



POLITÉCNICA



TEMA 19 : Transporte de materiales (I)



JOSÉ LUIS GARCÍA RODRÍGUEZ
UNIDAD DOCENTE DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL
E.T.S. DE INGENIEROS DE MONTES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- **Granulometría de los materiales**
- **Coeficientes representativos**
- **Características principales que diferencian los materiales**
- **Tamaños**
- **Diámetros**
- **Estudios de los acarreos**
- **Análisis del sólido aislado**



Suelo que procede del tramo anterior

D_R

DISGREGACION
POR GOTA DE
LLUVIA

D_E

DISGREGACION
POR GOTA DE
LLUVIA

**Suelo disgregado
en el incremento**

**D, SUELO TOTAL
DISGREGADO
DISPONIBLE**

Comparar

T_R

CAPACIDAD DE
TRANSPORTE
POR LLUVIA

T_E

CAPACIDAD DE
TRANSPORTE POR
ESCORRENTIA

**T, CAPACIDAD
TRANSPORTE TOTAL
EN EL TRAMO**

Si $D < T$

Si $T < D$

Suelo erosionado al tramo siguiente



$$E = D + T$$

¿Cuándo ocurre el transporte?

Cuando se producen circulación de flujos en cauces de evacuación

¿Esto es así en la naturaleza?

Siempre hay relaciones entre los tres procesos de erosión, transporte y sedimentación



Áreas de aplicación

¿Dónde se trabaja?



Torrente > 6%

Ribera torrencial 1,5 % – 6 %

Rio < 1,5 %

Meunier

Rio Cinca



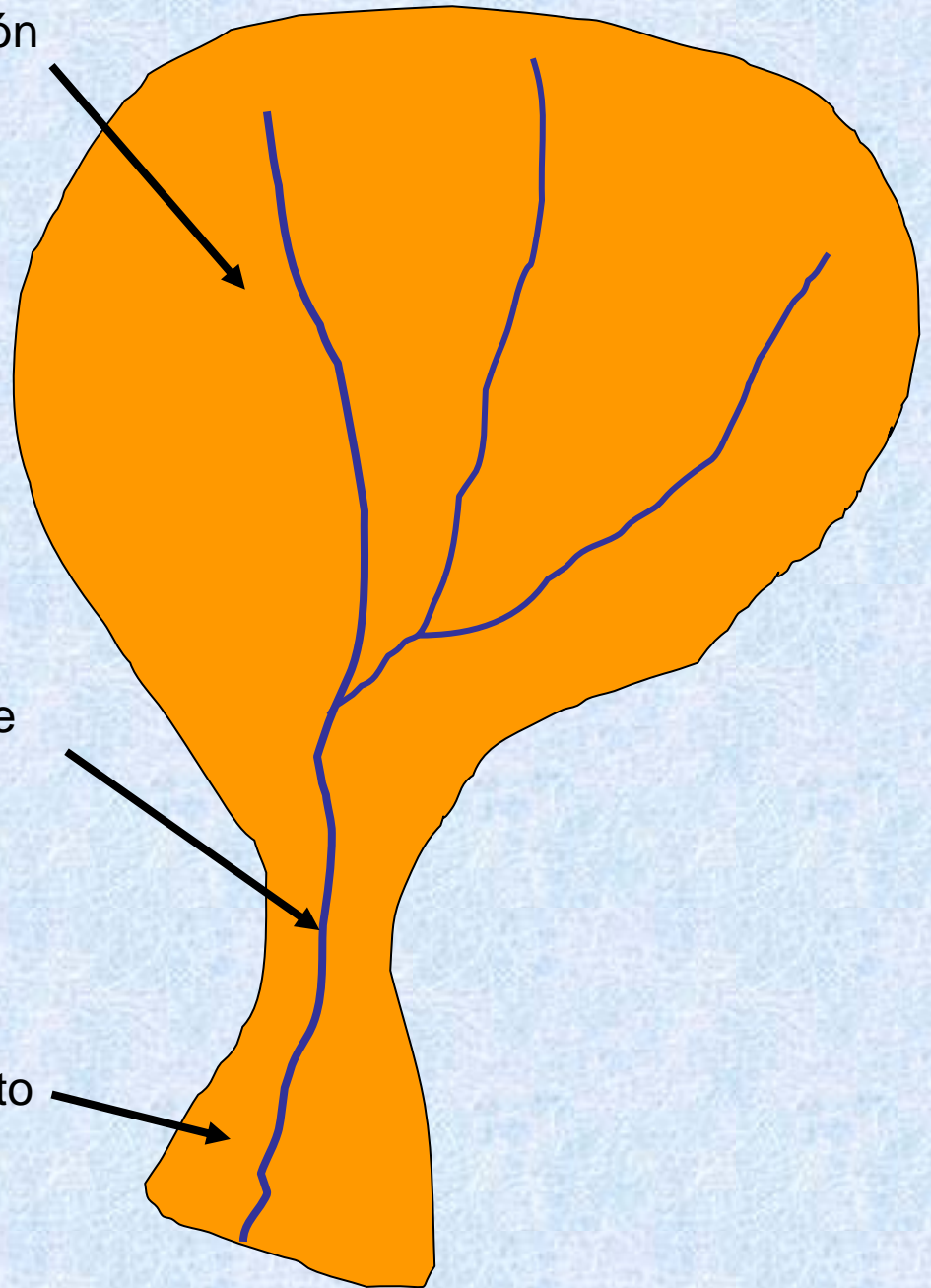
TORRENTES ALPINOS

TORRENTES RAMBLAS **RAMBLAS** **O**

Producción

Transporte

Depósito



CONSECUENCIAS

Transporte = f (erosión lineal)

Transporte = f (sedimentación en el cauce, formación de la pendiente de equilibrio)

Erosión lineal

Erosión en cauces. Circulación del flujo

Circulación del flujo de avenida

Sedimentación parcial al disminuir la capacidad de transporte



Preguntas fundamentales

1ª) ¿De qué formas se realiza el transporte de materiales?

2ª) ¿Cuándo y cómo comienza y/o cesa la presencia de materiales en la corriente?

3ª) ¿Qué significa y cómo se puede definir el fenómeno torrencial?



Las respuestas a estas preguntas tratan de resolver dos problemas básicos:

1) CUANTIFICACIÓN DEL VOLUMEN DE MATERIALES TRANSPORTADOS

2) DEFINICIÓN DE LA NUEVA PENDIENTE DEL LECHO DEL CAUCE O PENDIENTE DE EQUILIBRIO

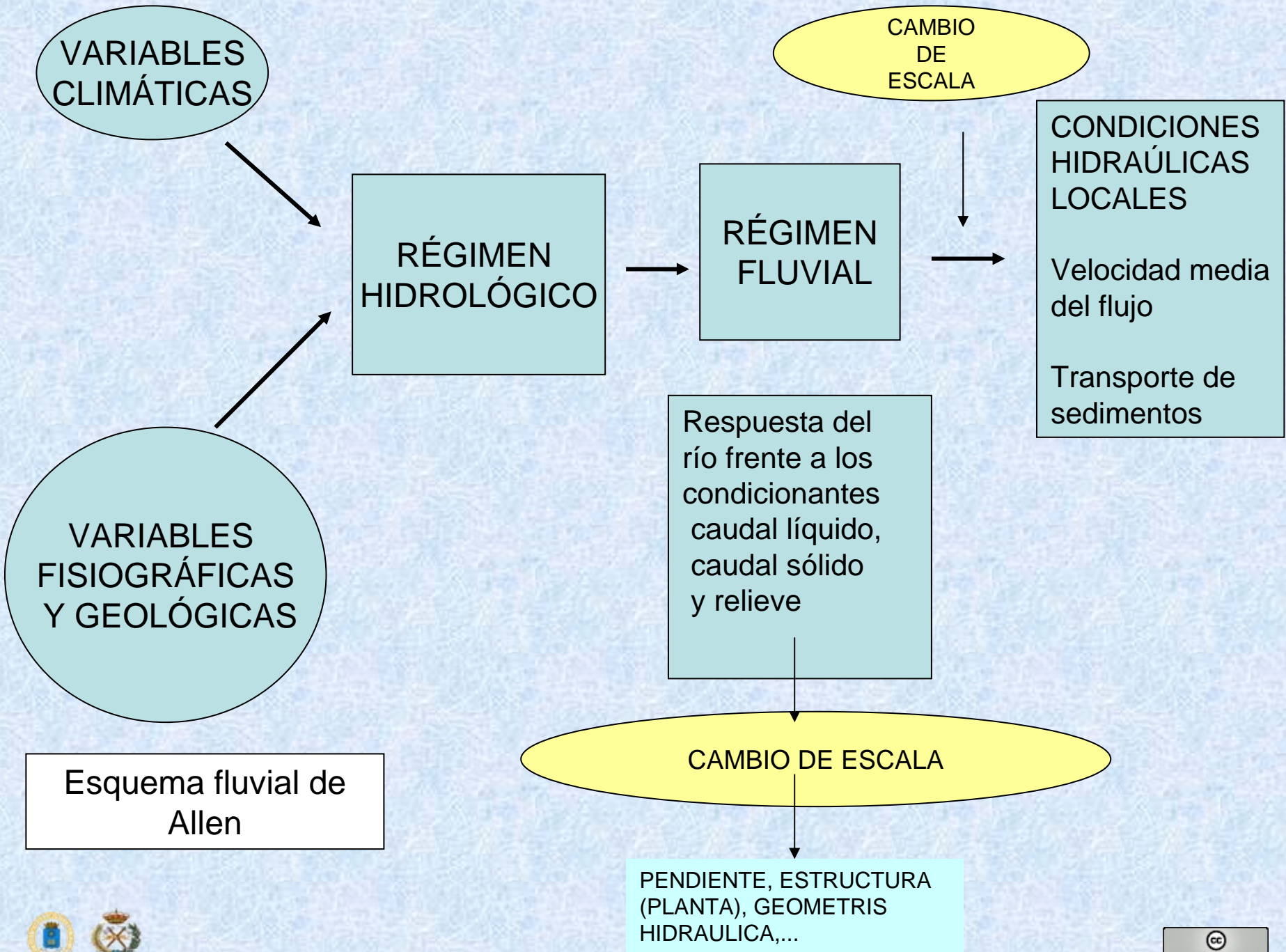


El transporte de sedimentos se engloba dentro de la **HIDRAÚLICA FLUVIAL**, mucho más amplio, cuyo objetivo es el estudio de los fenómenos a que da lugar el flujo de agua sobre un lecho que tiene la posibilidad de modificar sus características en respuesta a las sollicitaciones que el flujo induce, lo que a su vez comporta sustantivas alteraciones cualitativas y cuantitativas en los parámetros del referido flujo.

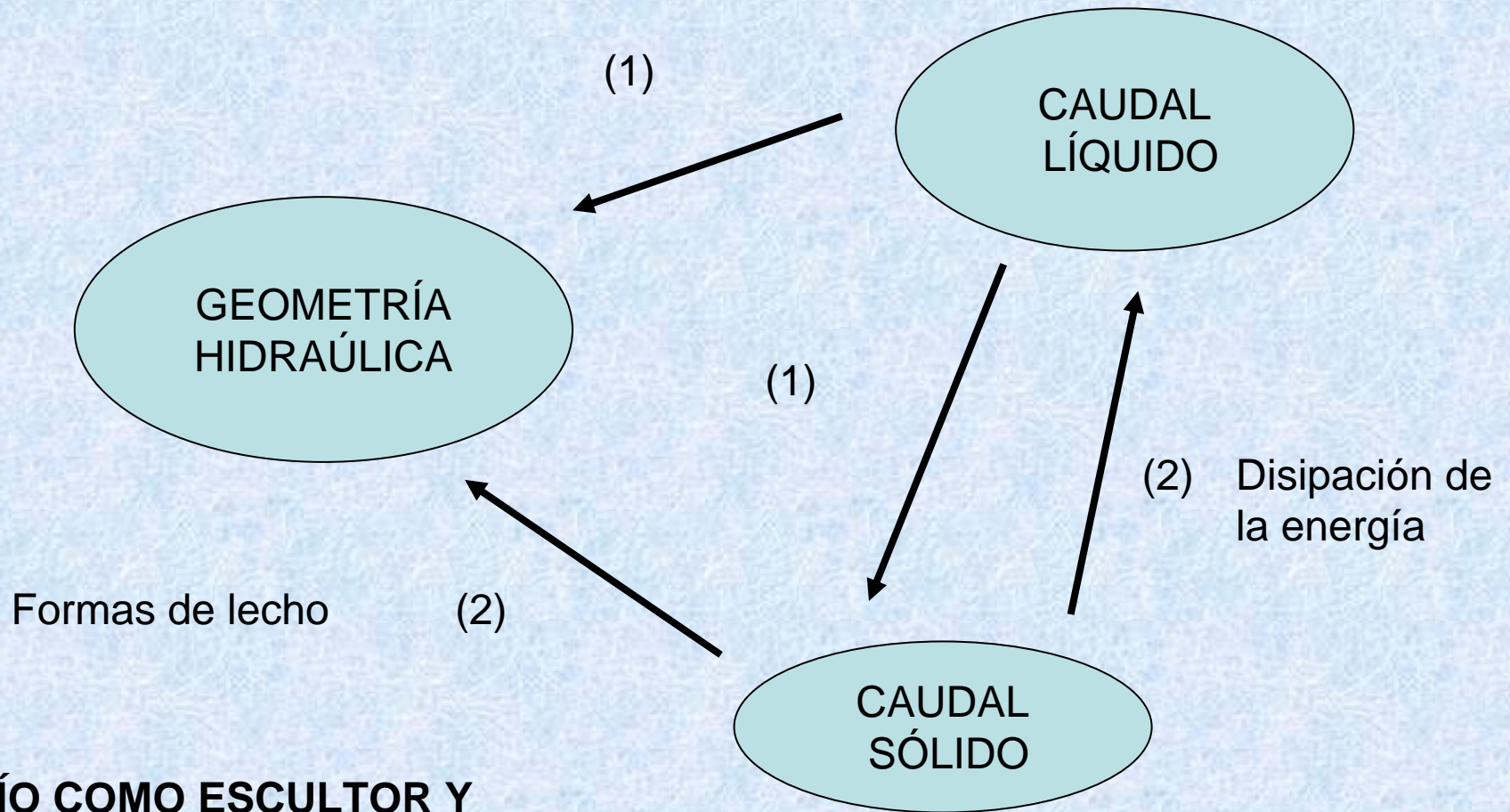
Los definidores de las características fluviales o torrenciales de los cursos que drenen una cuenca son:

- **Complejo físico**
- **Clima**
- **Vegetación**





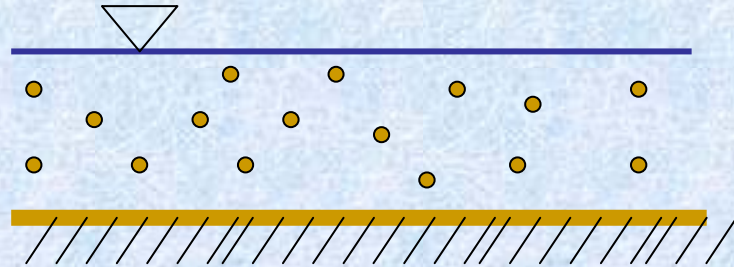
CARACTERÍSTICAS DEL CAUCE PARA UNA DETERMINADA PENDIENTE Y ESTRUCTURA



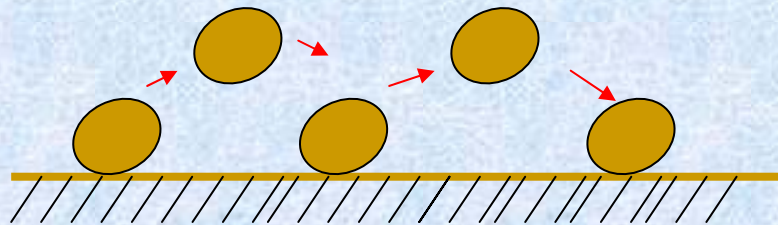
“RÍO COMO ESCULTOR Y ESCULTURA”

¿De qué formas y qué diferencias tienen?

Suspensión



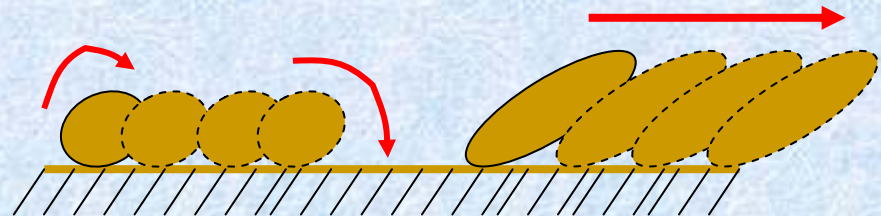
Saltación



Rodadura

Deslizamiento

Acarreo



Bed material load

PROCEDENCIA

TIPO DE TRANSPORTE

CARGA DE MATERIAL DEL LECHO

CARGA TOTAL DE SEDIMENTOS

CARGA TOTAL DE SEDIMENTOS

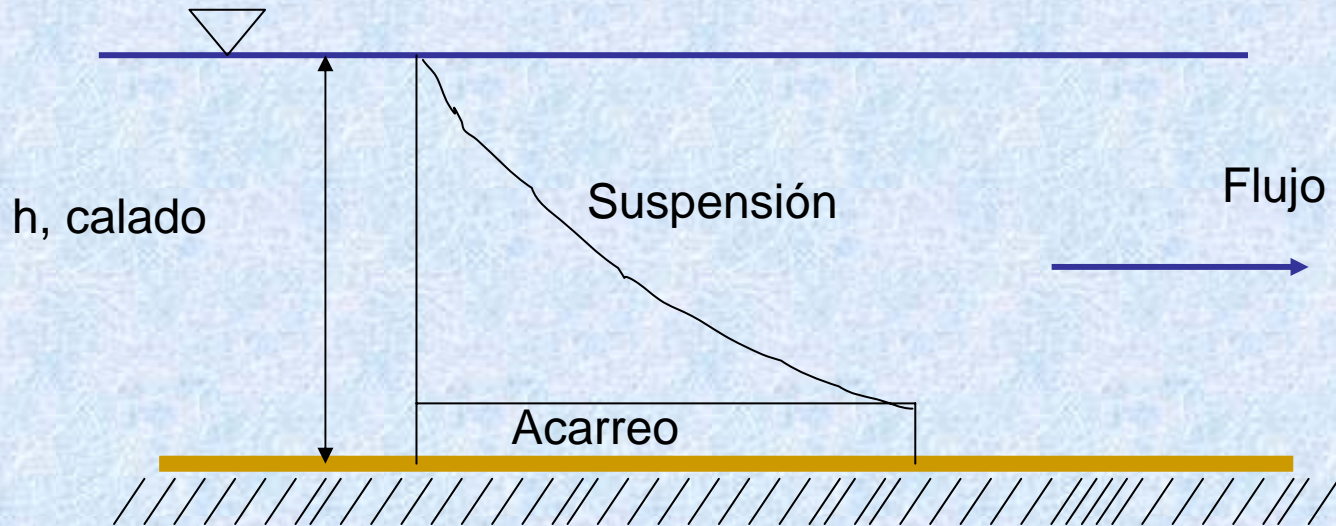
CARGA DE LAVADO (CUENCA VERTIENTE)

TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN

Wash load

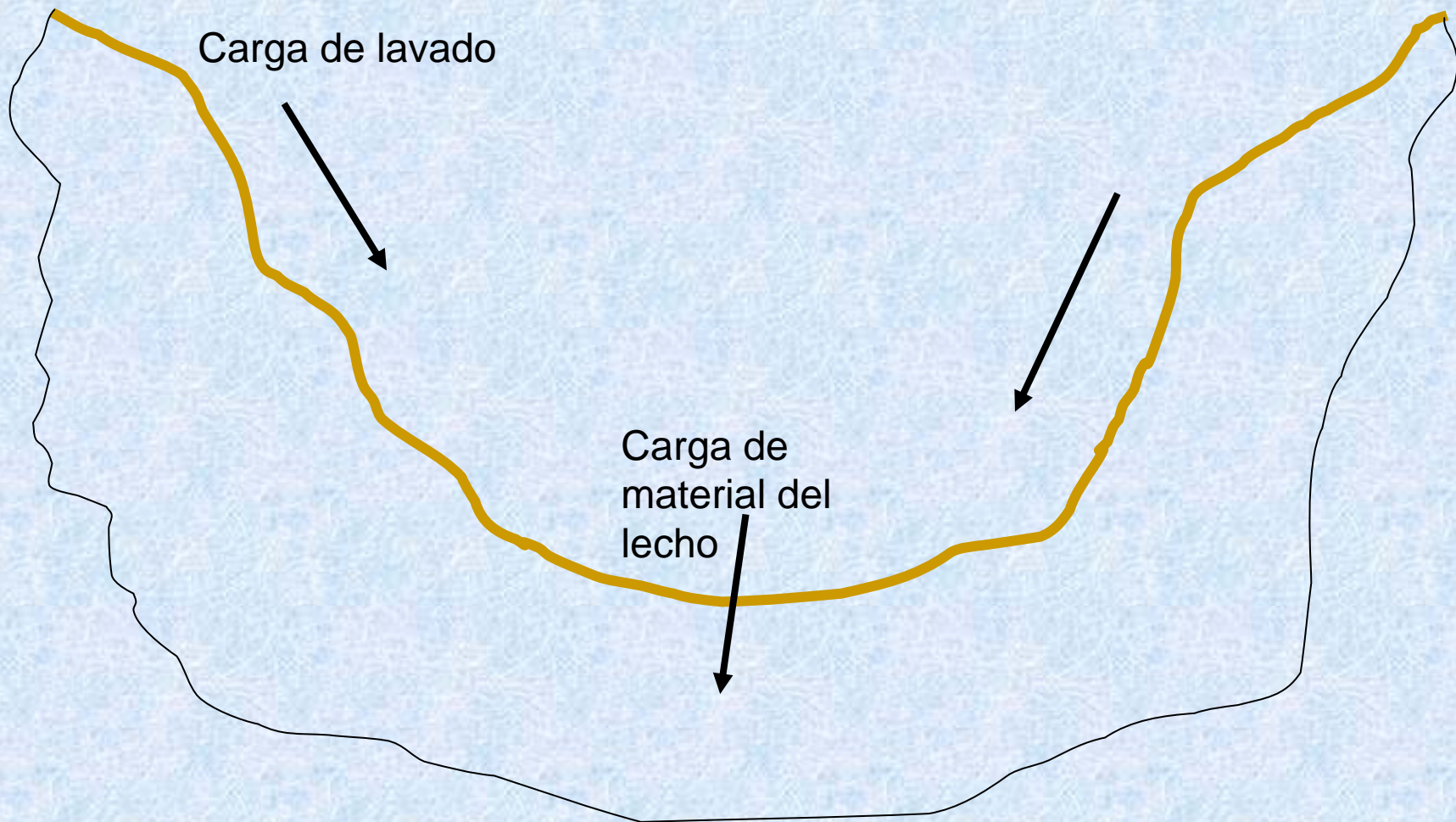


Distribución de la concentración de sedimentos



		Clasificación	
		Basada en el modo T. dominante	Basada en el origen de las partículas
Carga Total de sedimentos	Carga de lavado	Suspensión	Carga de lavado
	Carga en suspensión		
	Carga del lecho	Acarreo	Carga de material del lecho





Carga de lavado

Carga de
material del
lecho

DIFERENCIAS ENTRE ACARREO Y SUSPENSIÓN

(Quesnel, 1963)

Acarreos mayor tamaño que en suspensión el diámetro máximo en suspensión depende del grado de turbulencia, varía desde una micra en régimen laminar hasta gravas de 2 a 30 mm en régimen de gran turbulencia.

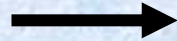
El acarreo es esencialmente discontinuo en el espacio y en el tiempo.

Con un gasto líquido dado se pueden dar varios tipos de concentraciones posibles sólidos en suspensión, pero un solo caudal de acarreo compatible con la estabilidad del lecho.

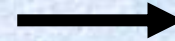
El acarreo se hace próximo al lecho en cambio **la suspensión** afecta a toda la altura de la masa de agua.



Flujo monofásico
(agua limpia)



**VALORES
CRÍTICOS**



Flujo bifásico
(agua + sedimento)

¿En qué condiciones de flujo se inicia el movimiento de las partículas sólidas del contorno?



1ª Solución.

Perspectiva científica
Modelos de transporte
de sedimentos



Gran
complejidad
del
problema



2ª Solución.

Perspectiva tecnológica
Diseño de cauces
Protección de márgenes

CARGA DE SEDIMENTOS DE LAVADO

- **Tasas de emisión de sedimentos. SDRs**
- **Ecuaciones predictivas. Modelo MUSLE**

CARGA DE SEDIMENTOS DEL LECHO

A) Modelos de transporte y cálculo de caudales sólidos

B) Flujos hiperconcentrados y lavas torrenciales



CARGA DE SEDIMENTOS DEL LECHO

A) MODELOS DE TRANSPORTE Y CÁLCULO DE CAUDALES SÓLIDOS

- FASE LÍQUIDA: CONCEPTOS DEL FLUJO MONOFÁSICO CON SUPERFICIE LIBRE
- FASE SÓLIDA: CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL CONSTITUTIVO DEL CONTORNO
- CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS
- UMBRALES DE COMIENZO DE ARRASTRE
- MÉTODOS DE CÁLCULO DEL TRANSPORTE POR ACARREO

B) FUJOS HIPERCONCENTRADOS Y LAVAS TORRENCIALES

- CARACTERÍSTICAS DIFERENCIALES DEL DOMINIO TORRENCIAL
- DELIMITACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS TORRENCIALES
- FÓRMULAS PARA FLUJOS HIPERCONCENTRADOS DE APLICACIÓN PRÁCTICA EN INGENIERÍA



FASE LÍQUIDA: CONCEPTOS HIDRAÚLICOS DEL FLUJO MONOFÁSICO CON SUPERFICIE LIBRE.

EN LA HIDRAÚLICA CLASICA SE ESTUDIAN DE FORMA AISLADA LA FASE LÍQUIDA (AGUA) Y LA FASE SÓLIDA (SEDIMENTO).



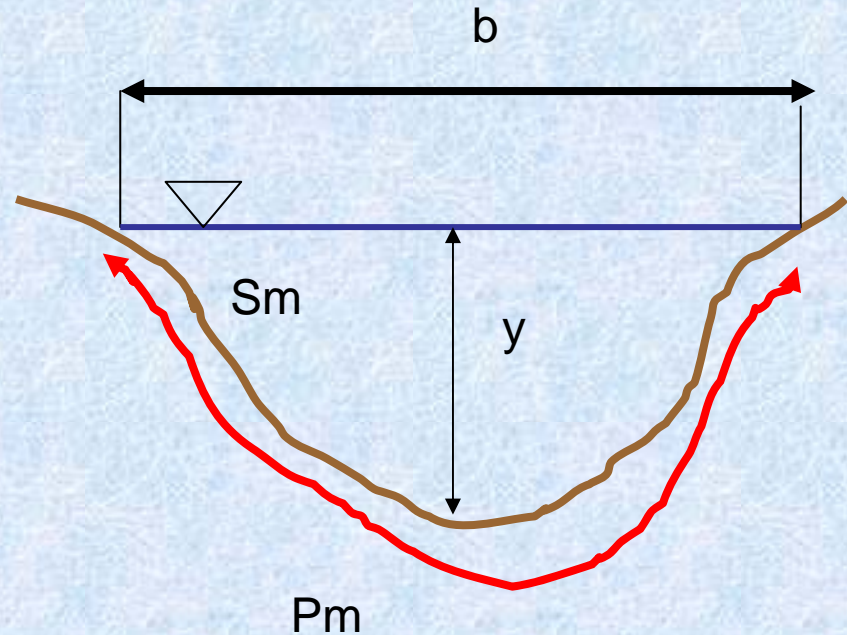
FLUJO MONOFÁSICO (FASE LÍQUIDA)

HIPÓTESIS GENERALES:

- CONTORNO RÍGIDO

- FLUIDO NEWTONIANO $\tau = \mu \frac{du}{dy}$

- ACCIÓN GRAVITATORIA



PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN LA CONDUCCIÓN

PERFIL LONGITUDINAL (PENDIENTE)

TRAZADO EN PLANTA

SECCIÓN TRANSVERSAL

Sección transversal

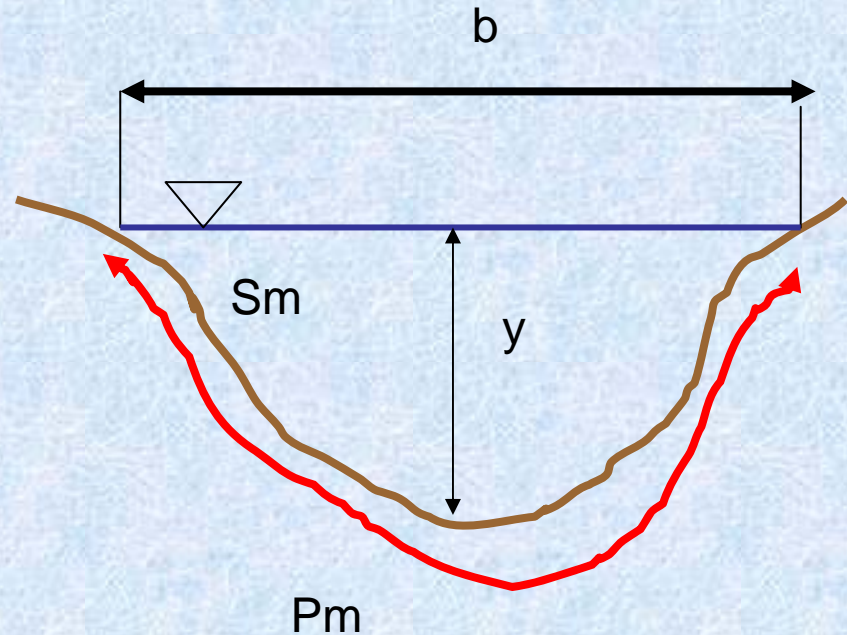
Perímetro mojado

Radio hidráulico

Calado

Ancho en superficie libre

Calado medio



RUGOSIDAD (taludes y lecho mediante Manning)

Características del flujo.

- Las isotacas
- El caudal Q
- La velocidad media v

Ecuaciones

• Conservación de la energía (Ecuación de Bernoulli en canales abiertos).

• Continuidad. $\left(\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \right)$

• La de equilibrio dinámico (Ecuación de Saint Venant).

$$j_f = j - \left(\frac{\partial d}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v \cdot v}{gy} \right)$$

j , es la pendiente del cauce y j_f , es la pendiente de fricción o energía



$$\mathbf{j}_f = \mathbf{j} - \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{g}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{1}{\mathbf{g}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\mathbf{v} \circ \mathbf{v}}{\mathbf{g} \mathbf{y}} \right)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{j}_f = \mathbf{j}$$

Si el régimen es permanente y uniformes: ($dy/dt = 0$; $dy/dx = 0$).

Régimen permanente es aquel que el caudal es constante $dQ = 0$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

y **uniforme** es cuando además de permanente el flujo tiene el mismo caudal en el tramo de estudio, velocidad constante

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

En este caso $j_f = j$

La pendiente de fricción mide la disipación de energía por rozamiento. Y se evalúa por la ecuación de Manning.

$$v = 1/n * R^{2/3} * S^{1/2}$$



La tensión tractiva:

$$\tau = \gamma R j$$

Esta expresión se deduce:

$\tau dx = dP \operatorname{sen} \alpha = \gamma (h-y) \operatorname{sen} \alpha dx$; por lo tanto eliminando dx

$$\tau = \gamma (h-y) \operatorname{sen} \alpha$$

Cuando α es pequeño, entonces $\operatorname{sen} \alpha = \operatorname{tag} \alpha = j$

$$\tau = \gamma (h-y) j$$

En el fondo $y = 0$ entonces:

$$\tau = \gamma R_h j$$



VELOCIDAD DE FRICCIÓN DE CORTE

Sobre el contorno.
$$v^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{gR_h j}$$

En un punto del lecho
$$v^* = \sqrt{ghj}$$

En un punto a una altura “y” sobre el lecho
$$v^* = \sqrt{g(h-y)j}$$

NÚMEROS DE REYNOLDS Y DE FROUDE

El número de Reynolds R , cuantifica la relación las fuerzas de viscosidad y las fuerzas de inercia.

Siendo v la velocidad del flujo, h es un parámetro que mida una longitud y ν es la viscosidad cinemática.

Existe una capa límite próxima al contorno que soporta la parte esencial de la disipación de energía por rozamiento. El espesor de esta capa depende de la rugosidad absoluta del contorno

K_s

Así si $R^* < 5$ es un movimiento turbulento liso.

Si $R^* < 70$ es un movimiento de transición.

Si $R^* > 70$ es un movimiento turbulento rugoso

$$R = \frac{vh}{\nu}$$

$$R^* = \frac{v^* k_s}{\nu}$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{gy_m}}$$



El número de Froude relaciona la influencia de la acción gravitatoria del flujo.

- Si $F < 1$ Régimen lento (normalmente fluvial).**
- Si $F = 1$ Régimen crítico.**
- Si $F > 1$ Régimen rápido (normalmente torrencial).**



FASE SÓLIDA: CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL CONSTITUTIVO DEL CONTORNO

El contorno del lecho puede estar formado por:

- **Roca (contorno fijo).**
- **Suelo cohesivo (arcillas limos).**
- **Suelo incoherente (arenas gravas).**

Los materiales pueden ser cohesivos e incohesivos.

Materiales cohesivos. En los materiales cohesivos la fuerza que evita su movimiento es la cohesión desarrollada entre partículas vecinas (el tamaño no se tiene en cuenta). Se debe de estudiar el comportamiento en conjunto.

