

# Transporte de Sedimentos:

Dinámica de los Fluídos

# Los agentes de transporte

Olas, mareas y corrientes oceánicas



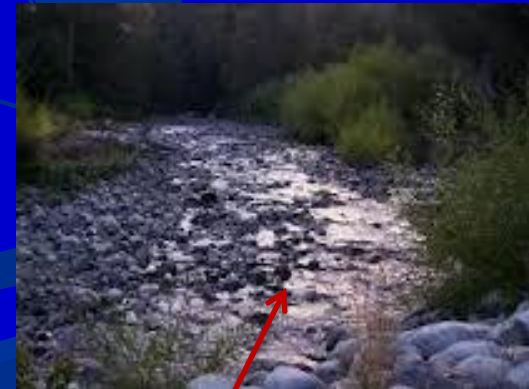
Hielo (glaciar)



Viento



Gravedad



Rios y arroyos

# FUNDAMENTOS DEL FLUJO DE FLUIDOS

**Objetivo final** = partiendo de las propiedades de una roca sedimentaria/sedimento, inferir las condiciones de flujo en la cual esa roca se formó, es decir en las condiciones que el sedimento fue transportado y acumulado.

- ◆ Fluidos = líquidos y gases, no tienen resistencia interna (strength) al esfuerzo de cizalla (shear stress) y se deforman rápida y completamente.
- ◆ Las fuerzas que actúan en sólidos y líquidos pueden representarse como vectores que tienen componentes normal y paralela a la superficie del cuerpo. La componente de fuerza perpendicular a la superficie del cuerpo, por unidad de área es la presión ( $P$ ). La componente de fuerza paralela a la superficie del cuerpo es el esfuerzo de cizalla ( $\Gamma$ ).

# Presión y Cizalla

- Cizalla ( $\tau$ ) - se refiere a la fuerza o esfuerzo ejercido paralelo a la superficie

$$\text{Cizalla } (\tau) = F/A$$

- Presión (P) – se refiere a la fuerza o esfuerzo ejercido perpendicular a la superficie

$$\text{Presión} = F/A$$

# TRANSPORTE Y ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS

- **FLUJOS FLUIDOS**

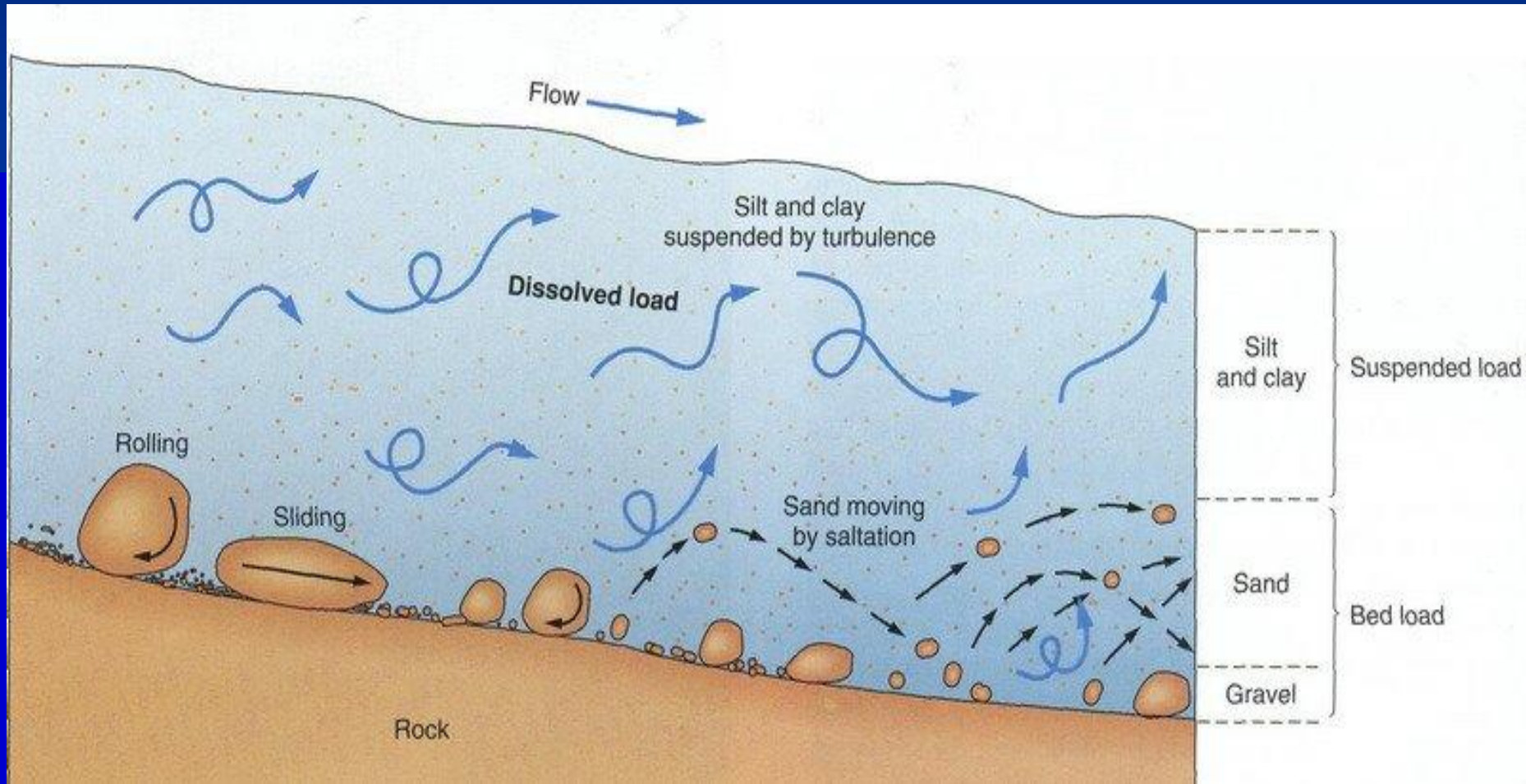
- Acuosos
- Aéreos

- **FLUJOS DENSOS**

- **GRAVEDAD**



# Modos de transporte de las partículas: rolido, saltación, suspensión



# Fluídos

- Sustancias que no transmiten esfuerzos
- Se deforman cuando se les aplica una fuerza, incluso bajo su propio peso
- Incluye, agua y gases
- Fuerzas – actúan en todo el fluido

Agua, aire y mezclas conteniendo diferentes proporciones de agua son los fluídos que interesan en el transporte de sedimentos

# Propiedades de los Fluidos

Los dos parámetros principales son: densidad y viscosidad.

Densidad es una medida del masa por unidad de volumen ( $\text{g/cm}^3$ ). El agua es hasta 700 veces más densa que el aire. Menor densidad menor competencia.

Viscosidad es una magnitud relacionada con la resistencia del fluido a la cizalla, es decir a fluir, y se mide en Poise ( $\text{g/cm/sec}$ ). El agua es hasta 55 veces más viscosa que el aire. Mayor viscosidad implica menor turbulencia y menor poder erosivo.

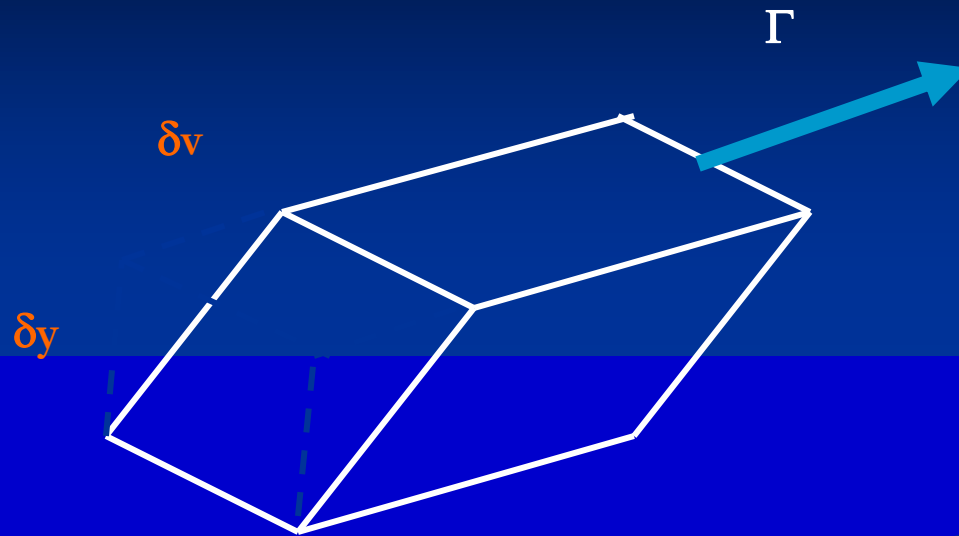
Un factor importante que afecta tanto a la densidad como a la viscosidad es la temperatura (en general ambas disminuyen con el aumento de la temperatura).



# Viscosidad

- Medida de la fricción interna entre las partículas de un fluido
  - Cohesión molecular
  - Resistencia del fluido a deformarse (o fluir)
- Viscosidad dinámica o molecular =  $\mu$  (mu) = esfuerzo de cizalla/ritmo de cambio por unidad de tiempo

## Ley de Newton de la Viscosidad



$$\Gamma = \mu \cdot \delta v / \delta y$$

$v$  = velocidad

$y$  = distancia a la base (puede ser la profundidad)

$\mu$  = viscosidad dinámica

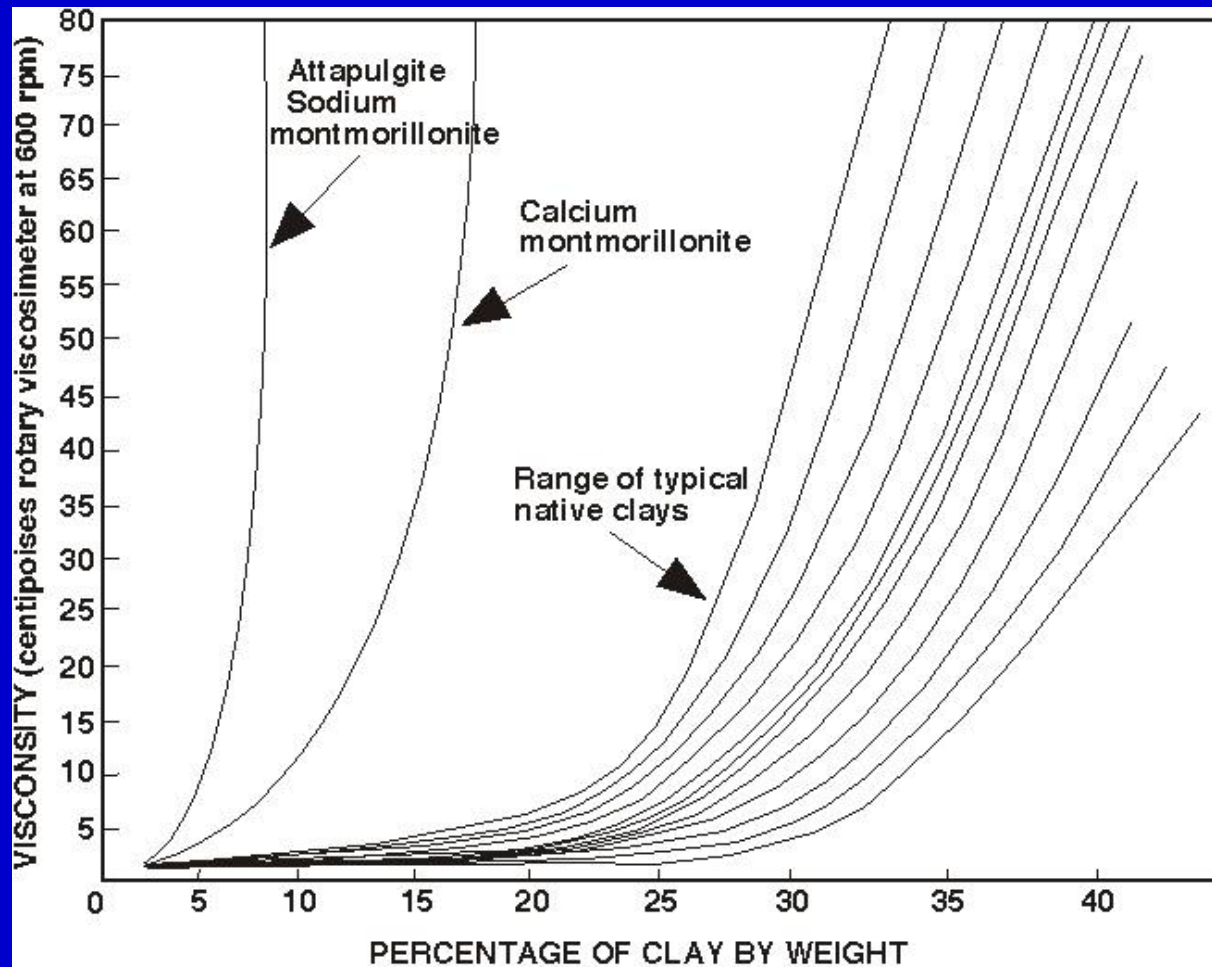
$\Gamma$  = esfuerzo de ciza

$\mu$  es constante a  $T^\circ = \text{constante}$

- **La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a fluir, o sea al esfuerzo de ciza; *este es un concepto fundamental para la mecánica del transporte de los sedimentos.***

- Si tengo un fluido acuoso y le agrego partículas de arcilla en suspensión modifico su densidad y viscosidad, y también cambia su comportamiento dinámico. El fluido se vuelve no-Newtoniano (o sea que no obedece a las leyes de Newton), como ocurre con los torrentes de barro.

La concentracion y mineralogia de las arcillas en suspension dentro de un fluido tiene una influencia importante sobre la densidad y la viscosidad



# Viscosidad Cinemática (nu)

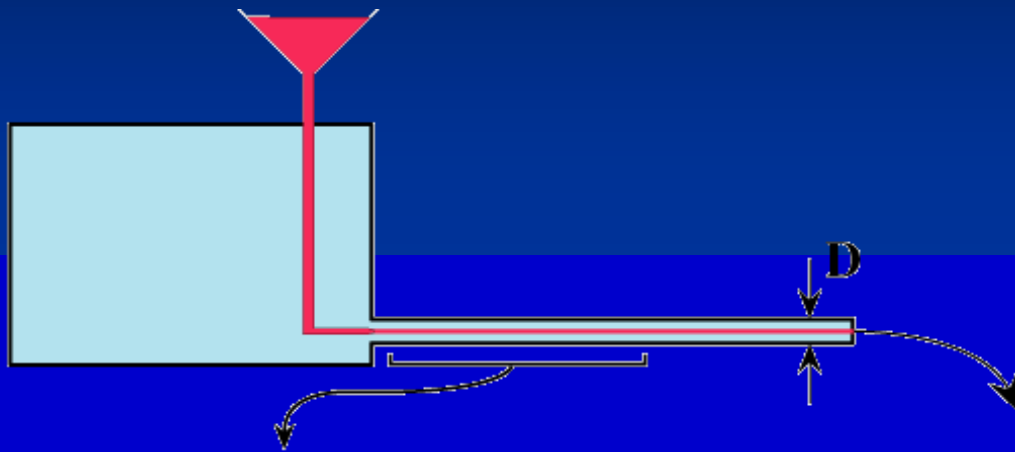
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$\mu$  = viscosidad  
 $\rho$  = densidad

- Viscosidad constante a T constante;  $\rho$  no depende del esfuerzo de cizalla o de la duración del esfuerzo – Fluido Newtoniano
- $T \uparrow$        $\mu \downarrow$
- Viscosidad cinemática determina cuando un flujo desarrolla turbulencia



# El experimento de O. Reynolds



El marcador sigue un camino recto



El marcador sigue un camino ondulado pero sin mezclarse



Inmediata mezcla

# Tipos de Flujos Fluídos

- Flujo laminar – el flujo persiste como un movimiento unidireccional
  - Moléculas fluyen paralelamente
  - No hay movimientos hacia arriba y hacia abajo por difusión
- Flujo turbulento— flujo altamente distorsionado
  - Flujos perpendiculares a la dirección principal del movimiento
  - Transferencia de movimiento hacia arriba y abajo por procesos de macroescala
- Turbulencia = componente irregular y aleatorio del movimiento del fluido
- Remolinos = parte del fluido altamente turbulento

# Flujo Laminar vs Turbulento

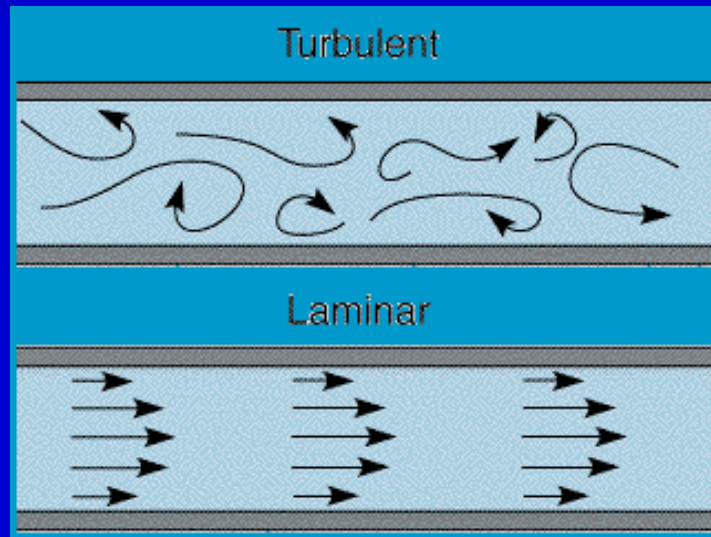
- Flujo Laminar – velocidad constante en un punto a través del tiempo
- Turbulencia
  - Mayoría de los flujos son turbulentos
  - Lenta velocidad de decantación – movimientos hacia arriba de la moléculas de agua
  - Incremento en la capacidad del fluído para erodar y capturar partículas del lecho pero menos eficiente en transportarlas
  - La velocidad medida en un punto varía de un momento a otro pero tiende a un valor promedio a lo largo del tiempo

# Flujos Fluídos

Laminares versus Turbulentos.

Los números de **Reynolds** y **Froude** proveen un modo de expresar la naturaleza del flujo en términos de su comportamiento dinámico.

**Número de Reynolds.** Expresa la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas dentro de un fluido y entonces el grado de turbulencia.



# Número de Reynolds

$$R_e = UR\rho/\mu = UR/\nu$$

U = velocidad media del flujo

R = radio hidráulico (A/P)

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $\mu/\rho$ )

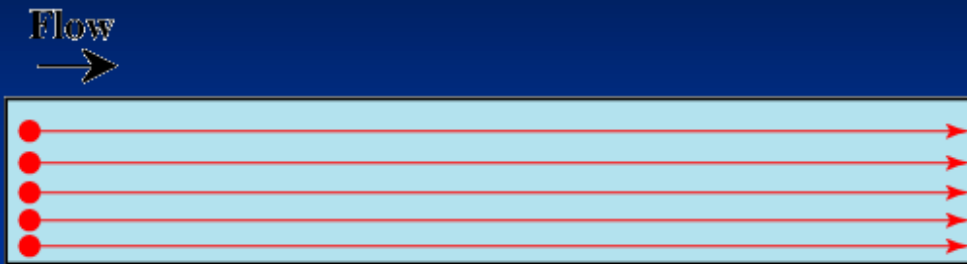
$\rho$  = densidad

$\mu$  = viscosidad

- Balance entre fuerzas inerciales (que causan turbulencia) y viscosas (suprimen turbulencia)
- Flujo Laminar:  $Re < 500$  – domina viscosidad; poca profundidad o baja velocidad
- Flujo Turbulento:  $Re > 2000$  – domina inercia; flujo profundo o rápido



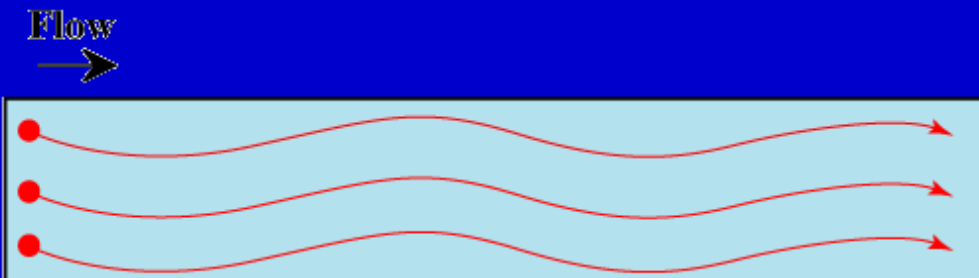
# Resultados del experimento de Reynolds



Low discharge

**Flujo Laminar:** cada molécula sigue un camino recto y paralelo a los márgenes.

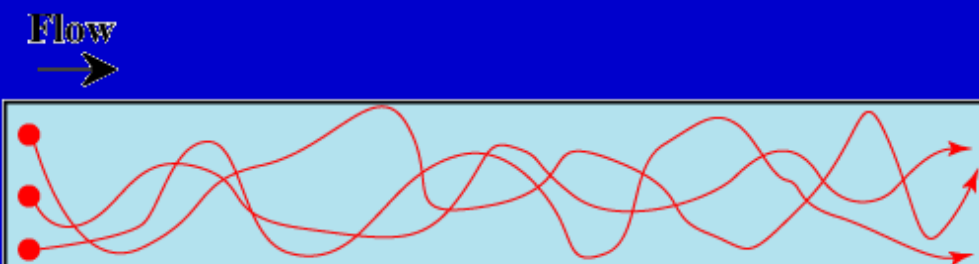
$$R < 500$$



Medium discharge

**Flujo transicional:** cada molécula sigue un camino ondulado y no paralelo a los márgenes.

$$500 < R < 2000$$



High discharge

**Flujo turbulento:** cada molécula sigue un camino compello que lleva al desarrollo de remolinos y mezcla.

$$R > 2000$$

# Esfuerzos:

## Flujos Laminares vs Turbulentos

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Flujo Laminar

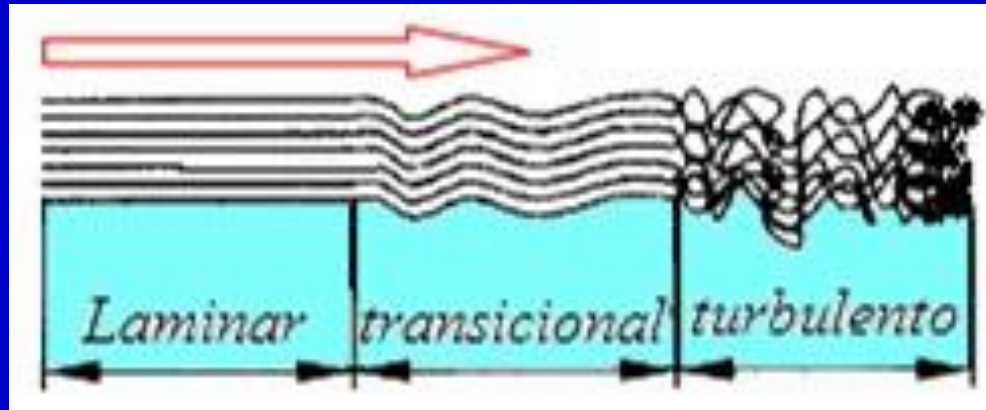
$$\tau = (\mu + \eta) \frac{du}{dy}$$

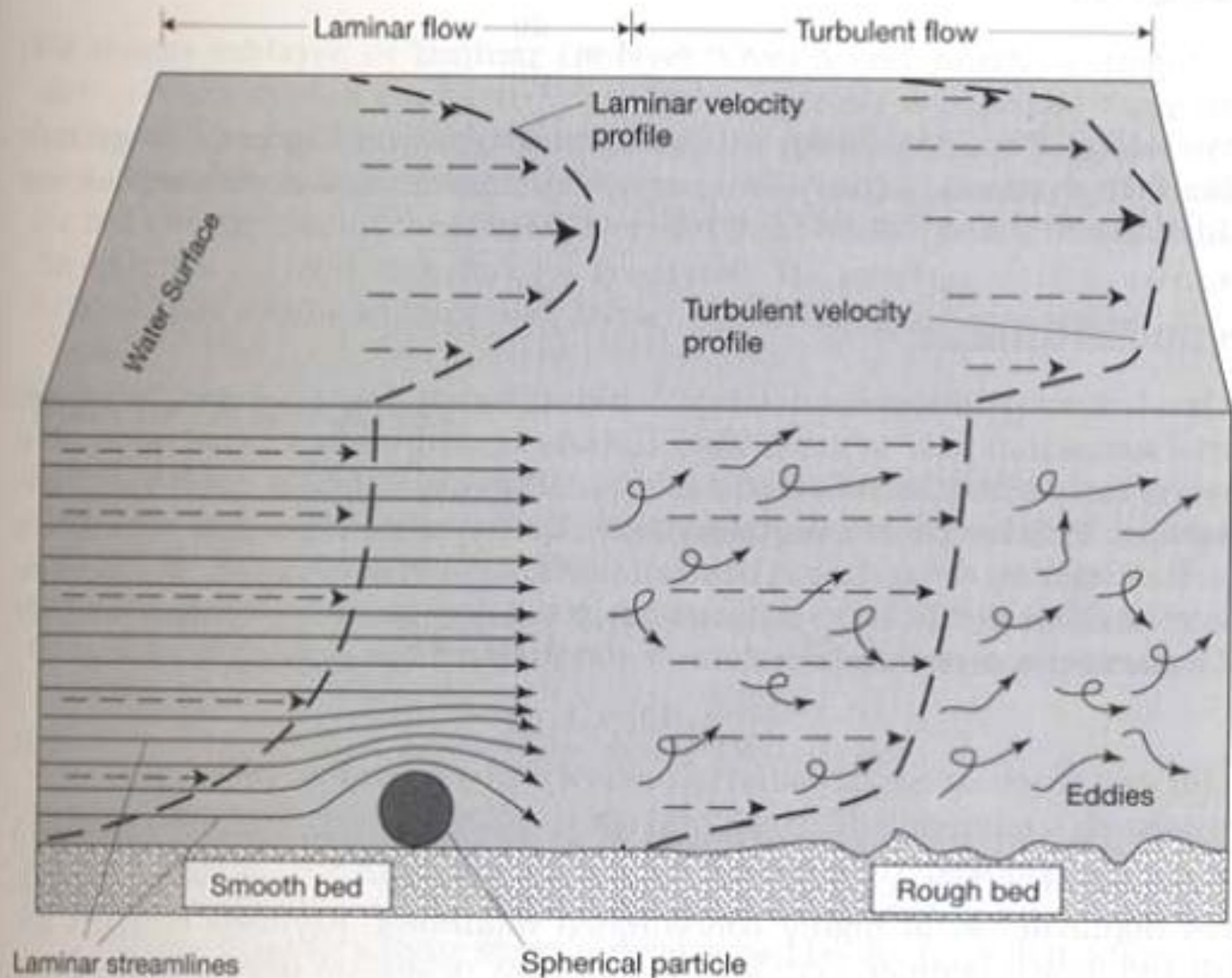
Flujo Turbulento

- Se le agrega una viscosidad aparente (viscosidad de remolino) ( $\eta$  o eta) a la ecuación para flujos turbulentos
- La turbulencia genera esfuerzos mayores sobre los flúidos adyacentes que en los flujos laminares

El flujo en canales abiertos donde hay una superficie libre y las fuerzas gravitacionales son importantes se describen utilizando el Número de Froude, que representa la relación entre las fuerzas inerciales y gravitatorias

Para flujos turbulentos la profundidad ( $L$ ) es inversamente proporcional a la velocidad ( $U$ ); en flujos laminares ambas son proporcionales.





# Número de Froude

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

$F_r$  = Número de Froude

$U$  = velocidad media

$\sqrt{gL}$  = velocidad del movimiento  
de la onda superficial

$g$  = aceleración de la gravedad

$L$  = profundidad del agua

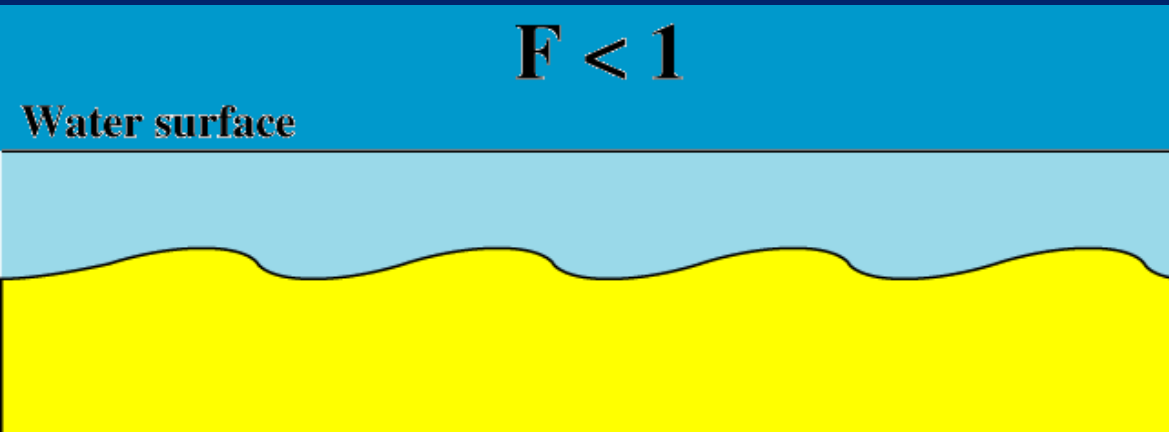
- Relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales
- Gravedad influencia el modo en que el fluido transmite ondas superficiales
- Valor adimensional (igual que Re)



# Número de Froude

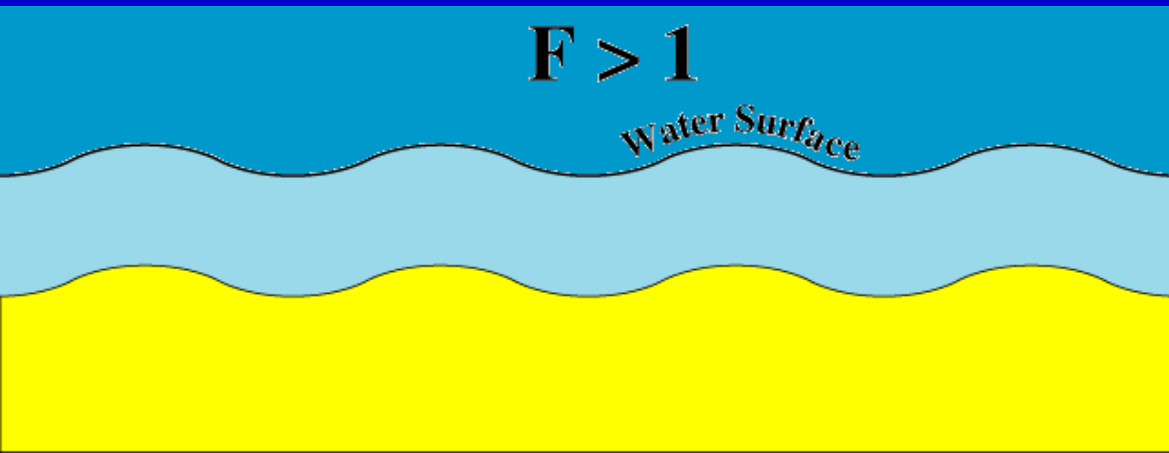
- $Fr < 1$     Tranquilo, Subcrítico
  - Velocidad de la onda  $>$  velocidad del flujo
- $Fr > 1$     Rápido, Supercrítico
  - Ondas no pueden propagarse corriente arriba
- $Fr$  tiene relación con el régimen de flujo
  - Define formas de lecho características que se desarrollan por un flujo sobre un lecho granular

$F < 1$ ,  $U <$  las ondas de la superficie del agua se pueden propagar aguas arriba porque su velocidad es MAYOR a la del fluido. Flujo subcrítico o tranquilo (BAJO REGIMEN).



Las formas del lecho NO están en fase con las de la superficie del fluido.

$F > 1$ ,  $U >$  las ondas de la superficie del agua NO se pueden propagar aguas arriba porque su velocidad es MENOR a la del fluido. Flujo supercrítico (ALTO REGIMEN).



Las formas del lecho están en fase con las de la superficie del fluido.

***El agua no presenta ondulaciones***

**El lecho sí**

**El Regimen de flujo es bajo**



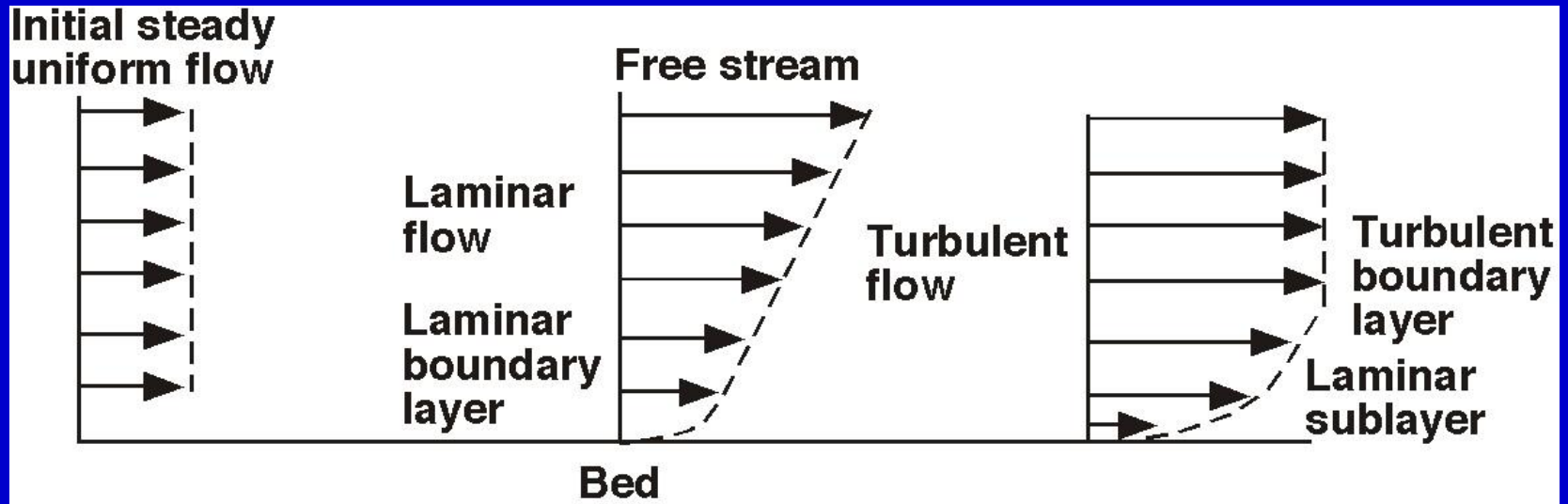
La superficie del agua  
presenta ondulaciones

El lecho también, y están  
en fase con la superficie

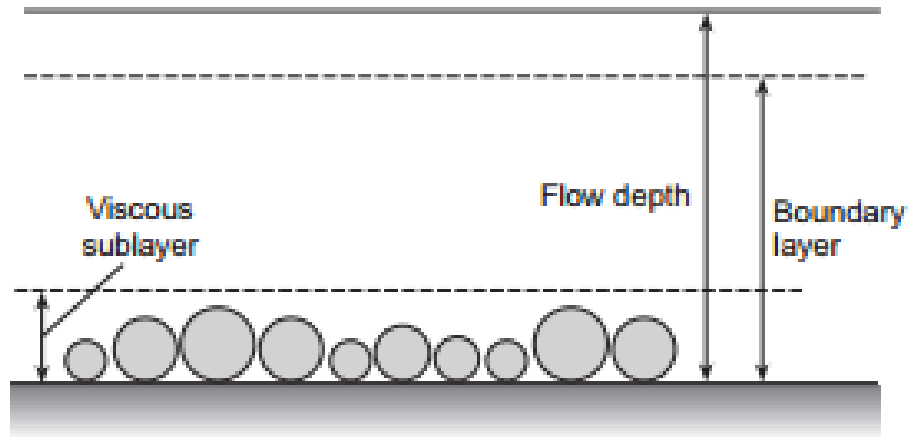
El Régimen de flujo es alto



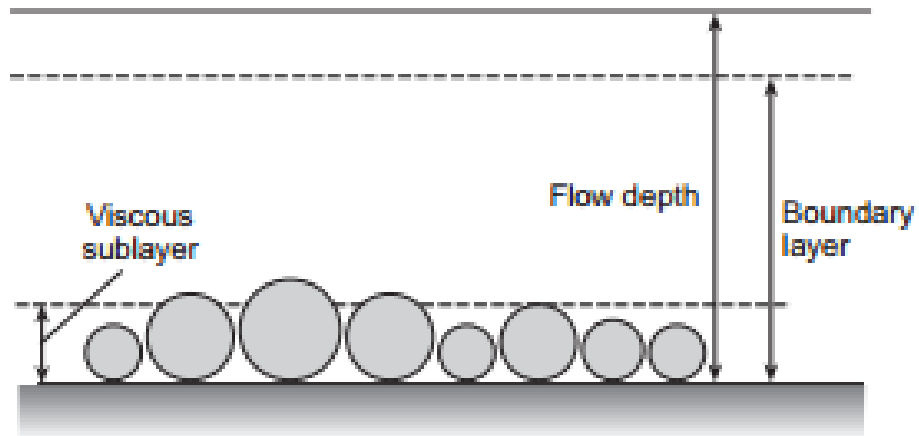
Efectos de capa límite: Cuando una corriente fluye a lo largo de las paredes de un canal o sobre el lecho es afectada por los esfuerzos retardantes (rozamiento) producidos por la superficie limitante. La capa en contacto con la superficie rígida se denomina capa límite.







**Smooth boundary:**  
 Thick viscous sublayer (low velocities)  
 and/or small grain diameters



**Rough boundary:**  
 Thin viscous sublayer (high velocities)  
 and/or large grain diameters

Lecho hidráulicamente plano o suave

Lecho hidráulicamente rugoso

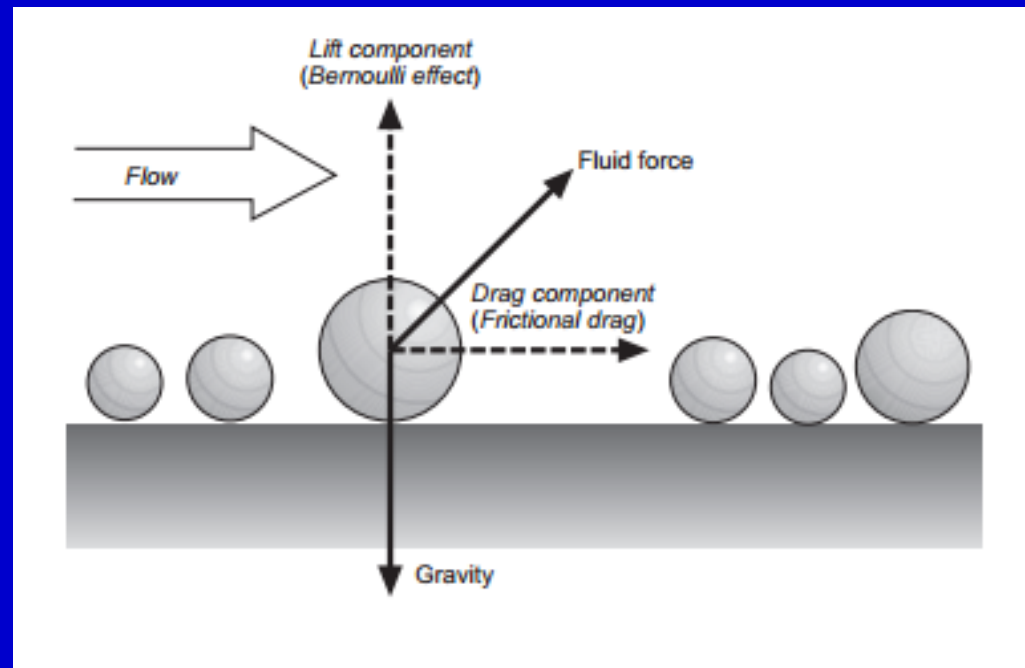
# Perfiles de velocidad y rugosidad del lecho

En **flujos turbulentos** – el flujo es laminar/casi laminar sólo cerca del lecho

- Lechos suaves – fuerzas moleculares viscosas dominan en láminas delgadas cerca del lecho
  - Subcapas viscosas / subcapas laminares
- Lechos Rugosos/Irregulares
  - Gravas o arena gruesa
  - Subcapas viscosas destruídas por las partículas del lecho
  - Obstáculos generan remolinos en la interfase
- Presencia/ausencia de subcapas laminares – factores importantes en el inicio del movimiento de las partículas

# Flujos y transporte de sedimentos

- La habilidad de un río de erosionar y transportar sedimentos representa un balance entre fuerzas y resistencias
- Las ecuaciones que involucran fuerzas (esfuerzos) y resistencias son el núcleo del transporte por flujos fluídos



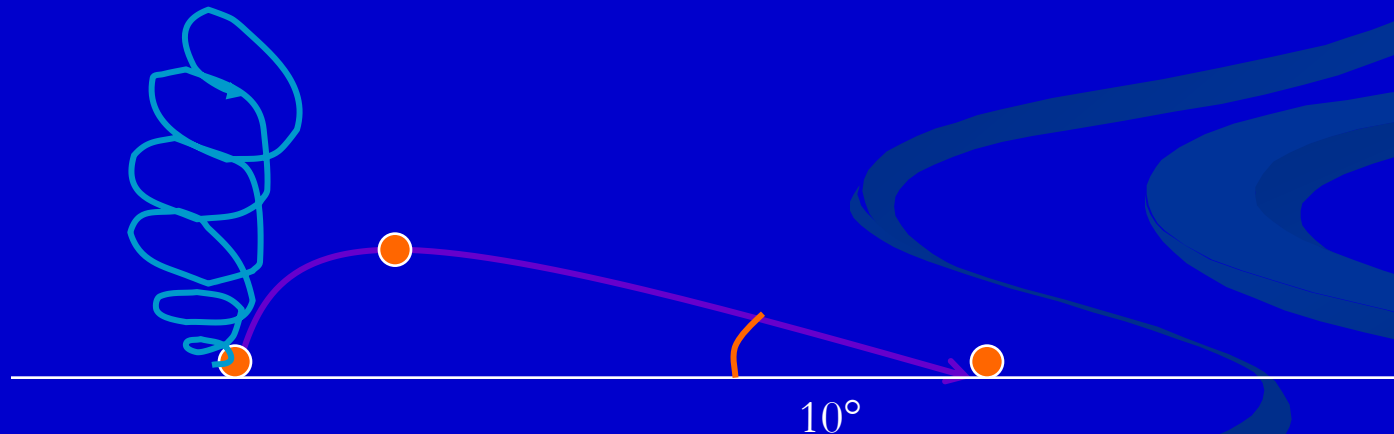
# Flujos y transporte de sedimentos

- Relaciones de conservación
  - Masa (continuidad del fluido)
  - Momento (2<sup>nd</sup> Ley de Newton –  $F=M \cdot A$ )
  - Energía (1<sup>ra</sup> Ley de la Termodinámica)
- Relaciones constitutivas
  - Resistencia (Ecuación de Manning)
  - Transporte de sedimentos (Hjulstrom, Bagnold)
  - Presión dinámica (Bernoulli)

# Movimiento de las partículas en un fluido

**Rolido y deslizamiento** sobre el lecho (**tracción**) dando lugar a la **carga tractiva**.

**Saltación** (la partícula se levanta y cae sucesivamente, impacta a otras partículas en el lecho y en el flujo, y produce eyección, impacto-proyección y reptaje, especialmente en el aire)

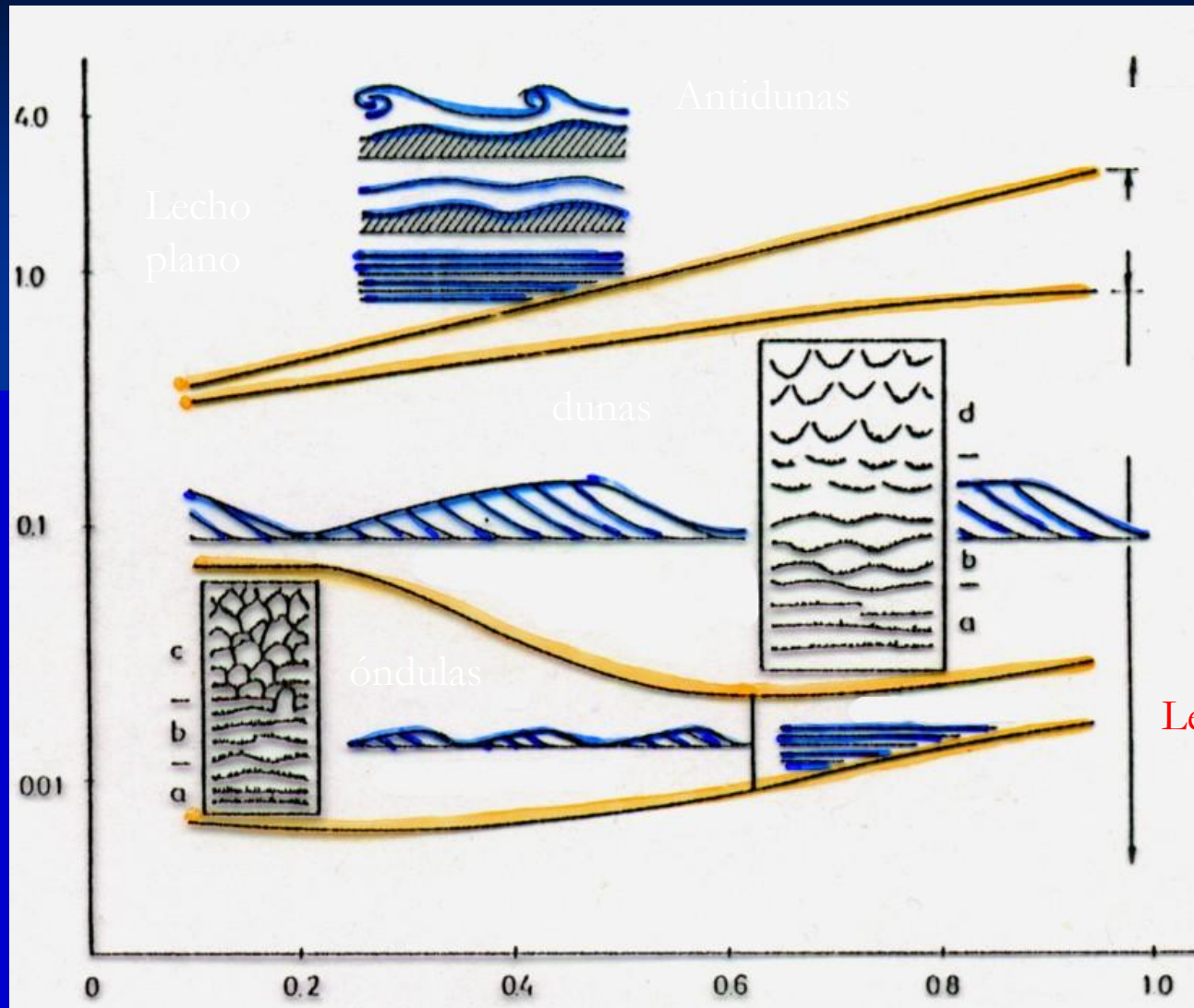


- **Suspensión** (la partícula no toca el lecho)

- **Carga de lecho** = es el material que se mueve cerca del lecho por tracción y saltación
- **Carga en suspensión** = el material permanece suspendido por la turbulencia (el diámetro depende del régimen de flujo)
  - Carga de lavado = suspendida siempre
- **Capacidad:** cantidad de sedimento que puede transportar un flujo
- **Competencia:** diámetro máximo de partículas que puede transportar un flujo

# FORMAS DE LECHO, TAMAÑO DE GRANO Y FLUJO

$\Gamma_0 V$



*Alto regimen de  
flujo*

*Bajo regimen de  
flujo*

Lecho plano

Diámetro medio de caída



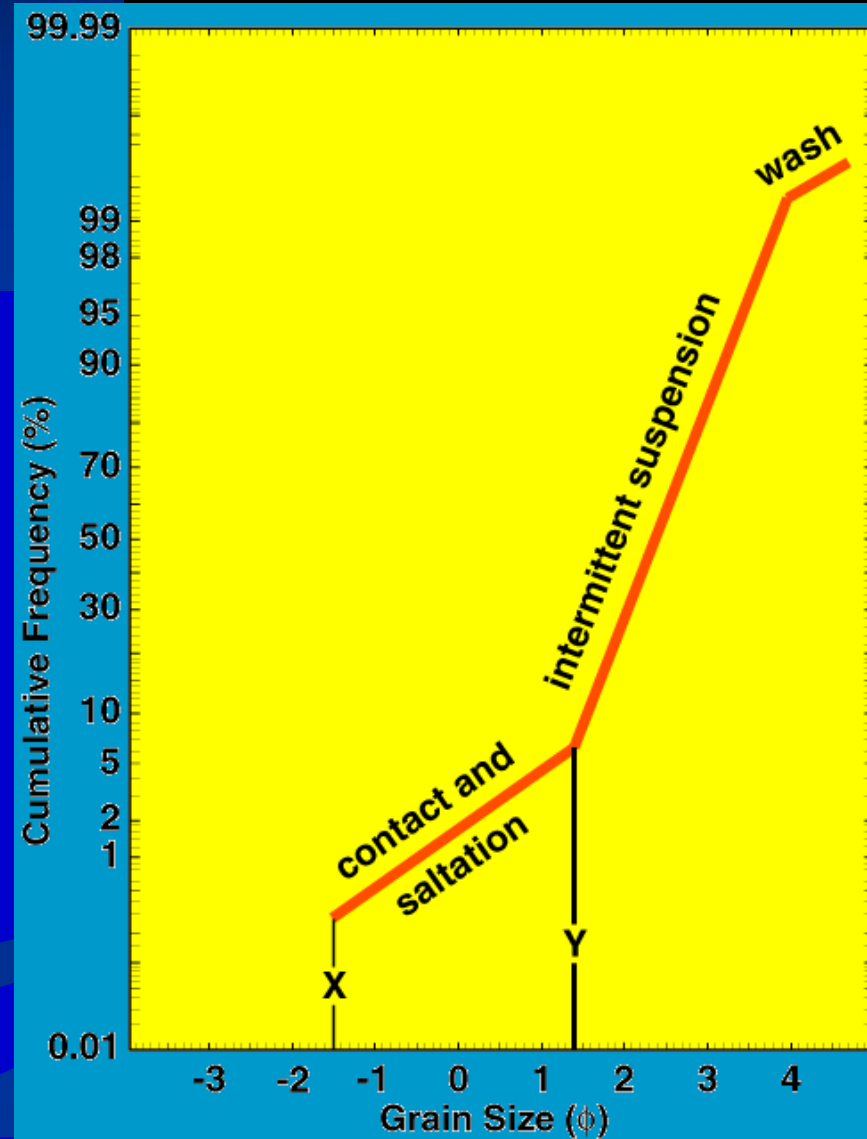
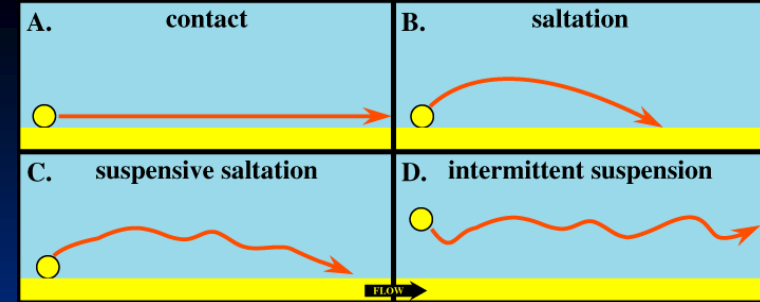
# Interpretación dinámica de la distribución de poblaciones granulométricas

Partículas finas que viajan siempre en suspensión (wash)

Partículas gruesas que viajan como carga de lecho o en saltación.

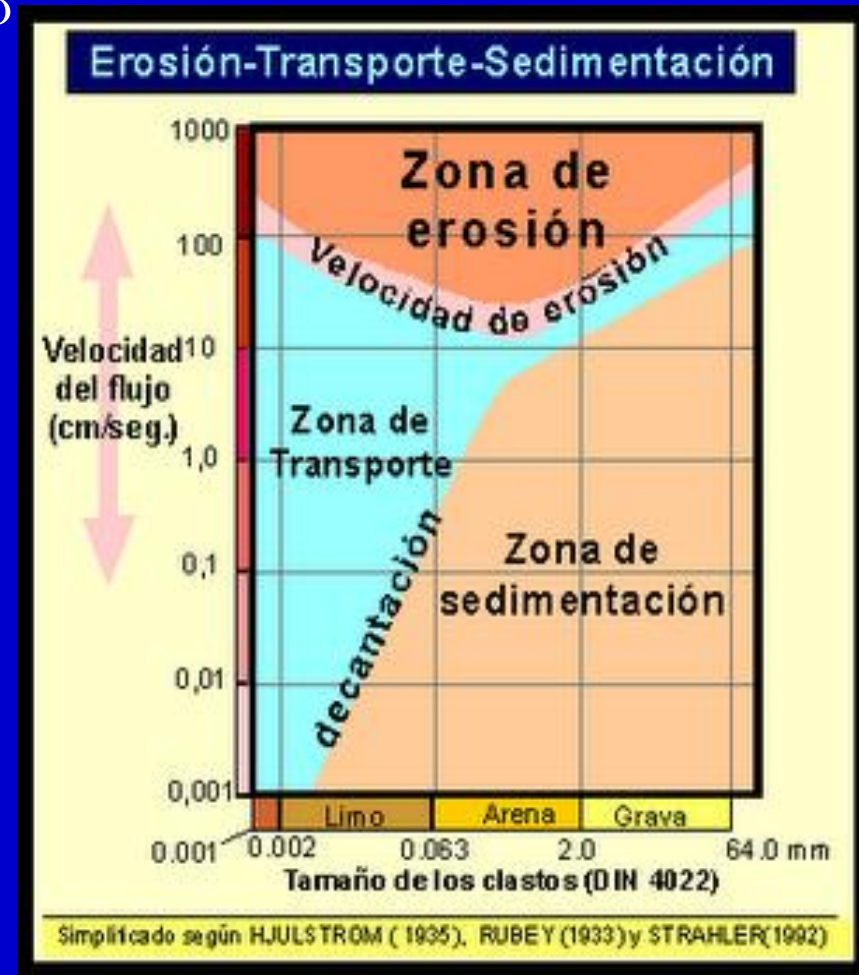
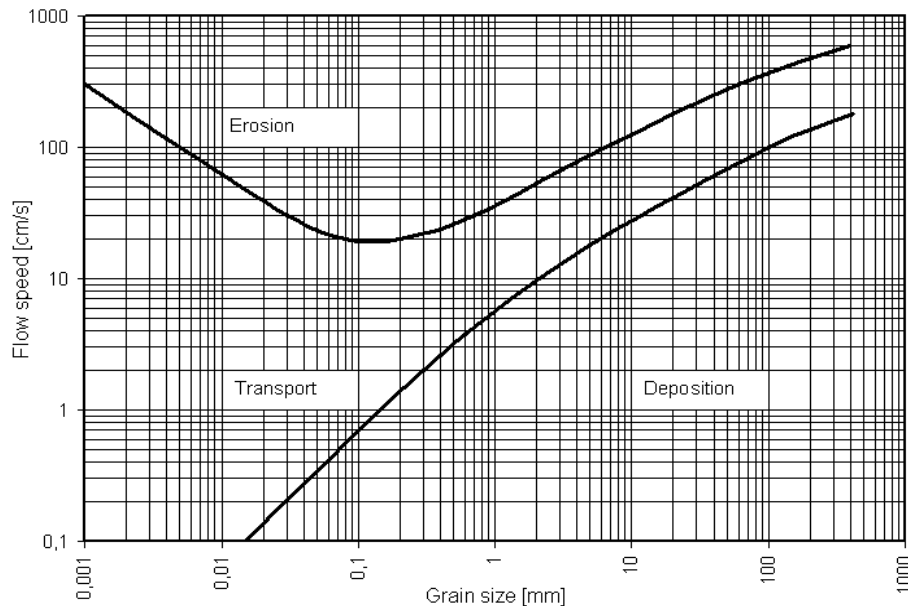
X: tamaño máximo que pudo ser transportado (umbral de movimiento)

Y: tamaño máximo que pudo ser puesto en suspensión (umbral de suspensión)



# Erosión y depositación

La facilidad con la que una corriente erosiona el sustrato y por lo tanto pone en movimiento a las partículas del lecho es influenciada no sólo por el poder de la corriente sino por el tamaño de las partículas y su cohesión. La cohesión de un sustrato inconsolidado es controlada principalmente por el contenido de arcillas y la fricción entre las partículas



# El diagrama de Hjulstrom

Sobre la base de experimentos hechos en un canal de 1 m de profundidad con una corriente unidireccional, el diagrama muestra la velocidad crítica requerida para erosionar partículas de diferentes tamaños (parte superior) o depositarlas (parte inferior)

