

# Navegabilidad del Río Magdalena y Río Meta

## *Condiciones hidromorfodinámicas y Retos*



**Humberto Avila, PhD**

Director

Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA

Universidad del Norte

2016

# IDEHA

Instituto de Estudios  
Hidráulicos y Ambientales



- 30 años de experiencia
- Profesionales de planta y contratistas (PhD, MSc)
- Profesionales en formación de Maestría y Doctorado
- Equipos, Software y Conocimiento

**Pregrado  
(Semillero)**



**Maestría**



**Doctorado**

# Introducción

- Exponer condiciones hidromorfodinámicas características de los ríos Magdalena y Meta en Colombia y algunos retos y necesidades por investigar.
- La mayor parte de los trabajos presentados han sido realizados por el Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA de la Universidad del Norte

## Proyectos destacados del IDEHA en Ingeniería y Navegación en ríos de Colombia

Río Magdalena K0 – K120  
**(2014 – Actual).** Gob. Atlántico,  
Colciencias, Uninorte

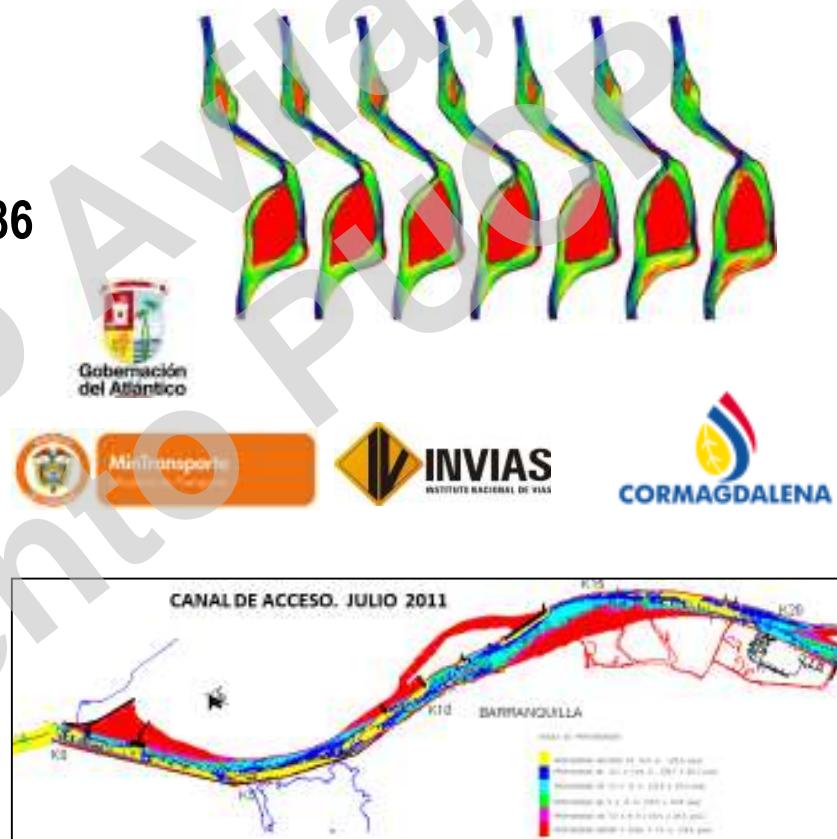
Río Magdalena y Canal de Acceso **(1986 – 2014).** CORMAGDALENA

Canal del Dique **(1986 – 2012)**  
CORMAGDALENA

Río Cauca **(2012)** .180 Km INVIAS

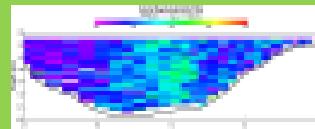
Río Meta **(2013)**. 800 Km INVIAS

Plan Maestro Fluvial – Diagnóstico  
DNP **(2014)**



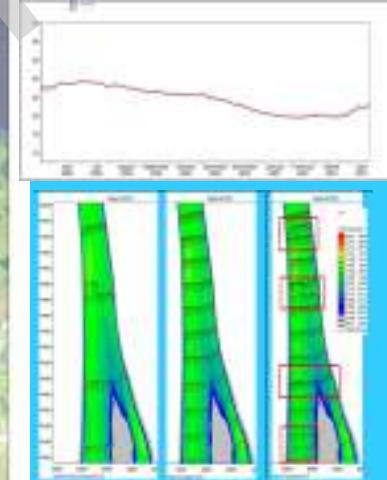
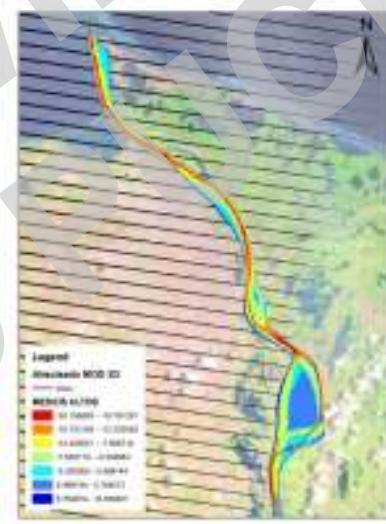
# Enfoque IDEHA: Modelación numérica robusta

## Mediciones de campo



- Comportamiento y evolución real del río
- Base para la calibración y validación de modelos numéricos

## Modelación numérica



- Condiciones hidromorfodinámicas pasadas, actuales y futuras
- Requiere calibración y validación con mediciones de campo

## Cuencas para análisis de transporte fluvial



Ríos Principales	Longitud total (km)	Longitud navegable (km)	Navegación mayor permanente (km)
<b>Intendencia del Magdalena</b>			
Magdalena	1.550	1.092	631
Cauca	1.024	818	184
Canal del Dique	117	117	117
San Jorge	400	193	110
Sinú	340	270	pasajeros
<b>Total cuenca</b>	<b>4.258</b>	<b>2.770</b>	<b>1.188</b>
<b>Intendencia del Atrato</b>			
Atrato	720	560	508
San Juan	410	350	63
Baudó	180	150	80
León	135	50	50
<b>Total cuenca</b>	<b>4.435</b>	<b>3.077</b>	<b>1.175</b>
<b>Intendencia del Orinoco</b>			
Orinoco	290	163	127
Meta	865	866	800
Arauca	440	296	296
Guaviare	947	947	774
Inírida	919	448	30
Vichada	668	580	149
<b>Total cuenca</b>	<b>8.897</b>	<b>6.736</b>	<b>1.955</b>
<b>Intendencia del Amazonas</b>			
Amazonas	116	116	116
Putumayo	1.717	1.600	1.272
Vaupés	1.000	660	600
Orteguaza		149	
Caquetá	1.360	1.200	857
Cauca		360	
Apaporis		370	
Patía	450	350	250
Mira		150	
<b>Total cuenca</b>	<b>7.135</b>	<b>5.636</b>	<b>2.245</b>
<b>Total País</b>	<b>24.725</b>	<b>18.225</b>	<b>7.063</b>

# Integración de Infraestructura Regional Suramericana IIRSA (2000)



## CONEXIÓN PACIFICO - ATLANTICO



# Orientar la navegabilidad fluvial

## DESARROLLO AUTÓNOMO DE RÍOS



Hidrología



Geología/Geomorfología



Hidráulica/Hidrodinámica



Sedimentología



Morfodinámica



Criterios de diseño

# ENFOQUE DE INVESTIGACIONES

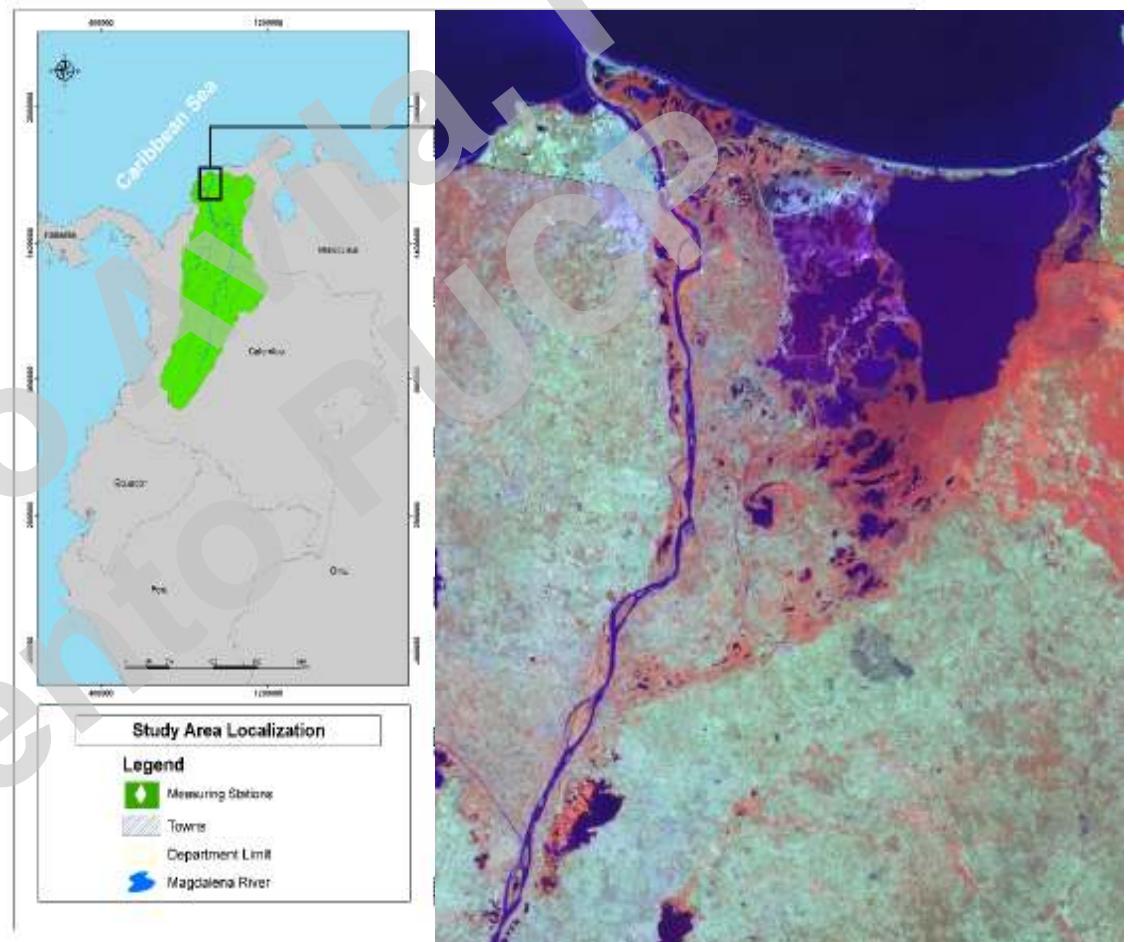
- Diseño de hidrovías orientado al desarrollo autónomo de ríos: obras flexibles y dragados inteligentes.
- Diseño de hidrovías orientado a obras rígidas y dragados de mantenimiento.
- Criterios de diseño híbridos
- Diseños eficientes Beneficio/Costo

# RIO MAGDALENA

Humberto M. Villa, PhD.  
Evento PUCP

# Área de estudio

- **Localización:** Conecta el centro del país con la costa Caribe.
- **Área de Cuenca:** 257,440Km<sup>2</sup>
- **Longitud Total:** 1550Km
- **Sectores de estudio:** 115 Km



# Casos de estudio: río Magdalena y río Meta



## Río Magdalena

Conecta el Centro y Norte de Colombia

**Área de la cuenca:** 257,440 km<sup>2</sup>

**Longitud total:** 1,550 km

**Desemboca:** Mar Caribe

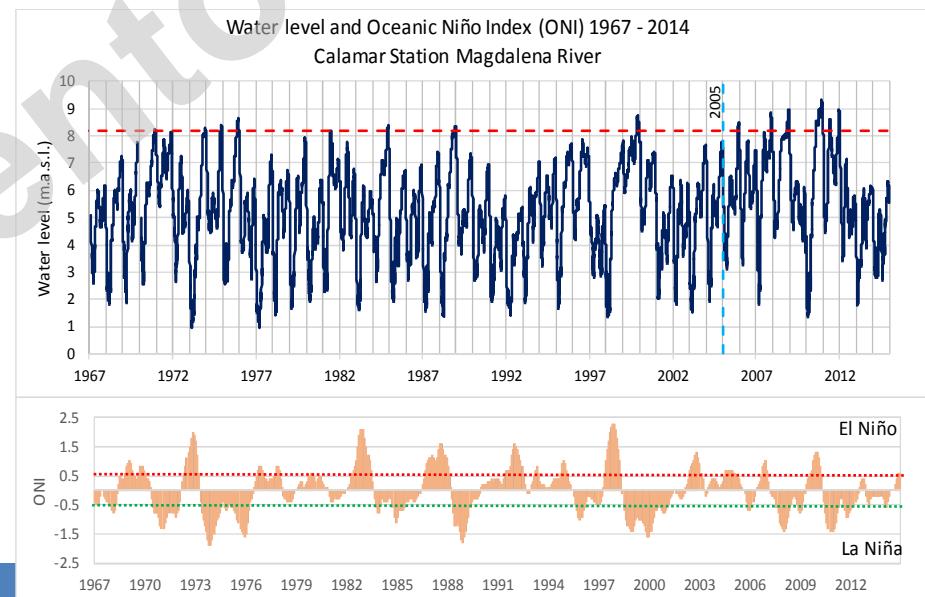
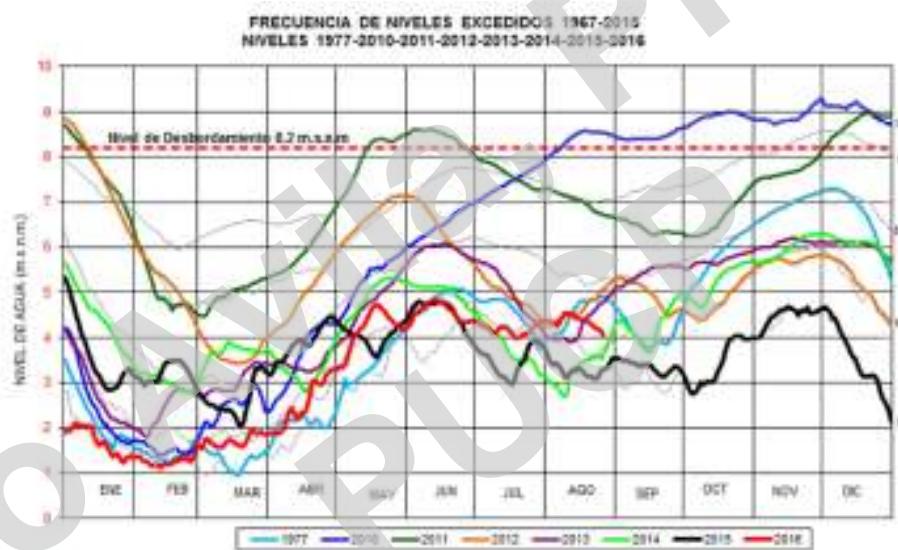
Cuenca ocupa el 24% del territorio donde vive el 80% de la población y se genera el 85% del PIB Nacional

Moviliza el 50% de la carga fluvial nacional (2 millones toneladas / año)

Sin embargo, eso equivale solo al 1% de la carga nacional total.

# Hidrología

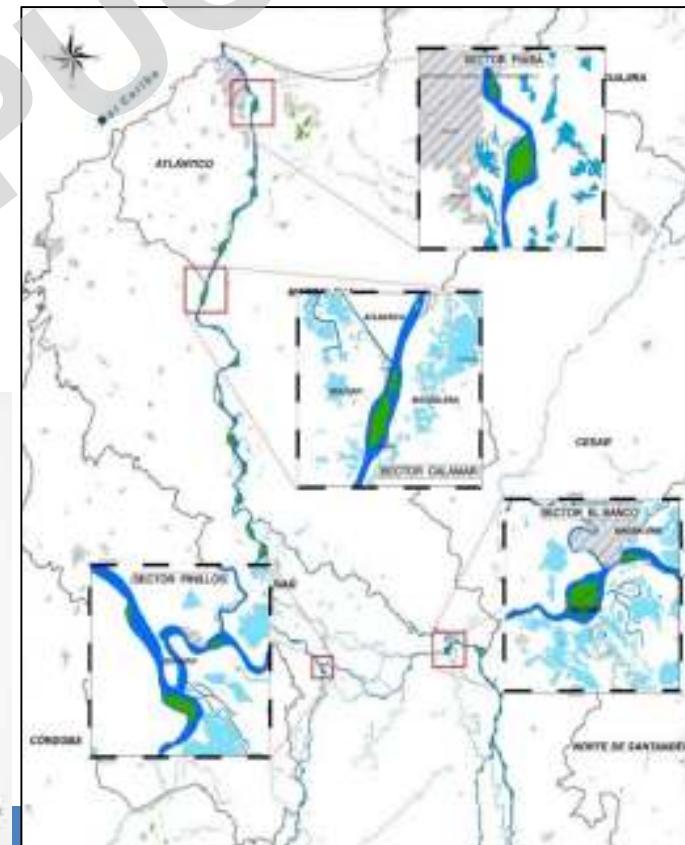
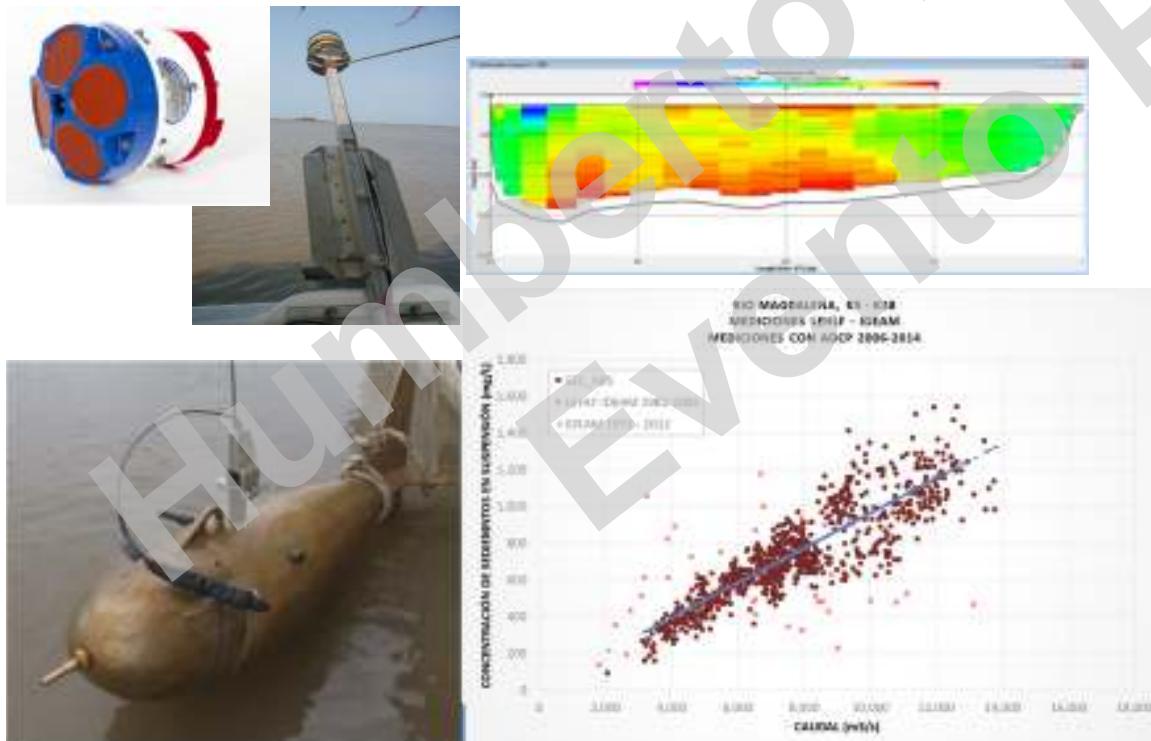
- Hidrograma Bimodal
- $Q_{\text{Min}}: 2,100 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{Avg}}: 7,050 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{Max}}: 18,300 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{SST}} = 135 - 200 \text{ MII ton/año}$
- $D_{50-\text{BED}} = 250 \mu\text{m}$

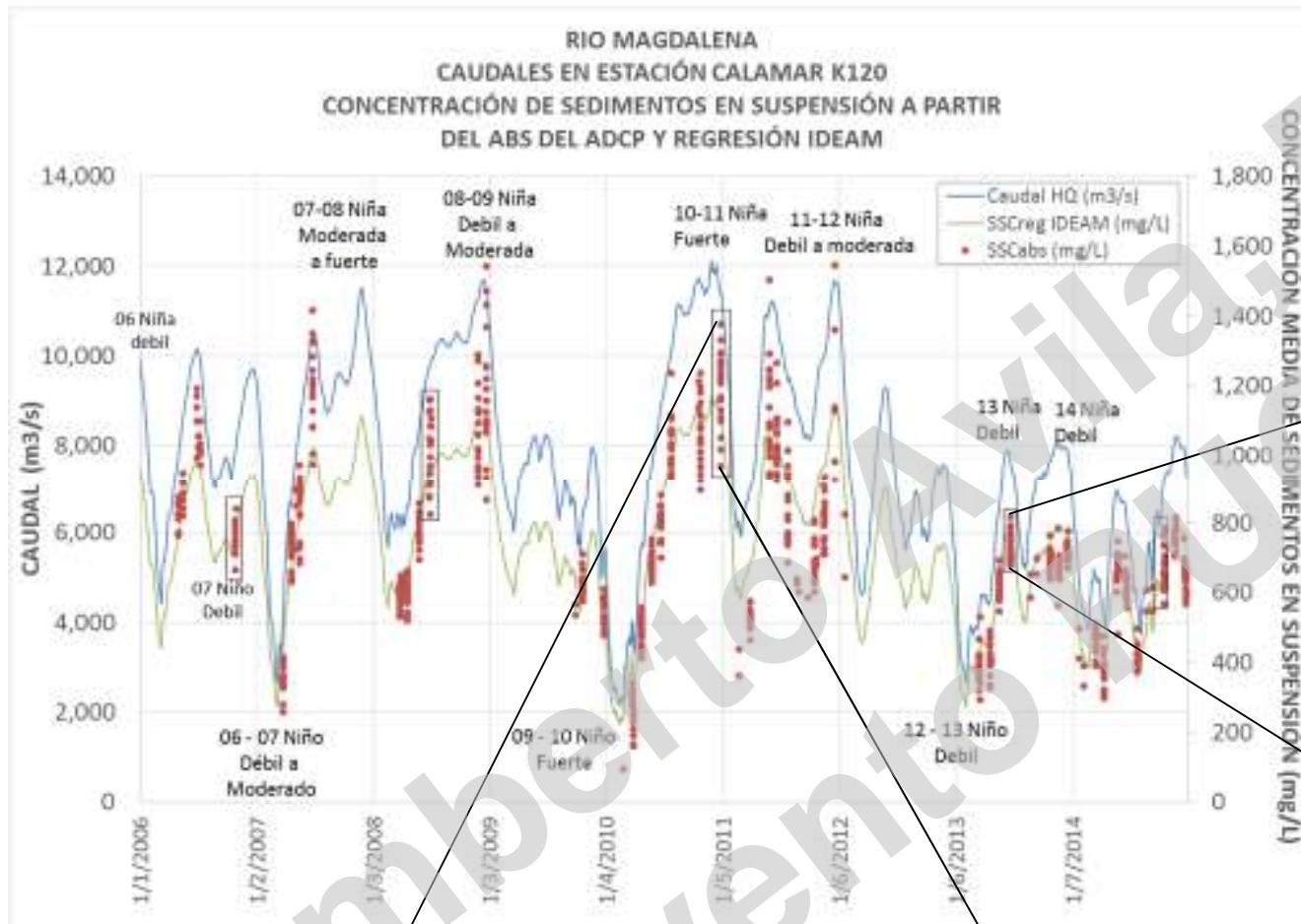


# Transporte de Sedimento

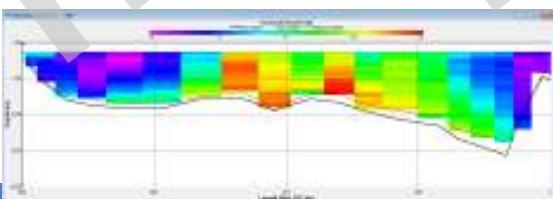
El transporte total de sedimento en suspensión en el río Magdalena se estimó entre **135 Mill Ton/año** (Avila&Amaris, 2016) y **198 Mill Ton/año** (Diaz&Avila, 2014)

La concentración media oscila entre **535 mg/L** (Avila&Amaris, 2016) y **732 mg/L** (Diaz&Avila, 2014).

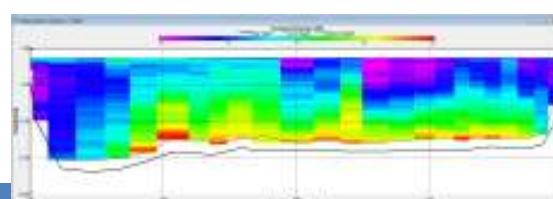




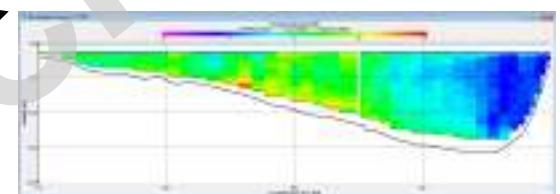
Sección K13 → 29 Dic 2010 →  $Q = 11.281 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\text{ABS} = 96.92 \text{ dB} \rightarrow \text{SSC} = 1.375 \text{ mg/L}$   
 $Qst = 1'340.458 \text{ Ton/día}$



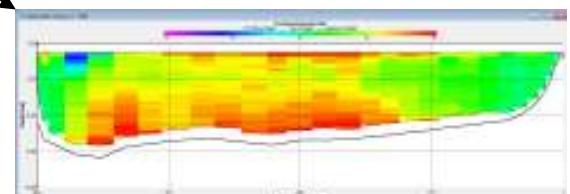
Sección K19 → 29 Dic 2010 →  $Q = 12.226 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\text{ABS} = 93.35 \text{ dB} \rightarrow \text{SSC} = 969 \text{ mg/L}$   
 $Qst = 1'023.548 \text{ Ton/día}$



Sección K16 → 25 Jun 2013 →  $Q = 7.910 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\text{ABS} = 91.60 \text{ dB} \rightarrow \text{SSC} = 816 \text{ mg/L}$   
 $Qst = 557.764 \text{ Ton/día}$



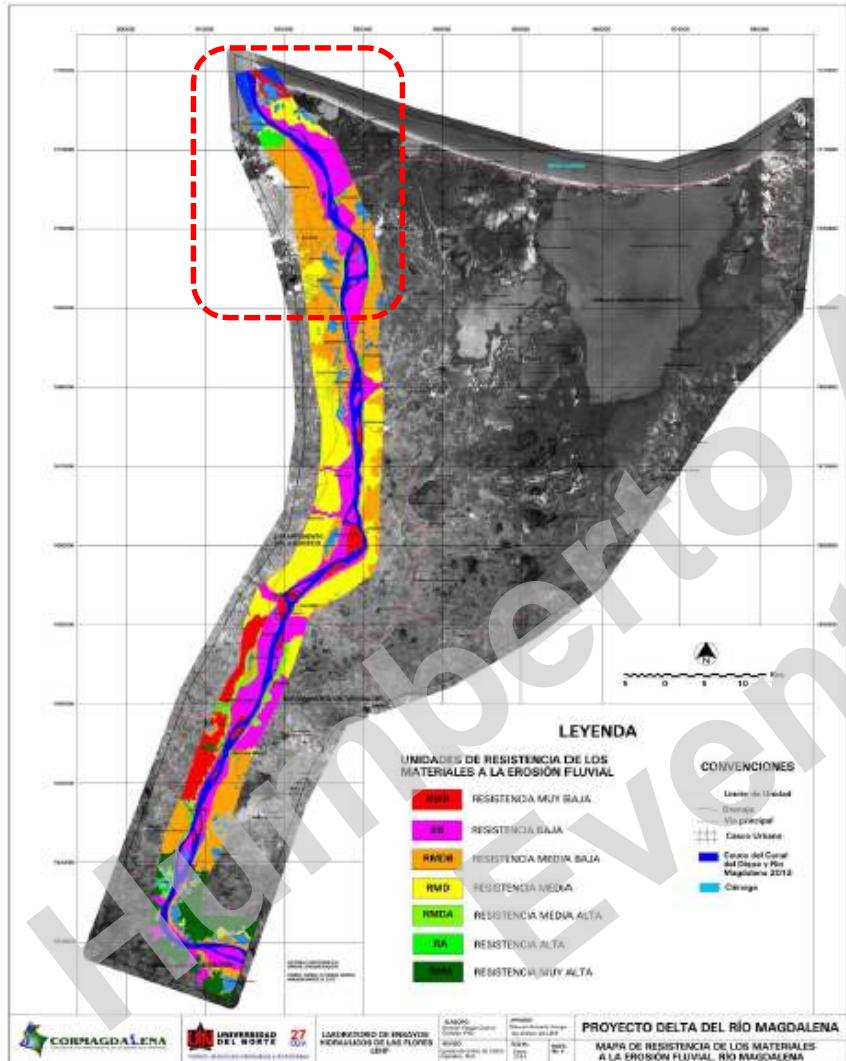
Sección K11 → 25 Jun 2013 →  $Q = 7.248 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\text{ABS} = 89.90 \text{ dB} \rightarrow \text{SSC} = 684 \text{ mg/L}$   
 $Qst = 428.363 \text{ Ton/día}$



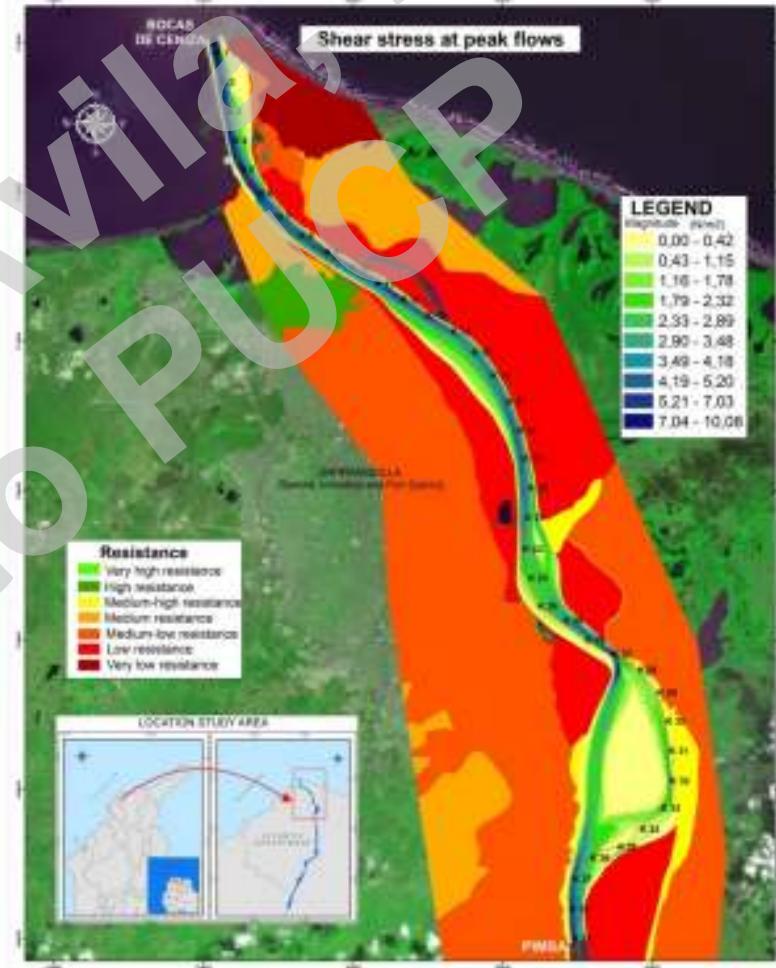
Uninorte, Diaz, Avila (2015)

# Geología/Geomorfología

Río Magdalena



Uninorte, Vargas, G. (2014)

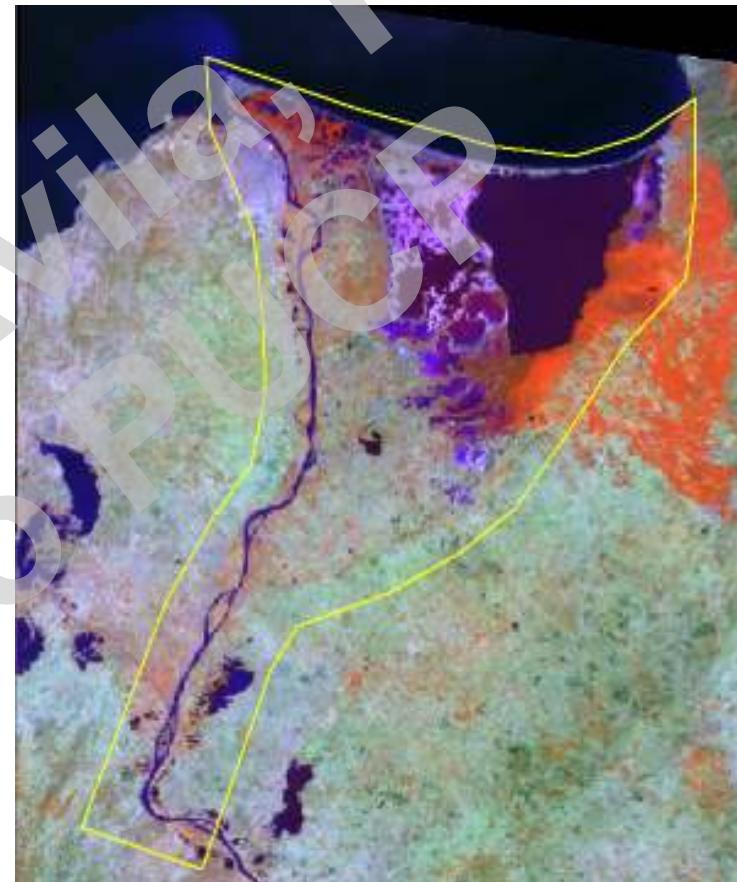


Uninorte, Avila, Acuña, Vargas. (2015)

# Delta del río Magdalena con El Niño y La Niña



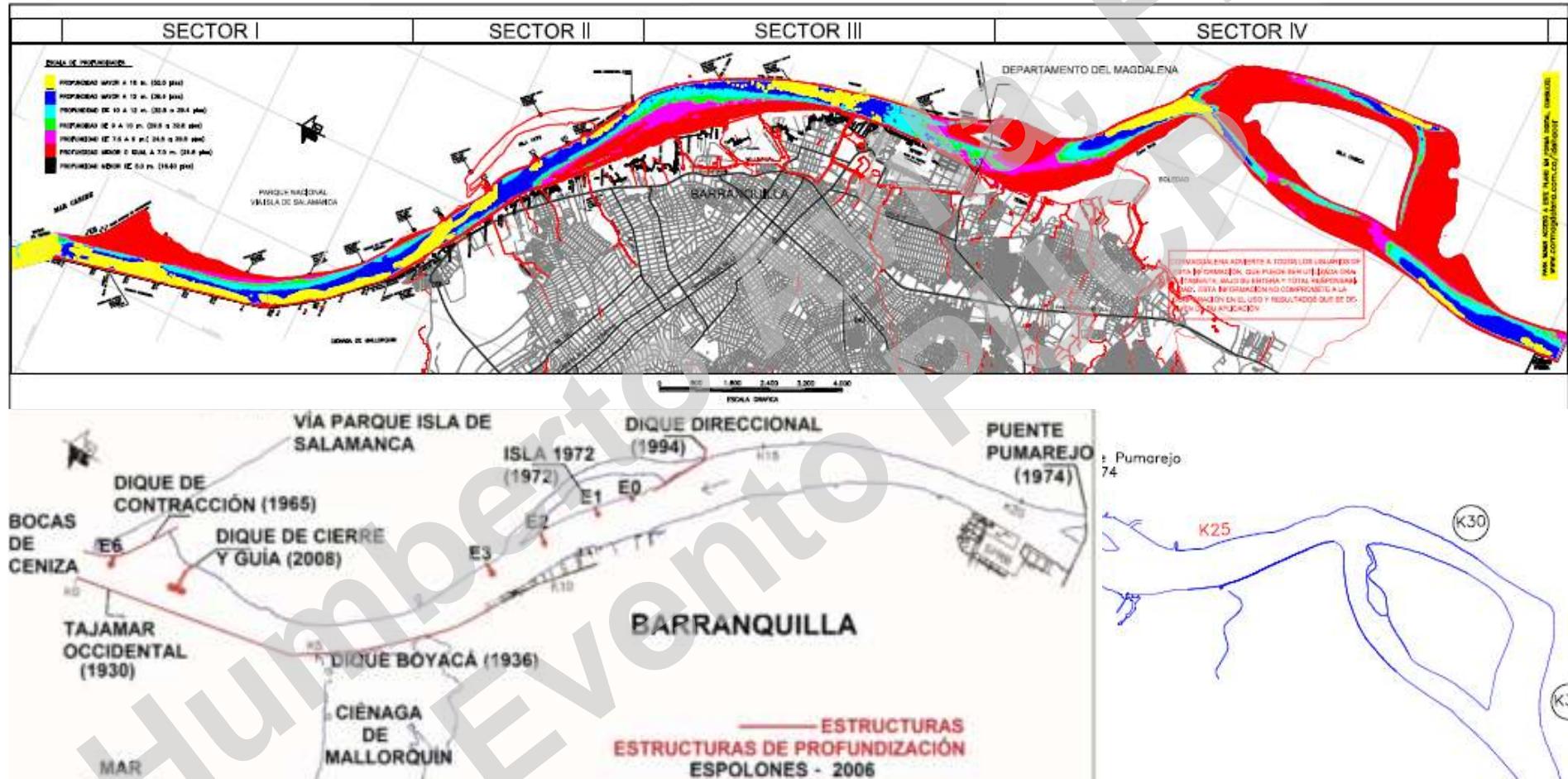
Landsat TM de 1984  
“La Niña”



Landsat TM de 1998  
“El Niño”

Fuente: Cormagdalena, Uninorte, Germán Vargas (2014)

# CANAL DE ACCESO PUERTO DE BARRANQUILLA (1938 - 2015)



Profundidad de diseño:

- 12.20m (40ft) entre K0 (Bocas de Ceniza) y – K22 (Puente Pumarejo)
- 2.13m (7ft) entre K22 (Puente Pumarejo) y Calamar (K115)

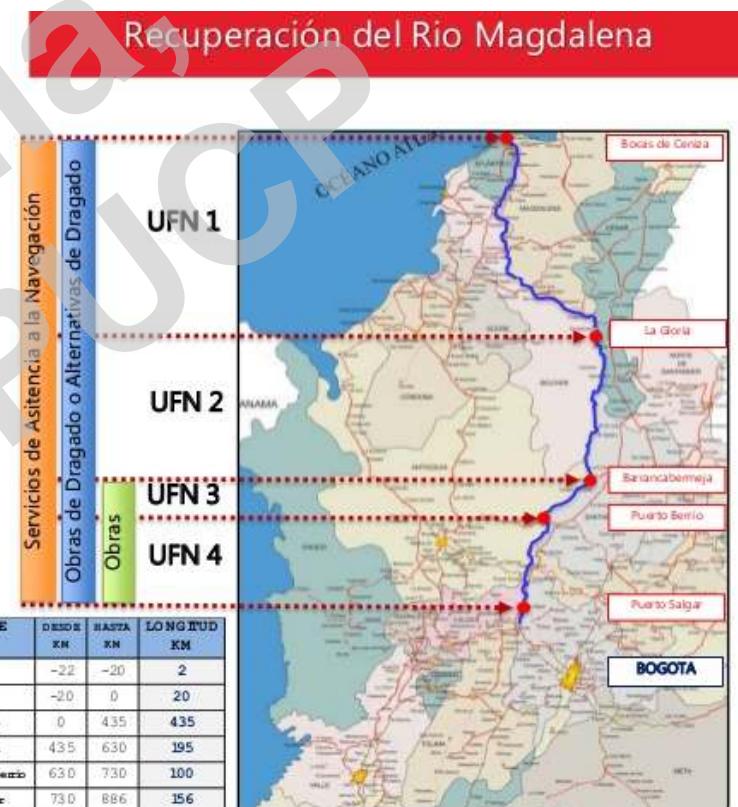
Fuente: Plan Maestro Portuario (Rotterdam Maritime Group, 2012)

# Proyecto de recuperación de Navegabilidad



## El Proyecto

Cuatro  
Unidades  
Funcionales de  
Navegación en  
906 Km



Fuente: Navelena

Fuente: La República

# Plan Maestro Portuario

## Objetivos:

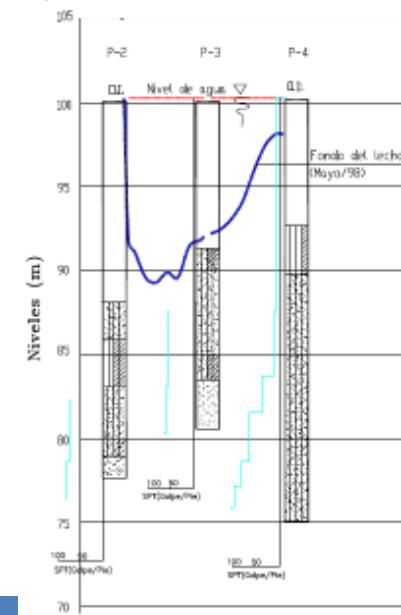
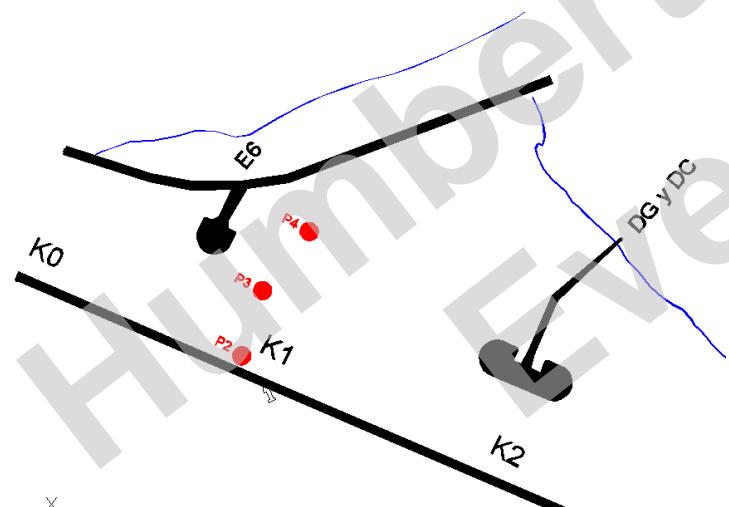
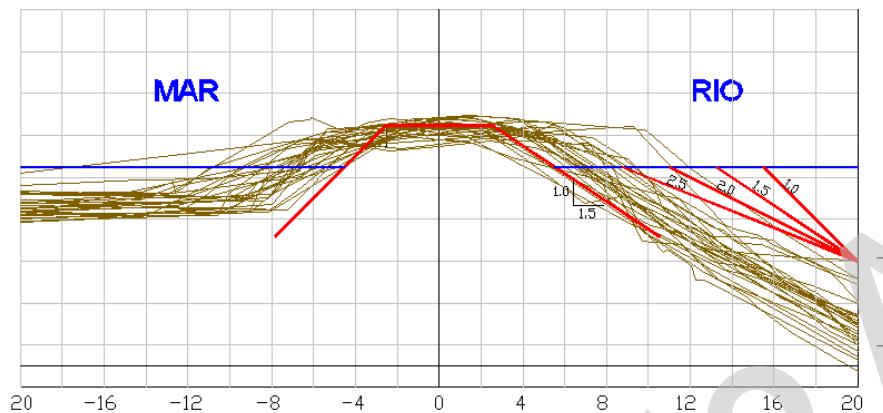
- Proveer suficiente profundidad
  - Super Port: 19m
  - Outer Port: 14m
  - Inner Port: 12.2m
- Conectividad dentro de la región

Phase	Years	Cargo mobilization (mton/year)	port capacity (mton/year)
1	2012-2013	8.5	16.1
2	2013-2015	15.2	33.1
3	2015-2018	39.1	81.2
4	2018-2023	66.3	92.1
5	2023-2030	96.9	123.5

## Trabajos propuesto



# Retos: Reforzamiento de estructuras

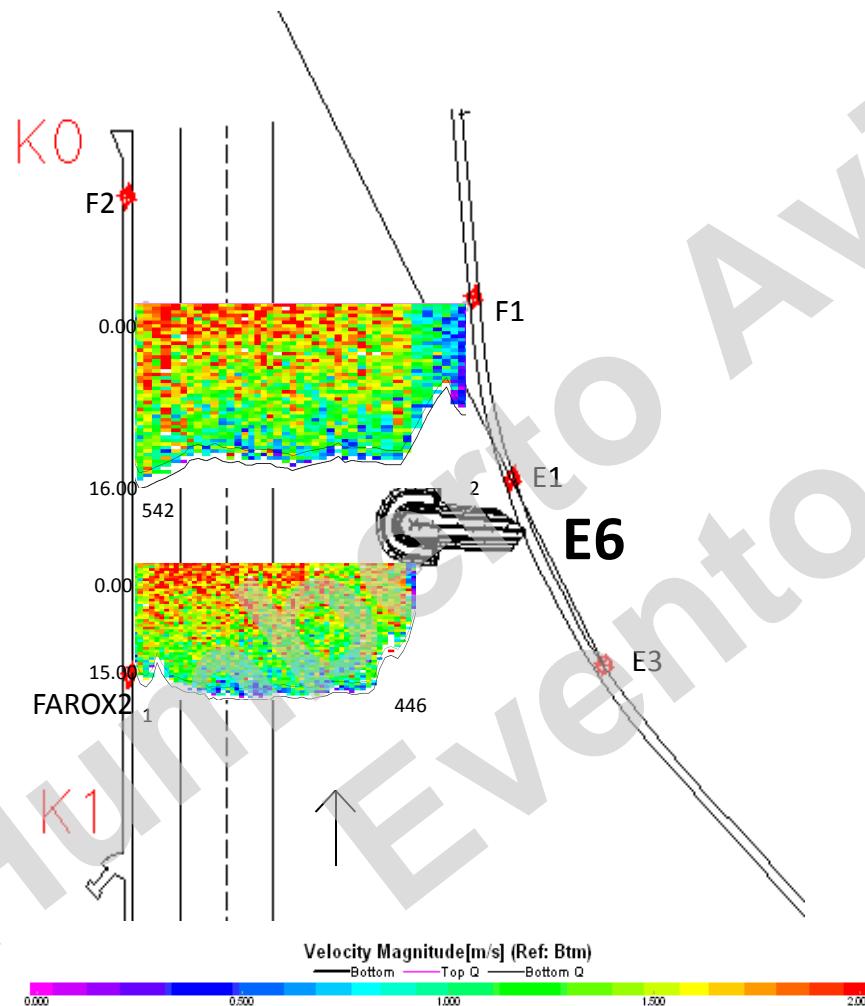


## CONVENCIONES :

- P-5 ● PERFORACIONES REALIZADAS
- ARENA
- LIMO
- ARCILLA
- SPT RESISTENCIA A LA PENETRACION ESTANDAR

Fuente: Cormagdalena – Uninorte- Bateman Ingeniería

# Retos: Manejo de hidrodinámica en condiciones máximas

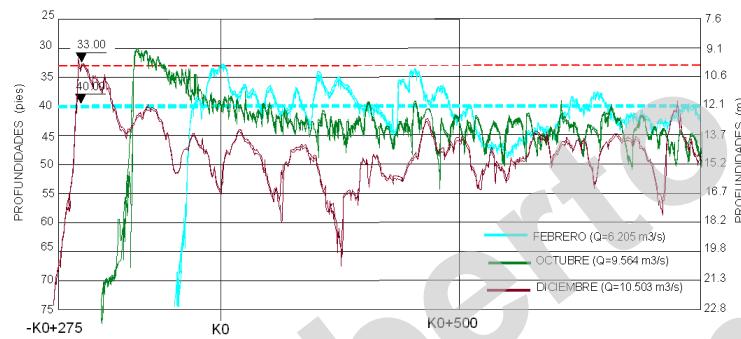


Mayo 27, 2008  
 $Q=7,788 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $V_{\text{avg}} = 2 \text{ m/s}$

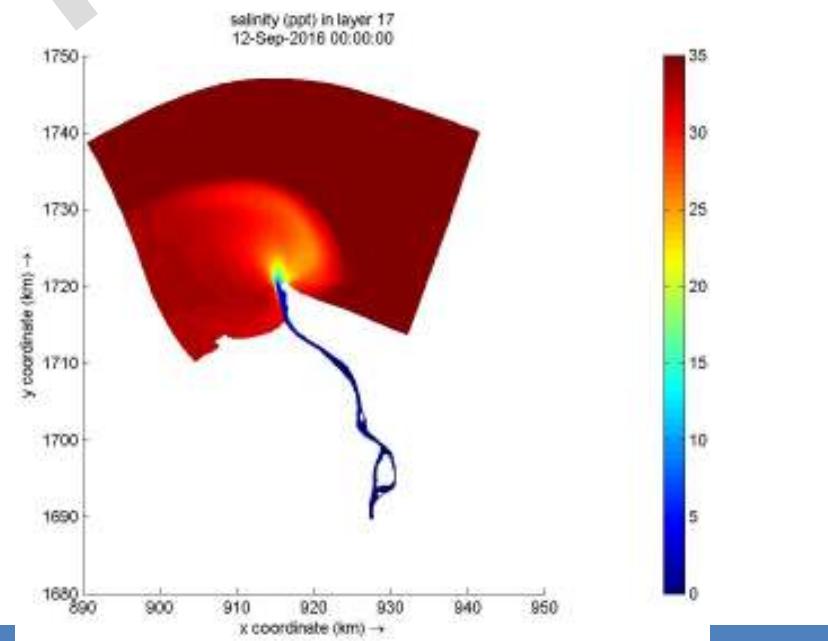
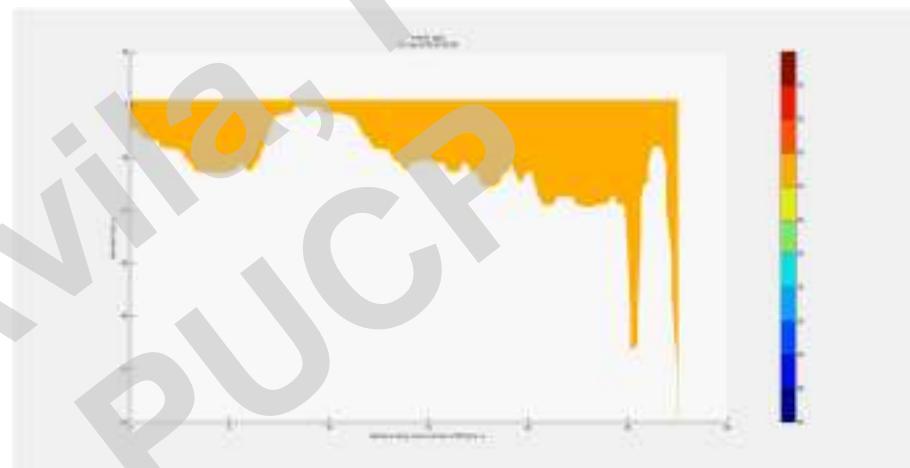
Diciembre 20 2010  
 $Q=15,000 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $V_{\text{avg}} = 3 \text{ m/s}$

# Retos: Efectos de la cuña salina

Condiciones hidrosedimentológicas y morfológicas de operación el sector de Bocas de Ceniza: fluvial y marino



IDEHA-Uninorte, 2014 - 2016

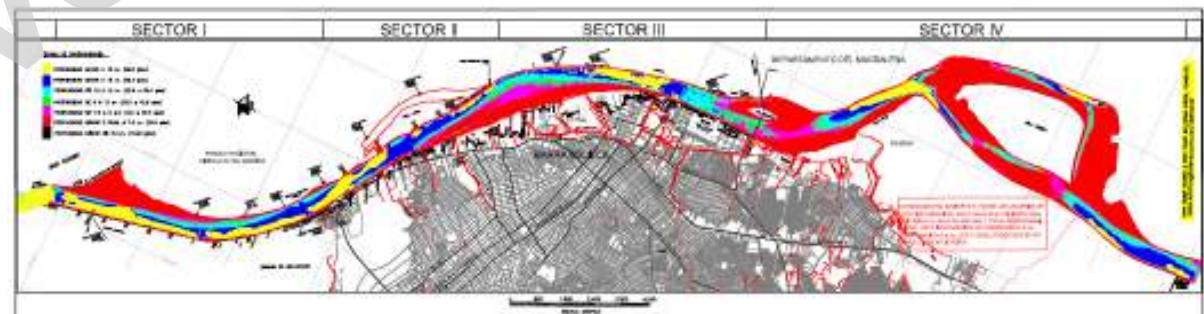


# Retos: Propuesta de ampliación de profundidad

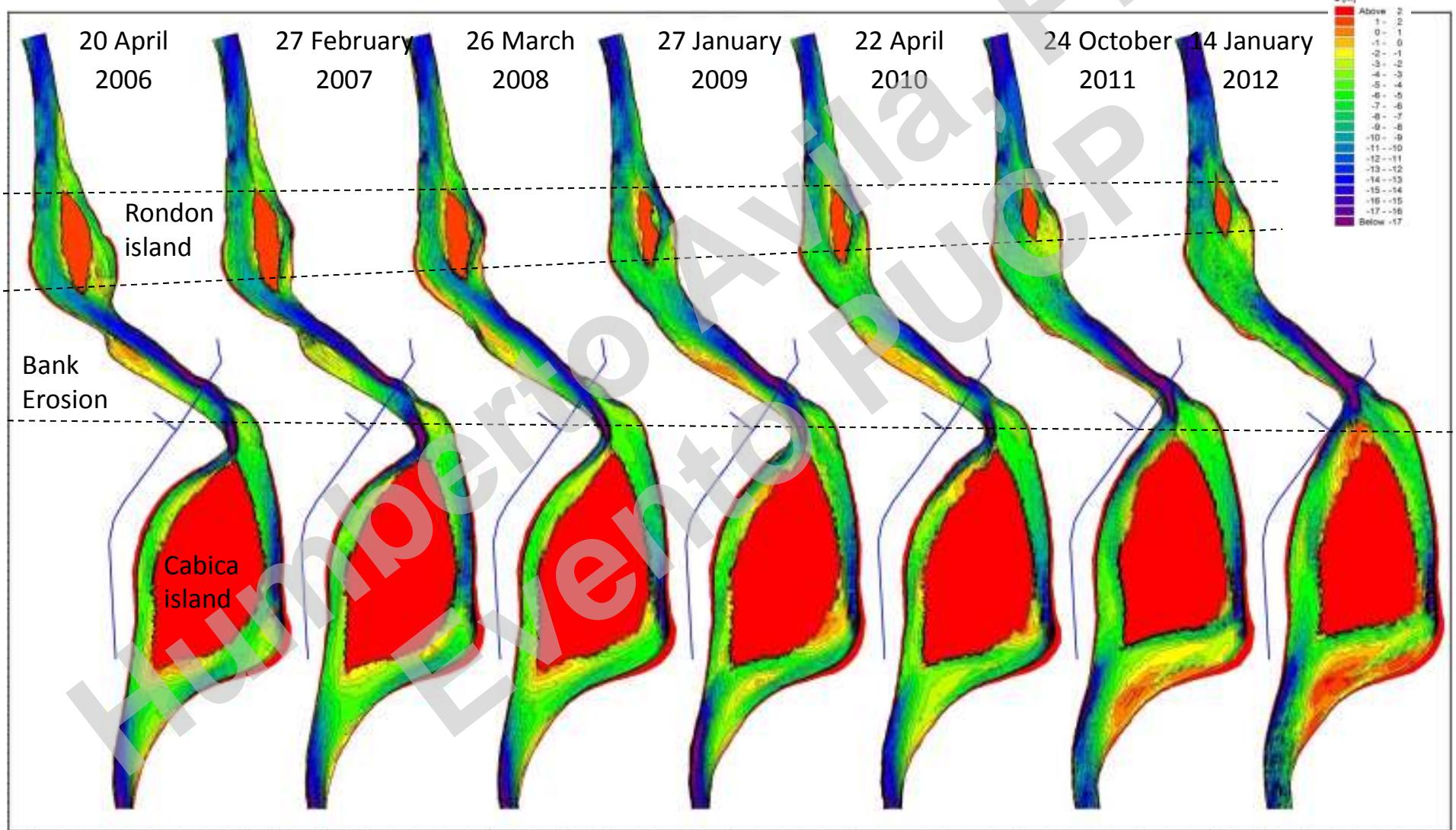
- Ampliación de calado para embarcaciones de mayor capacidad.
- Evaluar límite máximo de profundización: estructural, hidráulico, cuña salina, operacional
- Evaluar relación beneficio/costo



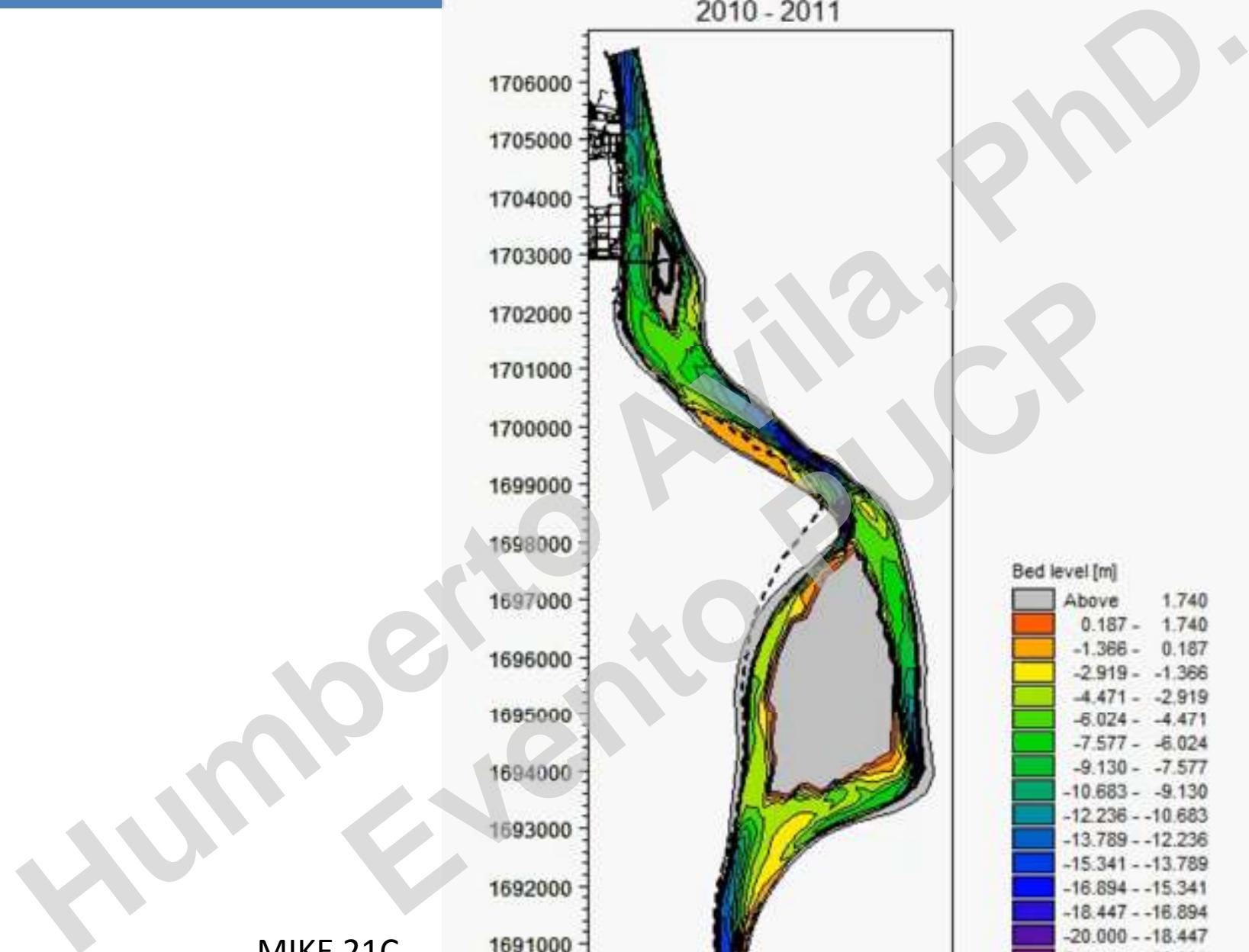
Fuente: stevensmaritime.com



# Retos: Erosión fluvial en sector K22 – K38



IDEHA-Uninorte: 2013



MIKE 21C

**RIO META**

Humberto Villa, PhD.  
Evento PUCP

# Casos de estudio: río Meta



## Río Meta

Conecta el Centro y Este de Colombia

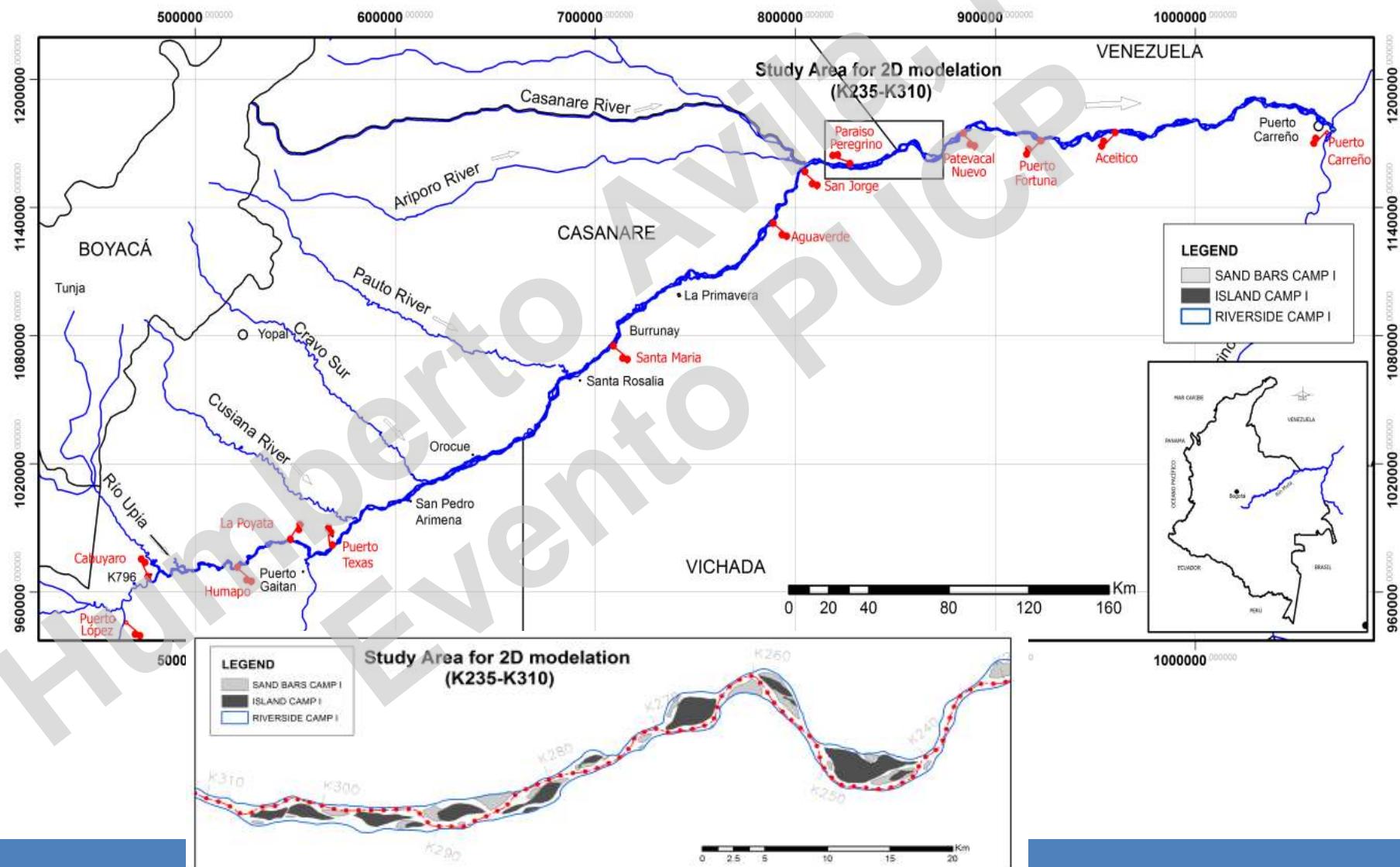
**Área de la cuenca:** 99,500 km<sup>2</sup>

**Longitud total:** 1,002 km

**Desemboca:** río Orinoco

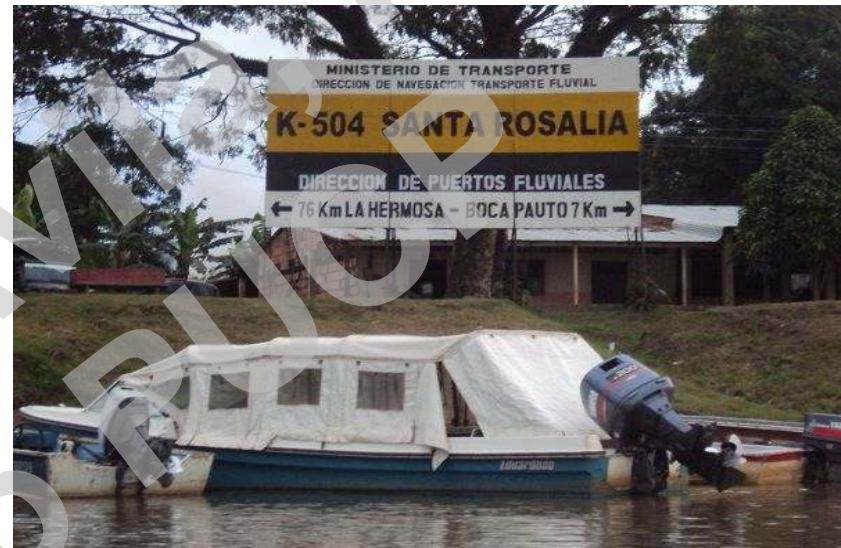
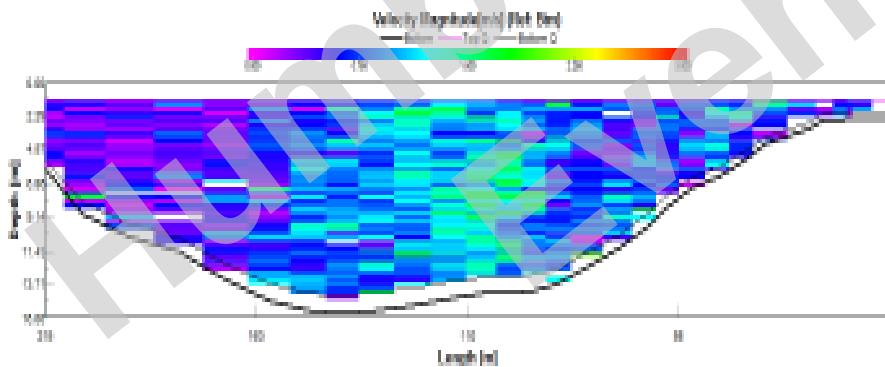
**Condición estratégica económica por su conexión con el río Orinoco**

# Sector de estudio



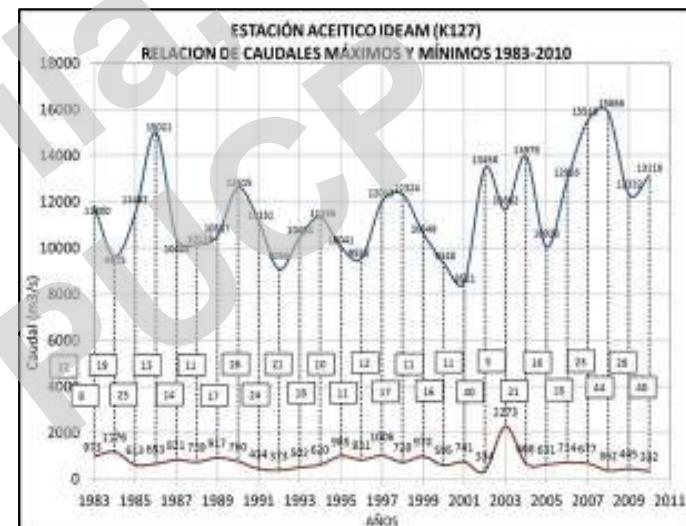
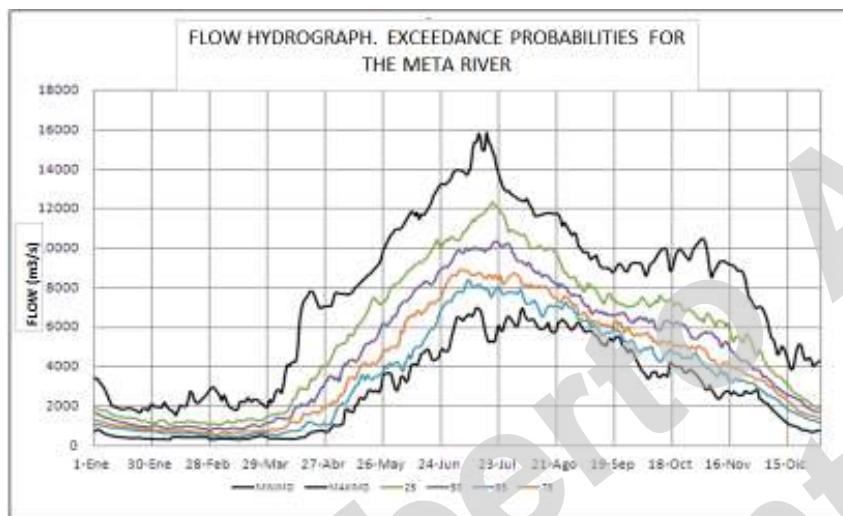
# Trabajo de campo y procesamiento

- Rectificación Georreferenciación y Nivelación de red de estaciones
- Batimetrías
- Mediciones de velocidad y caudal con (ADCP)
- Levantamiento de orillas
- Mediciones de sedimento
- Reconocimiento de campo



# Hidrología

- Río Meta

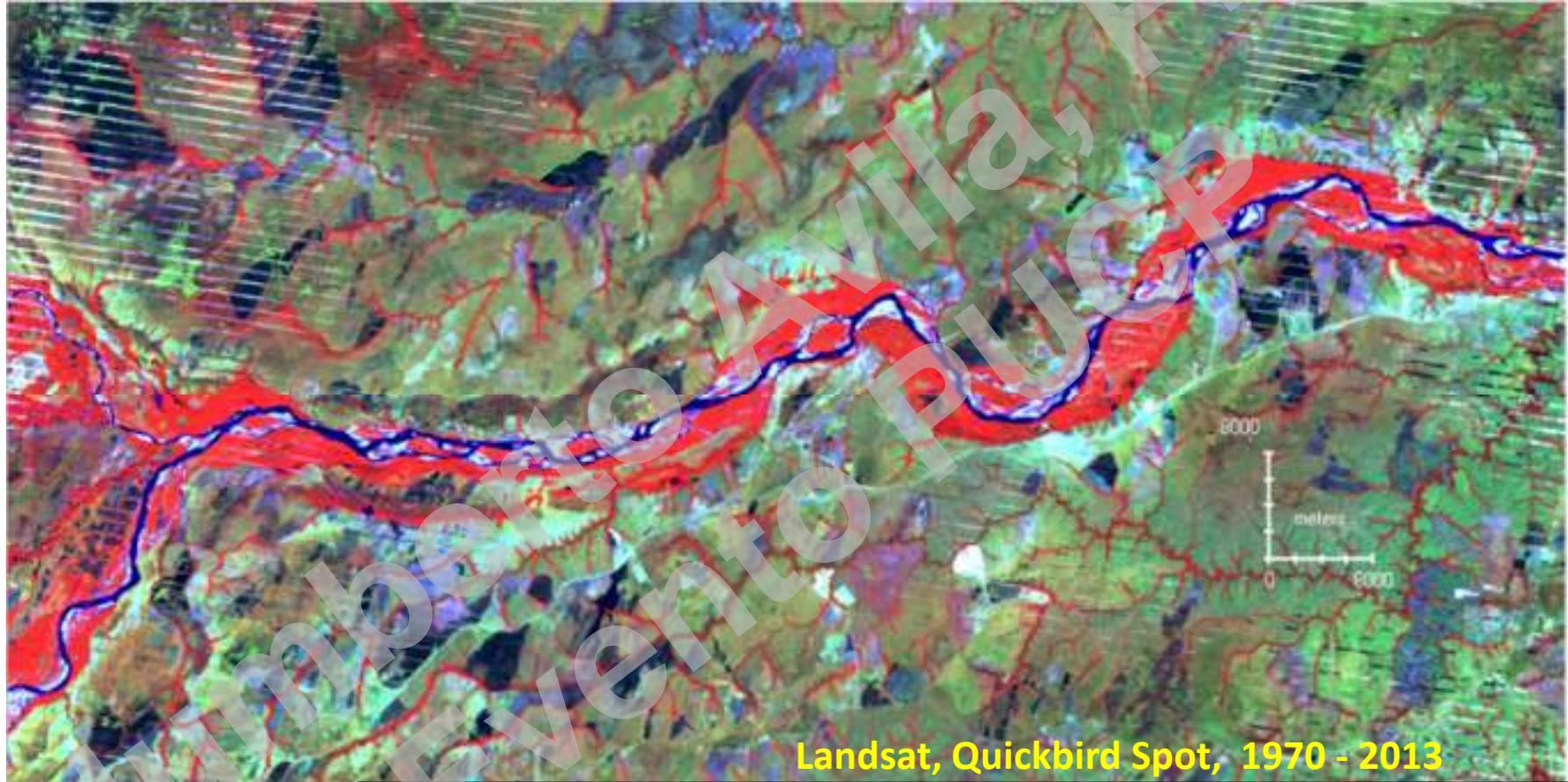


- Hidrograma Unimodal
- $Q_{\text{Min}}: 300 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{Avg}}: 5,500 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{Max}}: 15,800 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{SST}} = 40 \text{ MII ton/año}$
- $D_{50-\text{BED}} = 350 \mu\text{m}$

Río Meta:  
 $5 < Q_{\text{Max}}/Q_{\text{Min}} < 10$

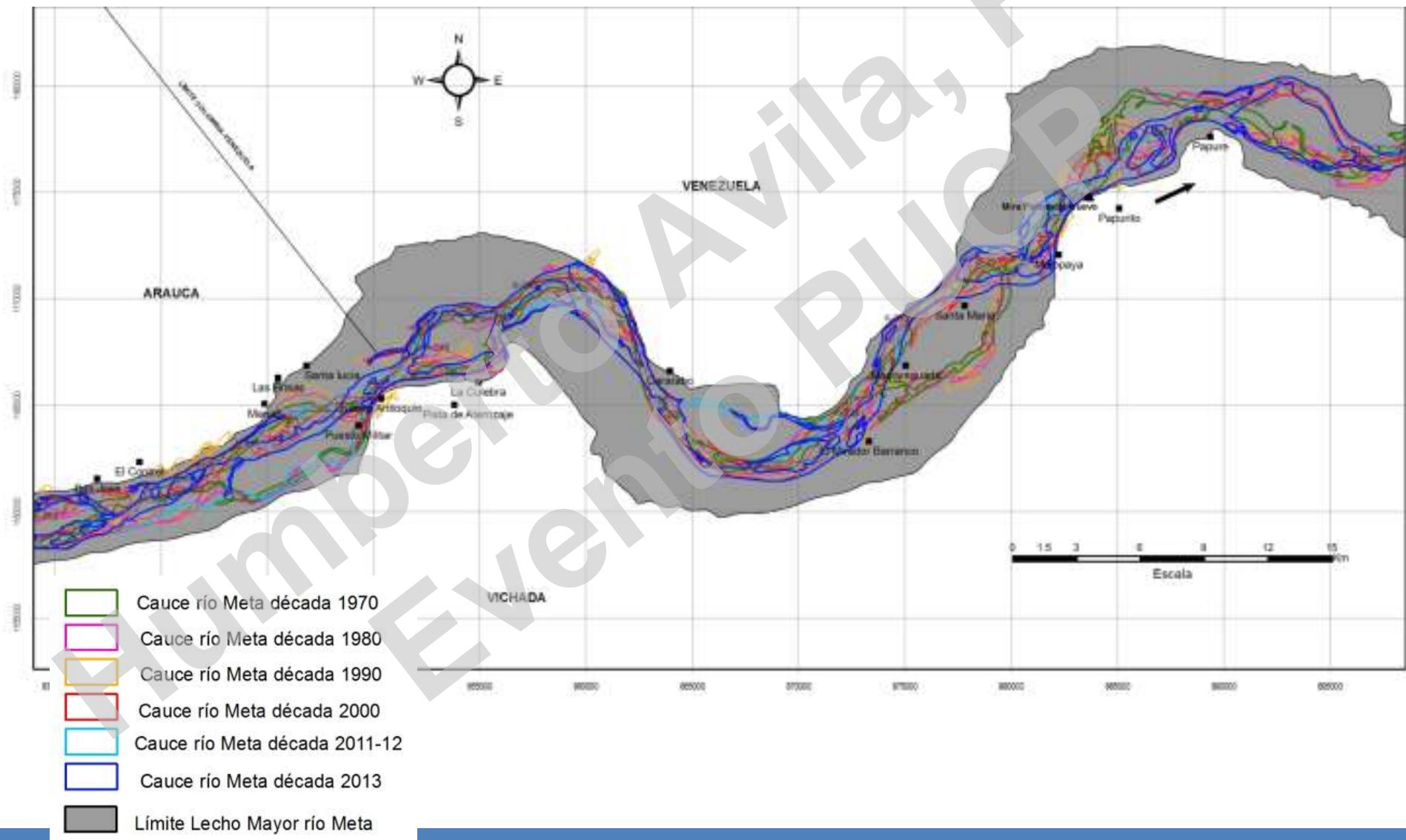
Río Magdalena:  
 $Q_{\text{Max}}/Q_{\text{Min}} < 10$

# Geomorfología



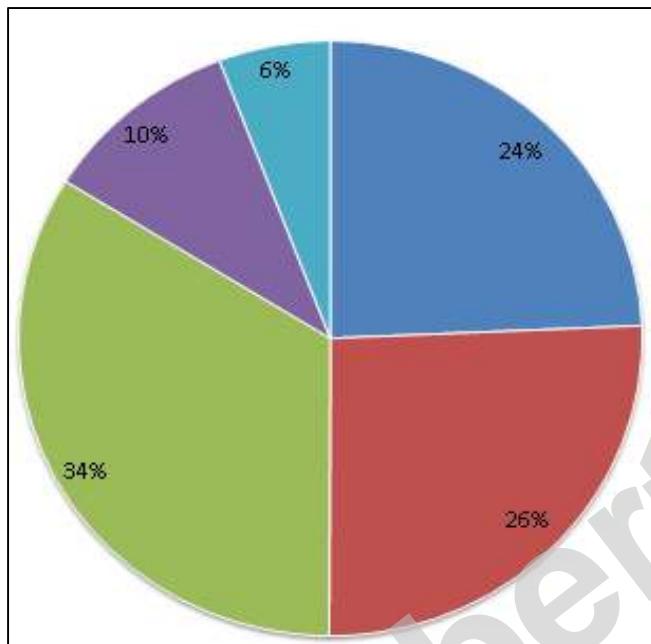
SECCIÓN	ANCHO (m)
CAUCE ACTIVO/LECHO MOBIL	Hasta 2,700
LECHO MAYOR	Hasta 9,000

# Evolución multitemporal de orillas

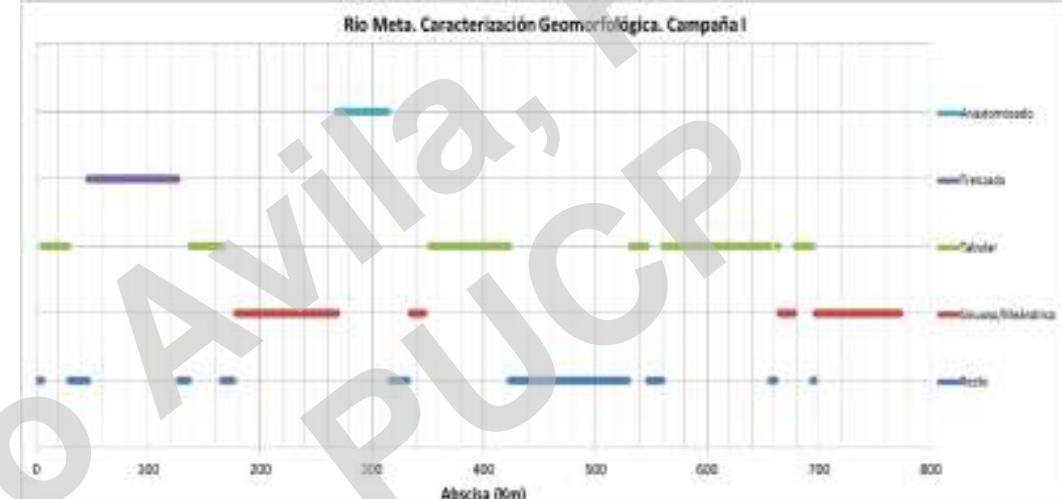


# Morfología

Río Meta



- Recto
- Sinuoso/Meandriforme
- Tabular
- Trenzado
- Anastomosado



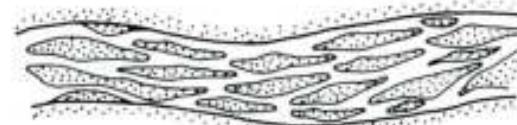
Caracterización Geomorfológica del río Meta entre el K0 - K773

RECTILÍNEO



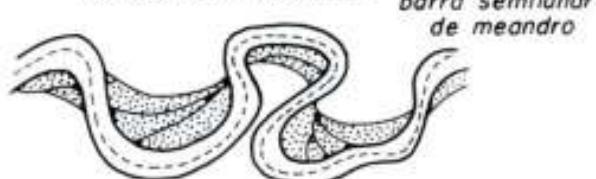
barras marginales

BRAÍDED Y/O ANASTOMOSADOS



múltiples de baja sinuosidad

MEANDRIFORME



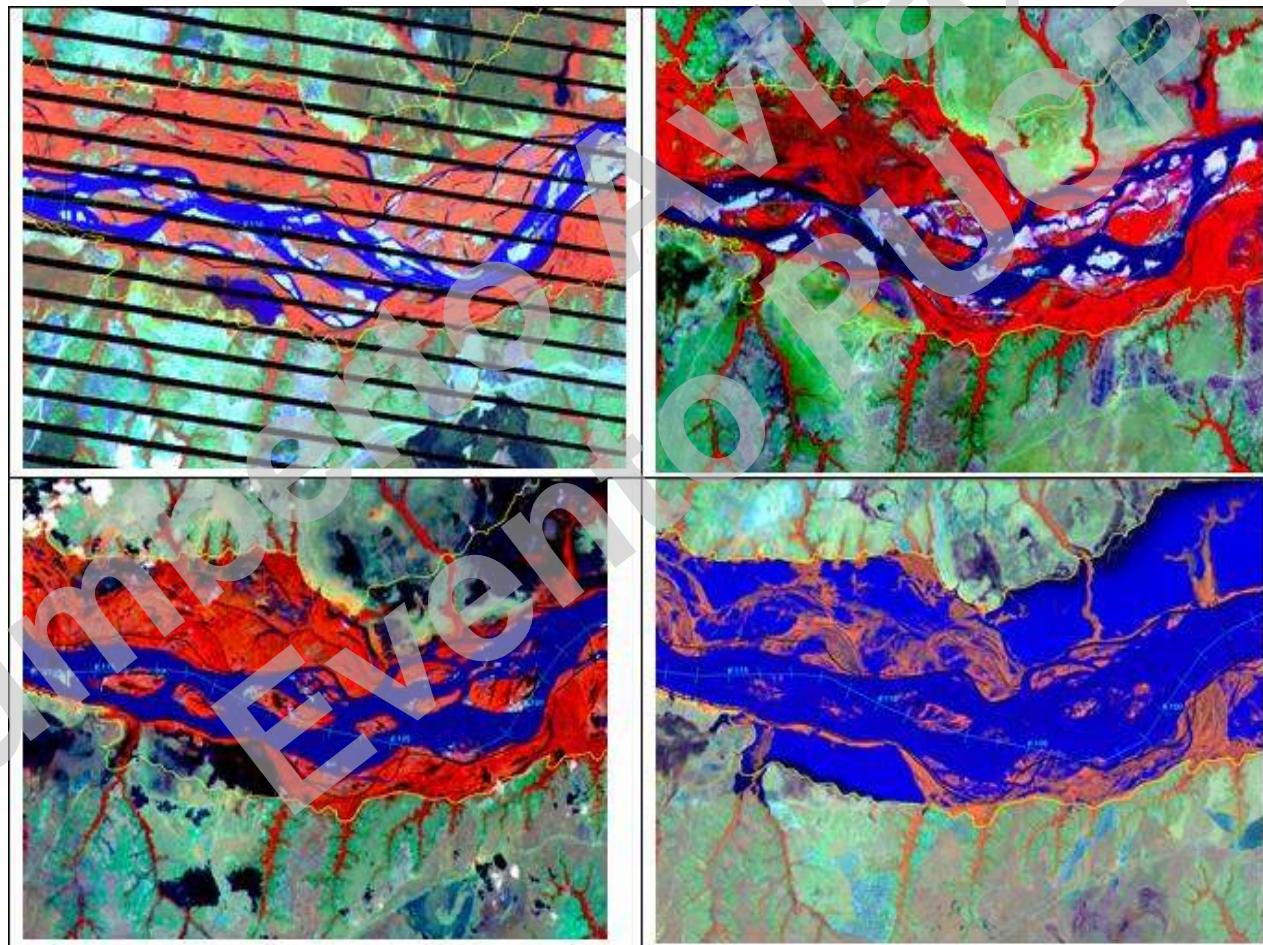
barra semilunar de meandro



múltiples de alta sinuosidad

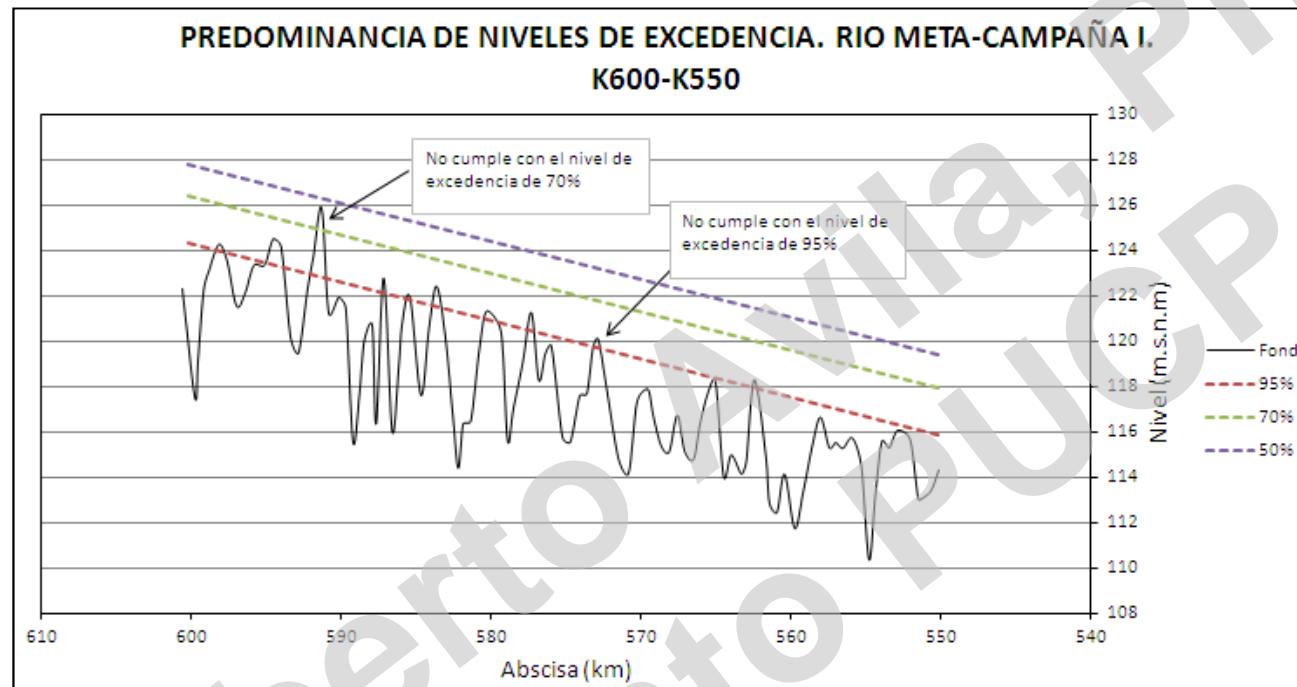
# Hidrología/Geomorfología

Aguas bajas, medias, altas y aguas extremas

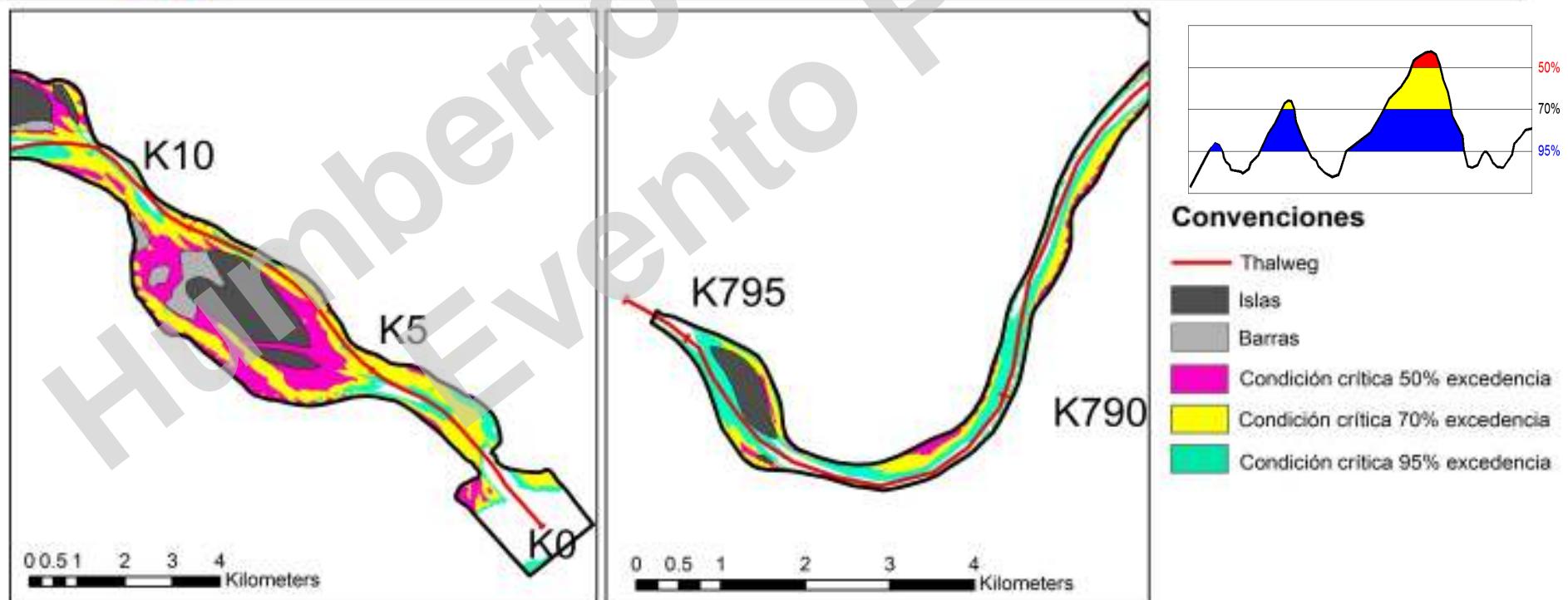
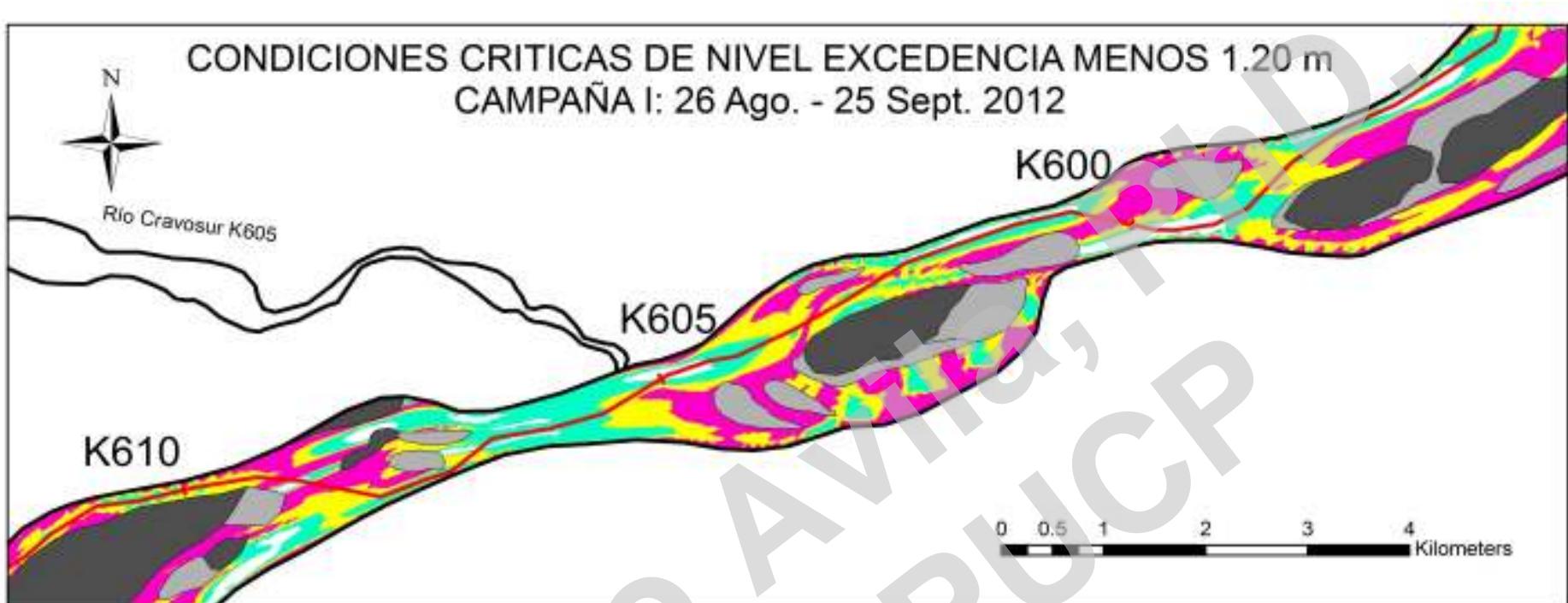


Río Meta

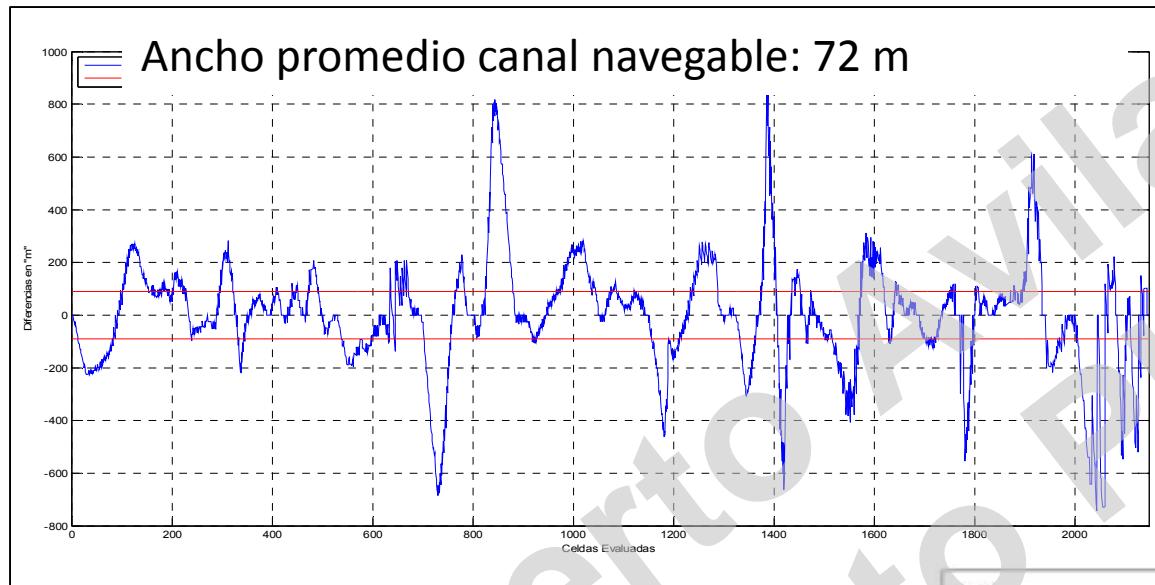
# Análisis de Nivel de Reducción Predominante – Campaña I: 26 de Agosto y 25 de Septiembre del 2012



Niveles de excedencia netos	Nivel de Excedencia			Niveles de excedencia con inclusión de calado de 1.2m	Nivel de Excedencia		
	95,0%	70,0%	50,0%		95,0%	70,0%	50,0%
Porcentaje Que Cumple	86,0%	98,3%	100,0%	Porcentaje Que Cumple	70,0%	92,5%	99,7%
Porcentaje Que No Cumple	14,0%	1,7%	0,0%	Porcentaje Que No Cumple	30,0%	7,5%	0,3%
Longitud Que No Cumple	111 Km	14 Km	0 Km	Longitud Que No Cumple	239 Km	60 Km	2 Km
				Nivel de Excedencia			
				Niveles de excedencia con inclusión de calado de 1.8m	95,0%	70,0%	50,0%
				Porcentaje Que Cumple	58,5%	87,0%	99,4%
				Porcentaje Que No Cumple	41,5%	13,0%	0,6%
				Longitud Que No Cumple	330 Km	103 Km	5 Km

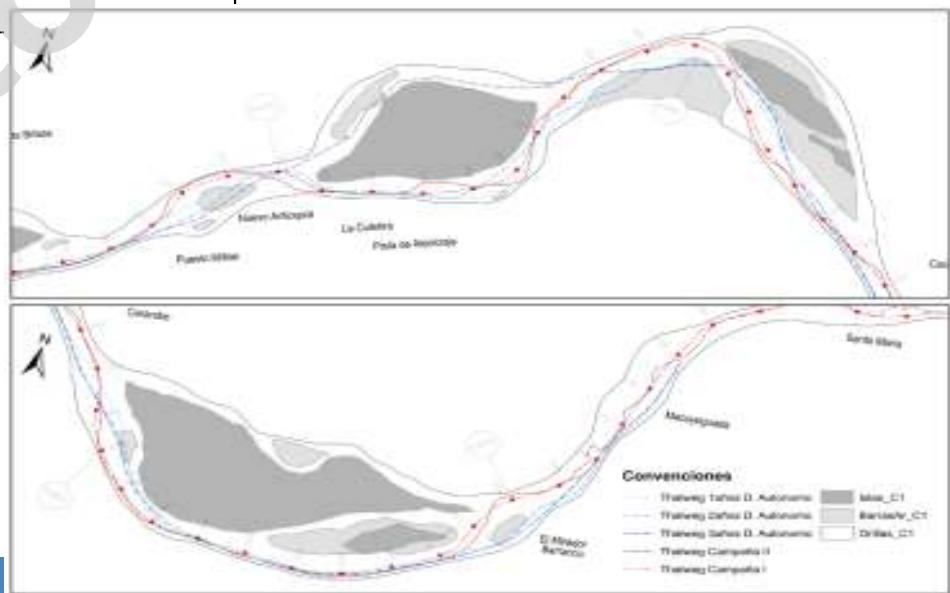


# Variación planta Thalweg - Mediciones

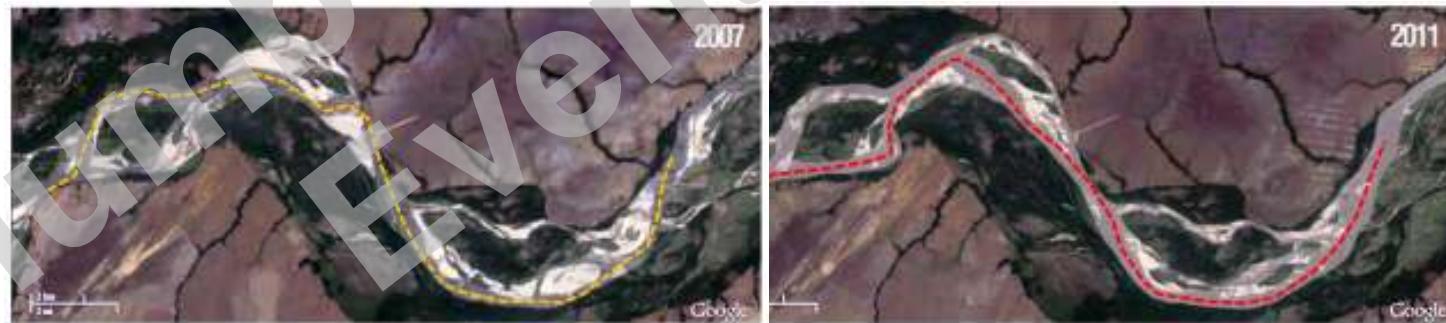
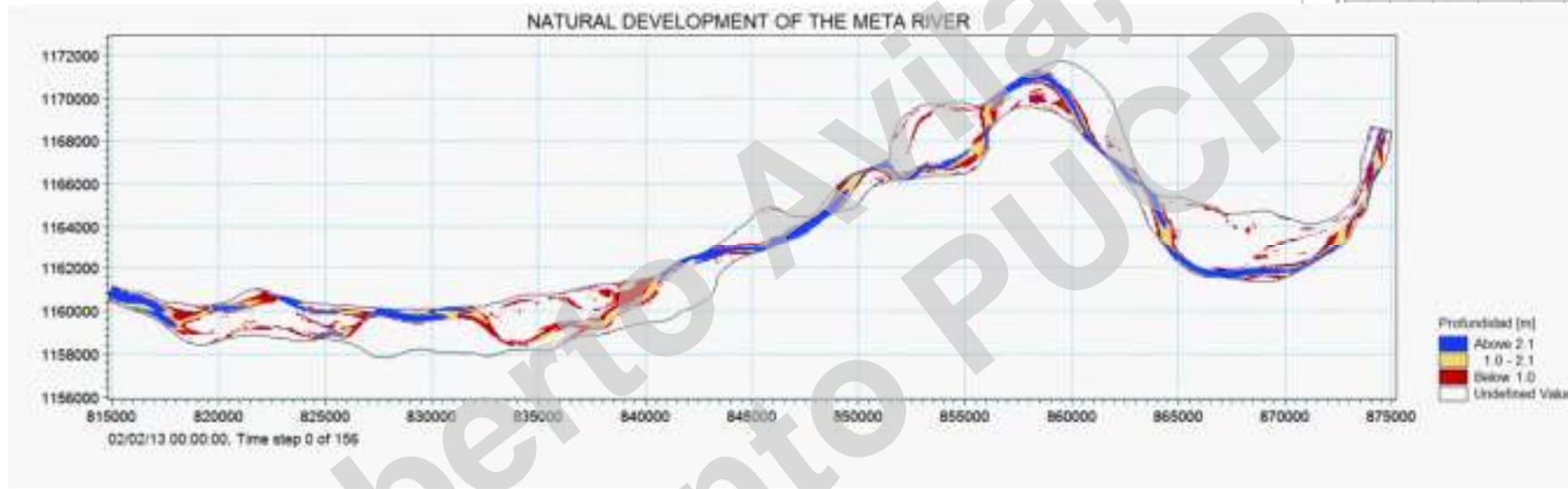
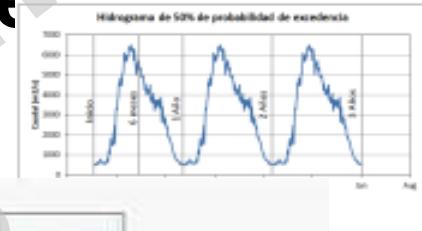


C-I: Septiembre 2013  
C-II: Febrero 2014

5 meses

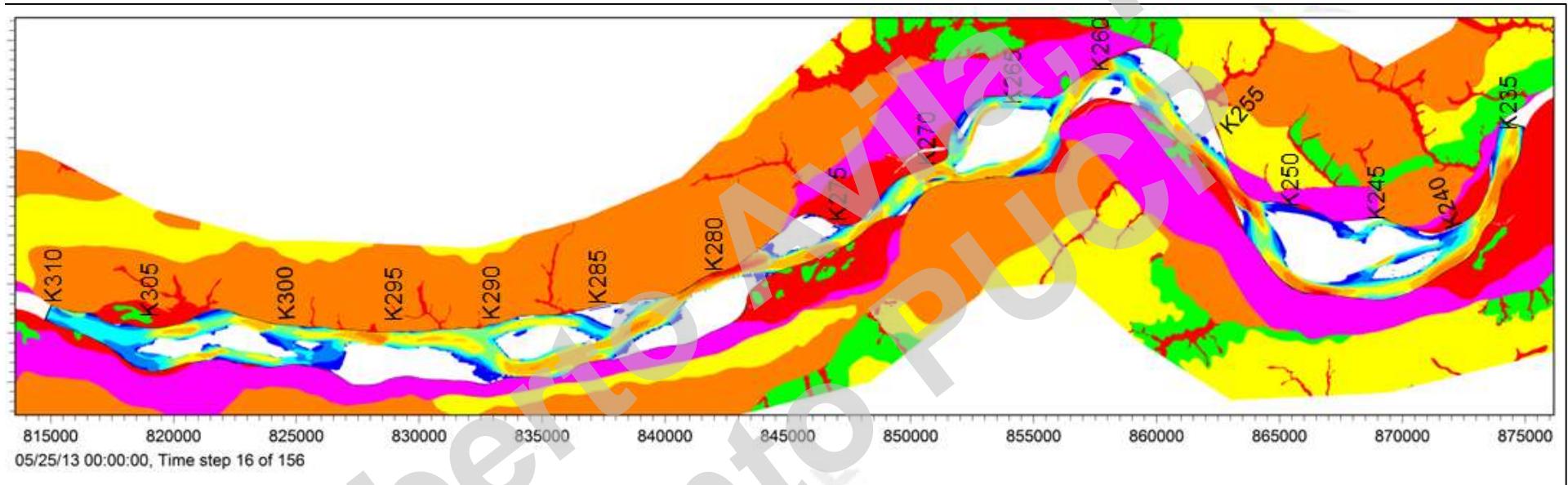


# Desarrollo Autónomo - Río Meta



# Esfuerzo cortante/Geomorfología

Simulación: 4 meses.



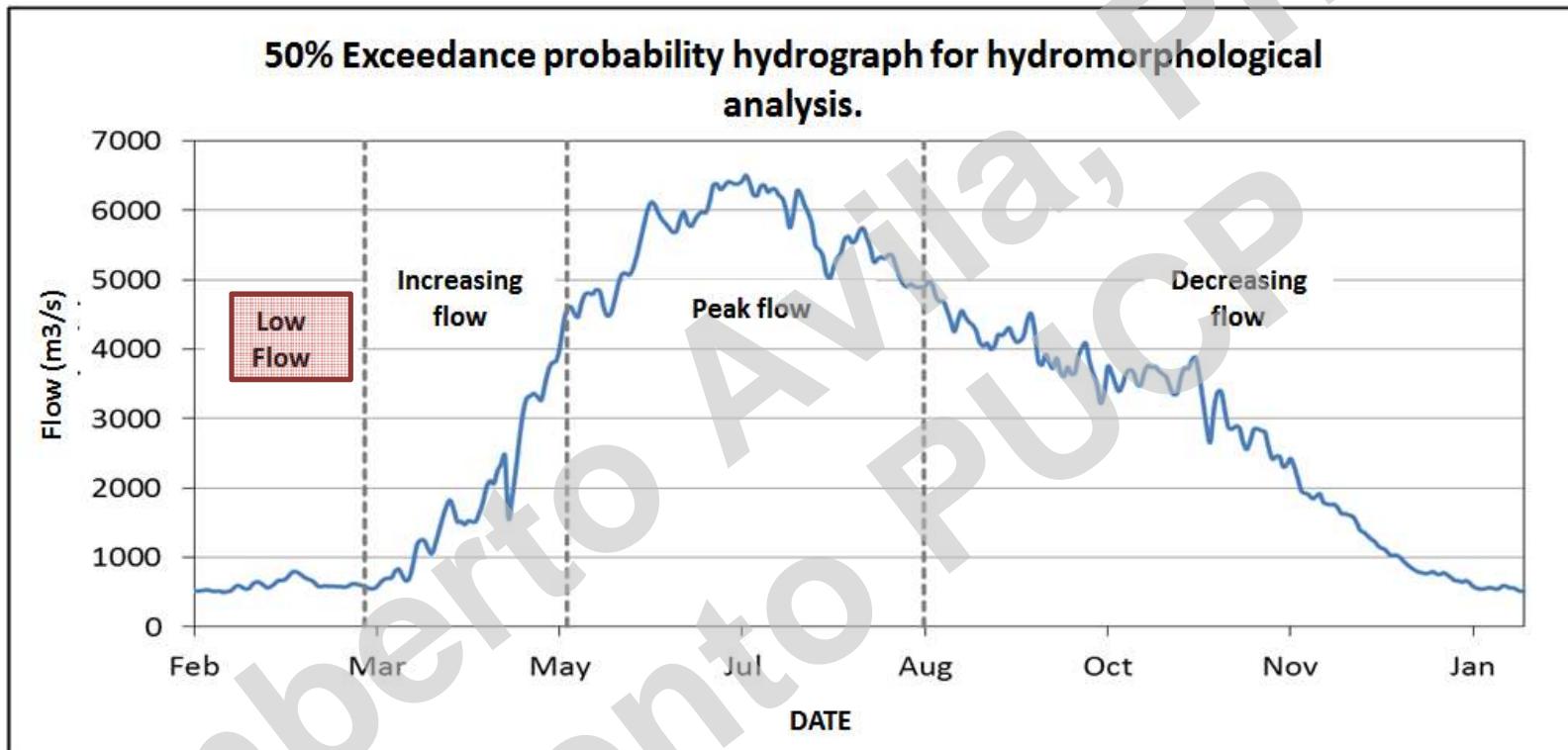
## SHEAR STRESS (N/m<sup>2</sup>)

Above 10
9 - 10
7 - 9
5 - 7
4 - 5
3 - 4
2 - 3
1 - 2
0 - 1
Below 0
Undefined Value

## RESISTANCE TO FLUVIAL EROSION CATEGORIES

VERY HIGH
MEDIUM-HIGH
MEDIUM
MEDIUM-LOW
LOW
VERY LOW

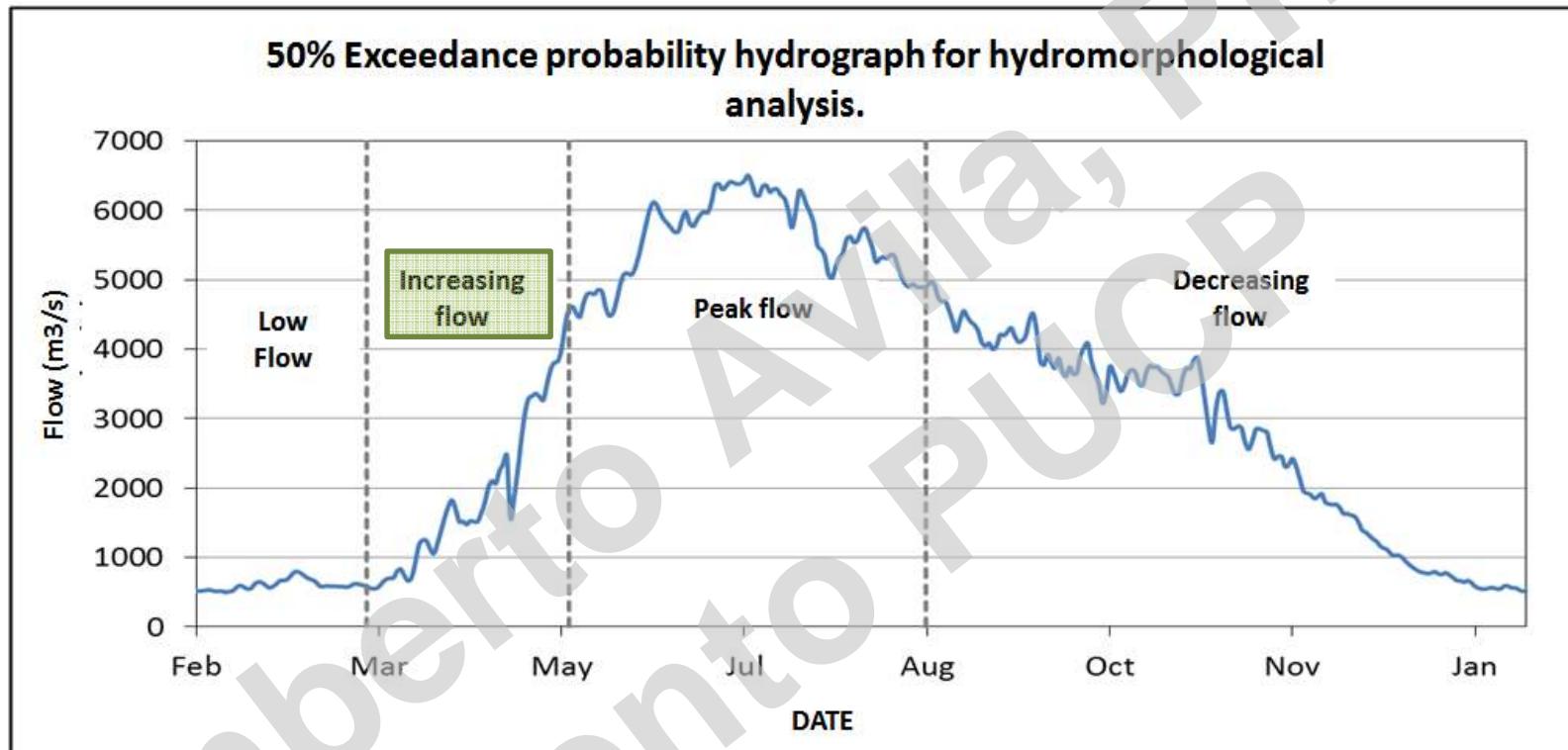
# Análisis



Caudales  
bajos

- El río concentra el flujo sobre el canal principal del cauce activo, dejando la mayoría de islas y barras de arenas secas.
- La profundidad del agua es menor a 2.0 m para la mayor parte del río

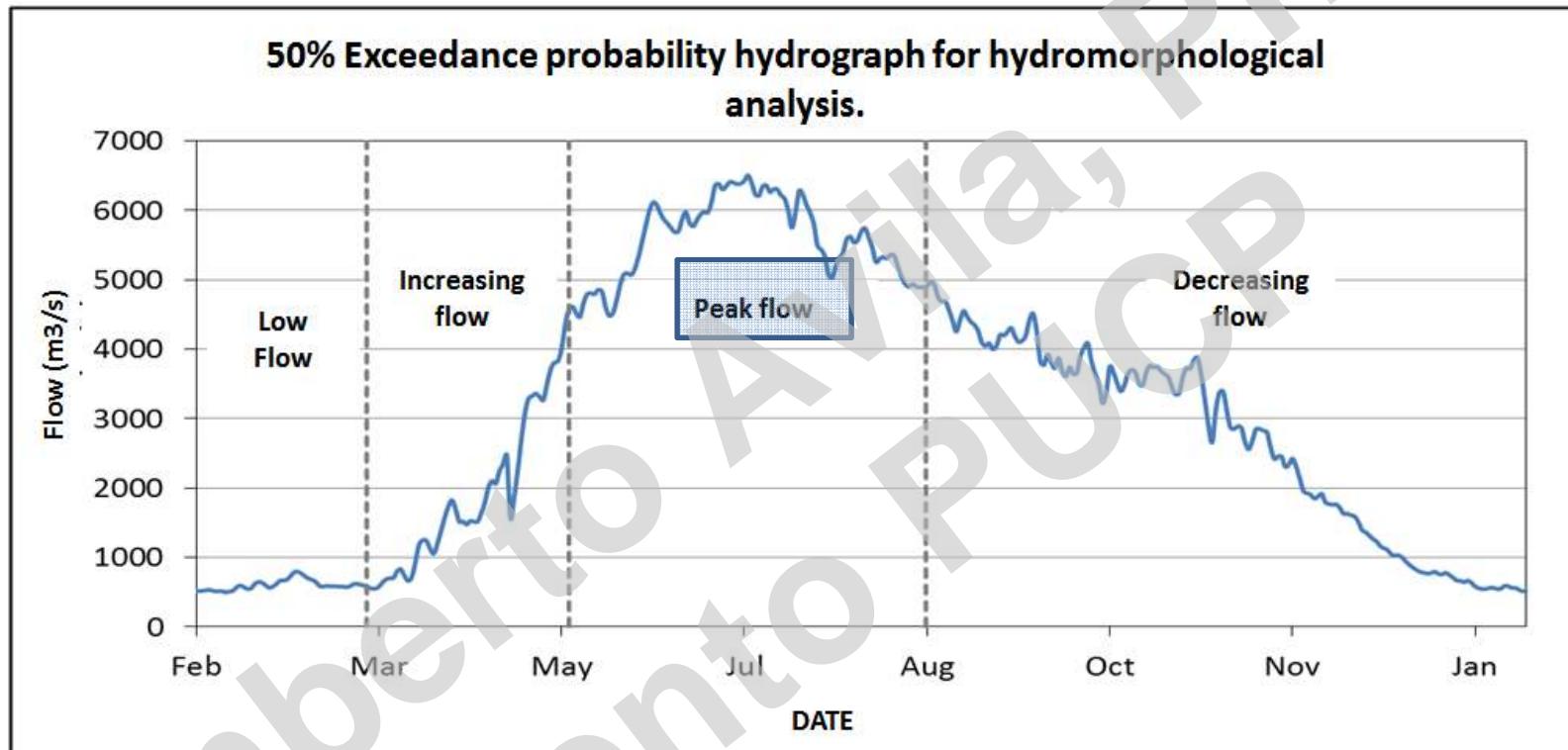
# Análisis



Incremento de caudal

- El transporte de sedimento incrementa causando un incremento en la cota del lecho
- El nivel del agua también aumenta pero más rápido que el lecho, permitiendo profundidades suficientes para navegación.
- El agua empieza a fluir a través de algunos brazos

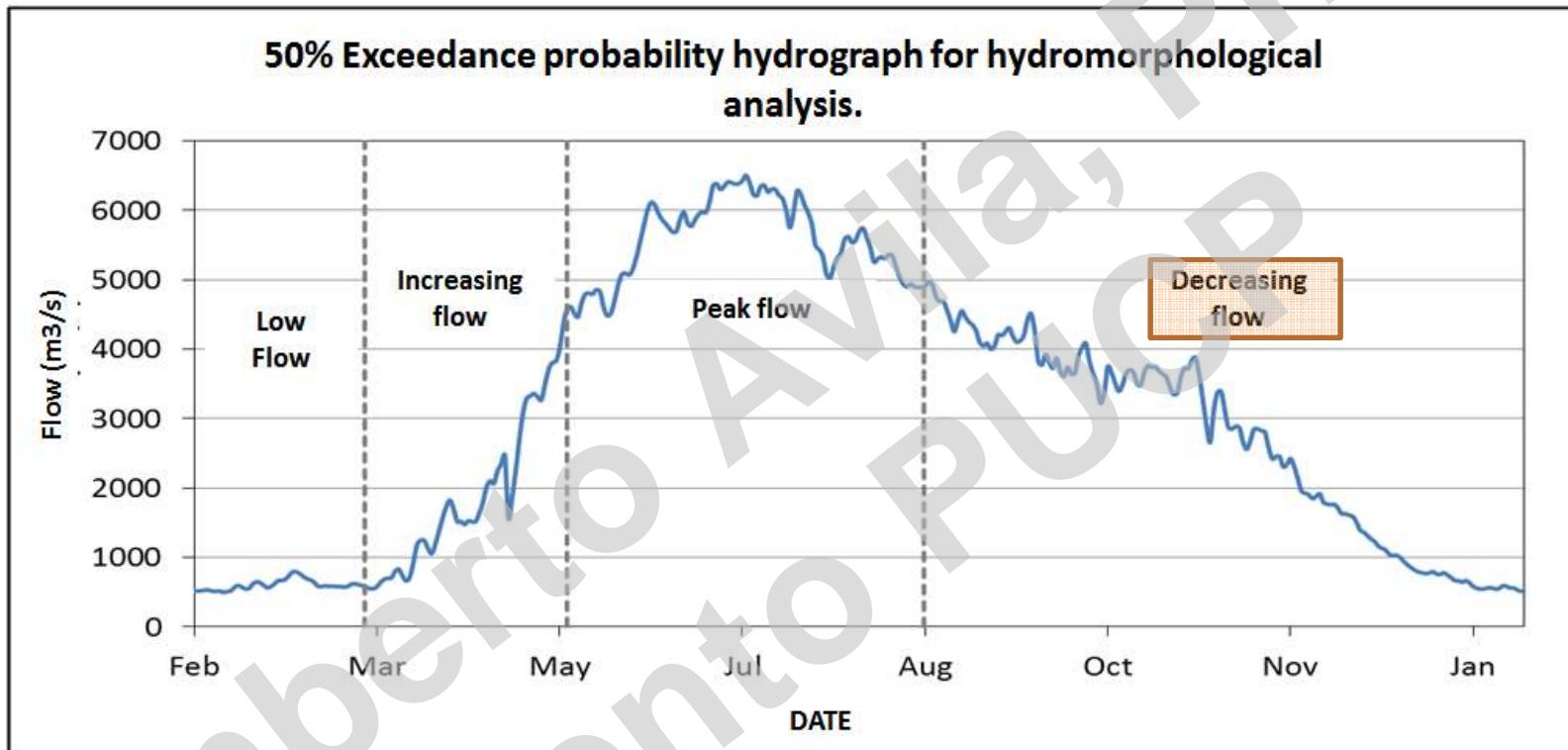
# Análisis



- La mayoría de los cambios morfológicos ocurren en este período
- Los caudales sin más altos y el transporte de sedimento es máximo
- El agua fluye por todos los brazos
- En eventos extremos el flujo cubre todo el lecho mayor

Caudal  
Pico

# Análisis



Disminución  
del caudal:

- El nivel del agua decrece rápidamente, generando procesos de erosión/sedimentación en el lecho y en orillas
- La condición del lecho empieza a cambiar para la condición de aguas bajas.
- El caudal empieza a concentrarse sobre el canal principal
- El canal principal puede cambiar de acuerdo con los procesos morfodinámicos ocurridos durante el caudal pico

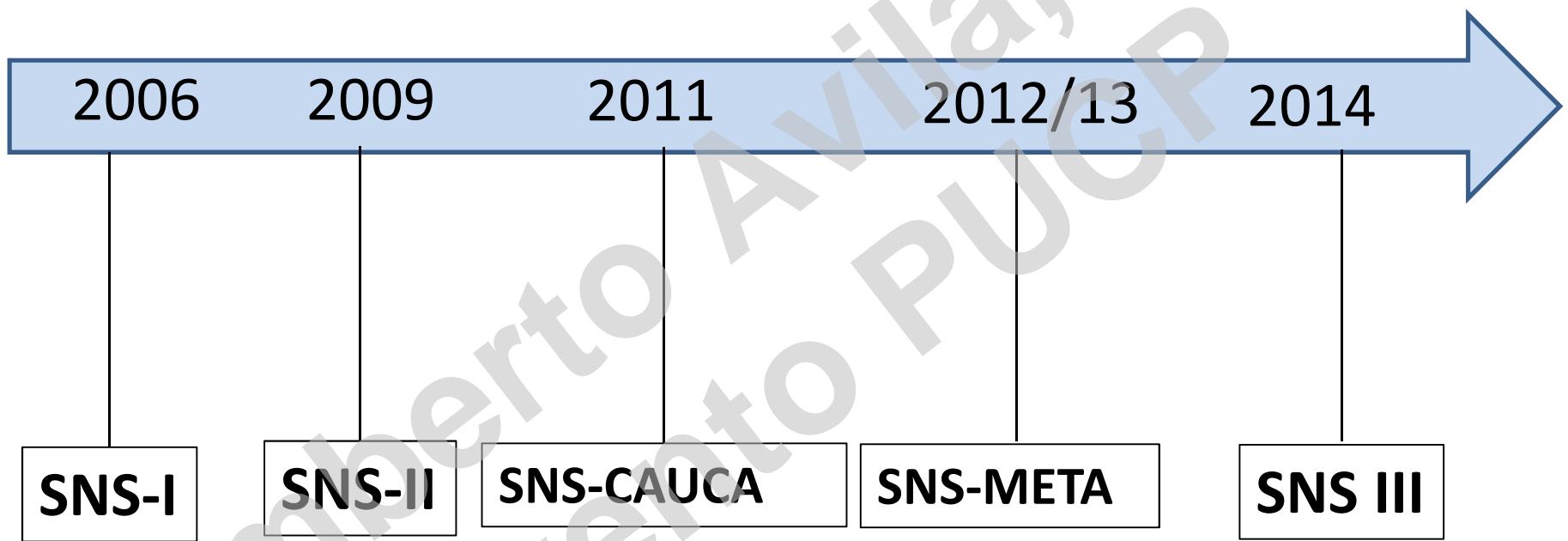
# Alternativas de obras hidráulicas

- **CRITERIOS BASADO EN EL DESARROLLO AUTÓNOMO**
- Dragado progresivo e inteligente
- Cierre de brazos con material dragado
- Incremento de rugosidad
- Monitoreo periódico
- Navegación satelital

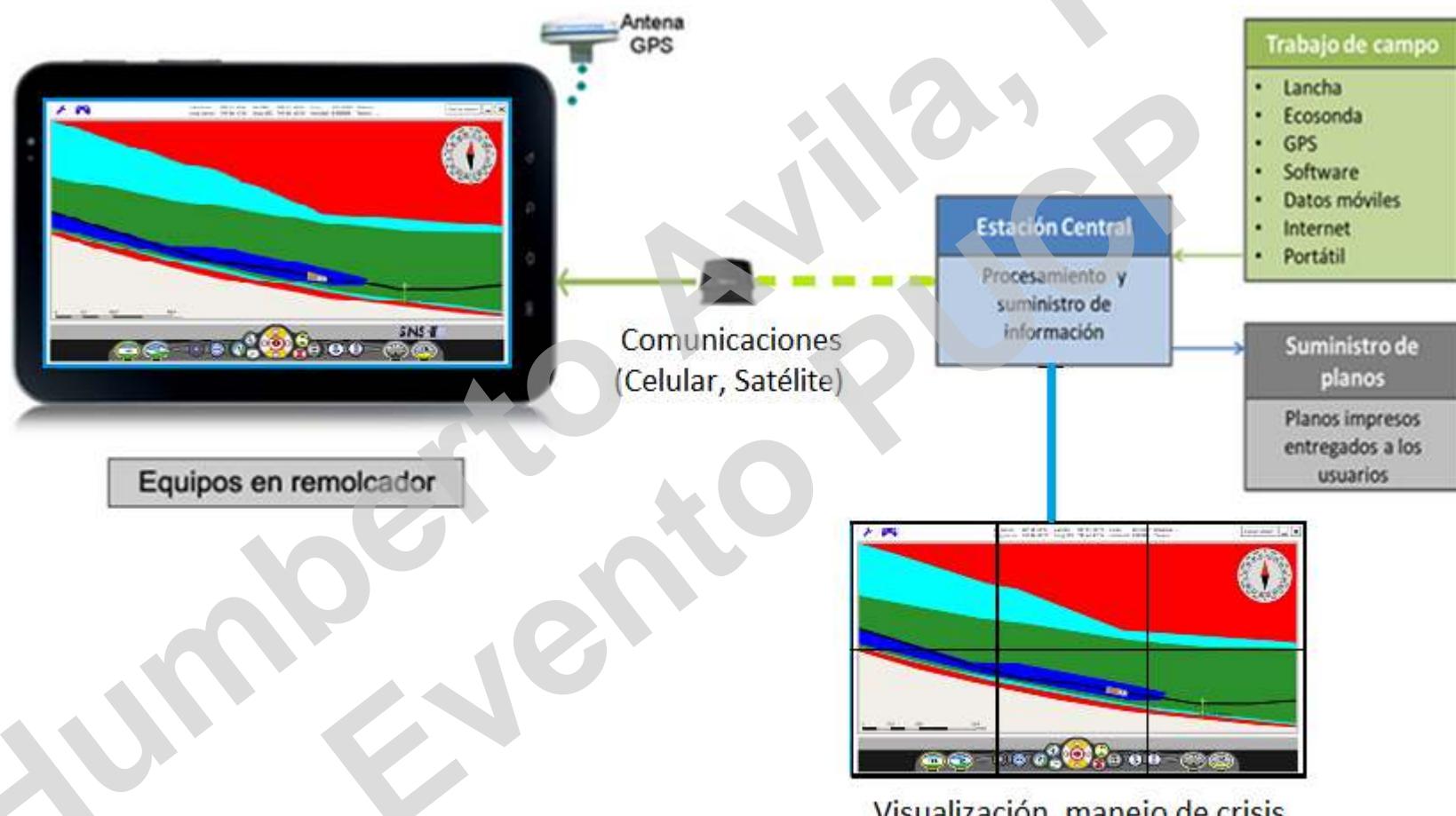
# SISTEMA SATELITAL DE ASISTENCIA A LA NAVEGACIÓN-SNS



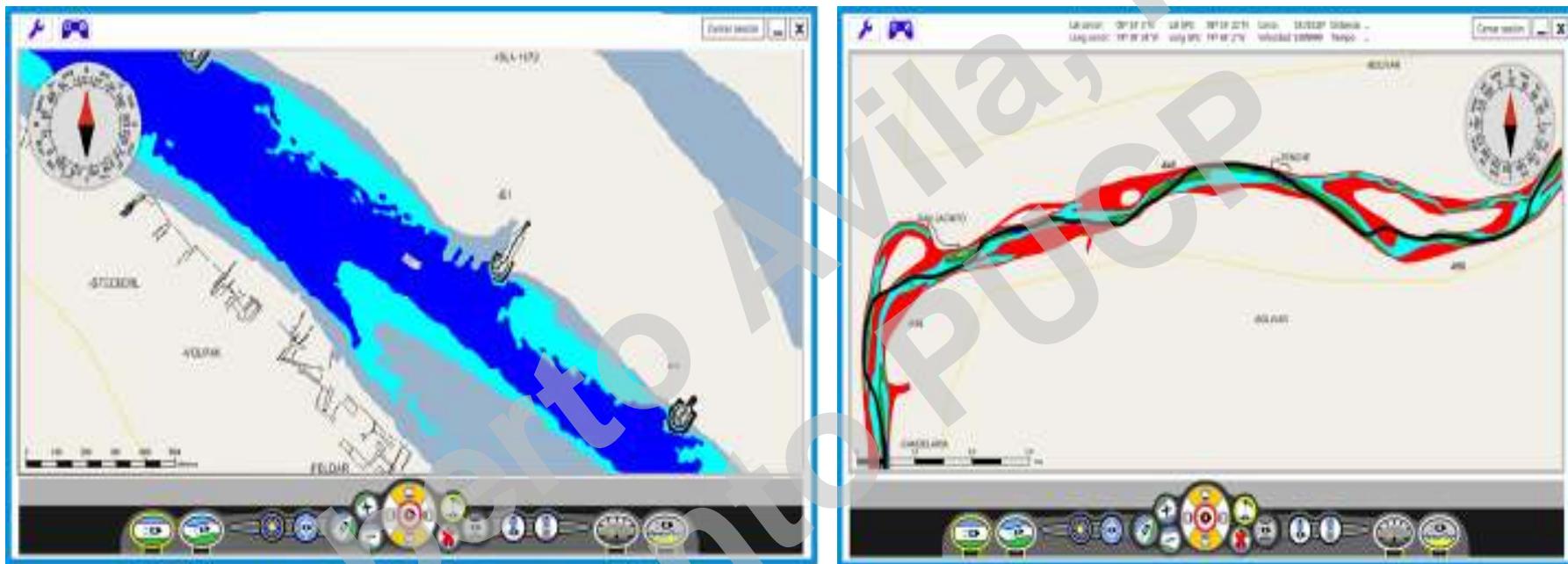
## Línea de tiempo de desarrollo del SNS



# Arquitectura del SNS-III

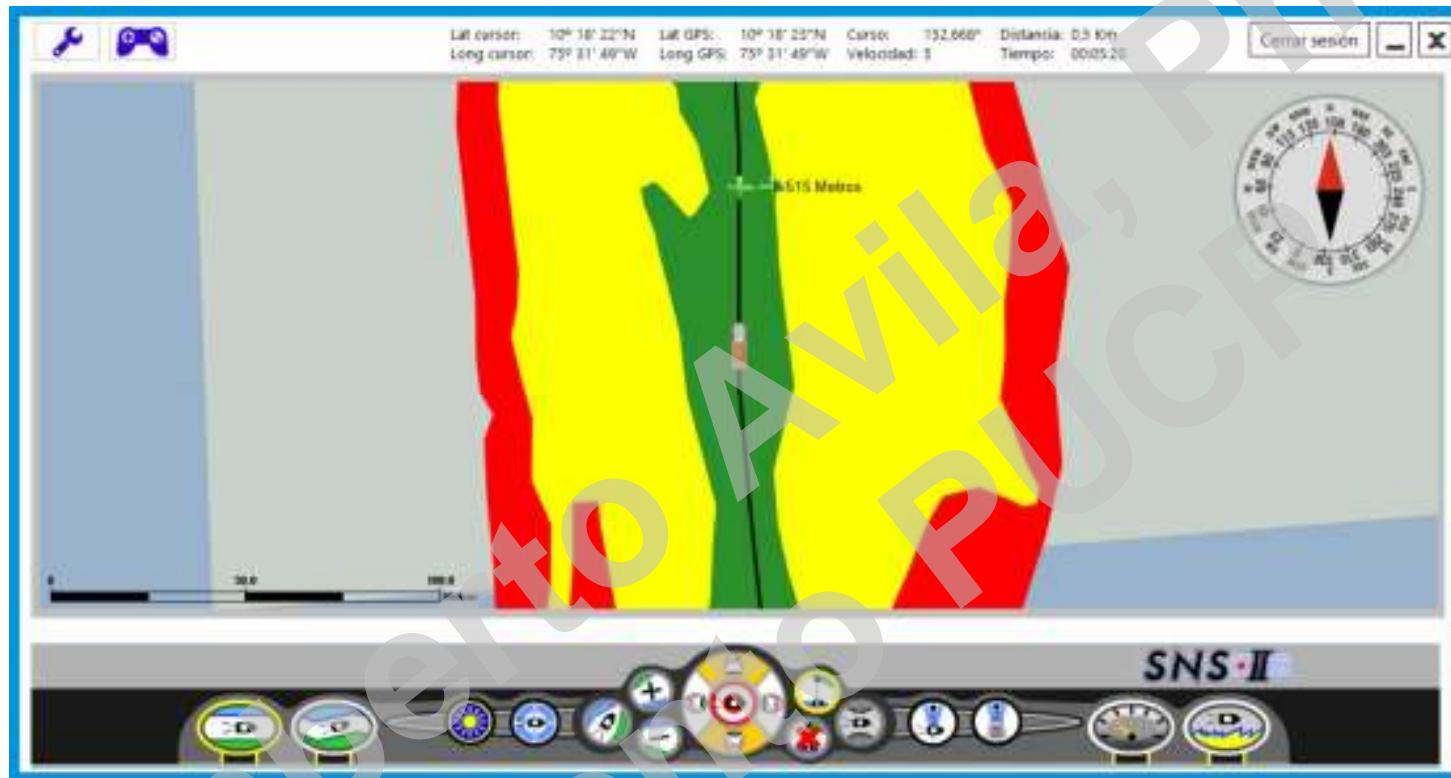


# Módulo principal: Mapa de navegación



*Sistema de Información Geográfico (SIG) con las  
batimetrías y el canal navegable*

# Módulo principal, segmento



Permite la visualización del SIG, seleccionar modo nocturno/diurno, centrado automático de remolcador, medición de distancias, puntos de interés, grabación de recorridos, entre otros.

# Módulos complementarios

- **Módulo de Posicionamiento Satelital de Embarcaciones.** Muestra las variables de navegación Velocidad, Rumbo, Latitud y longitud, distancia recorrida, entre otras, en tiempo real.
- **Módulo de Gráficas complementarias:** Curvas de niveles excedidos.
- **Modo nocturno:** Facilita la navegación durante la noche.



# PRUEBA Y VERIFICACIÓN DEL SISTEMA Y CAPACITACIÓN



Capitán del barco: Sr. Miguel Sarmiento

El SNS se montó en el **remolcador María Camila** de la empresa NAVIAGRO (rio Meta).

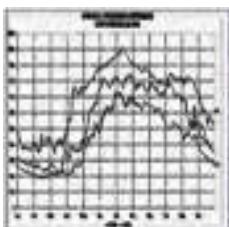
# CONCLUSIONES



**El conocimiento del DESARROLLO AUTÓNOMO de los ríos permiten proponer obras de navegabilidad sustentables y resilientes a los cambios naturales del río.**



**La navegación fluvial como parte del transporte multimodal representa una gran fortaleza económica en países con una red fluvial importante que se debe aprovechar.**



**Es necesario contar con una red de registro e información en tiempo real para mantener el conocimiento de los ríos y contar con pronósticos que minimicen el riesgo en la infraestructura y operación.**



**Las obras de ingeniería para navegación requieren del soporte de la modelación numérica para su diseño, planificación, operación y seguimiento ambiental.**

*Muchas gracias!*

Humberto Avila, PhD

Director

Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA

Universidad del Norte

[havila@uninorte.edu.co](mailto:havila@uninorte.edu.co)