos directos para determinar las concentraciones media y transporte total de sedimento en suspensión.

Otra forma de calibrar las mediciones ADCP, para determinar SSC, consiste en efectuar mediciones simultáneas con muestreadores puntuales. Y correlacionar las concentraciones de sedimentos en suspensión determinadas con el muestreador puntual con la medición del ADCP. Para esto se tendría que tener un período de mediciones de al menos un año hidrológico (aguas altas, medias y bajas) y un número importante de registros por la dispersión que en condiciones naturales presenta el fenómeno de transporte del sedimento. Además, estos métodos tradicionales con muestreadores puntuales, si bien han demostrado ser precisos, requieren tiempos prolongados de medición, procesamiento en laboratorio de las muestras y costos relativamente elevados.

La metodología planteada permite tener no sólo una herramienta robusta para la estimación de la concentración de sedimentos en suspensión, sino también reconstruir la historia del comportamiento hidrosedimentológico con información precisa, confiable y representativa.

El transporte de sedimentos determinado a partir de mediciones ADCP es de gran importancia para el conocimiento hidrosedimentológico del río Magdalena, especialmente en la cuenca baja, y aportar información fundamental para la aplicación de modelos numéricos hidro-morfodinámicos en los proyectos de infraestructura fluvial y portuaria, los cuales hoy adolecen de esta información, tanto en Colombia como en otros países Latinoamericanos.

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 ESTADO DEL ARTE

La tecnología acústica Doppler es una potencial herramienta para obtener información de las concentraciones de sedimento en suspensión, analizando la intensidad de la señal de retorno ó backscatter. En la literatura existen dos aproximaciones: la primera consiste en el uso de las ecuaciones de la teoría acústica que describen la propagación del sonido en agua (Holdaway et al, 1999; Thorne y Hanes, 2002; entre otros); y la segunda utiliza expresiones empíricas que relacionan cambios en la intensidad de la señal acústica de retorno recibida por el ADCP con variaciones de la concentración de partículas en suspensión medidas en campo, utilizando instrumental mecánico y acústico u óptico (Latosinski, y otros, 2011; Wright, Topping, & Williams, 2010; Gray & Gartner, 2008; Szupiany et al, 2009; Wall, Nystrom, & Litten, 2006; Kostaschuk et al, 2005; Gartner J. W., 2004; Kim, y otros, 2004; Filizola & Guyot, 2004; Poerbandono & Mayerle, 2002; Creed, Pence, & Rankin, 2001).

Después de varias sustituciones la Ecuación del Sonar puede ser escrita en términos de la concentración y el backscatter, como sigue:

$$\text{LOG}_{10} \text{SSC} = A * (\text{RL} + 2\text{Tl}) + K_T \quad \text{Ec. 1}$$

ó

$$\text{SSC} = 10^{A*\text{ABS}+B} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde,

SSC, es la concentración másica total de sedimentos en suspensión (incluye el material grueso y fino)

ABS = RL + 2Tl, y es el Acoustic Backscatter o señal corregida

RL, es la señal cruda de retorno del ADCP

2Tl, es la corrección por pérdidas de transmisión

B = K_T = 0.1K₂, es el intercepto y la constante que engloba parámetros característicos del instrumento y del material en suspensión. Varía para diferentes instrumentos y rangos de tamaño de grano.

K₂, es el parámetro que incluye el nivel de la fuente, target strength, volumen sondeado, y masa del material en suspensión.

A, es la pendiente de la relación lineal entre el *LOG₁₀ SSC* y el *ABS*.

Los valores teóricos de *A=0.1* y *B=0.1K₂* son apropiados para una concentración uniforme de partículas sedimento de la misma masa. Para una distribución de partículas en campo, estos valores concuerdan con valores experimentalmente revisados por la regresión del Backscatter (*ABS*) del ADCP con las mediciones estimadas de concentración total de sedimentos en suspensión de la misma ubicación (Gartner J. W., 2004). Además, Thevenot, Prickett, & Kraus (1992) determinaron que *B* ó *K_T* puede estar entre 0.97 y 1.43 basados en datos de laboratorio y calibraciones de campo, respectivamente. También estimaron valores para el coeficiente multiplicativo *A* iguales a 0.077 en el laboratorio y 0.042 en campo. Por tanto, la Ecuación 1 ó 2 puede ser utilizada para estimar series de *SSC* desde el *ABS* en cualquier distancia desde donde la señal acústica del transducer

obtiene datos válidos del backscatter, una vez son aplicadas las correcciones por pérdidas de transmisión y los valores de la pendiente e intercepto son determinadas.

Las mediciones con ADCP tienen las ventajas de realizarse con la embarcación en movimiento, con una alta resolución espacial y temporal. Sin embargo, el ADCP para medir concentraciones precisas de sedimento en suspensión aún requiere mayores pruebas de la influencia de la calidad y el tamaño no uniforme de partículas en suspensión sobre la intensidad de retorno (Latosinski, y otros, 2011). Con la determinación de la concentración total de sólidos en suspensión (arenas y material fino) es posible reconstruir el transporte para cada caso de estudio. A continuación se citan los resultados de diferentes autores, los cuales han encontrado buenos resultados en la estimación de los parámetros A y B.

Gartner & Cheng (2001) y Gartner (2002) mencionaron las limitaciones de usar los datos del echo intensity del ADCP para estimar SSC. La primera limitación consiste en que los sensores acústicos son más sensible a las partículas grandes mientras que los sensores ópticos son más sensibles a las partículas pequeñas. La comparación entre el equipo Optical Backscatter Sensor (OBS) y el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP), mostró que para las muestras de arenas (partículas > 62.5 μm) los métodos acústicos concuerdan muy bien con el método óptico (OBS). Sin embargo, para los sedimentos finos (partículas < 62.5 μm), las estimaciones acústicas son ligeramente inferiores a las ópticas. La segunda limitación esta asociada a la relación entre la frecuencia del instrumento y la distribución del tamaño de las partículas. Según Urick (1983) el límite de detección de las partículas acústicas es determinado por el radio de la circunferencia de la partícula (asumiendo una forma esférica). Es decir, el metodo acústico para frecuencias de 1200kHz es mas apropiado para tamaños de particulas entre 10 y 400 μm . Y si la frecuencia es el doble (2400 kHz), los diametros corresponden a la mitad d elos de 1200 kHz. La investigación de Gartner & Cheng (2001) fue realizada con datos tomados en Bahía de San Francisco en los sitios San Mateo y Puente Dumbarton, entre del 19 al 23 y del 23 al 28 de Octubre de 1998 respectivamente. El modelo se basó en la ecuación del Sonar simplificada utilizada para corregir la señal retorno de los ADCP, para efectos de dispersión geométrica y absorción del fluido. No se considero corrección por atenuación del sedimento en suspensión puesto que los rangos de profundidad de la Bahía son menores a 2m. Y se emplearon ADCP de diferentes frecuencias (1200 y 2400 kHz). Los resultados de la calibración muestran los siguientes valores para los parametros A y B, ver Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Estimación estadística de los sólidos totales suspendidos, Bahía de San Francisco. Fuente: Gartner & Cheng, 2001.

<i>Frecuencia del ADCP (kHz)</i>	<i>Estación</i>	<i>Coefficientes de Regresión</i>		<i>Diferencia con la media del OBS (%)</i>
		<i>Pendiente, A</i>	<i>Intercepto, B</i>	
1200	SMB98B	0.129	-7.419	55
2400	SMB98B	0.125	-5.624	44
1200	DB98B	0.095	-4.541	35
2400	DB98B	0.092	-3.428	31

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Kim & Voulgaris, 2003), realizó un estudio sobre mediciones acústicas con ADCP y ópticas con OBS para estimar concentración de sedimentos en suspensión en la Bahía Winyah Bay cerca de Georgetown (South Carolina). El modelo se basó en la ecuación del Sonar simplificada utilizada para corregir la señal retorno de los ADCP, para efectos de dispersión geométrica y absorción/atenuación del fluido y sedimento en suspensión. Adoptando las formulaciones de Thorn et al. (1993) and Holdaway et al. (1999) para el cálculo de la

atenuación por el sedimento en suspensión, encontraron que el rango del coeficiente de atenuación del sedimento (α_s) estaba entre 10^{-3} y 10^{-4} . Y asumieron un coeficiente de atenuación del fluido de $\alpha_f = 0.48 \text{ dB/m}$. Los valores del coeficiente de atenuación por el sedimento (α_s) son mucho menores que el coeficiente de atenuación por el fluido (α_f), entonces los autores decidieron omitir los efectos de la atenuación por los sólidos suspendidos. Esto también fue asumido en los estudios realizados en la Bahía de San Francisco por Gartner y Cheng (2001). Y los resultados de la calibración arrojaron un valor de la pendiente A igual a 0.43 y el intercepto B igual a -104.65, y los errores asociados con intervalo del 95% de confianza son ± 0.0075 y ± 1.75 respectivamente.

Gartner (2004) realizó la “Estimación de las concentraciones de sólidos en suspensión a partir de las mediciones de intensidad del backscatter del ADCP en la Bahía de San Francisco, California”. Se utilizaron los ADCP de 1200 y 2400 kHz, y se calibró usando con instrumento óptico (OBS). El modelo se basó en la ecuación del Sonar simplificada la cual fue utilizada para corregir la señal retorno de los ADCP, para efectos de dispersión geométrica y absorción/atenuación del fluido y sedimento. Se realizó la calibración para la sección Puente San Mateo (SMB) entre Octubre 19 y 23 de 1998 y Febrero – Marzo de 1995, y Puente Dumbarton (DB) entre Octubre 23 y 29 de 1998. Los datos de 1998 corresponden a la misma información utilizada por Gartner & Cheng (2001), sin embargo se obtuvieron diferentes resultados para la sección. Los resultados de los coeficientes de la regresión fueron $A_1=0.04933$ y $B_1=-0.74593$ para la sección SMB98, y $A_2=0.04015$ – $B_2=-0.57666$ para la sección SMB95; con diferencias en el valor medio del OBS del 25% (ver Tabla 1-2). Las pendientes entre 0.04 y 0.05 sugieren que el tamaño medio de las partículas o algunas otras características del material en suspensión pueden haber sido diferentes durante Febrero – Marzo de 1995 y Julio – Octubre de 1998. Sin embargo, no se tuvieron datos del tamaño de las partículas durante estos estudios de campo para determinar las razones potenciales en las diferencias de las pendientes. También obtuvieron resultados de las regresiones de la misma ubicación (SMB y DB) para diferentes zonas de la sección (top, middle and bottom), con los ADCP’s de frecuencias de 1200 y 2400 kHz, ver Tabla 1-2. El parámetro A varía en mayor proporción al cambiar de fecha, y no de frecuencia. Esto indica que las variaciones espaciales del material en suspensión es un factor más influyente que la frecuencia del instrumento. Este resultado se debe a la naturaleza de las partículas en suspensión, las cuales son más arenas que material fino (Gartner J. E., Cheng, Wang, & Richter, 2001) y en consecuencia menos susceptibles a las limitaciones de la técnica basada en la frecuencia para tamaños de partículas más pequeñas. En cualquier caso, las calibraciones son para sitios y tiempos específicos porque, los sensores de una sola frecuencia son altamente dependientes del tamaño de las partículas. En la Tabla 1-2 se presentan los resultados de los coeficientes de la regresión entre estimaciones de sólidos suspendidos a partir de ADCP y OBS.

Tabla 1-2. Coeficientes de la regresión entre estimaciones de sólidos suspendidos a partir ADCP y OBS. Fuente: Gartner, 2004.

Frecuencia del ADCP (kHz)	Localización del bin OBS y ADCP	Coeficientes de Regresión		Diferencia con la media del OBS (%)
		Pendiente, A	Intercepto, B	
1200	SMB-TOP	0.11492	-6.24411	45.3
1200	DB-TOP	0.09274	-4.34931	35.0
2400	SMB-TOP	0.10943	-4.46387	34.5
2400	DB-TOP	0.08955	-3.145	30.9
1200	SMB98	0.04933	-0.74593	25.0
1200	SMB95	0.04015	-0.57666	25.5

La estimación del transporte de sedimentos a partir de mediciones con ADCP también ha sido realizada por U.S. Geological Survey (Wall, Nystrom, & Litten, 2006), logrando describir un método procedimental para calibrar las mediciones de echo intensity (EI) del ADCP - Río Grande de 614 kHz a concentración de sedimentos en suspensión (SSC) empleando un muestreador simple P-61, en el río Hudson en New York. Se trabajó con 74 secciones transversales tomadas en Junio 2001. La metodología consiste en convertir el EI en counts a dB, normalizando el beam, y realizando las correcciones por los efectos de dispersión del haz acústico, absorción acústica por el agua y atenuación por el sedimento. De esta forma fueron determinados los parámetros que relacionan la concentración de sedimentos en suspensión (SSC_{bin}) con el Acoustic Backscatter (ABS_{bin}) por bin ó celda de la sección transversal. Esta ecuación es expresada en función de la temperatura (WT) en grados Celsius, como se presenta a continuación:

$$SSC_{bin} = 10^{\overline{ABS}_{bin} \times 0.034 - WT \times 0.019 - 1.018} \times 1.033$$

Topping, Wright, Melis, & Rubin (2007) presentaron un método para discriminar los limos y arcillas de las arenas en suspensión, a partir de múltiples frecuencias de un sistema acústico. El sector de estudio comprende varias secciones a lo largo del Río Colorado en el Gran Cañón, utilizando un vector de tres frecuencias del perfilador acústico Doppler sideways-looking de 2 MHz, 1 MHz y 600 kHz. Y con los equipos: Sequoia Scientific LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry), LISST-100X y LISST-25X, y un muestreador automático ISCO 6712, realizaron comparaciones de los resultados de concentración de sedimentos en suspensión y tamaños del sedimento. Para la calibración de las mediciones acústicas se utilizó el método convencional de muestreo Equal-Discharge-Increment (EDI) descrito por Edwards and Glysson (1999), con los equipos: muestreador integrador puntual P-61, y los muestreadores de integradores en profundidad D-77 y D96. La frecuencia de 1MHz EZQ fue calibrada usando 341 mediciones EDI, entre 12 Febrero 2003 y 19 Septiembre 2005; la de 2 MHz EZQ con 74 mediciones EDI, entre 30 Septiembre de 2004 y 19 Septiembre de 2005; y la de 600 kHz Aquadopp con 65 mediciones EDI, entre 19 Septiembre de 2004 y 19 Septiembre de 2005. La metodología relaciona el acoustic backscatter, el coeficiente de atenuación por el sedimento en suspensión, la concentración de sedimentos en suspensión, y la distribución del tamaño de las partículas. Es decir, el coeficiente de atenuación por el sedimento en suspensión es usado para medir la concentración de limos y arcillas, y el Acoustic Backscatter en cada frecuencia es usado para medir la concentración de arenas en suspensión en un rango de tamaños de grano. El modelo para estimar los parámetros de la regresión que convierte el Acoustic Backscatter en concentración de sedimentos en suspensión, se basó en la ecuación del Sonar simplificada; utilizada para corregir la señal retorno de los ADCP, para efectos de dispersión geométrica, absorción del fluido, y atenuación por el sedimento en suspensión. Los resultados muestran que el coeficiente de atenuación del sedimento tiende a correlacionarse fuertemente con las concentraciones de limo y arcilla, con un R2 de 0.95 para 2 MHz y 1 MHz, y 0.94 para la frecuencia de 600 kHz; basados en 40213 mediciones con LISST-100, con una mediana y promedio del tamaño de grano de 0.012 y 0.0014 mm respectivamente. Y los parámetros de la relación entre el Backscatter y la concentración de arenas en suspensión a partir de las mediciones EDI, para la frecuencia de 2 MHz y a 1.6m de profundidad del instrumento, obtuvieron un valor de: pendiente A=0.11 y un intercepto B=-7.53 con R2 de 0.95, para arenas de 0.0625-0.105 mm de diámetro; y A=0.11 y B=-7.44 con R2 de 0.97, todos los tamaños de arenas entre 0.0625 y 2.0 mm. Estos resultados indican que tomar mediciones diarias con equipos acústicos de diferente frecuencias, permiten tener un registro más completo y preciso de las

mediciones de concentración y transporte de sedimentos que utilizando métodos de muestreo convencionales.

La U.S. Geological Survey (Wright, Topping, & Williams, 2010) realizó una discriminación entre limos - arcillas y arenas en suspensión, a partir de perfiladores acústicos side-looking de 1.5kHz, en el Río Gunnison, CO. Basado en el estudio presentado por Topping, Wright, Melis, & Rubin (2007), realiza las correcciones para efectos de dispersión geométrica, absorción del fluido, y atenuación por el sedimento en suspensión. Los resultados muestran que el coeficiente de atenuación por el sedimento en suspensión tiende a correlacionarse fuertemente con las concentraciones de limo y arcilla, con un R2 de 0.98; mientras que, el backscatter corregido (ABS) promedio esta correlacionado con el logaritmo de la concentración de arenas en suspensión con un R2 de 0.89, pendiente A=0.13 e intercepto B=-9.23.

Latosinski, y otros (2011) realizó "La Estimación de la Concentración y Transporte de Sedimentos de Fondo en Suspensión con Perfilador Acústico Doppler" para el Río Paraná y en un cauce secundario. El perfilador es el ADCP Teledyne RDI de 1200 kHz. El modelo se basó en la ecuación del Sonar simplificada la cual fue utilizada para corregir la señal retorno de los ADCP, para efectos de dispersión geométrica y absorción/atenuación del fluido y sedimento. El valor obtenido para el coeficiente de absorción acústica por el agua, α_f , es de 0.2974 dB/m. Para el caso del coeficiente de absorción por el sedimento, α_s , el valor se obtiene a partir de una curva teórica (Gartner J. W., 2004), y el resultado es una atenuación mínima para diámetros de sedimento en suspensión de 0.1mm, incrementandose para diámetros mayores o menores. Para el sistema del río Paraná se tiene un diametro medio de sedimentos de fondo de 120 μm , y material fino (limos y arcillas) de 8 μm . El valor de α_s promedio obtenido para todas las verticales es de 0.065 dB/m. Este valor incluye la componente de material fino, de 0.061 dB/m, y la componente aportada por el material grueso, de 0.004 dB/m. El valor de α_s de 0.065 dB/m es muy pequeño, comparado con α_f de 0.2974, lo que indica que la atenuación por el sedimento en suspensión no adquiere relevancia significativa. Mientras sus concentraciones en el medio se mantengan en valores bajos, y el tamaño de sedimento sobre el limite inferior de la curva teórica de atenuación por sedimento. Sin embargo, el autor sugiere que no se debe dejar de evaluar el orden de magnitud de la atenuación, pues su omisión podría llevar a errores importantes en la estimación de la pérdida de transmisión de energía acústica. Los resultados de la relación entre la concentración de material grueso (CSS) y la señal corregida del ADCP (SCS) presentan un R2=0.91. La pendiente de la recta de ajuste tiene una valor de A igual a 0.13, que se aproxima al valor teorico de 0.1, y el intercepto B tiene un valor de -9.5. A continuación se presenta le ecuación obtenida:

$$CCS = 10^{0.129 * SCS - 9.514} \quad Ec. 3$$

Otro resultado interesante de este estudio (Latosinski, y otros, 2011) es la pobre relación que existe entre las concentraciones de material fino en suspensión (Cw), y la señal corregida del ADCP (SCS), debido a la sensibilidad exclusiva de la frecuencia de trabajo de 1200 kHz hacia el tamaño de las particulas de arenas. Por otro lado, la comparación entre el transporte de sedimento de fondo en suspensión, obtenido por método tradicional, y con ADCP, desde plataforma móviles, presentan diferencias menores al 25%. Lo cual avala la metodología propuesta, y el uso de los ADCP para la cuantificación de la concentración y transporte en suspensión.

En Colombia, (Restrepo & Pierini, 2012) realizaron la investigación “Medición De La Concentración De Sedimentos En Suspensión Mediante Dispositivos Ópticos Y Acústicos: Aplicación En Sistemas Tropicales (Delta del río Mira, Colombia)”. En el trabajo se implementó un procedimiento de calibración para un dispositivo OBS-3A, tomando como patrón de calibración sedimento seco y desagregado de la zona de estudio. Además, se presentan las correcciones a las que se debe someter la señal de respuesta del ADCP, debido a la dispersión geométrica, la atenuación del sonido por el agua y las partículas en suspensión, para que sea útil en la estimación de SSC. Sin embargo, en los dos muestreos realizados no se encontró una relación significativa entre los registros obtenidos con los dispositivos OBS-3A y ADCP, debido principalmente a las condiciones del muestreo. Sin embargo, los datos del OBS-3A y del ADCP mostraron una tendencia similar al registrar incrementos simultáneos de concentración y Echo Intensity (EI) hacia el fondo. Como conclusión, el autor sugiere diseñar un muestreo experimental que incorpore los efectos de la variabilidad del diámetro de partícula, así como un mayor número de mediciones de CSS para encontrar los parámetros de la ecuación del Sonar, que convierte las señales del ADCP en concentración de sedimentos en suspensión.

El río Magdalena ha sido estudiado por varios autores nacionales e internacionales, algunos en cooperación con entidades gubernamentales nacionales y/o internacionales.

A continuación se presenta una revisión de las investigaciones sobre el caudal, concentración y transporte de sedimentos del río Magdalena. Y resultados sobre la erosión de la cuenca del Magdalena.

En el año 2008 se publicó el libro río Magdalena, Navegación Marítima y Fluvial 1986 – 2008 (Alvarado, 2008) presenta una caracterización hidrosedimentológica de las mediciones realizadas: serie de niveles, curvas de correlación nivel-caudal, curvas de remanso medidas y calculadas, velocidades medias, concentración de sedimentos en suspensión, formas de lecho y caracterización geométrica del río. Las mediciones fueron realizadas por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de las Flores (LEH-LF), operado por CORMAGDALENA y La Universidad del Norte, y el IDEAM en los sectores Calamar (K120) a Bocas de Ceniza (K0). Estas mediciones fueron realizadas con correntómetros A-OTT, USP 61, Botellas plegables, y ADCP, siguiendo los protocolos definidos por el IDEAM. Los resultados de las mediciones muestran un caudal medio multianual de 7100 m³/s, y una tasa de transporte de sedimentos anual de 200x10⁶ Ton/año. Según el IDEAM, el caudal medio multianual es de 7200 m³/s y la tasa de transporte de sedimentos anual es de 145x10⁶ Ton/año.

Otros autores han realizado análisis sobre el caudal medio del río Magdalena 7500 m³/s para Wright and Coleman (1973), Coleman (1976), Meybeck (1976, 1979); 7474 m³/s para Milliman and Meade (1983); 7600 m³/s para Vernet (1985); 7421 m³/s para Marín (1992); y 7200 m³/s para Restrepo & Kjerfve (2000). Y sobre el transporte total de sedimentos en suspensión anual existen diferentes aproximaciones. Milliman and Meade (1983) presenta un valor de 220x10⁶ Ton/año, basado en el estudio de NEDECO (1973); Marín (1992) reporta un valor de 133.0x10⁶ Ton/año; y Restrepo & Kjerfve (2000), 144x10⁶ Ton/año.

Según un estudio realizado por la American Society of Civil Engineers ASCE (Schumm & Winkley, 1994), el caudal medio del Río Magdalena es de 7100 m³/s, ocupando el lugar 29 en caudal respecto a otros ríos del mundo, y con respecto a la relación entre el transporte

de sedimentos y caudal ocupa el lugar 8. Las mediciones utilizadas para este análisis corresponden a los datos del LEH-LF. La Tabla 1-3 y

Tabla 1-4 presentan estas estadísticas, con respecto a otros grandes ríos del mundo.

Tabla 1-3. Características de los grandes ríos del mundo. Fuente: Schumm – Winkley, *The variability of large alluvial rivers*, ASCE, 1994.

N°	Río	País	Caudal (m³/s)	Long. (km)	Área (km²)	M.Ton/Año
1	Amazonas	Brasil	180.000	6.450	6.900.000	900
2	Zaire	Zaire	42.000	4.667	3.700.000	70
3	Padma	Bangladesh	39.000	2.900	2.049.000	1.927
4	Orinoco	Venezuela	36.000	2.062	899.000	350
29	Magdalena	Colombia	7.100	1.612	262.000	200

Tabla 1-4. Relación entre transporte de sedimentos y caudal medio. Fuente: Schumm – Winkley, *op. cit.*

N°	Río	País	Concentración (Kg/m³)
1	Ganges	India	2,6
2	Amarillo	China	2,6
3	Padma	Bangladesh	1,6
4	Rojo	USA	1,2
8	Magdalena	Colombia	0,9

Investigadores del Departamento de Geología de la Universidad EAFIT, con el apoyo de COLCIENCIAS, CORMAGDALENA y la Universidad de Colorado en Estados Unidos, han venido analizando las causas y tendencias (1980-2000) de la erosión en el río Magdalena (Restrepo & Syvitski, 2006; Restrepo, et al., 2006a, 2006b; Restrepo, 2008; Restrepo, et al., 2009; Kettner, et al., 2010). En estos estudios se planteó porqué la tasa de erosión del río Magdalena 690 Ton/Km²/año, valor estimado en la estación de Calamar en el 2000, era la más alta del continente en comparación con los grandes ríos suramericanos como el Amazonas (167 Ton/Km²/año), el Orinoco (158 Ton/Km²/año), el Paraná (43 Ton/Km²/año) y el Sao Francisco (10 Ton/Km²/año) Esta alta tasa de erosión según los autores se debe a varios factores naturales: el relieve, reflejado en cuencas montañosas con altas pendientes; la gran actividad tectónica; las diferencias espaciales en la composición de los suelos; un clima con grandes variaciones de temperatura y rangos de precipitación entre los 500 y 6.000 mm al año, así como la capacidad de transporte de sedimentos de los ríos con caudales entre moderados y altos (Restrepo & Kjerfve, 2000a; 2000b).

Restrepo & Kjerfve (2000) realizó en el río Magdalena la variabilidad interanual (1975 – 1995) y revisión del caudal y estimación de la carga de sedimentos. Encontrando que la carga media de sedimentos para el río Magdalena es de 144×10^6 Ton/año, correspondiente a una producción de sedimentos de 560 Ton/Km²/año para los 257438 Km² de la cuenca. Este análisis fue realizado con los 55 datos de mediciones de concentración de sedimentos en suspensión y caudal líquido de la estación IDEAM Calamar 1975 – 1995. Según el LEH-LF la información tomada entre 1972 – 1985 con Botella Delft no es confiable y se sacó de servicio por datos errados. Sin embargo, con las 55 mediciones los autores determinaron la correlación entre el transporte total de sedimentos en suspensión y el caudal, con un R2 de 0.76. Adicionalmente, realizan la correlación de la serie de caudales y transporte total de sedimentos con el Índice de Oscilación del Sur (SOI). Encontrándose que el 69% de la variabilidad de caudales del Magdalena esta explicada por el SOI, con altos caudales durante la fase Niña y bajos

durante la fase Niño, y la serie del transporte total de sedimentos en suspensión (1975 – 1995) indica que la fase niña está caracterizada por una carga alta de 1600×10^3 Ton/día.

Cubillos & Forero (2005) realizaron cinco casos de análisis temporal de la carga de sedimentos transportada por el río Magdalena estimada según la metodología sedimentológica tradicional que parte de la información de 8 estaciones hidrométricas del IDEAM, para el período 1974-2000. Con el objetivo de apreciar si en la información registrada existe una tendencia temporal del crecimiento de la carga de sedimentos para darle validez a las afirmaciones, en el sector de Puerto Salgar – La Gloria, de que la erosión de las cuencas hidrográficas colombianas ha acabado con los ríos que la drenan; y por tanto, la carga de sedimentos registrada debe haberse incrementado con el paso del tiempo. Según los resultados obtenidos se puede decir que no existe evidencia objetiva que sustente esas afirmaciones contundentemente, ya que la carga de sedimentos no registra un aumento apreciable, con tendencia más bien a disminuir o a permanecer aproximadamente constante en la mayoría de las estaciones. Sólo con más de 25 datos de aforos sólidos es posible obtener estimativos aproximadamente confiables de la carga media anual. Otra de las conclusiones del estudio, es que la cuenca del río Magdalena ante la ocurrencia de los fenómenos Niña y Niño en relación con los sedimentos, es coherente con el comportamiento esperado según las condiciones hidroclimatológicas del fenómeno.

Según Restrepo (2015) la cuenca del río Magdalena ha experimentado un incremento en las tasas de erosión del orden del 34%, pasando de $550 \text{ Ton/Km}^2/\text{año}$ antes del año 2000 a $710 \text{ Ton/Km}^2/\text{año}$ en el periodo 2000-2010, con un aumento en el transporte total de sedimentos de 44 Mton/año . Estos resultados fueron obtenidos del modelo BQART, calibrado para el período 1980 a 2010, que combina variables climáticas, hidrológicas, litológicas, morfométricas y del impacto humano por deforestación. Los resultados obtenidos explicaron el 86 % de la variabilidad del transporte de sedimentos en la cuenca. Adicionalmente, el estudio presenta promedios mensuales de las series de caudal y transporte de sedimentos del río Magdalena en la estación IDEAM Calamar. Obteniendo que el caudal promedio de $7.156 \text{ m}^3/\text{s}$ para el periodo 1940-1999, se incrementó a $8.833 \text{ m}^3/\text{s}$ entre los años 2005 y 2011, un aumento de $1.677 \text{ m}^3/\text{s}$ o del 24 % con respecto al promedio interanual de la serie completa del periodo 1940-2011. Y para el transporte de sedimentos, estas tendencias ascendentes fueron igualmente representativas, mostrando un aumento de 100.000 ton/día para el periodo 2005-2011 en relación con el promedio del periodo 1972-1999. Entre los años 2000 y 2011, el caudal promedio fue de $7.783 \text{ m}^3/\text{s}$ y el transporte total de sedimentos en suspensión de 413.898 Ton/día .

1.2 MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SEDIAMENTOS EN SUSPENSIÓN EN RÍOS TROPICALES

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2007) es el encargado de definir los protocolos para mediciones de aguas superficiales. A continuación se presentan aspectos generales del muestreador de sedimentos USP-61 y del perfilador acústico ADCP, los cuales son instrumentales para realizar aforos sólidos y líquidos. También, se exponen las expresiones empíricas que relacionan los cambios en la intensidad de la señal acústica de retorno recibida por el ADCP con variaciones de la concentración de partículas en suspensión para ríos tropicales.

1.2.1 AFOROS SÓLIDOS CON EL MUESTREADOR DE SEDIMENTO USP-61

El aforo sólido se considera como el conjunto de operaciones para determinar la cantidad de sólidos suspendidos que transporta un curso de agua en la unidad de tiempo y para un nivel de agua determinado.

El aforo sólido convencional consiste en tomar muestras de agua en diferentes puntos de la sección de aforo para determinar la concentración y el transporte de sedimento, referenciados al nivel y al caudal que se presenta en la corriente durante el muestreo. Los puntos de medición o muestreo deben coincidir con los realizados en el aforo líquido, pues los primeros están en función de los resultados obtenidos del aforo líquido. Se aprovecha, igualmente, el material sólido recogido en las muestras, para realizar análisis granulométricos que permiten determinar el tamaño de las partículas asociado al tipo de material.

Dependiendo de la profundidad, se realizan mediciones con más detalle tomando muestras en diferentes puntos de la vertical (método puntual). Estas mediciones se inician desde la superficie hasta el fondo, o en su defecto se toma una sola muestra integrada (método integrado) como representativa de toda la vertical.

El U.S.P-61 es un tipo de muestreador integrador puntual. Consisten en un recipiente provisto de una válvula accionada desde la superficie que permite abrir y cerrar a voluntad el acceso del agua y así tomar muestras en los puntos deseados. Conjuntamente con la válvula de acceso funciona un dispositivo de compensación de presiones que facilita la entrada del agua a la misma velocidad del flujo.



Figura 1-1. USP 61. Fuente: USGS, 2006.

La Figura 1-1 presenta un U.S.P. 61, un modelo perfeccionado por el Inter – Agency Committee on Water Resources (Comité interinstitucional de los E.U., sobre Recursos Hídricos), el cual fue construido en forma original con características hidrodinámicas y consta de un cuerpo de bronce fundido provisto de aletas y cola direccional.

En la parte anterior del equipo se aloja un frasco, en Colombia según el IDEAM (2007) se utilizan botellas de 500 cc (0.473 litros). La parte delantera del muestreador es rebatible para permitir el acceso a la cavidad donde se aloja el frasco de la muestra; al cerrarla se ajusta a la boca del frasco un empaque en forma de anillo dejando la botella solamente en comunicación con la válvula de acceso y el escape de aire. El muestreador tiene un peso de 46 kilogramos, (100 libras aprox.). Para el acceso del agua al frasco se emplean tres tamaños de boquillas (de 1/4", 3/16" y 1/8"), para utilizar de acuerdo a la velocidad de agua y tiempo de llenado.

1.2.2 PERFILADOR DE CORRIENTE ACUSTICO DOPPLER – ADCP

Un perfilador de corriente ADCP es un tipo de medición sonar que registra el perfil de velocidad del agua sobre un rango de profundidades. Diseñado por primera vez en 1982 por Teledyne RD Instruments. El ADCP es considerado como una herramienta esencial para la medición de flujos de corrientes en el mar, estuarios, ríos, y arroyos. Los manuales del equipo tienen información adicional y complementaria (RD Instruments, 1996; Teledyne RD Instruments, 2007; Sontek, 2000; Simpson, 2001). A continuación se presenta una descripción breve de los aspectos más importantes del equipo:



Figura 1-2. ADCP – Río Grande de 600 kHz. Fuente: Teledyne RD Instruments, 2008.

La Figura 1-2 presenta el cabezal de un ADCP modelo Río Grande de 600 kHz. Los ADCP miden la velocidad del agua utilizando el principio físico llamado efecto Doppler, que se da cuando sus transductores (o emisores) generan un pulso de sonido corto (ping) a una frecuencia conocida, que se propaga a través del agua y se refleja en todas las direcciones (echoes) por las partículas que se encuentran en suspensión (sedimento, materia orgánica, etc.), ver Figura 1-3. Una porción de la energía reflejada vuelve hacia los transductores y así el ADCP mide el cambio de frecuencia de la señal retorno y su intensidad como se observa en la Figura 1-3. Este cambio medido por cada transductor se traduce en la velocidad del agua en la dirección radial del mismo para luego ser transformada en velocidad del flujo. Y como se tiene la profundidad y ancho de cada celda es posible estimar el caudal de la sección. El cálculo de este caudal se realiza con un error del 2 al 3%.

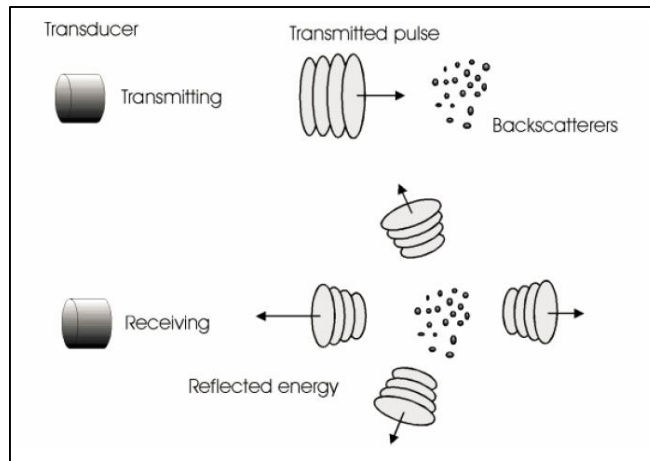


Figura 1-3. Ráfagas de sonido, ecos y backscattereres. Fuente: Simpson, 2001.

El procedimiento de campo consiste en atravesar el río en la sección establecida con una embarcación que no produzca variaciones al campo magnético del aparato. La duración del aforo es el tiempo que demora la embarcación en cruzar el río, como se observa en la Figura 1-4.

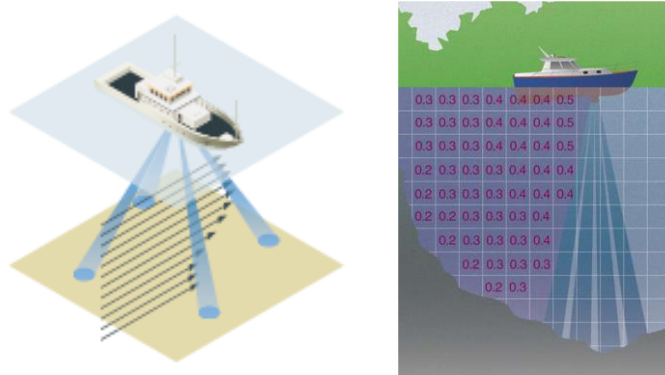


Figura 1-4. Medición de un perfil de velocidad desde una embarcación en movimiento con ADCP.

Fuente: TELEDYNE RD INSTRUMENTS, 2007

El ADCP opera con 3 o 4 haces, según el modelo o marca, compuesto por celdas (bins), cuyo tamaño es variable según lo defina el usuario.

Los ADCP transmiten los pulsos y reciben el retorno con el mismo transductor, por lo que cada haz mide en zonas diferentes. Las distancias entre las zonas de medición de cada haz dependen del ángulo de separación entre éstos, aumentando a medida que se incrementa la distancia al aparato, es decir, con el aumento de la profundidad en una disposición del instrumento vertical hacia abajo. Cada haz mide la velocidad del agua en su eje dentro de las celdas mencionadas. Luego, la combinación de datos de las correspondientes celdas de cada haz, permite al instrumento calcular la velocidad 3D del agua.

La Figura 1-5 presenta el perfil de la columna de agua que miden los ADCPs, el cual está dividido en diferentes regiones (Sontek, 2000; RD Instruments, 1996):

- i. inmediatamente debajo del transductor hay una región donde éste no registra el cambio de frecuencia (blanking distance) debido al rápido retorno de las ondas de sonido,
- ii. luego aparece la zona de medición la cual está dividida en las celdas (bins), y
- iii. una zona cercana al fondo (del 10 % de la profundidad) que no puede ser medida a causa de la interferencia que produce un lóbulo lateral o “side lobe” formado alrededor del haz donde se produce un rebote acústico antes del que ocurre en el lóbulo principal.

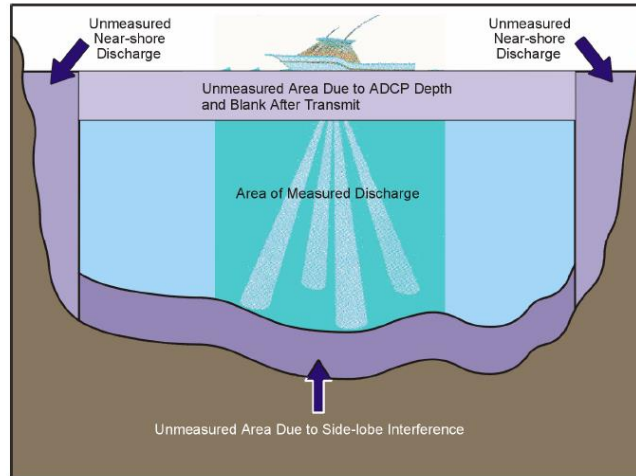


Figura 1-5. Zona de mediciones en la columna de agua. Fuente: TELEDYNE RD INSTRUMENTS, 2007.

La Figura 1-6 presenta otro esquema vertical de la sección de un río, donde se muestra las zonas de medición (top unmeasured, measured zone, bottom unmeasured, y el área cercana a las bancas), y las celdas o bins y las columnas de medición o ensembles.

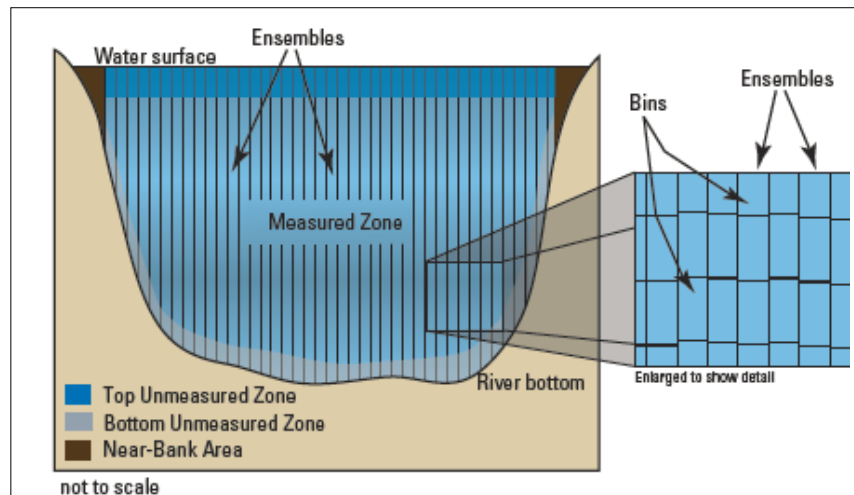


Figura 1-6. Esquema vertical de la sección de un río que muestra la zona de toma de datos del ADCP. Fuente: USGS, 2006.

Además de la información de las tres componentes del vector velocidad de flujo en cada celda, la cual es necesaria para la caracterización del flujo y la cuantificación de caudales, el ADCP registra información adicional, como por ejemplo la amplitud de la señal acústica de retorno o echo intensity (EI). Este es un parámetro de control de calidad y es medido en *counts* para cada haz. Los altos echo intensity pueden mostrar objetivos sólidos (límites, obstrucción o peces), mientras que los bajos echo intensity puede mostrar insuficiencia de dispersión o límites del rango de perfiles para el medio ambiente. El echo intensity de cada haz en counts debe ser convertido a decibeles (dB), y ello se logra multiplicando los valores de counts por factores específicos para cada haz, con un error de ± 1.5 dB relativo a la medición. Cuando el pulso emitido o Echo en dB (para el ensemble) se conoce como Backscatter (dB) cuando es corregido en función de las pérdidas de transmisión de la señal en su paso de ida y vuelta a lo largo del haz, medido también en dB.

El software Winriver II, desarrollado por TELEDYNE RD INSTRUMENTS, permite la lectura del archivo generado por el ADCP, y calcula el Backscatter teniendo en cuenta la corrección del echo intensity por absorción del sonido, dispersión del haz (beam spreading) y temperatura del transductor, el cual provee una excelente información para la estimación de la concentración de sedimentos en suspensión.

1.2.3 MODELO PARA ESTIMAR CONCENTRACIONES DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN UTILIZANDO INFORMACIÓN ADCP

Este modelo se basa en la ecuación que describe la raíz cuadrada media de la presión de la señal de retorno producida por las partículas en suspensión, esta es (Thorne y Hanes, 2002):

$$P_{rms} = P_0 r_0 f_s \left[\frac{3SSC\tau c}{16a_s \rho_s} \right]^{1/2} \frac{0.96}{ka_t \psi r} \exp\{-2\alpha r\} \quad Ec.4$$

Dónde,

P_0 : Presión de referencia en el rango r_0

r : Distancia desde el transductor

a_s : Radio de la partícula

a_t : Radio del transductor

τc : Longitud del pulso

τ : Duración del pulso

c : Velocidad del sonido en agua

ρ_s : Densidad de la partícula

$k = 2\pi/\lambda$: Número de onda

$\lambda = c/f$: Longitud de onda acústica

f : Frecuencia de trabajo

SSC: Concentración másica

f_s : Forma de la función que describe las propiedades de dispersión (scattering) de la partícula

ψ : Corrección por campo cercano del transductor

α : Coeficiente de atenuación para pérdidas de transmisión debidas al fluido y al sedimento en suspensión.

La Ecuación 4 esta expresada en términos de los parámetros internos característicos del instrumento, y mediante varias sustituciones y pasos algebraicos, se llega a la expresión simplificada de la ecuación del Sonar. La cual, relaciona la señal retorno (Backscatter) con el logaritmo de la concentración másica de sedimentos en suspensión (Urlick, 1983). A continuación se presenta esta expresión:

$$\text{LOG}_{10} \text{SSC} = A * (\text{RL} + 2\text{TL}) + K_T \quad \text{Ec. 5}$$

ó

$$\text{SSC} = 10^{A*\text{ABS}+B} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde,

SSC: Concentración másica total de sedimentos en suspensión (incluye el material grueso y fino)

ABS = RL + 2TL: Acoustic Backscatter o señal corregida

RL: Señal cruda de retorno del ADCP

2TL: Corrección por pérdidas de transmisión

$B = K_T = 0.1K_2$, es el intercepto y la constante que engloba parámetros característicos del instrumento y del material en suspensión. Varía para diferentes instrumentos y rangos de tamaño de grano.

K_2 : Parámetro que incluye el nivel de la fuente, target strength, volumen sondeado, y masa del material en suspensión.

A: Pendiente de la relación lineal entre el $\text{LOG}_{10} \text{SSC}$ y el *ABS*.

La Ecuación 5 es lineal e indica que con los valores de la señal del equipo corregido y los correspondientes de la concentración de sedimentos se puede obtener la pendiente e intercepto de su regresión, y con ello lograr la calibración que permitirá estimar posteriormente la concentración de sedimentos en una vertical.

Según Gartner (2004), en la Ecuación 5 ó 6, los valores teóricos $A=0.1$ y $B=0.1K_2$ son apropiados para una concentración uniforme de partículas de sedimento de la misma masa.

En la Ecuación 5, al término $\text{RL} + 2\text{TL}$, se lo considera señal corregida, pues ajusta el eco que recibe el equipo en función de las pérdidas de transmisión de la señal en su paso de ida y vuelta a lo largo del haz. Cabe aclarar que los valores de *RL* son los valores crudos registrados en el equipo, en counts; éstos deben convertirse a decibeles (dB) y ello se logra multiplicando los valores en counts por factores específicos para cada haz (y para cada modelo y marca de instrumento). Respecto al término *2TL*, éste contempla la pérdida en la señal de retorno. Pues la señal sonora de un ADCP en agua dulce es sometida a la absorción y dispersión, llevada a cabo tanto por las moléculas de agua, como por las partículas presentes en el cuerpo de agua. Estos procesos se traducen en una pérdida de señal acústica, es decir, el eco del sonido emitido es recibido con menor intensidad en el ADCP. La siguiente ecuación es la expresión que permite obtener la señal corregida:

$$2\text{TL} = 20 \text{Log}_{10}(\psi r) + 2\alpha_f r + 2\alpha_s r \quad \text{Ec. 7}$$

Puesto que $\text{ABS} = \text{RL} + 2\text{TL}$, entonces el Acoustic Backscatter es igual a:

$$ABS = RL + 20 \text{Log}_{10}(\psi r) + 2\alpha_f r + 2\alpha_s r \quad \text{Ec. 8}$$

El primer término de la Ecuación 7 ($20 \text{Log}_{10}(\psi r)$) corresponde a las pérdidas debidas a la dispersión del haz (beam spreading), el segundo ($2\alpha_f r$) y tercero ($2\alpha_s r$), a las pérdidas debidas a la absorción del sonido por el fluido y a la atenuación por el sedimento en suspensión, respectivamente.

En la expresión para calcular las pérdidas debidas a la dispersión del haz, el parámetro ψ y es la corrección por campo cercano del transductor, cuya expresión es (Downing et al, 1995):

$$\psi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}} \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

$$z = \frac{R\lambda}{\pi\alpha_t^2} \quad \text{Ec. 10}$$

$$R = r + \frac{H_B}{4} \quad \text{Ec. 11}$$

r (previamente presentada), es la distancia oblicua desde la cara del transductor al centro del bin y H_B es el tamaño del bin.

El segundo término, $2\alpha_f r$ de la Ecuación 7, que corrige la pérdida de señal debida a los efectos de absorción acústica por el agua, está directamente relacionada a la frecuencia de trabajo del ADCP y de la salinidad, temperatura y presión en la columna de agua. Interviene allí el coeficiente de absorción acústica por el agua, α_f , cuya expresión (en nepers/m) es la siguiente (Schulkin y Marsh, 1962):

$$\alpha_f = \left(\frac{S_a A f_T f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{3.38 \times 10^{-6} f^2}{f_T} \right) (1 - 6.54 \times 10^{-4} P) \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde:

S_a : Salinidad

A: Constante del proceso de relajamiento iónico en agua de mar

P: Presión del agua

$f_T = 21.9 \times 10^{[6 - (1520/T + 273)]}$: Frecuencia de relajación dependiente de la temperatura

El tercer término, $2\alpha_s r$ de la Ecuación 7, contempla los efectos de pérdida por atenuación del sedimento en suspensión, que para la frecuencia de trabajo utilizada y los rangos de tamaño de partícula presentes, está conformada por una componente de pérdida viscosa y otra de dispersión. Ambas varían en forma opuesta conforme se deslice ascendente o descendientemente sobre el rango de tamaño de partícula. La componente de pérdida viscosa aumenta a medida que el tamaño del sedimento decrece y lo opuesto ocurre para la componente de dispersión. Esta corrección suele no considerarse en la mayoría de los trabajos indicados en la bibliografía, a excepción de los más recientes que cuentan con la instrumentación necesaria para medir este efecto. La incertidumbre sobre la magnitud de la atenuación sugiere confeccionar la curva de atenuación teórica respectiva para

determinar si la misma será o no importante en la estimación de la concentración de sedimentos suspendidos a partir de la intensidad de señal. A continuación se presenta la expresión determinada por Urick (1948):

$$\alpha_s = 4.34 * SSC_V \left[k(\gamma - 1)^2 \left\{ \frac{s}{s^2 + (\gamma + \tau)^2} \right\} + \frac{1}{6} (k^4 a_s^3) \right] \quad Ec. 13$$

Dónde:

$SSC_V = SSC/\rho_s$: Concentración adimensional volumétrica del sedimento

$k = 2\pi/\lambda$: Número de onda

λ : Longitud de onda en cm

γ : Gravedad específica

$a_s = D_{50}/2$: Radio del sedimento medio en cm

$s = [9/4\beta a_s][1 + 1/\beta a_s]$

$\tau = [0.5 + 9/4\beta a_s]$

$\beta = [\omega/2v]^{0.5}$

$\omega = 2\pi f$

f = Frecuencia en Hz

v = viscosidad cinemática del agua en Stokes

4.34 es la conversión de nepers a decibeles para la atenuación

El primer término de la suma dentro de los corchetes, en la Ecuación 13, es la atenuación debido pérdidas por viscosidad y el segundo es la atenuación acústica debida a las pérdidas por dispersión. Esta fórmula es dimensionalmente consistente y usada por otras investigaciones (Flammer, 1962; Hay, 1983; Gartner, 2004; Wall, et al., 2006).

2 METODOLOGIA

El esquema metodológico desarrollado para estimar la concentración media de sedimentos en suspensión, aplicando un modelo teórico estadístico basado en la ecuación del Sonar Simplificada y simulación de Montecarlo, usando de mediciones Perfilador de Corriente ADCP se presenta a continuación:

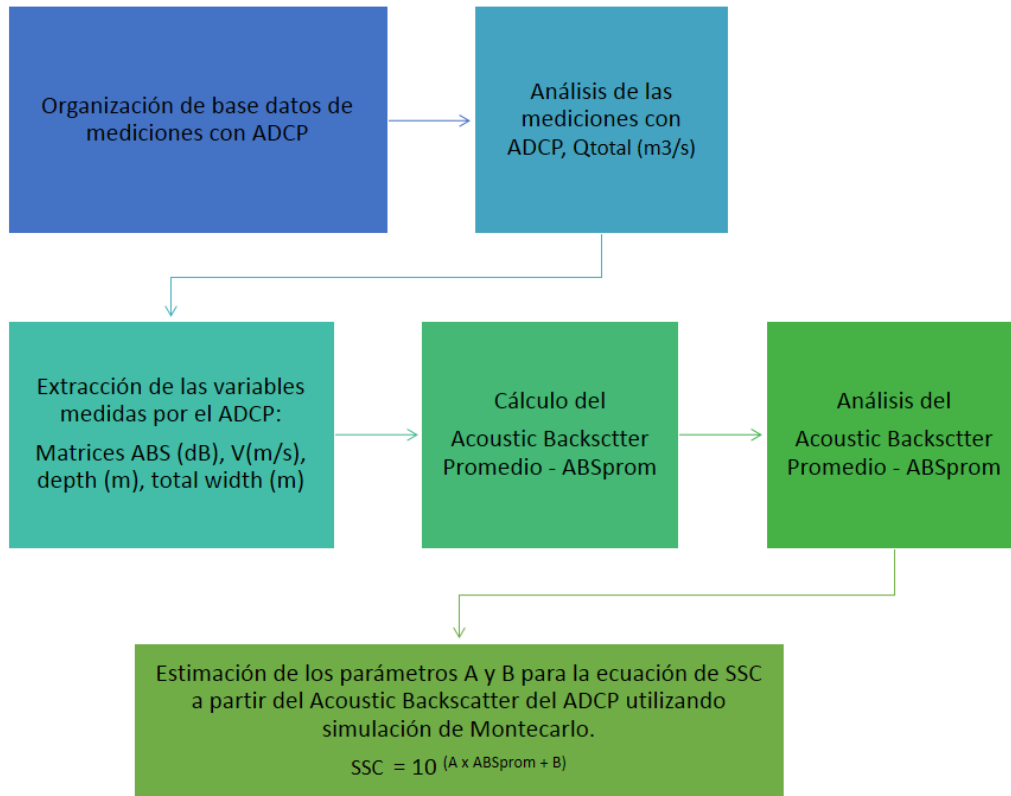


Figura 2-1. Metodología. Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes numerales se describe cada uno de los pasos metodológicos.

a) ORGANIZACIÓN DE BASE DE DATOS DE LAS MEDICIONES CON ADCP

Las mediciones ADCP se registran en carteras de campo. Toda esta información debe ser organizada en una base de datos. La cual debe tener los siguientes atributos: número de muestra, ubicación de la sección transversal en una abscisa determinada definiendo un K0 en el río, sentido del recorrido en la sección, fecha con formato dd/mm/año, número del archivo según el formato rio00X.000, y caudal total en m³/s. Puesto que en cada sección se realizan dos mediciones, para la base de datos se debe seleccionar sólo uno teniendo en cuenta:

- Consistencia en el dato de caudal en comparación con las otras mediciones realizadas para la misma fecha.
- Verificación de que la distancia aforada sea la más representativa de la sección
- Fallas en el equipo, espacios vacíos durante el barrido de la sección.

b) ANALISIS DE LAS MEDICIONES CON ADCP

Se determina el número total de mediciones, las mediciones totales por año, por sectores (tramos únicos, e islas). Se grafica la serie de caudales medidos en las distintas campañas de medición. Y se realiza una gráfica exploratoria de cajas y bigotes para observar la distribución de las mediciones por secciones teniendo en cuenta el caudal medido, y se realiza un resumen estadístico con el número de aforos por sección, promedio, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y rango de caudales. Con toda la información analizada se aplican los siguientes criterios para la selección de los aforos que serán objetos estudio en la determinación del Acoustic Backscatter (ABS).

- Aforos en secciones completas, por tanto, no se tendrán en cuenta los aforos realizados en islas. Puesto que el transporte y concentración de sedimentos se ve afectado por la bifurcación en los brazos de las islas.
- No se tomaran secciones cercanas a la desembocadura (K0 – K5). Puesto que, el modelo aplicado no tiene en cuenta la corrección de la señal retorno del ADCP por efectos de salinidad y mezcla.

De esta forma se obtiene un nuevo grupo de aforos a los cuales se les debe realizar el análisis estadístico correspondiente: mediciones por año, gráfica de serie de caudales, gráfica exploratoria de cajas y bigotes, y resumen estadístico.

c) EXTRACCIÓN DE LAS VARIABLES MEDIDAS POR EL ADCP

El equipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) – Rio Grande genera archivos tipo rio00X.000. Estos archivos pueden ser leídos en el software WinRiver versión II elaborado por Teledyne RD Instruments. Los cuales contienen toda la información medida.

A continuación se presenta la Tabla 2-1 y Figura 2-2 donde se observa la información que visualiza Winriver II, la cual se extrae en códigos ASCII con todas las variables que mide el equipo.

Tabla 2-1. Información visualizada en la interfaz de Winriver II.

<i>Dato</i>	<i>Unidad</i>	<i>Abreviatura</i>
Aforo leído	-	rio00Xr.000
Perfil de velocidades de la sección	m/s	V
Average Backscatter	dB	ABS
Intensity por Beam	Counts	Intensity Beam
Vectores de velocidad promedio por vertical	m/s	Vprom
Caudal medido	m ³ /s	Qmeasured
Caudal total	m ³ /s	Qtotal

Las variables de interés para el cálculo del Acoustic Backscatter promedio (ABS_{prom}) son: las matrices Acoustic Backscatter, velocidad y profundidad, cuya información es por cada celda de la sección perteneciente a la zona de medida del ADCP (Figura 1-5 y Figura 1-6). Y el vector ancho de la sección. Para cada una las variables se crearon unas plantillas que permiten la extracción de los datos a código ASCII. En la Tabla 2-2 se presentan las cuatro variables y su respectiva plantilla.

Tabla 2-2. Variables a utilizar y plantilla.

Variable	Unidad	Abreviatura	Plantilla
Matriz Acoustic Backscatter	dB	ABS	acoustic_basckscatter_aforo_ASC.TXT
Matriz Velocidad	m/s	V	earth_velocity_magnitud_aforo_ASC.TXT
Matriz Profundidad	m	D	depth_aforo_ASC.TXT
Vector ancho de la sección	m	W	total_width_aforo_ASC.TXT

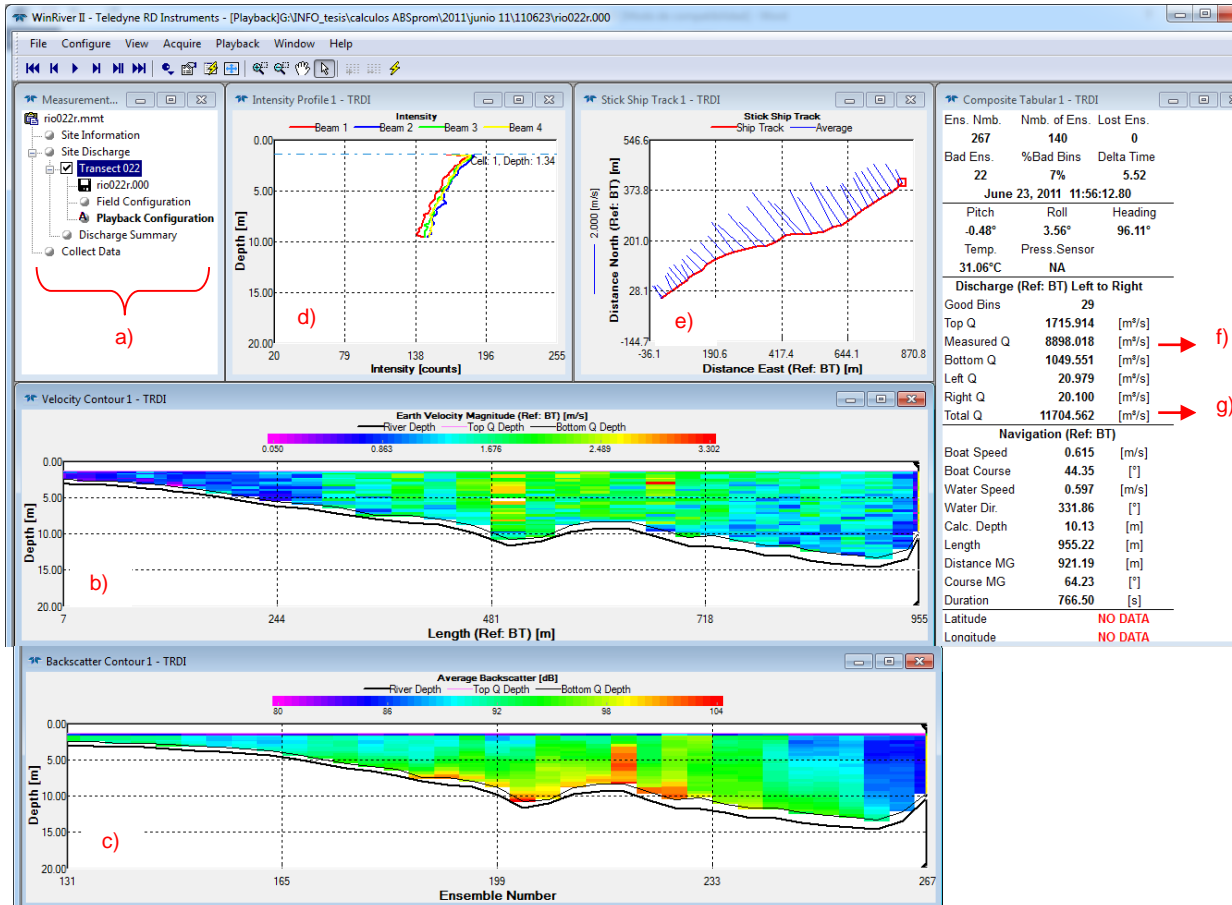


Figura 2-2. Software utilizado, WinRiver II. a) Visualización del archivo cargado y plantillas. b) Perfil de velocidad (m/s) de la sección transversal c) Perfil del Average Backscatter (dB) d) Intensidad de cada beam e) Vectores de velocidad promedio por vertical. f) y g) Datos de medición del caudal: caudal medido y total.

d) CALCULO DEL ACOUSTIC BACKSCTTER PROMEDIO - ABSprom

La expresión simplificada de la ecuación del Sonar que relaciona la señal retorno (Backscatter) con el logaritmo de la concentración másica de sedimentos en suspensión (Urlick, 1983) se presenta a continuación. En el marco teórico se presenta una explicación con mayor detalle de cada uno de los términos de la Ecuación 5 hasta la Ecuación 8.

$$\text{LOG}_{10} \text{SSC} = A * (\text{RL} + 2\text{TTL}) + K_T \quad \text{Ec. 5}$$

ó

$$\text{SSC} = 10^{A*\text{ABS}+B} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

SSC: Concentración máscica de sedimentos en suspensión (incluye el material grueso y fino).

ABS: Es igual a $\text{RL}+2\text{TTL}$, y es el Acoustic Backscatter o señal corregida, Matriz *ABS*.

RL: Señal cruda de retorno del ADCP

2TL: Corrección por pérdidas de transmisión.

B ó K_T : Intercepto, igual a $0.1K_2$, y es la constante que engloba parámetros característicos del instrumento

K_2 : Parámetro que incluye el nivel de la fuente, target strength, volumen sondeado, y masa del material en suspensión

El parámetro *B* ó K_T varía para diferentes instrumentos y rangos de tamaños de grano. Y *A* es la pendiente de la relación lineal entre el $\text{LOG}_{10} \text{SSC}$ y el *ABS*.

Los valores de *RL* son los valores crudos registrados en el equipo, en counts; éstos deben convertirse a decibeles (dB) y ello se logra multiplicando los valores en counts por factores específicos para cada haz (y para cada modelo y marca de instrumento). Y el término *2TL*, contempla la pérdida en la señal de retorno, pues la señal sonora de un ADCP en agua dulce es sometida a la absorción y dispersión, llevada a cabo tanto por las moléculas de agua, como por las partículas presentes en el cuerpo de agua. La siguiente ecuación es la expresión que permite obtener la señal corregida:

$$2\text{TTL} = 20 \text{Log}_{10}(\psi r) + 2\alpha_f r + 2\alpha_s r \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

$20 \text{Log}_{10}(\psi r)$: Pérdidas debidas a la dispersión del haz (beam spreading)

$2\alpha_f r$: Pérdidas debidas a la absorción del sonido por el fluido

$2\alpha_s r$: Atenuación por el sedimento en suspensión

Puesto que $\text{ABS} = \text{RL} + 2\text{TTL}$, entonces el Acoustic Backscatter es igual a:

$$\text{ABS} = \text{RL} + 20 \text{Log}_{10}(\psi r) + 2\alpha_f r + 2\alpha_s r \quad \text{Ec. 8}$$

El Acoustic Backscatter (ver Figura 2-2) de la sección transversal corregido por las pérdidas debidas a la dispersión del haz, y las debidas a la absorción del sonido por el fluido, se obtienen a partir del software WinRiver, desarrollado por TELEDYNE RD INSTRUMENTS. Es decir, realiza las correcciones debidas al primer ($20 \text{Log}_{10}(\psi r)$) y segundo término ($2\alpha_f r$) de la Ecuación 4 (TELEDYNE RD INSTRUMENTS, 2007). Esta corrección del coeficiente de absorción del sonido por el fluido no incluye la corrección por salinidad y presión para profundidades mayores a 20m. Esta corrección de la señal *RL* no contempla las pérdidas por la atenuación del sedimento en suspensión. Por tanto, para esta corrección de debe calcular el coeficiente de atenuación del sedimento en suspensión. Sin embargo, la metodología planteada no contempla mediciones al tiempo de concentración de sedimentos en suspensión de forma directa y con ADCP. Por tanto,

no es posible realizar la corrección por atenuación del sedimento en suspensión, que consiste en calcular el cuarto término ($2\alpha_s r$) de la Ecuación 4. La incertidumbre sobre la magnitud de la atenuación sugiere confeccionar la curva de atenuación teórica respectiva para determinar si la misma será o no importante en la estimación de la concentración de sedimentos suspendidos a partir de la intensidad de señal. Esta corrección de pérdidas por el sedimento en suspensión suele no considerarse en la mayoría de los trabajos indicados en la bibliografía, a excepción de los más recientes. Trabajos como los de: Kim & Voulgaris (2003), Gartner & Cheng (2001), y Latosinski, y otros (2011) demuestran que los valores del coeficiente de atenuación del sedimento α_s están en un orden de 10^{-3} y 10^{-4} , y son mucho menores el coeficiente de atenuación del agua α_f . Entonces, podríamos omitir los efectos de la atenuación por los sólidos suspendidos. Esta misma asunción fue hecha por estudios en la Bahía de San Francisco (Gartner y Cheng, 2001).

Luego de tener la matriz ABS, se debe proceder a calcular un Acoustic Backscatter promedio ponderado de la sección (ABS_{prom}) teniendo en cuenta el caudal que pasa por cada bin, con las variables obtenidas a partir de las plantillas presentadas anteriormente (ver Tabla 2-2).

El ABS_{prom} de la sección es representado en la siguiente ecuación:

$$ABS_{prom} = \frac{\sum_{bin=1}^n (ABS_{bin} \times q_{bin})}{Q_{bin}} \quad [dB] \quad Ec. 14$$

El Q_{bin} corresponde al caudal medido. Entoces el cálculo del Q_{bin} se realiza teniendo en cuenta la matriz velocidad, y el área de la sección medida.

$$Q_{bin} = \sum V \times A \quad [m^3/s] \quad Ec. 15$$

El área de la sección medida se determina multiplicando la matriz profundidad por el vector ancho de la sección.

$$A = \sum D \times W \quad [m^2] \quad Ec. 16$$

El q_{bin} representa el caudal que es transportado por una celda. Este se calcula multiplicando la velocidad de cada bin (V_{bin}), que se obtiene de la matriz Velocidad, por el área del bin (A_{bin}).

$$q_{bin} = V_{bin} \times A_{bin} \quad [m^3/s] \quad Ec. 17$$

Mientras que el área de cada bin es igual a la profundidad de cada bien por el ancho del ensemble, definido por el usuario en el momento de realizar la medición, correspondiente al vector ancho de sección.

$$A_{bin} = D_{bin} \times W_{bin} \quad [m^2] \quad Ec. 18$$

Una forma de comprobar que el Q_{bin} de la sección transversal de la metodología se ajuste al promedio estimado por el software Q_{measured} es graficando las dos variables. Con la relación 1:1, para comprobar que esta se mantiene.

e) ANALISIS DEL ACOUSTIC BACKSCATTER PROMEDIO - ABSprom

Se gráfica el caudal total medido por el ADCP contra el ABSprom obtenido, y se agrupa por años para observar la tendencia de la gráfica, y la dispersión de la nube de puntos generada. Igualmente se debe analizar la serie de caudales con la serie del ABSprom para observar la respuesta del ABSprom ante la subida o bajada del hidrograma. Y finalmente se debe realizar un análisis de identificación de valores atípicos, usando la prueba Grubbs que asume normalidad. En caso, de encontrar posibles datos atípicos estos deben analizarse y recalcularse para evitar errores de cálculo, o algún otro efecto en el valor de la medición. En caso de no encontrarse explicación al valor del dato se determina como atípico, y sugiere eliminar para reducir la dispersión en la estimación de los parámetros para convertir el ABSprom en concentración de sedimentos en suspensión. Y finalmente, determinar un grupo de datos que cumplan con los anteriores criterios de análisis. Para continuar con la estimación de la concentración media de sedimentos en suspensión a partir del Acoustic Backscatter del ADCP, utilizando el método numérico de Montecarlo.

f) ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN A PARTIR DEL ACOUSTIC BACKSCATTER DEL ADCP

La relación entre LOG_{10} SSC y ABS está basada en la ecuación Sonar, presentada con detalles anteriormente. Esta ecuación es lineal e indica que con los valores de la señal del equipo corregido y los correspondientes de la concentración de sedimentos se puede obtener la pendiente e intercepto de su regresión, y con ello lograr la calibración que permitirá estimar posteriormente la concentración de sedimentos. La ecuación del Sonar ajustada a las convenciones utilizadas es la siguiente:

$$SSC_{ABS} = 10^{(A \times ABS_{prom} + B)} \left[\frac{mg}{L} \right] \quad Ec. 19$$

Dónde:

ABSprom: Acoustic Backscatter promedio, del ADCP [dB], de la sección transversal.

SSC_{ABS}: Concentración media de sedimentos en suspensión a partir de datos ABS [mg/L]

A: Pendiente, cuyo valor teórico es $0.1 [dB^{-1}]$

B: Constante que engloba parámetros característicos de instrumento, varía para diferentes instrumentos y rangos de tamaño de grano [mg/L]

La concentración media de sedimentos en suspensión se obtiene a partir de la variación aleatoria de los parámetros A y B ajustándolos a la curva de calibración de los datos de referencia, aplicando Montecarlo y seleccionando la combinación con mayor R2 y valor de A cercano a los valores teóricos y experimentales sugeridos por Gartner (2004), y Thevenot, Prickett, & Kraus (1992).

Antes de aplicar el método de Montecarlo, se deben analizar los datos de referencia. Los cuales corresponden a las mediciones directas de concentración media de sedimentos suspensión realizadas históricamente, cercanos al área de estudio, a partir de los cuales se obtiene una curva de calibración. A estos datos se les realiza un análisis estadístico y se selecciona la regresión que mejor los ajuste. Estas mediciones históricas de concentración de sedimentos en suspensión se presentan en función del caudal. Es decir, como caudal sólido o transporte total. El cálculo del caudal sólido se realiza utilizando la

concentración media de sedimentos en suspensión multiplicada por el caudal líquido y un coeficiente.

$$Q_{st} = Q_l * CSS * k \left[\frac{Ton}{dia} \right] \quad Ec. 20$$

Dónde:

Q_{st} : Caudal sólido o transporte total de sedimentos en suspensión (Ton/día)

CSS : Concentración media de sedimentos en suspensión (mg/L)

Q_l : Caudal líquido (m³/s)

$k = 0.0864$ Coeficiente basado en la unidad de medida del caudal, asumiendo un peso específico del sedimento de 2.65

El método Montecarlo nos permite determinar de forma aproximada los parámetros A y B de la ecuación del Sonar ajustada, Ecuación 16. Se define un rango de valores máximo y mínimo para los dos parámetros. El método genera números aleatorios entre las fronteras con un valor semilla dado. La función evaluación es SSC_{ABS} , la cual se ajustará a la curva de calibración SSC generada a partir de los datos de referencia (concentraciones totales de sedimento en suspensión medidas históricamente). Teniendo estos valores de SSC_{ABS} y SSC se calcula el R2 de la siguiente forma:

$$Error\ 1 = \sum (SSC - SSC_{ABS})^2 \quad Ec. 21$$

$$Error\ 2 = \sum (SSC_{ABS} - SSC_{ABSPROMEDIO})^2 \quad Ec. 22$$

$$R2 = 1 - \frac{Error1}{Error2}$$

En la iteración i los valores estimados para los parámetros, en caso de tener A y B , es:

$$A_i = A_{min} + RND(A_{max} - A_{min}) \quad Ec. 23$$

$$B_i = B_{min} + RND(B_{max} - B_{min}) \quad Ec. 24$$

Entonces los SSC_{ABS_i} para las i iteraciones se obtienen de la siguiente forma:

$$SSC_{ABS_i} = 10^{(A_i \times ABS_{prom} + B_i)} \quad Ec. 25$$

Finalmente, se selecciona los parámetros A y B de la curva de calibración con valor de la pendiente A más cercano al valor teórico de 0.1. Los valores teóricos A=0.1 y B=0.1K₂ son apropiados para una concentración uniforme de partículas de la misma masa. Para una distribución de partículas en campo, concuerdan con los valores teóricos experimentalmente chequeados por la regresión del Backscatter (ABS) del ADCP con las mediciones estimadas de concentración total de sedimentos en suspensión de la misma ubicación (Gartner J. W., 2004). Además, Thevenot y otros 1992 determinaron que 0.1K₂ puede ser igual a 0.97 y 1.43 para el laboratorio y calibraciones de campo, respectivamente. También estimaron valores para el coeficiente multiplicativo A del ABS iguales a 0.077 en el laboratorio y 0.042 en campo.

3 APLICACIÓN DE METODOLOGIA Y RESULTADOS

3.1 AREA DE ESTUDIO

El río Magdalena (Colombia) nace en el Suroeste del país, en la laguna de La Magdalena a 3685 msnm, en la región conocida como el Macizo Colombiano, en el departamento del Huila. Su cuenca hidrográfica alcanza los 266.541 km², que equivalen al 23% de la superficie continental del país, donde se localizan 731 municipios y se asienta el 85% de la población colombiana (ver Figura 3-1). Su caudal medio es de 7100 m³/s, ocupa el lugar 29 en caudal respecto a otros ríos del mundo; pero con respecto a la relación entre el transporte de sedimentos y caudal ocupa el lugar 8, con una concentración media de 0.9 Kg/m³ (Schumm & Winkley, 1994). Su cauce tiene dirección general Sur-Norte, hasta desembocar en el mar Caribe, próximo a la ciudad de Barranquilla, en el sitio conocido como Bocas de Ceniza.



Figura 3-1. Representación Cuenca Río Magdalena en Colombia. Fuente IDEAM

En su recorrido de 1615 Km de longitud, se ha dividido en tres tramos para los estudios de hidráulica fluvial: Alto Magdalena, Medio Magdalena, y Bajo Magdalena. El sector de estudio se encuentra en el Bajo Magdalena, en una zona de cauce único comprendido entre la bifurcación del Canal del Dique en Calamar (K120) hasta Bocas de Ceniza (K0). Donde se sitúan el puerto de Sabanagrande (K23), el puerto de PIMSA (K38), y el puerto de Barranquilla.

La estación IDEAM de Calamar (K120) es la estación de aforo más aguas abajo, localizada antes de la confluencia con el Canal del Dique y con el delta en Bocas de Ceniza. Los datos de esta estación resumen el comportamiento general de los pulsos y tendencias de los aportes fluviales provenientes de las partes media y alta de la cuenca. Aunque no dan una medida de la variabilidad espacial aguas arriba, sí representan el comportamiento acumulado de todos los procesos de producción y de depósito de sedimentos.

La Figura 3-2 presenta los caudales 2006 – 2014 generados a partir de la Curva Nivel-Caudal de la Estación IDEAM Calamar K120 (ver Figura 3-3). Donde se observa que el río Magdalena presenta un comportamiento hidrológico bimodal teniendo dos períodos de niveles máximos, el primero entre principio de mayo y finales de julio y el segundo entre mediados de octubre y final de año. Los niveles mínimos se presentan entre mediados de enero y finales de abril y un periodo de medios bajos entre mediados de agosto y septiembre.

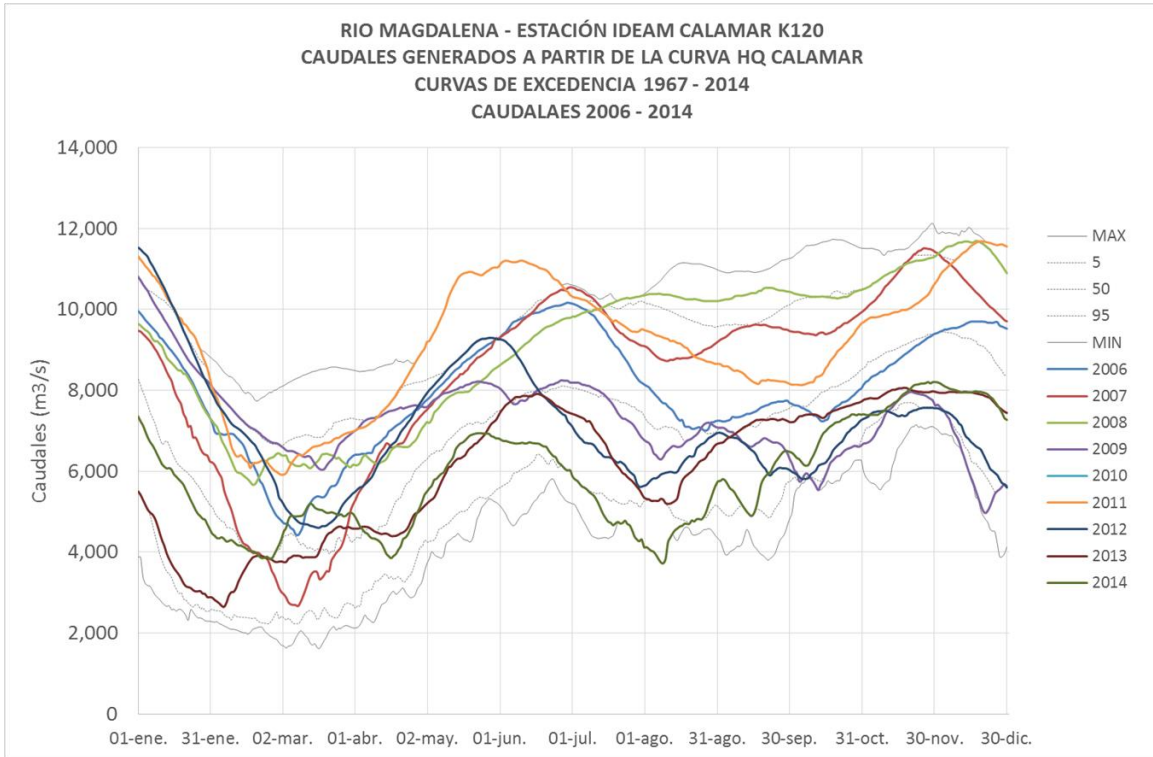


Figura 3-2. Caudales generado por la HQ Calmar (K120), años 2006 - 2014. Fuente: UNINORTE, 2014.

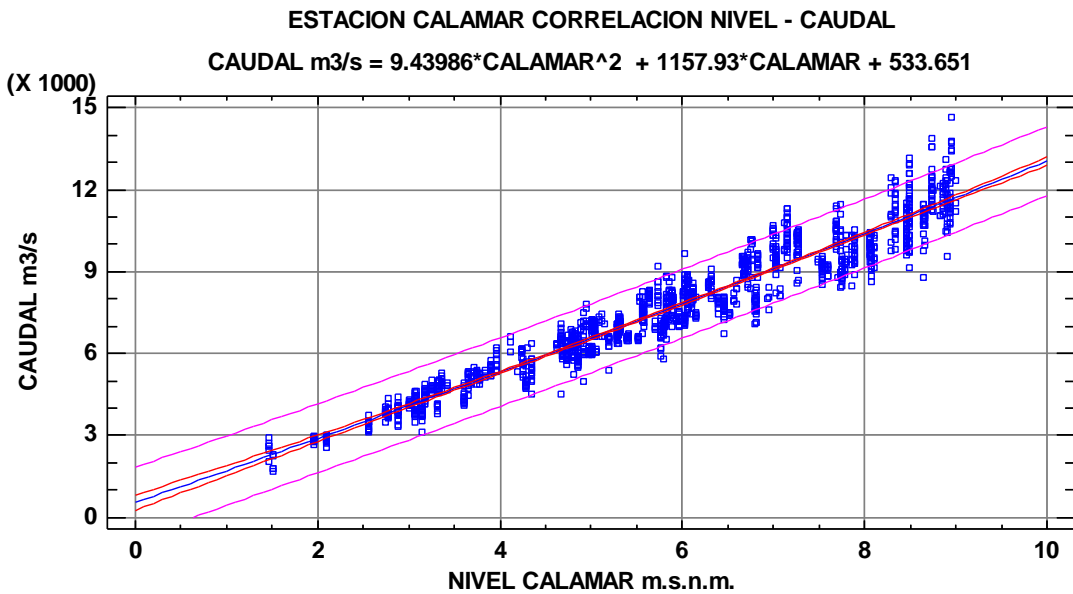


Figura 3-3. Correlación Nivel – Caudal Estación Calamar. Fuente: Uninorte, 2014.

El río Magdalena, sector Calamar (K120) a Bocas de Ceniza (K0), cuenta con 51 mediciones hidrosedimentológicas del IDEAM 1982 – 1998 y LEHLF 1989 – 2005. Del IDEAM son 29 datos de aforos sólidos y líquidos, y del LEH-LF son 22 datos. Las dos fuentes de datos fueron realizados con USP-61 y Correntómetro A-OTT modelo C-31. También se cuenta con la información IDEAM 1972 – 2012 entregada oficialmente como los datos de transporte de sedimentos en promedios mensuales, con un total de 480 datos.

Las mediciones realizadas con ADCP – Río Grande de 600 kHz por UNINORTE – CORMAGDALENA desde el 2006 al 2014 son un total de 1602, entre el K0 – K38 incluyendo secciones en islas. Los aforos ADCP que son objeto de análisis están entre el K5 – K38. La Figura 12 presenta una localización del sector de estudio, K5 – K38

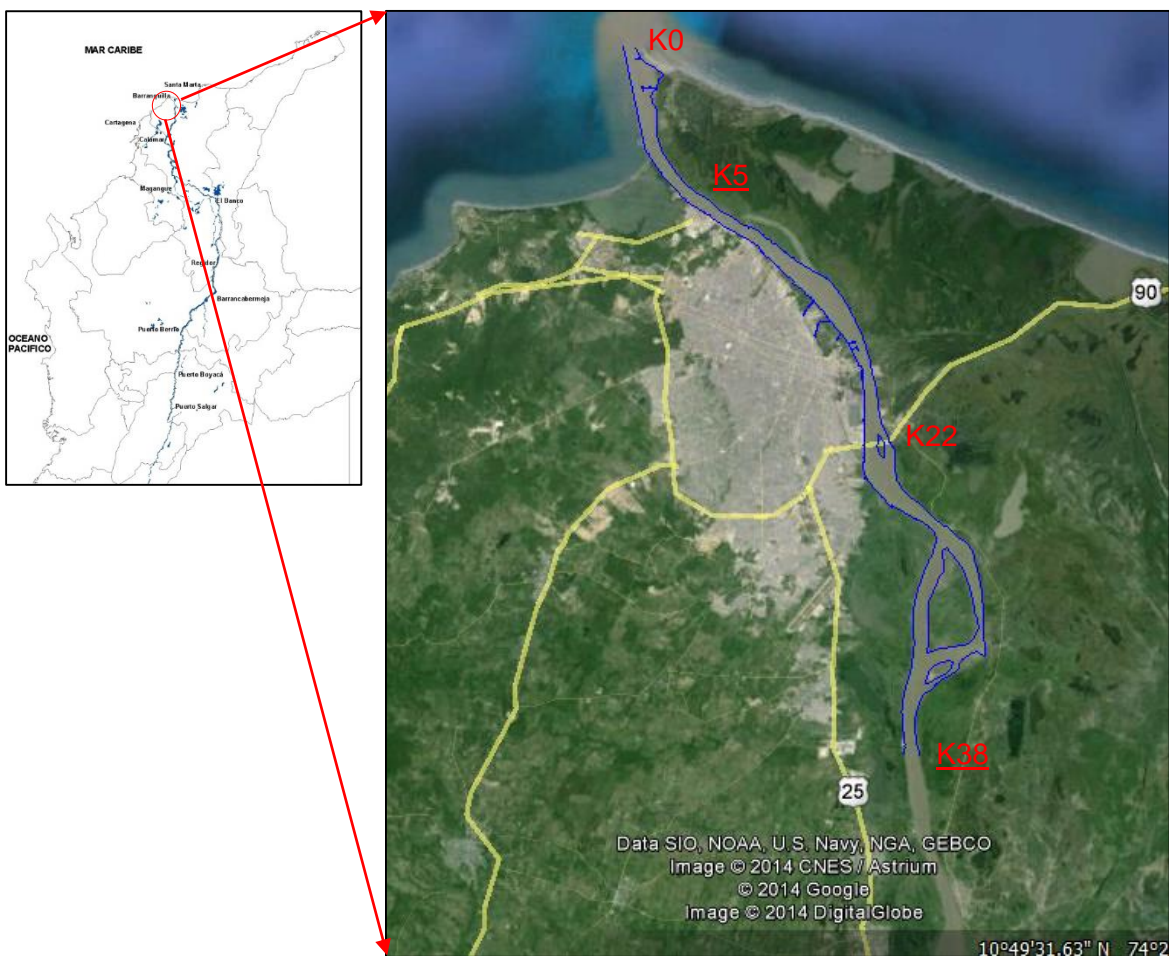


Figura 3-4. Localización del sector de estudio. Fuente: Google Earth

3.2 METODOLOGIA APLICADA AL CASO DE ESTUDIO

La metodología presentada será aplicada al Río Magdalena, con K0 en Bocas de Ceniza. Las mediciones realizadas con ADCP por UNINORTE – CORMAGDALENA que son objeto de estudio fueron tomadas entre el 2006 al 2014. Con estas mediciones se creará una base de datos con toda la información disponible.

Para calibrar el modelo seleccionado, basado en la ecuación del Sonar Simplificada, se tendrán como datos de referencia las mediciones históricas realizadas en el río Magdalena. A estas mediciones se les realizará un análisis estadístico para obtener las curvas de calibración empleadas en la simulación de Montecarlo. A continuación se presentan las mediciones de referencia:

- Datos del sector Calamar (K120) a Bocas de Ceniza (K0). Esta zona cuenta con 51 mediciones hidrosedimentológicas realizadas por IDEAM entre 1982 – 1998, y LEHLF entre 1989 – 2005. Del IDEAM son 29 datos, y del LEH-LF 22 datos.
- Datos IDEAM 1972 – 2012 entregados oficialmente como los datos de transporte de sedimentos mensuales. Son un total de 480 datos.

Con la información anterior, se determinaron cuatro curvas de calibración. Una curva de calibración para los datos IDEAM 1982 y LEHLF 1989 – 2005, y tres curvas de calibración para los datos IDEAM 1972 – 2012 (máximos, medios y mínimos).

El modelo utilizado se basa en la ecuación del Sonar simplificada (Urlick, 1983) la cual fue utilizada para corregir la señal retorno del ADCP, para los efectos de dispersión geométrica y absorción/atenuación de fluido. Para el caso de estudio, no se realizó corrección por atenuación del sedimento, teniendo en cuenta las limitaciones de información en la zona de estudio y de la metodología planteada.

La aplicación del método Montecarlo, permitirá tener un rango de valores de A y B con su respectivo R2. Y se seleccionará el valor de A que más se acerque al valor teórico de 0.1 sugerido por Gartner (2004). El intercepto B varía para diferentes instrumentos y rangos de tamaños de grano. Sin embargo, no se cuenta con información granulométrica de los sedimentos.

Finalmente, se realizarán diferentes análisis a los resultados del modelo calibrado utilizando. Reconstruyendo la serie de concentración y transporte total de sedimentos en suspensión en el río Magdalena desde el año 2006 – 2014.

La metodología aplicada al caso de estudio es la siguiente:

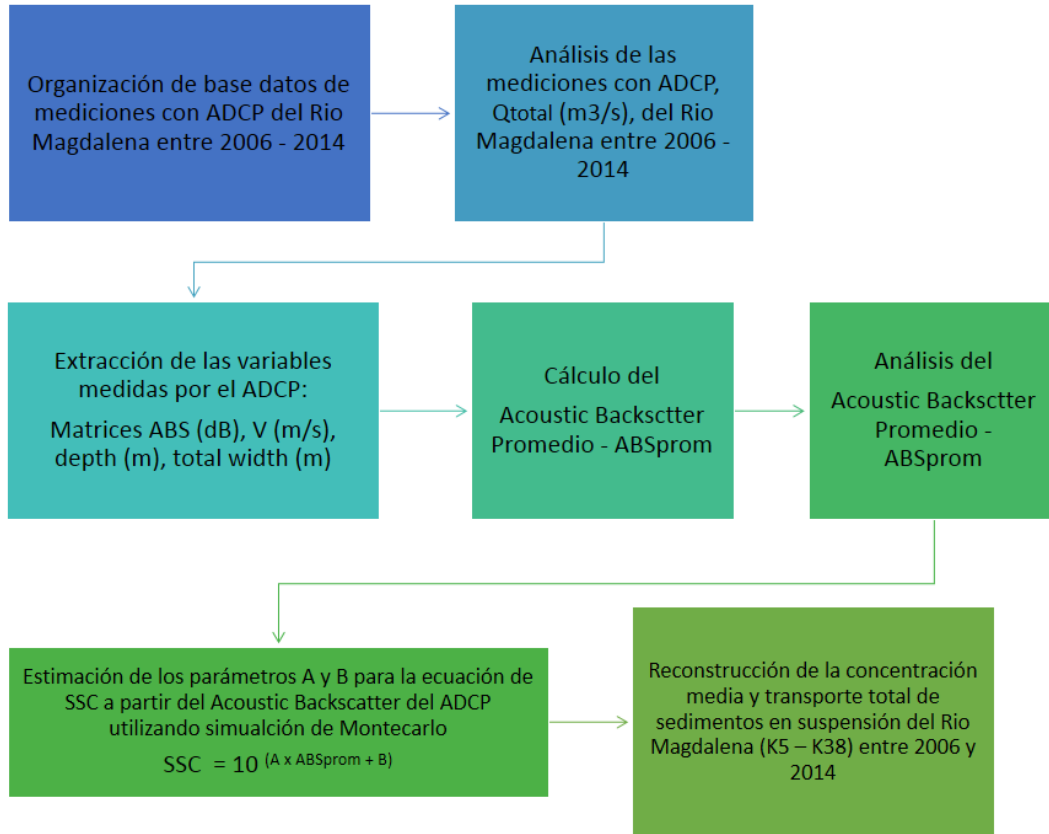


Figura 3-5. Metodología aplicada al caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

A continuación desarrollaremos cada aspecto de la metodología aplicada al caso de estudio.

3.3 ORGANIZACIÓN DE BASE DE DATOS DE LAS MEDICIONES CON ADCP

Se recopilaron las mediciones históricas 2006 - 2014 realizadas con ADCP en el Río Magdalena, Sector Canal de Acceso (K0 – K25) y PIMSA (K25 – K38). Las cuales fueron realizadas en el marco de varios convenios entre UNINORTE y CORMAGDALENA. Estas campañas se realizaron mensuales entre el K0 – K38.

Con esta información se creó una base de datos que permita la identificación de los archivos base (rio00X.000), coordenadas del aforo, sentido, abscisa de campo, abscisa con K0 en Bocas de Ceniza, fecha y caudal total. Teniendo en cuenta las carteras de campo de los diferentes levantamientos, las cuales del 2006-2010 estaban escritas a mano alzada y fueron digitalizadas, del 2010 – 2014 se encontraban en documentos de Excel. En la Figura 3-6 se presenta una cartera de campo.

Mue - 06 - 2006		
07/04	Bocas 7-12 6:30-8:20 600 1.21	10000 10000 10000 10000 10000 10000
08/04	Bocas 7-12 8:30-10:30 1940 1.20	10000 10000 10000 10000 10000 10000
09/04	Bocas 7-12 10:30-12:40 730 1.16	10000 10000 10000 10000 10000 10000
10/04	Bocas 7-12 12:40-2:50 710 1.15	10000 10000 10000 10000 10000 10000
11/04	Bocas 7-12 2:50-5:00 670 1.13	10000 10000 10000 10000 10000 10000
12/04	Bocas 7-12 5:00-7:10 910 1.01	10000 10000 10000 10000 10000 10000
13/04	Bocas 7-12 7:10-9:20 830 1.09	10000 10000 10000 10000 10000 10000
14/04	Bocas 7-12 9:20-11:30 830 1.09	10000 10000 10000 10000 10000 10000
15/04	Bocas 7-12 11:30-1:40 410 1.14	10000 10000 10000 10000 10000 10000
16/04	Bocas 7-12 1:40-3:50 440 1.00	10000 10000 10000 10000 10000 10000
17/04	Bocas 7-12 3:50-6:00 1140 1.10	10000 10000 10000 10000 10000 10000
18/04	Bocas 7-12 6:00-8:10 510 1.14	10000 10000 10000 10000 10000 10000
19/04	Bocas 7-12 8:10-10:20 510 1.14	10000 10000 10000 10000 10000 10000
20/04	Bocas 7-12 10:20-12:30 1140 1.06	10000 10000 10000 10000 10000 10000
21/04	Bocas 7-12 12:30-2:40 510 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
22/04	Bocas 7-12 2:40-4:50 510 1.22	10000 10000 10000 10000 10000 10000
23/04	Bocas 7-12 4:50-7:00 510 1.16	10000 10000 10000 10000 10000 10000
24/04	Bocas 7-12 7:00-9:10 730 1.14	10000 10000 10000 10000 10000 10000
25/04	Bocas 7-12 9:10-11:20 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
26/04	Bocas 7-12 11:20-1:30 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
27/04	Bocas 7-12 1:30-3:40 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
28/04	Bocas 7-12 3:40-5:50 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
29/04	Bocas 7-12 5:50-8:00 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
30/04	Bocas 7-12 8:00-10:10 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
01/05	Bocas 7-12 10:10-12:20 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
02/05	Bocas 7-12 12:20-2:30 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
03/05	Bocas 7-12 2:30-4:40 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
04/05	Bocas 7-12 4:40-6:50 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
05/05	Bocas 7-12 6:50-9:00 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
06/05	Bocas 7-12 9:00-11:10 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
07/05	Bocas 7-12 11:10-1:20 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
08/05	Bocas 7-12 1:20-3:30 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
09/05	Bocas 7-12 3:30-5:40 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
10/05	Bocas 7-12 5:40-7:50 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
11/05	Bocas 7-12 7:50-10:00 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
12/05	Bocas 7-12 10:00-12:10 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
13/05	Bocas 7-12 12:10-2:20 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
14/05	Bocas 7-12 2:20-4:30 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
15/05	Bocas 7-12 4:30-6:40 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
16/05	Bocas 7-12 6:40-8:50 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
17/05	Bocas 7-12 8:50-11:00 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
18/05	Bocas 7-12 11:00-1:10 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
19/05	Bocas 7-12 1:10-3:20 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
20/05	Bocas 7-12 3:20-5:30 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
21/05	Bocas 7-12 5:30-7:40 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
22/05	Bocas 7-12 7:40-9:50 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
23/05	Bocas 7-12 9:50-12:00 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
24/05	Bocas 7-12 12:00-2:10 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
25/05	Bocas 7-12 2:10-4:20 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
26/05	Bocas 7-12 4:20-6:30 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
27/05	Bocas 7-12 6:30-8:40 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
28/05	Bocas 7-12 8:40-10:50 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
29/05	Bocas 7-12 10:50-1:00 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
30/05	Bocas 7-12 1:00-3:10 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000
31/05	Bocas 7-12 3:10-5:20 730 1.17	10000 10000 10000 10000 10000 10000

Figura 3-6. Carteras de Campo 2006 – 2010

Las campañas realizadas contemplan en su mayoría secciones estables y brazos de las islas Rondón (K22) y Cabica (K30). En cada sección se realizan dos mediciones, sin embargo para la creación de la base de datos se seleccionó un solo aforo, teniendo en cuenta:

- Consistencia en el dato de caudal en comparación con las otras mediciones realizadas para la misma fecha.

- Verificación de que la distancia aforada sea la más representativa de la sección
- Fallas en el equipo, espacios vacíos durante el barrido de la sección.

Las secciones levantadas se realizan cada 1 Km del K0 – K21, 1 aforo en los brazos de la Isla Rondón K22, en el K27, brazos de la Isla Cabica K30, y en el K37; las abscisas pueden variar dependiendo de las condiciones de campo. En la Tabla 3-1 se presentan las secciones levantadas durante los aforos del 27 de Febrero de 2011, y en la Figura 3-7 se presenta una foto del equipo ADCP, antes de iniciar una de las mediciones.

Tabla 3-1. Secciones levantadas, aforos sólidos realizados el 27 de Febrero de 2011.

Secciones			
K0+525	K8+000	K14+000	K20+950
K1+775	K8+900	K15+000	K22+200 BD
K3+000	K10+100	K16+000	K22+200 BI
K4+000	K10+800	K17+000	K27+250
K5+000	K11+325	K18+000	K34+700 BD
K6+000	K12+075	K18+950	K34+700 BI
K7+000	K13+000	K20+000	K37+800



Figura 3-7. Equipo ADCP instalado en el bote, río Magdalena. Foto tomada el 27 de Febrero 2013.

La base de datos cuenta con un total de 1602 mediciones, estos datos se encuentran organizados en Excel y a continuación se presenta una muestra de los datos, ver Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Base de datos, mediciones con ADCP 2006-2014, río Magdalena K0-K38. Medición 1 – 42.

<i>MEDICION</i>	<i>ABSCISADO CAMPO</i>	<i>ABSCISADO K0 BOCAS DE CENIZA</i>	<i>COORD (x)</i>	<i>COORD (Y)</i>	<i>SENTIDO</i>	<i>FECHA</i>	<i>ARCHIVO</i>	<i>Q total (m3/s)</i>
1	K18000	4000	915943	1716225	ID	2-May-06	rio001r	7006
2	K17000	5000	916340	1715251	ID	2-May-06	rio003r	7072
3	K16000	6000	917333	1714732	DI	2-May-06	rio004r	7339
4	K15000	7000	917968	1714042	DI	2-May-06	rio006r	7545
5	K14000	8000	918778	1713577	DI	2-May-06	rio008r	7519
6	K13000	9000	919343	1712513	ID	2-May-06	rio0011r	7469
7	K12000	10000	920136	1712009	ID	2-May-06	rio0013	7376
8	K11000	11000	920987	1711477	ID	2-May-06	rio0015	7194
9	K10000	12000	921676	17110739	ID	2-May-06	rio0017	7184
10	K9000	13000	922461	1710122	ID	2-May-06	rio0019	7071
11	K8000	14000	923175	1709490	ID	2-May-06	rio0021	7389
12	K4000	18000	925761	1706477	DI	15-May-06	rio0022	7921
13	K5000	17000	925470	1707438	DI	15-May-06	rio0024	7972
14	K6000	16000	924395	1707994	ID	15-May-06	rio0027	7959
15	K7000	15000	923788	1708741	ID	15-May-06	rio0029	8237
16	K0 Puente OD	22000 BD	926494	1702888	ID	16-May-06	rio0031r	1596
17	K0 Puente OI	22000 BI	926094	1702732	DI	16-May-06	rio032r	6767
18	K1000	21000	925537	1703387	ID	16-May-06	rio035r	8777
19	K2000	20000	925582	1704401	ID	16-May-06	rio038r	7797
20	K3000	19000	925962	1705451	DI	16-May-06	rio039	7969
21	K1000	21000	925535	1703398	ID	28-Jun-06	rio001r	10375
22	K2000	20000	926148	1704444	DI	28-Jun-06	rio003r	9330
23	K3000	19000	925498	1705376	ID	28-Jun-06	rio005r	9841
24	K4000	18000	925306	1706307	ID	28-Jun-06	rio006r	9390
25	K5000	17000	925471	1707443	DI	28-Jun-06	rio009r	9672
26	K11000	11000	921394	1711986	DI	5-Jul-06	rio010	8934
27	K12000	10000	920576	1712564	DI	5-Jul-06	rio012	8993
28	K13000	9000	919631	1713067	DI	5-Jul-06	rio014	8433
29	K10500	11500	921767	1711645	DI	5-Jul-06	rio018	8784
30	K19000	3000	916369	1717351	DI	10-Jul-06	rio020	8831
31	K18000	4000	915943	1716224	ID	10-Jul-06	rio023	9196
32	K17000	5000	916779	1715521	DI	10-Jul-06	rio024	9237
33	K16000	6000	917341	1714732	DI	10-Jul-06	rio026	9182
34	K15000	7000	917986	1714032	DI	10-Jul-06	rio028	9271
35	K14000	8000	918778	1713577	DI	10-Jul-06	rio030	8887
36	K10000	12000	922132	1711303	DI	10-Jul-06	rio034	8880
37	K2000	20000	926146	1704465	DI	23-Aug-06	rio000	6479
38	K3000	19000	925960	1705446	DI	23-Aug-06	rio002	6672
39	K4000	18000	925319	1706320	ID	23-Aug-06	rio005	6582
40	K5000	17000	924905	1707220	ID	23-Aug-06	rio007	6755
41	K6000	16000	925045	1708442	DI	23-Aug-06	rio008r	6719
42	K7000	15000	924484	1709316	DI	23-Aug-06	rio014	6599

3.4 ANALISIS DE LAS MEDICIONES CON ADCP

Las mediciones con ADCP recopiladas en la base de datos suman un total de 1603, entre los años 2006 – 2014, de los sectores de Canal de Acceso (K0-K25) y PIMSA (K25-K38).

En el año 2006 se realizaron 102 mediciones correspondientes al 6.4% de las mediciones totales. Entre el 2006-2014 el número de mediciones ha incrementado, y en el año 2014 se realizaron 333 mediciones correspondientes al 20.8%. En la Figura 3-8 se presenta una tabla con los números de mediciones anuales. Las secciones medidas incluyen secciones estables y brazos de las islas Rondón (K22) y Cabica (K30).

Tabla 3-3. Número de mediciones con ADCP por año. Fuente: Elaboración propia

<i>Año</i>	<i>n</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
2006	102	6.4
2007	91	5.7
2008	181	11.3
2009	74	4.6
2010	237	14.8
2011	278	17.4
2012	54	3.4
2013	252	15.7
2014	333	20.8
Total	1602	100%

*n: número de mediciones

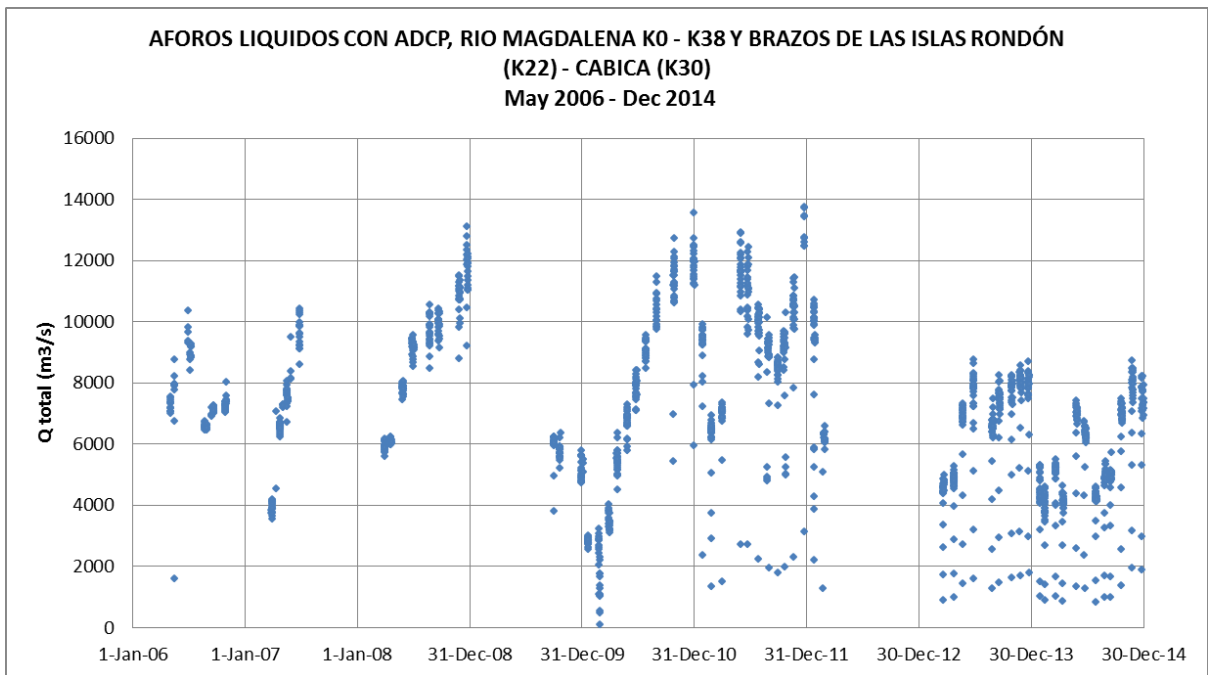


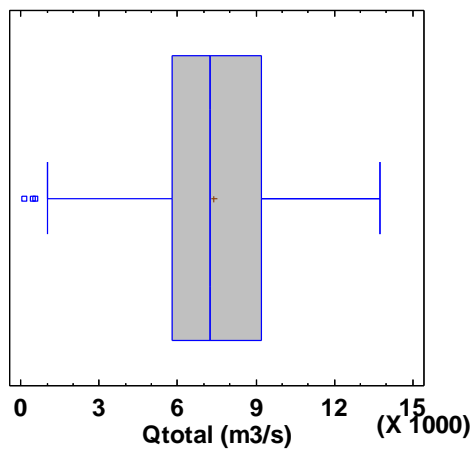
Figura 3-8. Aforos líquidos con ADCP, Río Magdalena K0 – K38 e islas Rondón (K22) - Cabica (K30), entre los años 2006 – 2014.

El 87.6% de los datos corresponden al sector K0-K25, el 4.0% al K25 – K38, el 4.4% y 4.0% corresponden respectivamente a mediciones de los brazos de las Islas Rondón (K22) y Cabica (K30), ver Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Número de mediciones ADCP por sectores desde el 2006 – 2014

Sección	Mediciones	Porcentaje (%)
K0-K25	1404	87.6
K25-K38	64	4.0
Isla Rondón K22	70	4.4
Isla Cabica K30	64	4.0
Total	1602	100

Puesto que el transporte de sedimentos en los brazos de islas es diferente a secciones completas, y estas mediciones representan un 8.4% del total. Se tomaran para los análisis posteriores las secciones entre el K0 – K38, sin incluir las islas. A continuación se presenta un análisis de las 1468 mediciones de caudales con ADCP, sin incluir las Islas Rondón y Cabica.



Resumen Estadístico para Qtotal (m³/s)

Variable	Dato
Número de datos	1468
Promedio	7392
Mediana	7220
Desviación Estándar	2389
Mínimo	118
Máximo	13766
Rango	13648
Cuartil Inferior	5815
Cuartil Superior	9191
Rango Intercuartílico	3376

Figura 3-9. Grafica de caja y bigotes, y resumen estadístico de los 1468 aforos líquidos con ADCP 2006 -2014. Río Magdalena K0 – K38, sin incluir Isla Rondón y Cabica.

La Figura 3-10 presenta una gráfica de bigotes por abscisas de los aforos líquidos entre el año 2006 – 2014 en el sector del Canal de acceso K0 – K38. Para realizar este análisis se aproximaron las abscisas de las mediciones al valor entero más cercano.

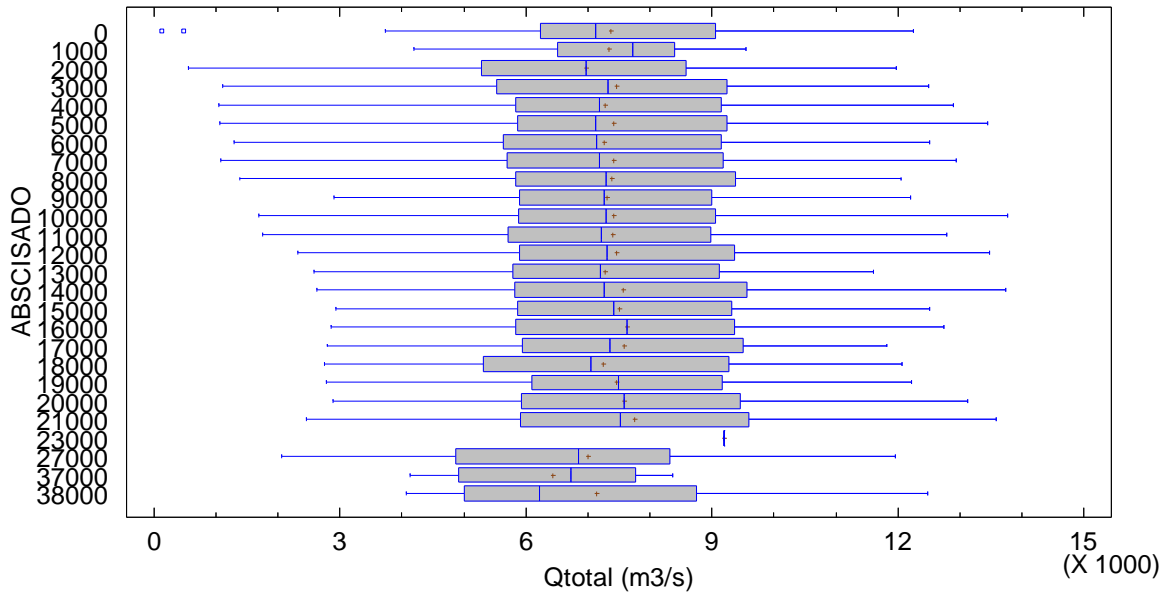


Figura 3-10. Grafica de Bigotes aforos líquidos con ADCP por secciones. Rio Magdalena 2006-2014 entre el K0 - K38, sin incluir Islas.

En la gráfica de bigotes se observan los 26 niveles, correspondientes a las abscisas del K0 - K23 y K27 - K38, con un total de 1468 aforos. La sección con mayor número de mediciones es la K11 con un total de 126 en los 9 años de mediciones. El rango de caudales medidos está entre 118 - 13766 m³/s, con una media de 7392 m³/s y desviación estándar de 2389 m³/s. Las mediciones en el K0 presentan dos valores atípicos, correspondientes a 118 y 479 m³/s, estas mediciones se presentaron durante el 26 de Febrero de 2010. Sin embargo, esta medición no refleja el valor real del caudal que transportaba el Río, que en otras abscisas para la misma fecha alcanzó un valor de 2312 m³/s (K12). Esta diferencia se debe a la metodología empleada por el equipo para la determinación de caudal, la cual no es confiable para secciones cercanas a la desembocadura, con presencia de cuña salina y niveles bajos. Por tanto, para los análisis posteriores se tomaran caudales mayores a 2000 m³/s.

A continuación se presenta un análisis de las mediciones con ADCP, excluyendo los aforos en los brazos de las islas, las secciones menores a K5, y las secciones menores o iguales a K21 con niveles mínimos durante los meses de Enero, Febrero, Agosto y Septiembre entre los años 2006 - 2014. Puesto que, la concentración y transporte de sedimentos en las islas tienen comportamientos diferentes a secciones estables; y la presente metodología no tiene en cuenta la corrección al Backscatter por salinidad, debido a que no se tienen registros de salinidad al tiempo con las mediciones ADCP respectivas. Sin embargo, se cuentan con registros históricos de salinidad de Cormagdalena - Uninorte (1972) y de Cormagdalena - Triple A - Uninorte (2010) que indican evidencia de cuña salina hasta cercanías al Puente Pumarejo (K21).

La Figura 3-11 presenta la serie de caudales de los años 2006 - 2014, para el Rio en las abscisas K5 - K38, con las restricciones mencionadas anteriormente. Donde se observa la tendencia de caudales medios entre 2006 - 2007, altos 2008, bajos a finales de 2009 e inicios de 2010, altos a finales de 2010 y 2011, y caudales de medios a bajos entre 2012 - 2014.

Los datos a analizar entre el K5 – K38 son 868 mediciones, con un promedio de caudal de 7667 m³/s, y una desviación estándar de 2343 m³/s. El caudal mínimo presentado es de 2058 m³/s (25 Febrero de 2010 – K27) y un máximo de 13766 m³/s (23 de Diciembre de 2011 – K10). La Figura 3-12 presenta una gráfica de caja y bigotes, y un resumen estadísticos de los datos.

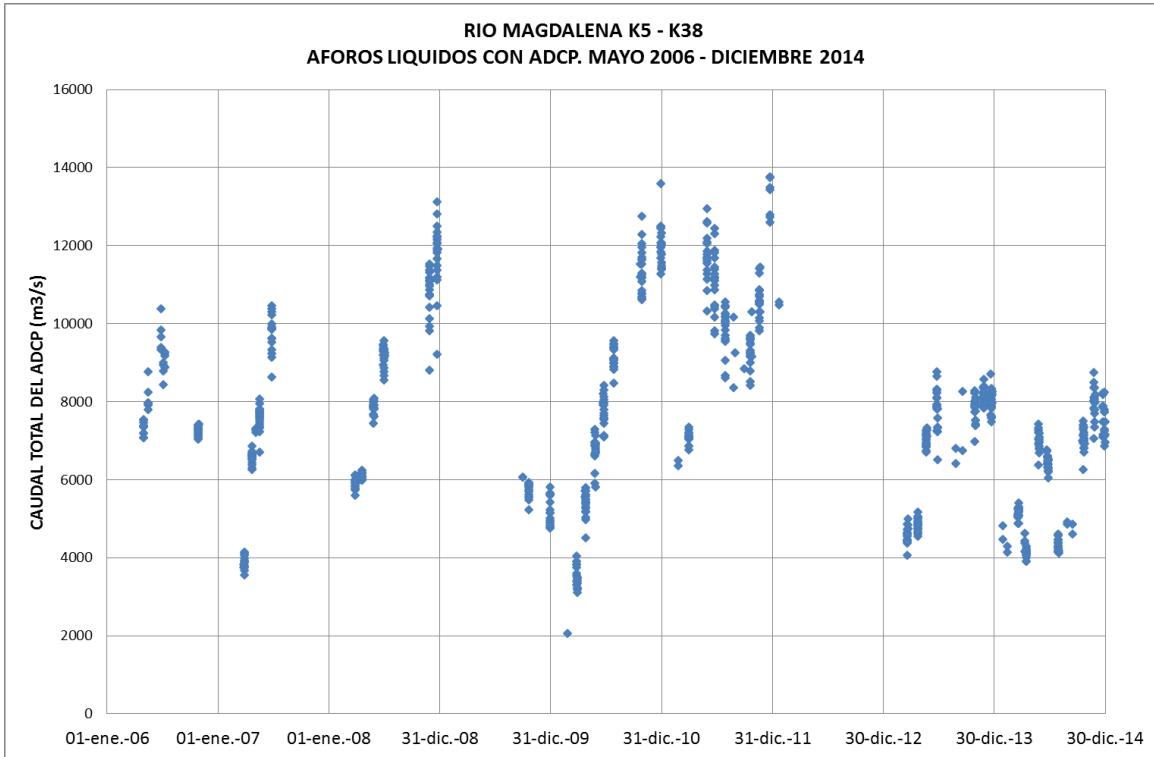
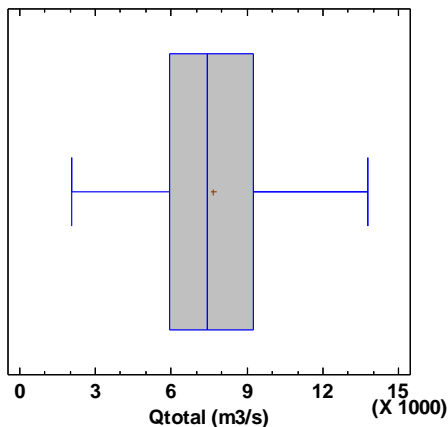


Figura 3-11. Serie de aforos líquidos con ADCP 2006 - 2014. Río Magdalena K5 – K38.



Resumen estadístico	
Variable	Dato
Número de datos	868
Promedio	7667
Mediana	7409
Desviación Estándar	2343
Mínimo	2058
Máximo	13766
Rango	11708
Cuartil Inferior	5927.5
Cuartil Superior	9247.0
Rango Intercuartílico	3319.5

Figura 3-12. Grafica de caja y bigotes, y resumen estadístico de los aforos líquidos (m³/s) con ADCP 2006 -2014. Río Magdalena K0 – K38.

Las 868 mediciones con ADCP se distribuyen en 21 secciones como se muestra en la Figura 3-13 y Tabla 3-5, las cuales presentan la gráfica exploratorio de cajas y bigotes para las mediciones en casa abscisa y el resumen estadístico de los datos por secciones

respectivamente. Correspondientes a las abscisas del K5 – K21, K23 y K27, K37 y K38. La sección con mayor número de mediciones sigue siendo la K11 con un total de 84.

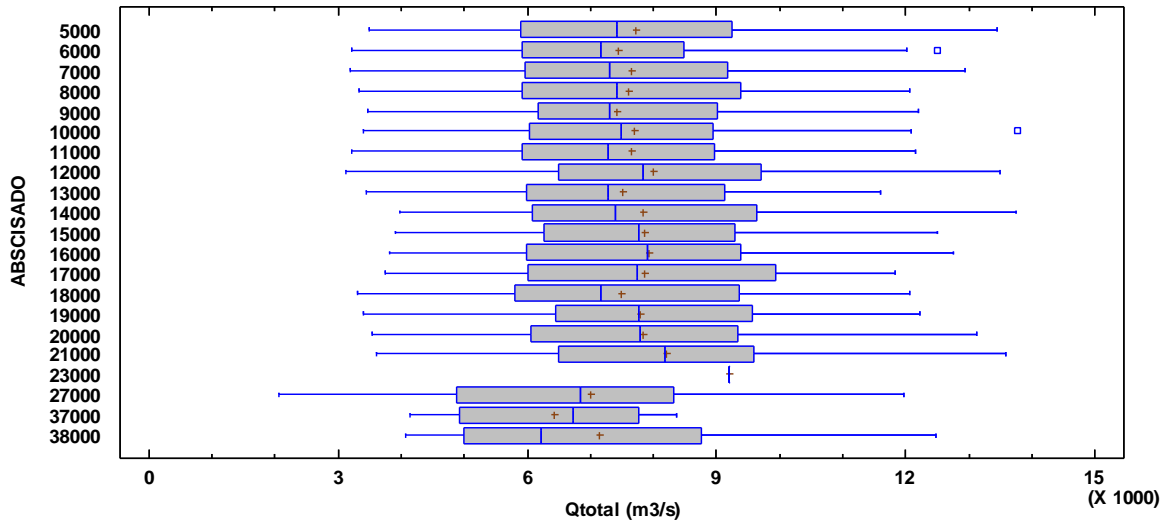


Figura 3-13. Grafica de Bigotes aforos líquidos (m³/s) con ADCP por secciones. Rio Magdalena 2006-2014 entre el K0 – K38.

Tabla 3-5. Resumen estadístico. Aforos líquidos (m³/s) con ADCP por secciones. Rio Magdalena 2006-2014 entre el K0 – K38.

Abscisado	Número de mediciones	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
5000	46	7727	7422	2519	3490	13442	9952
6000	45	7439	7161	2303	3207	12511	9304
7000	44	7640	7294	2470	3187	12942	9755
8000	46	7596	7421	2238	3337	12051	8714
9000	45	7428	7299	2153	3471	12209	8738
10000	44	7689	7483	2455	3409	13766	10357
11000	84	7647	7281	2337	3221	12146	8925
12000	50	8002	7827	2403	3119	13485	10366
13000	42	7507	7276	2151	3456	11610	8154
14000	43	7835	7389	2514	3984	13739	9755
15000	40	7855	7768	2382	3906	12508	8602
16000	43	7922	7910	2444	3820	12743	8923
17000	48	7868	7746	2312	3757	11825	8068
18000	55	7493	7162	2283	3303	12073	8770
19000	42	7782	7762	2191	3397	12226	8829
20000	43	7841	7797	2448	3534	13132	9598
21000	43	8207	8182	2487	3605	13581	9976
23000	1	9201	9201		9201	9201	0
27000	32	6997	6850	2333	2058	11961	9903
37000	16	6426	6730	1479	4137	8362	4225
38000	16	7145	6211	2600	4065	12486	8421
Total	868	7667	7409	2343	2058	13766	11708

3.5 EXTRACCIÓN DE LAS VARIABLES MEDIDAS POR EL ADCP

Con el software Winriver II se visualizaron las 868 mediciones con ADCP, rectificándose los valores de caudal y consistencia de la medición, para proceder a la extracción de los parámetros utilizados.

Las variables extraídas fueron la matriz Acoustic Backscatter (ABS, dB), velocidad (V, m/s) y profundidad (D, m), y el vector ancho de sección (W, m). Para cada una de estas variables se utilizó la plantilla definida en la metodología, ver Tabla 2-2.

La Figura 3-14 presenta la forma en que son visualizadas numéricamente la matriz de datos ABS, y la velocidad en una sección tipo.

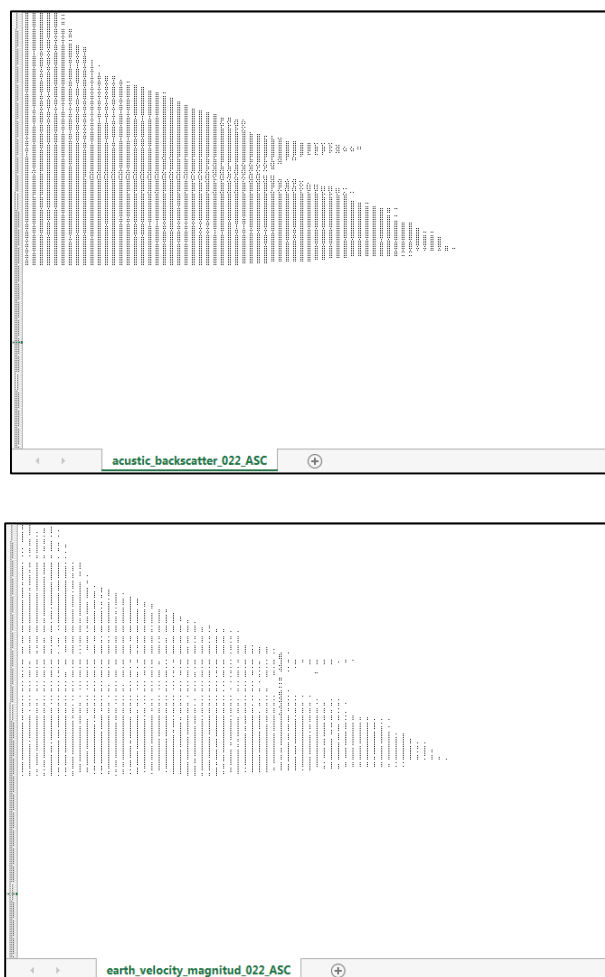


Figura 3-14. Matriz ABS y Velocidad de una sección tipo.

3.6 CALCULO DEL ACOUSTIC BACKSCATTER PROMEDIO - ABS_{prom}

El ABS_{prom} para la sección transversal se calculó de la siguiente manera:

$$ABS_{prom} = \frac{\sum_{bin=1}^n (ABS_{bin} \times q_{bin})}{Q_{bin}} \quad [dB] \quad Ec. 14$$

En la Figura 3-15 se presentan los resultados del cálculo del ABS_{prom} de los 868 datos en estudio.

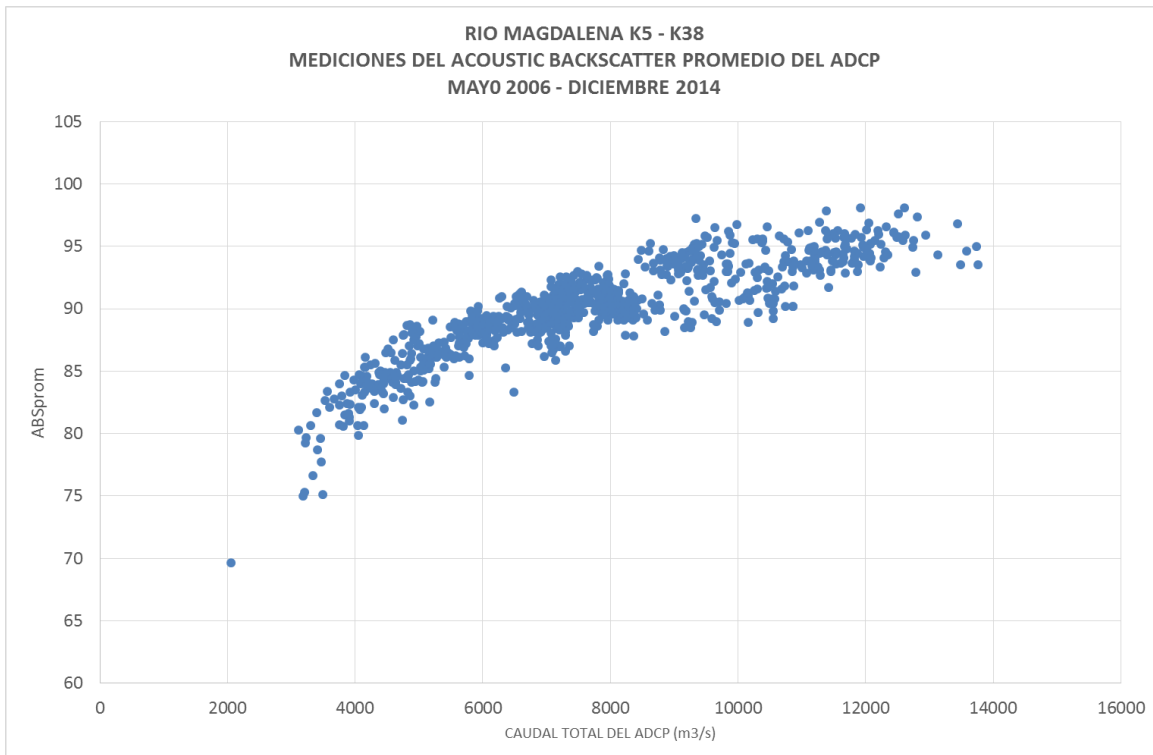


Figura 3-15. Resultados del cálculo del ABS_{prom} vs. Caudal total del ADCP.

Una forma de comprobar que el Q_{bin} de la sección transversal de la metodología se ajuste al promedio estimado por el software Qmeasured es graficando las dos variables. La Figura 3-16 muestra que la relación 1:1 se mantiene, y existen algunos puntos que tienen una dispersión mayor. Sin embargo, este efecto no es relevante, puesto que se calcula un ABS ponderado para la sección y lo importante es la distribución del q_{bin} en la sección medida.

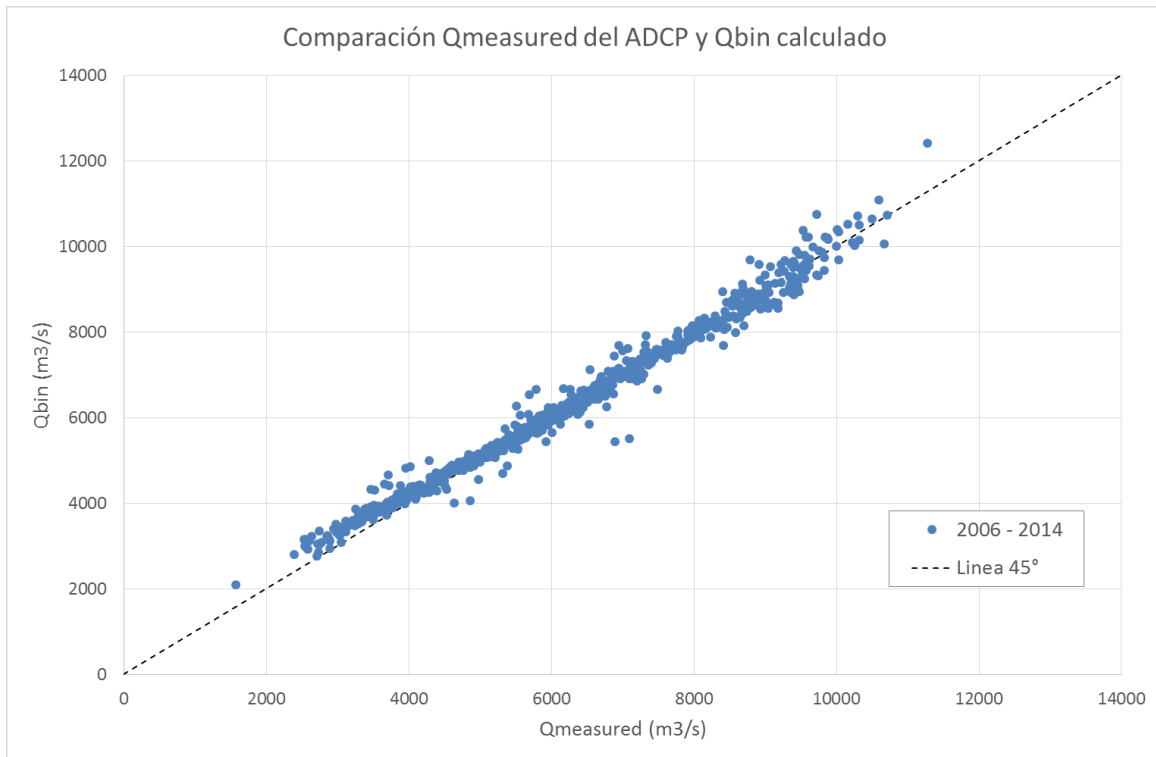


Figura 3-16. Qmeasured por el ADCP vs. Qbin calculado.

3.7 ANALISIS DEL ACOUSTIC BACKSCATTER PROMEDIO - ABSprom

Los resultados del ABSprom por sección de cada una de las 868 mediciones realizadas entre los años 2006 a 2014 se presentan en la Figura 3-17. En la gráfica se observa como el año 2010, que fue un año de extremos, tiene ABSprom mínimos y máximos; el año 2011 y 2008 también tienen tendencia a caudales altos, y se observa como el ABSprom se mantiene en valores altos. Mientras que el año 2013 y 2014 son años de caudales medios a bajos y en el ABSprom se mantiene en los rangos bajos. En la Figura 3-18 se observa la serie de tiempo de caudales superpuesta con el ABSprom, en la cual se observa como al aumentar el hidrograma el ABSprom también aumenta, y al bajar el hidrograma el ABSprom también baja. Por tanto, el ABSprom responde a las variaciones del hidrograma.

En la Figura 3-17 se observa un ABSprom de 69.62 dB con caudal de 2058 m³/s, el cual corresponde al único caudal registrado menor a 3000 m³/s para el grupo de 868 datos, correspondiente a la sección K27 del 25 de Febrero de 2010. Puesto que con las restricciones de la metodología planteada se eliminaron los caudales mínimos entre las secciones del K5 – K21. Este dato es de gran importancia para analizar el comportamiento de la concentración de sedimentos en suspensión para caudales bajos, menores a 3000 m³/s, donde no se tiene influencia de la cuña salina.

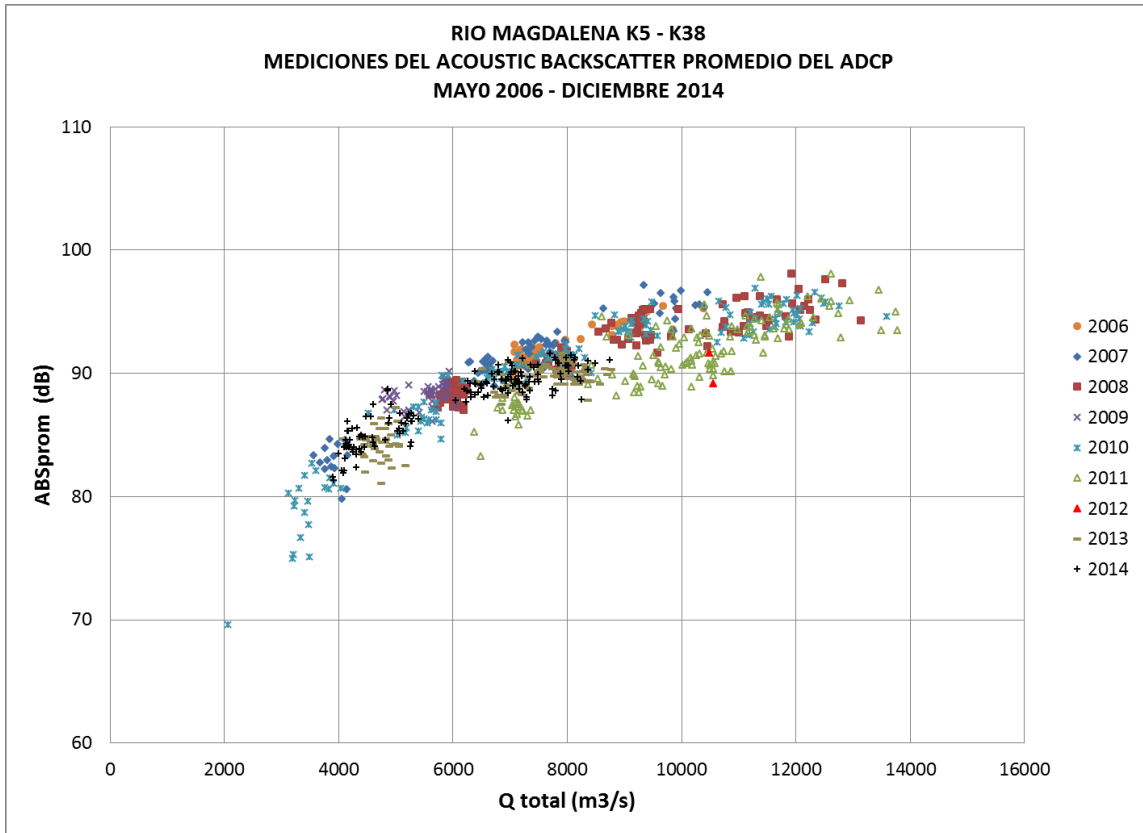


Figura 3-17. ABSprom (dB) de los años 2006 a 2014. Rio Magdalena, K0 – K38.

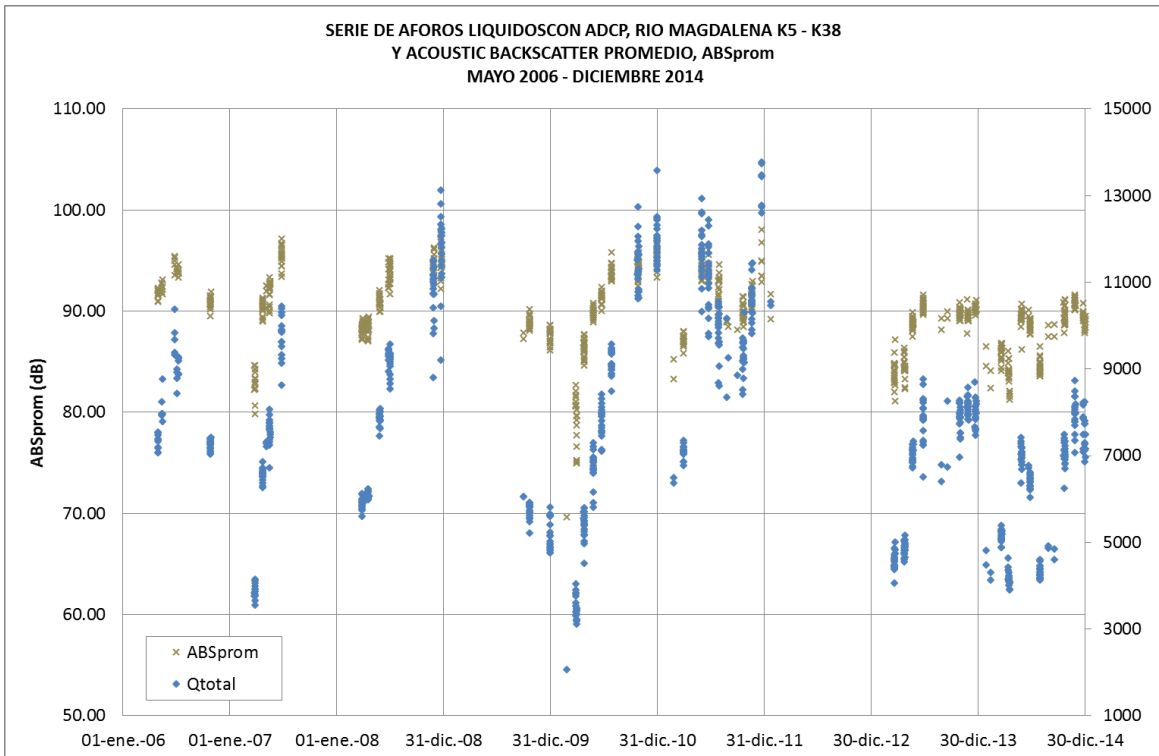


Figura 3-18. Comparación del ABSprom y Qtotal del 2006 – 2014. Rio Magdalena, K5 – K38.

Se llevó a cabo un análisis de identificación de valores atípicos a las 868 mediciones, usando la prueba Grubbs, la cual asume normalidad. La media muestral es de 89.84 dB, y desviación estándar de 3.8 dB. Los datos aberrantes son aquellos cuyo valor es superior a la media más cuatro veces la desviación estándar, estos datos corresponden a los ubicados en la fila 283; correspondientes al valor mínimo de ABSprom de 69.62 dB (Ver Figura 3-19). El valor-P para la prueba de Grubb es 0.0000545247, menor que 0.05, por tanto los valores determinados como aberrantes significativos, lo son con un nivel de significancia del 95.0%, asumiendo que todos los demás valores siguen una distribución normal. Sin embargo, todos los datos no siguen una distribución normal, ver Figura 3-20. Puesto que las colas no se ajustan a esta distribución. Y al realizar la prueba Chi-Cuadrado y Estadístico W de Shapiro-Wilk (ver Tabla 3-6), el valor-P más bajo de las pruebas realizadas es igual a 0.0. Siendo el valor-P menor que 0.05, se puede rechazar la idea de que ABSprom (dB) proviene de una distribución normal con 95% de confianza. Por tanto, no se pueden considerar estos datos como aberrantes.

Teniendo en cuenta lo anterior. Se dejaron todos los datos para la estimación de los parámetros A y B.

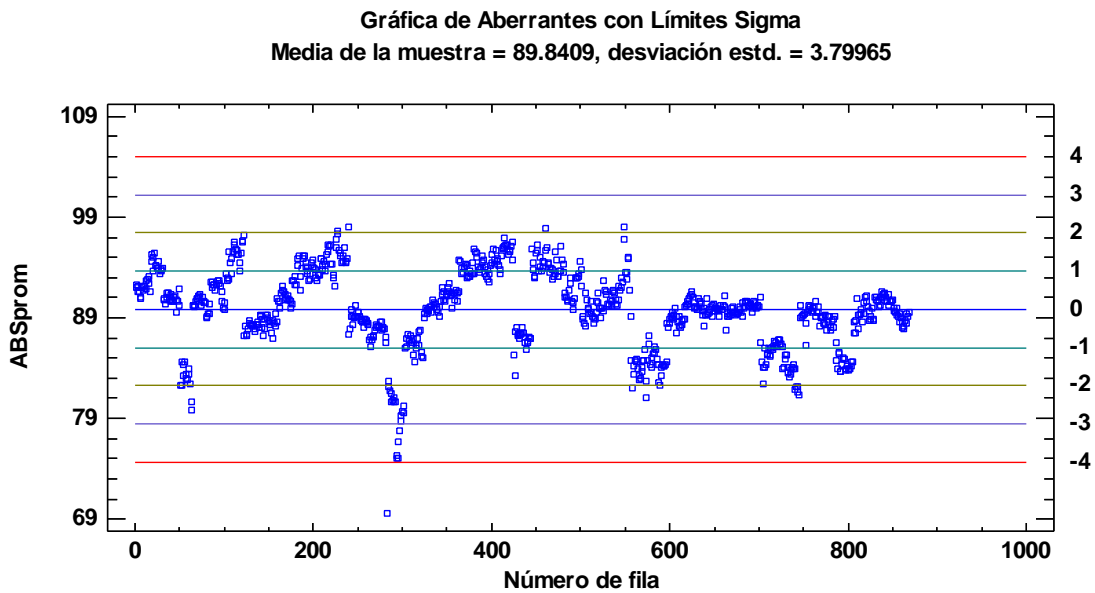


Figura 3-19. Grafica de aberrantes con Limites Sigma para ABSprom (dB)

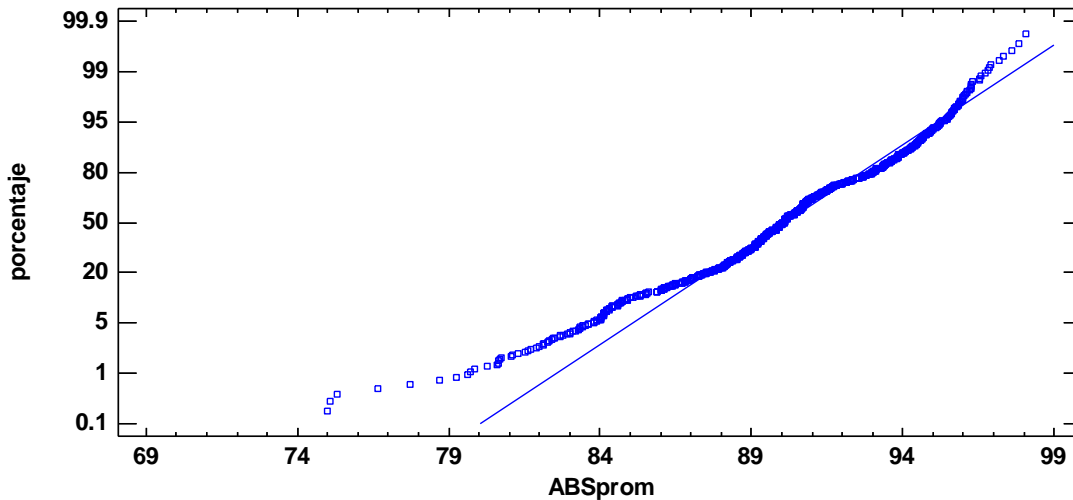


Figura 3-20. Grafica de Probabilidad Normal para ABSprom (dB).

Tabla 3-6. Prueba de Normalidad.

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
Chi-Cuadrado	194.38	0.0
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.963551	0.0

3.8 ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN A PARTIR DEL ACOUSTIC BACKSCATTER DEL ADCP UTILIZANDO MONTECARLO

3.8.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE REFERENCIA

A continuación se presentan las mediciones de caudal sólido más cercanas al área de estudio (K5-K38), ver Figura 3-21. Correspondientes a la estación de aforo más aguas abajo, Calamar, localizada antes de la confluencia con el Canal del Dique y con el delta en Bocas de Ceniza. Los datos fueron medidos por:

- Muestra 1: LEH-LF desde 1989 a 2005, sector Calamar (K120) hasta Bocas de Ceniza (K0). Se utilizó un US-P-61 para determinar la concentración de sedimentos en suspensión. Y un Correntómetro C-31 y contador A-OTT para determinar el caudal líquido, teniendo en cuenta todos los protocolos del IDEAM. Datos de transporte total en suspensión de diferentes fechas.
- Muestra 2: IDEAM desde 1982 a 1988, estación Calamar (K120). Datos de transporte total en suspensión de diferentes fechas. Medidos con botella plegable y Correntómetro C-31 y contador A-OTT para determinar el caudal líquido.
- Muestra 3: IDEAM desde 1972 – 2012, estación Calamar (K120). Datos de transporte total de sedimentos en suspensión promedios mensuales en Ton/día. Fueron entregados oficialmente por el IDEAM, como registros de referencia.

Las metodologías implementadas en campo para las muestra 1 y 2 son diferentes. Los resultados del Laboratorio de Las Flores presentan mayores valores de transporte a los

deducidos por el IDEAM, como se observa en la Figura 3-21. Por tanto, es necesario analizar estadísticamente los datos para determinar si las dos son independientes, Datos IDEAM 1982-1988 y Datos LEH-LF 1989 – 2005, o provienen de la misma población y si existen diferencias significativas en las dos distribuciones. Para poder trabajar las muestras 1 y 2 en una sola regresión para obtener la Curva de Calibración IDEAM – LEH-LF 1982 – 2005.

Con los datos de la muestra 3 IDEAM desde 1972 – 2012, entregados oficialmente por el IDEAM como la información de transporte total en suspensión de la estación Calamar a nivel mensual en Ton/día vs. Caudales medios en m³/s, ver Figura 3-22. Luego de realizar el análisis estadísticos. Se realizarán las tres Curvas de Calibración correspondiente a mínimos, medios y máximos.

Nota: La convención utilizada para los datos medidos es: Ql caudal líquido medido [m^3/s]; y Qst , caudal sólido o transporte total en suspensión medido [$Ton/día$]

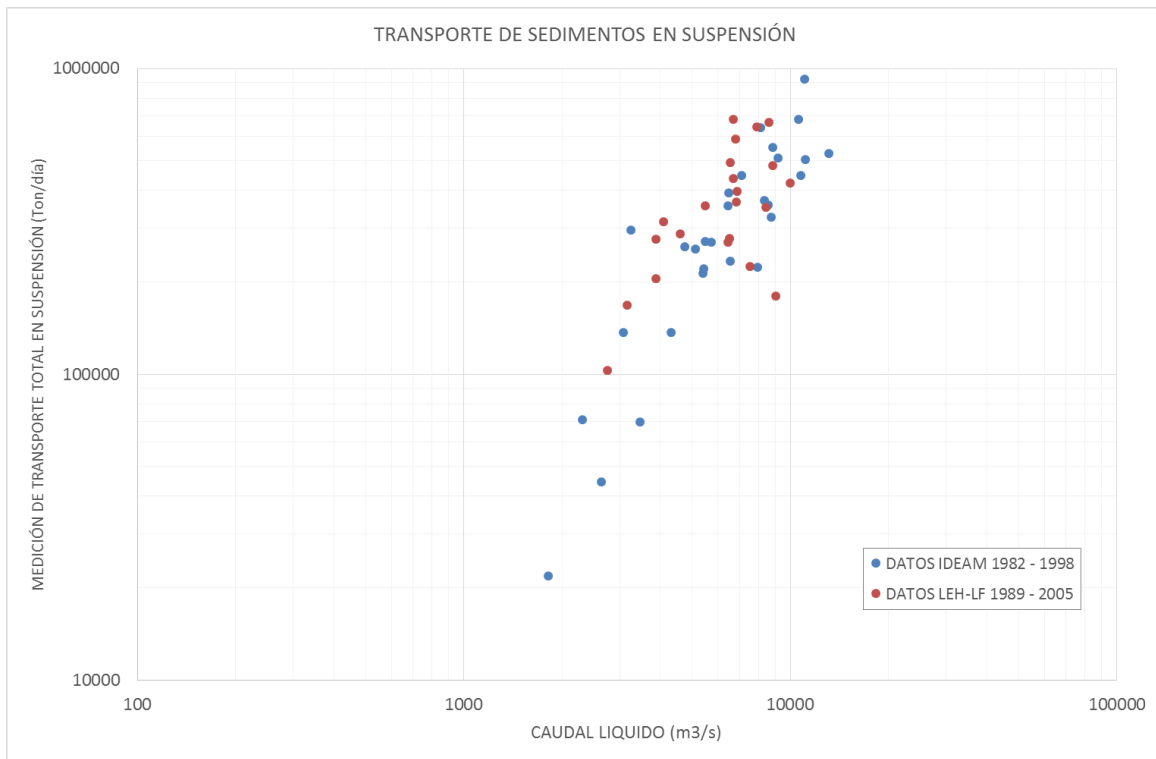


Figura 3-21. Transporte de sedimentos en suspensión, Río Magdalena – Sector Calamar (K120) a Bocas de Ceniza (K0). LEH – LF 1989 – 2005 e IDEAM 1982 – 1998. Fuente: LEHLF, 2005.

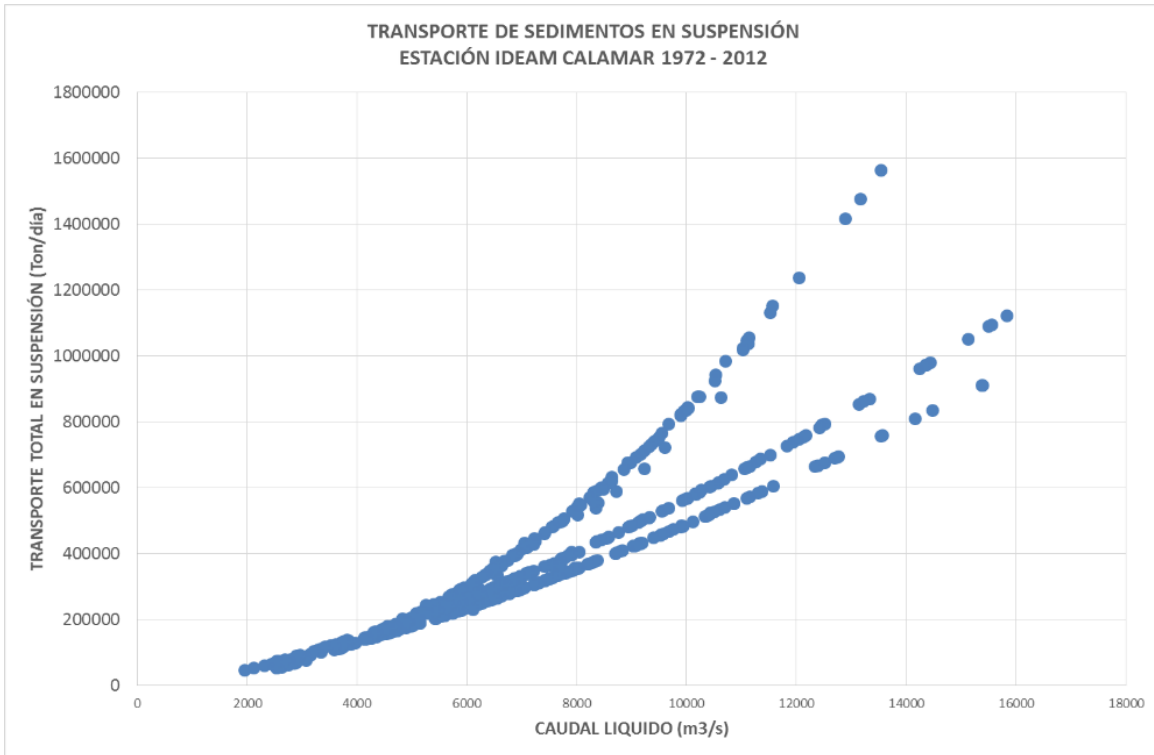


Figura 3-22. Transporte de sedimentos en suspensión, Río Magdalena – Estación Calamar (K120). IDEAM 1972 – 2012.

3.8.1.1 MUESTRA 1. DATOS IDEAM 1982 – 1996

Los datos medidos por el IDEAM 1982 – 1996 de transporte de sedimentos en suspensión, caudal sólido, corresponden a 29 mediciones con un promedio de 336858 Ton/día, y una desviación estándar de 207679 Ton/día. El valor mínimo es de 21885 Ton/día correspondiente a un caudal líquido de 1813 m³/s, y el máximo es de 925949 Ton/día con un caudal de 11059 m³/s. En la Tabla 3-7 se presenta un resumen estadístico para los datos Qst IDEAM 1982-1996.

Tabla 3-7. Resumen Estadístico para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día)

Variable	Dato
Número de datos	29
Promedio	336858
Mediana	296525
Varianza	4.31307E10
Desviación estándar	207679
Coef. de variación	61.65%
Mínimo	21885
Máximo	925949
Rango	904064
Cuartil inferior	220838
Cuartil superior	446265
Rango intercuartílico	225427
Sesgo estandarizado	1.74
Curtosis estandarizada	1.01

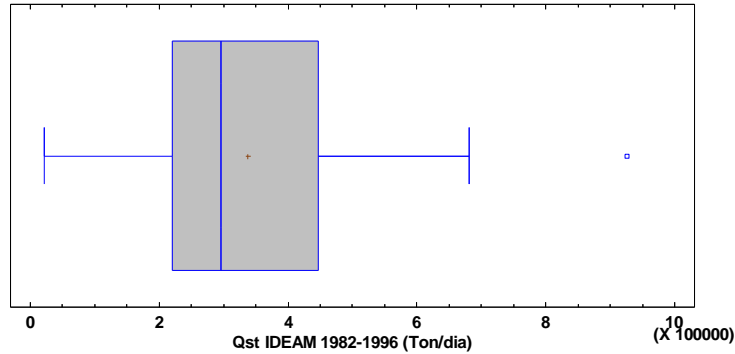


Figura 3-23. Grafica de Caja y Bigotes para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día)

La grafica exploratoria de Caja y Bigotes para el transporte de sedimentos en suspensión nos ofrece una idea de la tendencia central del conjunto de datos, con un valor de mediana de 296525 Ton/día y un rango intercuartílico de 225427 Ton/día (Ver Figura 3-23). El diagrama nos muestra la presencia de un dato atípico correspondiente al valor máximo de 925949 Ton/día. Sin embargo, son pocas las mediciones que se tienen para deducir que este es un valor atípico, ya que se cuentan con 5 mediciones con caudales superiores a 10000 m³/s. Teniendo en cuenta que el rio Magdalena presenta un comportamiento bimodal, con dos periodos de niveles máximos, el primero entre principio de Mayo y finales de Julio y el segundo entre mediados de Octubre y final de año. Por otro lado, el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada tienen un valor de 1.74 y 1.01 respectivamente, puesto que están en el rango de - 2 y 2 es posible afirmar que los datos provienen de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar.

Se llevó a cabo un análisis de identificación de valores atípicos a las 29 mediciones, usando la prueba Grubbs, la cual asume normalidad. Teniendo en cuenta que la media muestral es de 336858 Ton/día, y desviación estándar de 207679 Ton/día. Los datos aberrantes son aquellos cuyo valor es superior a la media más cuatro veces la desviación estándar y el valor más extremo se encuentra en la fila 16, el cual es 2.84 desviaciones estándar de la media, ver (Figura 3-24). El valor-P para la prueba de Grubb es 0.064, mayor que 0.05, por tanto los valores determinados como aberrantes significativos, no lo son con un nivel de significancia del 5.0%, asumiendo que todos los demás valores siguen una distribución normal. Para ello, se realizaron las pruebas de normalidad, Chi-Cuadrado y Estadístico W de Shapiro-Wilk, el valor-P más bajo es igual a 0.28. Debido a que el valor-P para esta es mayor o igual que 0.05, no se puede rechazar la idea de que los datos Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día) provienen de una distribución normal con 95%, o más, de confianza. En la Figura 3-25 se presenta la gráfica de probabilidad normal para los datos, donde se observa que siguen esta distribución, exceptuando las colas.

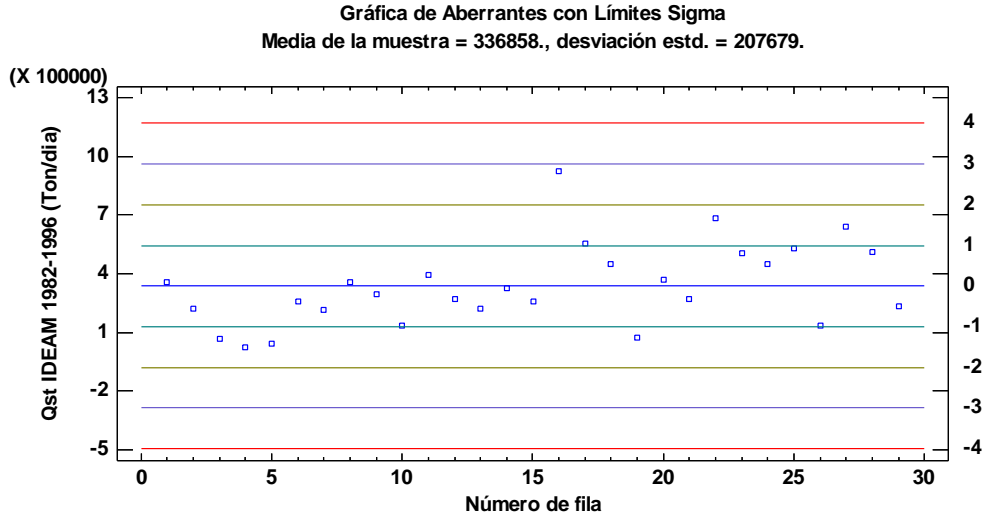


Figura 3-24. Grafica de aberrantes con Limites Sigma para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día)

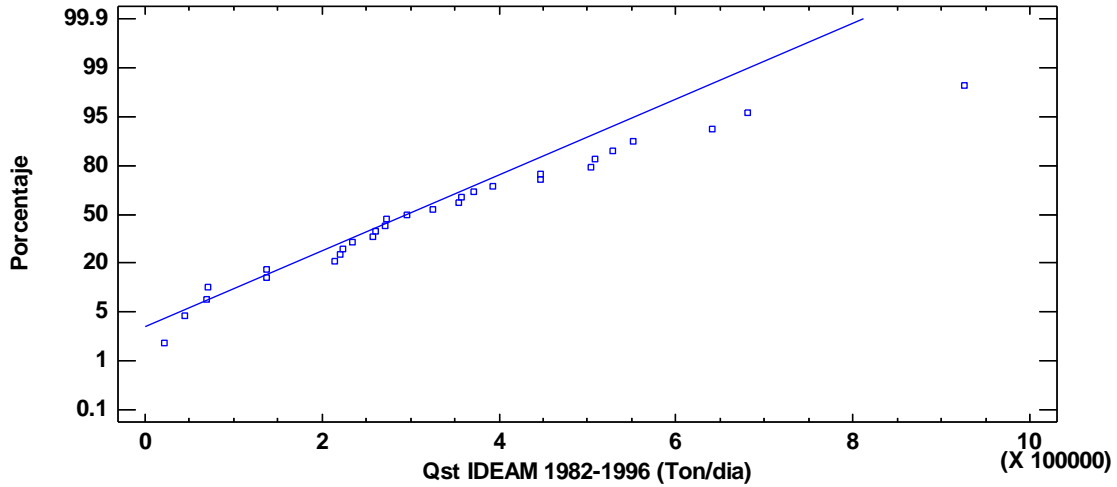


Figura 3-25. Grafica de Probabilidad normal para Qst IDEAM 1982-1996 (Ton/día)

3.8.1.2 MUESTRA 2. DATOS LEH-LF 1989 – 2005

Los datos medidos por el LEH-LF 1989 - 2005 de transporte de sedimentos en suspensión, caudal sólido, corresponden a 22 mediciones con un promedio de 372315 Ton/día, y una desviación estándar de 165613 Ton/día. El valor mínimo es de 103256 Ton/día correspondiente a un caudal líquido de 2756 m³/s, y el máximo es de 681996 Ton/día con un caudal de 10008 m³/s. En la Tabla 3-7 se presenta un resumen estadístico para los datos Qst IDEAM LEH-LF 1989-2005.

Tabla 3-8. Resumen Estadístico para Qst LEH-LF 1989-2005 (Ton/día)

<i>Variable</i>	<i>Dato</i>
Número de datos	22
Promedio	372315
Mediana	353928
Varianza	2.74278E10
Desviación estándar	165613

Variable	Dato
Coef. de variación	44.5%
Mínimo	103256
Máximo	681996
Rango	578740
Cuartil inferior	270155
Cuartil superior	480961
Rango intercuartílico	210806
Sesgo estandarizado	0.93
Curtosis estandarizada	-0.54

La grafica exploratoria de Caja y Bigotes para el transporte de sedimentos en suspensión nos ofrece una idea de la tendencia central del conjunto de datos, con un valor de mediana de 353928. Ton/día y un rango intercuartílico de 210806. Ton/día (ver Figura 3-26). El diagrama no muestra la presencia de datos atípicos. Por otro lado, el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada tienen un valor de 0.93 y -0.54 respectivamente, puesto que están en el rango de -2 y 2 es posible afirmar que los datos provienen de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a $+2$ indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar.

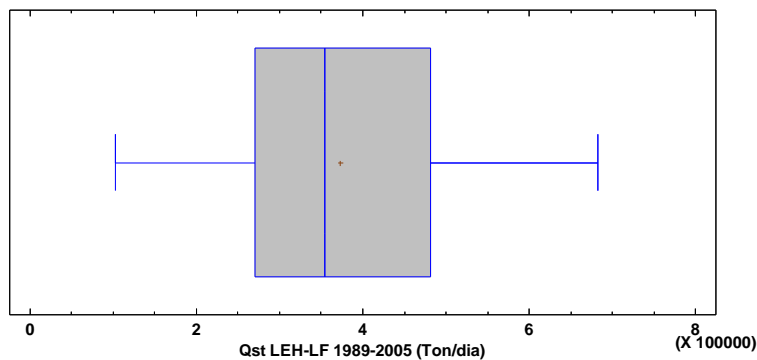


Figura 3-26. Grafica de Caja y Bigotes para Qst LEH-LF 1989 - 2005

Se llevó a cabo un análisis de identificación de valores atípicos a las 22 mediciones, usando la prueba Grubbs, la cual asume normalidad. Teniendo en cuenta que la media muestral es de 336858 Ton/día, y desviación estándar de 207679 Ton/día. Los datos aberrantes son aquellos cuyo valor es superior a la media más cuatro veces la desviación estándar y el valor más extremo se encuentra en la fila 2 (681996 Ton/día), el cual es 1.8699 desviaciones estándar de la media, ver (Figura 3-27). El valor-P para la prueba de Grubb es 1.0, mayor que 0.05, por tanto los valores determinados como aberrantes significativos, no lo son con un nivel de significancia del 5.0%, asumiendo que todos los demás valores siguen una distribución normal. Para ello, se realizaron las pruebas de normalidad, Chi-Cuadrado y Estadístico W de Shapiro-Wilk, el valor-P más bajo es igual a 0.36. Debido a que el valor-P para esta es mayor o igual que 0.05, no se puede rechazar la idea de que los datos Qst LEH-LF 1989-2005 (Ton/día) provienen de una distribución normal con 95%, o más, de confianza. En la Figura 3-28 se presenta la gráfica de probabilidad normal para los datos, donde se observa que siguen esta distribución, exceptuando las colas.

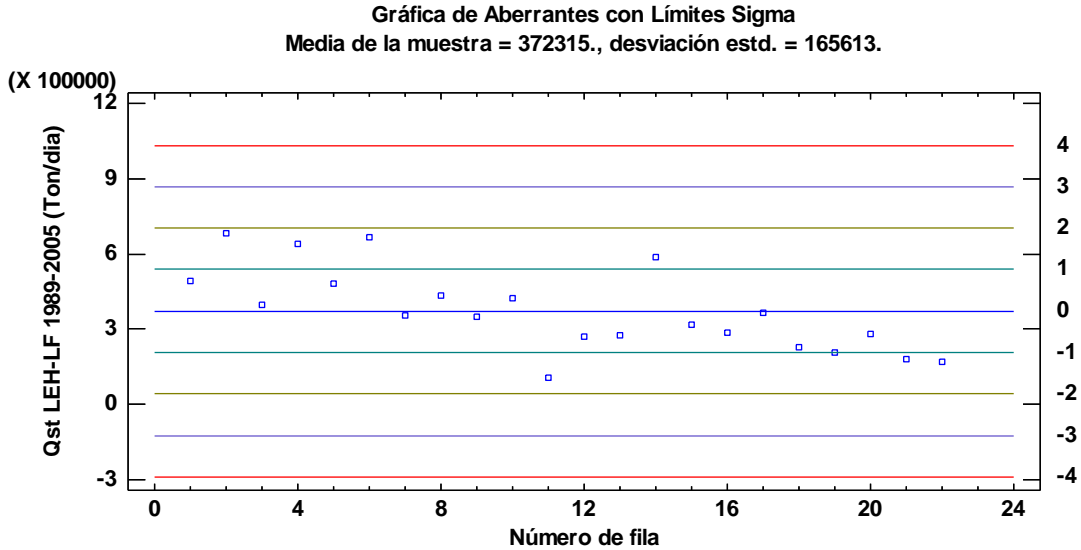


Figura 3-27. Grafica de aberrantes con Limites Sigma para Qst LEH-LF 1989 - 2005 (Ton/día)

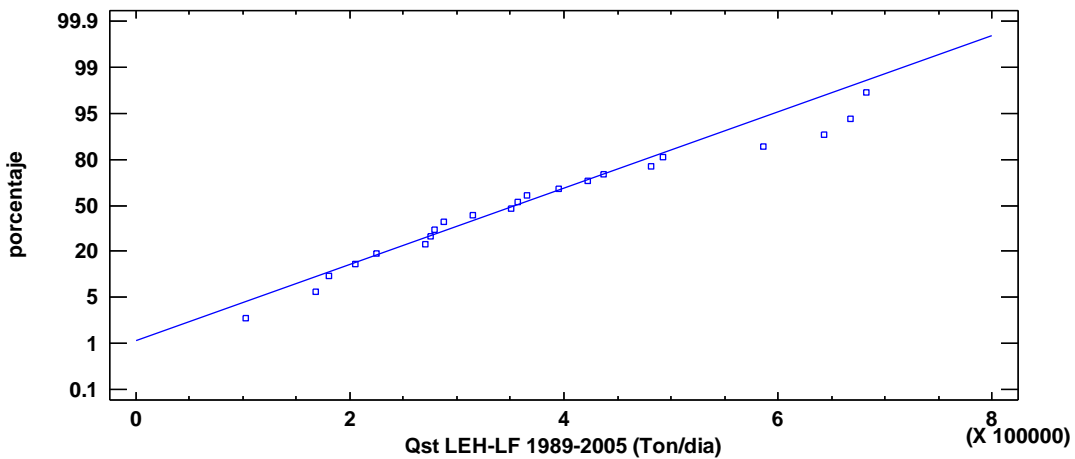


Figura 3-28. Grafica de Probabilidad normal para Qst LEH-LF 1989 - 2005 (Ton/día)

3.8.1.3 COMPARACIÓN DE MUESTRAS 1 y 2

Los datos medidos por IDEAM (Muestra 1) y LEH-LF (Muestra 2) fueron analizados para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas. La Tabla 3-9 presenta un resumen estadístico de las dos muestras. Los datos del LEH-LF (22 mediciones) presentan un mayor promedio, pero menor desviación estándar con respecto a los del IDEAM (29 mediciones). En los subcapítulos anteriores se realizó un análisis de los demás parámetros presentados. La Figura 3-29 presenta una comparación de la gráfica de Caja y Bigotes, donde se observa que la posición de la mediana y promedio de los datos LEH-LF son mayores a los del IDEAM.

Tabla 3-9. Resumen Estadístico de los datos de transporte total en suspensión (Ton/día) del IDEAM 1982 – 1998 y LEH-LF 1989-2005.

	<i>Qst IDEAM 1982-1998</i>	<i>Qst LEH-LF 1989-2005</i>
Recuento	29	22
Promedio	336858	372315
Mediana	296525	353928
Varianza	4.31307E10	2.74278E10
Desviación Estándar	207679	165613
Coficiente de Variación	61.65%	44.48%
Mínimo	21885	103256
Máximo	925949	681996.
Rango	904064	578740.
Cuartil Inferior	220838	270155.
Cuartil Superior	446265	480961.
Rango Intercuartílico	225427	210806.
Sesgo Estandarizado	1.74	0.93
Curtosis Estandarizada	1.01	-0.54

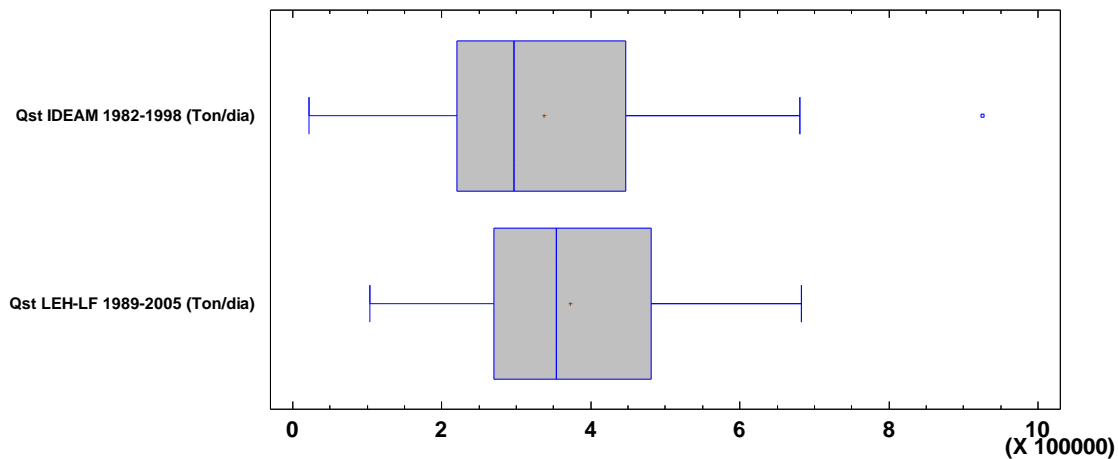


Figura 3-29. Grafica Caja y Bigotes de las dos muestras *Qst IDEAM 1982-1998* y *Qst LEH-LF 1989-2005*

La Figura 3-30 muestra las grafica de densidades suavizadas para las dos muestras, donde se observa que la distribución de los datos es similar.

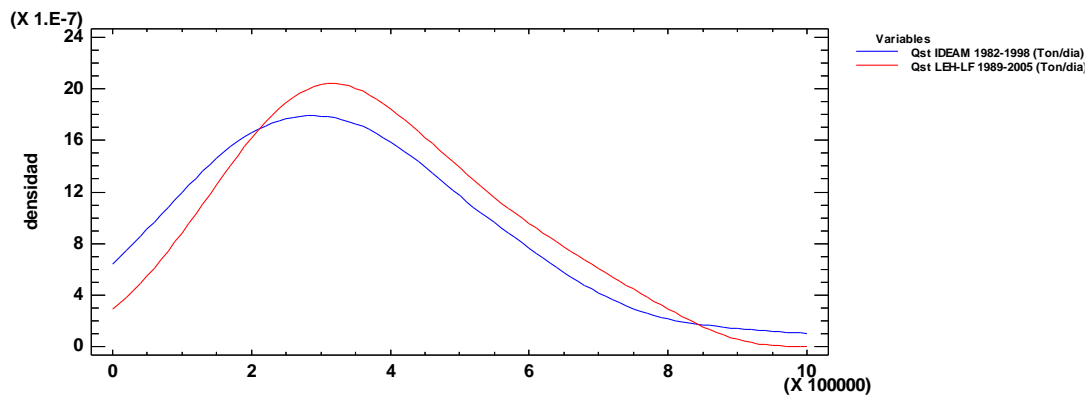


Figura 3-30. Grafica de densidades suavizadas de las dos muestras *Qst IDEAM 1982-1998* y *Qst LEH-LF 1989-2005*

A continuación se presenta la comparación de medias, desviaciones estándar, medianas y distribuciones.

Comparación de Medias

Se construyeron los intervalos, o cotas, de confianza del 95% para cada media:

- Media de Qst IDEAM 1982-1998 (Ton/día): 336858 +/- 78997.1 [257861, 415856]
- Media de Qst LEH-LF 1989-2005 (Ton/día): 372315 +/- 73429.0 [298886, 445744]

El intervalo de confianza para la diferencia entre las medias es -143859 hasta 72944.6 (-35457.0 +/- 108402). Puesto que el intervalo contiene el valor de 0, no hay diferencia significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95.0%.

Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: $\text{media1} = \text{media2}$

Hipótesis Alt.: $\text{media1} <> \text{media2}$

Suponiendo varianzas iguales: $t = -0.657312$ valor-P = 0.514056

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Se realizó la prueba-t para comparar las medias de las dos muestras. Se evaluó las hipótesis específicas acerca de la diferencia entre las medias de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras. En este caso, la prueba se ha construido para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la diferencia no es igual a 0.0. Puesto que el valor-P calculado no es menor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula. Es decir, las medias de las dos muestras son iguales.

Estos resultados asumen que las varianzas de las dos muestras son iguales. En este caso, esa suposición parece razonable, con base en los resultados de la prueba-F para comparar las desviaciones estándar. A continuación se presenta la comparación de las desviaciones estándar.

Comparación de Desviaciones Estándar

Tabla 3-10. Comparación de desviaciones estándar

	Qst IDEAM 1982-1998 (Ton/día)	Qst LEH-LF 1989-2005 (Ton/día)
Desviación Estándar	207679	165613
Varianza	4.31307E10	2.74278E10
Gl	28	21

Razón de Varianzas= 1.57

Se construyeron los intervalos o cotas de confianza del 95% para cada desviación estándar:

- Desviación Estándar de Qst IDEAM 1982-1998 (Ton/día): [164810, 280876]
- Desviación Estándar de Qst LEH-LF 1989-2005 (Ton/día): [127415, 236672]

El intervalo de confianza para la razón de varianzas es 0.676239 hasta 3.48442. Puesto que el intervalo contiene el valor de 1, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las dos muestras con un nivel de confianza del 95.0%.

Prueba-F para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula: $\sigma_1 = \sigma_2$

Hipótesis Alt.: $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 1.57252 valor-P = 0.288255

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Se realizó la prueba-F para comparar las varianzas de las dos muestras. Se evaluó las hipótesis específicas acerca de las desviaciones estándar de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras. En este caso, la prueba se ha construido para determinar si el cociente de las desviaciones estándar es igual a 1.0 versus la hipótesis alternativa de que el cociente no es igual a 1.0. Puesto que el valor-P calculado no es menor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula. Es decir, las desviaciones estándar de las dos muestras son iguales.

Las pruebas-F y los intervalos de confianza mostrados aquí dependen de que las muestras hayan provenido de distribuciones normales. Para probar esta suposición, se deben probar los valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada (ver Capitulo 3.8.1.1 y Capitulo 3.8.1.2). Donde se verifica que los datos provienen de distribuciones normales.

Comparación de Medianas

Mediana de muestra 1: 296525

Mediana de muestra 2: 353928

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: $mediana_1 = mediana_2$

Hipótesis Alt.: $mediana_1 \neq mediana_2$

Rango Promedio de muestra 1: 24.5

Rango Promedio de muestra 2: 28.0

W = 363.0 valor-P = 0.40806

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$

La prueba W de Mann-Whitney se utiliza para comparar las medianas de las dos muestras. Esta prueba se construye combinando las dos muestras, ordenando los datos de menor a mayor, y comparando los rankeos promedio de las dos muestras en los datos combinados. Debido a que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95.0%.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Estadístico DN estimado = 0.210031

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 0.742864

Valor P aproximado = 0.63919

La prueba de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras. Esta prueba se realiza calculando la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras. En este caso, la distancia máxima es 0.210031, que puede verse gráficamente en la Figura 3-31. De particular interés es el valor-P aproximado para la prueba. Debido a que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones con un 95.0%.

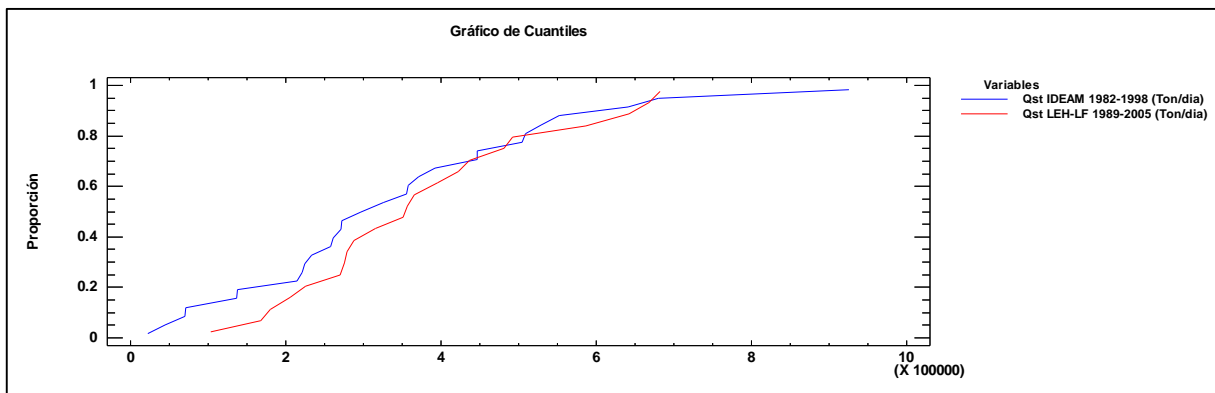


Figura 3-31. Grafica de Cuantiles de las dos muestras

Luego de comparar las medias, desviaciones estándar, normalidad, y distribución se obtuvo que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras. Se probó que las provienen de la misma población. Por tanto, los datos medidos por el IDEAM 1982 – 1996 y LEH-LF 1989 – 2005 se tomarán como un solo grupo de datos medidos. Es decir estos 51 mediciones de transporte total en suspensión (Qst, Ton/día) se tomarán como datos observados en la método de Montecarlo, que permitirá la estimación de los parámetros A y B de la ecuación de Gartner (2004) modificada para transporte total en suspensión.

3.8.1.4 CURVA DE CALIBRACIÓN DE MUESTRAS 1 Y 2: IDEAM – LEH-LF 1982 - 2005

Los 55 datos de las dos muestras, IDEAM 1982 – 1996 y LEH-LF 1989-2005, fueron ajustados a una regresión simple con el modelo multiplicativo o potencial ($Y = aX^b$). Se tomó como variable dependiente, Qst (Ton/día), e independiente, Ql (m³/s). Este modelo es el que mejor representa la tendencia de los datos, y el fenómeno físico del transporte total de sedimentos en suspensión en función del caudal.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$Qst = 3.0444 * Ql^{1.31673} \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Dónde:

$$a = 3.0444$$

$$b = 1.31673$$

Esta ecuación se utilizará para calcular el caudal sólido en función de los caudales de las 868 mediciones ADCP. Y Luego se realizará la respectiva conversión a concentración de sedimentos en suspensión, usando la Ecuación 20, para determinar la Curva de Calibración IDEAM – LEHL-LF 1982 – 2005.

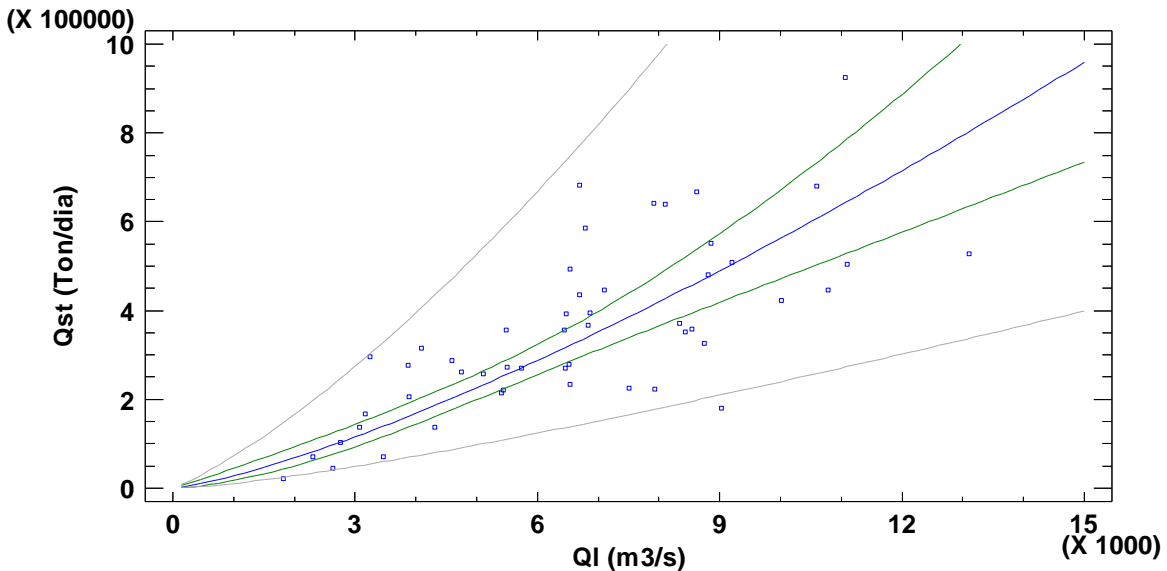


Figura 3-32. Regresión potencial de datos IDEAM – LEH-LF. R2 = 0.67

A continuación se presenta el análisis de varianza realizado:

Tabla 3-11. ANOVA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	17.30	1	17.30	99.98	0.00
Residuo	8.48	49	0.17		
Total (Corr.)	25.78	50			

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Qst (Ton/día) y Ql (m³/s) con un nivel de confianza del 95.0%. El estadístico R² indica que el modelo ajustado explica en un 0.67 la variabilidad en Qst (Ton/día), y el R² ajustado para los grados de libertad es 0.66, por tanto no se tiene una variación significada del R². El coeficiente de correlación es igual a 0.82, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El estadístico Durbin-Watson es igual 1.74601 (P=0.1811), puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

Se realizó la verificación de los supuestos de normalidad, independencia y homocedasticidad. En la Figura 3-33 se presenta la gráfica de Normalidad de los residuos en la cual no se detecta ninguna variación significativa en el comportamiento de los mismos.

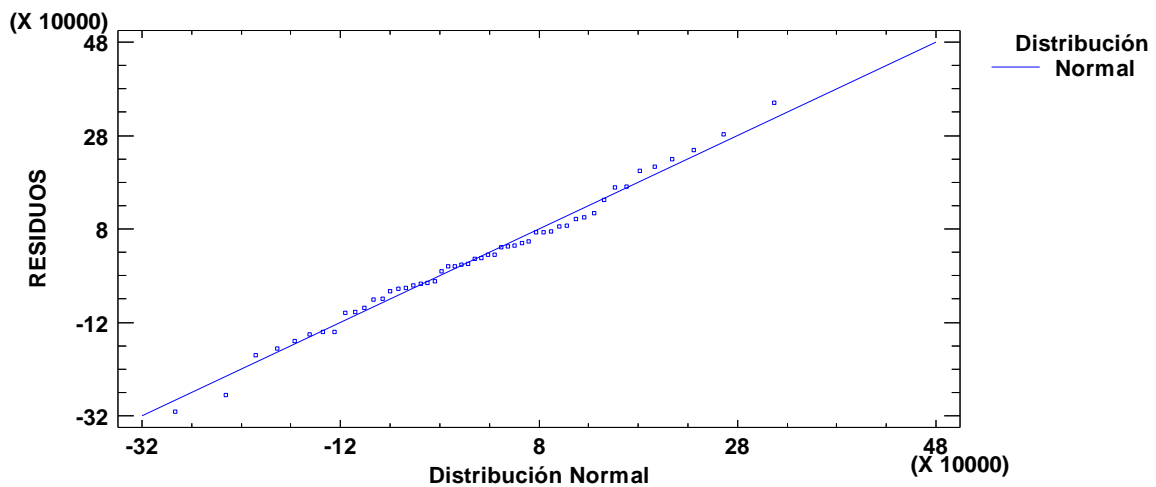


Figura 3-33. Normalidad de los residuos

La comprobación de la homocedasticidad en los residuos se realiza con la gráfica entre los residuos y los valores predichos. Los residuos estudentizados miden cuántas desviaciones estándar se desvía cada valor observado de Qst (Ton/día) del modelo ajustado, utilizando todos los datos excepto esa observación. En este caso, hay 4 residuos estudentizados mayores que 2, pero ninguno mayor que 3. No es evidente ninguna estructura inusual.

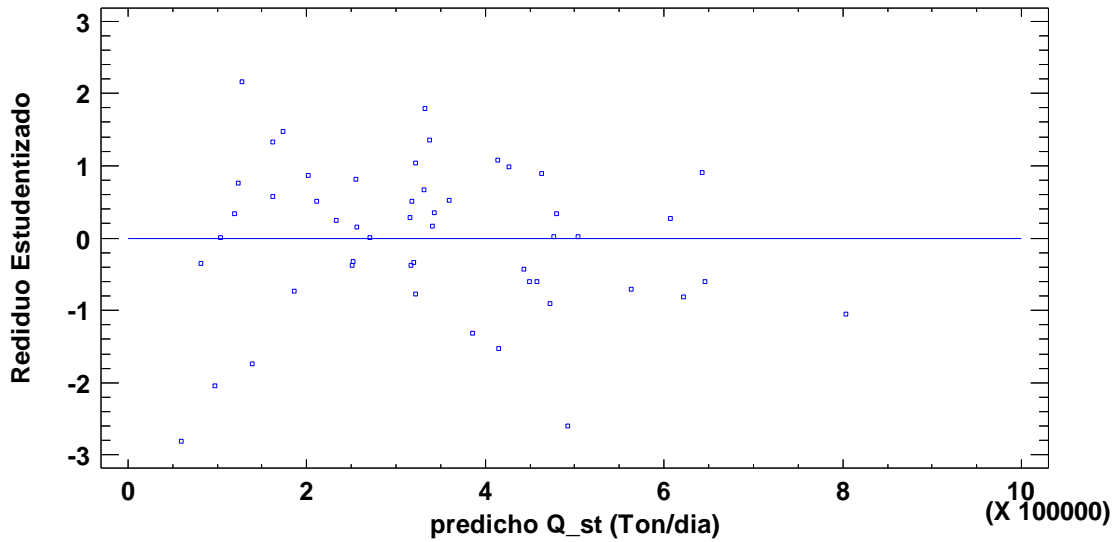


Figura 3-34. Residuos Estudentizados vs. Predicho Qst (Ton/día).

Para comprobar el supuesto de independencia, se verifico que los residuos no presentaran una tendencia con respecto al orden de ejecución. En la Figura 3-35 se presenta la gráfica de residuos para Qst, y se observa un comportamiento errático y disperso lo que permite concluir que no hay autocorrelación de residuos.

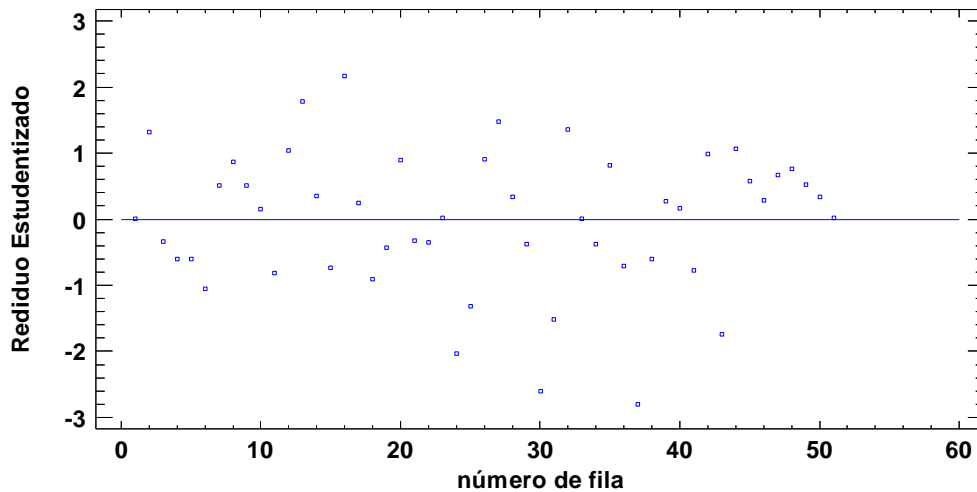


Figura 3-35. Residuos Estudentizados vs. Número de fila

Entonces, se utilizará la regresión expuesta anteriormente para generar los caudales sólidos (Qst, Ton/día) que serán utilizados en el método Montecarlo para calibrar la ecuación de ABSprom determinando los parámetros A y B.

3.8.1.5 MUESTRA 3. DATOS IDEAM 1972 – 2012

Los datos medidos por el IDEAM 1972 – 2012 de transporte de sedimentos en suspensión, caudal sólido, corresponden a 476 mediciones con un promedio de 398212 Ton/día, y una desviación estándar de 253059 Ton/día. El valor mínimo es de 46830 Ton/día correspondiente a un caudal líquido de 1953 m³/s, y el máximo es de 1564000

Ton/día con un caudal de 13531 m³/s. En la Tabla 12 se presenta un resumen estadístico para los datos Qst IDEAM 1972-2012.

Tabla 3-12. Resumen Estadístico para Qst IDEAM 1972 – 2012 (Ton/día)

<i>Variable</i>	<i>Dato</i>
Número de datos	476
Promedio	398212
Mediana	337000
Varianza	6.40388E10
Desviación estándar	253059
Coef. de variación	63.5488%
Mínimo	46830
Máximo	1.564E6
Rango	1.51717E6
Cuartil inferior	221100
Cuartil superior	522050
Rango intercuartílico	300950
Sesgo estandarizado	11.42
Curtosis estandarizada	9.08

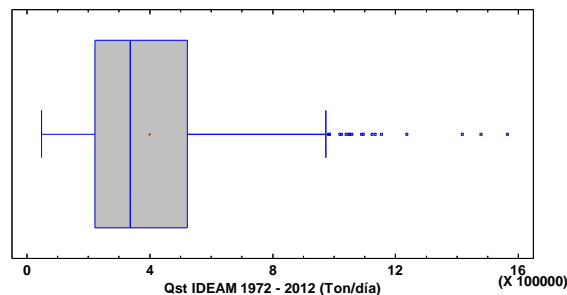


Figura 3-36. Grafica de Caja y Bigotes para Qst IDEAM 1972 - 2012

La grafica exploratoria de Caja y Bigotes para el transporte de sedimentos en suspensión nos ofrece una idea de la tendencia central del conjunto de datos, con un valor de mediana de 337000 Ton/día y un rango intercuartílico de 300950 Ton/día (Ver Figura 3-23). El diagrama nos muestra la presencia varios datos atípicos, superiores a 1003475 Ton/día. Por otro lado, el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada tienen un valor de 11.42 y 9.08 respectivamente, puesto que están en el rango de -2 y 2 es posible afirmar que los datos provienen de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a $+2$ indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar.

Se llevó a cabo un análisis de identificación de valores atípicos a las 476 mediciones, usando la prueba Grubbs, la cual asume normalidad. Teniendo en cuenta que la media muestral es de 398212 Ton/día, y desviación estándar de 253059 Ton/día. Los datos aberrantes son aquellos cuyo valor es superior a la media más cuatro veces la desviación estándar, estos datos son los de la fila 202, 203 y 204 con valores superiores a 1410448 Ton/día (ver Figura 3-24). El valor-P para la prueba de Grubb es 0.0015259, menor que 0.05, por tanto los valores determinados como aberrantes significativos, lo son con un nivel de significancia del 5.0%, asumiendo que todos los demás valores siguen una distribución normal. Para ello, se realizaron las pruebas de normalidad, Chi-Cuadrado y Estadístico W de Shapiro-Wilk, el valor-P más bajo es igual a 0. Debido a que el valor-P para esta es menor que 0.05, se puede rechazar la idea de que los datos Qst IDEAM 1972-2012 (Ton/día) provienen de una distribución normal con 95%, o más, de confianza.

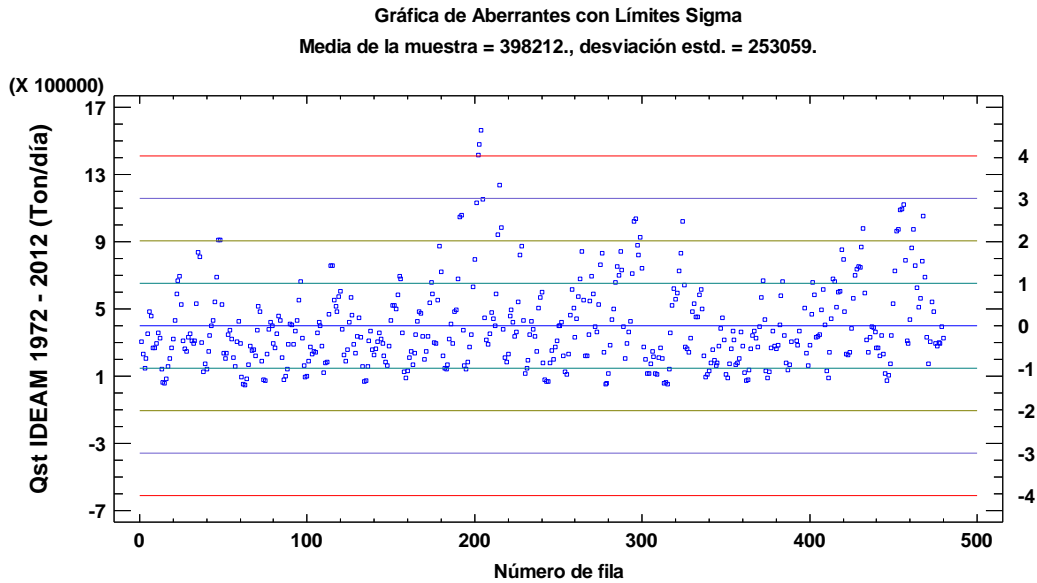


Figura 3-37. Grafica de aberrantes con Límites Sigma para Qst IDEAM 1972-2012(Ton/día)

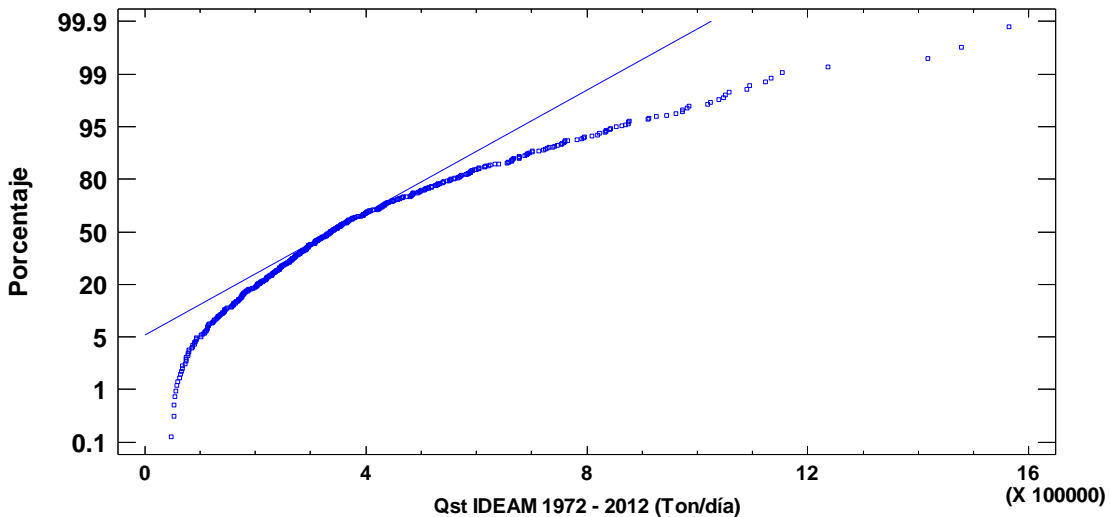


Figura 3-38. Grafica de Probabilidad normal para Qst IDEAM 1972-2012 (Ton/día)

3.8.1.6 CURVAS DE CALIBRACIÓN MUESTRA 3: DATOS IDEAM 1972 – 2012

Los datos IDEAM 1972 – 2012 de transporte total en suspensión fueron convertidos a concentración media de sedimentos, usando la Ecuación 15. Y analizando cada una de las tendencias definidas se obtuvieron las siguientes curvas de calibración o regresiones para mínimos, medios y máximos, usando los caudales totales de las 868 mediciones ADCP.

$$\begin{aligned}
 SSC_{reg_{IDEAM\ min}} &= 2.7 * Ql^{0.58} \quad [mg/L] \\
 SSC_{reg_{IDEAM\ med}} &= 0.095 * Ql + 20 \quad [mg/L] \\
 SSC_{reg_{IDEAM\ max}} &= 2.124 * Ql^{0.6307} \quad [mg/L]
 \end{aligned}$$

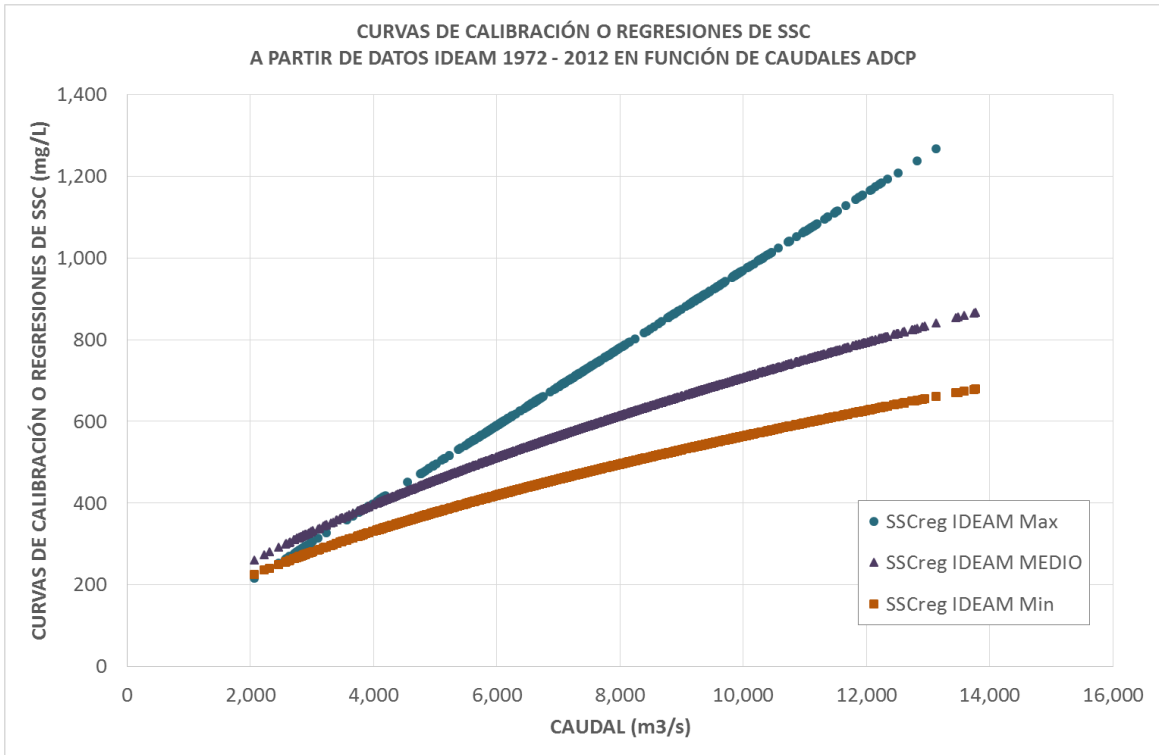


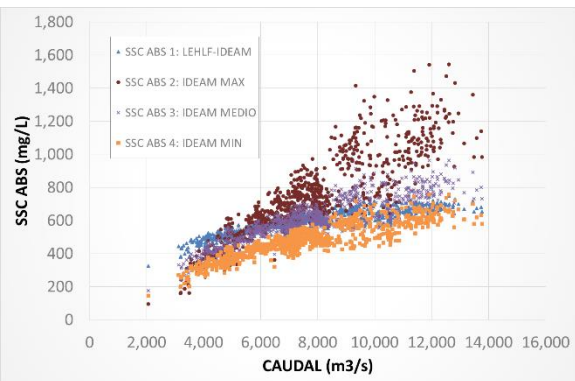
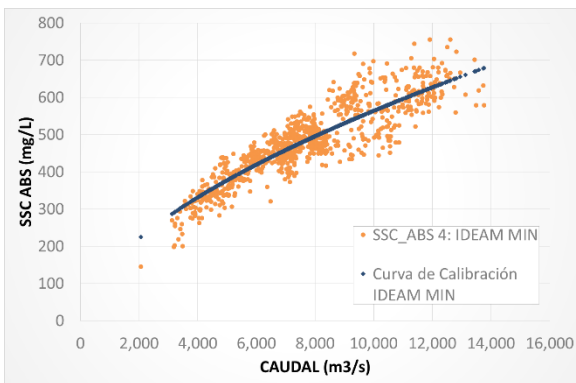
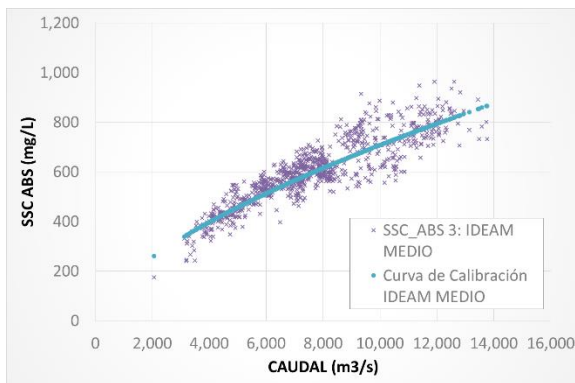
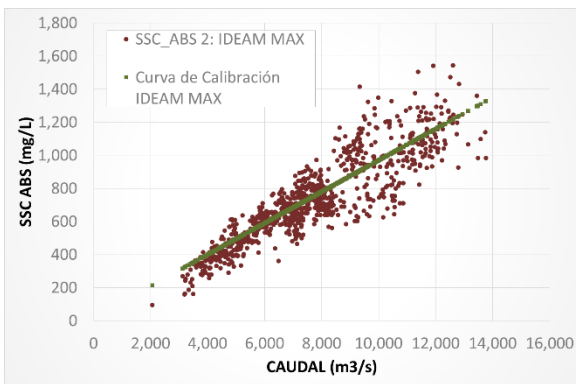
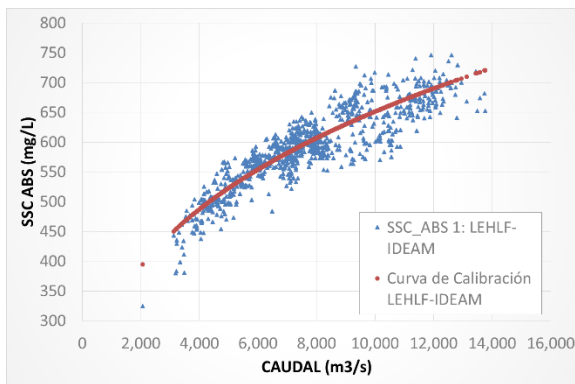
Figura 3-39. Concentración de sedimentos en suspensión – Estación Calamar 1972 – 2012. Curvas de Calibración para máximos, medios y mínimos.

3.8.2 RESULTADOS DEL MODELO MONTECARLO

La simulación de Montecarlo basado en la generación aleatoria de valores para los parámetros A y B, comparando la ecuación simplificada del Sonar con datos de referencia a través de un R2, fue desarrollada en Matlab. En la Tabla 3-13 y Figura 3-40 se presentan los resultados de A y B, de las ecuaciones SSC_{ABS} 1, SSC_{ABS} 2, SSC_{ABS} 3, y SSC_{ABS} 4 correspondiente a las cuatro calibraciones realizadas con los datos de referencia.

Tabla 3-13. Parámetros A y B para las diferentes calibraciones

PARAMETROS	SSC_{ABS} 1 LEHLF-IDEAM	SSC_{ABS} 2 IDEAM MAX	SSC_{ABS} 3 IDEAM MEDIOS	SSC_{ABS} 4 IDEAM MIN
A	0.0127	0.0426	0.0260	0.0251
B	1.6270	-0.9904	0.4337	0.4161
R2	0.82	0.81	0.82	0.82



SSC_{ABS1} : Datos SSC generados a partir del ABSprom ajustado a la Curva de Calibración LEHLF-IDEAM 1982-2005.
 SSC_{ABS2} : Datos SSC generados a partir del ABSprom ajustado a la Curva de Calibración IDEAM MAXIMOS 1972-2012.
 SSC_{ABS3} : Datos SSC generados a partir del ABSprom ajustado a la Curva de Calibración IDEAM MEDIOS 1972-2012.
 SSC_{ABS4} : Datos SSC generados a partir del ABSprom ajustado a la Curva de Calibración IDEAM MINIMOS 1972-2012.

Figura 3-40. Concentración media de sedimentos en suspensión, Río Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom con mediciones 2006-2014, y Curvas de Calibración de los datos de referencia.

En la

Tabla 3-13 se observa que el rango de valores del parámetro A esta entre [0.0127, 0.0426] y del B esta entre [-0.9904, 1.6270] con un R2 entre 0.81 y 0.82 para las cuatro calibraciones. El parámetro A presenta una menor variación al cambiar la curva de calibración, a diferencia del parámetro B. La mejor estimación de los parámetros A y B corresponde a la calibración realizada con los datos máximos del IDEAM. Es decir, la ecuación SSC_{ABS2} puesto que la pendiente A y el intercepto B son iguales a 0.0426 y -0.9904, respectivamente. Acercándose el valor de A más al valor teórico de 0.1 sugerido por Gartner (2004) el cual asume una distribución de partículas uniforme. El intercepto B varía para diferentes instrumentos y rangos de tamaños de grano. Como valores de referencia se tiene los dados por Thevenot y otros 1992 determinaron que A puede ser igual a 0.077 en laboratorio y 0.042 en campo, mientras que B puede ser igual a 0.97 y 1.43 para el laboratorio y calibraciones de campo, respectivamente.

A continuación se presenta la forma de la ecuación del Sonar para la concentración media de sedimentos en suspensión a partir del ABSprom para el Río Magdalena, entre K5 – K38, entre los años 2006 – 2014 con los parámetros A y B de la mejor estimación. Y en la Figura 3-41 se presenta la gráfica de caudal del ADCP vs SSC a partir del ABSprom.

$$SSC_{ABS} = 10^{(0.0426 \cdot ABS_{prom} - 0.9904)} [mg/L] \quad Ec. 16$$

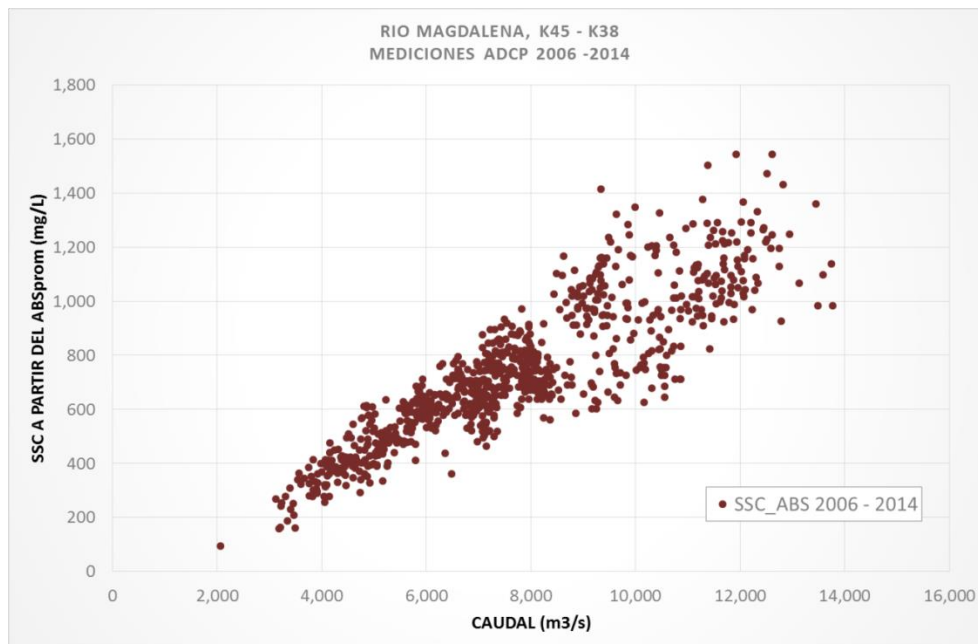


Figura 3-41. Concentración de sedimentos en suspensión a partir del ABSprom del ADCP 2006 -2014. Río Magdalena K5 – K8.

La Figura 3-42 presenta las Concentración media de sedimentos en suspensión estimada a partir del ABSprom, con los parámetros A=0.0426 y B=-0.9904, de las mediciones ADCP entre el 2006 y 2014 del sector K5 – K38 comparadas con las mediciones históricas de concentración de sedimentos en suspensión realizadas por el LEHLF –

IDEAM 1982 – 2005 e IDEAM 1972 – 2012. Según Schumm – Winkely (1994) los valores medios de concentración del río Magdalena son 900 mg/L.

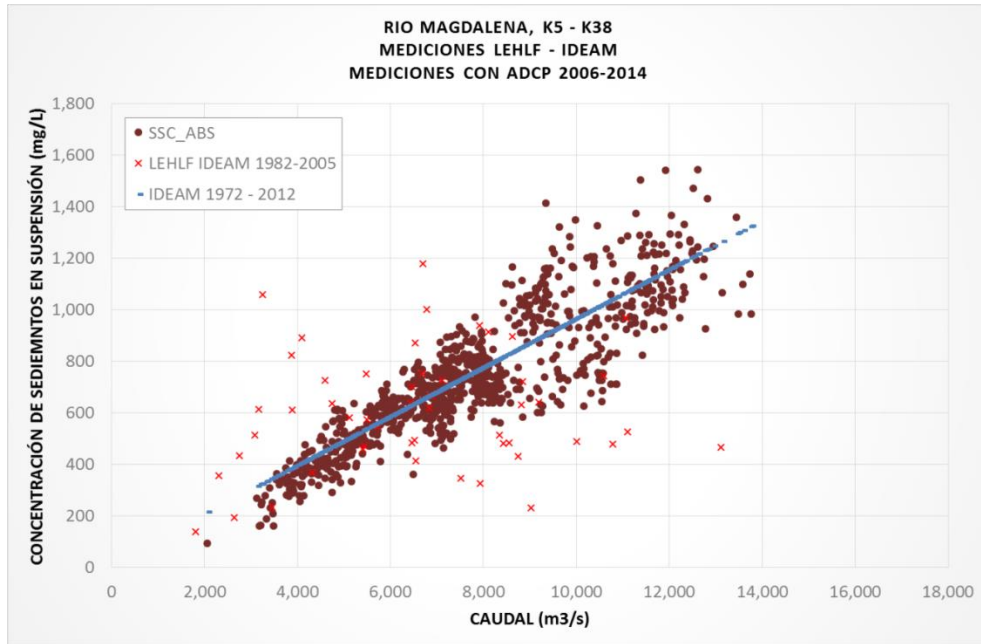


Figura 3-42. Concentración media de sedimentos en suspensión a partir del ABSprom del ADCP, Río Magdalena K5 – K38, entre 2006 – 2014. Mediciones históricas y de referencia.

La Figura 3-43 presenta la gráfica de la relación entre la curva de calibración $SSC_{max-IDEAM}$ vs. La concentración de sedimentos estimada a partir del ABSprom, SSC_{ABS2} . Se observa como la relación 1:1 se mantiene entre los datos de referencia ($SSC_{max-IDEAM}$) y los datos de SSC generados a partir del ABS (SSC_{ABS2})

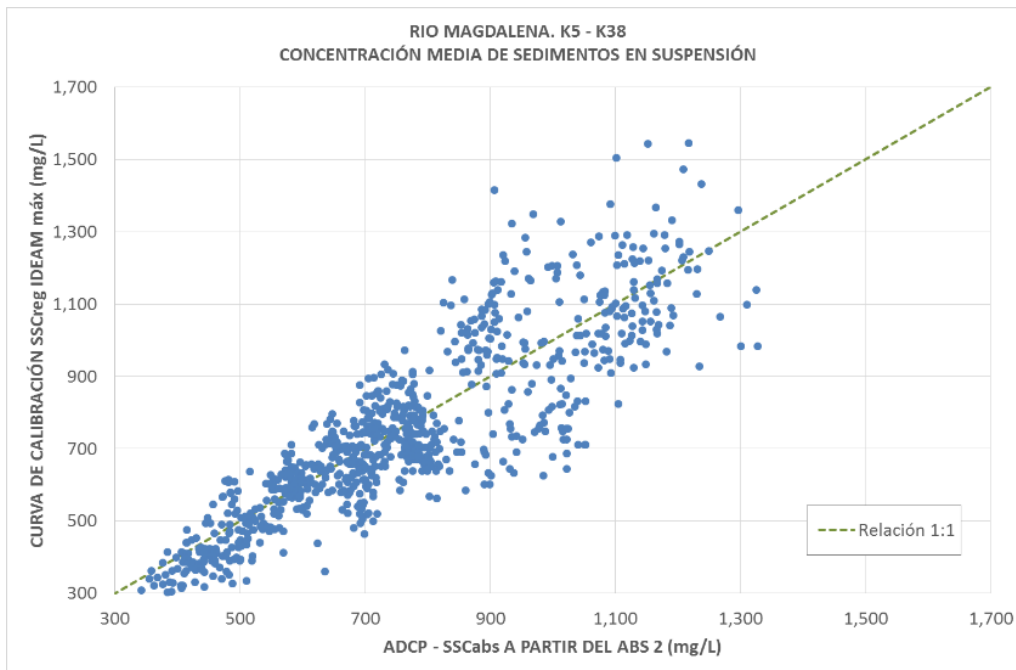


Figura 3-43. Relación entre $SSC_{max-IDEAM}$ vs. SSC_{ABS2}

3.9 RECONSTRUCCION DE LA SERIE 2006-2014 DE CONCENTRACIÓN MEDIA Y TRANSPORTE TOTAL DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN DEL RIO MAGDALENA K5-K38

Una vez calibrada la ecuación del Sonar Simplificada con el método Montecarlo, con los valores de los parámetros $A=0.0426$ y $B=-0.9904$ que mejor ajustaron la ecuación del Sonar simplificada a los registros históricos. Se procede a calcular la serie 2006 - 2014 de SSC de las mediciones ADCP y el transporte total de sedimentos en suspensión, luego estos resultados se comparan con la serie de caudales medidos por el ADCP, y se les realiza un análisis estadístico. Posteriormente, se realiza una comparación entre la estimación de la concentración media y transporte total de sedimentos en suspensión a partir del ABS del ADCP y con las metodologías tradicionales, regresiones del IDEAM. Y finalmente, se presenta un análisis estadístico por fechas de las mediciones de SSC y Qst obtenidas a partir de las mediciones del Acoustic Backscatter.

A continuación se presenta la serie de concentración media de sedimentos en suspensión calculados a partir del ABSprom, de las 868 mediciones ADCP realizadas entre 2006 y 2014. Se observa que las concentraciones en el Rio Magdalena no han aumentado, la serie se mantiene sin ninguna tendencia, respondiendo al comportamiento del hidrograma. Con un promedio de 732 mg/L, un valor mínimo de 94.5 mg/L y un máximo de 1455.05 mg/L. El valor mínimo de la serie 2006 – 2014 se obtuvo el 25 de Febrero de 2010, con un caudal de 2058 m³/s, y el máximo el 23 de Diciembre de 2011 con un caudal de 12608 m³/s.

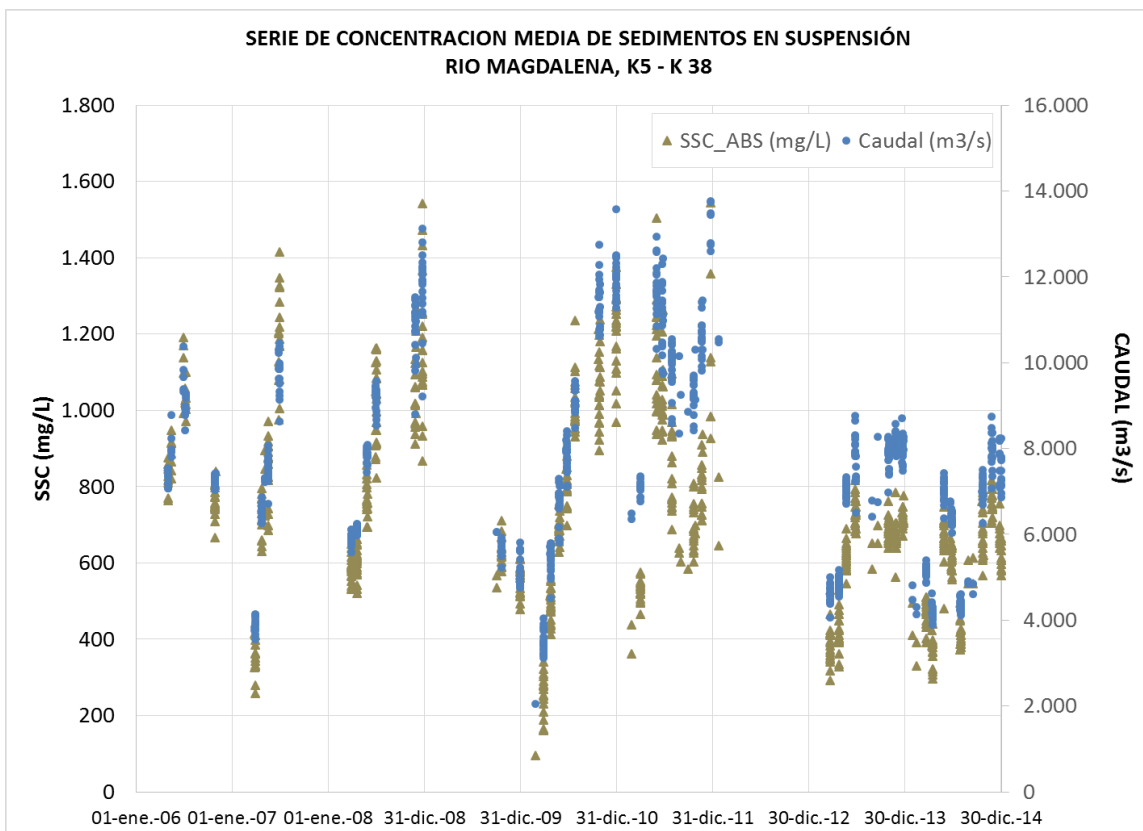


Figura 3-44. Serie 2006 – 2014 de concentración media de sedimentos en suspensión, rio Magdalena K5 – K38.

En la Figura 3-45 y Tabla 3-14 se presenta un análisis de los resultados de SSC_{ABS} con la gráfica exploratorio de Cajas y Bigotes y resumen estadístico por secciones, K5 – K35, del Rio Magdalena entre los años 2006 – 2014. Siendo la sección K11, la del mayor número de mediciones en el periodo analizado, presenta un promedio de 724 mg/L con una desviación estándar de 237 mg/L, un mínimo y máximo de 243 y 1292 mg/L respectivamente.

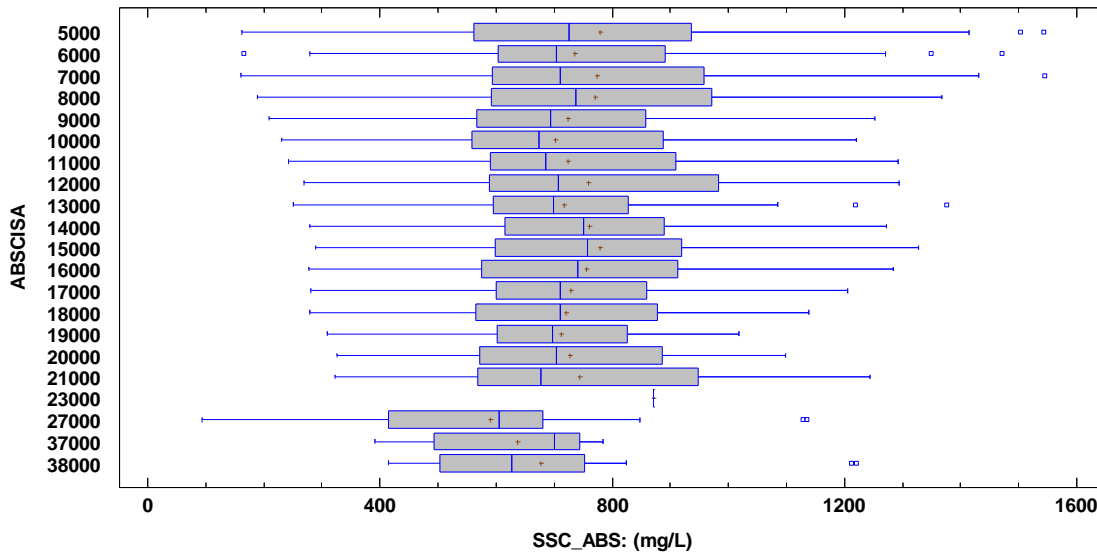


Figura 3-45. Gráfica de cajas y Bigotes para la Concentración de Sedimentos en suspensión 2006 – 2014, para el río Magdalena K5 – K38.

Tabla 3-14. Resumen Estadístico para SSC_ABS (mg/L). Rio Magdalena K5 – K38. Años 2006 – 2014.

ABSCISA	Número de datos	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
5000	46	778	726	342	162	1543	1381
6000	45	735	704	291	165	1472	1307
7000	44	773	710	315	160	1544	1384
8000	46	771	738	267	188	1367	1179
9000	45	724	694	244	209	1253	1044
10000	44	703	673	234	230	1220	990
11000	84	724	685	237	243	1292	1049
12000	50	758	708	248	269	1294	1025
13000	42	718	699	238	252	1375	1124
14000	43	760	750	260	279	1271	992
15000	40	779	757	268	290	1328	1038
16000	43	755	740	257	277	1284	1007
17000	48	728	711	234	281	1206	925
18000	55	721	711	209	279	1138	859
19000	42	713	697	189	309	1019	710
20000	43	727	704	228	326	1099	772
21000	43	743	677	267	322	1244	922
23000	1	872	872		872	872	0
27000	32	590	605	212	95	1135	1040
37000	16	637	701	130	391	785	394
38000	16	677	626	241	415	1220	805
Total	868	732	704	252	95	1544	1450

Aplicando la Ecuación 20 a los resultados obtenidos de concentración media de sedimentos en suspensión calculados a partir del ABS_{prom} se obtiene el transporte total

de sedimentos en suspensión. La Figura 3-50 presenta los resultados, el Qst ABS en función del caudal. La Figura 3-47 presenta el caudal sólido calculado por el ABS, comparado con las mediciones de LEHLF – IDEAM realizadas entre 1982 – 2005, y los datos entregado por el IDEAM. Observamos que la dispersión de Qst ABS 2006 -2014 está entre el rango de mediciones del LEHLF 1982 – 2005, e IDEAM 1972 – 2012.

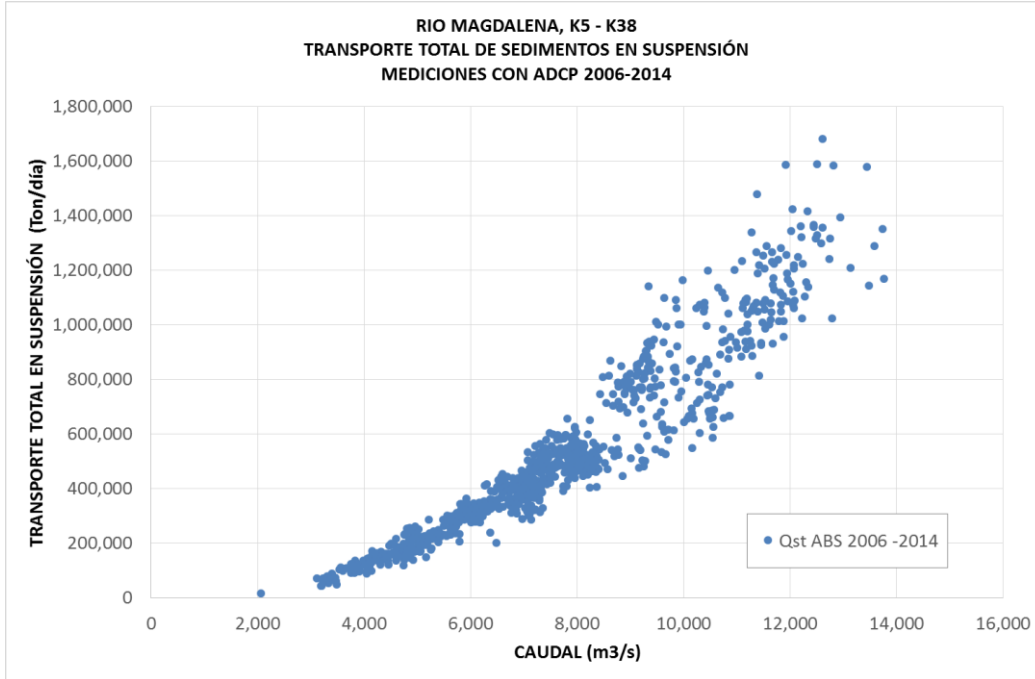


Figura 3-46. Transporte total de sedimentos en suspensión, Río Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom del ADCP.

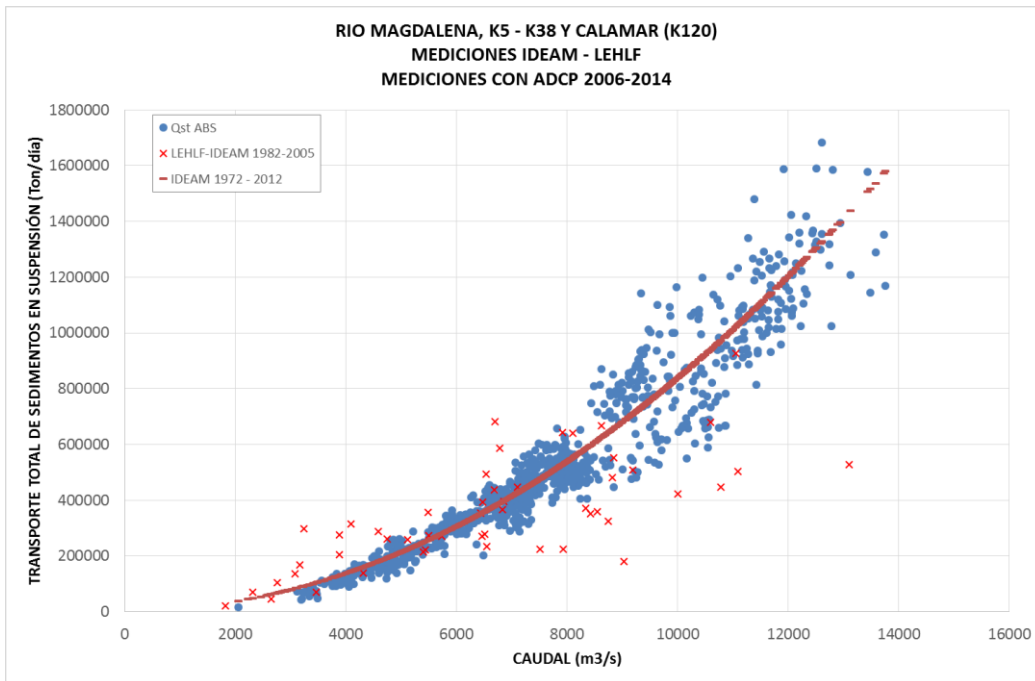


Figura 3-47. Transporte total de sedimentos en suspensión, río Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom del ADCP. Y mediciones IDEAM y LEHLF.

Con las fechas correspondientes a las mediciones ADCP se reconstruye la serie de Transporte Total de Sedimentos en Suspensión 2006 – 2014 para el Río Magdalena, Sector K5 – K38. El mínimo transporte total es de 16.802 Ton/día, correspondiente al 25 de Febrero de 2010, y el máximo es de 1.681.980 Ton/día del 23 de Diciembre de 2011. Correspondiente a las fechas de menores valores de concentración media de sedimentos en suspensión.

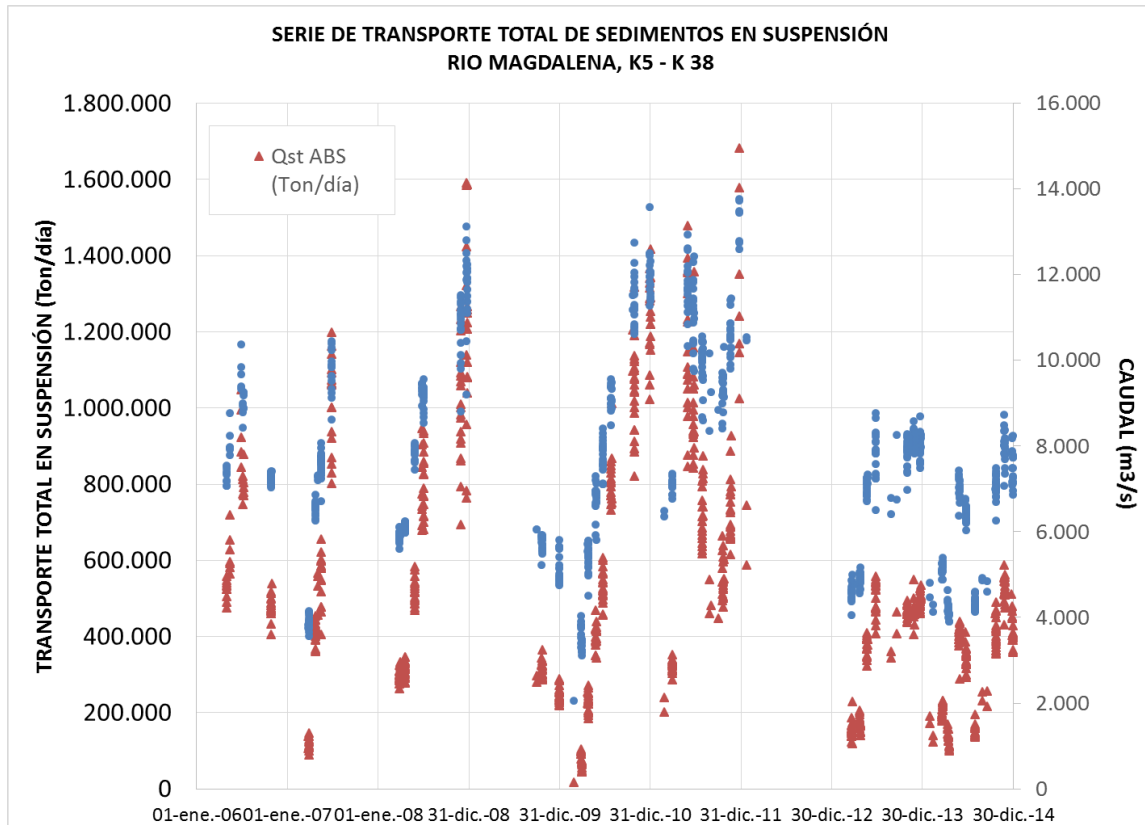


Figura 3-48. Serie 2006 – 2014 de Transporte total de sedimentos en suspensión, río Magdalena K5 – K38, calculado a partir de ABSprom del ADCP.

En la Figura 3-49 y Tabla 3-15 se presenta un análisis de los resultados de $Q_{st_{ABS}}$ con la gráfica exploratorio de Cajas y Bigotes y resumen estadístico por secciones, K5 – K35, del Río Magdalena entre los años 2006 – 2014. Siendo la sección K11, la del mayor número de mediciones en el periodo analizado, presenta un promedio de 519.925 Ton/día con una desviación estándar de 307.250 Ton/día, un mínimo y máximo de 67.566 y 1.290.700 Ton/día respectivamente.

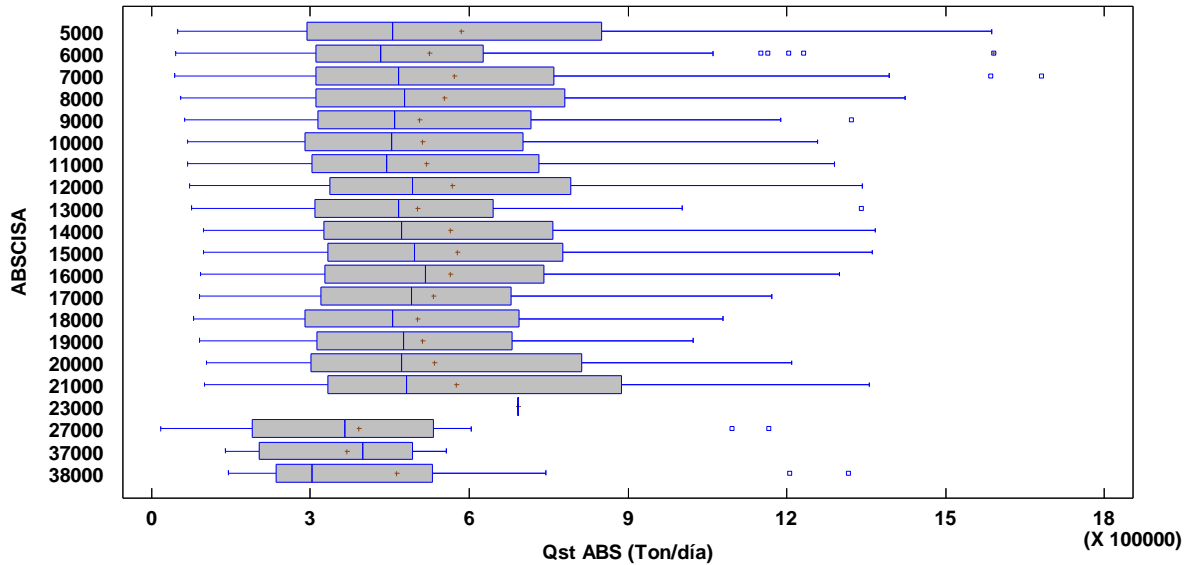


Figura 3-49. Gráfica de cajas y Bigotes para el Transporte Total de Sedimentos en suspensión determinada a partir del ABS del ADCP, 2006 – 2014, para el Río Magdalena K5 – K38.

Tabla 3-15. Resumen Estadístico para Qst_ABS (Ton/día). Río Magdalena K5 – K38. Años 2006 – 2014.

ABSCISA	Número de datos	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
5000	46	585,819	455,680	424,823	48,775	1,587,970	1,539,190
6000	45	524,704	433,593	355,929	45,708	1,590,710	1,545,010
7000	44	571,767	465,999	402,948	44,106	1,681,980	1,637,870
8000	46	552,232	478,754	325,429	54,295	1,423,550	1,369,260
9000	45	505,684	459,101	301,957	62,787	1,321,650	1,258,860
10000	44	510,867	453,716	313,903	67,820	1,257,480	1,189,660
11000	84	519,925	444,183	307,250	67,566	1,290,700	1,223,130
12000	50	567,520	493,731	320,154	72,453	1,343,550	1,271,100
13000	42	502,700	466,925	287,433	75,101	1,340,460	1,265,360
14000	43	564,805	472,215	351,777	97,532	1,367,160	1,269,630
15000	40	577,641	497,459	350,709	97,757	1,361,230	1,263,470
16000	43	564,229	517,495	335,681	91,567	1,299,800	1,208,230
17000	48	532,853	490,411	292,724	91,123	1,171,450	1,080,330
18000	55	501,781	455,847	268,486	79,719	1,080,440	1,000,730
19000	42	511,067	476,272	255,694	90,705	1,023,550	932,843
20000	43	534,016	471,377	307,776	103,884	1,209,140	1,105,260
21000	43	576,090	481,320	354,624	100,405	1,356,250	1,255,850
23000	1	692,868	692,868		692,868	692,868	0
27000	32	391,888	365,015	254,151	16,802	1,166,940	1,150,140
37000	16	368,385	399,251	143,538	139,785	555,935	416,150
38000	16	462,943	303,461	350,362	145,678	1,316,310	1,170,630
Total	868	530,046	466,757	323,165	16,802	1,681,980	1,665,180

La Figura 3-50 presenta una comparación de la serie de caudales (estimada con la Curva HQ, ver Figura 3-3), la serie de SSC estimada con la regresión del IDEAM y la estimada con el ABS del ADCP entre los años 2006 – 2014. También se realiza una anotación de los eventos niño y niña presentados en este periodo de tiempo con el nivel de intensidad, tomados de la NOAA. También se presenta una comparación del transporte total de sedimentos en suspensión a partir del ADCP y con los datos del IDEAM, ver Figura 3-51.

En la Figura 3-50 se puede observar que la regresión del IDEAM permite tener un punto de SSC, mientras que con las mediciones ADCP se tiene un rango de valores. De la gráfica se observa que para el 23 de Diciembre de 2011, evento máximo, se presentó un

caudal según la curva HQ de 11.653 m³/s, con un valor de SSC y Qst según la regresión del IDEAM de 1.127 mg/L y 1.134.775 Ton/día (ver Figura 3-51). Mientras que con las mediciones del ADCP, un total de 7 mediciones para esta fecha, se tiene un promedio de 1.152 mg/L con un valor mínimo y máximo de 927 y 1.544 mg/L respectivamente. Es decir, con las estimaciones de concentración media de sedimentos en suspensión a partir del ABS se pueden tener rangos de mediciones para las mismas fechas en el sector del río Magdalena, K5 – K38, dependiendo del caudal y momento del hidrograma.

Otro aspecto importante que se puede observar en las gráficas Figura 3-50 y Figura 3-51 es que después de eventos niñas sostenidos, con intensidad de moderada a fuerte, se obtienen mayores valores de Concentración de sedimentos en suspensión, según las mediciones ADCP. En los eventos máximos de Octubre a Diciembre del 2010, se obtuvieron SSC_{ABS} entre 895 a 1375 mg/L con un rangos entre 77 – 406 mg/L. Y para los eventos máximos de 2011, finales de Mayo y de Diciembre, el SSC_{ABS} estuvo entre 1224 – 1504 mg/L y 927 – 1544 mg/L, con rangos entre 280 y 617 mg/L respectivamente. Es decir, el río Magdalena presentó una mayor concentración de sedimentos en el año 2011, que en la inundación del 2010.

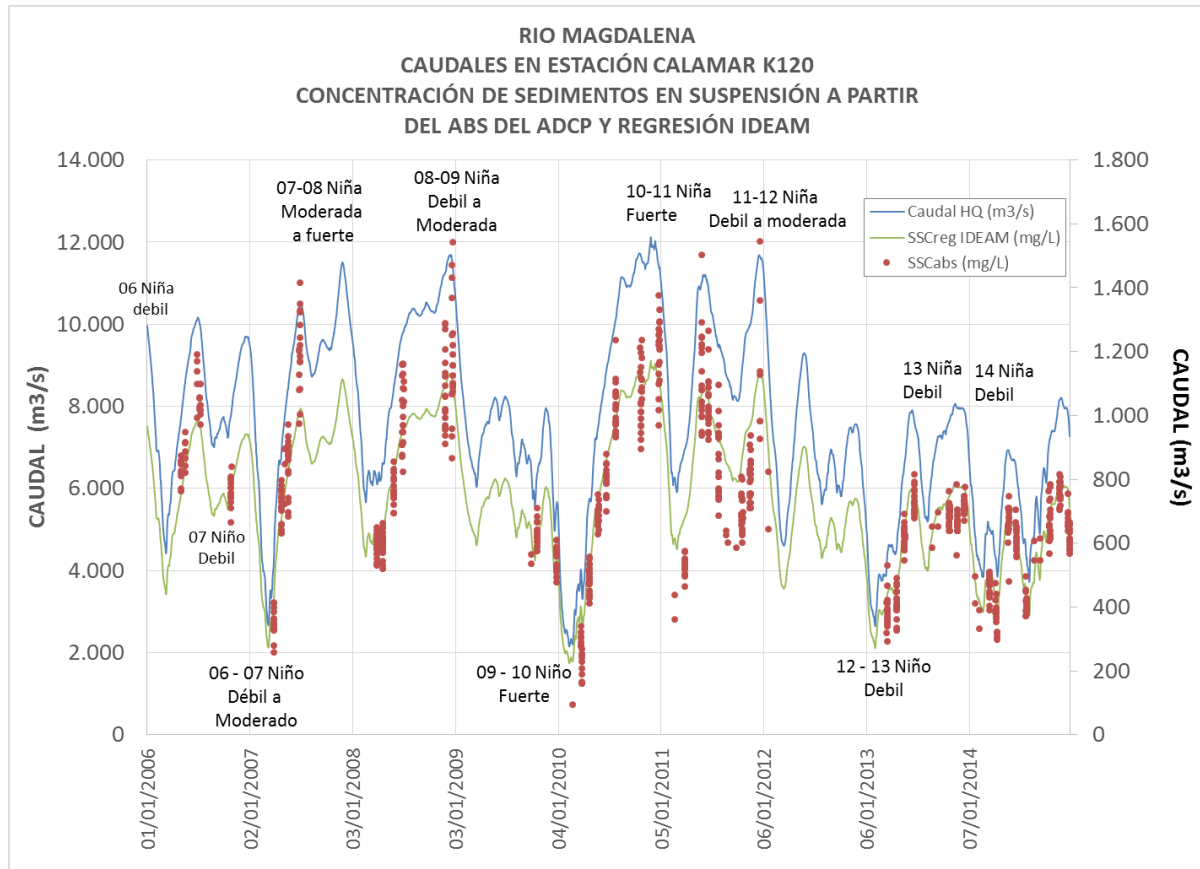


Figura 3-50. Serie de caudales del Río Magdalena 2006 – 2014, Calamar (K120), comparada con la SSC_{ABS} del ADCP (sector K5 – K38) y de la regresión del IDEAM.

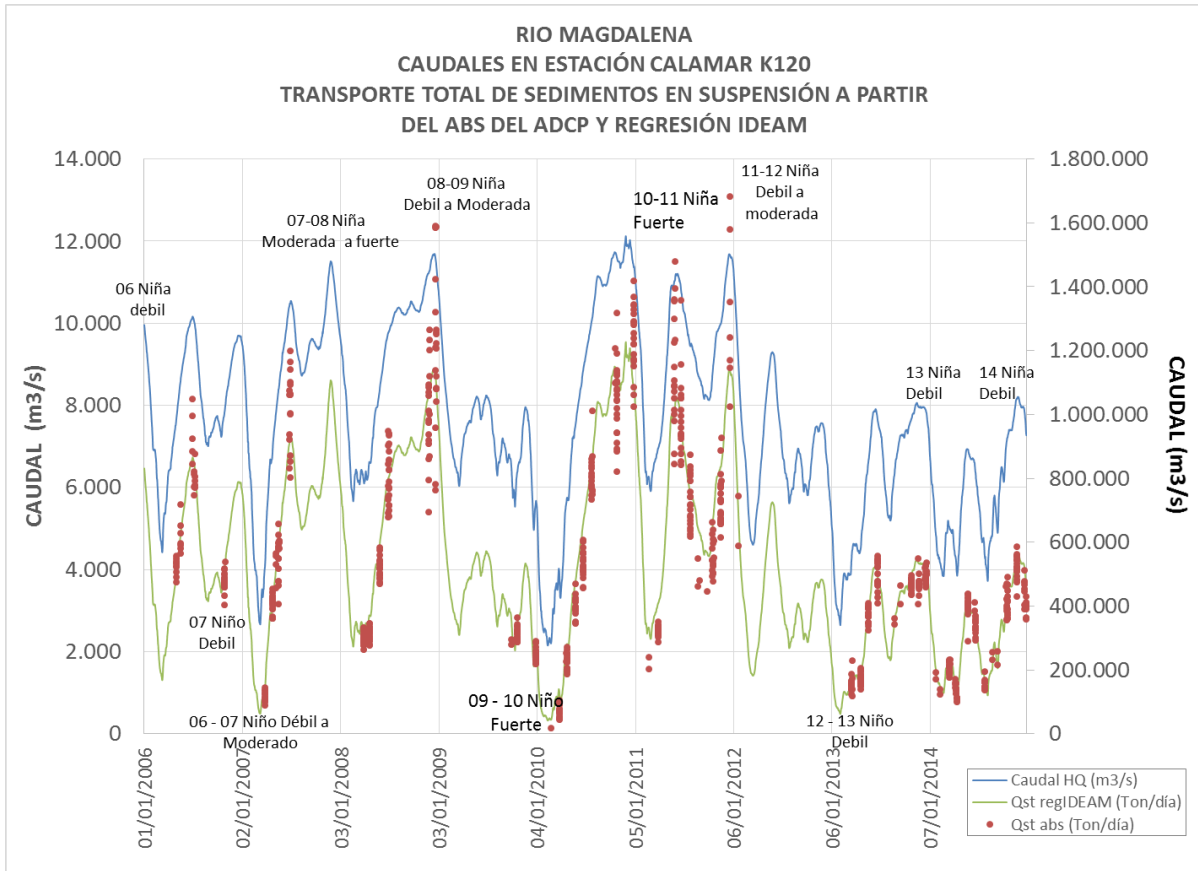


Figura 3-51. Serie de caudales del Rio Magdalena 2006 – 2014, Calamar (K120), comparada con el QstABS del ADCP (sector K5 – K38) y de la regresión del IDEAM.

Luego de tener las series 2006 a 2014 de concentración media y transporte total de sedimentos en suspensión calculadas a partir de la información ADCP se determinó el promedio anual. La Tabla 1-3 muestra que el mayor transporte total de sedimentos en suspensión entre los años 2006 a 2014 se presentó en el año 2011 con un valor de 277 MTon/año y una concentración media anual de 840 mg/L, y el menor fue en el año 2009 con 103 MTon/año. El promedio multianual del transporte total de sedimentos en suspensión fue de 198 MTon/año, y concentración media anual de 732 mg/L.

Tabla 3-16. Promedios de concentración y transporte total de sedimentos anual en el rio Magdalena 2006 – 2014 a partir de mediciones ADCP.

ANO	SSC (mg/L)	Qst (MTon/año)
2006	876	223
2007	801	197
2008	881	257
2009	590	103
2010	787	228
2011	840	277
2012	735	243
2013	605	138
2014	572	116
PROMEDIO	732	198

4 CONCLUSIONES

La tecnología ADCP se presenta como una herramienta de gran utilidad para el monitoreo de las concentraciones media y transporte total de sedimentos en suspensión. Con este método se obtiene un rango de valores para la concentración y transporte total de sedimentos, respecto a curvas de regresiones para el mismo caudal en diferentes secciones transversales del río. Es conocido que las fórmulas clásicas para el transporte hacen los cálculos con errores habituales de orden del 100%. Mientras que los equipos ADCP, nos permite tener menores tiempos de medición y procesamiento de información para estimar concentración en suspensión, y menores costos involucrados.

Al aplicar la metodología desarrollada, de las 1602 mediciones con ADCP disponibles, se tomaron como objeto de estudio 868 mediciones. Estas mediciones se encuentran entre el K5-K38, desde el 2006 al 2014. Y presentan un caudal promedio de 7667 m³/s, y una desviación estándar de 2343 m³/s. El caudal mínimo presentado es de 2058 m³/s (25 Febrero de 2010 – K27) y un máximo de 13766 m³/s (23 de Diciembre de 2011 – K10).

Con la metodología desarrollada, aplicada a las mediciones del Rio Magdalena entre el K5-K38 durante los años 2006 a 2014, es posible obtener una buena aproximación de los parámetros A y B que calibren la ecuación del Sonar Simplificada. El método Montecarlo fue desarrollado con cuatro curvas de calibración con información histórica del LEHLF e IDEAM. De las cuales se seleccionó la curva con mayor R², correspondiente a los datos máximos del IDEAM. Con una pendiente A y un intercepto B de 0.0426 y -0.9904, respectivamente. El valor de A se aproxima al valor teórico de 0.1 sugerido por Gartner (2004), el cual asume una distribución de partículas uniforme. Y el intercepto B varía para diferentes instrumentos y rangos de tamaños del sedimento. Adicionalmente, se tiene como valores de referencia los dados por Thevenot y otros 1992, quienes determinaron que A y B puede ser igual a 0.077 y 0.97 en laboratorio, y 0.042 y 1.43 en campo.

La ecuación del Sonar Simplificada para el Rio Magdalena es:

$$SSC_{ABS} = 10^{(0.0426 * ABS_{prom} - 0.9904)} [mg/L]$$

Con los resultados de los parámetro A y B, se reconstruyó la serie de concentración y transporte total de sedimentos en suspensión en el Rio Magdalena desde el año 2006 – 2014. Los resultados de concentraciones muestran que no ha aumentado, la serie se mantiene sin ninguna tendencia, respondiendo al comportamiento del hidrograma. Con un promedio de 732 mg/L, un valor mínimo de 94.5 mg/L y un máximo de 1455.05 mg/L. El valor mínimo de la serie 2006 – 2014 se obtuvo el 25 de Febrero de 2010, con un caudal de 2058 m³/s, y el máximo el 23 de Diciembre de 2011 con un caudal de 12608 m³/s. Igualmente, se reconstruye la serie de Transporte Total de Sedimentos en Suspensión. El mínimo transporte total es de 16,802 Ton/día, correspondiente al 25 de Febrero de 2010, y el máximo es de 1681980 Ton/día del 23 de Diciembre de 2011. Correspondiente a las fechas de menores valores de concentración media de sedimentos en suspensión. Un aspecto importante que se puede observar en los resultados mostrados en las gráficas Figura 3-50 y Figura 3-51 es que después de eventos niñas sostenidos, con intensidad de moderada a fuerte, se obtienen mayores valores de Concentración de sedimentos en suspensión, según las mediciones ADCP. En los eventos máximos de Octubre a Diciembre del 2010, se obtuvieron SSC_{ABS} entre 895 a 1375 mg/L con un rangos entre 77 – 406 mg/L. Y para los eventos máximos de 2011, finales de Mayo y de Diciembre, el SSC_{ABS} estuvo entre 1224 – 1504 mg/L y 927 – 1544 mg/L, con rangos entre 280 y 617

mg/L respectivamente. Es decir, el río Magdalena presentó una mayor concentración de sedimentos en el año 2011, que en la inundación del 2010.

La concentración media y transporte total de sedimentos en suspensión en el río Magdalena a partir de mediciones ADCP, entre 2006 a 2014, son en promedio 732 mg/L y 198 Mton/año, respectivamente.

A continuación se presenta un resumen de resultados de calibraciones de la ecuación del Sonar Simplificada, parámetros A y B, para diferentes sistemas hídricos, y sus respectivos autores.

Tabla 4-1. Resumen de resultados de calibración de equipos ADCP, para diferentes sistemas hídricos. Fuente: Elaboración propia.

Sistema	Equipo Acústico	A	B	Equipo de referencia	Autor
Bahía de San Francisco	ADCP de 1200 y 2400 kHz	0.092 a 0.129	-3.428 a -7.419	OBS	Gartner & Cheng, 2001
Bahía Winyah Bay	ADCP	0.43	-104.65	OBS	Kim & Voulgaris, 2003
Bahía de San Francisco, SMB98-95	ADCP de 1200 y 2400 kHz	0.04015 a 0.04933	-0.57666 a -0.74593	OBS	Gartner, 2004
río Hudson en New York	ADCP 614 kHz	Ecuación en términos de $\overline{ABS}_{bin} y WT$		Muestreador USP-61	Wall, Nystrom, & Litten, 2006
Río Colorado	ADCP 2 MHz EZQ, 1 MHz EZQ, 600 kHz Aquadopp	A=0.11 y B=-7.53 con R2 de 0.95, para arenas de 0.0625-0.105 mm A=0.11 y B=-7.44 con R2 de 0.97, arenas entre 0.0625 y 2.0 mm		Muestreador LISST-100X y LISST-25X	Topping, Wright, Melis, & Rubin, 2007
Río Gunnison	Perfilador acústico Side-looking de 1.5kHz	0.13 arenas	-9.23 arenas	LISST	Wright, Topping, & Williams, 2010
Río Paraná	ADCP 1200 kHz	0.13	-9.5	LISST	Latosinski, y otros, 2011
Río Magdalena	ADCP 600 kHz	0.0426	-0.9904	Muestreador USP-61	Díaz y Ávila, 2015

No existe evidencia que sustente que la concentración de sedimentos ha aumentado o disminuido, ya que la concentración de sedimentos en suspensión no registra un aumento apreciable, con tendencia a permanecer aproximadamente constante. La morfología de un cauce aluvial es gobernada por el balance sedimentológico.

La cuenca del río Magdalena ante la ocurrencia de los fenómenos Niña y Niño en relación con los sedimentos, es coherente con el comportamiento esperado según las condiciones hidroclimatológicas del fenómeno.

5 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Con la calibración de los parámetros A y B, se puede estimar de forma aproximada para toda la sección transversal las concentraciones de sedimento en suspensión, lo cual es un aspecto importante para estudios de hidráulica fluvial, para identificar zonas de actual sedimentación y erosión, secciones de correspondencia y no correspondencia entre la estructura de flujo y el sedimento, entre otras.

La metodología planteada por restricciones de información no permitía realizar correcciones por atenuación del sedimento en suspensión. Esta corrección empieza a ser tomada en cuenta en los trabajos más recientes (Latosinski, y otros, 2011; Wright, Topping, & Williams, 2010; Topping, Wright, Melis, & Rubin, 2007; Gartner, 2004), en los que se demuestra, excluyendo a Gartner (2004), que la señal de retorno tiende a ser dominada por las partículas de arena, mientras que el coeficiente de atenuación del sedimento tiende a correlacionarse fuertemente con las concentraciones de limo y arcilla. Este aspecto es importante analizarlo para Ríos como el Magdalena donde según mediciones realizadas por UNINORTE-CORMAGDALENA la carga de lavado esta alrededor del 70 al 90%, ajustando la metodología planteada y realizando aforos al tiempo, con ADCP, muestreadores simples, OBS y/o LISST.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, M. (1992). *Río Magdalena (Sector Calamar - Bocas de Ceniza): caracterización hidrosedimentológica y cuña salina basada en mediciones realizadas durante 20 campañas. Technical Report*. Barranquilla: Ministerio de Obras Públicas.
- Alvarado, M. (1998). Cambios Antrópicos en la desembocadura del Río Magdalena y su efecto en la zona. *Memorias del Primer Seminario Nacional sobre Manejo Integrado de Zonas Costeras* (págs. 3-6). Medellín: EAFIT Press.
- Alvarado, M. (2008). *Río Magdalena, Navegación Marítima y Fluvial (1986 - 2008)*. Barranquilla: Ediciones Uninorte.
- Blanchard, S. F. (Octubre de 2009). *OFFICE OF SURFACE WATER TECHNICAL MEMORANDUM 2010.01 and OFFICE OF WATER QUALITY MEMORANDUM 2010.04*. Obtenido de water.usgs.gov/admin/memo/QW/qw10.04.html
- Chapter 3: COMPUTATION OF FLUVIAL-SEDIMENT DISCHARGE. (1972). En G. Porterfield, *Book 3: APPLICATIONS OF HYDRAULICS* (págs. 1-66). WASHINGTON.
- Coleman, J. M. (1976). *Deltas: processes of deposition and models for exploration*. Minneapolis, MN: Burgess Publishing Company.
- Creed, E. L., Pence, A. M., & Rankin, K. L. (2001). Inter-Comparison of Turbidity and Sediment Concentration Measurement from an ADP, an ABS-3, and LISST. *Oceans 2001 MTS/IEEE Conference Proceedings*, (págs. Vol. 3, 1750-1754). Honolulu.
- Cubillos, C. E., & Forero, G. (2005). ¿Qué se puede decir del efecto de la erosión en la cuenca sobre el río Magdalena? Análisis de la variación temporal de la carga de sedimentos medida en el Río Magdalena (Sector: Puerto Salgar - La Gloria). *Avances en recursos hidráulicos*.
- Downing, A., Thorne, P., & Vicent, C. (1995). Backscattering from a suspension in the near-field of a piston transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v.97, no.3, p. 1614.
- Edwards, T. K., & Glysson, G. D. (1999). Field methods for measurement of fluvial sediment. En USGS, *Techniques of Water - Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3* (pág. 89p).
- Filizola, N., & Guyot, J. L. (2004). The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 46 (1).
- Flammer, G. H. (1962). Ultrasonic measurement of suspended sediment. *U.S.G.S.* (págs. 1141-A, 48 pp).
- Gartner, J. (2002). Estimation of suspended solids concentrations based on acoustic backscatter intensity: theoretical background. *Turbidity and other sediment surrogates workshop*.
- Gartner, J. E., Cheng, R. T., Wang, P. F., & Richter, K. (2001). Laboratory and field evaluations of the LISST-100 instrument for suspended particle size determinations. *Marine Geology*, 199-219.
- Gartner, J. W. (2004). Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *ELSEVIER: Marine Geology 211*, 169–187.
- Gartner, J., & Cheng, R. (2001). The Promises and pitfalls of estimating total suspended solids based on backscatter intensity from acoustic Doppler current profilers. *Proceeding 7th Federal Interagency Sedimentation Conference*, (págs. III-119-III-126).

- Gray, J. R., & Gartner, J. W. (2008). Technological advances in suspended-sediment surrogate. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 45.
- Hay, A. E. (1983). On the Remote Acoustic Detection of Suspended Sediment at Long Wavelengths. *Journal Geophysica*.
- Helsel, D., & Hirsch, R. (1991). Chapter A3, Statistical Methods in Water Resources. En *Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey.
- Holdaway, G., Thorne, P., Flatt, D., Jones, S., & Prandle, D. (1999). Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 19:421-441.
- IDEAM. (2007). *PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DEL AGUA*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- IDEAM. (2007). *PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DEL AGUA: observación y medición en aguas superficiales*. Obtenido de www.ideam.gov.co
- IDEAM, & CORMAGDALENA. (2001). *Resumen Ejecutivo: Estudio Ambiental de la cuenca Magdalena - Cauca y elementos para su ordenamiento territorial*. Bogotá: Documento Oficial .
- Ketter, A., Restrepo, J. D., & Syvitski, J. (2010). Simulating spatial variability of sediment fluxes in an Andean drainage basin, the Magdalena River. *Journal of Geology*, 118:363-379.
- Kim, Y. H., & Voulgaris, G. (2003). *EPA-NOAA*. Obtenido de RD INSTRUMENTS: <http://www.rdinstruments.com/>
- Kim, Y. H., Gutierrez, B., Nelson, T., Dumars, A., Maza, M., Perales, H., & Voulgaris, G. (2004). Using the acoustic Doppler current profiler (ADCP) to estimate suspended sediment concentration. *University of South Carolina*, , Technical Report CPSD #04-01. .
- Kostaschuck, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., & Franklin, M. (2005). Measurement of flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, Vol.68, 25 - 37.
- Landers, M. N. (2010). Review of methods to estimate fluvial suspended sediment characteristics from acoustic surrogate metrics. *2nd Joint Federal Interagency Conference*. Las Vegas, NV: US Geological Survey.
- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Gallego, M., Amsler, M. L., & Pujol, A. (2011). ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO EN SUSPENSIÓN CON PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER. *Memorias del Quinto Simposio Regional sobre HIDRÁULICA DE RÍOS*.
- Marín, R. (1992). *Estadísticas sobre el recurso de agua en Colombia*. Bogotá: Publicación del Ministerio de Agricultura, Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras.
- Meybeck, M. (1976). Total mineral transport by world rivers. *Hydrol. Sci. Bull.*, 21, 265 - 284.
- Meybeck, M. (1979). Concentration des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys.*, 21, 215 - 246.
- Meybeck, M. (1988). How to establish and use world budgets of riverine materials. In: Lerman, A., Meybeck, M. (Eds), *Physical and chemical weathering in geochemical cycles*, North American Treaty Organization. . *Advanced Scientific Series C Math. Phys. Sci* , 247-272.
- Milliman, J. D., & Meade, R. H. (1983). World - wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol*, 91, 1 - 21.

- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment transport to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *J. Geol*, 100, 525-544.
- NEDECO. (1973). *Rio Magdalena and Canal del Dique Survey Project*. . The Hague, The Netherlands: Technical Report, Netherland Engineering Consultants.
- Poerbandono, & Mayerle, R. (2002). Preliminary Result on the Estimation of Suspended Sediment Concentration from Acoustical Profilers ADCP. *Anwender Workshop*. Warnemunde.
- RD Instruments. (1996). *Acoustic Doppler Current Profilers: Principles of Operation, A Practical Primer*. California, USA: Second edition for Broadband ADCPs.
- Restrepo, J. C., & Restrepo, J. D. (2005). Efectos Naturales y Antrópicos en la Producción de Sedimentos en la Cuenca del Rio Magdalena. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Fisicas, Exactas y Naturales.*, 29: 239-254.
- Restrepo, J. D. (2006). *Los sedimentos del rio Magdalena: reflejo de la crisis ambiental*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Restrepo, J. D. (2012). *Sedimentos del Rio Magdalena, reflejo de la crisis ambiental*. Obtenido de Propiedad Publica: www.propiedadpublica.com.co
- Restrepo, J. D. (2015). El Impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980 - 2010). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, 250-267.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 137-149.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andres with focus on Rio San Juan. *Journal of Geology*, 108: 17 -33.
- Restrepo, J. D., & Syvitski, J. (2006). Assessing the Effect of Natural Controls and Land Use Change on Sediment Yield in a Major Andean River: The Magdalena Drainage Basin, Colombia. . *Ambio: a Journal of the Human Environment*, 35: 44 -53.
- Restrepo, J. D., López, S. A., & Restrepo, J. C. (2009). The Effects of Geomorphic controls on sediment yield in the Andean Rivers of Colombia. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 16:79-92.
- Restrepo, J., & Pierini, J. (2012). Medición de la concentración de sedimentos en suspensión mediante dispositivos ópticos y acústicos: aplicación en sistemas tropicales (Delta del río Mira, Colombia). *Latin American Journal of Aquatic Research, Res.*, 40(1): 153-168, 2012.
- Schulkin, M., & Marsh, H. (1962). Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, v34,p.864-865.
- Schumm, S. A., & Winkley, B. R. (1994). *The variability of large alluvial rivers*. New York: ASCE Press.
- Simpson, M. (2001). *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*. Sacramento, California: United States Geological Survey.
- Sontek/YSI Inc. (2000). *Acoustic Doppler Profiler Principles of Operation*. San Diego, California.
- Szupiany, R., Amsler, M. L., Parsons, D. R., & Best , J. L. (2009). Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences. *Water Resour*, vol 45.
- TELEDYNE RD INSTRUMENTS. (2007). *WinRiver II User's Guide*. California.
- TELEDYNE RD INSTRUMENTS. (2007). *WorkHorse Rio Grande Acoustic Doppler Current Profiler, Technical Manual*. California.
- TELEDYNE RD INSTRUMENTS. (2007). *WorkHorse Rio Grande ADCP User's Guide*. California.

- Thevenot, M. M., Prickett, T. L., & Kraus, N. C. (1992). *Virginia, dredged material plume monitoring project 27 September to 4 October 1991. Dredging Research Program Technical Report DRP-92-7*. Washington D.C.: US Army Corps of Engineers.
- Thorne, P. D., & Hanes, D. M. (2002). A review of acoustic measurements of small - scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, Vol. 22, pp 603 - 632.
- Thorne, P., Hardcastle, P. J., & Soulsby, R. (1993). Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. *Journal of Geophysical Research*, 98: 899 - 910.
- Topping, D. J., Wright, S. A., Melis, T. S., & Rubin, D. M. (2007). HIGH-RESOLUTION MEASUREMENTS OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION AND GRAIN SIZE IN THE COLORADO RIVER IN GRAND CANYON USING A MULTIFREQUENCY ACOUSTIC SYSTEM. *10 International Symposium on River Sedimentation*, (págs. 330-338). Moscow, Russia.
- UNINORTE, LEH-LF, y CORMAGDALENA. (Octubre 1999 y Julio del 2000). *Estudio de Navegabilidad del Río Magdalena entre La Gloria (K460) – Puente Pumarejo (K1) Canal del Dique*. Barranquilla.
- Urick, R. (1983). *Principles of Underwater Sound 3rd Edition*. McGraw-Hill, Inc.
- Urick, R. J. (1948). The absorption of sound in suspensions of irregular particles. *Acoustical Soc. of America*, 283 - 289.
- Vernette, G. (1985). *La plateforme continentale caraibe de Colombie (du déboché du Magdalena au Golfede Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sédimentation*. Bordeaux, France: PhD Thesis, Université Bordeaux I.
- Wall, G. R., Nystrom, E. A., & Litten, S. (2006). Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River, New York. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations, Report 2006-5055*, 16 p.
- Wright, L. D., & Coleman, J. M. (1973). Variations in morphology of major rivers deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Assoc. Petrol. Geol*, 370 - 398.
- Wright, S., Topping, D., & Williams, C. (2010). DISCRIMINATING SILT-AND-CLAY FROM SUSPENDED-SAND IN RIVERS USING SIDE-LOOKING ACOUSTIC PROFILERS. *2nd Joint Federal Interagency Conference*. Las Vegas, NV.