



Modelos físicos de ríos en lecho fijo y móvil

Juan Pedro Martín Vide

profesor UPC, Barcelona

vide@grahi.upc.edu

II Seminario de Potamología

José Antonio Maza Álvarez

Villahermosa, Tabasco, agosto 2009

- **Objetivo:**

¿Para qué sirven los modelos físicos?

¿Sirven todavía?

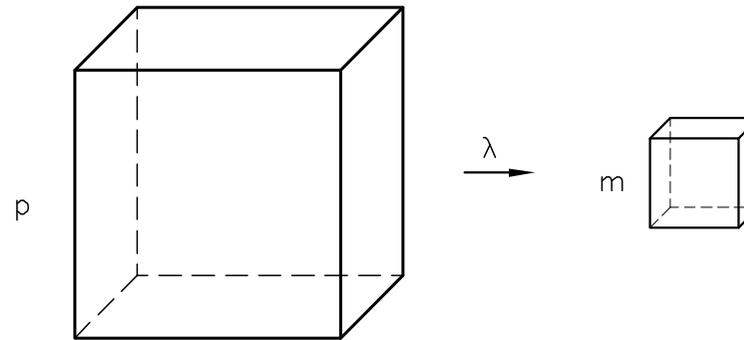
Utilidad y limitaciones.

Índice

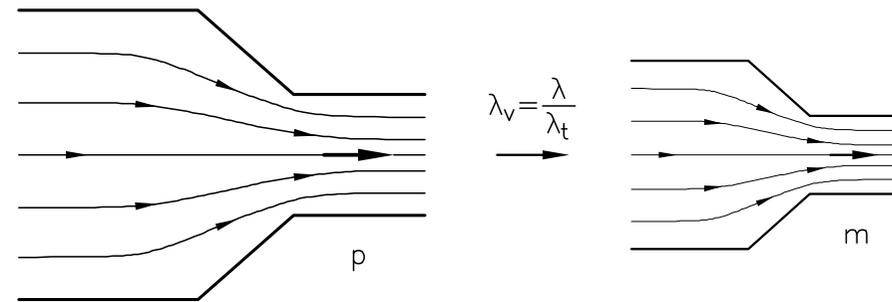
- recordatorio sobre semejanza hidráulica
- tipos de modelos y sus características particulares
- Ejemplos

Conceptos de teoría de la semejanza

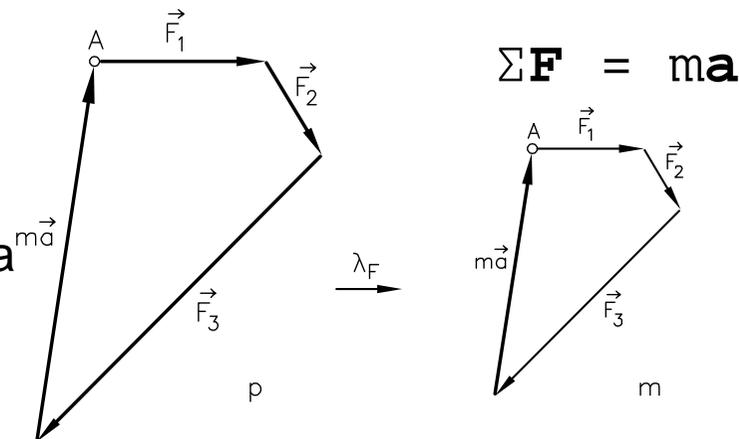
semejanza **geométrica** : **única**
escala λ_1 en todo el espacio.



semejanza **cinemática** : líneas de corriente y trayectorias geoméricamente semejantes **ídem** + **única escala** λ_t ; la semejanza geométrica es un requisito.

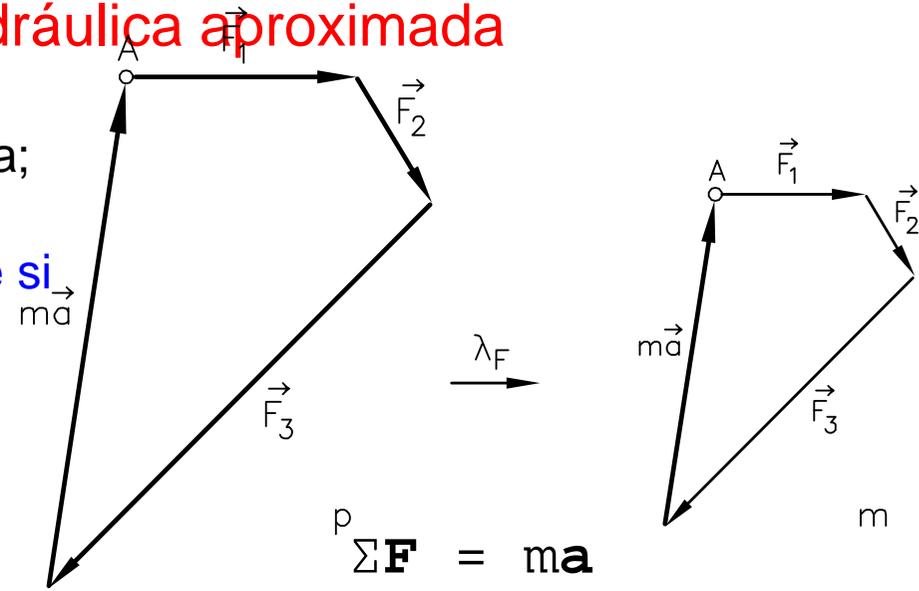


semejanza **dinámica** : polígonos de fuerza geoméricamente semejantes **ídem** + **única escala** λ_ρ ; la semejanza dinámica implica la cinemática.



Efectos de escala y semejanza hidráulica aproximada

polígonos que cumplen semejanza dinámica;
 se verificaría si $F_i / ma = \text{igual}$ en modelo y prototipo para todo i , pero esto es imposible si se usa agua y la gravedad terrestre.



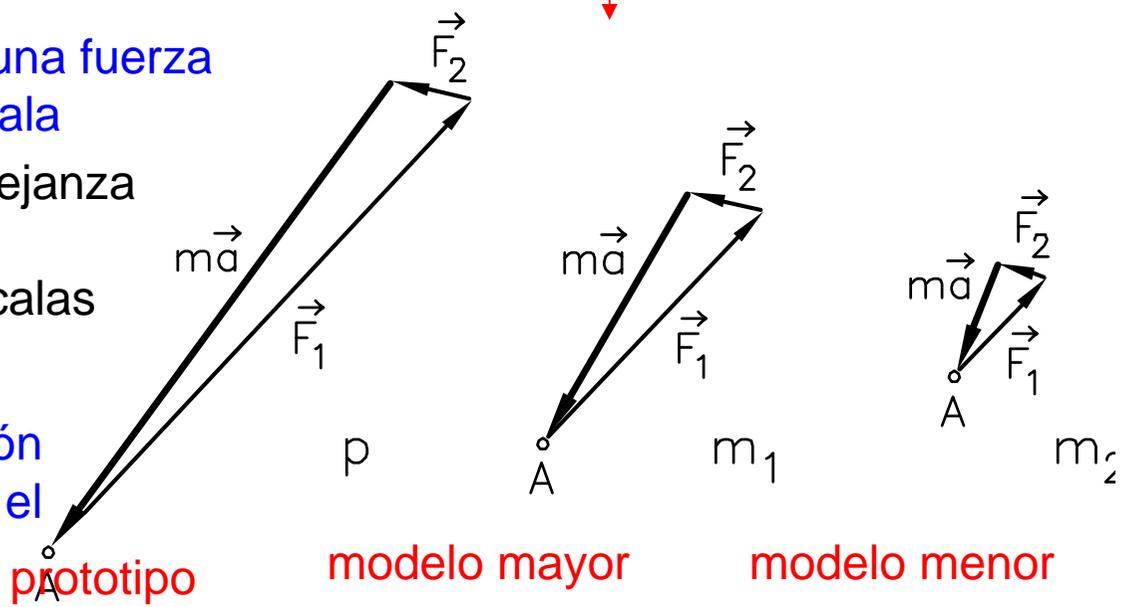
por desgracia, la realidad es:

La influencia mayor de lo debido de una fuerza en un modelo se llama efecto de escala

Si $F_{\text{gravedad}} / ma = \text{igual}$ en m y p , semejanza hidráulica de Froude pues

$n^{\circ}\text{Froude} = F_{\text{gravedad}} / F_{\text{inercia}}$. De ahí, escalas de semejanza, p.e. $\lambda_v = \lambda^{1/2}$ o $\lambda_Q = \lambda^{5/2}$.

Ojalá las fuerzas viscosas y de tensión superficial no influyan demasiado en el modelo.

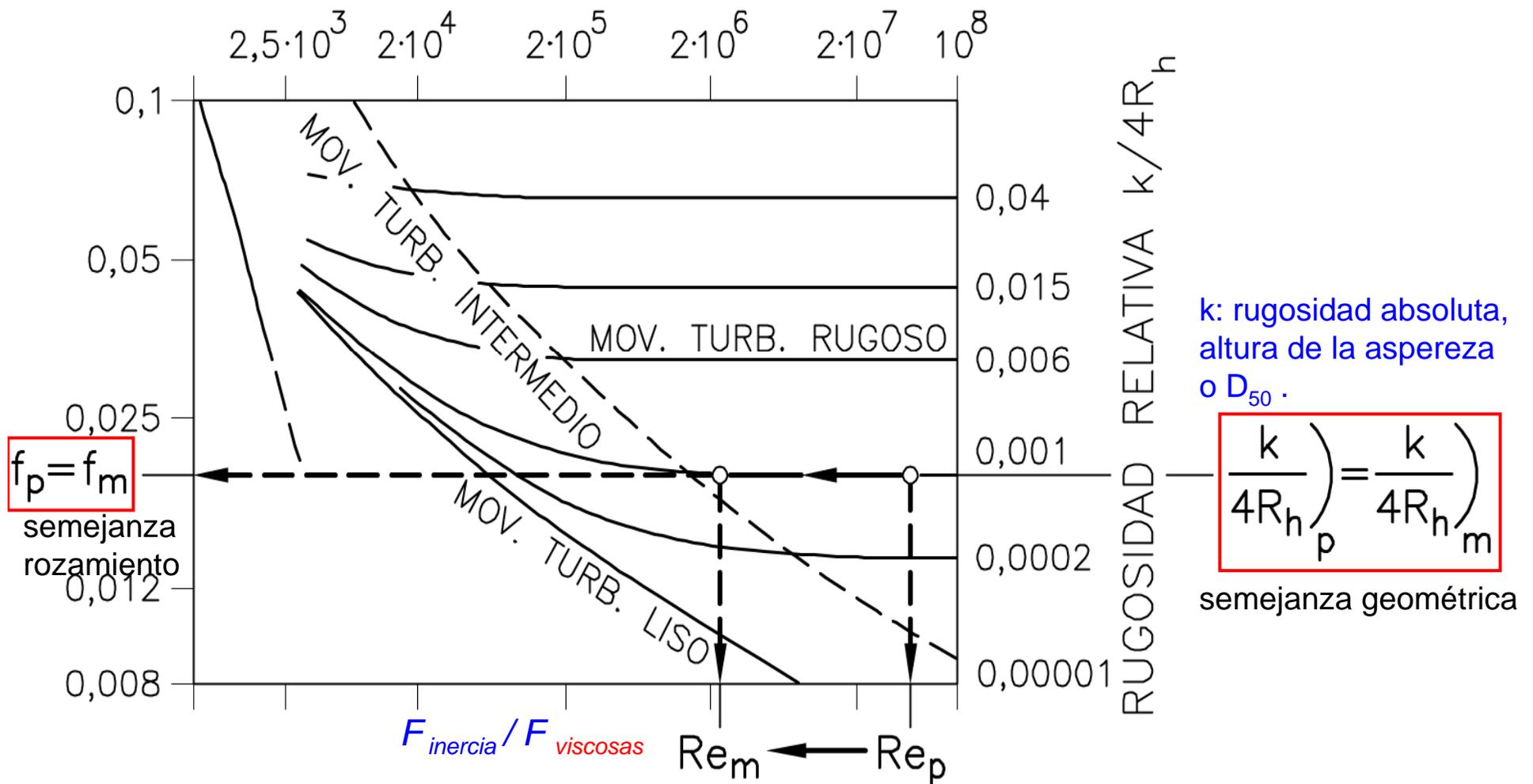


Análisis del efecto de escala de las fuerzas viscosas

Diagrama de Moody para el coeficiente de fricción f de Darcy-Weisbach en una conducción, expresión más rigurosa de la fuerza de rozamiento.

El coeficiente de Manning es $n=R_h^{1/6} (f/8g)^{1/2}$.

NUMERO DE REYNOLDS $Re = \frac{vD}{\nu}$ → $\lambda_{Re} = \lambda^{3/2}$ en sem. Froude



Tipos de Modelos Físicos sobre ríos:

1.- modelos de estructuras hidráulicas en ríos:
sin referirnos a presas, aliviaderos (vertedores),...

2.- modelos de tramos fluviales en lecho fijo:
¿sobreviven a los modelos matemáticos?

3.- modelos de tramos fluviales en lecho móvil:
¿son rigurosos?

4.- modelos de fenómenos locales de socavación:
pilas de puente, estribos...

Modelos Físicos sobre ríos:

1.- modelos de estructuras hidráulicas en ríos: 3 ej.

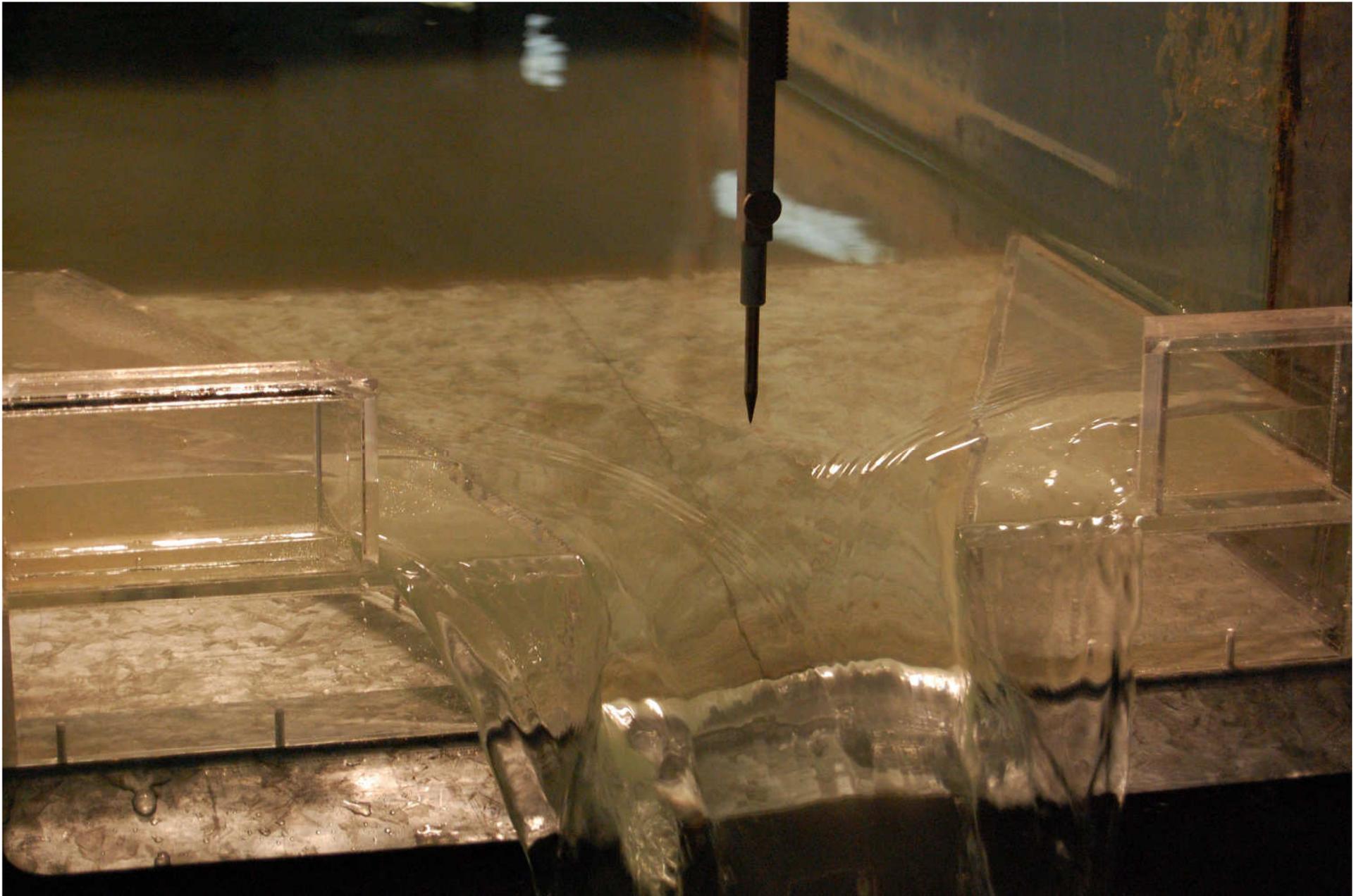
2.- modelos de tramos fluviales en lecho fijo:

3.- modelos de tramos fluviales en lecho móvil:

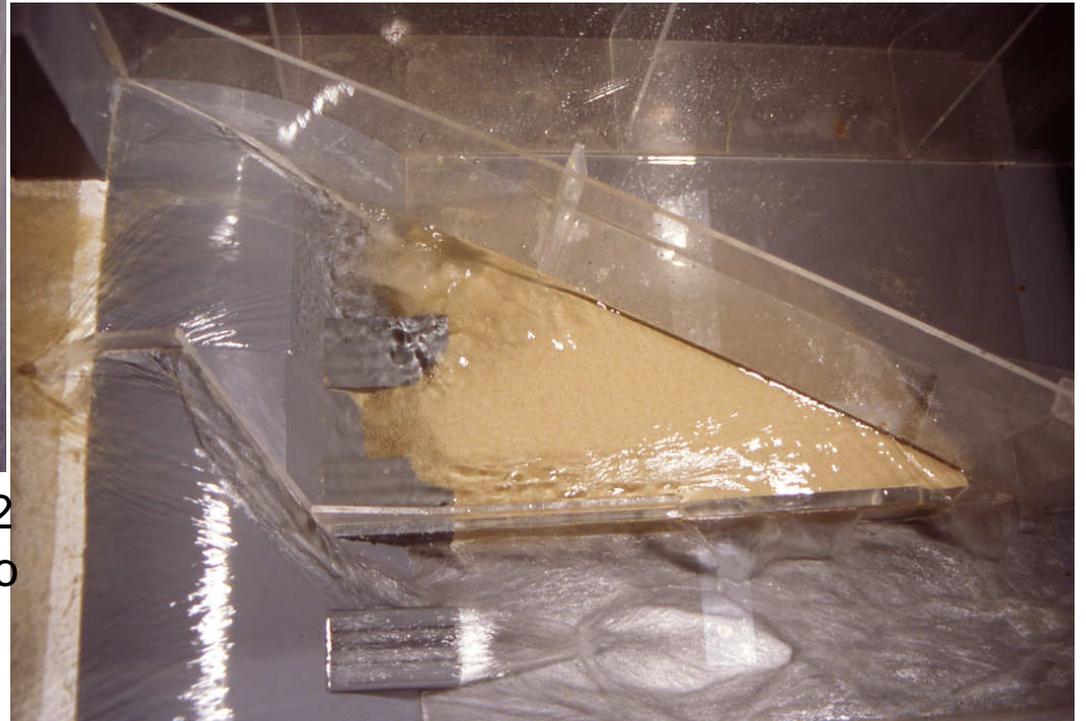
4.- modelos de fenómenos locales de socavación



Aforador en cabecera del río Llobregat; sección compuesta y compleja; es necesaria una gran precisión.



escala $\lambda = 10$; semejanza de Froude; atención al efecto de la tensión superficial en la curvatura de la lámina y al efecto de la aireación (además de Re). Objetivo: ecuación de desagüe (calibración de la estación); régimen permanente.



aforador+trampa de **sedimentos**: $\lambda= 12$
arena a escala de la grava del prototipo
objetivo: ecuación desagüe+eficiencia
de captura de la trampa.



desembocadura de la rambla del Hondón en una cámara; $\lambda = 40$; objetivo: riesgo de sedimentación; ensayo régimen **transitorio** (hidro y sedimentograma); arena y limo en el modelo a escala del prototipo



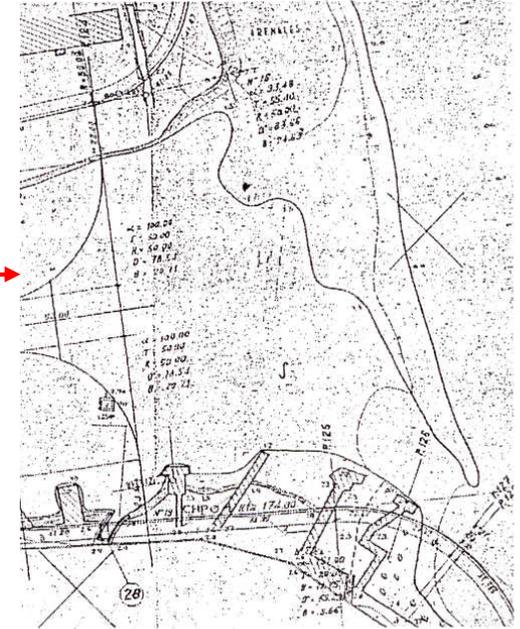
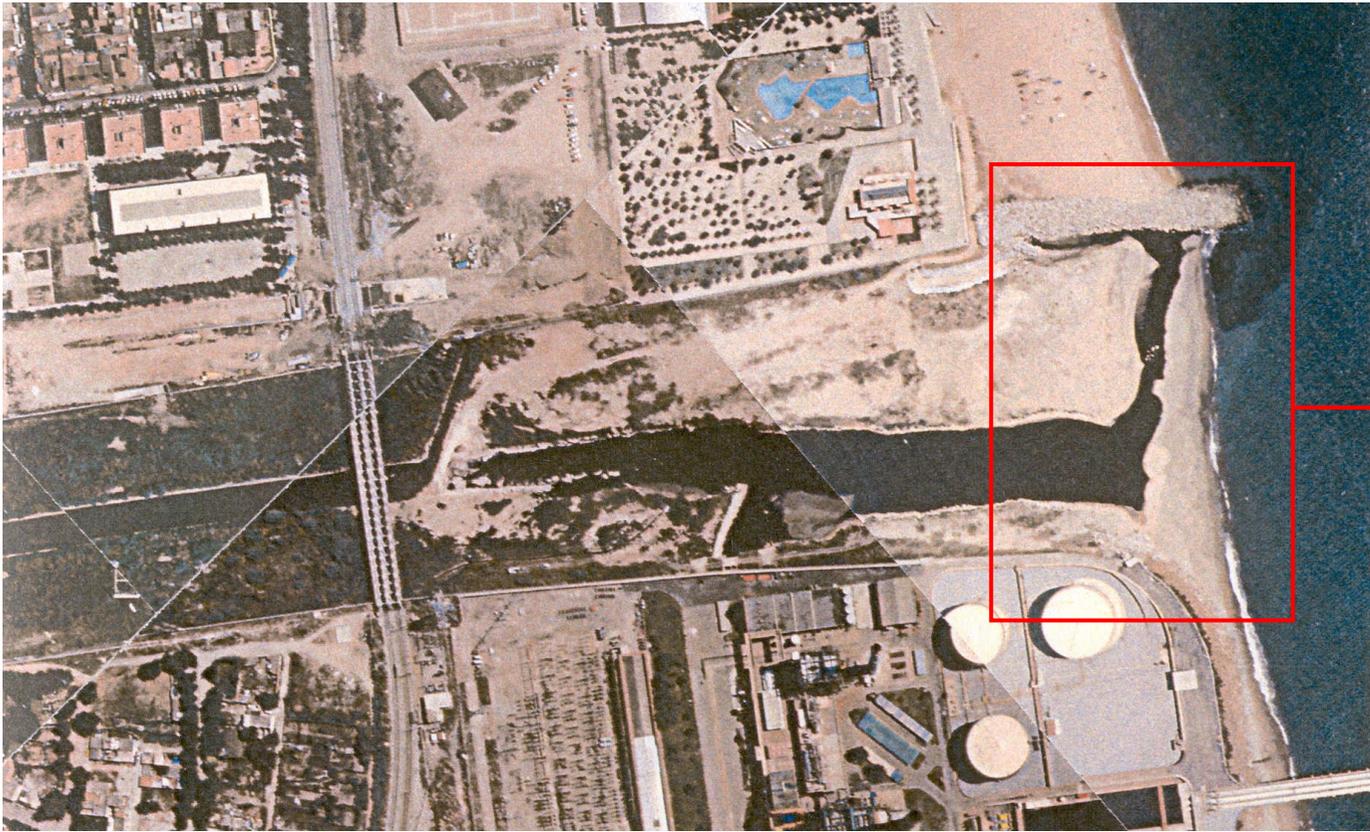
Modelos Físicos sobre ríos:

1.- modelos de estructuras hidráulicas en ríos:

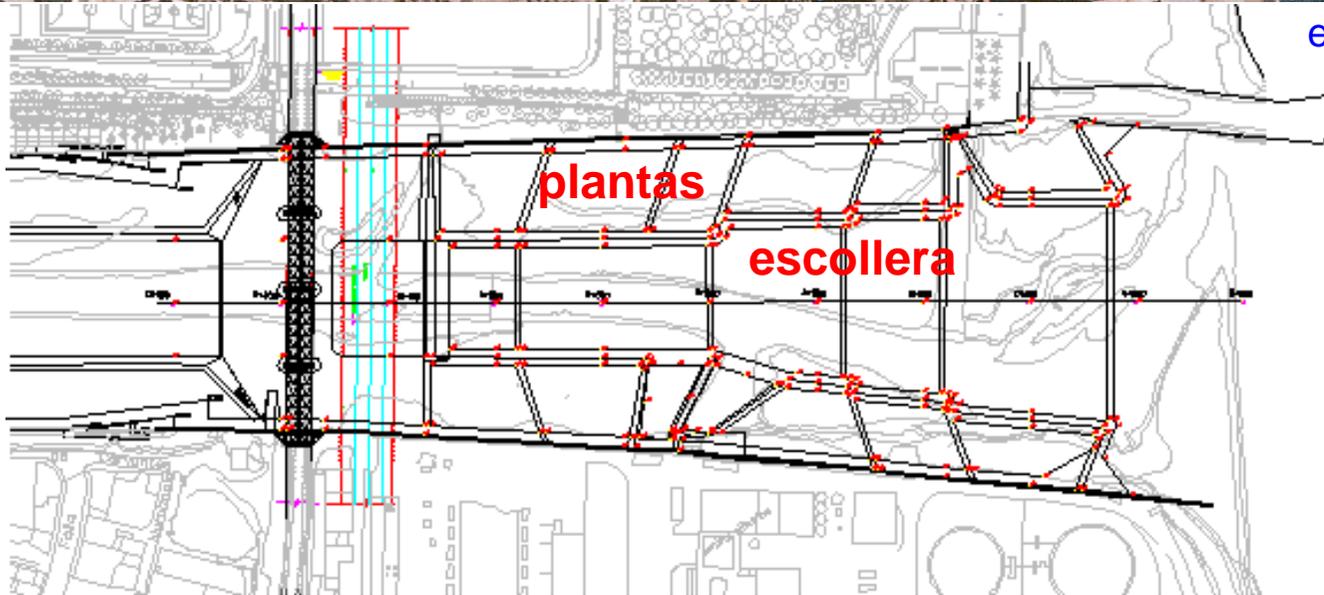
2.- modelos de tramos fluviales en lecho fijo: 5 ej.

3.- modelos de tramos fluviales en lecho móvil:

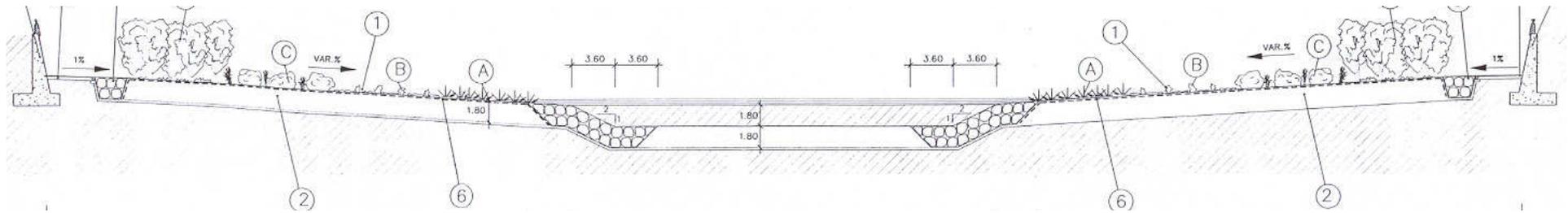
4.- modelos de fenómenos locales de socavación



estado anterior



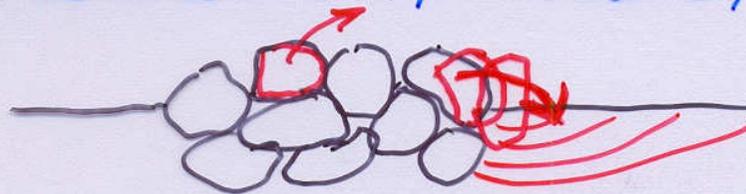
Proyecto para la
desembocadura del
río Besós (Barcelona)



¡ Analizar el problema ! Un modelo no es sólo construir un artefacto.

objetivos: capacidad (plantas y puente)
estabilidad (permanencia) de la escollera

fallo de la escollera por arrastre, no por erosión



objetivos en que un modelo físico es inmejorable:

capacidad del puente } modelo LECHO FIJO
arrastre de la escollera } $\lambda = 55$

objetivos en que compite un modelo matemático, incluso 1-D o 2-D
resistencia al flujo plantas (Trabajo de campo)



gris (sin pintar)	naranja	azul	verde	rojo
0.69 g	2.26 g	4.25 g	6.88 g	9.82 g
115 kg	375 kg	705 kg	1145 kg	1635 kg
28-55 cm	55-66 cm	66-82 cm	82-99 cm	99-110 cm

semejanza de las plantas

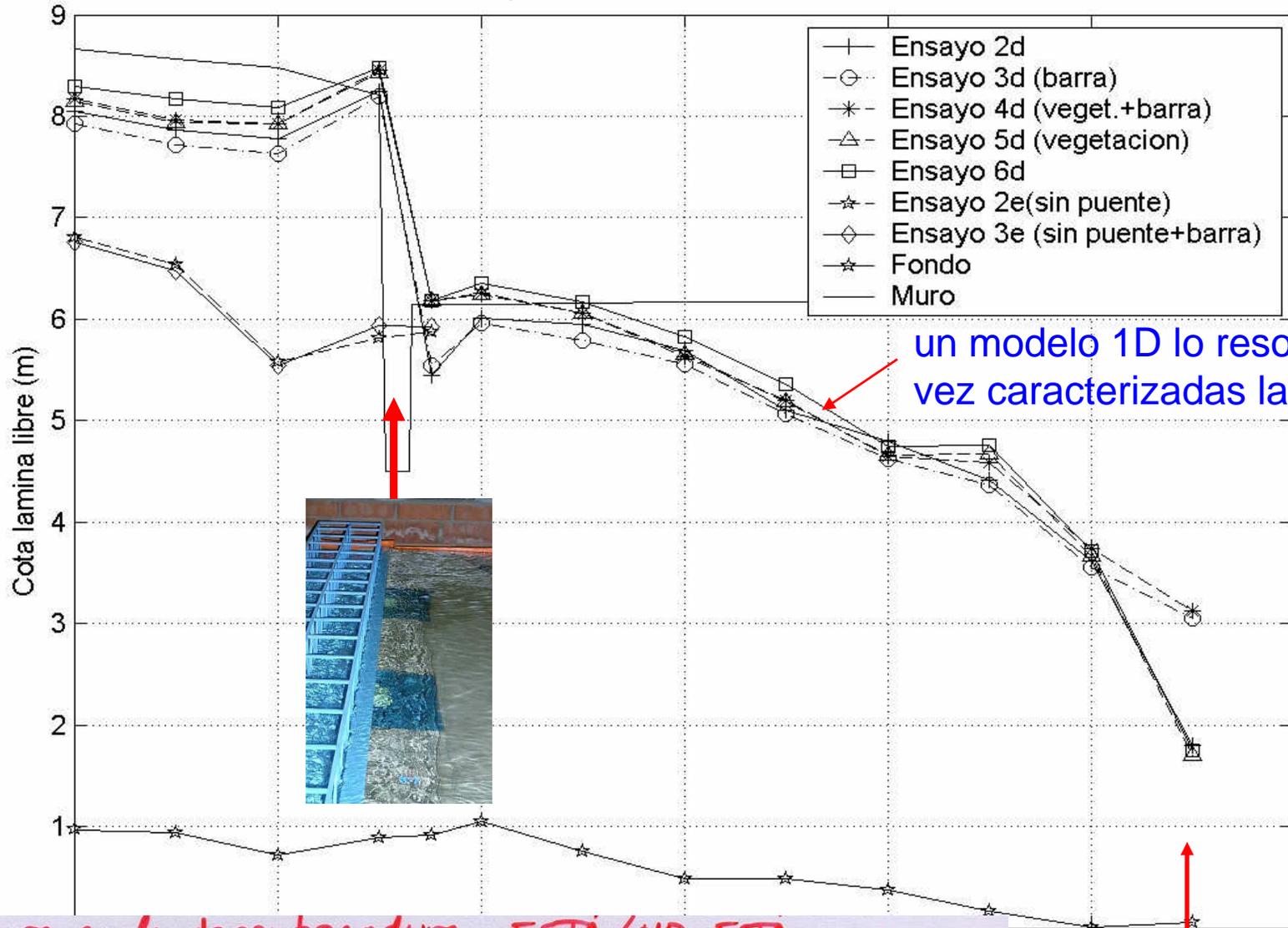
Q=constante o
flexibilidad fija



Se analiza la flexibilidad en **trabajo de campo** y se aplica un método de cálculo (método de Kouwen) para el coeficiente f de Darcy-Weisbach

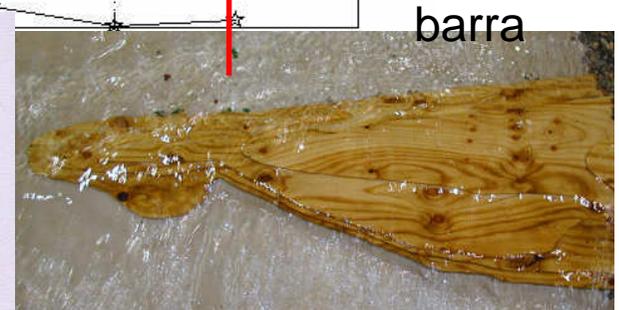
<i>Formación vegetal</i>	f	$L[cm]$	$D[mm]$	$a[cm^2]$
Tamarindo	0.140	5	6	10 x 10
Prado salicornias	0.102	1.5	10	8 x 8
Juncos	0.110	3	5	8 x 8

Lamina libre promediada en cada seccion transversal



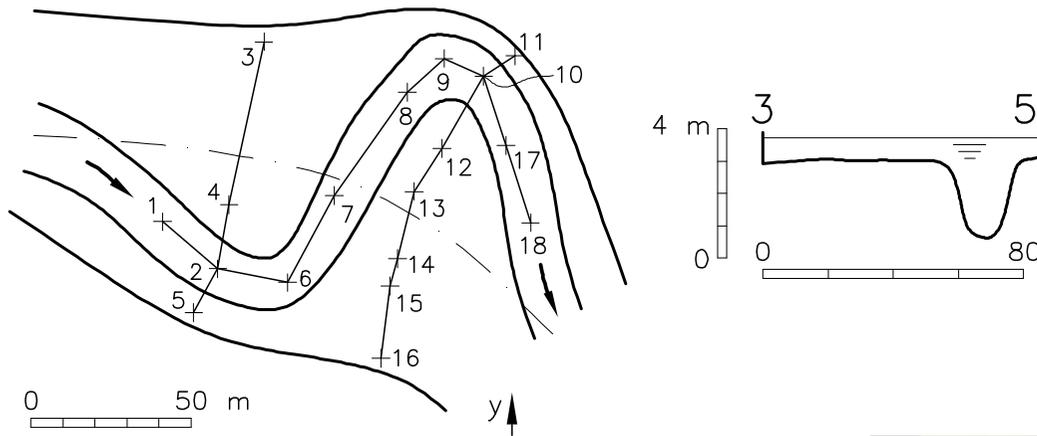
un modelo 1D lo resolvería, una vez caracterizadas las plantas

barra en la desembocadura ESTÁ/NO ESTÁ
 condición de contorno: mar → EL MAR NO ES C. de C.
 EL río cae, se precipita, al desembocar
 → desahúe en calado crítico en algún punto.





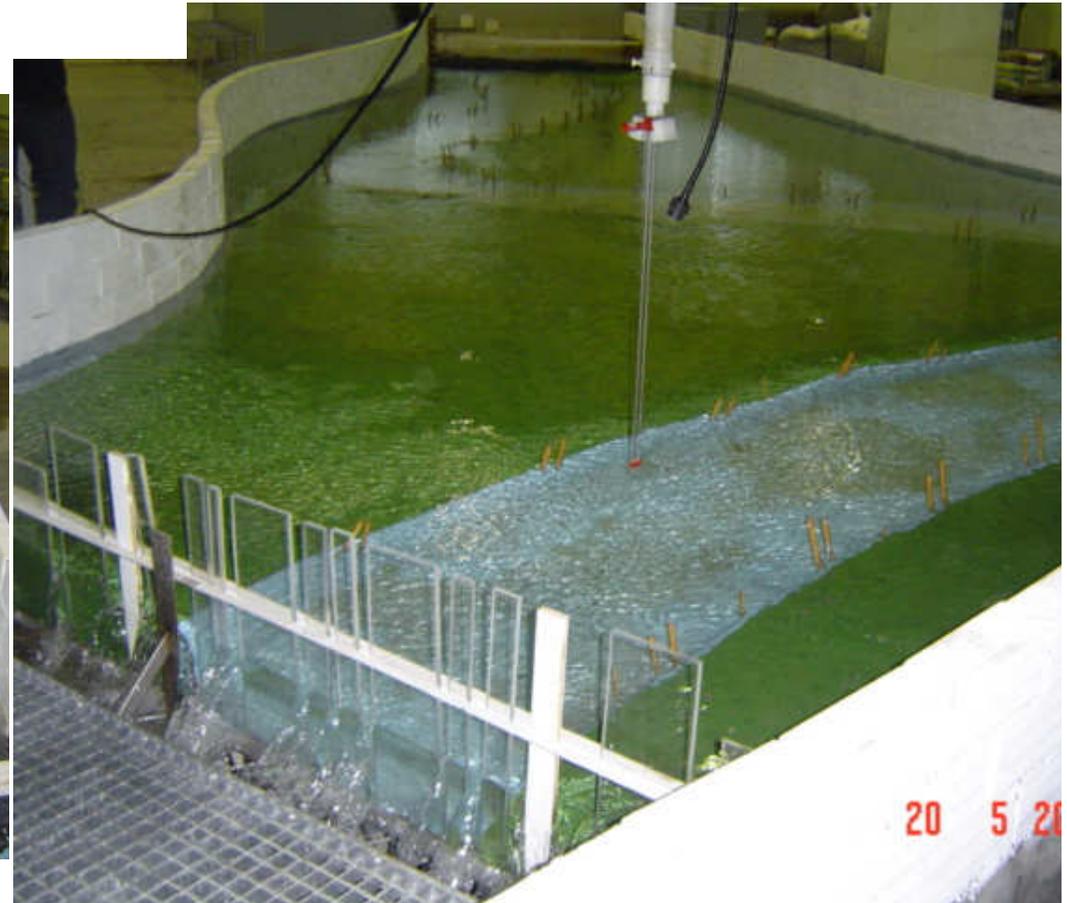
río Mero (La Coruña)



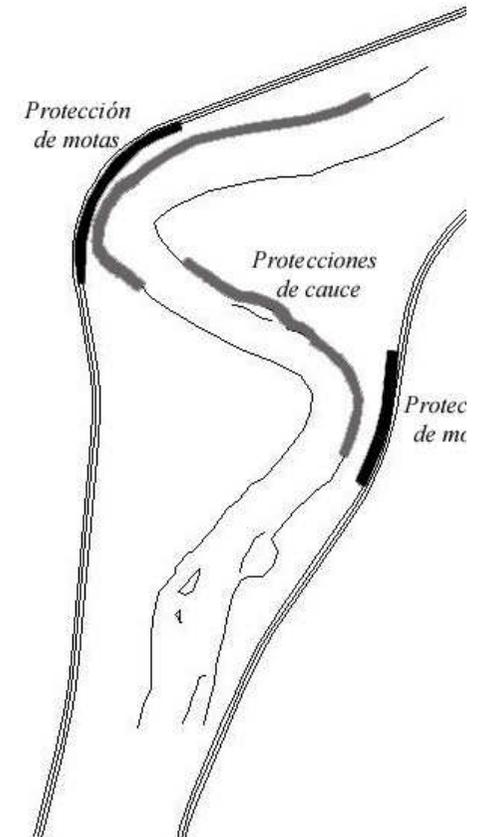
modelo del río Mero: objetivo: hidrodinámica (**flujo complejo**) y altura de inundación; altura de bordos, ¿necesidad de una corta de meandros? $\lambda = 20$. **Había gran necesidad pública de convencer.**



alimentación de agua conforme al flujo



cond.de contorno aguas abajo conforme al flujo

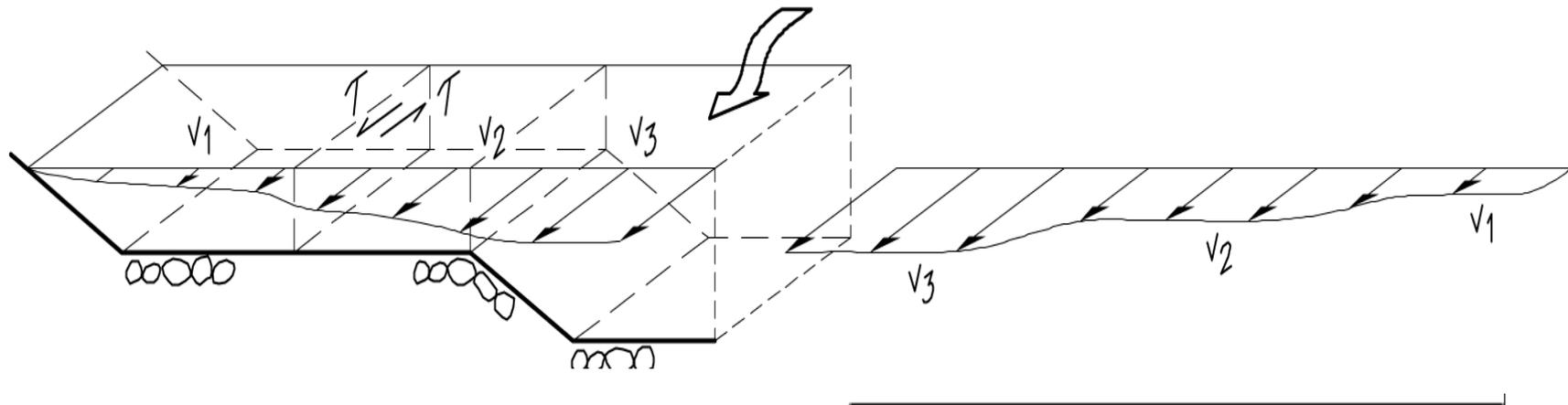
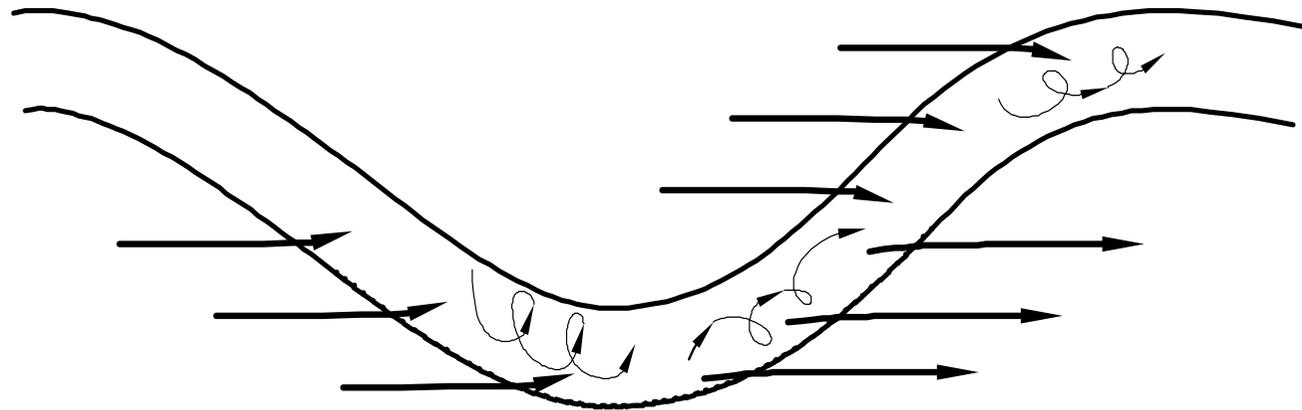


recomendaciones de
protección, a partir de
medidas de τ (tensión)

Flujo complejo: cauce sinuoso y llanuras de inundación

Preguntas: ¿resistencia al flujo?, ¿reparto del caudal entre cauce y llanuras?
¿distribución de tensiones tangenciales de corte?

modelo  **investigación experimental**



recuperación ambiental del río Besós, río canalizado

1907,
ligeramente
trenzado
300 m



Actualmente
120 m entre
muros



recuperación ambiental del río Besós



MODELOS FÍSICOS

objetivos : influencia del carrizo en la capacidad y la socavación (humedal)

sobreelevación o remanso en un puente

Modelos de lecho fijo (2) :

$$\lambda_n = \lambda_y^{1/6} / \sqrt{(\text{distorsión})}$$

$$D_{50})_p \approx D_{50})_m$$

$$\lambda_x = 75, \lambda_y = 30$$

$$\text{distorsión} = 2.5$$

$$\rightarrow \lambda_n \approx 1 \quad (\text{SEMEJANZA de FROUDE})$$

comparación antes - después

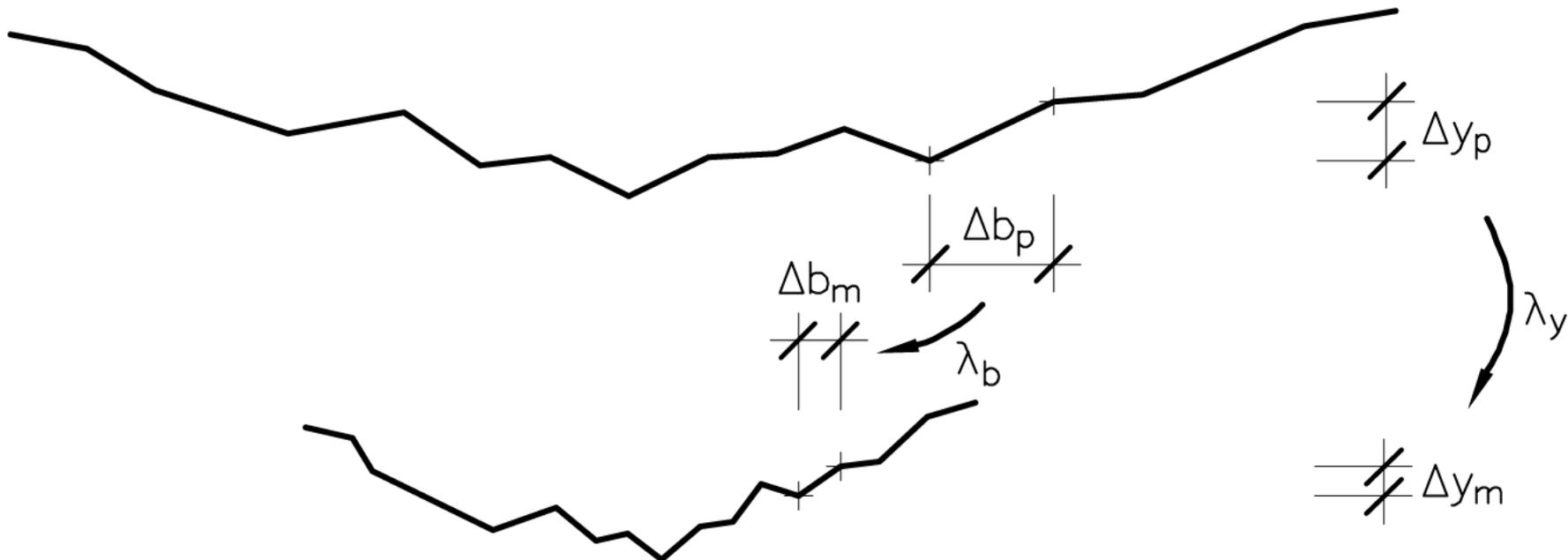
plantas según teoría de Kouwen

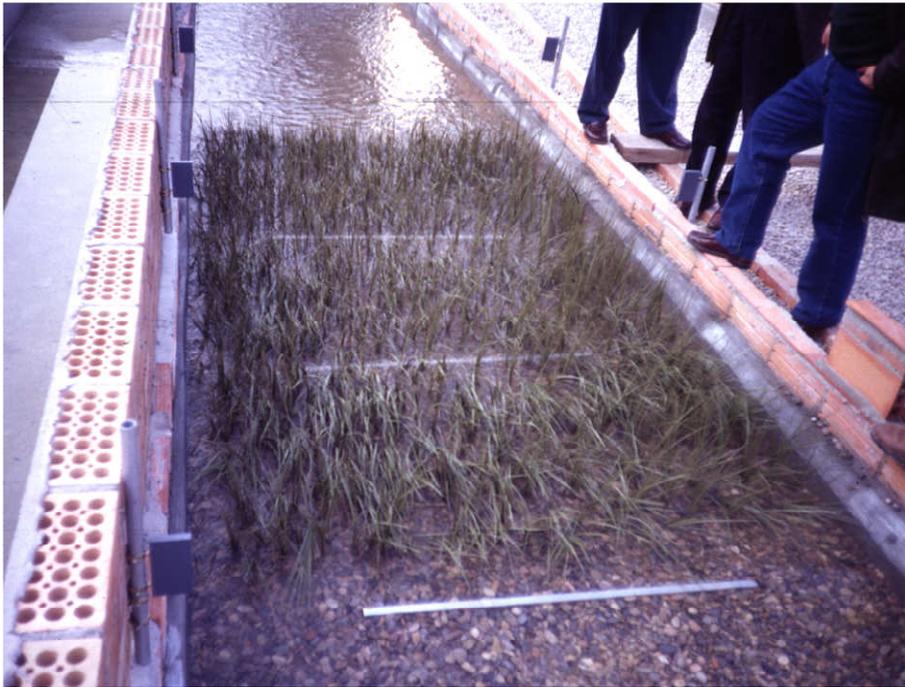
modelo geoméricamente distorsionado

- se pierde la semejanza geométrica: atención a flujo 3D. *Es como si fuera 2D*
- las pérdidas de energía localizadas (función de la geometría) mal representadas: cambios de sección, curvas...
- el radio hidráulico en la fuerza de rozamiento $(f/4R_h)(v^2/2g)$ depende del calado

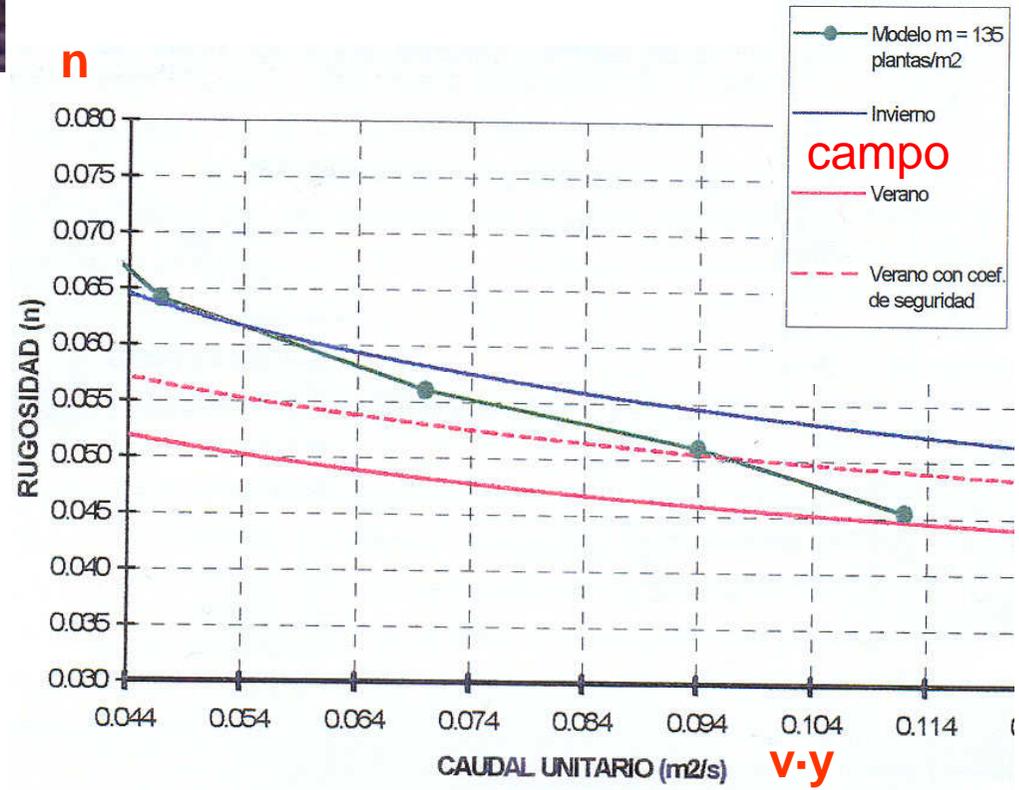
pero **necesario** porque:

- se gana precisión en vertical (niveles)
- aumenta la velocidad media y la turbulencia
- el modelo no ha de ser *extremadamente* liso para representar el prototipo



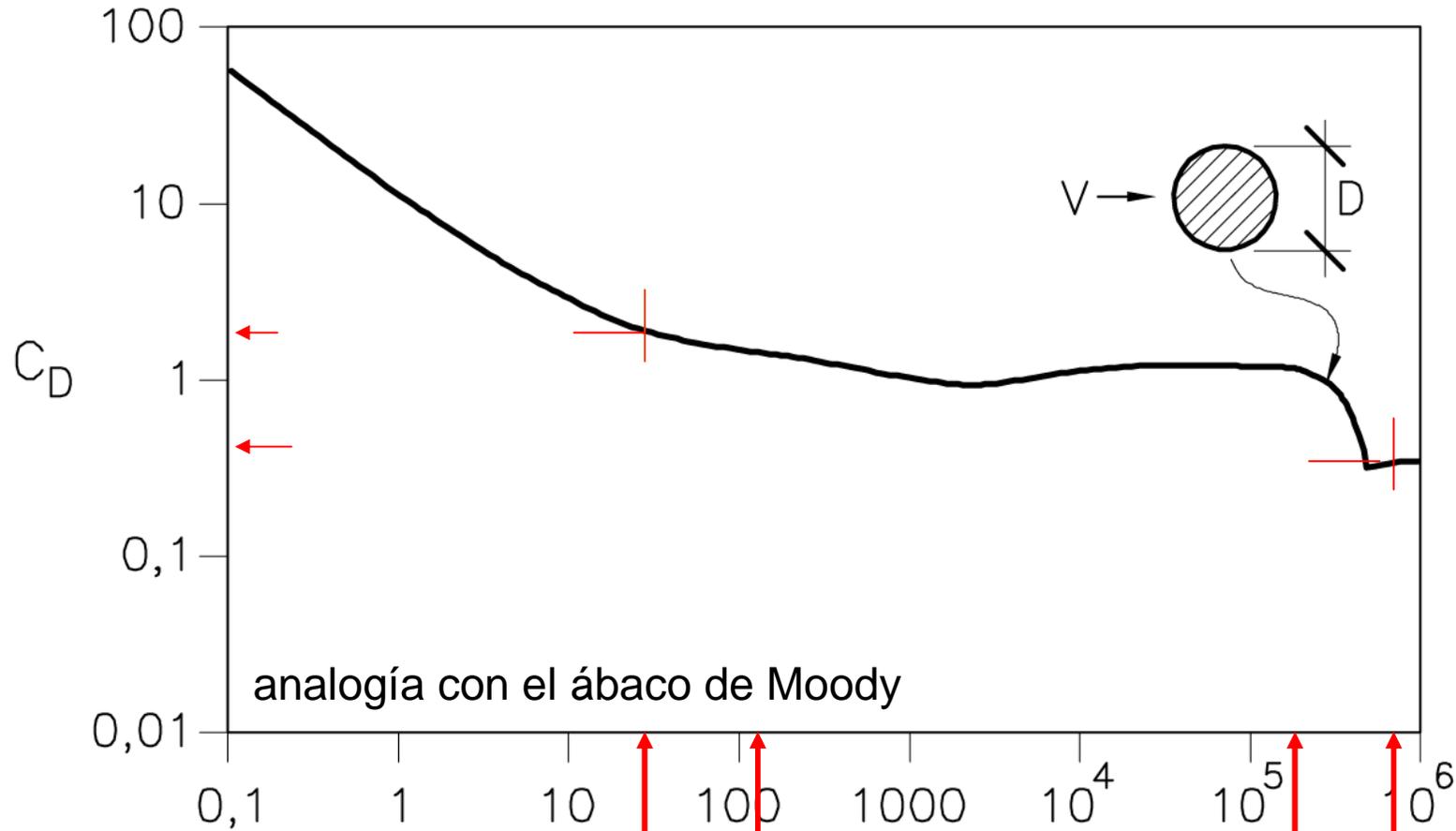


semejanza de las plantas con elementos flexibles de plástico



gracias a distorsión de 2.5, las plantas muy flexibles en la realidad se representaron por medio de plástico bastante flexible. **Sin distorsión deberían ser tan flexibles que sería impracticable.**

efecto de escala de la fuerza de arrastre = resistencia al flujo de las plantas, asimilado al caso de un cilindro $F = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A$.



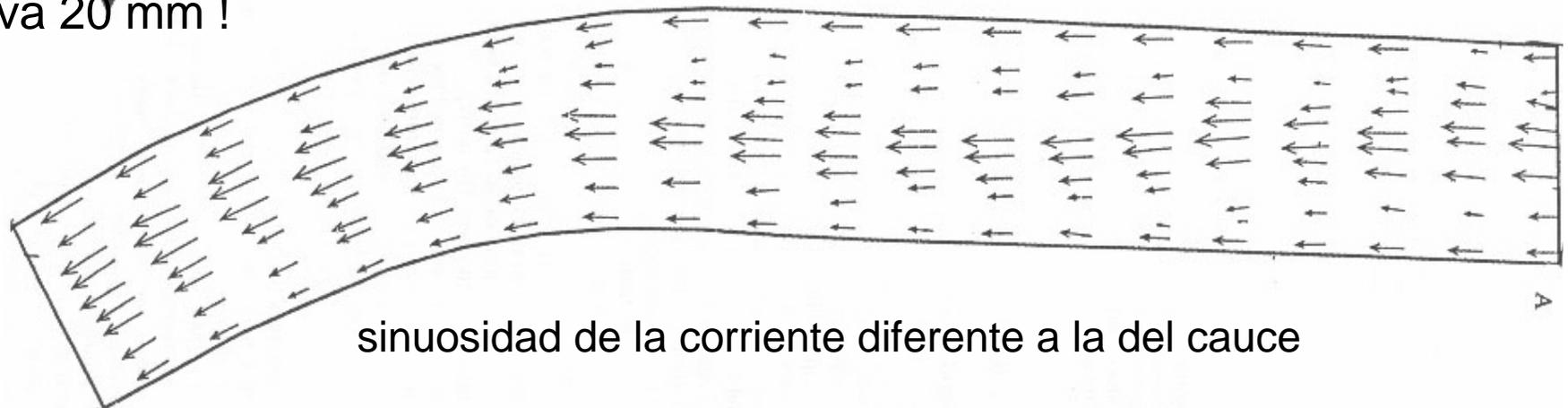
$\lambda_{Re} = \lambda^{3/2}$ en sem. Froude \rightarrow modelo $Re = \frac{VD}{\nu}$

prototipo

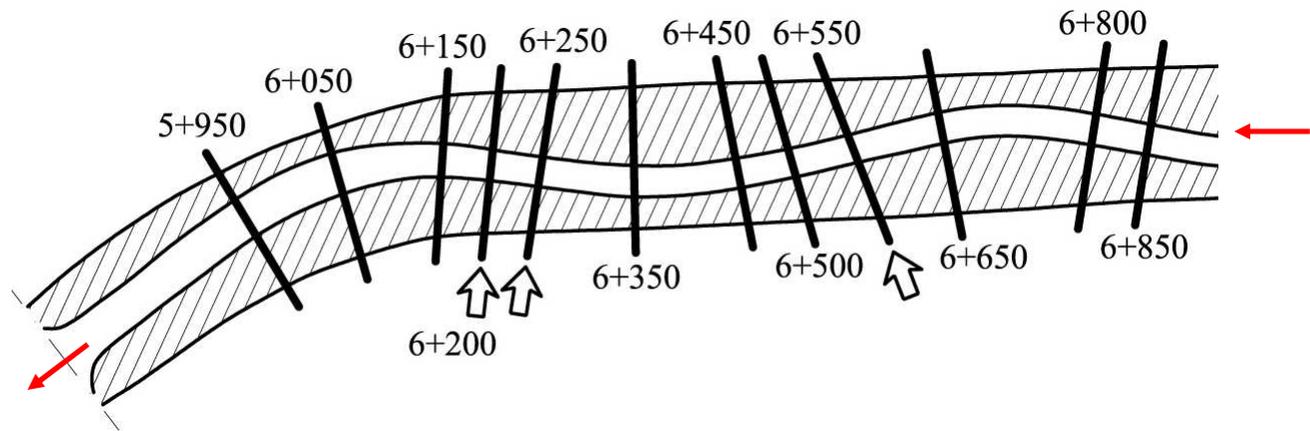
recuperación ambiental del río Besós



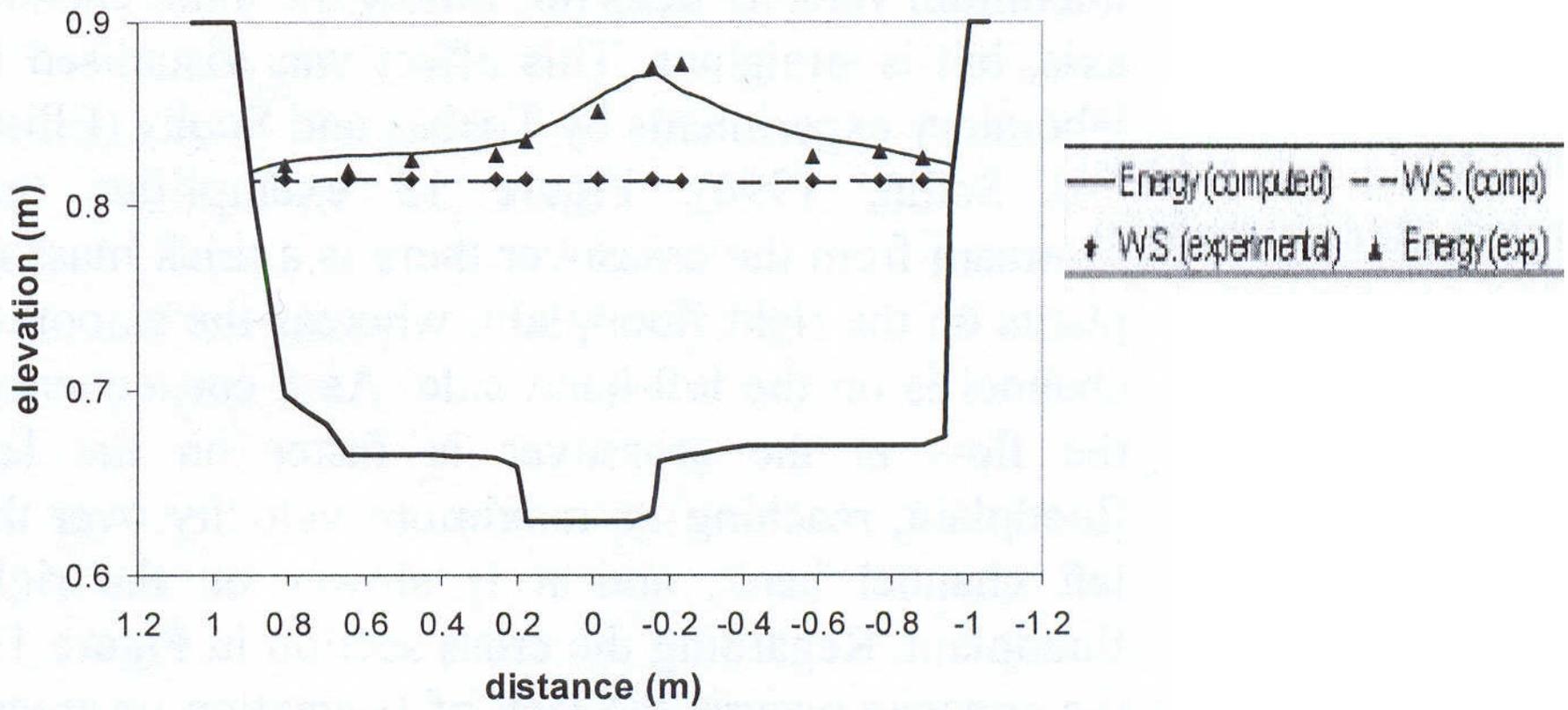
¡ grava 20 mm !



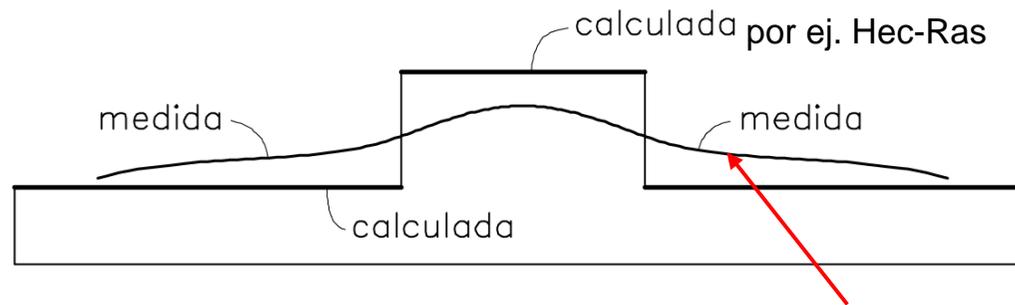
sinuosidad de la corriente diferente a la del cauce



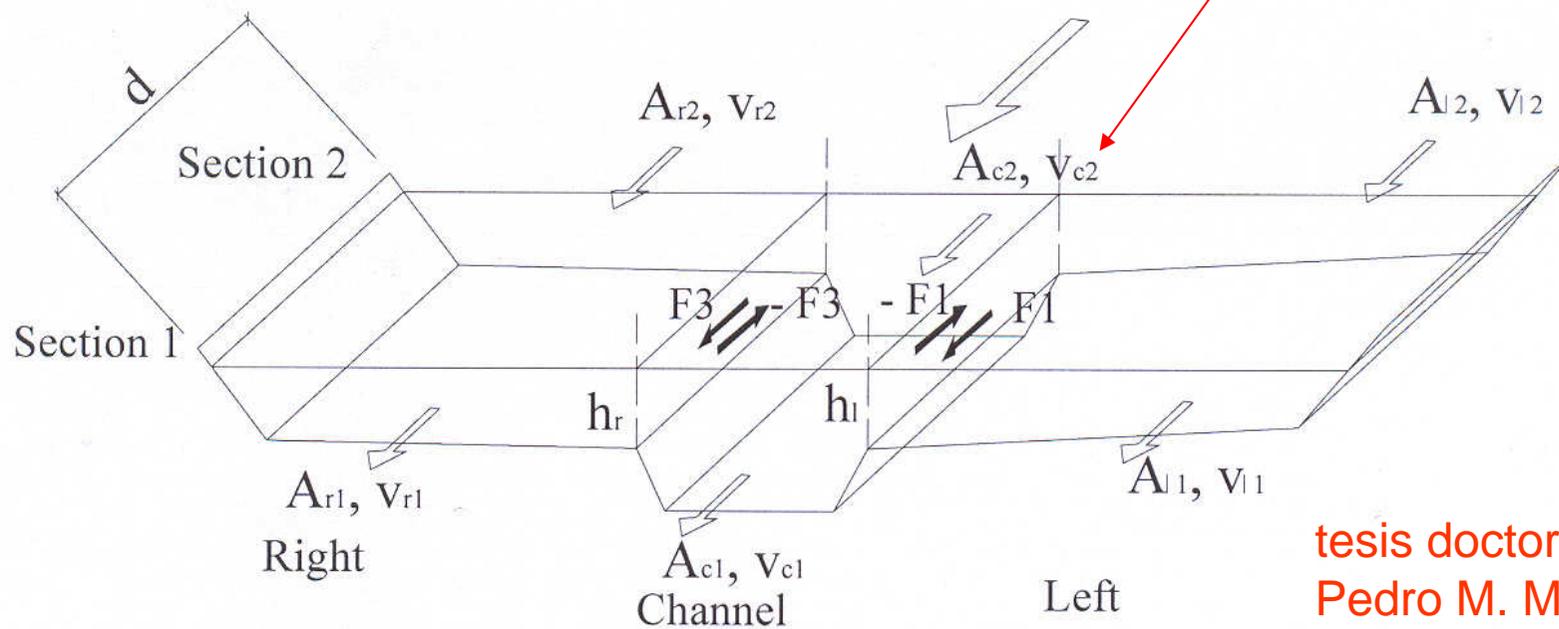
Section 6+500



modelo \longrightarrow investigación experimental

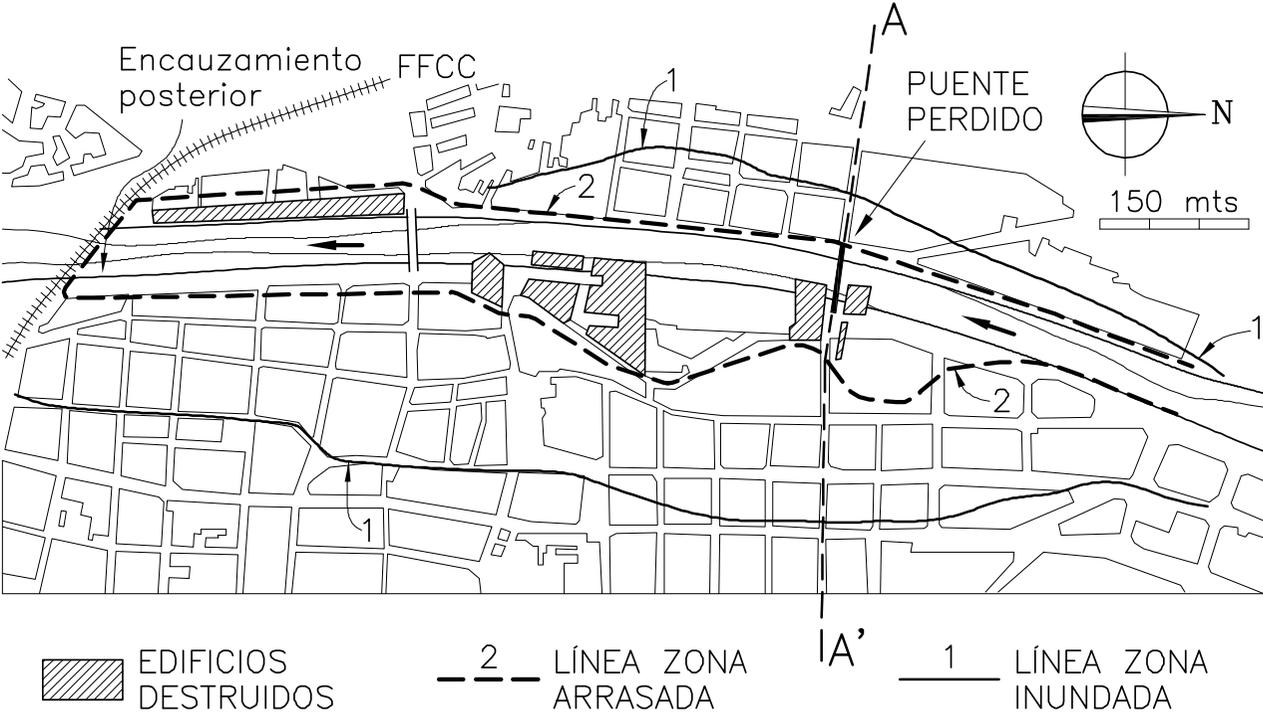


LDM: método de distribución lateral
Fuerzas en la superficies fluidas



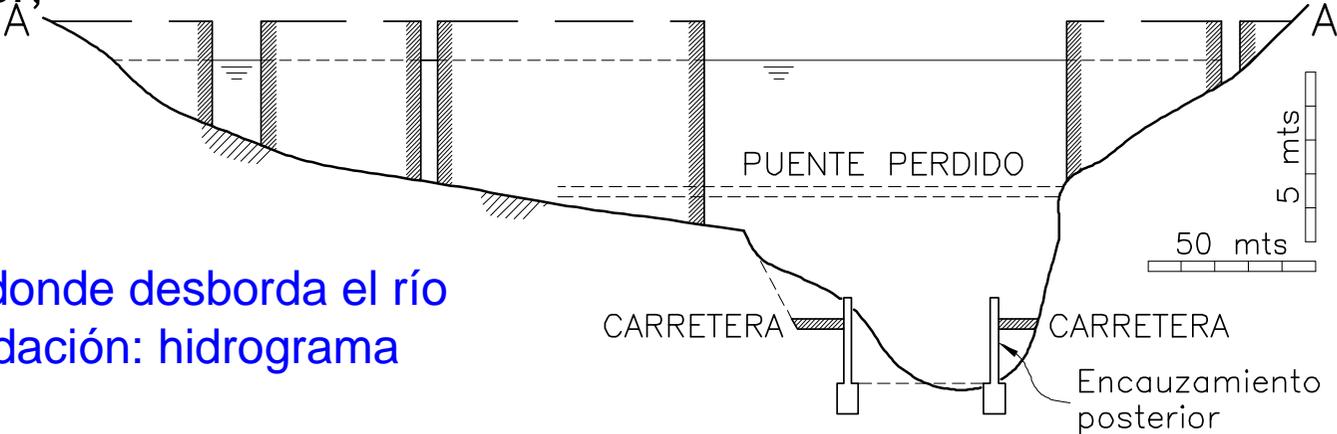
tesis doctoral
Pedro M. Moreta

modelos físicos de inundación urbana, también distorsionados, con más motivo por la gran extensión horizontal. Reproducen edificaciones, calles, etc.

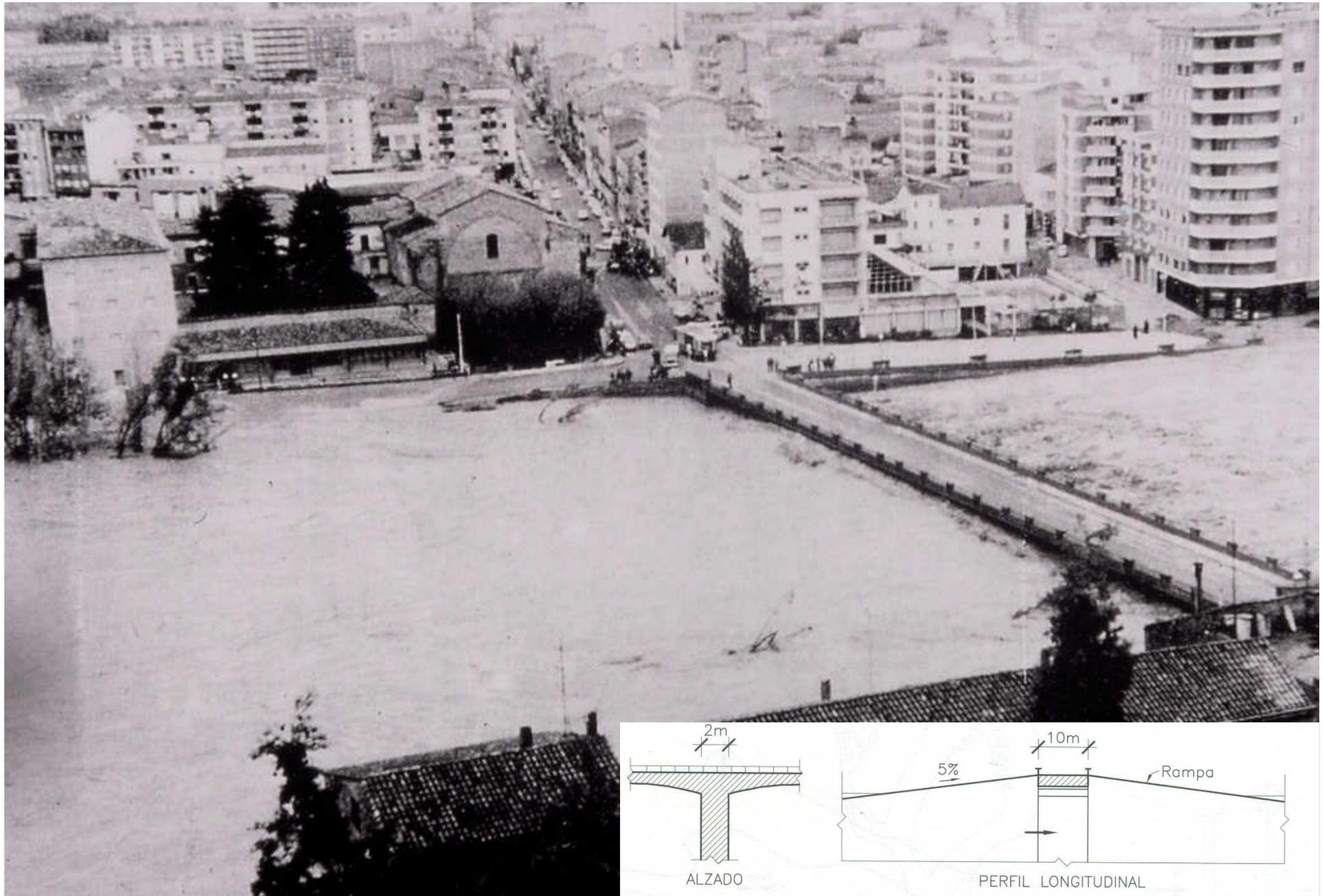


modelo propuesto para estudiar la inundación en la ciudad de Rubí (50.000 habitantes), a calibrar con evento histórico. Distorsionado,

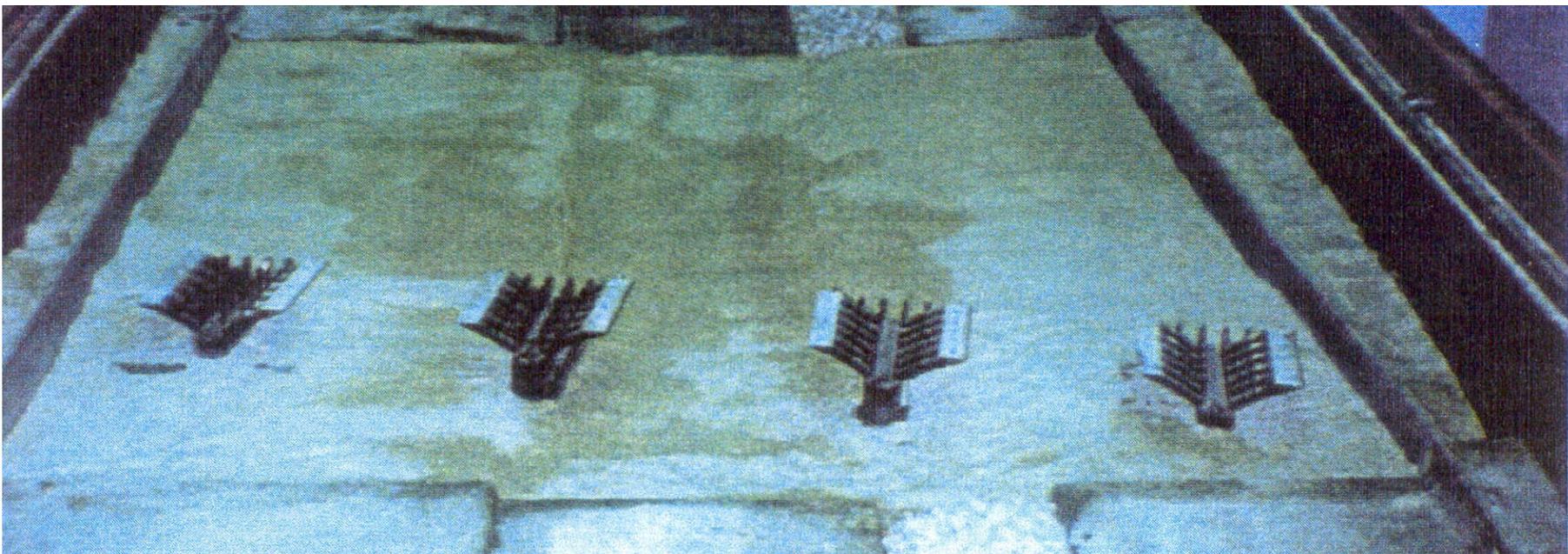
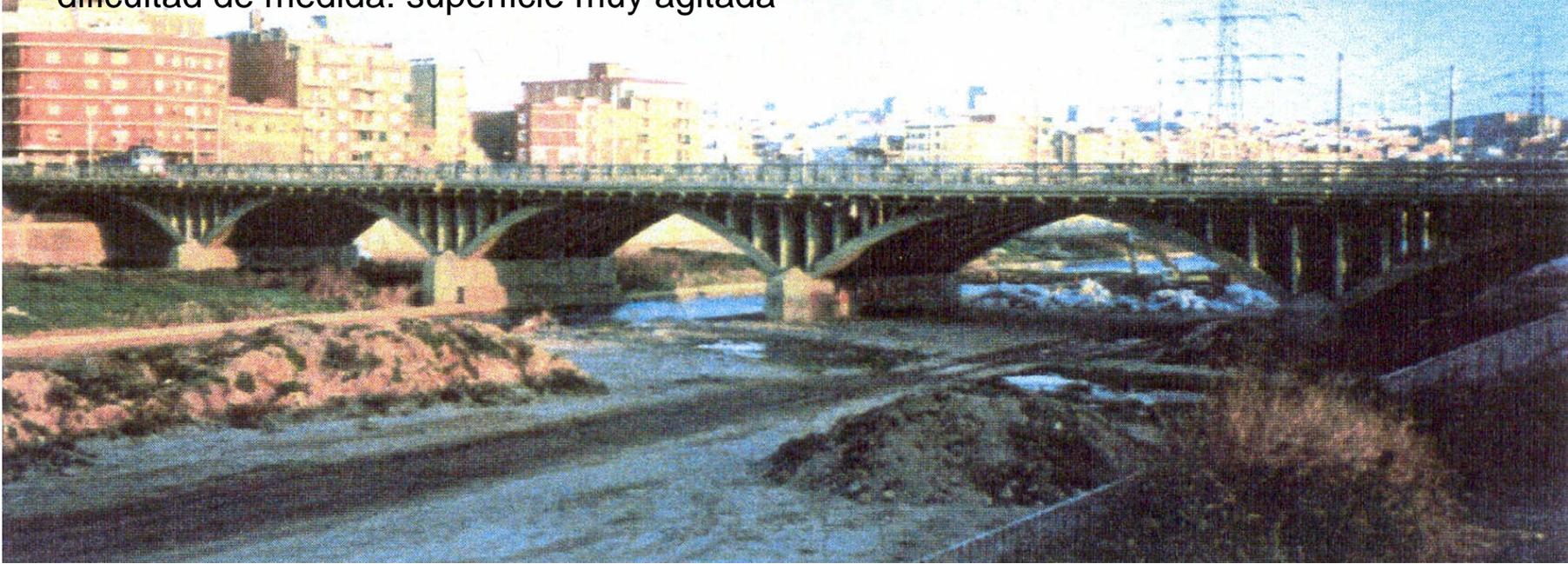
si se busca saber por donde desborda el río y como avanza la inundación: hidrograma



para determinar la sobreelevación en un puente, problema fuertemente 3D, el modelo físico de lecho fijo (y no distorsionado) no tiene rival



modelo $\lambda = 58.6$ sin distorsión, del puente de Santa Coloma (río Besós) localmente erosionable, $Q = 2.400 \text{ m}^3/\text{s}$, longitud del tramo estudiado: 400m; puente con arcos y tirantes; dificultad de medida: superficie muy agitada



$\lambda = 55$ sin distorsión



$Fr > 1$

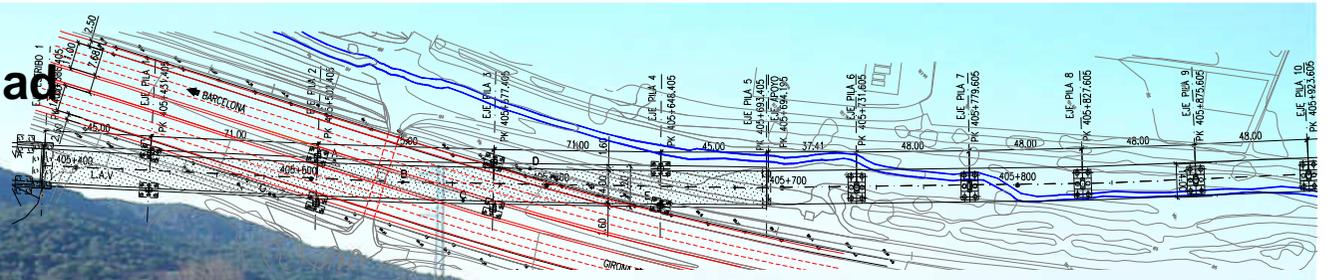


ascensión

sobreelevación



Ferrocarril de alta velocidad



29 12 2004

Modelo $\lambda = 40$ simplificado en geometría.
Objetivo: coeficientes de pérdida de carga en las pilas para introducir en modelo Hec-Ras.



1 1 2005

Modelos Físicos sobre ríos:

1.- modelos de estructuras hidráulicas en ríos:

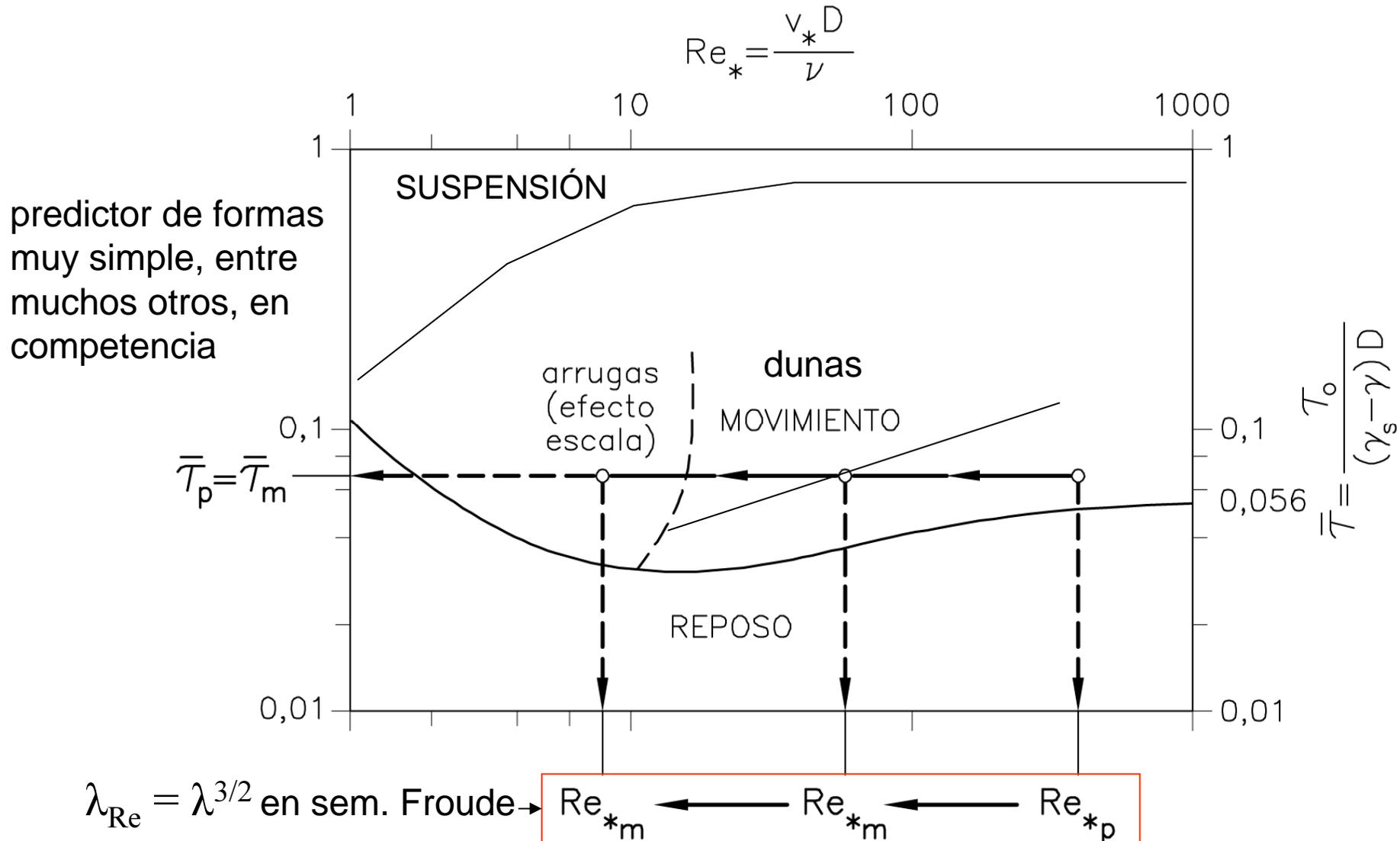
2.- modelos de tramos fluviales en lecho fijo:

3.- modelos de tramos fluviales en lecho móvil: 3ej.

4.- modelos de fenómenos locales de socavación

semejanza del lecho móvil

el parámetro de Shields (tensión de corte adimensional) debe ser igual en modelo y prototipo o $\lambda_\tau = 1$, para que el inicio del movimiento y el transporte sean semejantes, pero **¿y las formas de fondo?**



problemas

- a las escalas geométricas normales, el material del modelo debería ser tan fino que es impracticable; p.e. 5 mm → 0.05 mm
- si la tensión adimensional no ha de cambiar $\lambda_{\Delta\rho}\lambda_D = \lambda_y$. Cabe una **distorsión** de la densidad $\Delta\rho$ y tamaño del material D en el modelo.
- un material más ligero pero más grueso exagera la resistencia al flujo por grano, que se suma a la resistencia por formas de fondo, pero ¿acaso ésta será igual en modelo y prototipo?
- ¿y si además es necesario distorsión geométrica para hacerlo viable?
- para colmo, hay que dar una condición de contorno arriba en caudal sólido → SON MODELOS CUALITATIVOS, más bien útiles en sentido comparativo
- no se puede estudiar en rigor ni el transporte en suspensión ni la erosión de orillas



modelo de lecho móvil con material más ligero:

carbón, $\rho_s/\rho = 1.25$ en lugar de 2.65 para sedimento natural.

Otros: bakelita (1.40), PVC (1.35), perspex (1.10), poliestireno (1.04), cáscara de nuez,...

río Magdalena (canal del dique)

Universidad Nacional, Bogotá

modelo empírico en el sentido de buscar que se reproduzca un episodio.

recuperación ambiental del río Besós

objetivos : influencia del carrizo en la capacidad y la socavación (humedal)

$$\lambda_x = 75, \lambda_y = 30 \quad \text{distorsión} = 2.5$$

Modelo de lecho móvil : igualdad de $\tau / (\rho_s - \rho) D$, $D = 1 \div 2 \text{ mm}$
Intento fracasado
ensayos en lecho vivo y recirculación

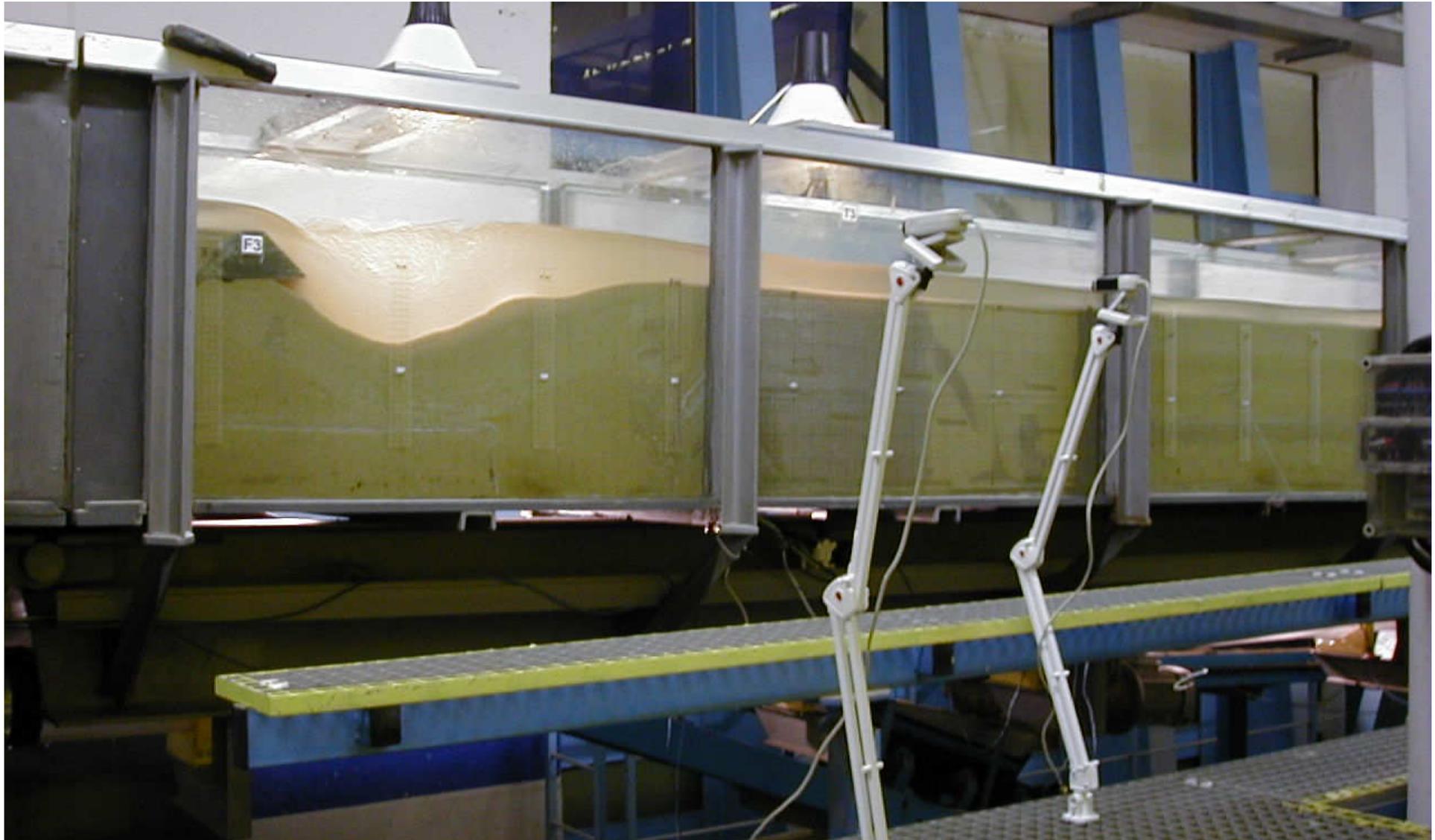
$\lambda_n > 1 \rightarrow$ modelo demasiado liso \rightarrow
régimen rápido y antidunas (irreal)
no se consigue simular un cauce principal





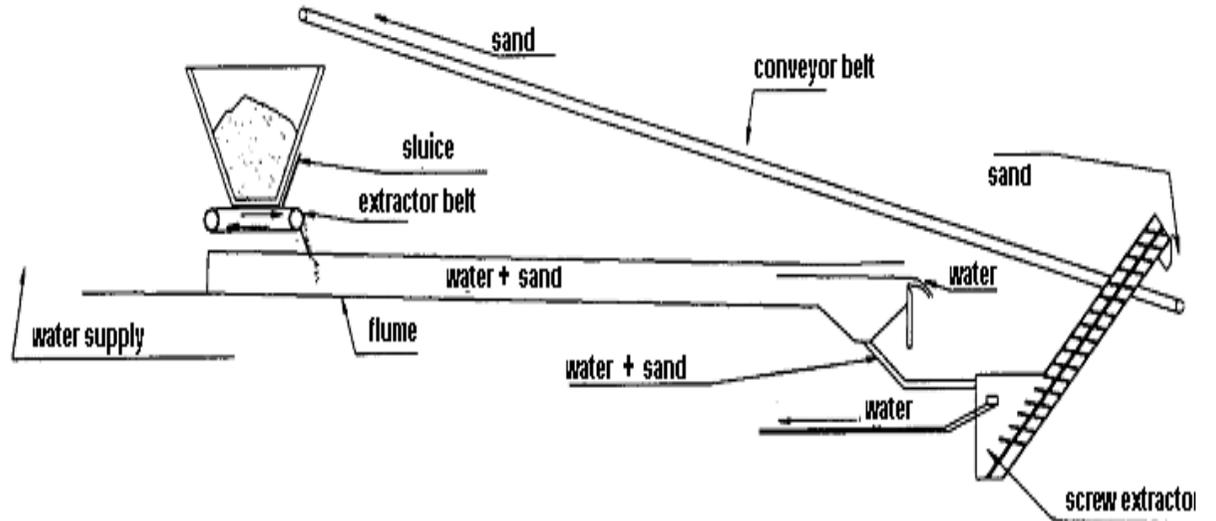
Control del perfil del lecho en ríos efímeros por medio de umbrales de fondo o traviesas: se presta a un modelo bidimensional (o por unidad de anchura: corte por un plano vertical del problema)

escala $\lambda = 12.5$; arena a escala de la grava del prototipo, pero uniforme y con recirculación del material



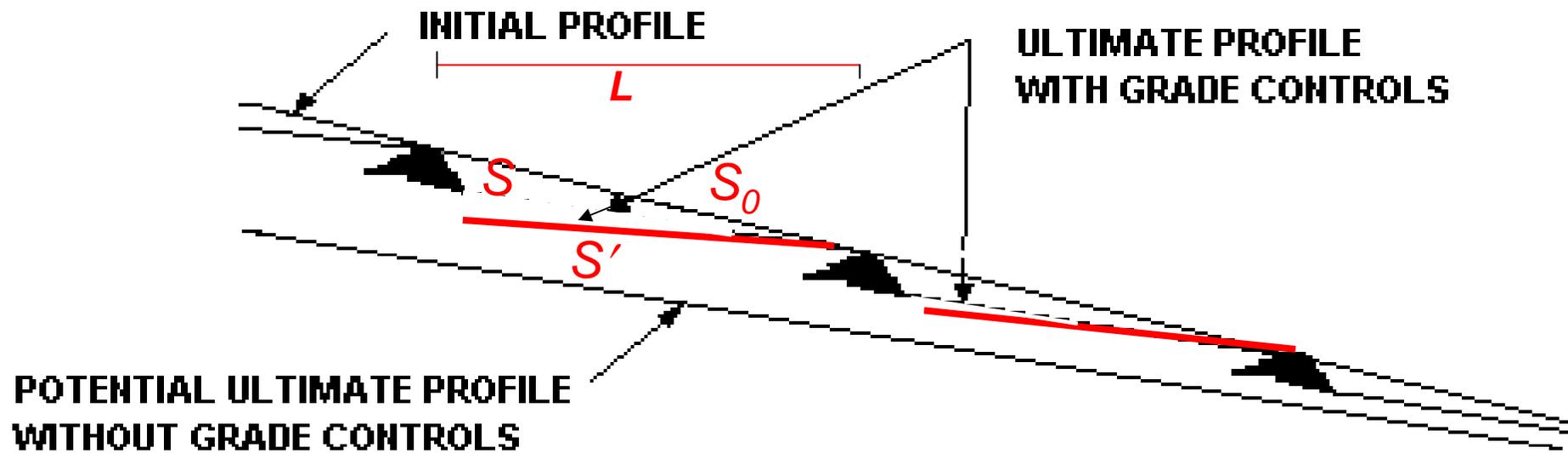
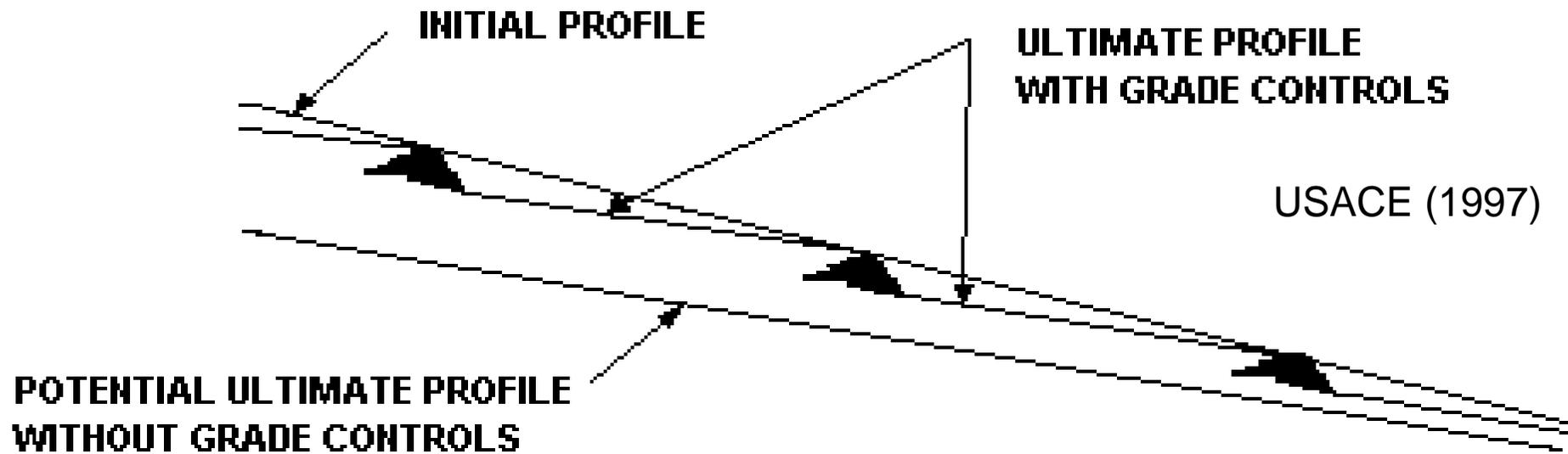
Experimentos: 111 ensayos (65 con traviesas + 46 sin).

Pendientes: 1 – 3%, caudal sólido Q_s : 200 -300 g/s, caudal Q : 10 - 25 l/s



alimentador (tolva) y cinta transportadora:
caudal sólido arriba = caudal que sale

Conclusión de este modelo



$$S' = 0.08 S_0 + 0.92 S - \text{constant} / L$$

Próximo a los modelos de lecho móvil son las **investigaciones experimentales** en problemas de transporte de sedimento y **morfodinámica**.



Purga de sedimento en embalse: I- formación del depósito sedimentario



cauce piloto

presa que ha formado el depósito y se retira



II – arrastre controlado de sedimento por el flujo base

cauce excavado por el agua. Tesis doctoral en curso de Carles Ferrer; ensayos en la UIUC (EE.UU.)



Resistencia al flujo, formas de fondo y transporte de fondo en ríos efímeros torrenciales (gran pendiente), de arena y grava. **Tesis doctoral en curso de Francisco Núñez**



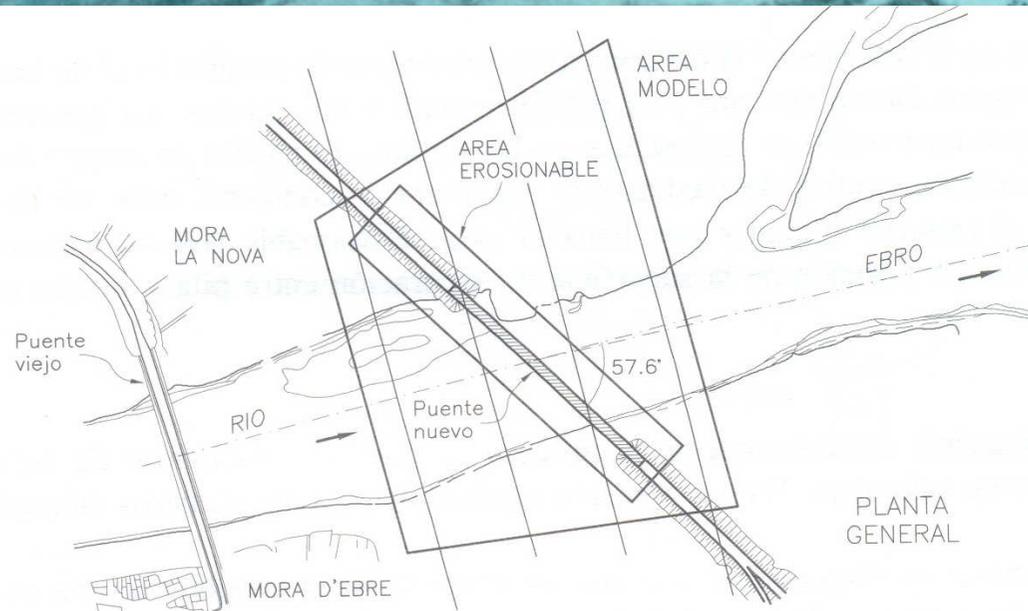
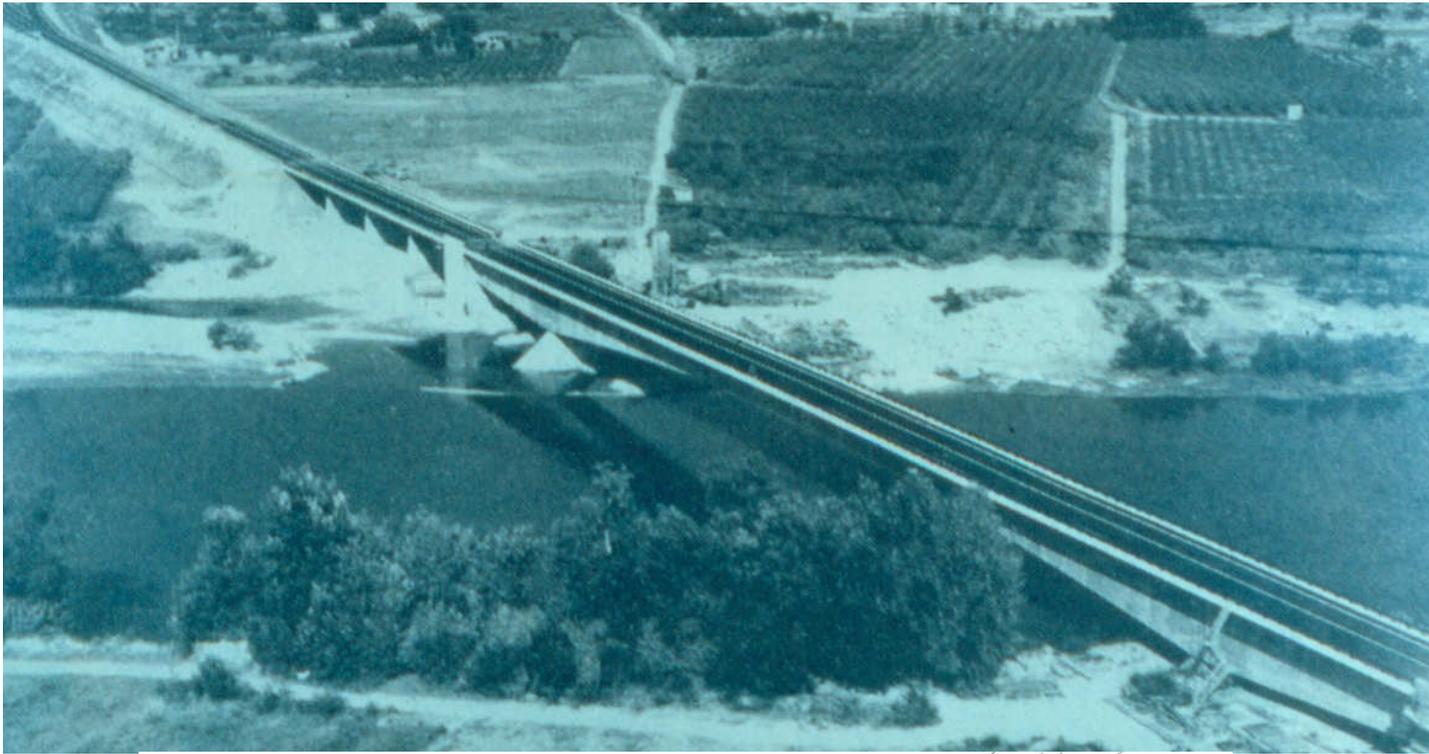
Modelos Físicos sobre ríos:

1.- modelos de estructuras hidráulicas en ríos:

2.- modelos de tramos fluviales en lecho fijo:

3.- modelos de tramos fluviales en lecho móvil:

4.- modelos de fenómenos locales de socavación: 2ej.



Puente nuevo de Móra d'Ebre (1993); 83100 km², $Q_m=475$ m³/s, $Q_{proyecto}=6455$ m³/s

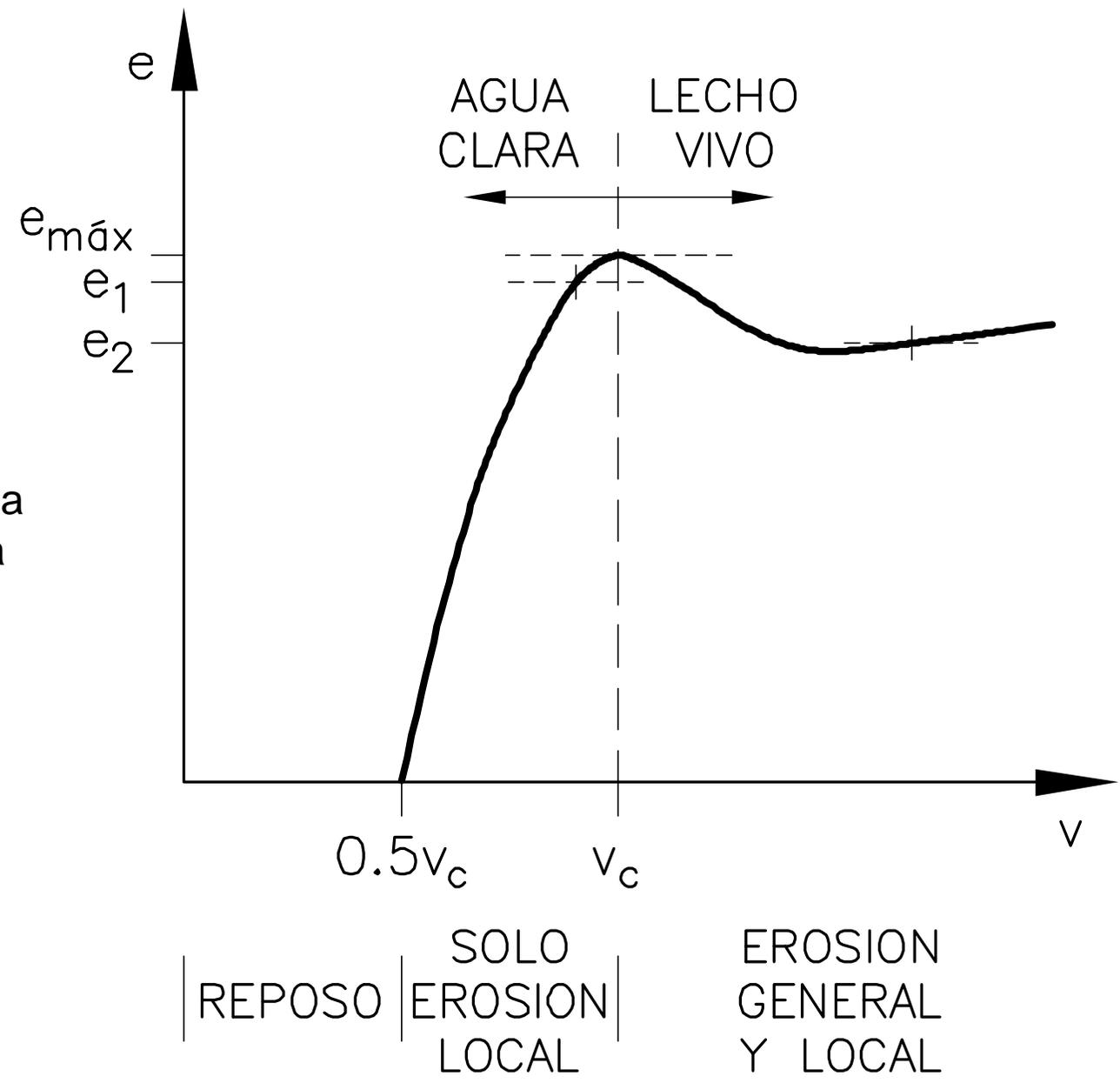


pilas 9.60 x 18.0 m, forma de tienda de campaña, alineación oblucia

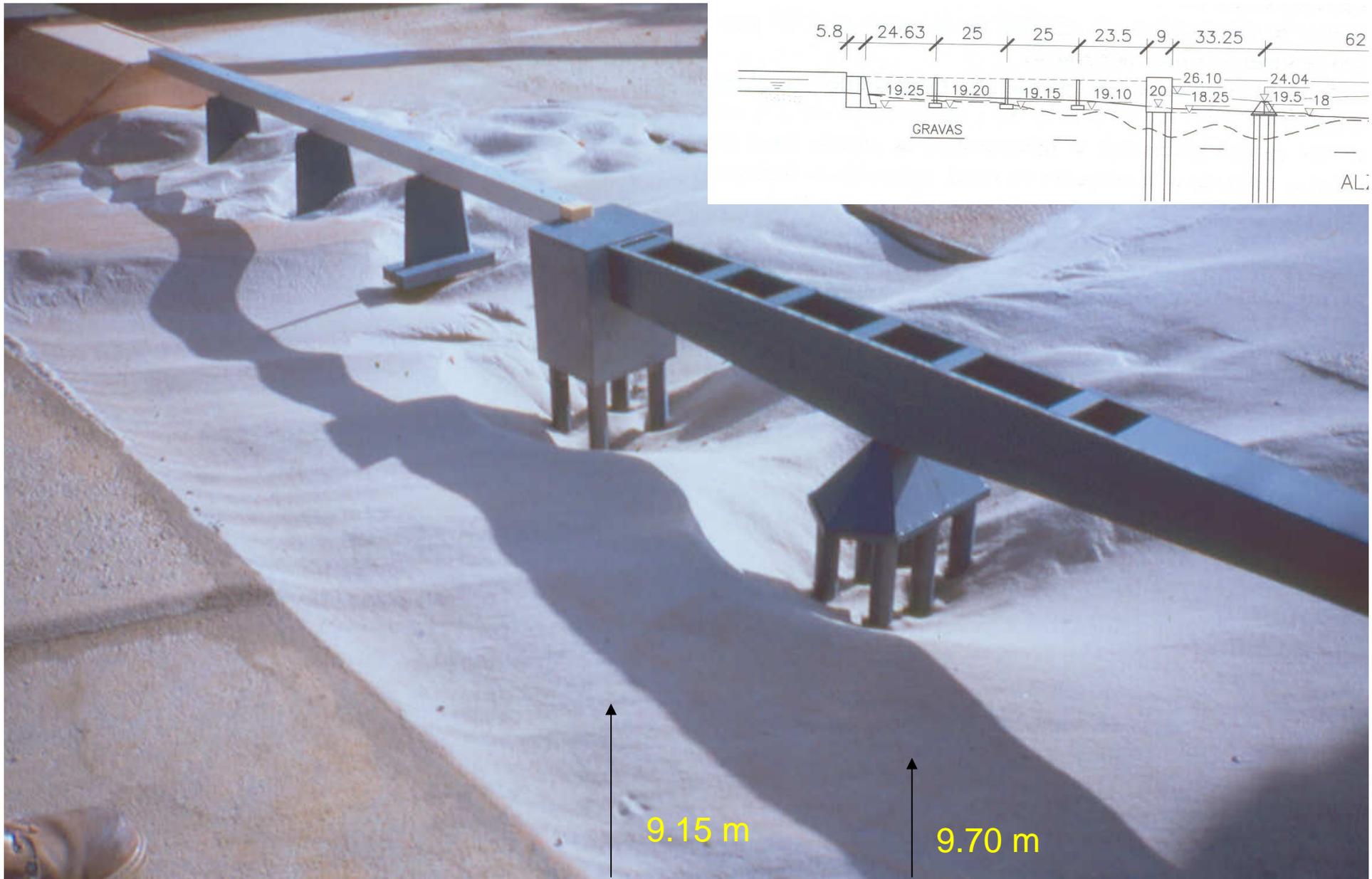


lecho del río Ebro: gravas $D_{50} = 35$ mm

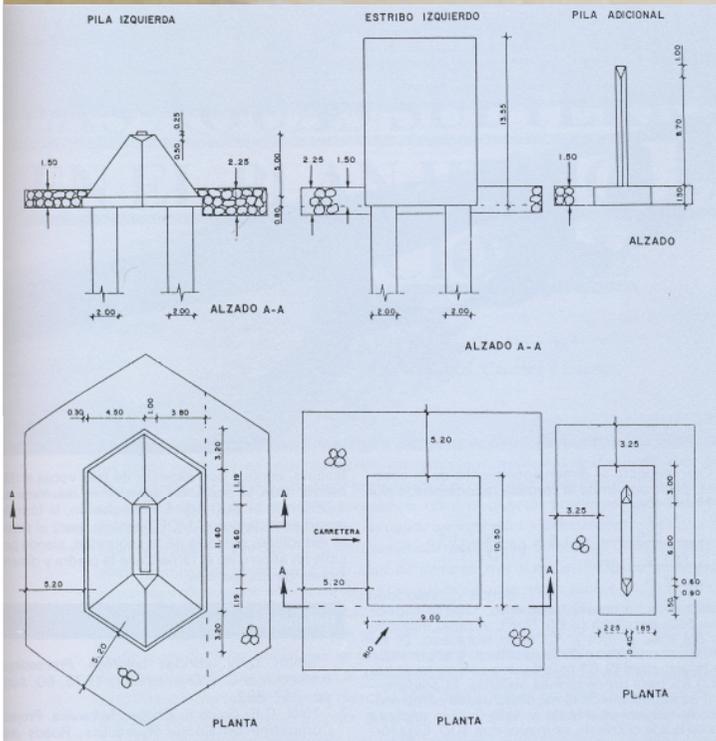
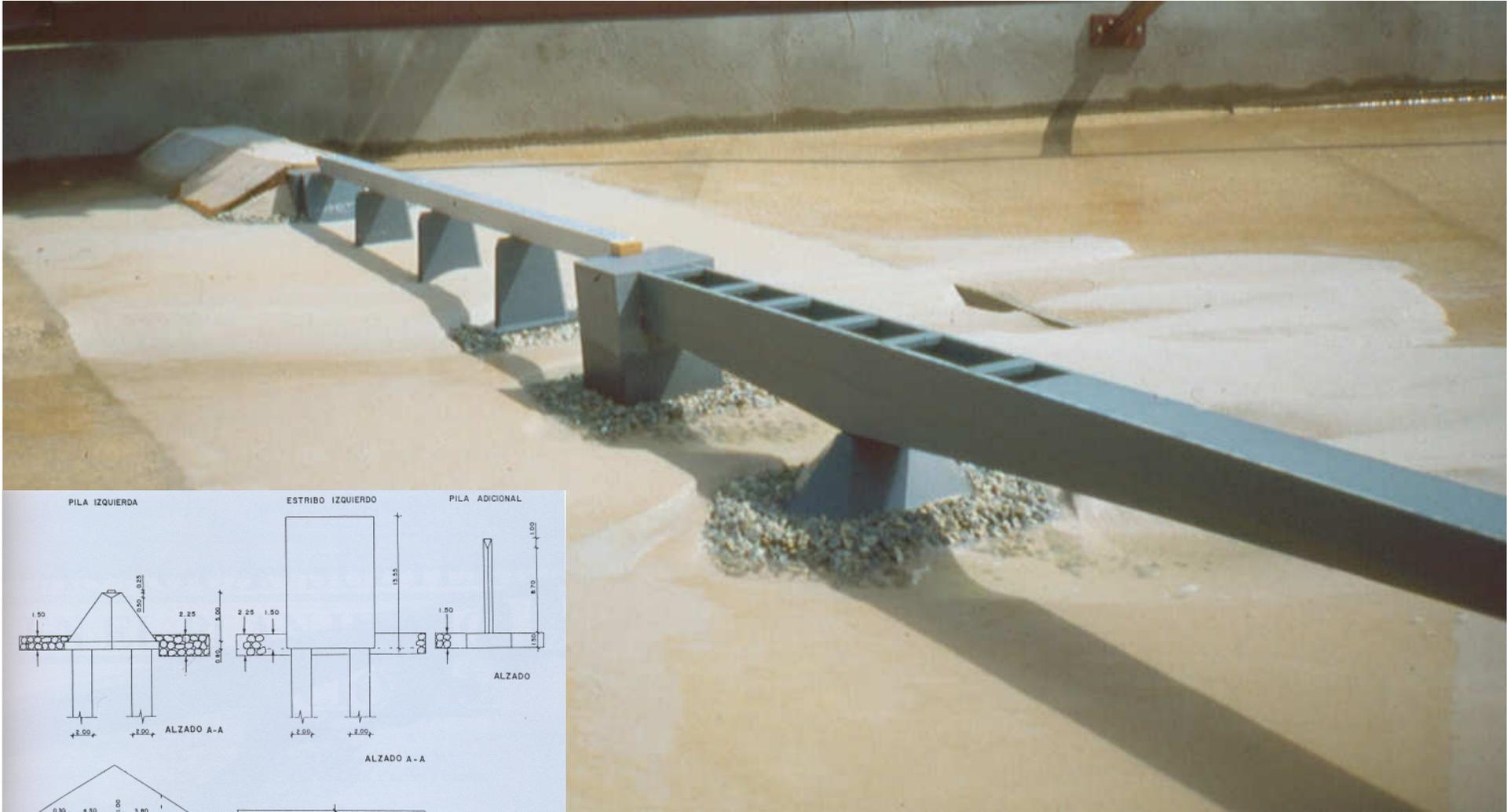
critério de semejanza



La erosión en agua clara es más lenta que en lecho vivo



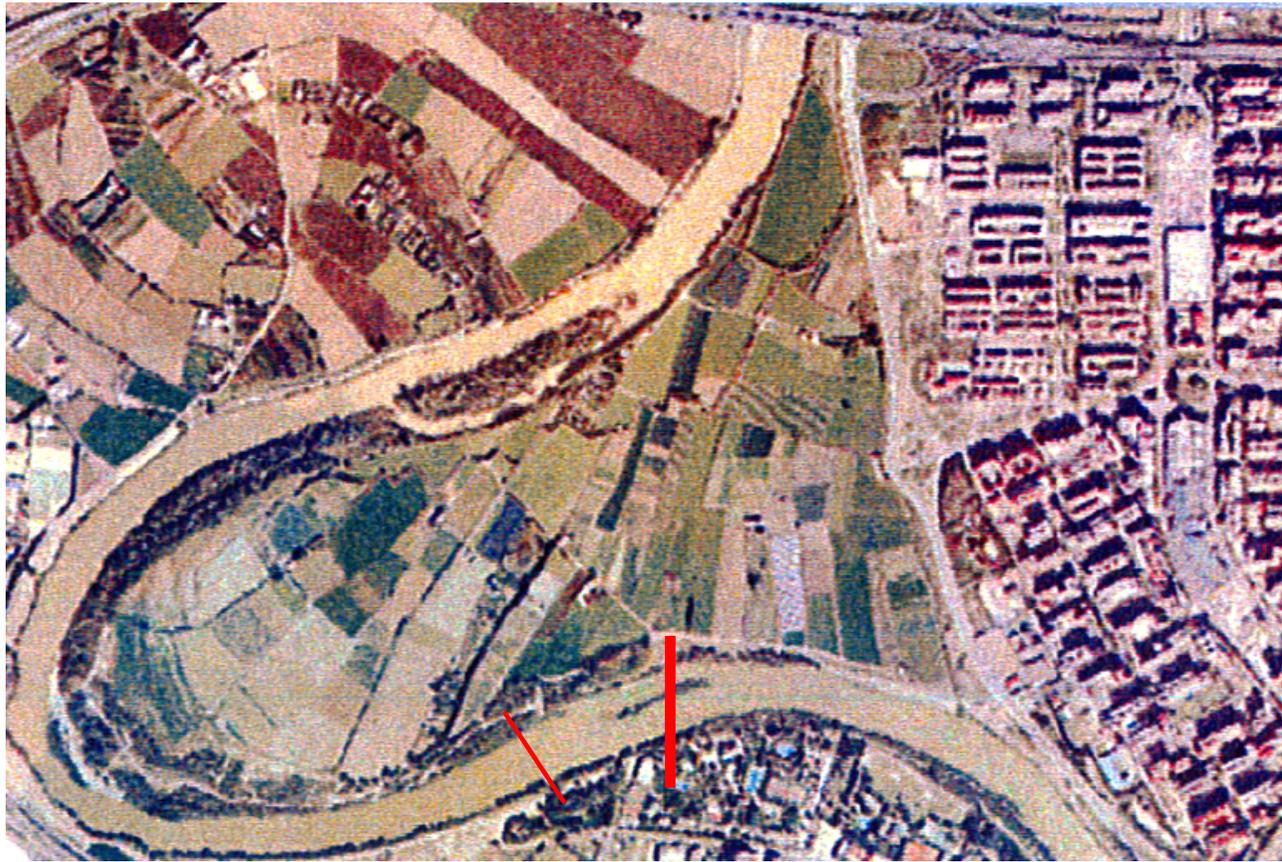
Modelo escala $\lambda=65$, localmente erosionable, semejanza de Froude, sin distorsión, arenas 0.81 mm en el umbral del movimiento para el caudal de proyecto.



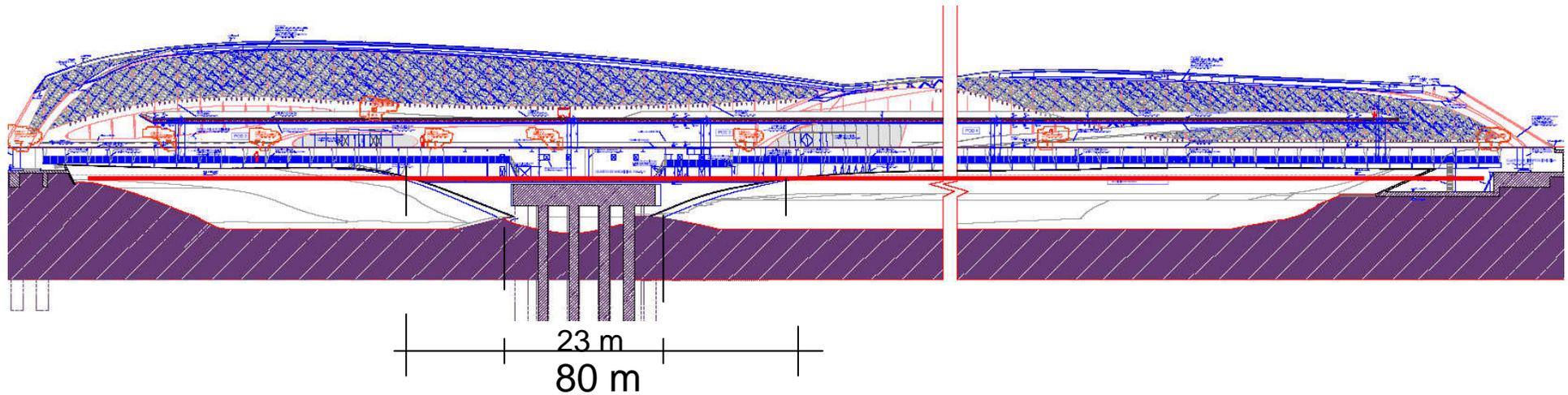
mantos de escollera 100-1000 kg

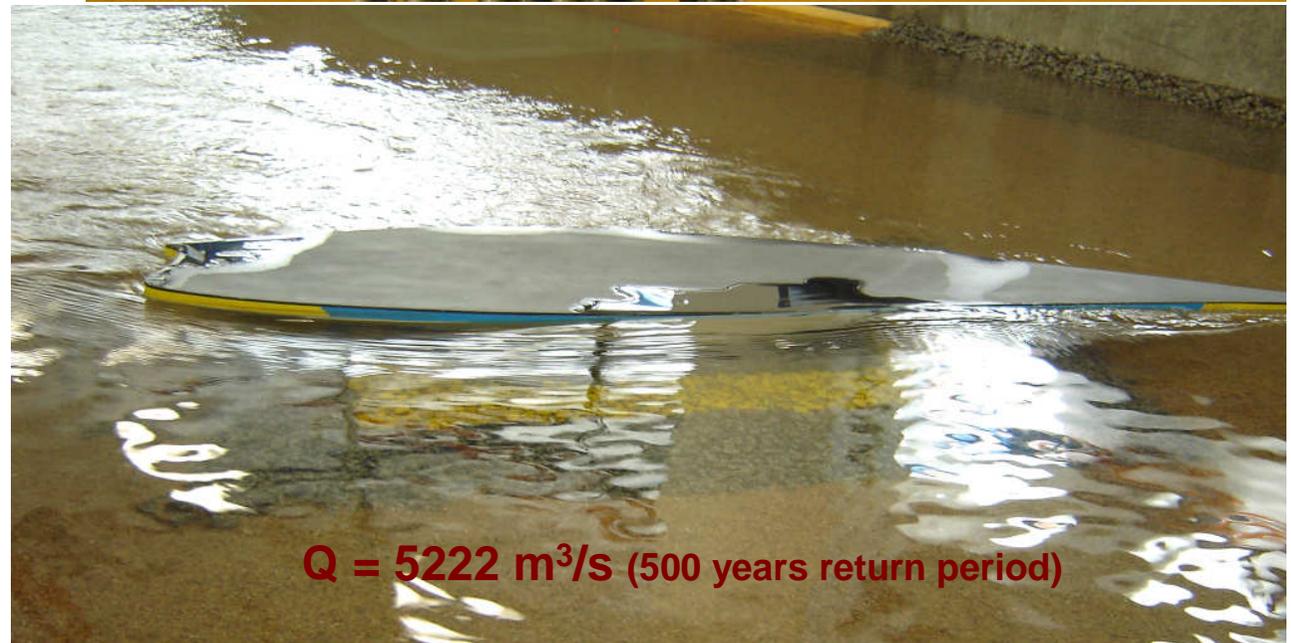
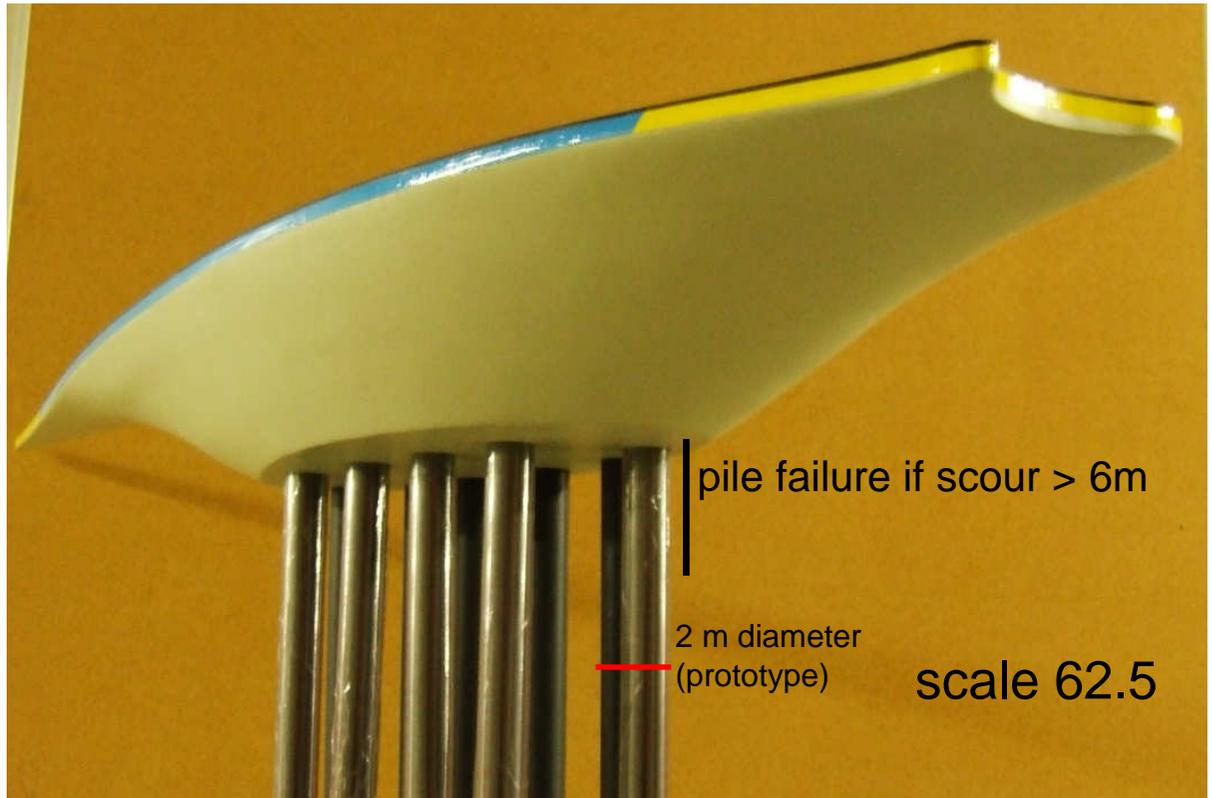
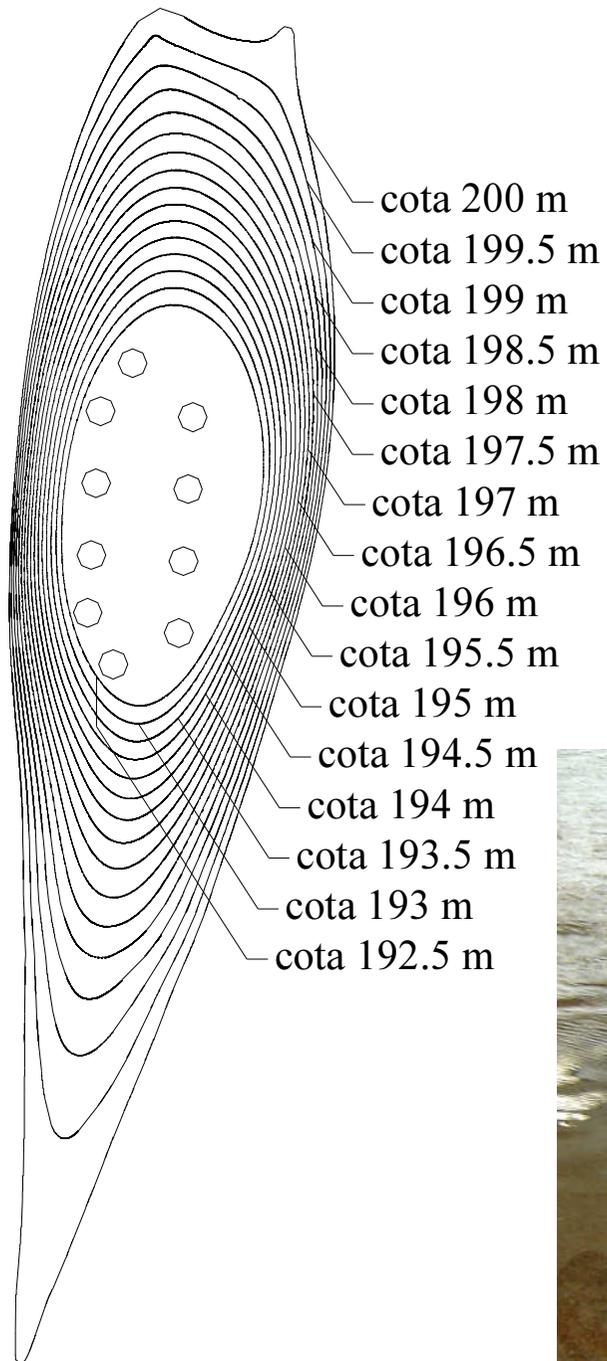


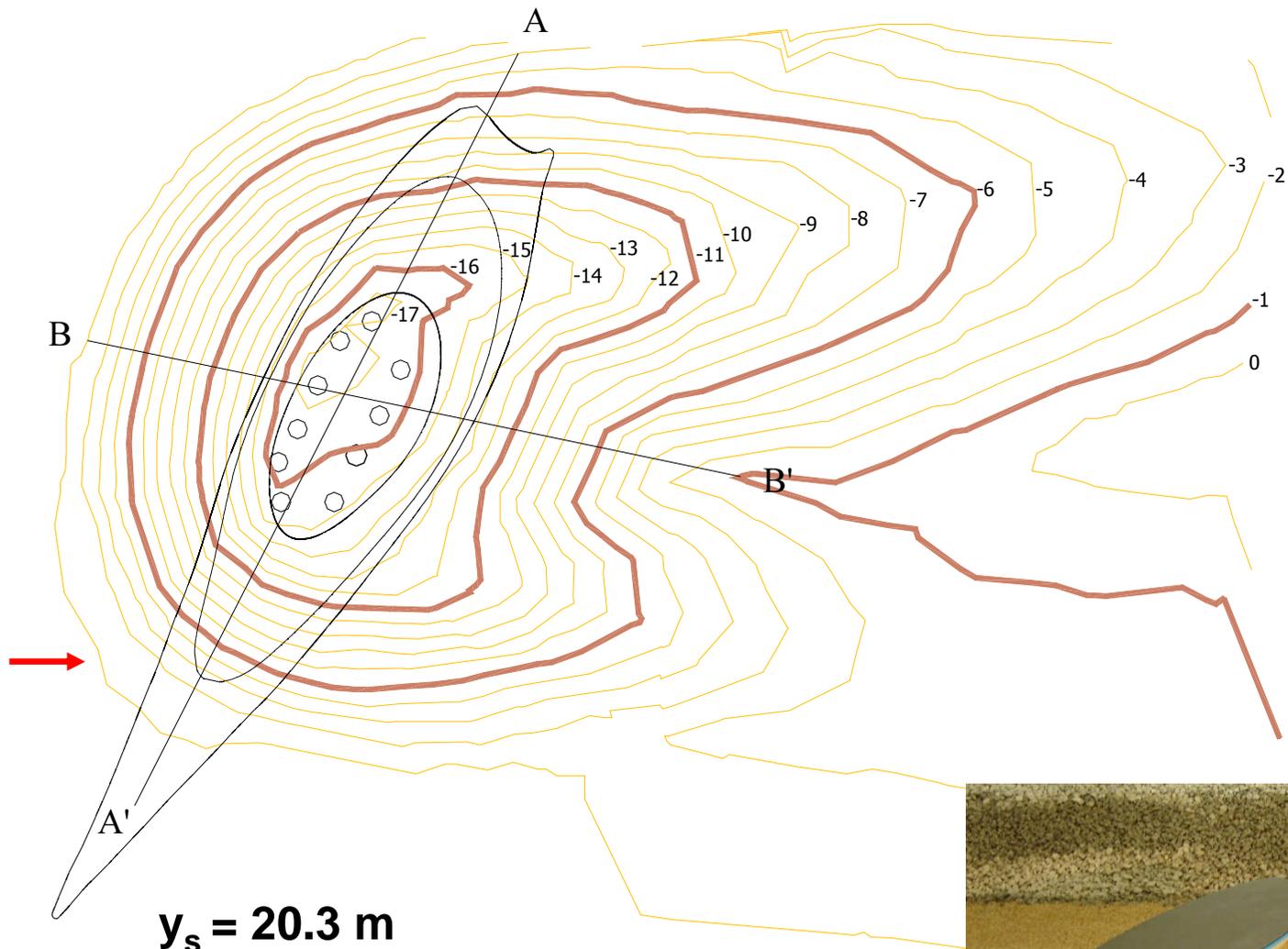
Puente Expo 2008 Zaragoza, río Ebro



Expo to open on June 15th 2008. Agreement to take some action on March 08

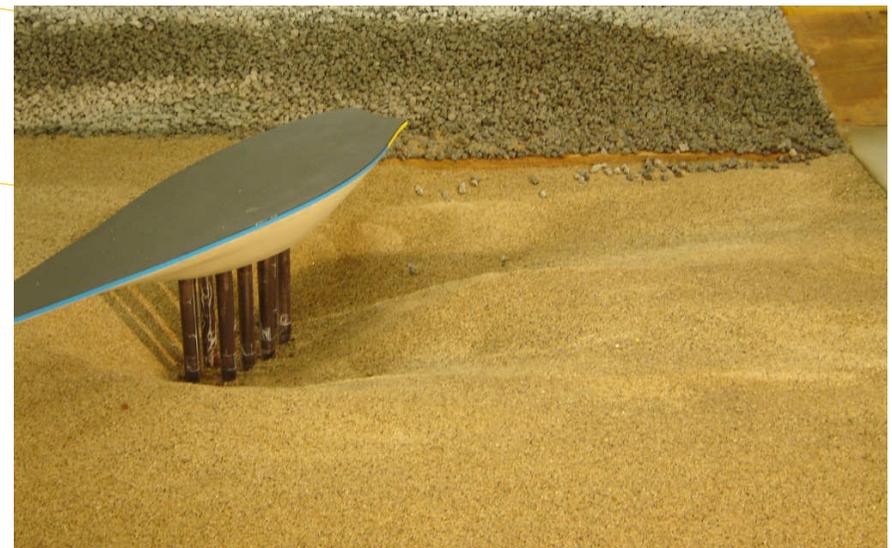






$D_{50 \text{ model}} = 1.28 \text{ mm}$
 $D_{50 \text{ prototype}} = 17 \text{ mm}$

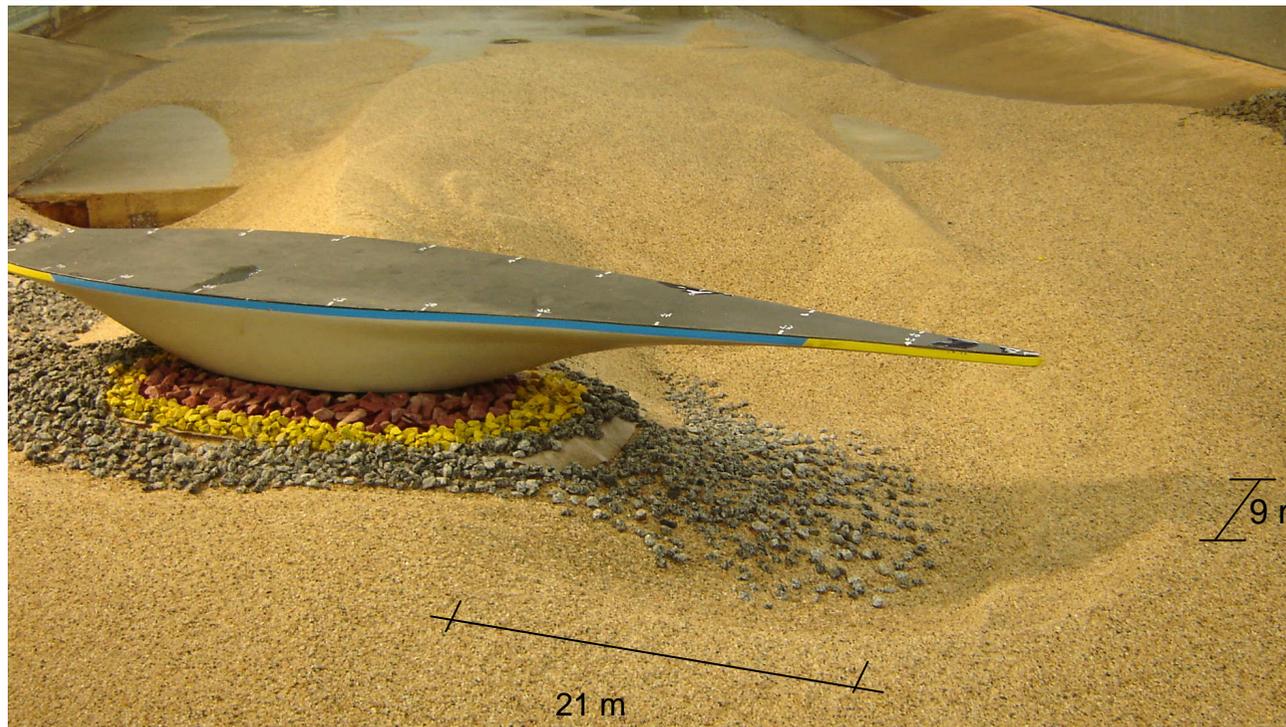
$y_s = 20.3 \text{ m}$
 scoured volume = $43,500 \text{ m}^3$
 scoured area > $10,000 \text{ m}^2$



Semejanza
de la
escollera y
el filtro



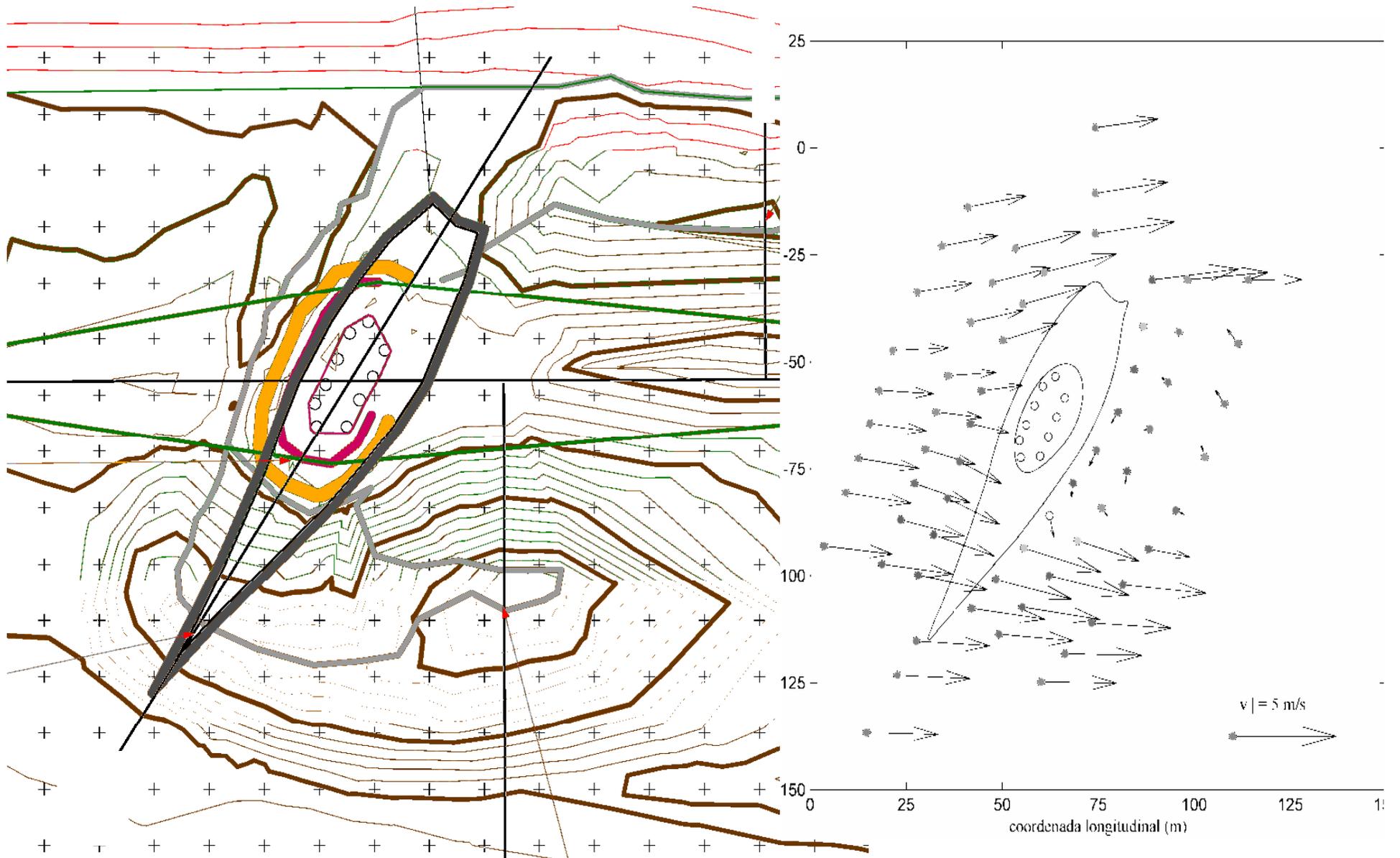
600 kg-riprap



$y_s = 15.0$ m

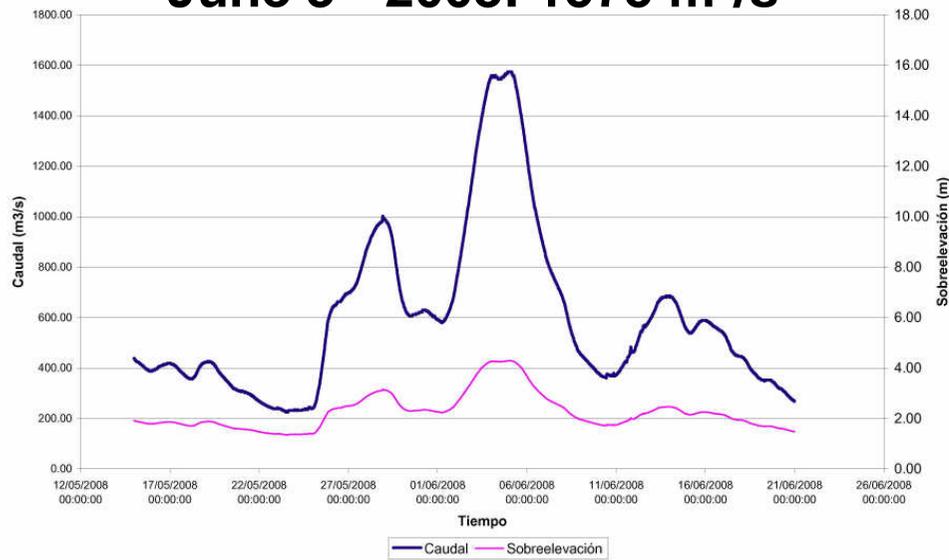
9 m

21 m



scoured volume $\approx 30,000 \text{ m}^3$

June 3rd 2008: 1575 m³/s



Conclusiones sobre Modelos Físicos de ríos:

- 1.- modelos de estructuras hidráulicas en ríos: *útiles para coeficientes de desagüe en estaciones hidrométricas; con alimentación de arena para estudiar sedimentación (azolvamiento), tomas,...*
- 2.- modelos de tramos fluviales en lecho fijo: *en geometrías prismáticas son raramente justificables ya hoy y menos en el inmediato futuro, frente a los modelos matemáticos. Sí útiles en flujo complejo, desbordamiento e inundación (pero atención a la distorsión vertical), en simulación de vegetación y escollera y en problemas muy 3D como sobreelevación en puentes en lo que son imbatibles. Inspiran líneas de investigación experimental..*
- 3.- modelos de tramos fluviales en lecho móvil: *cuestionables en su semejanza, en sus condiciones de contorno o abiertamente empíricos, cualitativos y de valor comparativo. Sólo para transporte de fondo –grueso- y orillas fijas (no transporte en suspensión ni orillas erosionables). Muy difícil de combinar con distorsión vertical. Terreno ideal para investigación de fenómenos.*
- 4.- modelos de fenómenos locales: *basados en un procedimiento estándar de maximización de los efectos, que facilita la evaluación y comparación, pero lo aleja de la realidad. Atención a la simulación de escolleras con filtros.*