

MORFOLOGÍA Y DINAMICA FLUVIAL DEL RIO MAGDALENA

SECTOR SAN RAFAEL DE CHUCURI – CARMELITAS

CARLOS ARTURO MARTINEZ CANO, IC

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AGRÍCOLA

POSTGRADO EN RECURSOS HIDRÁULICOS

BOGOTA D.C.

2003

**MORFOLOGÍA Y DINAMICA FLUVIAL DEL RIO MAGDALENA
SECTOR SAN RAFAEL DE CHUCURI – CARMELITAS**

**Trabajo Final para optar el título de
ESPECIALISTA EN RECURSOS HIDRÁULICOS**

CARLOS ARTURO MARTINEZ CANO, IC

DIRECTOR

SILVERIO FARIAS MENDOZA, IC, MSc

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
POSTGRADO EN RECURSOS HIDRÁULICOS
BOGOTA D.C.**

2003

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a:

Silverio Farias Mendoza. Ingeniero Civil. MSc. Profesor y Director del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia. Director del Trabajo.

Nelson Obregón Neira. Ingeniero Civil. MSc. PhD. Profesor Investigador de la Universidad Javeriana y Profesor de Postgrado de la Universidad Nacional de Colombia

A mi familia, sin ellos mi especialización no hubiera sido posible Gracias!!

A mis compañeros de Postgrado.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Director del Trabajo Final

Bogotá, Agosto 2003

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS	11
1. MARCO CONCEPTUAL	12
1.1. CLASIFICACION BASICA DE LOS RIOS	12
1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS RIOS	13
1.3. CONFIGURACIÓN DE LOS CANALES	17
1.4. GEOMETRÍA HIDRÁULICA DE UN RIO	22
1.5. CAUDALES	27
1.6. OBSERVACIONES EMPIRICAS.....	28
1.7. FLUJO EN CURVAS	31
1.8. VELOCIDADES	33
2. CASO DE ESTUDIO	35
2.1. ASPECTOS GENERALES	35
2.1.1. Río Grande De La Magdalena	35
2.1.2. San Rafael De Chucurí	40
2.1.3. San Luis	40
2.1.4. Carmelitas	41
2.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	41
2.2.1. Información Geomorfológica	41
2.2.2. Información Hidrológica	46
2.2.3. Información Transporte de Sedimentos	57
2.2.4. Fotografías Aéreas.....	61
2.2.5. Velocidades	61
3. IDENTIFICACIÓN MORFOLÓGICA	63
3.1. GENERALIDADES	63

3.2.	MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1972 Y 1981	64
3.3.	MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1981 Y 1984	64
3.4.	MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1984 Y 1988	65
3.5.	MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1988 Y 1992	66
3.6.	MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1992 Y 1998	66
3.7.	MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1998 Y 2001	67
4.	ANÁLISIS DINAMICO	68
4.1.	GENERALIDADES	68
4.2.	GEOMETRÍA DEL CAUCE.....	69
4.2.1.	Pendiente Longitudinal.....	71
4.2.2.	Secciones Transversales	72
4.2.3.	Anchura y Amplitud del Cinturón de Meandros.....	76
4.2.4.	Sinuosidad	77
4.2.5.	Cuenca de Drenaje	78
4.2.6.	Erosión de Orillas.....	78
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cauce Trenzado	18
Figura 2. Cauce meandriforme: Morfología (Planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución (derecha).	18
Figura 4. Secciones Transversales De Un Río.....	21
Figura 5. Río Trenzado y Sinuoso.	23
Figura 6. Parámetros de una Planta Sinuosa.....	23
Figura 7. Comparación de la relación de forma o anchura relativa de un río grande y uno pequeño.	25
Figura 8. Formas de Sección Transversal en Material Grueso (1), medio (2), y fino (3) a igualdad de las restantes condiciones.	25
Figura 9. Relación entre anchura y pendiente. Planta y perfil Longitudinal.	25
Figura 11. Planta y Perfil de un Tramo Sinuoso y Representación gráfica de las funciones de Curvatura y Calado.	30
Figura 12. Comparación entre dos curvas de igual longitud pero diferente curvatura media.	31
Figura 13. Sección de un río en curva.	32
Figura 14. Corriente Secundaria. (Sección planta y perspectiva de una trayectoria helicoidal).	33
Figura 15. Velocidad y Turbulencia en el Lecho de un Río.	34
Figura 16. Localización General de la Zona de Estudio.	36
Figura 18. Curvas de Duración de Niveles.	49
Figura 19 Curva de Calibración de Carga.	51
Figura 20. Curvas de Duración de Caudal del Río Magdalena 1974 – 1997.....	53
Figura 21. Curvas de Duración de Caudal del Río Magdalena 1999 – 2000.....	54
Figura 22 Sección Transversal del Río en San Luis.....	58
Figura 24. Secciones transversales del Río Magdalena según datos tomados por el IDEAM en la estación Peñas Blancas.....	73
Figura 25 Secciones transversales del Río Magdalena según datos tomados por el IDEAM en la estación Maldonado.....	74
Figura 26 Secciones transversales del Río Magdalena según datos tomados por el BEX - 2000 en las estaciones Peñas Blancas y Maldonado.	75

Figura 27 Comparación de la curva 1 para los años 1972 – 1981 con igual longitud pero diferente curvatura media.....	81
Figura 28. Comparación de la curva 1 para los años 1992 – 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media.....	82
Figura 29. Comparación de la curva 2 para los años 1984 – 1988 con igual longitud pero diferente curvatura media.....	83
Figura 30. Comparación de la curva 2 para los años 1992 – 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media.....	84
Figura 31. Comparación de la curva 3 para los años 1992 – 1998 con igual longitud pero diferente curvatura media.....	85
Figura 32. Comparación de la curva 3 para el año 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media. ...	86
Figura 33. Comparación de la curva 4 para los años 1984 – 1998 con igual longitud pero diferente curvatura media.....	87
Figura 34. Comparación de la curva 4 para el año 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media. ..	88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de Canales Aluviales Según Schumm	16
Cuadro 2. Caudales de Creciente (m ³ /s) Para diferentes períodos de retorno según distribución Log- normal de dos parámetros.....	50
Cuadro 3. Curvas de duración de caudal en las estaciones hidrométricas sobre el Río Magdalena Sector San Rafael de Chucurí – Carmelitas.....	55
Cuadro 4 Curvas de duración de caudal en las estaciones hidrométricas sobre el Río Magdalena campaña 1999 – 2000 Sector San Rafael de Chucurí – Carmelitas.	56
Cuadro 5. Caudales Máximos, Medios, y Mínimos Absolutos	57
Cuadro 6. Diámetros Representativos.....	59
Cuadro 7 Porcentaje de Sedimento en Rangos de Tamaños de Partículas.....	59
Cuadro 8. Velocidades Líneas de Corriente en San Rafael de Chucurí.....	62
Cuadro 9. Pendiente Longitudinal del Lecho Por el Canal Navegable.	71
Cuadro 10. Anchura y Amplitud del Cinturón de Meandros medidos cada 5 Km	76

INTRODUCCIÓN

El análisis de la morfología y dinámica de una zona en un río proporciona la evolución y el comportamiento de éste a través del tiempo para así llegar a tener una localización adecuada de las obras de protección e infraestructura dado que la diversidad de los ríos es virtualmente infinita porque no existen dos lugares iguales en clima, relieve, geología e hidrología. Por lo anterior algunas características morfológicas y dinámicas del río que son frecuentes e importantes merecen la atención del ingeniero.

Una de las primeras dificultades que se presentan en los ríos es la introducción de estructuras puesto que afecta el patrón del canal, también hay que agregar la incertidumbre en la determinación de la geometría hidráulica del cauce dada la diversidad de canales que pueden presentar los ríos, el caudal, las características del material de las bancas, la cantidad de sedimentos transportados y la capacidad de transporte, ya que no existe un método satisfactorio de cálculo de la geometría de los ríos.

El presente trabajo contiene una recopilación de literatura científica existente, además de una recopilación de datos de estudios anteriores y un análisis de fotografías aéreas de la morfología y dinámica (*cauce, canales, socavación, formación de islas, barras, playas*) de treinta años del cauce del río Magdalena en el sector San Rafael De Chucurí – Carmelitas cuya longitud aproximada es de 20 Km

Estudios futuros sedimentológicos e hidráulicos del cauce aportarán más conocimiento sobre el patrón del canal y del grado de equilibrio en que se encuentra el río, lo cual disminuiría la incertidumbre en el comportamiento de éste y sus efectos posteriores.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Presentar un análisis básico de lo que puede ser la morfología y dinámica del río Magdalena en el sector San Rafael de Chucurí – Carmelitas dado que allí se presentan dos estrechamientos importantes, basado en fotografías aéreas y estudios relacionados suministrados por el laboratorio de ensayos hidráulicos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Presentar un marco teórico sobre los aspectos principales que se deben tener en cuenta para hacer un estudio morfológico y dinámico, basado en literatura existente sobre ingeniería de ríos.
2. Analizar información disponible relacionada con el tema de estudio.
3. Desarrollar una identificación Morfológica para un período de tiempo de treinta años (1972 – 2002) por medio de fotografías aéreas y analizar su evolución a través del tiempo.
4. Estudiar la dinámica del río en el sector de estudio y analizar los cambios y características principales ocurridos durante el mismo período de tiempo.
5. Mostrar de qué manera ha evolucionado el río a través del tiempo en cuanto a su forma y comportamiento dinámico en éste sector y dar unas pautas de su posible comportamiento a futuro.

1. MARCO CONCEPTUAL

La morfología de los ríos concierne con la estructura y forma de estos, incluyendo la configuración del canal (*forma en planta*), geometría del canal (*forma de la sección transversal*), forma del lecho, y características del perfil. Los cambios morfológicos del canal se ven afectados con el tiempo y sus efectos por la descarga, incluyendo velocidades, descarga de sedimentos, composición del lecho y material de las bancas. En el presente capítulo se analizan los diferentes efectos mencionados anteriormente de una manera teórica e introductoria.

1.1. CLASIFICACION BASICA DE LOS RIOS

Los ríos tienen un régimen hidrológico determinado por las características de la cuenca y de las precipitaciones. Se acostumbra a relacionar el caudal de un río con las lluvias inmediatamente precedentes y así se piensa en la escorrentía directa de la cuenca como la realidad hidrológica más importante¹. En grandes ríos de climas tropicales el régimen hidrológico tiene una fuerte y regular estacionalidad, es decir hay un largo período de aguas altas que puede esperarse cada año, las aguas subterráneas explican la permanencia de un caudal base de un río durante un período seco y a la inversa, la infiltración a través de un cauce permeable explica que los ríos se sequen.

Se denominan ríos efímeros, aquellos que sólo llevan agua bajo episodios de fuertes precipitaciones, manteniéndose secos el resto del tiempo, se encuentran en climas áridos y semiáridos y como ejemplo especial de estos ríos se tienen las ramblas, barrancos y algunos pequeños ríos mediterráneos.

La pendiente de un río establece la diferencia más importante en cuanto al régimen hidráulico. Se llaman ríos torrenciales los que tienen una pendiente mayor del 1.5% y torrentes los cursos de agua de pendiente mayor que el 6%. La llamada hidráulica torrencial estudia el flujo de los torrentes, se abandona la premisa de que el flujo tiene una fase sólida y una líquida ya que es tal la cantidad de sólidos transportados que el comportamiento del fluido es no newtoniano, posiblemente con grandes bolos y una matriz de barro.

¹ MARTÍN, Vide Juan P. Ingeniería Fluvial. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. (August. 1996).

Se llaman ríos aluviales aquellos que discurren por materiales sedimentarios, generalmente aportados por el propio río, a su vez, el lecho de estos ríos tiene un cierto espesor de material granular prácticamente suelto. También, es muy común que los materiales aluviales ocupen mucha más extensión horizontal que la del cauce actual, formando unas llanuras ocasionalmente inundables llamadas llanuras de inundación. Estos ríos pueden evolucionar a través de estas llanuras causando cambios importantes de los cauces. Los ríos que tienen estas características son los que presentan mayores problemas en la ingeniería fluvial debido a que en sus valles aluviales se asienta la mayor densidad de actividades humanas.

Los ríos de lecho rocoso o cohesivo suelen ser ríos encajados o incisos en los valles, desde el punto de vista morfológico, con menos interacción con los asentamientos de población. Por otro lado, existe una diferencia importante, entre los ríos de arena y ríos de grava, diferencia de un orden más académico, en aspectos como las tasa o caudales de transporte sólido, las formas de fondo, la rugosidad del cauce, y el acorazamiento entre otros.

El papel geológico de un río es, a muy grandes rasgos, la erosión en la cabecera de la cuenca donde la pendiente es mayor y el material del cauce más grueso, el transporte en el tramo medio y la sedimentación en el tramo bajo donde la pendiente es menor y el material del cauce más fino. Esto da un perfil longitudinal típicamente cóncavo y una distribución granulométrica menguante en la dirección de aguas abajo².

1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS RIOS

Los ríos se diferencian entre sí porque poseen diferentes alineamientos, secciones transversales, lechos, material de orillas, pendiente, y características en su valle. Lane (1957)³ estableció que, mientras muchos factores afectan la corriente del canal en forma directa, otros afectan éste en forma indirecta e identificó las variables más importantes como:

- Caudal
- Pendiente longitudinal
- Carga de sedimentos

² MARTIN, Ibid., p. 1.

³ LANE, E. W. A Study of the Shape of Channels Formed by Natural Streams Flowing in Erodible Material, citado por PETERSEN, Margaret. River Engineering. USA : Prentice Hall, 1986. p. 9.

- Resistencia de las orillas y el lecho al movimiento del agua
- Vegetación
- Temperatura
- Geología
- Trabajos del Hombre

Lane declaró también que estos factores no son todos independientes, por el contrario dependen en mayor o menor extensión uno de otro, la interrelación entre la pendiente longitudinal, la carga de sedimentos, la resistencia de las orillas y el lecho al movimiento son particularmente cerrados y complejos.

Anding (1970)⁴, en discusión a las anteriores variables, dio énfasis a lo siguiente:

1. El caudal es el factor más importante en la determinación de la forma de la corriente. La descarga de una corriente natural influencia su forma no solo por la magnitud de la descarga, sino por los efectos integrados de su constante fluctuación.
2. La pendiente longitudinal depende de la geología y la topografía del área donde la corriente circula, también está relacionada con la medida del material del sedimento del lecho y de las bancas.
3. La cantidad y el carácter de las partículas incluidas en la carga del sedimento ejercen un importante efecto en la pendiente del canal. La configuración del canal, la sección transversal y el alineamiento de la corriente son afectados por la carga del sedimento y el patrón de depositación.

La forma de los canales cambian con la variación del caudal, estos cambios ocurren más rápidamente durante caudales altos que durante bajos o moderados caudales. Schumm (1963)⁵ en sus estudios dice que la clasificación de los canales del río pueden estar basados en las variables independientes, descarga y carga de sedimento. Desde la descarga principalmente se determina la medida del canal, Schumm usó carga

⁴ ANDING, M. G. Hydraulic Characteristics of Mississippi River Channels, citado por PETERSEN, Margaret. River Engineering. USA : Prentice Hall, 1986. p. 9.

⁵ SCHUMM, S. A. A Tentative Classification of Alluvial River Channels, citado por PETERSEN, Margaret. River Engineering. USA : Prentice Hall, 1986. p. 11.

de sedimento como la base de la clasificación a causa de su influencia en la determinación de la estabilidad del canal, forma y sinuosidad. Él estableció tres clases de canales: estable, erosionado, y depositado, y luego estableció tres subclases basados en el modo predominante del transporte de sedimentos, carga del lecho, carga mezclada, y carga en suspensión. La clasificación de canales aluviales según Schumm se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de Canales Aluviales Según Schumm ^a

Modo de Transporte de Sedimentos	M% (b)	Estabilidad Del Canal		
		Equilibrio (grado de la corriente)	Depositando (Carga Excesiva)	Erosionando (deficiencia de carga)
En Suspensión:	100	Proporción Ancho/Prof. <7	Mayor Depositación en las Bancas, causa estrechamiento del canal; menor depositación en el lecho	Erosión del Lecho predominante,
Carga 85% -100%		Sinuosidad (c) >2.1 Gradiente: Relativamente Suave		Ampliación del canal menor
Carga Mezclada: Carga en Suspensión 65% - 85% Carga de Fondo 15% - 35%	30	Proporción Ancho Prof >7<25 Sinuosidad < 2.1 > 1.5 Gradiente: Moderado	Depositación Inicial mayor en las bancas seguido por depositación en el lecho	Erosión inicial del Lecho seguido por la Ampliación del canal
		Proporción Ancho/Prof. >25		Pequeña erosión del
Carga de fondo 35% - 70%	0	Sinuosidad <1.5>1.0 Gradiente: Relativamente empinado	y formación de islas	lecho, Ampliación del canal predominante

(b) Porcentaje de Arena – Arcilla (silt-Clay) en perímetro del canal

(c) Proporción Longitud del canal – Longitud del Valle

Fuente: PETERSEN, Margaret. River Engineering

^a Después Anding, 1970

1.3. CONFIGURACIÓN DE LOS CANALES

En la naturaleza es muy raro encontrar cauces rectos y rectangulares, en cambio, se distinguen dos morfologías fluviales típicas. La primera es el cauce trenzado (*figura 1*). Éste es un cauce muy ancho compuesto por una multiplicidad de cauces menores entrelazados o trenzados, dejando islas (sumergibles) entre sí al unirse y separarse, éstos también son cauces inestables una crecida pueden cambiarlos considerablemente. Se dicen que son “*divagantes*” porque un brazo principal puede encontrarse tan pronto en un lugar como en otro. Su presencia se asocia a una gran capacidad de transporte sólido, es decir que una corriente muy cargada de sedimentos es propensa a formar un cauce trenzado, esto suele ocurrir en cauces de montaña con pendiente alta y sedimento grueso.

La segunda morfología típica es la de un cauce sinuoso o con meandros (*figura 2*) el cauce es único pero forma curvas. Se ha observado en laboratorio que una corriente de agua y sedimento circulando sobre un cauce aluvial recto da lugar a meandros a partir de la más mínima imperfección de la alineación recta o por una causa externa accidental⁶. La ondulación en planta se acompaña de una asimetría en las secciones transversales, ya que el calado es mayor junto a la orilla cóncava o exterior y menor junto a la orilla convexa o interior.

Los meandros presentan una evolución que consiste en una progresión o desplazamiento en dirección aguas abajo y una profundización a costa de las orillas en dirección perpendicular a la anterior (*figura 2*), el ritmo de evolución de los meandros depende de la resistencia de las orillas a la erosión, en el caso de ríos que discurren por llanos aluviales poco resistentes, donde no existe restricción a la libertad de esta evolución los meandros se mueven grandes distancias y en los irregulares pueden ser señal de orillas resistentes, el punto final de la evolución de un meandro es el encuentro en el cuello para formar un atajo y el abandono de los lóbulos (*figura 3*).

⁶ MARTIN, Op. Cit., p. 1.

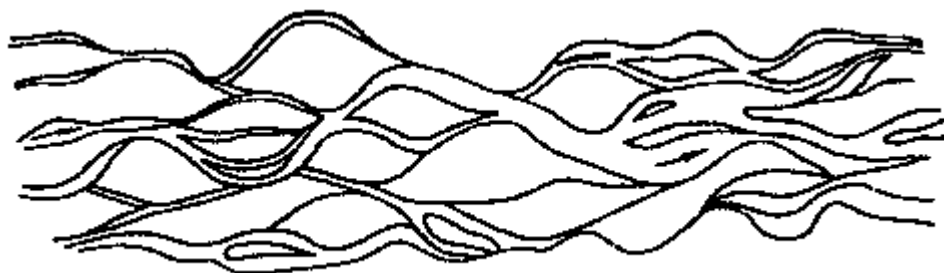


Figura 1. Cauce Trenzado

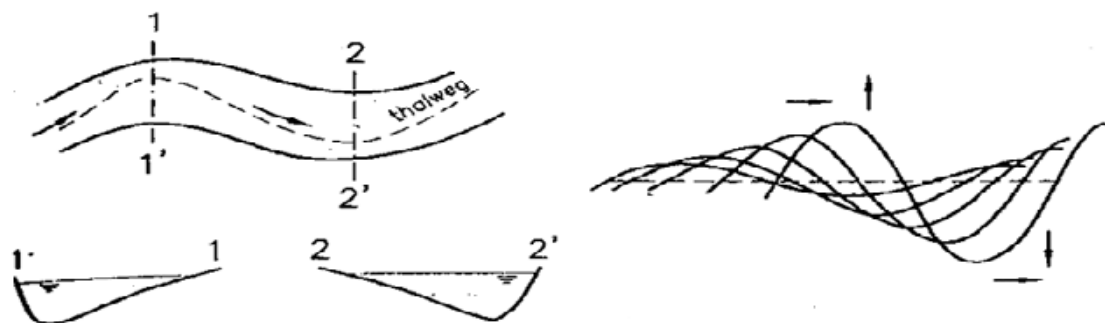


Figura 2. Cauce meandriforme: Morfología (Planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución (derecha).

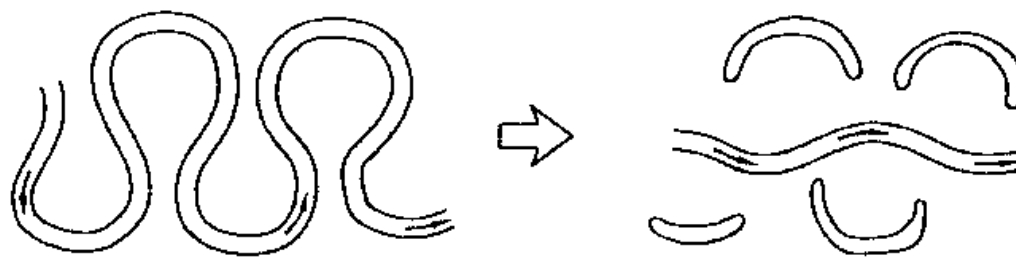


Figura 3. Corte Natural de un Meandro ⁷

Se puede mencionar que los ríos inestables son los que se desarrollan sobre conos de deyección, de piedemonte o deltas. Estas formaciones son planicies aluviales a modo de abanicos (*Acumulación de sedimentos del piedemonte de la cordillera*), bien sea a la salida de tramos de río encajados o bien en la desembocadura a un cuerpo de agua. Como se da una “indiferencia” o isotropía con respecto a la posición del cauce, éste puede experimentar grandes cambios.

Bajo la acción de las fuerzas de gravedad y de las fuerzas endógenas (*que se originan o nacen en el interior*) la superficie terrestre es modelada por el agua, el viento y el hielo, en presencia de diversos agentes físicos, químicos y biológicos. Algunas formaciones terrestres son función de la estructura de la roca, los procesos que actúan sobre ella y el tiempo de duración de dichos procesos.

La forma de la sección transversal del canal de un río en algún punto es función del flujo, la cantidad y características de los sedimentos, la composición del material del lecho y de los depósitos que se van formando. También tiene incidencia la vegetación. El flujo ejerce un esfuerzo cortante sobre el lecho y los depósitos, la forma que el canal puede asumir es aquel en cual el esfuerzo cortante sobre cada punto del perímetro del canal está balanceado con la resistencia al corte del lecho o de los depósitos.

Considerando un canal en arena granular uniforme con descarga constante, las partículas de arena sobre el lecho estarán en una etapa de movimiento incipiente cuando el esfuerzo cortante " τ " es igual al peso

⁷ FUENTE: Martín Vide, Ing. Fluvial. UPC.

sumergido del grano. Existe una componente de la fuerza gravitacional paralela a la pendiente lateral la cual contribuye a la inestabilidad de la partícula.

En el flujo de un fluido el esfuerzo de corte sobre el fluido es proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo y la velocidad es función de la rugosidad del canal, pendiente, contornos, profundidad del flujo tal como en la ecuación de Chezy.

Pueden ser derivadas expresiones para la forma del canal, por ejemplo para un canal en arena no cohesiva. Esta sección puede tener forma sinusoidal aproximadamente al de una parábola.

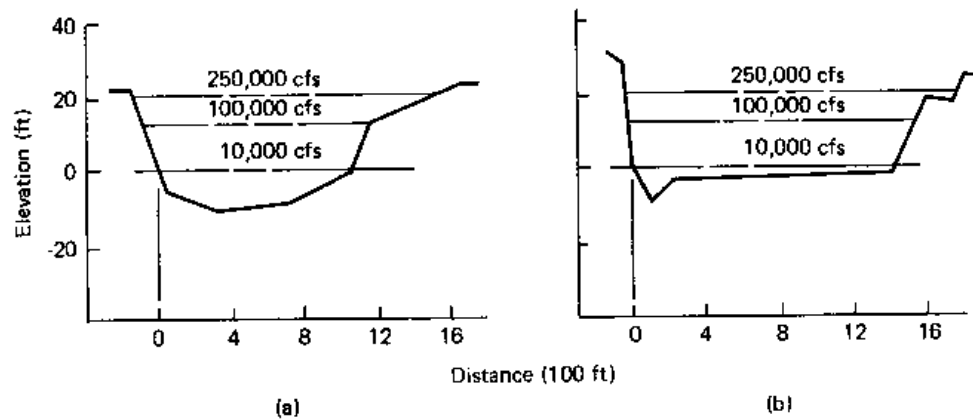
En los canales naturales simples y estables con lecho móvil y depósitos, se deben satisfacer dos condiciones simultáneamente: la transmisión del flujo y la estabilidad.

En la realidad, un canal natural no sólo transporta sedimentos, también migra lateralmente por erosión, manteniendo en promedio una sección transversal constante por deposición en la orilla opuesta. En éste caso la condición de no erosionar la banca es reemplazada por un equilibrio entre erosión y deposición y así la posición del canal no es estable.

Para una rugosidad dada y una pendiente, el tamaño del canal es función del flujo. Incrementando la descarga, se altera el tamaño superior pero la forma de las orillas tiende a ser constante.

La mayor parte de los ríos no son parabólicos en su sección transversal; tienden más a ser trapezoidales en tramos rectos y asimétricos en curvas.

Algunas secciones típicas de un río se muestran en la *figura 4* Cuando las secciones transversales son dibujadas sin exageración vertical, la forma tiende a ser la que presentan canales en materiales no cohesivos.



SECCIONES TRANSVERSALES
DE UN RÍO

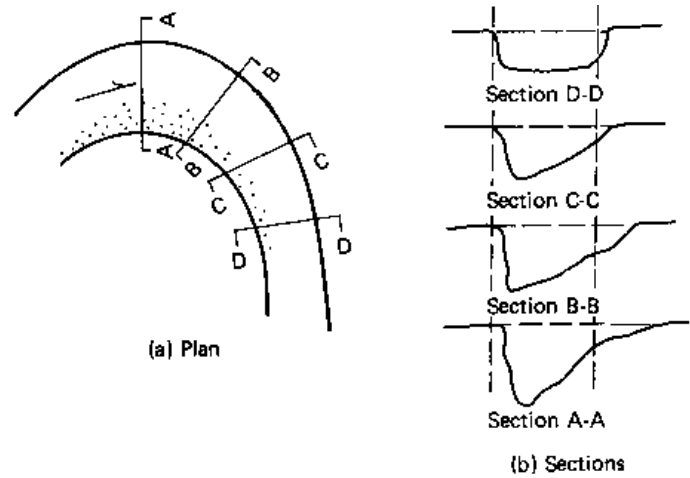


Figura 4. Secciones Transversales De Un Río.

Fuente: PETERSEN, Margaret. *River Engineering*.

1.4. GEOMETRÍA HIDRÁULICA DE UN RIO

Si se le permiten todos sus grados de libertad, un río es una corriente de agua que forma su cauce ajustando libremente la anchura, el calado y la planta. El problema de predecir o deducir esta geometría del río ha ocupado a muchos investigadores en geomorfología. Se cuenta con observaciones relativamente sencillas de las características geométricas de los ríos que sugieren relaciones empíricas entre ellas. Dando un paso más, la pregunta de ¿por qué adopta el río tales formas? permanece todavía sin contestación completa. Este es el caso del porqué de los meandros.

La primera relación empírica de interés es en qué condiciones un río forma un cauce trenzado o un cauce único meandriforme. La relación $i * Q^{0.44} = 0.0116$, donde “ i ” es la pendiente y “ Q ” el caudal, establece una frontera entre una y otra morfología. Si $i * Q^{0.44} > 0.0116$ el río es trenzado y en caso contrario meandriforme. Es interesante que las dos variables del primer miembro formen un brazo de la balanza de Lane, de todos modos esta frontera no distingue nítidamente sino que se traza dentro de una considerable dispersión. De hecho, muchos ríos son trenzados y sinuosos al mismo tiempo (*figura 5*) y así la clasificación es también más difusa. Es frecuente que un río sea trenzado en su tramo alto y luego pase a ser meandriforme aguas abajo, donde la pendiente es menor aunque el caudal es mayor.

En los ríos de meandros se aceptan como significativas pese a la lógica dispersión de los datos de campo, algunas relaciones empíricas entre la longitud de onda de la forma “ λ ” (*figura 6*), su amplitud “ a ”, el caudal “ Q ” y la anchura del cauce (*en la superficie libre*) “ B ”. La longitud “ λ ” es de 7 a 11 veces la anchura del río “ B ” (entre “ λ ” y “ B ” se propone una relación potencial pero el exponente de “ B ” resulta prácticamente la unidad) y la amplitud “ a ” es unas tres veces la anchura “ B ”, aunque esta última relación tiene menos fundamento, debido a que cambia durante la evolución de un meandro, mientras que por el contrario “ λ ” puede permanecer invariable (*figura 2*).

Estas relaciones mostrarían que es posible una semejanza geométrica entre ríos grandes y pequeños. Finalmente “ λ ” es proporcional a:

$$\frac{Q^{0.5}}{D^{0.3}}$$



Figura 5. Río Trenzado y Sinuoso.

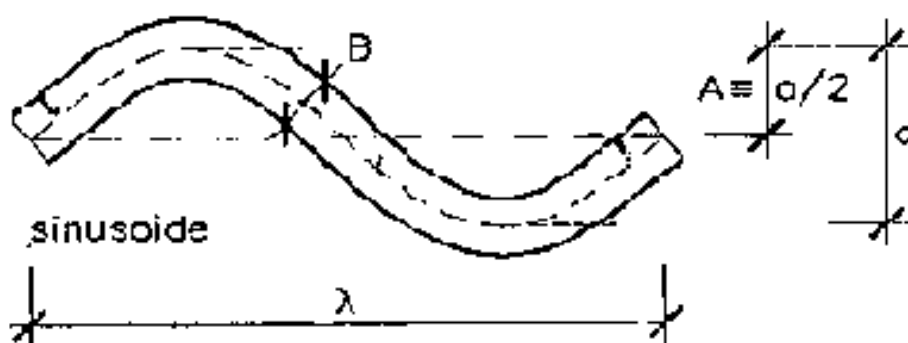


Figura 6. Parámetros de una Planta Sinuosa

FUENTE: Martín Vide, Ing. Fluvial. UPC.

Otro parámetro de un río meandriforme es la sinuosidad “ s ”, cociente de la longitud “ l ” y la longitud de onda “ λ ”. Por otra parte examinando las dimensiones de las secciones transversales de los ríos se ha encontrado que la anchura “ B ” es proporcional a la raíz cuadrada del caudal ($B \leftrightarrow Q^{0.5}$), es decir, que un río cuatro veces más caudaloso que otro tendrá una anchura, aproximadamente doble. Obsérvese que ésta relación es consistente ($\lambda \leftrightarrow Q^{0.5}$) y anteriormente ($\lambda \leftrightarrow B$). Estas relaciones cualitativas se pueden concretar en expresiones de cálculo a través de la teoría del régimen.

Un hecho claro en el movimiento del agua en lámina libre es que la velocidad media es mayor cuando mayor es el tamaño de la sección., más concretamente cuando mayor es su dimensión vertical “ y ” (*calado*). Como el producto $B * y * V$ es el caudal “ Q ” y como $B \leftrightarrow Q^{0.5}$, se desprende que el calado “ y ” crecerá con el caudal más suavemente que la anchura “ B ”. Por lo tanto el cociente B/y , llamado relación de forma de la sección crecerá, aunque suavemente, con el caudal. Es decir, un río más caudaloso es aún más ancho proporcionalmente a su profundidad que un río menos caudaloso (*figura 7*).

Otra relación empírica indica que el cociente B/y es mayor cuando menor es el contenido en material fino en el cauce, es decir, con material más grueso se tienen cauces más anchos (*figura 8*). La relación entre anchura y calado se ve influida por la resistencia de las orillas a la erosión, un ensanchamiento del cauce a costa de las orillas, cuando éstas tienen baja resistencia, implica una reducción del caudal unitario al tiempo que se pone en juego más material sólido. Como consecuencia se produce una acreción (*crecimiento por yuxtaposición*) del fondo que se reequilibrará con una pendiente mayor (*figura 9*).

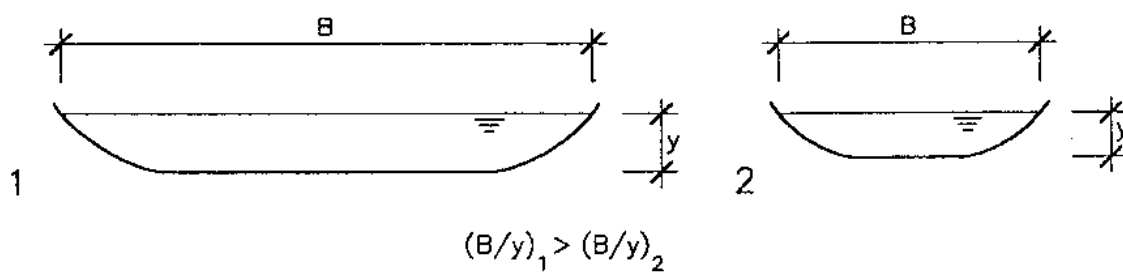


Figura 7. Comparación de la relación de forma o anchura relativa de un río grande y uno pequeño.

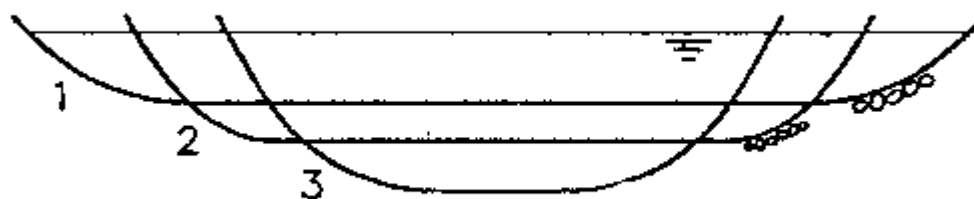


Figura 8. Formas de Sección Transversal en Material Grueso (1), medio (2), y fino (3) a igualdad de las restantes condiciones.

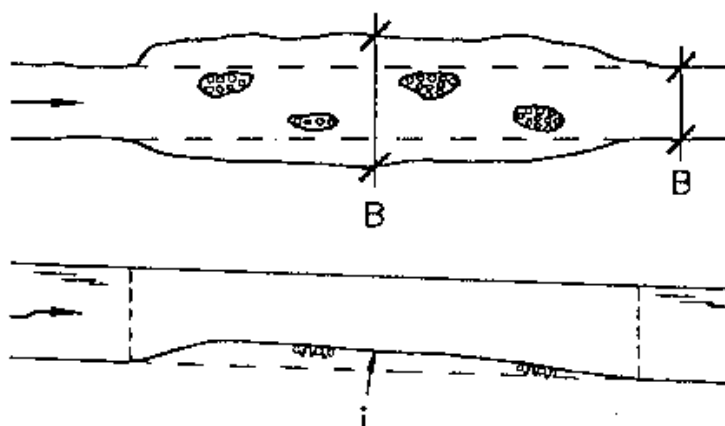


Figura 9. Relación entre anchura y pendiente. Planta y perfil Longitudinal.

En cuanto a la variación de las características hidráulicas en una sección dada, Leopold y Maddock en 1953 denominaron geometría hidráulica del río a las relaciones gráficas entre descarga, velocidad, ancho, profundidad y carga de sedimentos, estas relaciones muestran que cuando dos canales tienen la misma tasa de incremento de ancho con la descarga, si uno tiene una tasa mayor de incremento en la profundidad, debe tener una tasa menor de incremento en la velocidad.

Hay una interrelación entre factores hidráulicos del flujo en canales abiertos, los cuales se relacionan en las ecuaciones de Chezy y Manning, por lo cual es necesario incluir la rugosidad y la pendiente, la rugosidad debe ser calculada por observaciones de velocidad, profundidad y pendiente. De observaciones se ha deducido que la resistencia disminuye cuando incrementa la descarga.

El comportamiento de los parámetros hidráulicos es más complejo en cauces de lecho arenoso, pues un cambio en la descarga está asociado con un cambio en la configuración del lecho.

En canales efímeros vistos en épocas secas, los pozos y jorobas están generalmente ausentes, aunque en observaciones detalladas de mapas se notan delgadas acumulaciones superficiales de material granular en forma de barreras superficiales de grava. Las barreras de grava pueden ser tratadas como una clase de “onda cinemática”, la cual consiste en una concentración de unidades o partículas que pueden moverse, una onda de avenida moviéndose hacia aguas abajo en un río, es una onda cinemática que viaja más rápido que las mismas partículas de agua. En el análisis de onda intervienen dos factores principales; el flujo y la concentración lineal; el flujo se mide por el número de unidades que pasan por un punto en un tiempo dado, la concentración lineal en algún lugar está dada por el número de unidades por unidad de distancia.

Si un lecho arenoso es inicialmente liso, los granos de arena se van moviendo con el flujo formándose ondulados y dunas en el lecho. A medida que aumenta la velocidad, las dunas se alargan y se van formando dunas sobre otras, hasta que a una alta velocidad las dunas son prácticamente borradas. Con mayores incrementos en el flujo se forman antidunas por relaciones de velocidad con la onda armónica simple. La antiduna es una onda en el lecho que acompaña la onda superficial, la formación de antidunas a menudo ocurre cuando el número de Froude del flujo es cercano a 1.

1.5. CAUDALES

En las relaciones geométricas anteriores no se ha especificado qué caudal debe emplearse. Esta es una pregunta pertinente dado que un río transporta un caudal siempre variable. La respuesta, que puede parecer trivial o elusiva, es: debe emplearse el caudal que da lugar a la geometría hidráulica que se estudia. Esto significa reconocer que la geometría es consecuencia del caudal y más concretamente, que si una geometría es permanente se debe a que ciertos caudales, por su magnitud, por su frecuencia o por una combinación de ambas cosas, se convierten en los caudales determinantes.

Esta noción tiene un referente claro en geomorfología fluvial. Muchos ríos tienen un cauce, lecho, madre o álveo diferenciado, más o menos hondo y limitado por unas orillas que lo separan de las llanuras de inundación (*figura 10*). El río desborda de su cauce, sale de su madre, alguna que otra vez, el caudal que llena a rebosar el cauce es especialmente importante porque es responsable principal de la forma y dimensiones del cauce. Esto es así porque mientras el agua está contenida en el cauce, circula con cierta velocidad, en tanto que cuando desborda levemente, el incremento de caudal simplemente anega las llanuras adyacentes y deposita sedimento en ellas, pero no cambia sustancialmente el flujo en el cauce central. Así, por efecto de la sedimentación, crecen las llanuras y poco a poco hacen más infrecuente el desbordamiento. Este proceso tiende a un equilibrio en sentido geomorfológico, con un cauce principal que contiene las aguas la mayor parte del tiempo excepto unos pocos sucesos (*avenidas*) que exceden su capacidad.

El caudal que llena el cauce principal desarrolla la mayor o más importante acción modeladora sobre el cauce (*en términos de velocidad “ V ” o de tensión tangencial “ τ ”*), puesto que un caudal mayor es menos frecuente y sobretodo apenas incrementa la acción (“ V ” ó “ τ ”) (*figura 10*). Por esto este caudal de cauce lleno se conoce también como caudal formativo o dominante. Según unos autores es un caudal que se da dos veces al año como promedio o bien, según otros, un caudal con un período de retorno de 1.4 años. Para la hidrología de nuestro país, se ha encontrado mejor correspondencia con un período de retorno de 1.5 a 7 años, acercándose a la cifra más alta cuando mayor es la irregularidad hidrológica (*área mediterránea*), el caudal formativo sería el determinante de la geometría hidráulica.

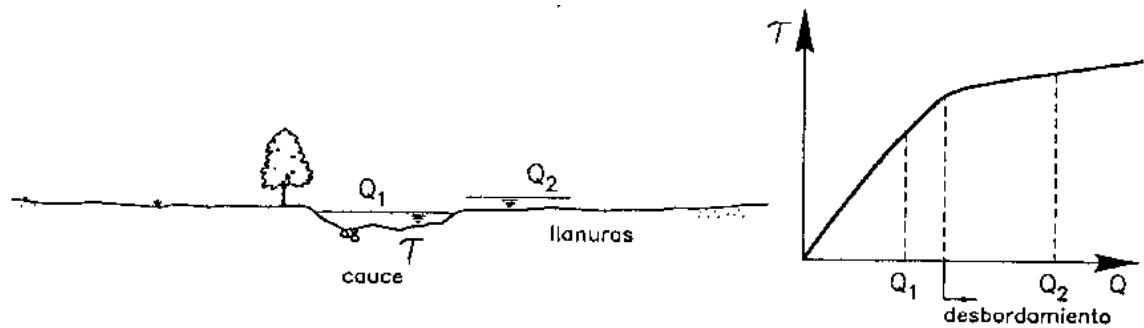


Figura 10. Concepto de Caudal Dominante

1.6. OBSERVACIONES EMPIRICAS

El Ingeniero francés Fargue presentó en 1908 los resultados de sus observaciones sobre el Río Garona. Sus conclusiones empíricas son conocidas como leyes de Fargue, las cuales son una aproximación más detallada a la morfología de un meandro cuyo Interés se encontrará en sus aplicaciones a encauzamientos.

La observación principal de Fargue es, en síntesis, la existencia de una relación entre la curvatura en planta del cauce y la pendiente local del fondo del río. Esta idea liga, por así decirlo, el grado de libertad horizontal (*planta*) con el grado de libertad vertical (*perfil*). Las leyes de Fargue son más ciertas en la medida en que no haya restricción o condicionamiento a la dinámica fluvial y en la medida en que la acción modeladora del caudal sea duradera. El contexto de las leyes de Fargue es por tanto el de los grandes ríos.

Las leyes de Fargue desarrollan las características geométricas de los meandros, designando como eje de un cauce (*coordenada "s"*) al punto medio del segmento perpendicular a las tangentes comunes a las orillas y como thalweg (*del Alemán*) a la línea de puntos más hondos de las secciones transversales (*figura 11*). Fargue observó la correspondencia, con un desfase como máxima igual a $\lambda/8$ (*siendo λ la longitud de onda*), entre la curva del eje (*en valor absoluto*) y el calado de agua por el thalweg. Las dos funciones: curvatura $c(s)$ y calado $y(s)$ son aproximadamente sinusoidales. Una función seno con argumento $(4\pi s)/l$ puede servir para ambas funciones. A partir del gráfico de $y(s)$ puede construirse el fondo del río por el thalweg (*figura 11*), el cual muestra que las regiones hondas situadas en las paredes cóncavas o externas de las curvas (*hoyas*) van seguidas por regiones someras situadas en la inflexión de las curvas

(vados). Más exactamente estos fondos consecutivamente profundos y someros se dan ligeramente aguas abajo de los lugares de curvatura máxima y de curvatura nula.

La expresión más formalizada que puede proponerse para las leyes de Fargue es:

$$\frac{\partial c}{\partial s} = \frac{\partial y}{\partial s} * K$$

se puede enunciar así: la pendiente local del fondo del thalweg ($\partial y / \partial s$) es proporcional (*constante K*) a la variación de la curvatura del eje ($\partial c / \partial s$). Se supone que la superficie es prácticamente horizontal o bien tiene una pendiente mucho menor que la pendiente local del fondo (*figura 11*). Esta expresión resume varias observaciones o leyes empíricas de Fargue como son.

1. El pozo en parte cóncava de una curva es más profundo cuando mayor es la curvatura máxima de la curva.
2. Un cambio brusco de curvatura ocasiona un cambio brusco de profundidad. Un cambio de curvatura gradual da un perfil de fondo continuo.
3. A igualdad de longitud “ *s* ” la profundidad media en un tramo es mayor a mayor ángulo entre las tangentes a la entrada y salida del tramo (*figura 12*), es decir a mayor curvatura media en el tramo.

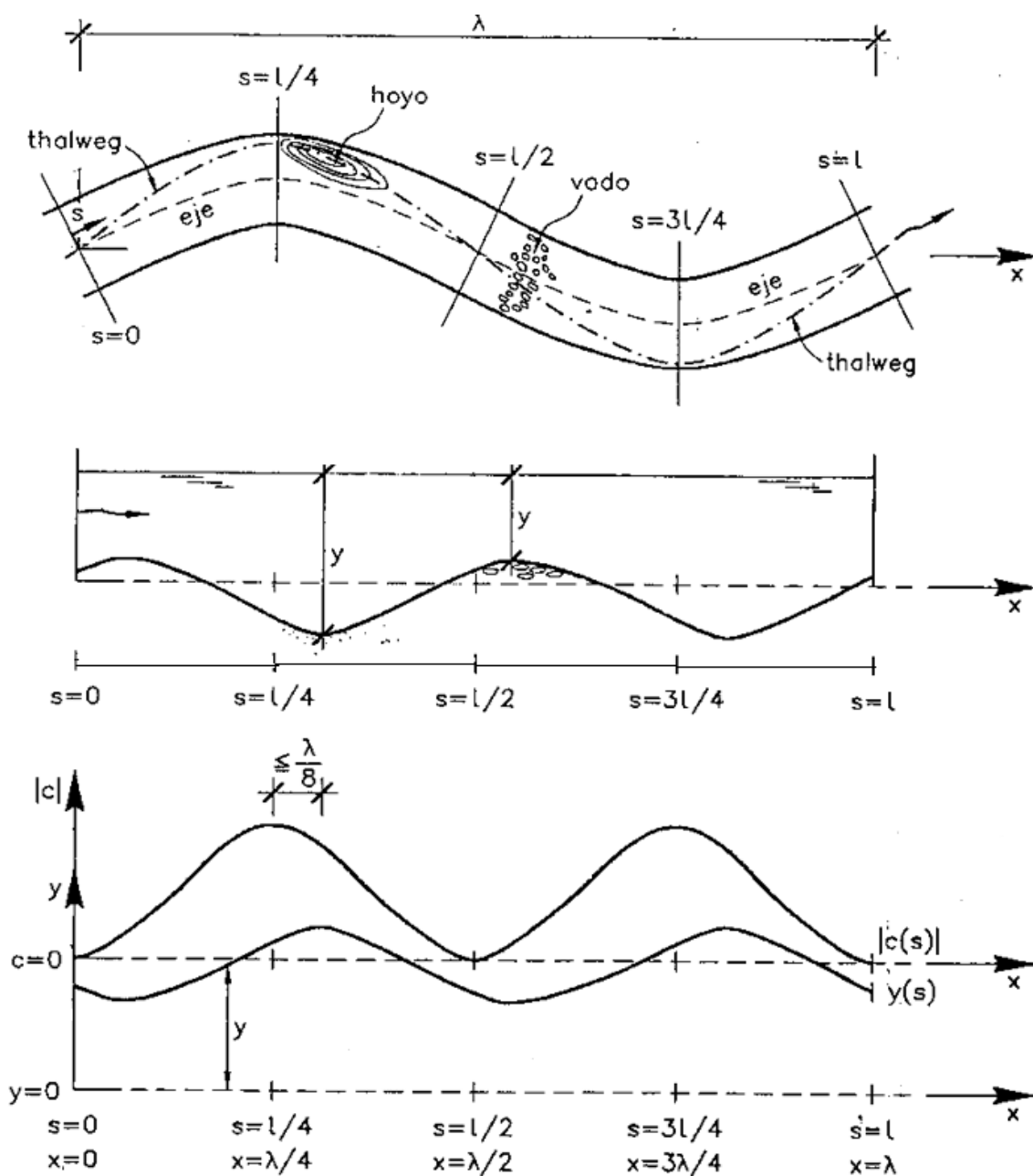


Figura 11. Planta y Perfil de un Tramo Sinuoso y Representación gráfica de las funciones de Curvatura y Calado.

FUENTE: MARTÍN. Ing. Fluvial. UPC.

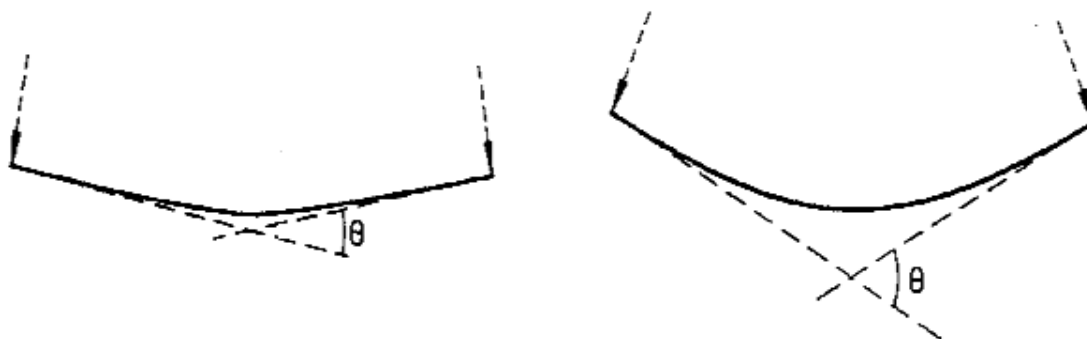


Figura 12. Comparación entre dos curvas de igual longitud pero diferente curvatura media.

1.7. FLUJO EN CURVAS

Dado que los meandros son consustanciales a los ríos, merece la pena explicar algunas otras características del flujo en las curvas. Entre la parte exterior e interior se desarrolla una sobre elevación del nivel de agua por causa de la fuerza centrífuga cuyo valor (*analíticamente*) es: (figura 13).

$$\Delta z = \frac{V^2 * B}{g * r}$$

con “ V “ velocidad media en la sección, $g = 9.8m/s^2$ y r = radio de curvatura.

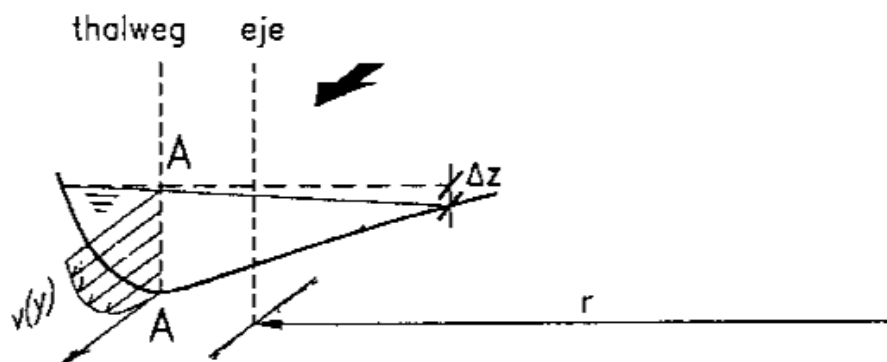


Figura 13. Sección de un río en curva.

A través de la sección de un río la velocidad no se distribuye uniformemente, esta distribución es, por otro lado, diferente a la de un canal no erosionable. En la vertical, la distribución de velocidad es logarítmica. La fuerza centrífuga explica otro importante efecto. Una sección vertical A-A, donde la velocidad no es uniforme sino logarítmica, gira toda ella con el mismo radio r y así se desarrolla mayor fuerza centrífuga cerca de la superficie que en el fondo. Por causa de estas fuerzas desiguales, hay unas componentes de la velocidad en el plano de la sección que crean una circulación llamada corriente secundaria (Figura 14). Estas componentes son la proyección del vector velocidad cerca de la superficie (*ligemente desviado hacia el exterior de la curva*) y cerca del fondo (*ligemente desviado hacia el interior*). Puede verse que la trayectoria de una partícula es helicoidal, en el sentido antihorario cuando la curva es hacia la derecha y horario cuando es a la izquierda. En los puntos de inflexión la hélice se estira hasta una línea recta, mientras que la hélice se aprieta más cuando mayor es la curvatura, la corriente secundaria es la que da forma o modela la sección transversal. El lado exterior es más hondo por efecto del descenso de la corriente secundaria, mientras el lado interior forma una suave pendiente por efecto de la corriente ascendente.

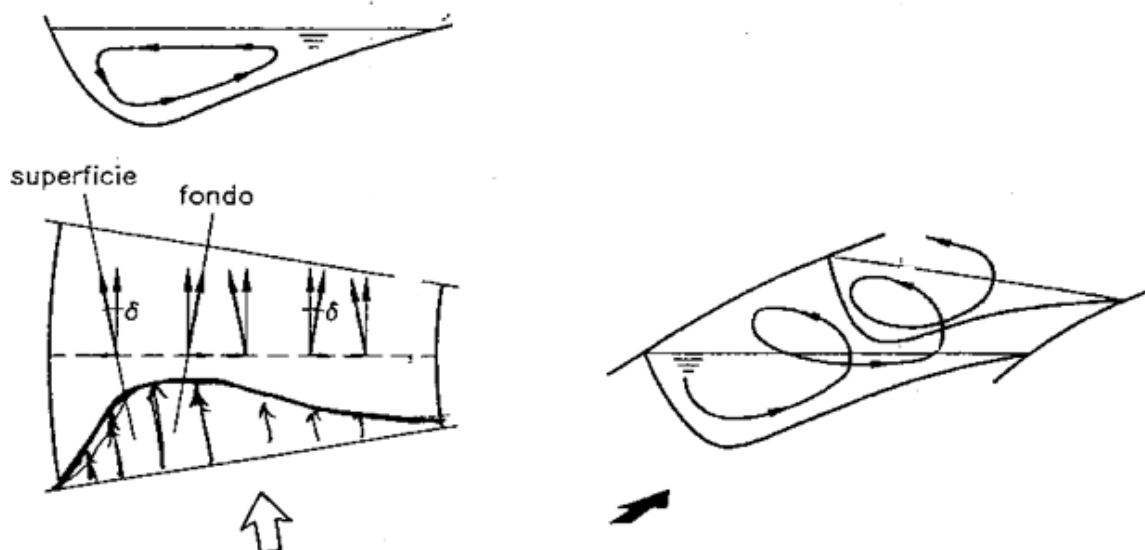


Figura 14. Corriente Secundaria. (Sección planta y perspectiva de una trayectoria helicoidal).

1.8. VELOCIDADES

El punto máximo de velocidad en un río aluvial es usualmente 25 a 30 por ciento mayor que el promedio de velocidad por la sección transversal.

Simons⁸ reportó que el U.S Geological Survey tabuló 2950 puntos de mediciones de velocidad y encontraron que menos del uno por ciento de las mediciones excedían 13 ft / seg., la velocidad media fue de 4.11 ft / seg. y la velocidad principal fue de 4.84 ft / seg. Velocidades por encima de 30 ft / seg. han sido ocasionalmente observadas, y velocidades mayores no han sido tomadas.

Excepto cuando se refiere al flujo de un evento específico o medición específica, la velocidad promedio de un río es la que corresponde al promedio de la descarga.

⁸ SIMONS, D. B. River and Canal Morphology, in river mechanics, H. W. Shen, ed., 1971, citado por PETERSEN, Margaret. River Engineering. USA : Prentice Hall, 1986. p. 49.

La máxima velocidad de un río corresponde al promedio de la velocidad durante altos caudales y rangos alrededor de 6 a 10 ft / seg , mientras la mínima velocidad corresponde al promedio de velocidades durante bajos caudales y rangos desde cerca de cero hasta 2 o 3 ft / seg. Las velocidades extremas en un período corto de tiempo pueden significativamente diferenciarse de una velocidad promedio en un punto y en período largo de tiempo. Tiffany⁹ reportó en un punto detallado de tres horas, mediciones de velocidad en el río Mississippi al sur de Vicksburg USA en 1948, donde se midieron velocidades en un rango mínimo de 2.3 ft / seg. aprox. Y máximo de 4.5 ft / seg, y velocidades promedio de 3.3 ft / seg. Como discusión previa, las velocidades son usualmente altas en la orilla cóncava durante flujos normales (*Figura 15*) y también altas cerca de la orilla convexa durante flujos altos, observaciones de campo han mostrado que el 90 por ciento de todas las erosiones significativas de las orillas ocurren durante grandes torrentes.

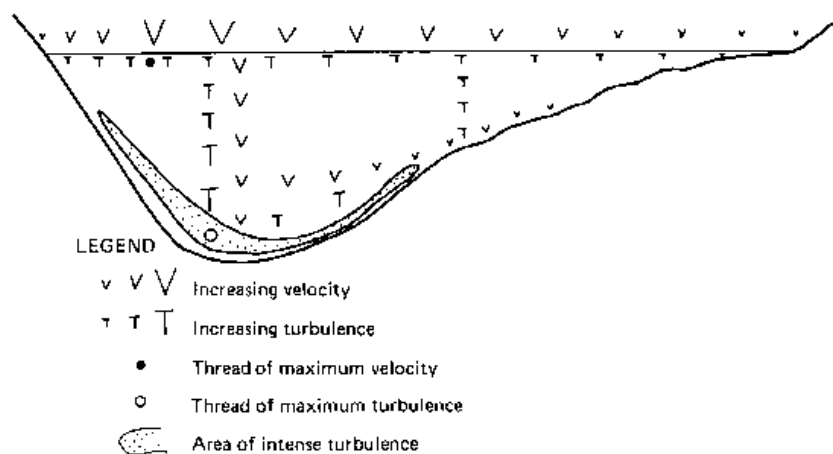


Figura 15. Velocidad y Turbulencia en el Lecho de un Río.

FUENTE: PETERSEN. *River Engineering*. UC.

⁹ TIFFANY, J. B. Review of Research on Channel Stabilization of the Mississippi River, U.S Army, Corps of Engineers, Technical Reports 2, 1963.

2. CASO DE ESTUDIO

El sector de estudio corresponde al río Magdalena en el tramo comprendido entre San Rafael de Chucurí y Carmelitas, longitud aproximada de 20 Km. Además se resalta los estrechamientos existentes entre Chucurí y San Luis, municipio localizado a 15 Km. de esta población (*Chucurí*).*(ver figura 16 localización general de la zona de estudio)*.

A continuación se presenta una descripción general del río Magdalena y las características generales de las poblaciones de éste estudio, luego la información disponible.

2.1. ASPECTOS GENERALES

2.1.1. Río Grande De La Magdalena

El río Magdalena es el río más importante de Colombia. Nace en el extremo sur de Colombia cerca de los picos de la Fragua en la laguna que lleva su nombre, localizado en las coordenadas 1° 55' 40'' Latitud N y 76° 35' 8'' Longitud W de Greenwich. Con 1550 Km de longitud forma un extenso valle que cruza el país de sur a norte, entre las cordilleras Central y Oriental desembocando en el mar de las Antillas. A lo largo de su curso recibe más o menos 500 ríos, numerosas quebradas y registra al desembocar 6.700 metros cúbicos por segundo.

Los principales afluentes son, por la margen derecha, la quebrada Lambedulce, la cual nace en la laguna de Santiago a unos 3 Km. abajo del nacimiento del río, los ríos Murales, Naranjo, Guarapas, Suaza, Neiva, Ceibas, Fortalecillas, Yaví, Sumapaz, Bogotá, Seco, Negro, Ermitaño, Baúl, Cararé, Opón, Lebrija, Sogamoso y Cesar, por la margen izquierda, los ríos Lagunilla, Yaguará, Bache, Aipe, Pata, Saldaña, Luisa Coello, Doima, Toraré, Recio, Sabandija, Gualí, Guarino, Doña Juana, La Miel, Cocorná, Naré, Cimitarra, Simití, Cauca y San Juan; en su recorrido atraviesa los departamentos de Huila y Tolima, y recorre por su margen oriental los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Cesar, y Magdalena, por su margen occidental recorre parte del Tolima, Caldas, Antioquia, sirve de límite entre los departamentos de Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Caldas, Antioquia, Bolívar, y Atlántico para desembocar en el mar caribe.

Figura 16. Localización General de la Zona de Estudio.

En las márgenes del río se localizan poblaciones y ciudades importantes como Neiva, Girardot, Honda, Puerto Boyacá, La Dorada, Puerto Salgar, Puerto Berrío, Barrancabermeja, Puerto Wilches, Magangue, Mompós, el Banco, Plato, Calamar y Barranquilla.

La cuenca del río Magdalena por su localización geográfica abarca una extensión de 257000 Km² aproximadamente, corresponde a 22.9% de la superficie total del país; se localizan 660 municipios donde se asienta el 80 % de la población Colombiana. Su cuenca hidrográfica tiene un gran potencial hidroeléctrico aproximadamente el 70% de las centrales generadoras de energía efectiva instalada. Entre estas se destacan la Central de Betania en el departamento del Huila donde confluye el río Yaguará en el Magdalena, y la Central de San Carlos en el departamento de Antioquia, sobre el río Guatapé, éstas son las centrales de generación hidroeléctrica de mayor capacidad efectiva construida en el país.

2.1.1.1. Geología

Su estructura geológica es de origen tectónico, de edad terciaria, el valle del Magdalena está cimentado en su mayor parte por elementos del terciario (*período plioceno*) hasta el presente, en su orden cronológico son:

1. Cesar – Ranchería
2. Fundación – Ariguaní
3. Luruaco
4. Dique
5. Río Viejo (*está cerca de la actual desembocadura*)
6. Bocas de Ceniza

2.1.1.2. Hidrología

El régimen hidrológico del río Magdalena muestra un comportamiento de carácter estacional en la ocurrencia de crecidas por la alta pluviosidad de su cuenca que hace que el agua rebose la capacidad del cauce desbordándose hacia las ciénagas y al canal del dique, el régimen hidrológico ha tenido alteraciones a través del tiempo no solo por la acción de elementos físicos sino también últimamente por la intensa acción antrópica a lo largo y ancho de toda su cuenca, la deforestación, el manejo de suelos y por ende el mal manejo de las

cuencas, subcuencas, y microcuencas hidrográficas han ocasionado variaciones significativas en el caudal y se han creado áreas de alto riesgo natural.

Los niveles más bajos del río corresponden con los meses menos lluviosos: enero, febrero, marzo, julio, agosto y septiembre. La falta de un manejo adecuado del caudal del río entre aguas altas y bajas se traduce en desastres naturales con las repercusiones socioeconómicas correspondientes.

2.1.1.3. Dinámica

La dinámica del río ocasiona desbordamientos, depósitos de materiales, formación de ciénagas, caños, diques, (*poco inundables*), islas temporales, también suelos ricos en nutrientes que se aprovechan intensamente en agricultura. En los municipios de Ponedera, Campo de la Cruz, y Santa Lucía es usual la siembra en las islas y diques que aumentan o disminuyen en tamaño y localización de acuerdo con la dinámica del río pero que ofrecen una alternativa a la escasez de suelos de uso agrícola en el departamento.

La mejor expresión geográfica del modelado que realiza el río, se observa en su desembocadura por la combinación de dinámica de las aguas fluviales y marinas que allí concluyen, se forman playas, barras, islas, ciénagas que dan lugar a un paisaje de ambiente cenagoso.

La sedimentación fluvial vertida en el mar es abundante y modifica el relieve submarino de la plataforma. La pendiente del curso se puede apreciar por las siguientes alturas sobre el nivel del mar, en su nacimiento 3685 m.s.n.m.; Neiva 472m, Girardot 326m, Honda 229m, Puerto Berrío 126m., Barrancabermeja 71m, Puerto Wilches 61m, Mangangué 27m, Calamar 15m, y Bocas de Ceniza 0m. Entre Girardot y Honda presenta varios chorros o raudales, uno de los más conocidos es el salto de Honda que impide la navegación en éste sector a causa del aumento de la velocidad de las aguas. Después de Puerto Wilches se divide en una serie de brazos que forman las mayores islas de su curso, como son las islas de Morales, Tablar, Papayal y Margarita esta última la más grande del país formada por los brazos de Loba y de Mompós con 2600 Km² de superficie.

En Calamar se ha construido una obra que desvía parte de las aguas hacia el occidente por el denominado Canal del Dique que descarga en la bahía de Cartagena. Gran cantidad de ciénagas se encuentran a lo largo del curso del río, entre las principales están la de Zapatosa que recibe sus aguas por varios brazos del río

Cesar, la de Santa Marta que es abastecida por varios brazos del río Magdalena y se comunica con el mar Caribe, la de Sapayán y la de Simití. Varios autores han dividido según diversos puntos de vista el curso, el valle y la cuenca del río Magdalena. La siguiente división comprende cinco tramos:

1. Nacimiento; Neiva 221 Km., es el Magdalena torrentoso y juvenil.
2. Neiva a la Dorada, 418 Km. Es el alto Magdalena.
3. La Dorada a Bodega Central, 386Km, es el Magdalena Medio;
4. Bodega Central y Calamar 403 Km el Bajo Magdalena
5. Calamar a Bocas de Ceniza, 112 Km. es el Delta.

2.1.1.4. Navegabilidad

En cuanto a navegabilidad el río Magdalena puede dividirse en tres sectores:

1. Alto Magdalena, comprende el trayecto desde la desembocadura del río Suaza hasta el puerto de la Dorada, es navegable por pequeños Buques de vapor en el trayecto Neiva, Girardot, Beltrán y la Dorada.
2. Magdalena Medio, comprende desde La Dorada hasta el corregimiento de Bodega Central en el municipio de Morales, es navegable por embarcaciones hasta de cinco pies de calado en épocas de aguas altas.
3. Bajo Magdalena, desde Bodega Central a Barranquilla y Cartagena, por el Canal del Dique, es navegable en toda época por el mismo tipo de embarcaciones.

El Magdalena y sus afluentes constituyen una de las cinco intendencias fluviales en que esta dividido el modo fluvial del país, ésta intendencia fluvial es la de mayor movimiento portuario, comprende las inspecciones fluviales de Barrancabermeja, Barranquilla, Betania, Calamar, Cartagena, Caucasia, el Bagre, el Banco, el Peñol, Gamarra, Guaranda, Guatapé, Hidroprado, Lurica, Magangué, Monteria, Nechí, Neusa, Puerto Berrío, Puerto Salgar, Salvajina, San Marcos y Tominé. Las inspecciones con más tráfico con embarcaciones mayores son Barranquilla, Cartagena, Barrancabermeja, el Banco y Magangué, Las inspecciones que registran movimiento de embarcaciones menores son Calamar, Caucasia, Magangué y Puerto Berrío.

2.1.2. San Rafael De Chucurí

Situada en el departamento de Santander a 42Km Aguas arriba de Barrancabermeja, su cabecera está localizada en la margen derecha del río Magdalena a 81 m.s.n.m, tiene una temperatura media de 28°C y su precipitación anual es de 2675mm, tiene acceso carretable desde la vía panamericana entrando por Puerto Parra – Las Montoyas; la Ciénaga de Chucurí es el recurso natural del cual derivan su sustento decenas de familias de la región mediante la práctica de la pesca, está ubicada en San Rafael de Chucurí inspección de policía del municipio de Barrancabermeja al sudoeste de la cabecera municipal de la cual dista 42 Kms por vía fluvial.

La principal actividad económica es la pesca como ya se mencionó anteriormente , se desarrolla en el río y especialmente en la Ciénaga, existen actividades agropecuarias pero en menor escala.

2.1.3. San Luis

Municipio en el departamento de Antioquia, su cabecera esta localizada a los 06° 02'42'' de latitud norte y 79° 59' 48'' de longitud oeste a 1050 m.s.n.m., tiene una temperatura media de 23°C y precipitación media anual de 5204mm. Dista de Medellín 126 Km. El área municipal es de 458 Km² y limita por el norte con San Carlos y Puerto Nari, por el oeste con Cocorná y Granada, hacen parte del municipio las inspecciones de policía de Buenos Aires, el prodigo, el Silencio, el Vergel, Monteloro, Playa Linda, y San Pablo, es cabecera de circulo notarial con una notaría, pertenece a la oficina seccional de registro de Marinilla y al circuito judicial de el Santuario, corresponde a la circunscripción electoral de Antioquia.

El primero de enero de 1995 tenía registrados 1238 predios urbanos y 3637 rurales, el territorio es montañoso al occidente y plano al oriente, donde los pantanos son numerosos. Su relieve corresponde a la cordillera central y presenta los pisos térmicos, cálido, templado y frío, según datos preliminares del censo de 1993 la población de la cabecera municipal era de 5990 habitantes y el sector rural tenía 9408 habitantes.

2.1.4. Carmelitas

Sitio geográfico ubicado al noreste de la cabecera municipal del municipio de San Rafael, departamento de Antioquia, comunicado a ella por camino de herradura.

El municipio de San Rafael está localizado a los 06° 17' 51'' de latitud norte 75° 01' 53'' de longitud oeste, su altura es de 1000 m.s.n.m , tiene una temperatura media de 23°C y precipitaciones media anual de 3498mm. Dista de Medellín 102 Km. el área municipal es de 366 Km² y limita por el norte con Alejandría y San Roque por el este y el sur con San Carlos y por el oeste con Guatapé y Alejandría.

El territorio es quebrado y entre los accidentes orográficos se destacan los altos Careperro, Piedra, la Pradera y Tolima, su relieve corresponde a la cordillera central, riegan sus tierras los ríos Guatapé y Nare, además de numerosas quebradas. Presenta pisos térmicos cálido, templado y frío, según datos preliminares del censo de 1993, la población de la cabecera municipal era de 9549 hab. Y el sector rural tenía 12379 hab. Las actividades económicas de mayor importancia son la agricultura, ganadería, minería, y el comercio, los principales cultivos son café (2596 ha), caña de azúcar (307 ha), yuca y frijol.

Se explotan minas de oro. Las actividades comerciales más destacadas en el municipio guardan relación con los productos de origen agropecuario, el sistema financiero en el municipio presentó (1994) en total 1.311.026.000 pesos en captaciones y 507.110.000 pesos en colocaciones. Se une por carretera con San Roque, Guatapé y Alejandría, el municipio dispone de un hospital con 11 camas, 4 puestos de salud y 72 centros de atención de diferentes modalidades del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, tiene servicios de acueducto, energía Eléctrica, telegrafía, correo nacional, un banco y una sucursal de la caja agraria.

2.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE

2.2.1. Información Geomorfológica

La evolución geomorfológica de las márgenes del río Magdalena, en el tramo en estudio, ha sido causa de su gran dinámica lateral a través del tiempo, que genera cambios por socavación fluvial sobre poblaciones y obras de

infraestructura de importancia que transportan gran parte del potencial energético del país, y con una gran importancia también en la navegabilidad del río, debido a la intensa migración lateral de barras e islas.

Para realizar el análisis¹⁰ fue necesario considerar de manera general las condiciones de formación de la gran llanura aluvial del Río Magdalena, principal unidad geomorfológica y tener información básica, acerca de la naturaleza de los terrenos que ocupa, tanto el fondo del Valle, como los depósitos de aluvión reciente en constante cambio por migración lateral.

2.2.1.1. Geología

El Valle Medio del Magdalena se encuentra recubierto por sedimentos terciarios, bien diferenciados en el borde occidental de la Cordillera Oriental y reconocidos en el Valle, a través de la actividad petrolera facilita una comprensiva descripción de la estratigrafía del subsuelo que aflora parcialmente en algunos sectores. La estratigrafía general del Valle Medio del Magdalena, se relaciona a partir de los diferentes campos petroleros descubiertos a esa fecha. La secuencia Cretácica del Valle Medio se encuentra recubierta por los sedimentos terciarios. Sobre las secuencias Cretácicas y Terciarias, aparecen unidades que no son estratigráficamente rocas consolidadas, las cuales incluyen depósitos de terrazas y aluviones referidos como depósitos Cuaternarios que afloran a lo largo de los principales ríos. Para el área de influencia del río Magdalena, se describe brevemente la secuencia estratigráfica en el subsuelo, conforme a la estratigrafía regional.

El Sistema Cretácico cuya mejor manifestación se encuentra en el subsuelo, se ha dividido en una serie de unidades litológicas, que están compuestas principalmente de sedimentos marinos, representando la invasión del mar Cretácico (120 a 80 m.a). Teniendo en cuenta las diferencias litoestratigráficas observadas y las edades asignadas para el Valle Medio, se presenta éste subdividido en superior e inferior, tratando de seguir el límite Cenomaniano - Albiano y comprende las formaciones Tambor, Rosablanca, Paja, Tablazo y Simití, Salto, Luna y Umir.

Por lo que se refiere al Terciario, aflora parcialmente sobre el valle y presenta una sedimentación bastante continua, interrumpida solo por unas discordancias frecuentes pero poco acentuadas (Julivert, 1961). El Terciario

¹⁰ LEH, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos UN. Geología y Geomorfología del Río Magdalena sector Puerto Salgar – La Gloria. Informe Cormagdalena (CM 049). Diciembre 2000.

contrasta por su carácter continental frente al carácter marino del Cretáceo. Al mismo tiempo que ocurría el levantamiento progresivo de las Cordilleras durante el Terciario, el Valle Medio del Magdalena se hundía y se acumulaban allí sedimentos fluviales, lacustres, y a veces cenagales. Dos secuencias de rocas sedimentarias Terciarias, se observan en el área oriental del Valle Medio del Magdalena, la inferior y la superior, siguiendo el límite Mioceno-Oligoceno. El Terciario Inferior, lo constituye rocas sedimentarias de las formaciones Limas, La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado, aunque localmente pueden faltar algunas de ellas. El Terciario Superior esta representado por los Grupos Real-Mesa.

Una gran variedad de depósitos inconsolidados y generados por las corrientes y flujos en las planicies de inundación compuestos por gravas, arenas, limos y lodos, son en general considerados como depósitos Cuaternarios, que incluyen espesos y extensos depósitos aluviales y terrazas a lo largo de los principales ríos y sus tributarios.

2.2.1.2. Geomorfología Detallada del Sector en Estudio

El tramo del río Magdalena entre San Rafael de Chucurí - Carmelitas, se caracteriza por presentar diferentes características geomorfológicas, asociadas a los principales tipos de materiales que conforman las orillas, dependiendo de las unidades presentes. Estos materiales permiten categorizar las orillas del río como estables, poco estables, inestables y muy inestables.

Se tiene las siguientes unidades Geomorfológicas:

- **Lomeríos (Sc):**

La unidad está compuesta por pequeñas colinas, redondeadas y que no sobrepasan la cota 20 m.s.n.m, ubicados en la margen izquierda en el sector de la Ganadera.¹¹ LA unidad se deriva de una estructura sedimentaria subhorizontal del terciario superior, constituido de sedimentos arcillosos, arenosos y conglomeráticos con aspecto general de peniplanicie. Presenta suelos rojizos alterados y con perfiles poco profundos, poco diferenciales, poco permeables y con un contenido bajo de materia orgánica. Generalmente

¹¹ LEH, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos UN, Obras de estabilización de la orilla en el sector de la ciénaga de Chucurí. Informe Final. Marzo 2002.

se encuentra cubierta por sedimentos aluviales que en algunos casos cubrieron la paleotopografía sobre el tercio superior, la unidad se manifiesta por cuerpos resistentes que en algunos sectores actúan como un control litológico y como límite de divagación del río o en el lecho mayor, que puede ser ocupado en la época de aguas altas invadiendo la llanura aluvial en las depresiones inundables, como en éste caso sobre la ciénaga de Chucurí.

- Depósitos Aluviales (F):

La zona aluvial esta constituida por materiales de gravas y arenas sin consolidar con alta permeabilidad y que corresponden a las formas de acumulación aluvial, en la mayoría de los casos como terraza baja frecuentemente atacadas por desbordes del río. Se encuentran también limos y arenas en el lecho del río sobre las geoformas descritas anteriormente y en canales y meandros abandonados correspondiendo con la planicie aluvial del río Magdalena. Son comunes también los depósitos lagunares asociados con las depresiones anegadizas y ciénagas, frecuentes principalmente en la planicie aluvial, y representan sedimentos finos depositados en las áreas frecuentemente comunicadas con el río Magdalena.

Estas planicies se han generado detrás de los albardones o diques naturales y/o artificiales en las épocas de crecida, a través de las zonas de chorro o descargas donde hay desbordes que a su vez alimentan las depresiones inundables y/o ciénagas y lagunas. Estos sedimentos de la planicie aluvial son disectados durante períodos de relativa estabilidad de la corriente generándose así una terraza baja por la incisión en el lecho del río y con socavación lateral por las corrientes formándose así el talud de la terraza y en algunos puntos como terrazas emparejadas; terrazas aisladas en un lado del cauce, o enfrentadas a zonas de barras o playas recientes a diferentes alturas del lecho.

- Terrazas:

Las terrazas se definen como planicies aluviales disectadas y abandonadas por el río y eventualmente inundadas por él mismo. Esta geoforma es referida más propiamente como un relleno o deposito aluvial para diferenciar los constituyentes, más que de su forma topográfica en sí. Una característica importante observada en las terrazas, es su diferenciación en niveles. En general, las terrazas están caracterizadas por un buen drenaje con suelos fértiles donde se desarrolla vegetación y cultivos sobre los depósitos finos de desborde.

- Vega de Divagación (Fa1) (*Islas, Barras y Playas*):

En esta zona aluvial o vega de divagación los sedimentos pueden ser acumulados de dos maneras, por la migración lateral de los canales dentro del cauce, lo cual genera la formación de islas, barras y zonas de playa y por la depositación vertical de los flujos de agua que inundan la planicie aluvial y el lecho mayor, dando como resultado una acumulación de sedimentos en capas.

Los sedimentos formados dentro del cauce, islas o barras, son generados por la divagación lateral alterna, los cuales se conservan por la divagación de los canales dentro del cauce. Estos sedimentos están constituidos esencialmente por limos y arenas con ausencia casi total de gravas, lo cual facilita el desarrollo de zonas de playa en las islas y barras. Las barras son acumulaciones inestables de materiales transportados por el río como carga de fondo y en suspensión que se forman en la mitad del cauce o en posición lateral, los cuales emergen en épocas de aguas bajas y medias.

- Cubetas de Inundación (Fa3):

Esta unidad está formada por zonas pantanosas anegadizas o con lagunas o ciénagas permanentes como el caso de Chucurí. En la margen izquierda del río Magdalena, el cual acarrea abundante sedimento fino, el valle o lecho mayor socavado por él esta ahora relleno por estos. Sin embargo bastas depresiones subsisten detrás del dique ribereño formado por el mismo río o artificialmente. Estas están parcialmente rellenas por decantación de arcilla y limo; y acumulación de residuos orgánicos en las pequeñas cuencas donde el caudal sólido es escaso, y corren aguas cargadas de materia orgánica, las cuales ocupan valles poco profundos donde se desarrollan bosques acuáticos. Los materiales que forman los diques y los que forman el fondo de las depresiones son potencialmente muy fértiles.

- Albardón (Fa2):

Son acumulaciones recientes en los que los materiales predominantes son limos y arenas de grano fino y casi sin compactar dispuestos a lo largo de la orilla y en los bordes de la ciénaga. En perfil transversal tiene forma levemente convexa, y sus materiales se distribuyen en capas. El espesor de estas acumulaciones decrece desde el borde del lecho hacia las depresiones inundables. Su anchura varía, y en algunos sectores el dique es reemplazado por un control litológico. Los diques del lecho presenta ocasionales zonas discontinuas por donde se establecen chorros que alimentan las depresiones anegadizas o curvas de agua divergentes de la corriente principal. En algunos casos corresponden a diques artificiales construidos para controlar las inundaciones periódicas.

2.2.2. Información Hidrológica

La caracterización hidrológica es la descripción del comportamiento del río Magdalena desde el punto de vista de los niveles de la superficie de agua y de los caudales, tanto a nivel medio como a nivel extremo o de avenida. Igualmente se tiene en cuenta la influencia de los afluentes principales.

Para examinar el comportamiento hidrológico de una corriente es usual recurrir a los histogramas de valores medios para mostrar generalidades sobre su evolución temporal y espacial, a las curvas de duración para ilustrar el comportamiento detallado de la variable en cuestión dentro de un año típico, a las curvas de excedencia para mostrar el comportamiento multianual diario, y por último, al análisis de frecuencia de eventos extremos para proyectar, los riesgos de inundación cuando de caudales y niveles se trata.

El histograma representa los caudales medios, mediante diagramas de barras que tienen en las ordenadas los caudales medios y en las abscisas los periodos correspondientes que pueden ser diarios, mensuales o anuales.

2.2.2.1. Niveles del Río Magdalena y Curvas de Excedencias

Las estaciones hidrométricas del IDEAM se encuentran ubicadas a lo largo del río en el sector comprendido entre Puerto Salgar y el Banco esta última la de mayor longitud de registro en el sector aguas abajo, se encuentra también la estación Peñas Blancas pero presenta una reducida longitud del registro de niveles.

La curva de excedencias diarias de niveles representa gráficamente la probabilidad que un nivel sea igualado o excedido para cada día del año en una estación particular, es decir que se estudia para cada estación la probabilidad que un nivel sea igualado o excedido para cada día del año, su importancia para la navegación y otros usos es muy significativa al mostrar de manera detallada el régimen de niveles del río en cada localidad y en particular la variabilidad potencial de dichos niveles para cada día del año. Allí, se pueden corroborar las conclusiones deducidas de las curvas en cuanto a la ocurrencia de los periodos de niveles altos, medios y bajos. Incluso, se puede notar de forma más clara el desplazamiento temporal de los periodos de niveles altos y de niveles bajos a medida que se avanza aguas abajo.

Las estaciones hidrométricas en la zona de estudio son Puerto Berrío, Barrancabermeja, y Maldonado. Las variaciones de nivel en la estación Puerto Berrío son de casi 4.0 m, en la Estación Barrancabermeja alcanzan casi los 5.0m (entre 71 y 76 msnm ver Figura No.17), en las curvas de niveles medios mensuales multianuales se pueden definir la fluctuación anual promedio del régimen de niveles, y se deducen los meses en que se presentan niveles altos, medios y bajos.

En la estación Barrancabermeja se presenta un periodo de niveles muy altos en los meses de marzo, mayo y otro en el mes de noviembre pero en los años en que se han presentado niveles relativamente altos y bajos, se deben al fenómeno climático del niño o la niña sin embargo algunos años presentaron niveles máximos o mínimos a pesar de no depender de dicho fenómeno climático.

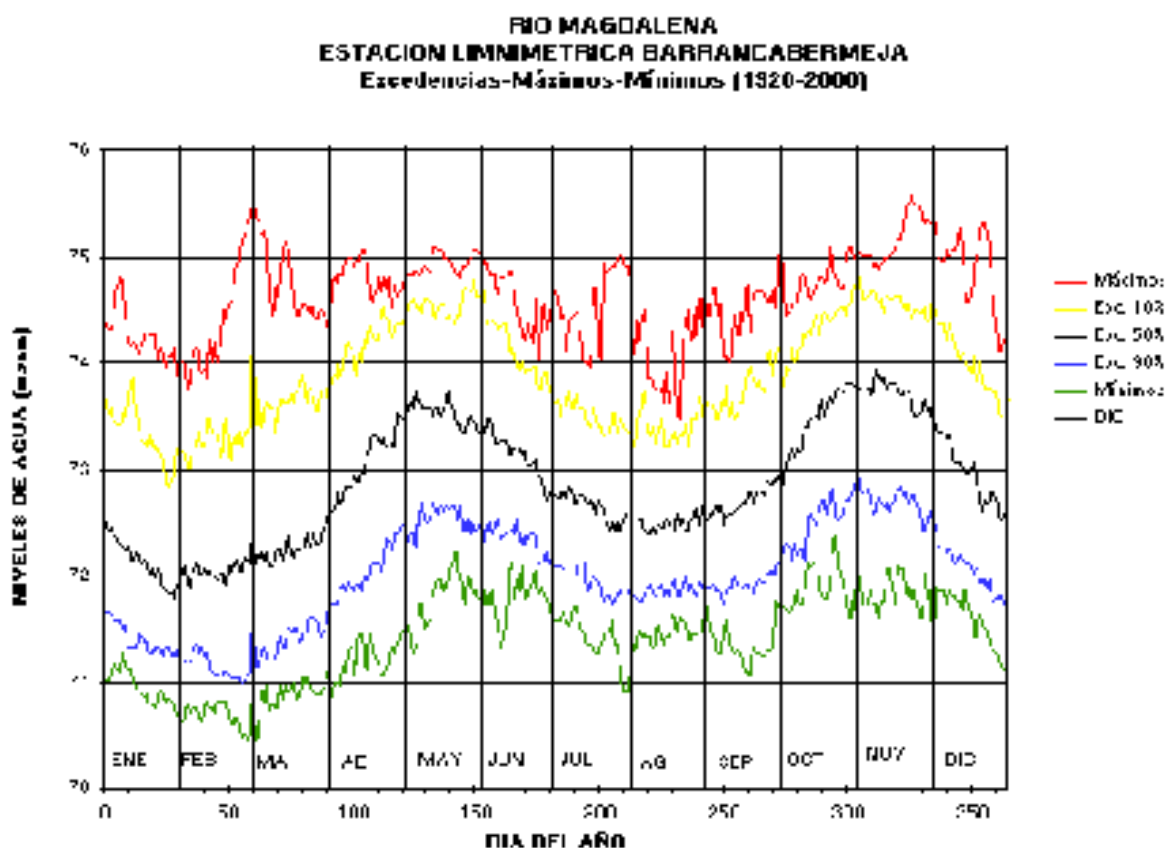


Figura 17. Curva de Excedencias

2.2.2.2. Curvas de Duración De Niveles

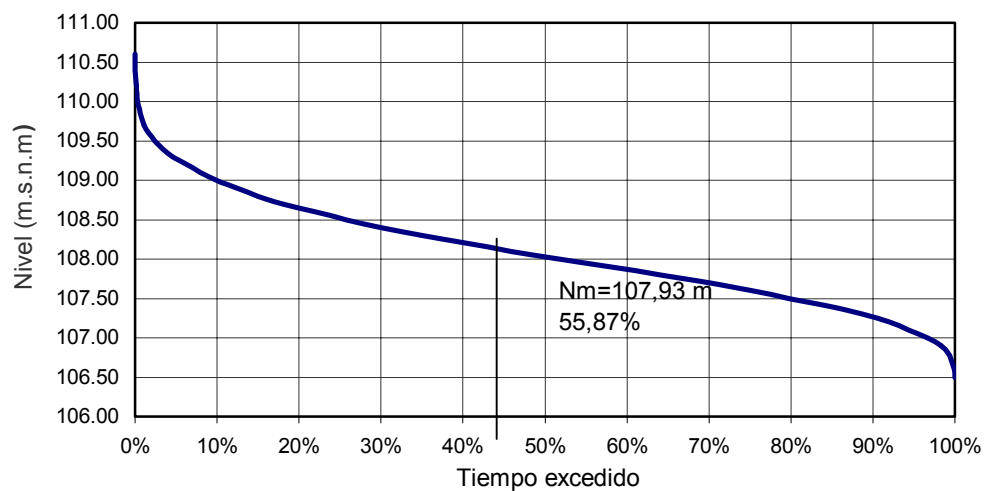
Para el estudio de navegabilidad las curvas de duración de niveles permiten obtener el nivel de la superficie de agua que sirve de referencia altimétrica para definir las condiciones de calado mínimo para la navegación en el sector en cuestión, y representa aquel nivel que es igualado o excedido el 95% del tiempo del periodo de registro.

Una revisión de estas curvas para las estaciones con referencia absoluta permiten deducir que siguen una tendencia normal, es decir, reduciendo el nivel medio a medida que se avanza hacia aguas abajo del río. También se obtienen algunos valores representativos del régimen de niveles del río en el cual no existe una tendencia clara sobre la magnitud de la variación local de niveles cuando se comparan a lo largo del río.

Como resultado de este proceso, se grafican las curvas de duración para el periodo base de cada una de las estaciones hidrométricas (ver *Figura No.18*), en las cuales se indica el caudal medio y su correspondiente valor de porcentaje, de acuerdo con las formas mostradas por las curvas, la variación del régimen hidrológico del río Magdalena hacia aguas abajo es gradual como corresponde a una cuenca de tan gran extensión. Las 'colas' de las curvas es un indicativo de la gradualidad con que se suceden los caudales altos, y bajos, en cada localidad del cauce.

En la estación Puerto Berrío la curva de duración indica que el 95 % del tiempo en el que se tomaron registros se presentó un nivel aproximadamente de 107 msnm; y la estación Maldonado indica que se presenta un nivel de 98 msnm el 95% del tiempo; por tanto si tomamos que el 95 % del tiempo es un tiempo significativo de observación, el río esta en un nivel alrededor de 98 y 107 msnm en este sector.

**CURVA DE DURACIÓN DE NIVELES PERIODO
1974-1998. ESTACIÓN PUERTO BERRÍO**



**CURVA DE DURACIÓN DE NIVELES PERIODO
1979-1997. ESTACIÓN MALDONADO**

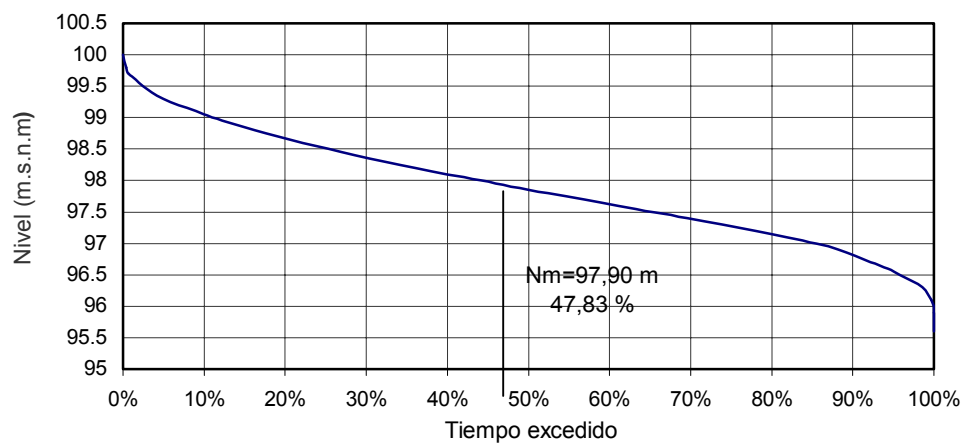


Figura 18. Curvas de Duración de Niveles.

FUENTE: LEH UN.

2.2.2.3. Análisis de Frecuencia

El análisis de frecuencias de niveles permite estimar la magnitud de eventos según su frecuencia de ocurrencia en términos de periodo de retorno. La variable analizada para este caso corresponde a los niveles máximos anuales. Habiéndose utilizado hasta seis distribuciones de probabilidad, se encontró un mejor ajuste a los datos con distribución Log-Normal¹² de 2 parámetros (ver Cuadro 2). Se obtienen valores asociados a periodos de retorno entre 2 y 100 años para las estaciones del río Magdalena con registro de niveles con referencia absoluta en términos de m.s.n.m. Los resultados permiten observar los incrementos de nivel en metros con respecto al nivel medio, **(por ejemplo para periodos de retorno de 50 y 100 años, en Puerto Berrío dichos incrementos son de 2.5 y 2.6 m)** los valores extremos de nivel tienen un carácter potencial debido al hecho que con los incrementos de nivel la posibilidad de inundación se hace mayor, de manera tal que los niveles alcanzados no necesariamente ascienden tanto pues este análisis no tiene en cuenta los ensanchamientos producidos con el crecimiento de los niveles.

Cuadro 2. Caudales de Creciente (m³/s) Para diferentes periodos de retorno según distribución Log- normal de dos parámetros.

ESTACION	AREA DE DRENAJE KM ²	PERIODOS DE RETORNO (AÑOS)						
		2	3	5	10	25	50	100
Puerto Berrío	74594	4.790	5.290	5.810	6.430	7.160	7.680	7.980
Maldonado	90062	4.870	5.290	5.730	6.230	6.820	7.230	7.620
Regidor	136167	6.880	7.310	7.740	8.240	8.800	9.180	9.540

2.2.2.4. Curvas de Calibración De Carga

La carga de sedimentos de lavado se puede evaluar mediante aforos sólidos efectuados en cada una de las secciones de interés, se puede establecer una relación empírica, con una buena medida de aproximación, para cada una de los sitios de interés mediante el empleo de métodos de correlación matemáticos. La correlación que mejor representa la tendencia de los datos de los aforos sólidos es la regresión potencial de la forma $Q_s = a(Q)^b$ y que se muestra como una línea recta si se dibuja en papel log-log (ver Figura 19.). La

¹² LEH, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. Caracterización Hidrosedimentológica. Informe Final.

calidad del ajuste se puede establecer por medio del valor del coeficiente de determinación R^2 que representa el grado de cercanía de los datos con respecto a la recta estimada. Un valor cercano a 1 indica un ajuste perfecto, un valor mayor a 0.8 se puede considerar como aceptable, mientras que un valor menor a 0.8 indica que el ajuste no es adecuado.

Para las curvas de Calibración de carga calculada se seleccionaron entre 8 y 12 condiciones de caudal líquido (con sus correspondientes variables descriptivas de la hidráulica del flujo), teniendo en cuenta las estaciones más cercanas a la zona de estudio que en este caso son Maldonado y Puerto Berrío procurando cubrir el mismo rango de variación observando en la curva de duración de caudal el sitio para los cuales se efectuó el cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos correspondientes a la carga calculada, una vez obtenidas todas las parejas de valores de caudal líquido y carga de sedimentos se procedió a graficar cada punto y así obtener la respectiva curva de calibración en papel log-log.

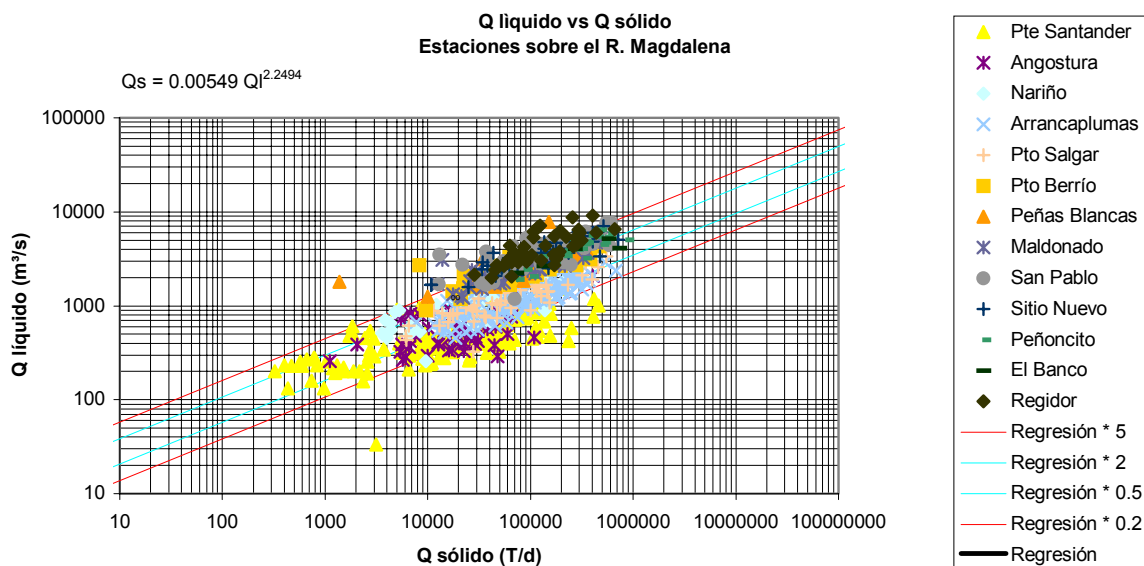


Figura 19 Curva de Calibración de Carga.

FUENTE: LEH UN.

2.2.2.5. Curva de Duración de Caudales

Para la obtención de las curvas de duración de caudales, se dibujaron para el período base en las estaciones ubicadas dentro del tramo Barrancabermeja – El Banco y puerto salgar – Puerto Berrío. A partir de las series definitivas se procedió a elaborar curvas de duración de caudales para períodos homogéneos que permitiesen su comparación entre las diferentes estaciones siguiendo la metodología establecida por Searcy¹³ la cual consiste en estimar la curva de duración extendida correspondiente a un periodo largo (o periodo base), de una estación que posee un registro corto, por correlación de su registro con el de aquella que posee el registro más extenso y confiable (estación base), considerando que ambas estaciones presentan un comportamiento hidrológico similar. Para efectos del estudio se extendió el periodo de las estaciones localizadas entre Barrancabermeja y El Banco con base en esta última estación, la cual se tomó como “Estación Base” por presentar el registro más completo (1974-1998). En las estaciones Puerto Salgar y Puerto Berrío, no fue necesario extender el periodo de registro, debido a que este es casi igual al de la estación base, y por lo tanto, las curvas de duración de caudales fueron construidas con la serie original de datos.

Una comparación de las curvas de duración se presentan de manera conjunta en la *figura 20* para las estaciones hidrométricas de Puerto Berrío y Maldonado (*cuadro 3*) de los años correspondientes entre 1974 y 1997, de igual manera las curvas de duración de caudales de las mismas estaciones correspondientes a la campaña 1999 – 2000 (*cuadro 4*) *figura 21*.

En éstas curvas, se puede notar el aumento de los caudales a medida que se avanza río abajo, de igual manera se observa que la diferencia entre las curvas de duración es mínima. De acuerdo con las formas mostradas por las curvas, la variación del régimen hidrológico del río Magdalena hacia aguas abajo es gradual como corresponde a una cuenca de tan gran extensión. Aún más, la forma poco “empinada” de los extremos de las curvas “colas” es indicativo de la gradualidad con que se suceden los caudales muy altos, por una parte, y muy bajos, por la otra, en cada localidad del cauce.

En el *cuadro 5* se muestran los datos de caudal medio, caudal máximo y caudal mínimo de acuerdo con los registros de caudal medio diario del periodo de análisis en cada estación, el rango de variación observado

¹³ Searcy, J.K. Manual of Hydrology: Part 2, Low Flow Techniques – Flow Duration Curves. Citado por LEH. Caracterización Hidrosedimentologica sector Puerto Salgar – LA Gloria. 2001

(caudal máximo menos caudal mínimo) y una relación de $Q_{\text{máx}}$ y Q_{min} con respecto al Q_{medio} , esto último con el fin de evidenciar la homogeneidad hidrológica observada.

Con relación a los caudales medios, el rango de variación longitudinal es de 307 m^3/s entre la estación hidrométrica de Puerto Berrío y la estación hidrométrica de Maldonado situadas en los extremos del tramo de estudio; además los valores indican que allí el caudal medio crece en una proporción de 1.1 veces.

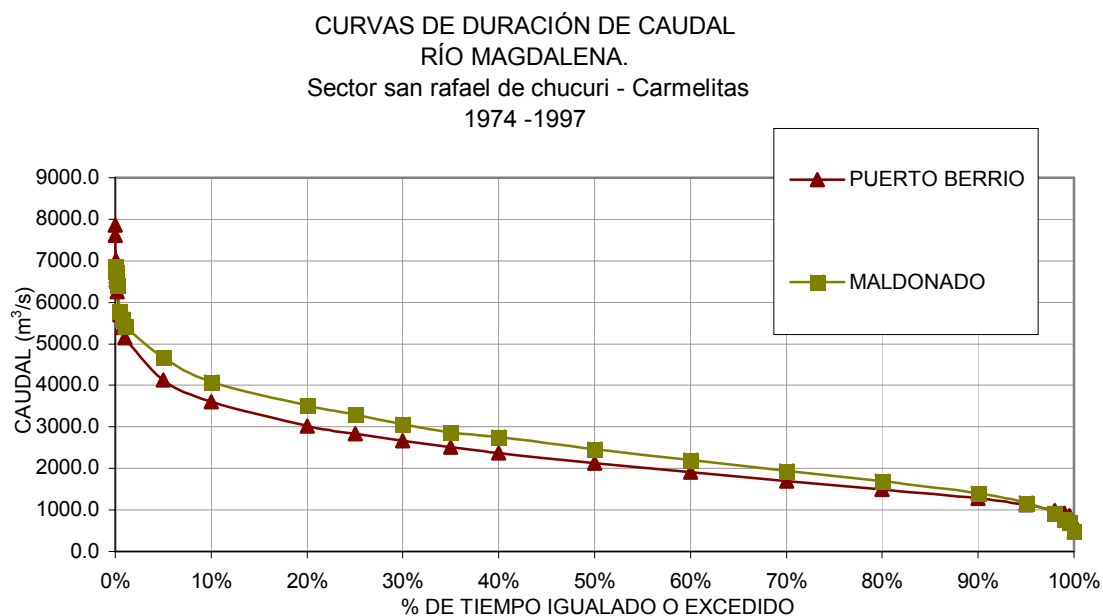


Figura 20. Curvas de Duración de Caudal del Río Magdalena 1974 – 1997

CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDAL
RÍO MAGDALENA.
Sector san rafael de chucuri - Carmelitas
1999 -2000

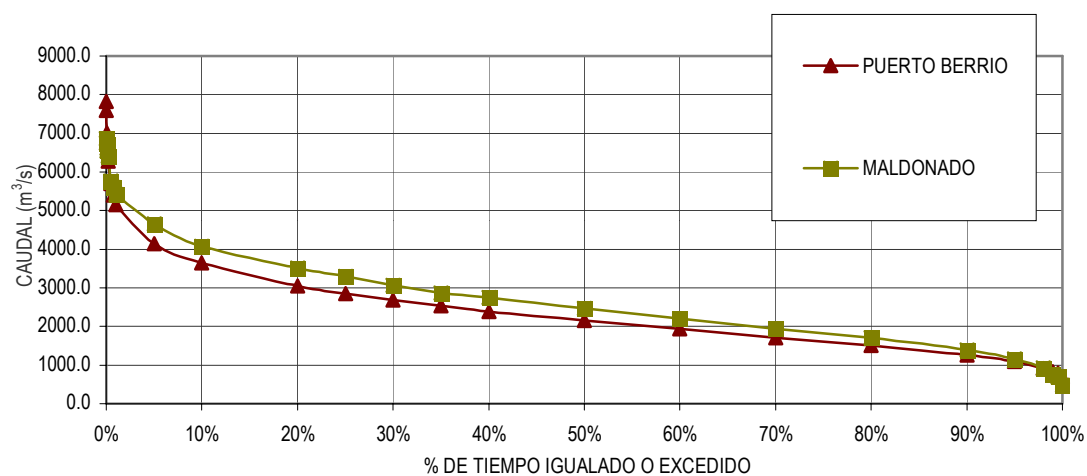


Figura 21. Curvas de Duración de Caudal del Río Magdalena 1999 – 2000

Cuadro 3. Curvas de duración de caudal en las estaciones hidrométricas sobre el Río Magdalena Sector San Rafael de Chucurí – Carmelitas.

	PUERTO BERRIO 1974- 1997	MALDONADO 1980 -1997
100,00%	697,00	485,35
99,50%	856,11	696,92
99,00%	928,31	764,60
98,00%	989,28	930,49
95,00%	1127,11	1164,83
90,00%	1275,26	1399,16
80,00%	1493,82	1699,48
70,00%	1694,09	1934,63
60,00%	1904,80	2204,93
50,00%	2133,54	2462,83
40,00%	2376,51	2758,66
35,00%	2517,28	2871,84
30,00%	2660,71	3060,75
25,00%	2828,41	3304,57
20,00%	3026,51	3512,54
10,00%	3599,49	4077,85
5,00%	4123,82	4664,68
1,00%	5153,46	5421,02
0,75%	5400,41	5599,06
0,50%	5694,50	5773,60
0,20%	6250,42	6406,47
0,10%	6827,23	6538,16
0,08%	6903,88	6619,09
0,05%	7006,18	6714,75
0,02%	7615,69	6739,65
0,01%	7855,00	6860,00

Cuadro 4 Curvas de duración de caudal en las estaciones hidrométricas sobre el Río Magdalena campaña 1999 – 2000 Sector San Rafael de Chucurí – Carmelitas.

%	PUERTO BERRIO 1999- 2000	MALDONADO 1999 -2000
100,00%	687,93	485,56
99,50%	788,22	697,11
99,00%	835,23	764,78
98,00%	919,52	930,68
95,00%	1094,07	1165,05
90,00%	1261,78	1399,40
80,00%	1503,22	1699,77
70,00%	1713,20	1935,01
60,00%	1931,76	2205,38
50,00%	2156,64	2463,37
40,00%	2393,46	2759,29
35,00%	2540,76	2872,55
30,00%	2684,46	3061,50
25,00%	2858,88	3305,34
20,00%	3047,62	3513,40
10,00%	3647,91	4078,85
5,00%	4148,14	4665,72
1,00%	5150,54	5422,56
0,75%	5411,35	5600,71
0,50%	5698,13	5775,41
0,20%	6285,93	6408,39
0,10%	6824,96	6540,29
0,075%	6903,43	6621,24
0,05%	7005,72	6716,87
0,02%	7593,45	6741,80
0,01%	7829,52	6862,11

Cuadro 5. Caudales Máximos, Medios, y Mínimos Absolutos

Estación	Área de Drenaje (Km ²)	Qmedio (m ³ /s)	Qmáx (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax/Qmedio	Qmin/Qmedio	Rango (m ³ /s)
Puerto Berrío	74594	2319	7855	697	3.4	0.30	7158
Maldonado	90061	2626	6860	485	2.6	0.18	6375

2.2.3. Información Transporte de Sedimentos

Dado que el sector de estudio comprende el sector de San Rafael de Chucurí – Carmelitas, se estima la capacidad de transporte de sedimentos (con el TRANSED)¹⁴ en el punto de San Luis, para el cual se requiere la curva granulométrica de material de lecho construida a partir de los aforos sólidos, además de la sección transversal del río.

Dentro de los aforos realizados por el buque explorador se denominó el punto de San Luis como Magdalena 10, para este sitio se tiene la siguiente curva granulométrica de material de fondo (*figura 23*) y sección transversal de río (*figura 22*).

¹⁴ LEH. Programa TRANSED. Laboratorio De Ensayos Hidráulicos. Universidad Nacional

PERFIL DE LA SECCION DE AFORO SAN LUIS

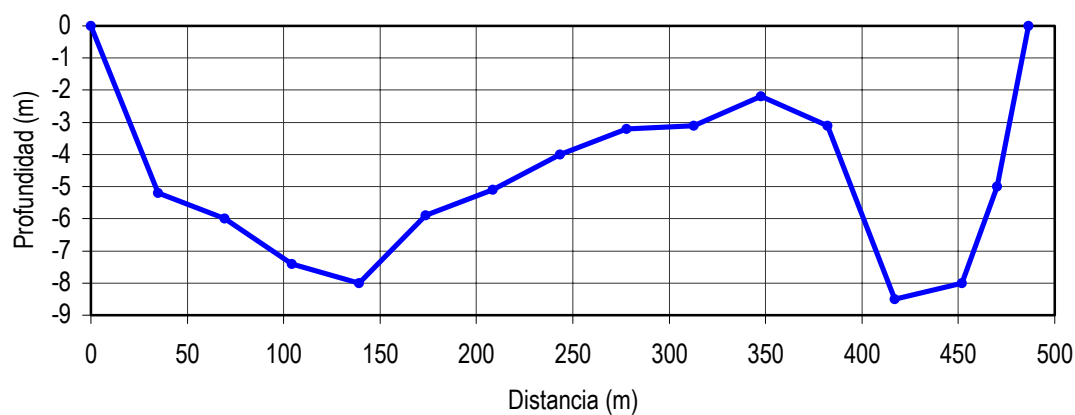


Figura 22 Sección Transversal del Río en San Luis

CURVA GRANULOMÉTRICA DE MATERIAL DEL LECHO
RÍO MAGDALENA
Sector San Luis - Barrancabermeja - Galán
San Luis Magdalena 10

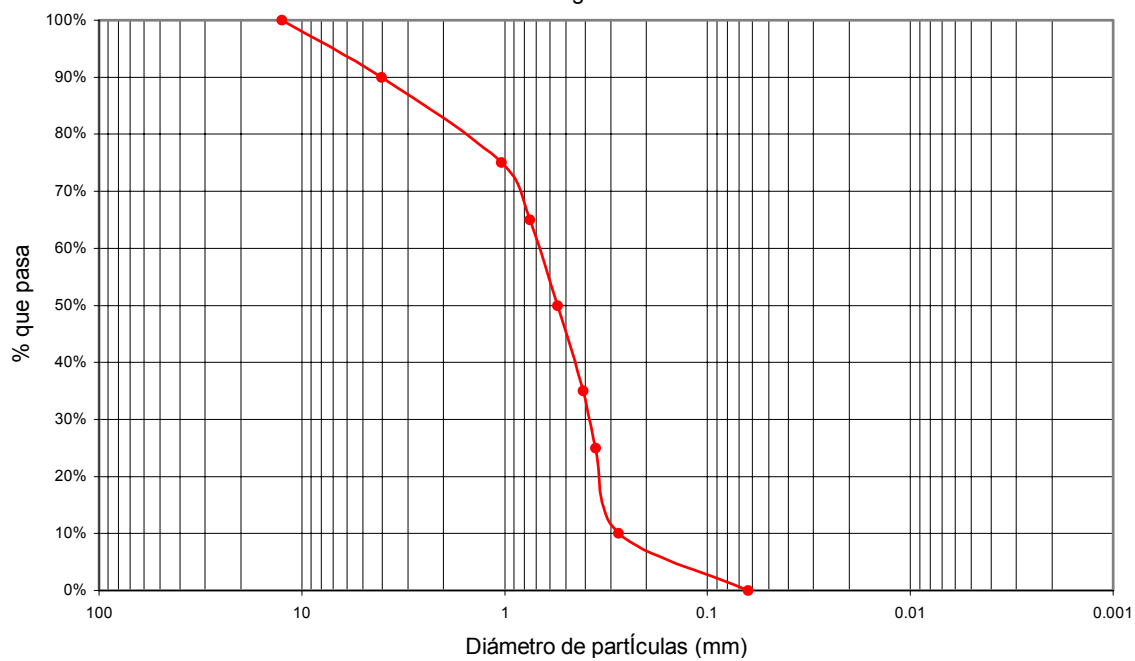


figura 23. Curva Granulométrica San Luis

Con base en la curva granulométrica se obtiene el cuadro 7, de rangos de tamaños de partículas y diámetros representativos en el cuadro 6, los cuales son datos de entrada para el programa TRANSED.

Cuadro 6. Diámetros Representativos.

Diámetro	D10	D25	D35	D50	D65	D75	D90	D100
(mm)	0.275	0.355	0.410	0.560	0.750	1.040	4.050	12.500

Cuadro 7 Porcentaje de Sedimento en Rangos de Tamaños de Partículas

D _{mín}	D _{máx}	% mín.	%máx.	% Rango
8,000	12,500	96	100	4
4,000	8,000	90	96	6
2,000	4,000	83	90	7
1,000	2,000	74	83	9
0,500	1,000	45	74	29
0,250	0,500	8	45	37
0,125	0,250	4	8	4
0,063	0,125	0	4	4

Con base en lo definido antes se procede a “correr” el programa TRANSED del cual se obtuvo principalmente los siguientes resultados. (ver anexo resultados TRANSED).

CAUDAL 3100 mcs

Cálculos Hidráulicos

Radio hidráulico para el tamaño de los granos

$R_b' = 1.88 \text{ m}$

Numero de Froude

$Fr = 0.203$

subcrítico

Tasa de transporte total

Suspensión 870127.8 Ton/día

Fondo 4579.3 Ton/día

Total 874707.1 Ton/día

CAUDAL 3500 mcs**Cálculos Hidráulicos**

Radio hidráulico para el tamaño de los granos $R_b' = 2.11 \text{ m}$

Numero de Froude $Fr = 0.214$ subcritico

Tasa de transporte total

Suspensión 1012726.0 Ton/día

Fondo 6161.6 Ton/día

Total 1018888.8 Ton/día

Así mismo, según el tamaño de las partículas existe una **mayor** capacidad de **arrastre de material de fondo** para partículas alrededor de **0.35 mm de diámetro** con 2329.9 Ton / día para el caudal de 3100 mcs y 2685.9 Ton / día para 3500 mcs, y **0.71 mm** con 1608.5 Ton / día (3100 mcs) y 2628.3 Ton / día (3500 mcs).

Lo anterior representa que la cantidad de material arrastrado por diámetros de 0.35 y 0.71 mm es el 82.2 % del total de material de fondo que puede ser arrastrado (caudal 3100 mcs) y un 86.0 % para el otro caso (caudal 3500 mcs).

De esta manera en este punto del río se produce un **arrastre** de gran porcentaje de **arenas medias y arena gruesas**.

2.2.4. Fotografías Aéreas

Se obtuvieron fotografías aéreas suministradas por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos U.N. correspondientes a los años **1981, 1984, 1988, 1992, 1998** y el levantamiento realizado durante la campaña topobatimétrica del año **2000**, en el IGAC se obtuvieron las del año **1972**, para completar así de esta manera el período de registro fotográfico de treinta (30) años.

2.2.5. Velocidades

En el cuadro 8 se presentan velocidades tomadas en el sector San Rafael de Chucurí.

Cuadro 8. Velocidades Líneas de Corriente en San Rafael de Chucurí.

LINEA No 1				LINEA No 2				LINEA No 3			
PUNTO	DISTANCIA	TIEMPO	VELOCIDAD	PUNTO	DISTANCIA	TIEMPO	VELOCIDAD	PUNTO	DISTANCIA	TIEMPO	VELOCIDAD
			m/s				m/s				m/s
352				353				369			
	104,49	115	0,91		126,17	107	1,18		87,76	77	1,14
354				355				370			
	80,35	89	0,90		128,59	113	1,14		134,9	132	1,02
356				357				371			
	135,81	129	1,05		156,71	115	1,36		221,59	149	1,49
358				359				372			
	143,23	104	1,38		181,88	104	1,75		188,3	90	2,09
360				361				373			
	190,55	109	1,75		266,13	104	2,56		150,66	59	2,55
362				363				374			
	242,25	102	2,38		249,64	93	2,68		144,15	78	1,85
364				365				375			
	143,92	98	1,47		257,5	111	2,32		147,64	77	1,92
366				367				376			
	242,8	127	1,91						154,07	91	1,69
368								377			

FUENTE LEH. U.N

3. IDENTIFICACIÓN MORFOLÓGICA

Las fotointerpretaciones se muestran en los planos (1 a 7) a continuación se presenta un recuento de los análisis hechos.

3.1. GENERALIDADES

En el sector estudiado el río Magdalena muestra inestabilidad en la permanencia de su curso en los tramos confinados desde la ciénaga de Chucurí hasta el corregimiento de San Luis, las divagaciones del río no son un hecho reciente puesto que una serie de orillares y terrazas de alturas diversas muestran la extensión lateral de las posiciones sucesivas del cauce en el pasado.

Las corrientes son de tipo sinuoso y se presenta migración de islas, barras y playas de arenas generados primero por la divagación lateral alterna los cuales se conservan por la misma divagación de los canales dentro del cauce y segundo por la depositación vertical de los flujos de agua que inundan la planicie aluvial y el lecho mayor, dando como resultado una acumulación por capas.

Presenta contrastes de velocidad y caudal según la época, antes de la ciénaga y hasta un poco después del corregimiento de San Luis presenta un marcado ensanchamiento del cauce y sedimentación. Se encuentran niveles del río entre 4.0m y 5.0m presentándose los niveles más altos en los meses de marzo, mayo y noviembre.

El caudal promedio del río se encuentra entre 3100 y 3500 m³/s, la tasa de transporte total de sedimentos en suspensión es de 870127.8 Ton /día, la tasa de sedimentos de fondo es de 4579.3 Ton /día para un total de transporte de sedimentos de 874707.1 Ton /día esto para un caudal de 3100m³/s, encontrándose además un $R^*b = 1.88m$ y $F = 0.203$ lo que indica un flujo subcrítico. De la misma forma para un caudal promedio de 3500 m³/s se obtuvo una tasa de transporte en suspensión y de fondo de 1012726.0 Ton /día y 6161.6 Ton /día respectivamente para un total de transporte de sedimentos de 1018888.8 Ton /día.

La mayor capacidad de arrastre de material de fondo es de partículas entre 0.35mm y 0.71mm, se produce un arrastre de gran porcentaje de arenas medias y arenas gruesas.

Las velocidades encontradas en el sector están entre 1.18 y 2.32 m/s.

3.2. MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1972 Y 1981

Para 1972 (plano1) se puede observar la presencia de islas en el brazo izquierdo frente a la Ciénaga de Chucurí lo que hace que el flujo se concentre sobre la margen derecha, lo mismo sucede para el año 81 con la diferencia que en éste año la presencia de islas es mayor y el flujo concentrado en la margen derecha se ve reducido por la presencia de dichas barras y playas.

En 1972 la orilla derecha frente a San Rafael De Chucurí no presenta la misma depositación de material que existe para 1982, una bifurcación del flujo se forma por la presencia de una isla en el centro del río, en 1982 el río toma completamente la margen izquierda por la gran sedimentación en su orilla opuesta, vale la pena resaltar la gran isla formada sobre la margen izquierda después de San Rafael de Chucurí (plano 1) ya que por la misma dinámica del río reduce para 1982 considerablemente el ancho del río.

En estos primeros diez años de evolución del río se puede notar la formación de islas, barras y playas aguas abajo del río hasta el muelle Carmelitas, en 1981 las fotografías no permiten ver en su totalidad la margen derecha antes de Carmelitas pero comparando con 1972 el ancho del río se reduce por el cerramiento total de éstas depositaciones en su brazo derecho.

3.3. MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1981 Y 1984

El río permite en 1981 su navegabilidad sobre la margen derecha en el sector de la Ciénaga (ver plano 2) produciendo una socavación en la orilla en 1984 (plano 3), en la margen izquierda (1981) se presentan varios brazos que se trenzan formando islas de gran tamaño que para el año 84 estas islas a través de la dinámica propia del río se dividen produciendo un estrangulamiento del caño Huila.

Sobre la población de San Rafael en 1981 el canal navegable se encuentra sobre la margen izquierda puesto que en la orilla opuesta es notoria la presencia de barras, playones e islas que imposibilitan su navegación, para el año 1984 la migración de estas barras, playones e islas producen una bifurcación del flujo permitiendo el paso de éste a través de dos canales navegables.

Antes de que el flujo llegue al corregimiento de San Luis en 1981 existe una bifurcación permitiendo la navegabilidad tanto en la orilla derecha como en la izquierda posteriormente sobre ésta población el flujo se concentra sobre la margen izquierda, ésta situación en 1984 cambia por completo puesto que la formación de islas, barras y playones sobre la margen izquierda imposibilitan la navegabilidad lo que conlleva al erosionamiento de la orilla derecha, nótese (plano 3) la curvatura que ésta orilla presenta en éste año. Al igual que en 1981, en 1984 el río permite navegabilidad sobre la margen izquierda en la población de San Luis.

Las fotografías aéreas en el sector del muelle de carmelitas para éstos dos años no eran muy claras para su fotointerpretación pero lo que se pudo observar fue la presencia de barras sobre la margen derecha y un control del flujo sobre la orilla del muelle.

3.4. MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1984 Y 1988

En 1988 continua el flujo principal sobre la margen derecha en la altura de la ciénaga presentando erosión de la orilla con respecto a 1984, en el caño Huila las islas y barras que se vienen formando desde 1981 se consolidan en 1988 (plano 4) formando una gran isla, permitiendo solo la navegabilidad sobre la margen derecha del río.

En la población de San Rafael en 1988 al igual que en 1984 presenta el río una bifurcación pero esta vez es más extensa por la migración de las islas formadas en el centro del río.

En 1988 después de la bifurcación el flujo llega por el centro hacia la orilla izquierda de la población de San Luis presentándose un estrangulamiento o disminución importante en el ancho de río, la formación de islas y barras con respecto a 1984 es menor. Por otro lado la curvatura de la orilla que se presenta en 1984 antes de ésta población en 1988 se ha erosionado a causa de la concentración de flujo sobre la margen derecha, a esto se le suma la presencia de barras.

El río continua su curso por la margen izquierda hacia el muelle Carmelitas presentando sedimentación en la orilla derecha.

3.5. MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1988 Y 1992

En 1992 el río toma una alineamiento más suave, las fotografías no permiten observar el caño Huila pero las islas y barras formadas anteriormente, para 1992 (plano 5) se observan ya no en gran número sino por el contrario han migrado en dos grandes islas dominando la margen izquierda en y después de San Rafael de Chucurí. La disminución de barras e islas se observa en toda la zona de estudio.

Como uno de los aspectos importantes en el cambio de forma para 1992 es la curvatura de la orilla derecha en la zona donde se encuentra la isla que en este caso se ha llamado número 1 (para reconocimiento en el plano 5) el cual presenta un cambio considerable, la orilla esta más erosionada, y tiene un cambio en la forma de la misma isla con respecto al año 1988.

Antes del estrechamiento encontrado en el corregimiento de San Luis la orilla derecha mencionada como cambio importante en 1988, para 1992 se presenta más erosionada y en su dinámica ha dirigido el flujo hacia el oriente mostrando una curva dirigiendo el flujo de derecha a izquierda para luego entrar hacia la margen izquierda exactamente en San Luis.

Un nuevo cambio en la forma del cauce se genera después del corregimiento de San Luis, formando un nuevo brazo en la orilla derecha con gran cantidad de barras de sedimento que hace que el río tome dos caminos antes de tomar su curso en el muelle de Carmelitas, es aquí donde el flujo ya no es interrumpido por barras o islas que hacían en 1988 que el río tomara la margen izquierda en este sector.

3.6. MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1992 Y 1998

Para 1998 (plano 6) la margen izquierda esta completamente cerrada por grandes islas que imposibilitan la navegación, además comparando con 1998 donde se puede observar el caño Huila (Plano 4) las mismas islas para 1998 han erosionado la orilla y han cambiado el alineamiento de la misma orilla izquierda frente a San Rafael lo que ha llevado a que el río se desplace sobre la orilla derecha.

El sitio donde se concentró el caudal se constituye en un estrechamiento y se aumenta la sedimentación hacia aguas abajo y sobre la orilla izquierda. No es apreciable entre 1992 y 1998 la migración lateral del cauce por socavación de la orilla derecha en San Rafael, ésta se puede decir que permaneció estable.

La curva derecha mostrada antes de San Luis en 1992, para el año 1998 cambia totalmente por la migración de las islas presentadas en el año 92, produciendo un estrechamiento del río en ésta zona. El brazo formado antes de Carmelitas en la margen derecha, las barras lo han cerrado y una nueva isla se ha formado en la orilla derecha frente al muelle, por lo cual hace que el río tome la margen opuesta.

3.7. MORFOLOGÍA ENTRE LOS AÑOS 1998 Y 2001

Una gran divagación presenta el río en 2001 (Plano 7) grandes formaciones de islas y barras en toda la zona de estudio. La margen izquierda en la ciénaga y en San Rafael están prácticamente cerradas y la orilla derecha está muy sedimentada.

Una de las zonas más afectadas para el 2001 es antes de San Luis donde la orilla derecha se ha visto erosionada y prácticamente colmatada por formaciones de sedimentos, el estrechamiento o cambio del ancho del río es ahora justo enfrente del corregimiento.

El muelle de Carmelitas también se ve afectado por la gran cantidad de sedimento, una isla se encuentra en el centro del cauce haciendo que el flujo ya no tome la margen izquierda como en 1998 sino que se divida por ambas márgenes, la curva que se presentaba en la margen derecha antes del muelle en 1992 y 1998 ya no es tan acentuada y no tiene tanta sedimentación.

4. ANÁLISIS DINAMICO

4.1. GENERALIDADES

En general el río muestra una gran dinámica fluvial, evidenciada por la migración y desarrollo de islas y barras acompañado de una corriente de tipo sinuosa. Ver fotografía Aérea.

Es probable que se estén dando dos tipos de situaciones alternadas o simultáneamente.

1. Un marcado proceso erosivo y de remoción en masa desde aguas arriba, lo cual aporta los materiales necesarios para crear islas y barras a lo largo del sector.
2. La presencia de inviernos fuertes y prolongados, el mal manejo de los cursos de los ríos y quebradas, provocan cambios marcados en la dinámica del río hacia aguas abajo y en la distribución de sus depósitos de arenas y gravas principalmente.

Durante los últimos treinta años (1972 – 2002) el río Magdalena, en el sector, ha mostrado cambios en el tipo de dinámica, caracterizada por la formación de islas y una subdivisión de la corriente en varios ramales que evolucionan según el desplazamiento de las orillas con importantes erosiones de los terrenos que conforman estas orillas. No se observa una tendencia a desplazarse preferiblemente por la margen derecha o izquierda.

En el año 1981 el flujo corría por la margen izquierda, entre 1984 y 1988 el flujo se presentaba tanto por la margen izquierda como por la derecha y en el 92 y 98 más hacia la margen derecha; en el 2001 termina en una gran divagación que hace que el río no tenga un cauce principal, esto indica cierta inestabilidad de éste sector.

La erosión previsible se desarrolla en forma de migración progresiva del curso, erosiones consecutivas a desbordamientos no son características de estos ríos¹⁵ los cuales sólo llegarían ocasionalmente a abrir nuevamente uno de sus cauces antiguos.

La dinámica del río muestra grandes cambios morfológicos en la margen izquierda debido a la formación de barras de sedimentación, en ésta orilla se producen desbordamientos en aguas altas del río debido a que esta orilla es más baja que la orilla derecha. La orilla derecha presenta un fenómeno de erosión y retroceso que obedece a cambios en la morfología del cauce debido a un proceso de sedimentación sobre la margen opuesta lo cual influye para que el flujo del río se vaya concentrando sobre la orilla derecha produciendo socavación y migración lateral del cauce.

La orilla derecha en las condiciones actuales no presenta buena estabilidad y ante una nueva acción dinámica fuerte del flujo se podrían presentar retrocesos importantes, la barra de sedimentación que cada vez se consolida más sobre la margen izquierda, puede afectar en gran forma ante un aumento de caudal considerable a esta orilla por ser ésta menos resistente y su composición de sedimentos de baja consolidación.

Es conveniente controlar la migración de la orilla derecha puesto que podría aumentar a lo largo de la zona de estudio. Se puede controlar mediante la construcción de obras de protección o modificando la morfología para que la presión ejercida por el flujo tenga menor agresividad sobre ésta orilla.

4.2. GEOMETRÍA DEL CAUCE

Para que ciertos rangos de flujo puedan transportar cargas de sedimentos sin erosionar las orillas debe haber una cierta velocidad, profundidad, ancho , pendiente, limites de corte y turbulencia; de alguna forma depende uno de otro

¹⁵ Centro Interamericano de Fotointerpretación. Informe Acerca de la Evolución Reciente del Río Magdalena, Sector Purificación. Septiembre 1983.

El caudal es el producto de la velocidad, profundidad y ancho, el movimiento del sedimento como carga de lecho, depende de la velocidad, profundidad y del tamaño del material del lecho.

La pendiente suficiente para alcanzar la velocidad necesaria depende del porcentaje de flujo o de la profundidad y de la resistencia total del flujo, ésta a su vez depende de la formación de dunas en el lecho, la geometría de dicha duna y de la rugosidad relativa. El material del lecho formado no es estable y el tamaño de las dunas y ondas, las cuales forman el lecho, dependen de las características del flujo, del sedimento, carga del sedimento y de la temperatura del agua.

Si el límite de corte de las bancas es demasiado grande el material de la orilla se erosionará, el ancho del canal será mucho mayor y la velocidad cambiará, si el límite de corte es un poco menor que el máximo no cambiará demasiado su sección, y si por el contrario es menor, el canal tratará de angostarse como sucede entre los años 1984 y 1988 (*ver planos 3 y 4*).

El proceso de angostamiento es lento, más sutil, llega a ser confundido con la inestabilidad, la no uniformidad del flujo, con los otros parámetros que están cambiando y con las condiciones de equilibrio en general. Algunas observaciones han puesto evidencias que los canales sufren un angostamiento por un período de tiempo.

Los fenómenos de socavación de un lecho granular sobrevienen cuando la capacidad de transporte dentro del campo de flujo es superior a la tasa de abastecimiento de sedimentos, la depositación es el fenómeno contrario, cuando la tasa de abastecimiento de sedimentos es mayor que la capacidad de transporte.

La geometría del cauce está representada por la pendiente longitudinal y por las características de la sección transversal.

4.2.1. Pendiente Longitudinal

La pendiente del cauce es uno de los factores importantes que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos ya que está relacionada con la velocidad del agua. En los tramos de pendiente fuerte los cauces tienen pendientes superiores al 3% y las velocidades de flujo resultan tan altas que pueden mover como carga de fondo sedimentos de diámetros mayores a 5 centímetros. Cuando el cauce pasa de un tramo de pendiente alta a otro de pendiente baja, su capacidad de transporte se reduce y comienza a depositar los materiales que recibe del tramo anterior. En este proceso se forman islas y brazos que pueden tomar una conformación trenzada con cauce divagante y el material que se deposita eleva el fondo del cauce y disminuye su capacidad.

La longitud del tramo en estudio como se mencionó en el capítulo 2 es de 20 Km. Según informe de hidrosedimentología ¹⁶ mediante la campaña topobatimétrica realizada en Octubre de 1999 y febrero de 2000 en el cual el río fue abscisado empezando en el K460 en La Gloria y finalizando aguas arriba en Puerto Salgar en el K927, se puede ubicar a Carmelitas en el K675 y a San Rafael De Chucurí en el K695. Se obtuvo la pendiente longitudinal del tramo teniendo en cuenta los sectores en los cuales fue dividido el río de acuerdo con los puntos de control geológico a lo largo del mismo, los resultados para el sector donde se encuentra localizado San Rafael De Chucurí - Carmelitas se presentan en el cuadro 9

Cuadro 9. Pendiente Longitudinal del Lecho Por el Canal Navegable.

SECTOR	PENDIENTE (m/m)
Termobarranca K 664 - Estación Peñas Blancas K 684	0.000449
Estación Peñas Blancas K684 - Ciénaga De Chucurí K 707	0.000307

¹⁶ LEH. Informe de Hidrosedimentología 12. Laboratorio De Ensayos Hidráulicos. Universidad Nacional

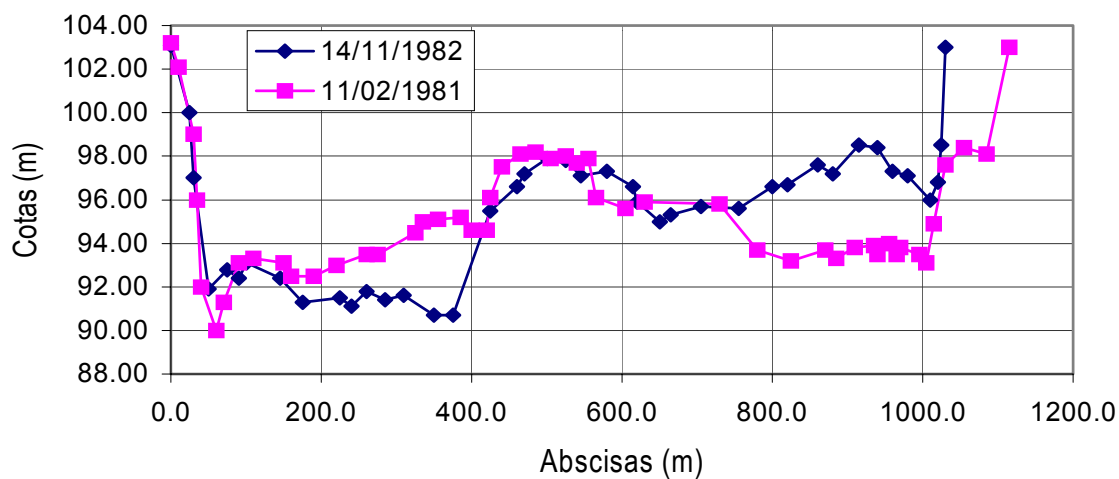
Estas pendientes fueron calculadas a partir de las cotas obtenidas del levantamiento topográfico y batimétrico realizado entre octubre de 1999 y febrero del 2000. El perfil longitudinal por el lecho del canal navegable se presenta en el Plano 8A Y 8B.

4.2.2. Secciones Transversales

En los cauces naturales las secciones transversales son irregulares y la medición de sus características geométricas se realiza con levantamientos batimétricos.

A continuación en las figuras 24, 25, y 26 se presentan las secciones transversales del río según datos tomados por el IDEAM en las estaciones Peñas Blancas, Maldonado y datos tomados por el BEX.

PEÑAS BLANCAS



PEÑAS BLANCAS

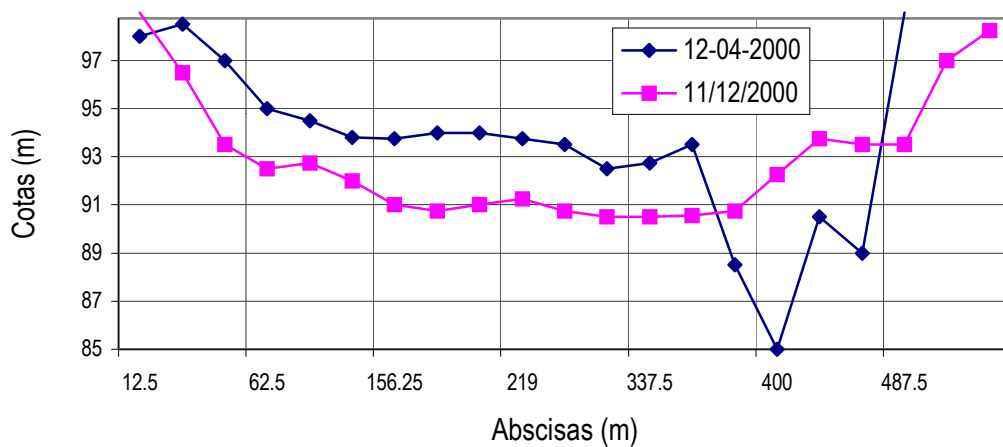


Figura 24. Secciones transversales del Río Magdalena según datos tomados por el IDEAM en la estación Peñas Blancas.

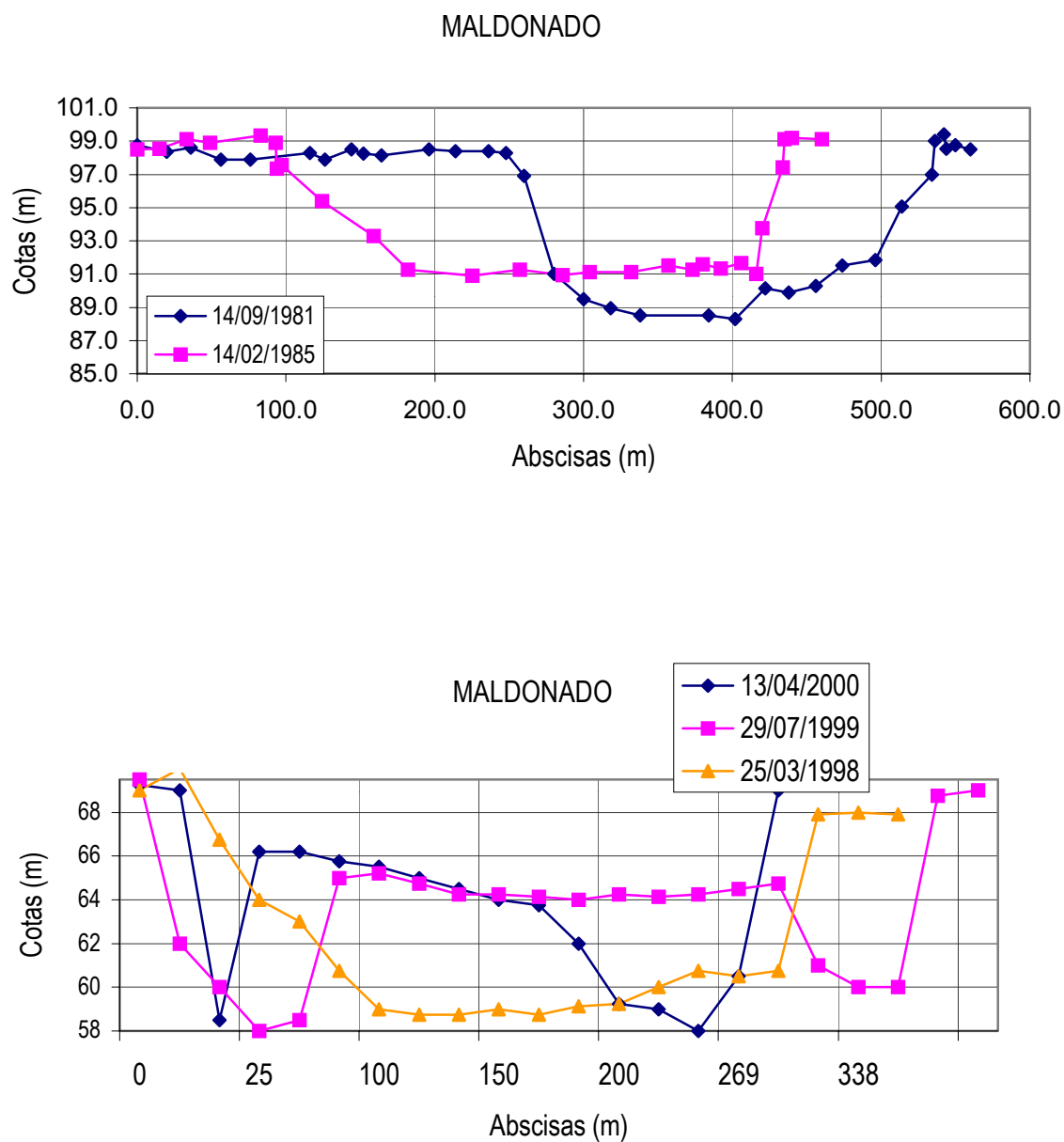


Figura 25 Secciones transversales del Rio Magdalena según datos tomados por el IDEAM en la estación Maldonado

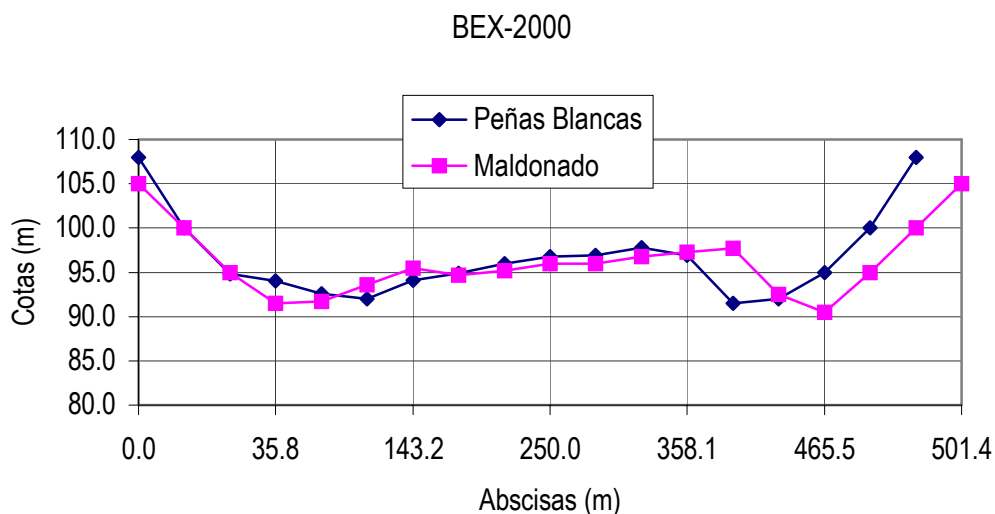


Figura 26 Secciones transversales del Río Magdalena según datos tomados por el BEX - 2000 en las estaciones Peñas Blancas y Maldonado.

4.2.2.1. Resultados Obtenidos

Para la estación Peñas Blancas¹⁷:

Ancho Sección: 453 m	Área Sección: 1800 m ²
Velocidad Media: 1.35 m / s	Profundidad Media: 4.0 m
Caudal: 2442 m ³ / s	Perímetro Mojado: 457 m

Estación Maldonado¹⁸:

Ancho Sección: 560 m	Área Sección: 1774 m ²
Velocidad Media: 1.1 m / s	Profundidad Media: 3.2 m
Caudal: 1937 m ³ / s	Perímetro Mojado: 563 m

¹⁷ Datos Suministrados por el IDEAM .tomados en 12-04-2000

¹⁸ Datos suministrados por el IDEAM. tomados en 12-12-2000

Secciones Transv. Según datos tomados por el BEX- 2000

Estación Peñas Blancas

Ancho Sección: 480 m

Área Sección: 1450 m²

Velocidad Media: 1.4 m / s

Profundidad Media: 4.0 m

Caudal: 3100 m³ / s

Estación Maldonado

Ancho Sección: 502 m

Área Sección: 1674. m²

Velocidad Media: 1.40 m / s

Profundidad Media: 4.2 m

Caudal: 3000 m³ / s

La línea que une los puntos más profundos de las secciones transversales a lo largo de la corriente se denomina Thalweg. En las corrientes de lecho aluvial se observan continuas variaciones en las secciones transversales y en la línea del Thalweg. Las magnitudes y frecuencias de éstas variaciones dependen del régimen de caudales, de la capacidad de transporte de sedimentos y del grado de estabilidad del cauce.

En el plano 9A y 9B se presenta el canal navegable del tramo estudiado.

4.2.3. Anchura y Amplitud del Cinturón de Meandros

De acuerdo con la campaña topobatimétrica realizada entre octubre de 1999 y febrero del 2000 se midió la anchura del río cada 5 km de orilla a orilla, igualmente se midieron para las mismas abscisas las anchuras del cinturón de meandros, los resultados se presentan en el cuadro 10; la abscisa 675 corresponde a Carmelitas y la abscisa 695 es aguas arriba en San Rafael de Chucurí.

Cuadro 10. Anchura y Amplitud del Cinturón de Meandros medidos cada 5 Km

ABSCISA	ANCHURA (m)	AMPLITUD (m)
675	461	4170
680	1520	3540
685	1640	3087
690	2586	3586
695	2194	3237

Se puede observar la gran diferencia de anchura del río en el sector de Carmelitas con 461m comparado con el de San Rafael de Chucurí cuya anchura es de 2194m. En cuanto a la amplitud del río, Carmelitas posee una amplitud de 4170m y en San Rafael De Chucurí 3237m.

Según algunas relaciones empíricas en investigaciones anteriores sobre ríos (*que fueron mencionadas en la sección 1.4 del capítulo 1 de éste trabajo*), dicen que la longitud del río “ λ ” es de 7 a 11 veces la anchura “ B ”, para éste caso la longitud del tramo es de 20.000 m (20 Km) y su anchura promedio es de 1385 m, lo que quiere decir que la longitud llega a ser 15 veces su anchura. La otra relación es que la amplitud “ a ” es 3 veces la anchura, la relación amplitud - anchura en el tramo San Rafael de Chucurí – Carmelitas es de 2.5 veces.

Otra relación empírica donde se muestra en qué condiciones un río forma un cauce trezado o un cauce único meandriforme está dada por la ecuación $i * Q^{0.44} = 0.0116$ donde “ i ” es la pendiente y “ Q ” el caudal, ésta ecuación establece una frontera entre una y otra morfología, si $i * Q^{0.44} > 0.0116$ el río es trezado y en caso contrario meandriforme. Aplicando ésta relación al estudio, con una pendiente promedio de 0.000378 (ver cuadro 9) y un caudal promedio de 3100 m³ / s se tiene una relación de 0.013 lo que dice que el río en éste tramo es trezado.

4.2.4. Sinuosidad

Se calcula la Sinuosidad del río midiendo la longitud del tramo a lo largo de su cauce “ L ” y la longitud del eje del cinturón de meandros “ LT ”¹⁹. Aplicando la ecuación $S = L / LT$ para una longitud “ L ” de 23000 m y una longitud del cinturón de meandros “ LT ” de 21506m (*dato tomado del LEH*) entre la estación Peñas Blancas K684 y la Ciénaga de Chucurí K707 se obtiene una sinuosidad de 1.07.

¹⁹ LEH. Informe de Hidrosedimentología No.14. 2000

4.2.5. Cuenca de Drenaje

La cuenca del río Magdalena en éste sector baña los departamentos de Antioquia y Santander y el tributario más importante es el río Opón en el k676 (*un kilómetro aguas arriba de Carmelitas*) cuya área de drenaje hasta su desembocadura es de 3569.40 Km² y la estación principal es Peñas Blancas localizada en el K683.5 (*aguas abajo de San Rafael de Chucurí*) con un área de drenaje de 86289.60Km² .

4.2.6. Erosión de Orillas

El límite de la corriente del río está constantemente cambiando con las variables de interacción del flujo como son la velocidad, la profundidad, la pendiente, la densidad, la viscosidad de la mezcla del sedimento con el agua, la concentración de la carga del lecho, la concentración de la carga en suspensión y las características del material del lecho. La estabilidad de las orillas dependen de éstas variables de la corriente interrelacionadas y también de la geometría del canal.

La erosión de las orillas pueden ser ocasionadas por:

1. La superficie:

a. El deterioro de algunas superficies de terreno pueden resultar en una banca inestable, tal como erosiones por corrientes de flujo en la punta de la banca, erosión en la superficie del agua debido a ondas y erosión a lo largo de la orilla debido a flujos por encima de éstas.

b. Rompimiento causado por excesivo secamiento de un suelo cohesivo o cambios en estructura similar que pueden causar que la banca se debilite y comience a desestabilizarse. El desmoronamiento puede ocurrir si el excesivo secamiento está seguido por sumergencia.

2. Humedad contenida dentro de la Banca:

- a. La pendiente de una orilla de menor cohesión puede estar temporalmente más empinada que el ángulo de reposo del material de la banca causado por capilaridad u otro efecto estabilizante temporal. Cuando el efecto estabilizante es removido, la orilla se vuelve inestable.
- b. Con tubificación, el material menos cohesivo es erosionado en una parte de la superficie de la banca por filtración, una cavidad se desarrolla y rápidamente se extiende dentro de la banca a lo largo de un sendero dominante de filtración.
- c. Licuefacción de granos finos y materiales estructurados libremente propensos a un incremento rápido en la presión de poros resultando un largo segmento de material de orilla corriendo aguas abajo como un fluido mezclado.
- d. Con un alto índice de agua y un bajo nivel de la corriente, una adición de carga hidráulica es localizada en la banca y puede resultar en falla a menos que sea reemplazada por una infiltración o una tubificación.
- e. Inflamación o encogimiento durante el humedecimiento o secamiento del terreno, esto afecta la estabilidad del suelo arcilloso substancialmente, las presiones hidráulicas pueden resultar desde el agua que corre libremente dentro del rompimiento del terreno y dentro de las aberturas en medio de diferentes materiales de la orilla.
- f. El esfuerzo cortante del suelo arcilloso depende de la presión de poros y del grado de saturación.

3. Condiciones variadas:

La lubricación por el agua y una alta presión hidrostática a lo largo de las interfaces en medio del material de la orilla, pueden causar baja resistencia al deslizamiento resultando una falla en la orilla.

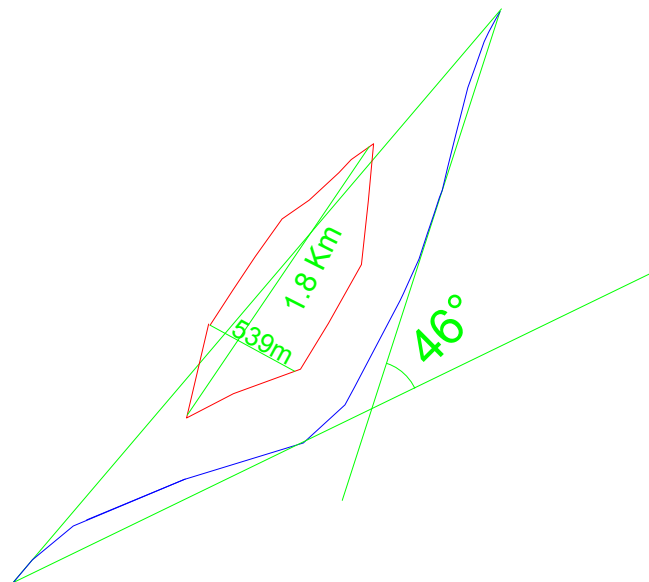
En el plano 10 se presenta la evolución que han tenido las orillas durante el período analizado

A continuación se presenta un análisis de las curvas producidas por la erosión utilizando las observaciones empíricas mencionadas en el capítulo 1, éstas leyes empíricas dadas por Fargue en uno de sus apartes dice que a igualdad de longitud “ s ” la profundidad media en un tramo es mayor a mayor ángulo entre las tangentes a la entrada y salida del tramo, es decir a mayor curvatura media en el tramo. También se presenta la geometría de las islas formadas en éstas curvas donde se puede notar la diferencia para los diferentes períodos de tiempo.

En las figuras 27 y 28 se hace una comparación para igual longitud de tramo de la curva pero diferente curvatura media. Allí se concluye que para 1972 comparado con 1981 existía mayor profundidad media y de igual manera para 1992 mayor profundidad que en 2001. La isla allí formada para 1972 tiene una longitud de 1.8 Km y en 1981 debido a la depositación su longitud aumenta a 3.12 Km. para 1992 continua aumentando a 2.4 Km y para el 2001 ya se encuentra en 2.7 Km.

De la misma manera se han comparado la curva 2 (*figuras 29 – 30*), la curva 3 (*figuras 31 - 32*) y la curva 4 (*figuras 33 – 34*) donde según estas observaciones o leyes empíricas a mayor ángulo entre las tangentes a la entrada y salida del tramo la profundidad es mayor.

CURVA 1 AÑO 1972 (ver plano 1)



CURVA 1 AÑO 1981 (ver plano 2)

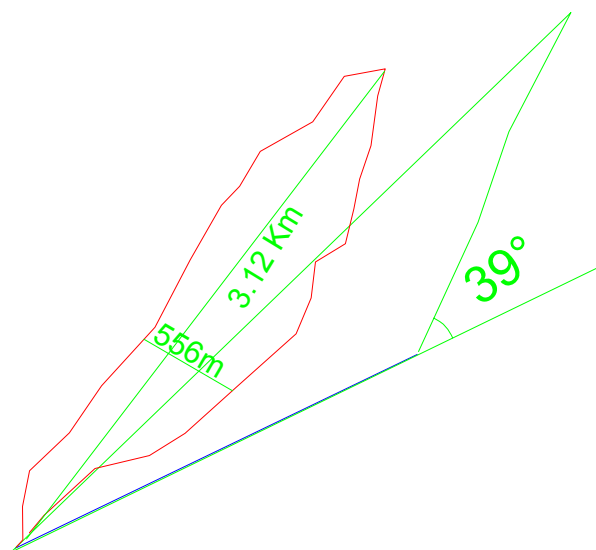
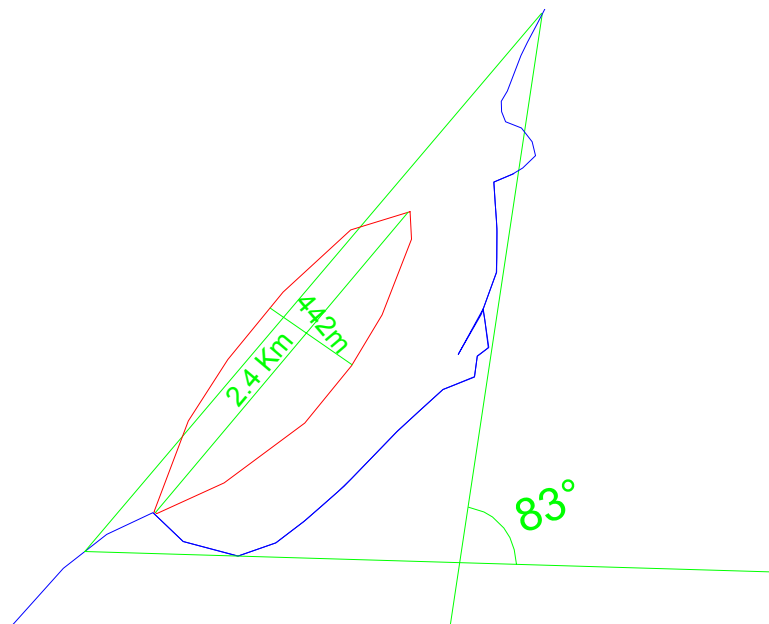


Figura 27 Comparación de la curva 1 para los años 1972 – 1981 con igual longitud pero diferente curvatura media

CURVA 1 AÑO 1992 (ver plano 5)



CURVA 1 2001(ver plano 7)

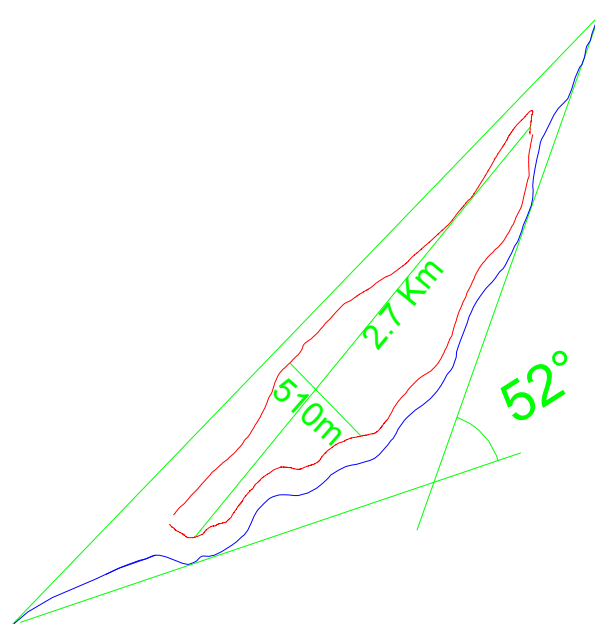
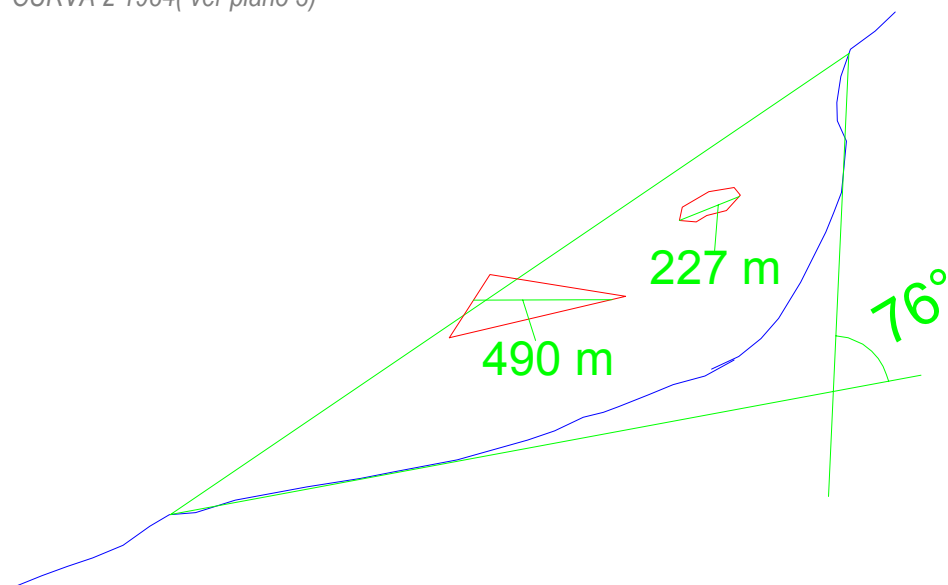


Figura 28. Comparación de la curva 1 para los años 1992 – 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media.

CURVA 2 1984(ver plano 3)



CURVA 2 1988 (ver plano 4)

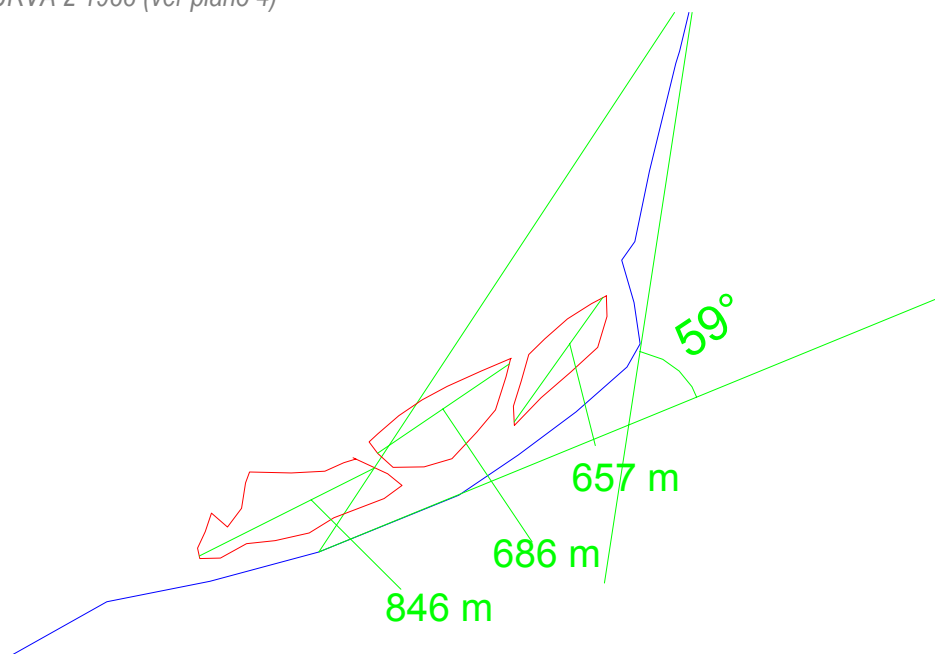


Figura 29. Comparación de la curva 2 para los años 1984 – 1988 con igual longitud pero diferente curvatura media.

Curva 2 1992



CURVA 2 2001

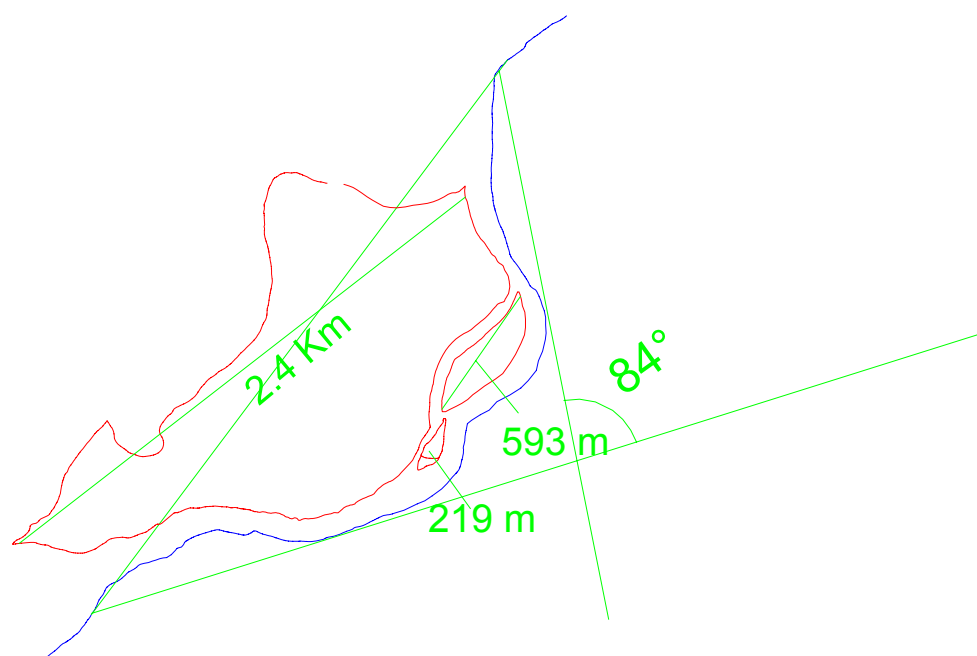
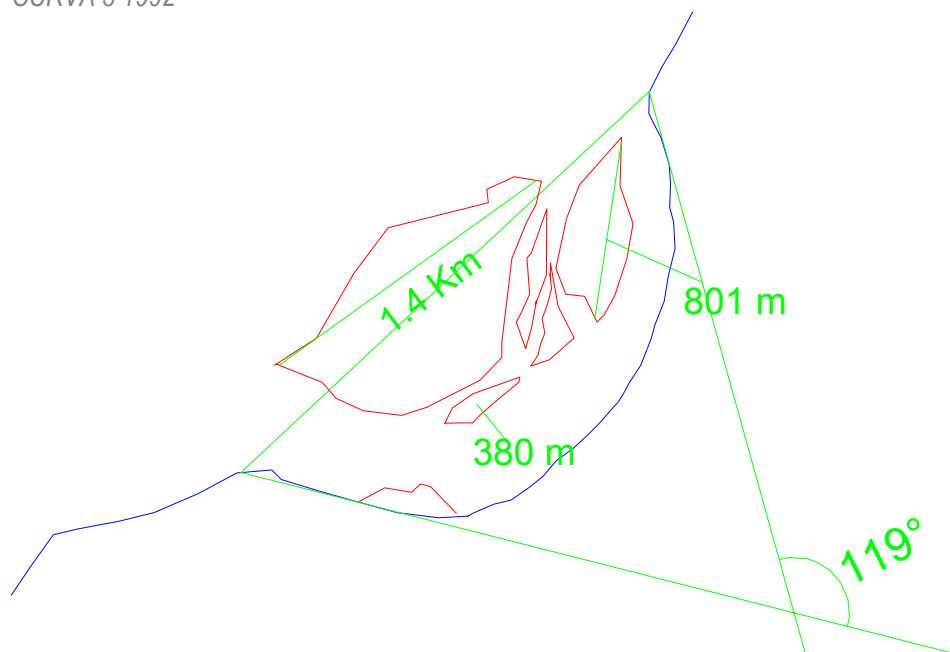


Figura 30. Comparación de la curva 2 para los años 1992 – 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media.

CURVA 3 1992



CURVA 3 1998

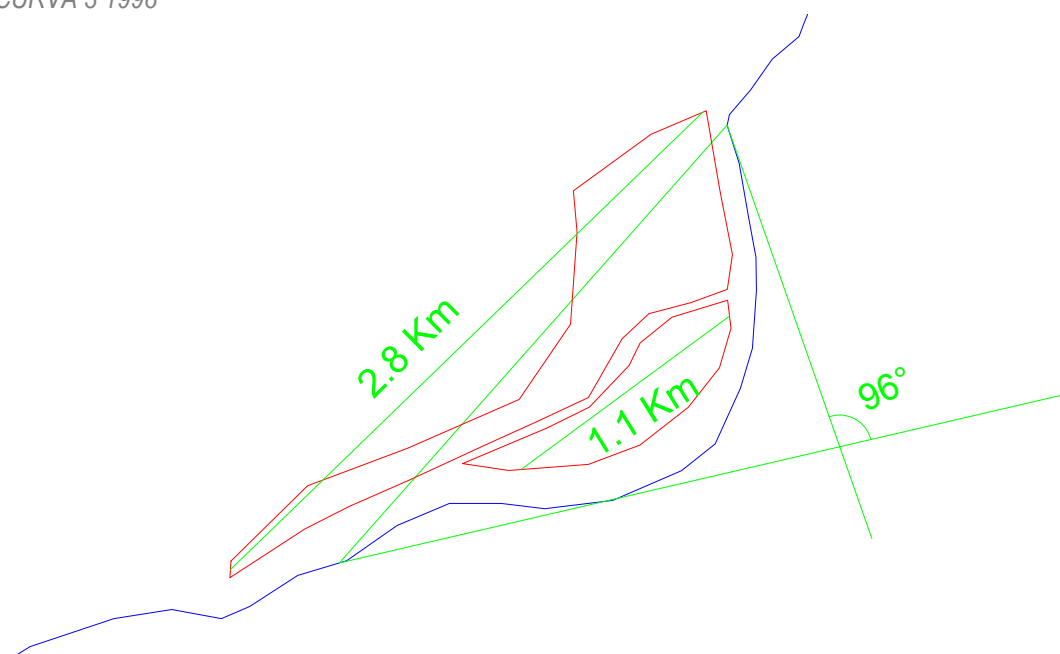


Figura 31. Comparación de la curva 3 para los años 1992 – 1998 con igual longitud pero diferente curvatura media.

CURVA 3 2001

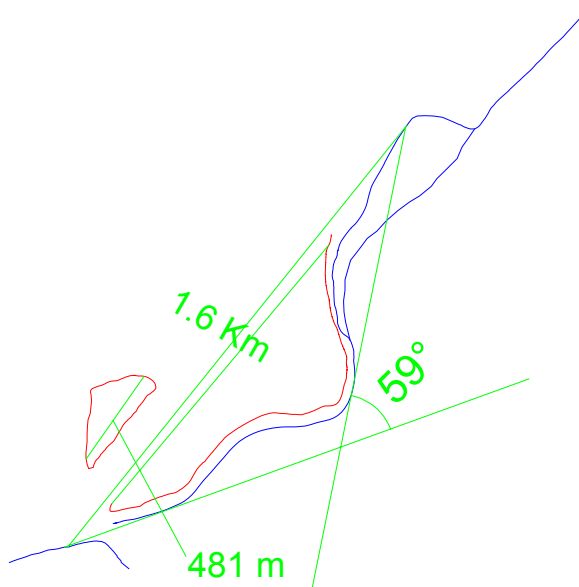
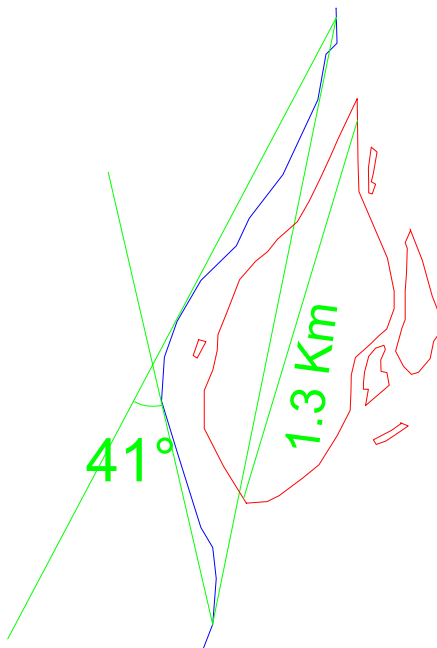


Figura 32. Comparación de la curva 3 para el año 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media.

CURVA 4 Caño Huila 1984



CURVA 4 Caño Huila 1998

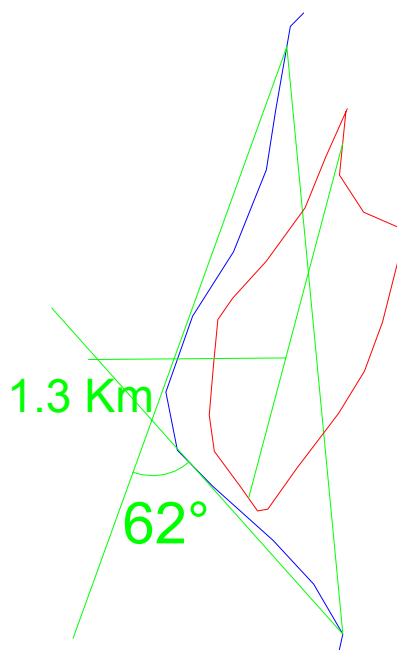


Figura 33. Comparación de la curva 4 para los años 1984 – 1998 con igual longitud pero diferente curvatura media.

CURVA 4 Caño Huila 2001

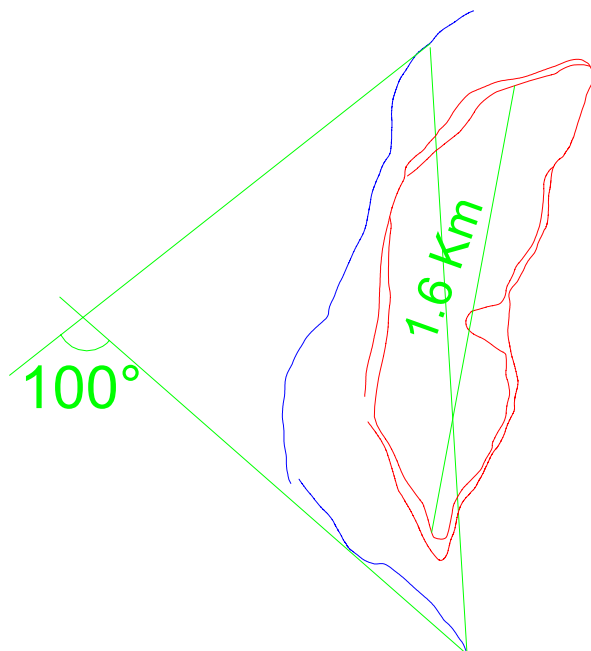


Figura 34. Comparación de la curva 4 para el año 2001 con igual longitud pero diferente curvatura media.

CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se ha llegado al término de éste trabajo son las siguientes:

- El desarrollo del presente trabajo sirve como referencia para suministrar información acerca de la morfología y dinámica del río Magdalena en el sector San Rafael de Chucurí – Carmelitas.
- El sector estudiado del río Magdalena presenta inestabilidad en la permanencia de su curso en los tramos confinados desde la ciénaga de Chucurí hasta el corregimiento de San Luis; las corrientes son de tipo sinuoso y se presenta migración de islas, barras, y playas de arenas generados por la divagación lateral alterna los cuales se conservan por la misma divagación de los canales dentro del cauce y por la depositación de los flujos de agua que inundan la planicie aluvial y el lecho mayor.
- El tramo presenta un marcado ensanchamiento del cauce y sedimentación antes de la Ciénaga y después del corregimiento de San Luis, se encuentran niveles del río entre 4.0m y 5.0m.
- Según el tamaño de las partículas existe una mayor capacidad de arrastre de material de fondo para partículas alrededor de 0.35mm de diámetro con 2330 Ton / día para el caudal de 3100 m.c.s y 2686 Ton / día para 3500 m.c.s. Para partículas de 0.71mm con 1609 Ton / día para 3100m.c.s y 2628.3 Ton / día para 3500mcs.
- El tratamiento del problema de erosión de orillas es un problema relacionado con la morfología y dinámica del río, por tanto los planes de adecuación y acondicionamiento del río en cuanto a profundidad y orientación del cauce deben hacerse partiendo desde el manejo de los aspectos que definen estas características (*profundidad y encauzamiento*) que es la dinámica fluvial y morfología, es decir, atacar el origen para poder ir modificando los efectos.

- En general el río muestra una gran dinámica fluvial, evidenciada por la migración y desarrollo de islas y barras acompañado de una corriente de tipo sinuosa, también presenta una subdivisión de la corriente en varios ramales que evolucionan según el principio de desplazamiento de las curvas de sus orillas con importantes erosiones de los terrenos mismos de las orillas.
- La margen izquierda presenta grandes cambios morfológicos, produce desbordamientos en aguas altas del río puesto que ésta orilla es más baja que la orilla derecha. La orilla derecha en las condiciones actuales no presenta buena estabilidad y ante una nueva acción dinámica fuerte del flujo podría presentar retrocesos importantes. La barra de sedimentación que se consolida en la margen izquierda hace concentrar el flujo sobre la margen derecha la cual se puede afectar en forma considerable ante un aumento de caudal por ser ésta menos resistente y su composición de sedimentos de baja consolidación.
- En el análisis del transporte de sedimentos debe tenerse en cuenta el aporte de sedimentos por parte de los afluentes que llegan al río Magdalena, de manera que éste aporte de sedimentos puede ser mayor a la capacidad de transporte total, presentándose una tendencia a la depositación .
- El anterior trabajo pretendió dar una explicación de los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta en un análisis morfológico y un estudio dinámico con miras a obtener información de orden natural para que con fruto de una modelación lleguen a ser las más efectivas y así conseguir la navegabilidad y respuesta adecuada del río en el diseño de obras requeridas.
- Este trabajo en ningún momento se constituye en un análisis definitivo ya que no existe una metodología específica para éste tipo de estudios.

RECOMENDACIONES

- Se debe realizar un análisis geotécnico detallado de la zona de orillas del río Magdalena en éste sector, con el fin de mejorar y dar seguridad a los futuros dimensionamientos y diseños de las obras de control que se proyecten.
- Teniendo en cuenta que los sitios que presentan dificultad para la navegación son producto o efecto de unas condiciones específicas que están directamente relacionadas con la morfología del cauce, lo más razonable es buscar introducir cambios en la morfología de tal manera que se propicien unas nuevas condiciones con efectos favorables para mejorar la navegabilidad del río. Resumiendo, es partir de la intervención en las causas (morfología) para cambiar los efectos (profundidad) .
- Es conveniente controlar la migración de la orilla derecha puesto que podría aumentar a lo largo de la zona de estudio, se puede controlar mediante la construcción de obras de protección o modificando la morfología para que la presión ejercida por el flujo tenga menor agresividad sobre ésta orilla.
- Debe ser conveniente realizar estudios detallados más puntuales a lo largo del sector que tenga en cuenta todos los aspectos técnicos actuales y condiciones futuras con el objeto de definir las obras y tomar las medidas más adecuadas para efectuar la recuperación o protección de las orillas que formen un cauce menos variable.

BIBLIOGRAFÍA

1. BAEZ ALVAREZ, Ruth Yolima. Estudio de las condiciones de navegación en el río Magdalena para el sector Las Carmelitas – Galán. tesis 2001.
2. CENTRO INTERAMERICANO DE FOTOINTERPRETACIÓN. Informe Acerca de la Evolución Reciente del Río Magdalena, Sector Purificación. Septiembre 1983.
3. INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI. Diccionario Geográfico de Colombia. tercera edición 1996.
4. -----, Estabilización del canal navegable sector Barrancabermeja San Pablo.
5. -----, Revista CIAF Vol. 10 No.1. 1985.
6. LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRÁULICOS. Caracterización Hidrosedimentológica. Informe Final 2000.
7. -----, Geología y Geomorfología del Río Magdalena sector Puerto Salgar – La Gloria. Informe Cormagdalena (CM 049). Diciembre 2000.
8. -----, Informe de Hidrosedimentología 12. 2000.
9. -----, Obras de estabilización de la orilla en el sector de la ciénaga de Chucurí. Informe Final. Marzo 2002.
10. -----, Programa TRANSED. Estimación de tasas de Transporte de Sedimentos.
11. LELIAVSKY, Serge. An Introduction to Fluvials Hydraulics. Dover Publications. 1966

12. LEOPOLD, L. Gordon, M. Fluvial Processes in Geomorphology. Dover. 1992 .
13. MARTÍN, Vide Juan P. Ingeniería Fluvial. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.(Agosto. 1996.
14. PETERSEN, Margaret. River Engineering. USA : Prentice Hall, 1986.
15. TIFFANY, J. B. Review of Research on Channel Stabilization of the Mississippi River, U.S Army, Corps of Engineers, Technical Reports 2, 1963.
16. [http:// www.pg-consultores.com/pg/pg1es.htm](http://www.pg-consultores.com/pg/pg1es.htm)
17. [http:// www.edicionsupc.es/virtuals/caplln/ECO1302X.htm](http://www.edicionsupc.es/virtuals/caplln/ECO1302X.htm)
18. [http:// www.geocities.com/eureka/company/7709/cauces.htm](http://www.geocities.com/eureka/company/7709/cauces.htm) Web Ing. Gustavo Adolfo Silva Medina
19. <http://www.miliarium.com/proyectos/RestauracionAmbiental/varios/principiosbasicos.asp>