

# Estudio del efecto de los sedimentos en el desgaste de elementos de turbinas Pelton

## Caso embalse La Esmeralda – Central hidroeléctrica de AES Chivor



*Universidad de los Andes,  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Grupo de Materiales y Manufactura, CIPP-CIPEM  
Grupo de mecánica computacional*

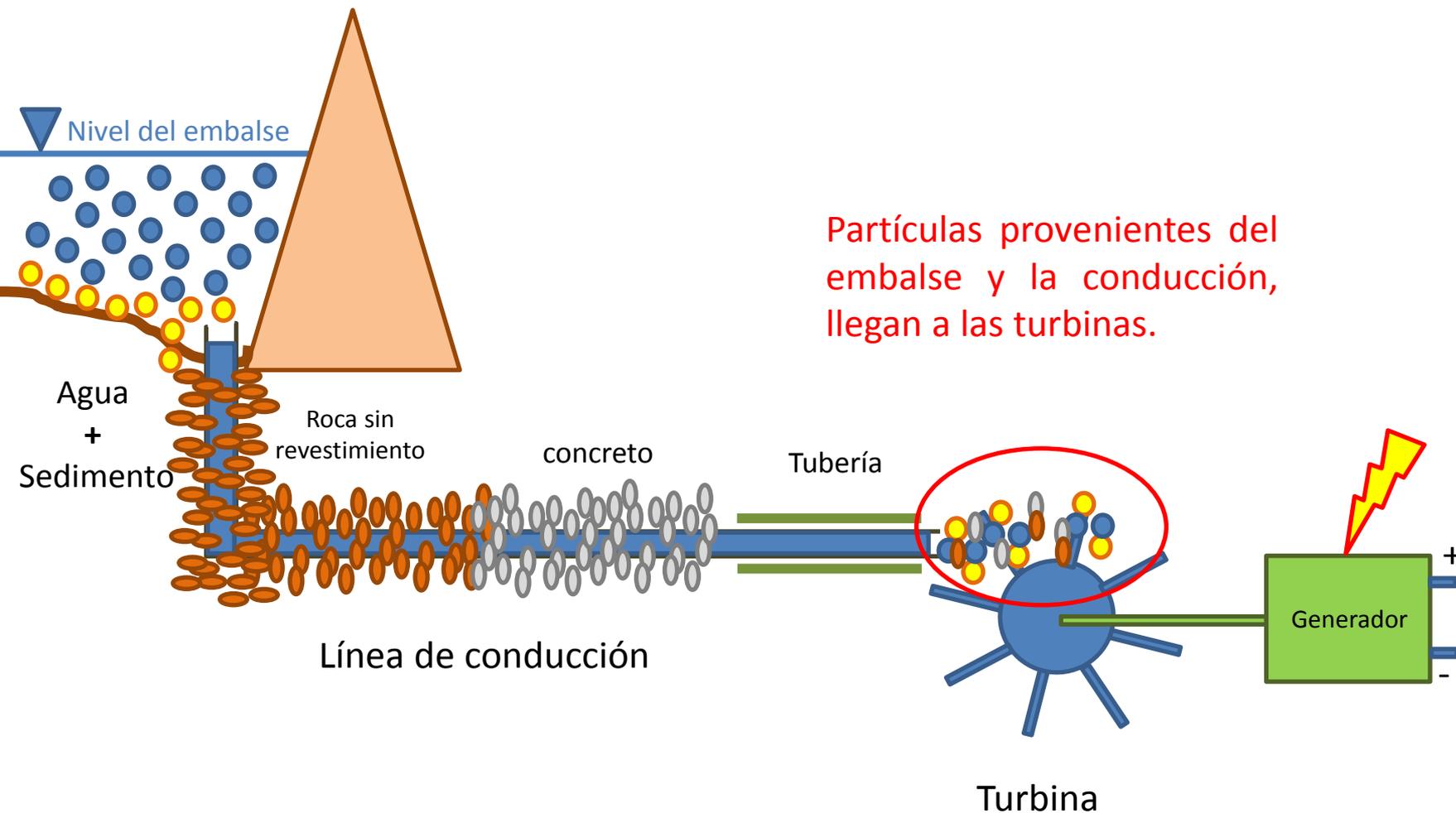
Dr. Jairo A. Escobar G.  
Dr. Jaime Loboguerrero.  
Dr. Orlando Porras  
Dr. Jorge Medina.  
Ing. Andrés M. Morales B.  
Ing. Juan F. Ortiz O.

# Agenda

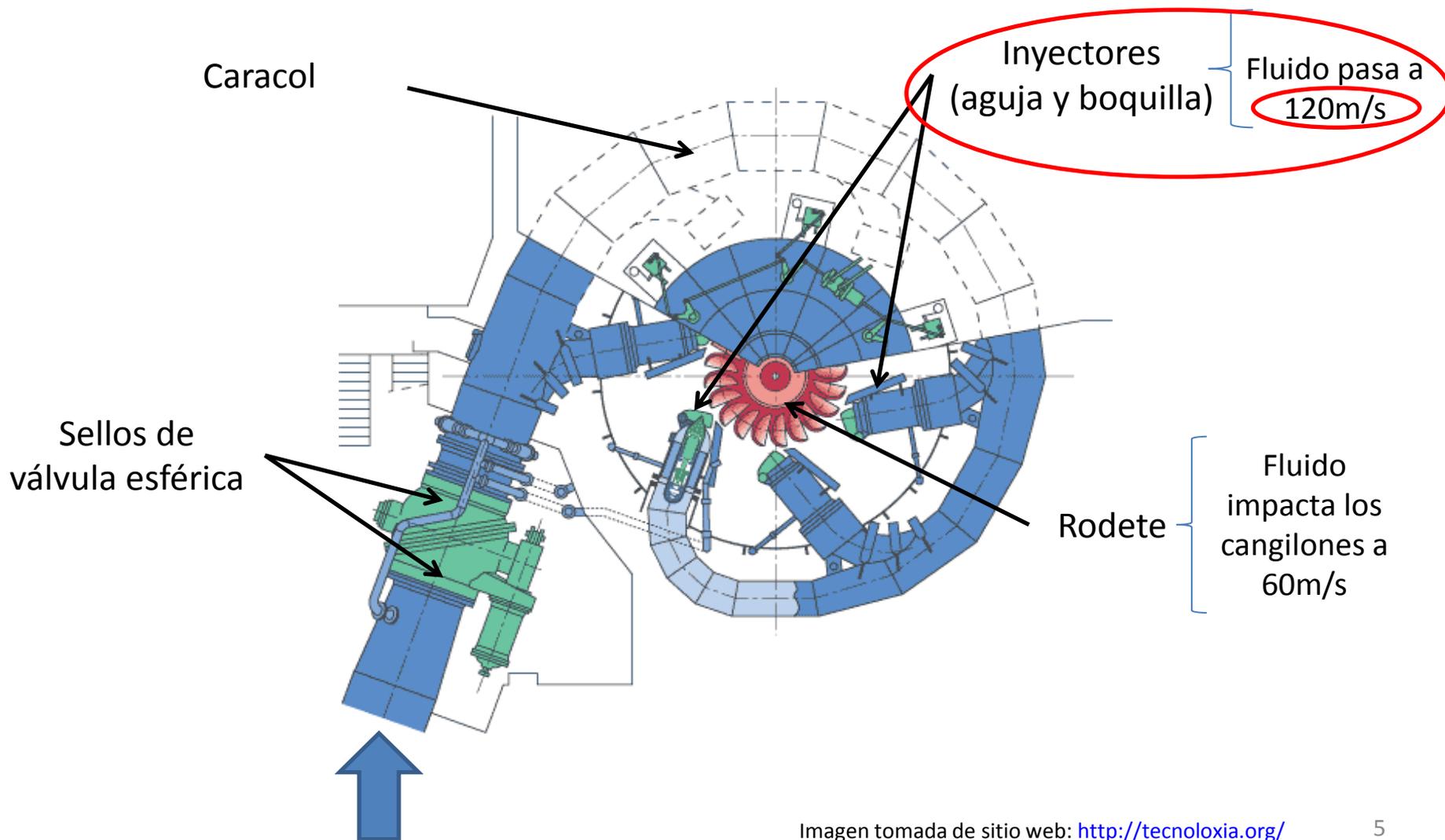
- Contexto
- Objetivo
- Metodología
- Resultados
- Agradecimientos

# Agenda

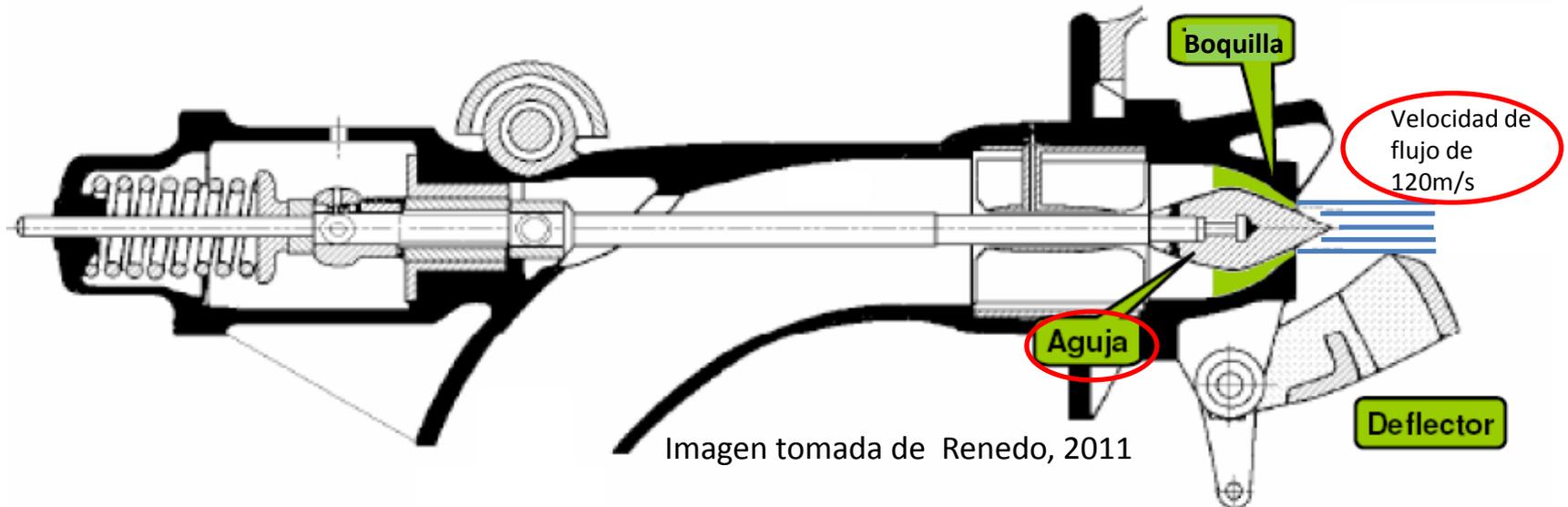
- Contexto
- Objetivo
- Metodología
- Resultados
- Agradecimientos



## Principales elementos desgastados por efecto de sedimentos



## Elementos desgastados por efecto de sedimentos: **Inyector**



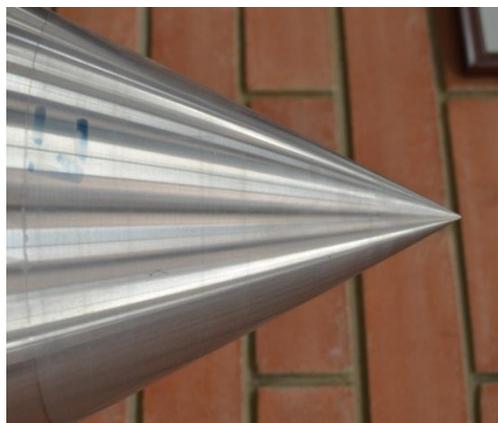
**Desgaste:** Pérdida progresiva de material derivada de la interacción (contacto) entre 2 o más cuerpos.

**Erosión:** Desgaste derivado del impacto de sólidos o líquidos sobre una superficie.

$$E = f(C * H * D * G * f(\alpha) * V^{2-3})$$

Tasa de erosión → C  
 Concentración de partículas → H  
 Dureza de partícula → D  
 Tamaño partícula → G  
 Geometría partícula → f(α)  
 Ángulo de impacto → α  
 Velocidad de impacto → V

¿Cómo afectan los sedimentos el desgaste?



0 horas de operación



9000 horas de operación con baja concentración de sedimentos



24 horas de operación con alta concentración de sedimentos

## Consecuencias del desgaste



Desgaste de la zona de sello



### Fugas

Flujo de agua que no genera energía



- Desperdicio del recurso
- Paradas de mantenimiento
- Disminución de la capacidad
- Incremento de costos operativos
- Vulnerabilidad en Sistema



Desgaste de las superficies directoras de flujo.



### Pérdida de eficiencia

Mayor cantidad de flujo para generar energía



¿Cómo contrarrestar la erosión de componentes?

$$E = f(C * H * D * G * f(\alpha) * V^{2-3})$$

Tasa de erosión  
Concentración de partículas  
Dureza de partícula  
Tamaño partícula  
Geometría partícula  
Ángulo de impacto  
Velocidad de impacto

¿Cualquier tecnología que permita el aumento de la dureza es una solución para aumentar la resistencia al desgaste de componentes?

NO



Aguja recubierta con WC-Co mediante HVOF después de 4000h de operación

La solución para el desgaste es única para cada central tiene condiciones de operación diferentes y la relación entre el abrasivo (sedimentos) y el sustrato es particular

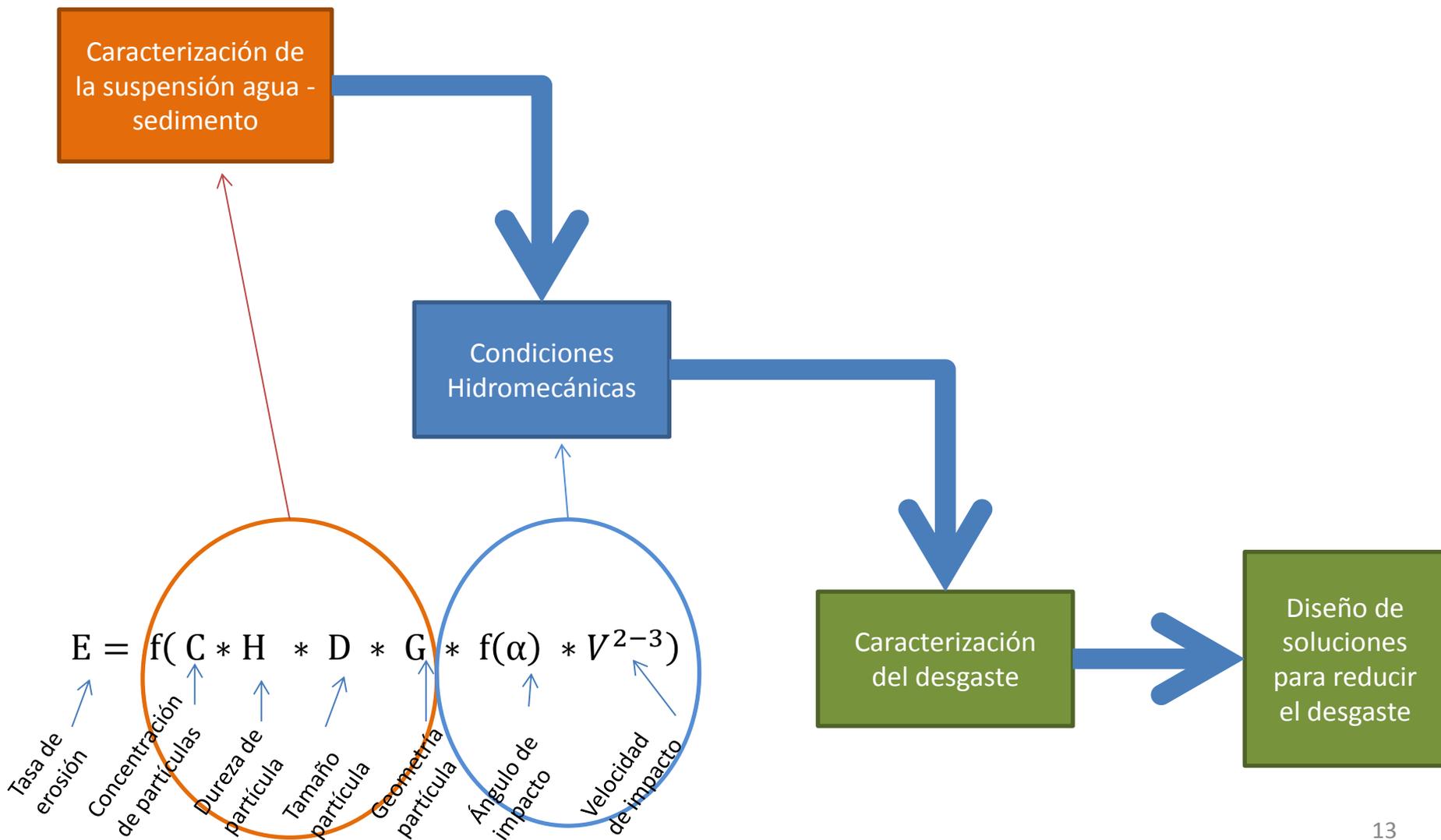
# Agenda

- Contexto
- **Objetivo**
- Metodología
- Resultados
- Agradecimientos

*Identificar y caracterizar* los sedimentos presentes en el agua de generación del embalse La Esmeralda para *diseñar* una solución que permita el aumento de la vida útil de agujas y boquillas de la central hidroeléctrica de Chivor.

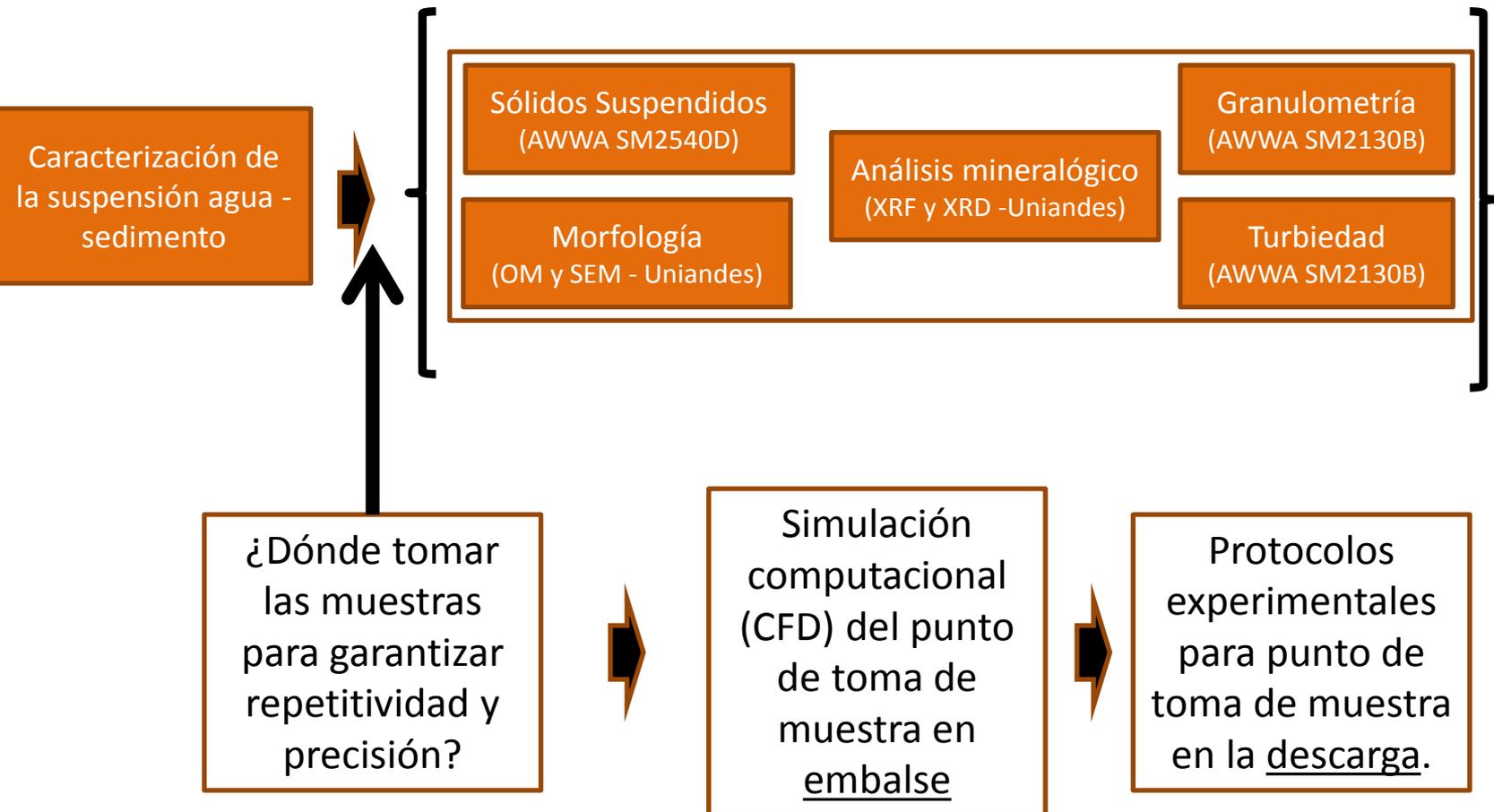
# Agenda

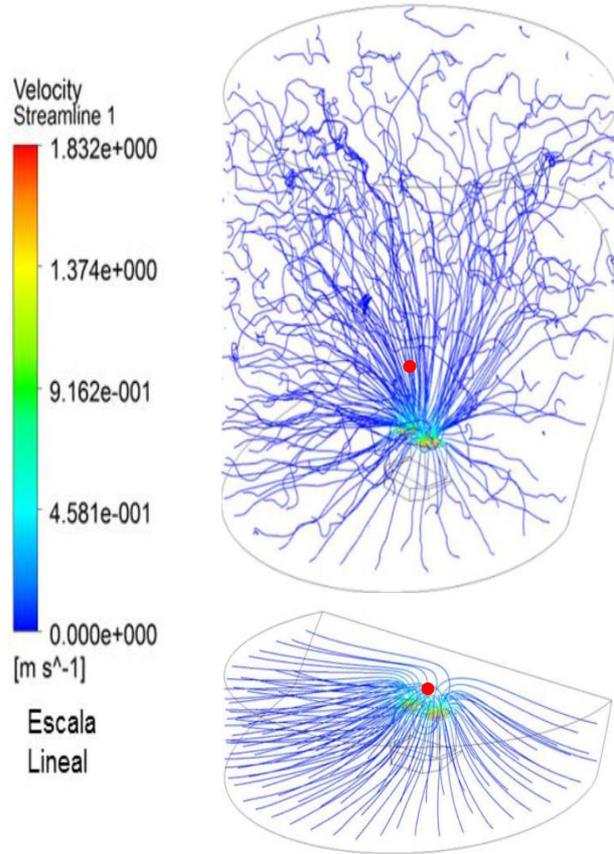
- Contexto
- Objetivo
- **Metodología**
- Resultados
- Agradecimientos



# Agenda

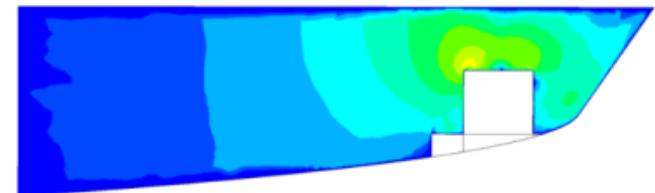
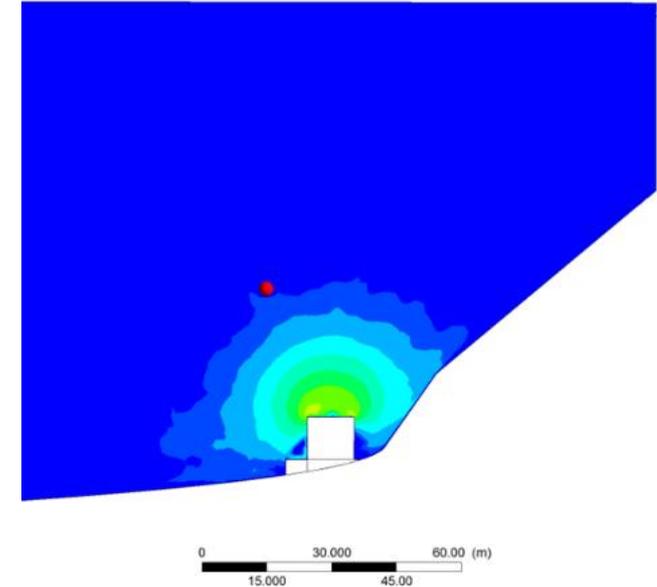
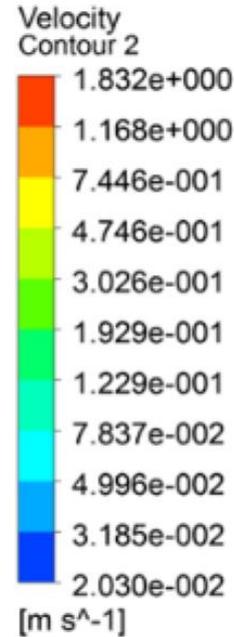
- Contexto
- Objetivo
- Metodología
- **Resultados**
- Agradecimientos





Nivel máximo del embalse

Nivel mínimo del embalse



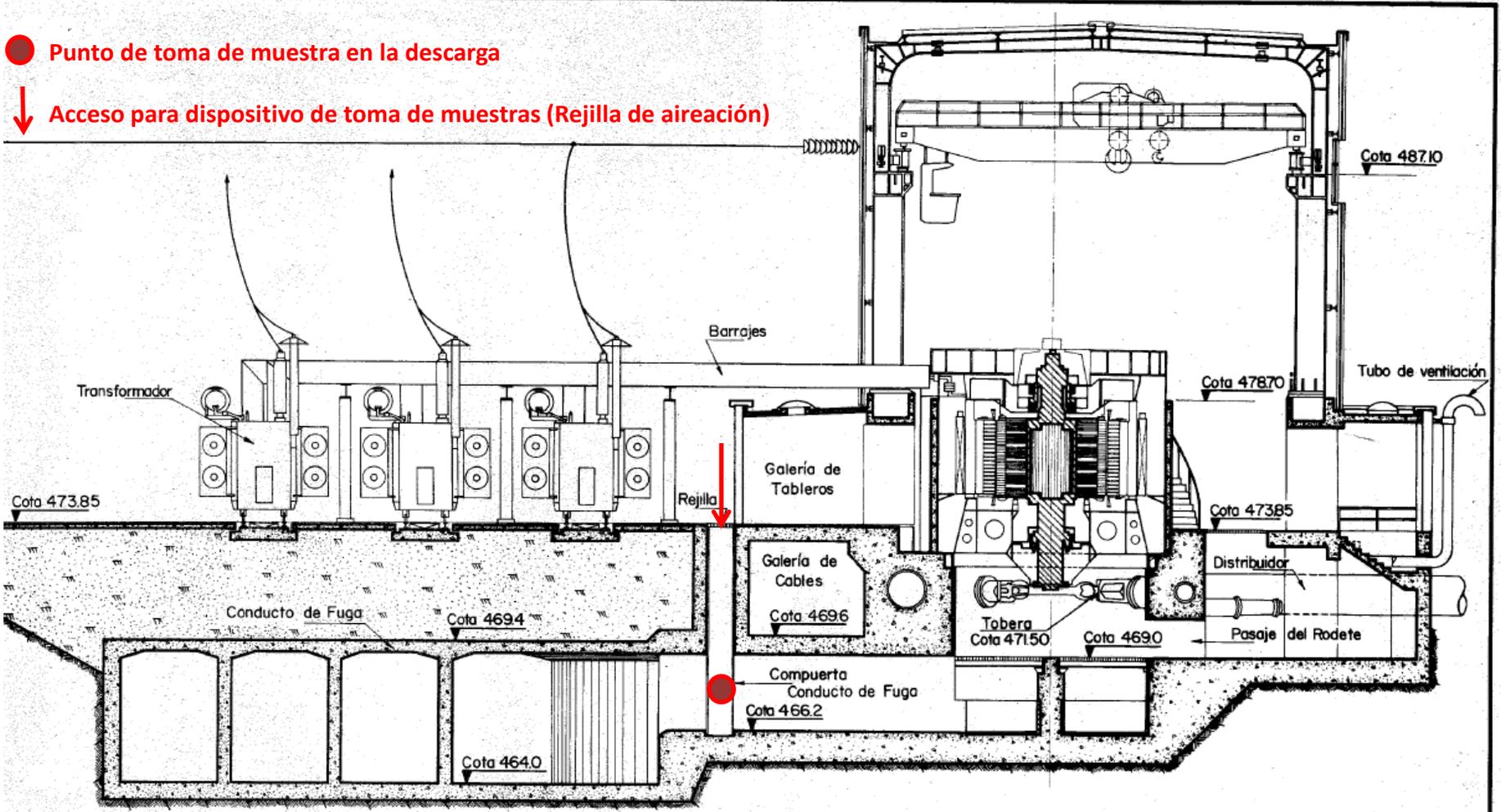
Contornos de velocidad en el embalse  
 - Límite inferior de la escala  $v_t$  de una partícula de  $D=90\ \mu\text{m}$

**● Punto de toma de muestra en el embalse**

Un punto 10m por encima de las bocatomas es adecuado para captar partículas de hasta 90 $\mu\text{m}$ .

## Punto de muestra en la descarga (fuga)

- Punto de toma de muestra en la descarga
- ↓ Acceso para dispositivo de toma de muestras (Rejilla de aireación)

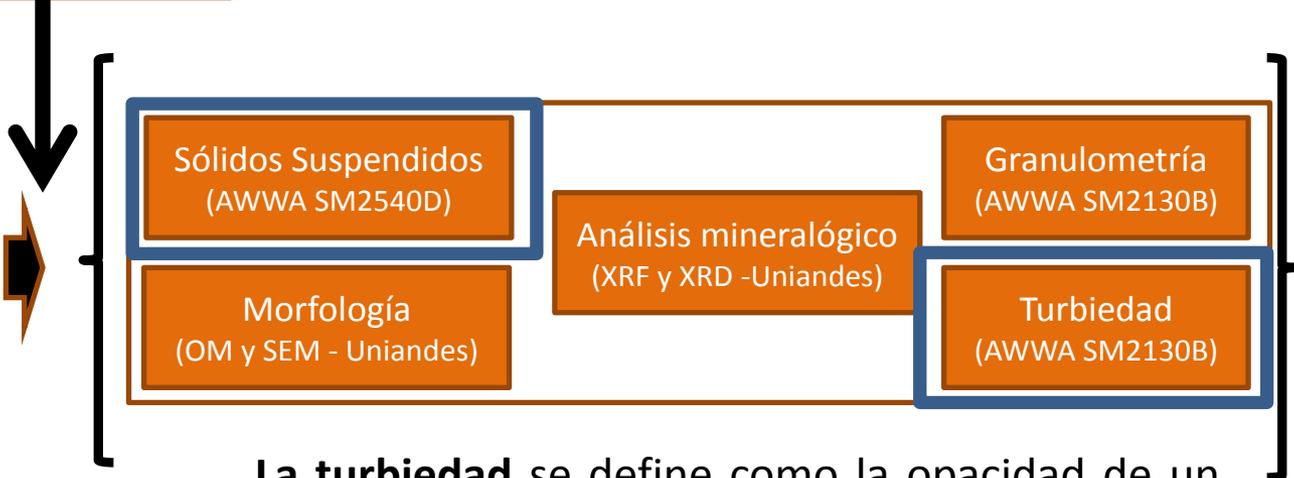


CORTE TRANSVERSAL

Imagen cortesía de AES Chivor

Muestras provenientes del embalse y la descarga.

Caracterización de la suspensión agua-sedimento



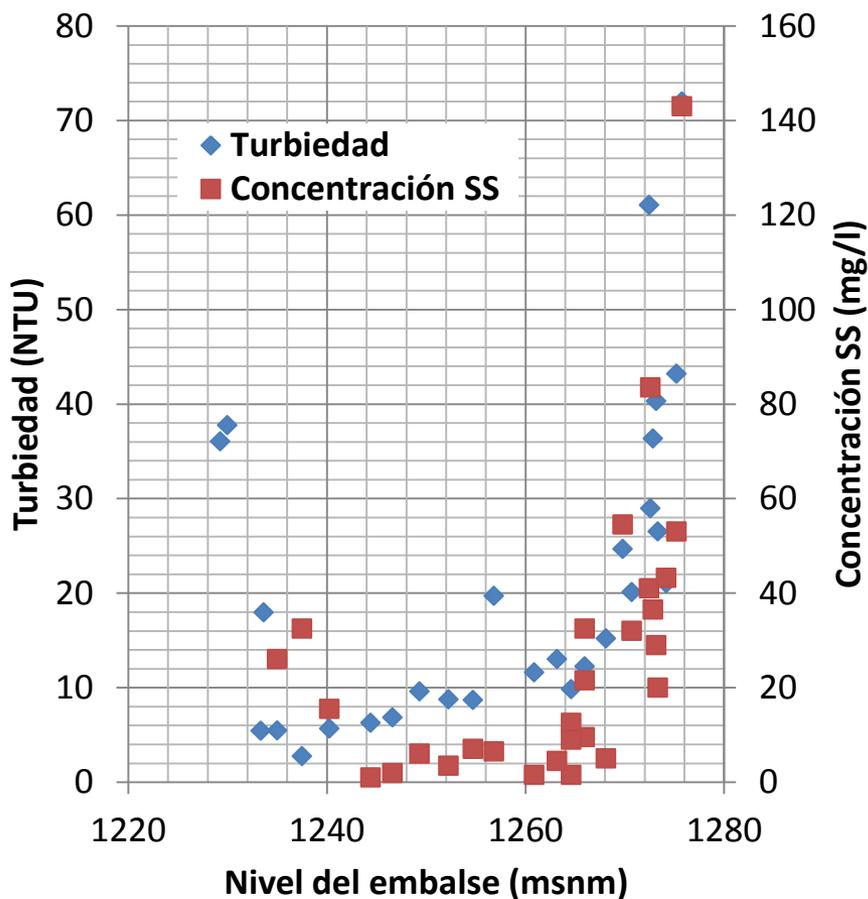
**La turbiedad** se define como la opacidad de un fluido por efecto de los **sólidos suspendidos**. Se mide en NTU

$$E = f(C * H * D * G * f(\alpha) * V^{2-3})$$

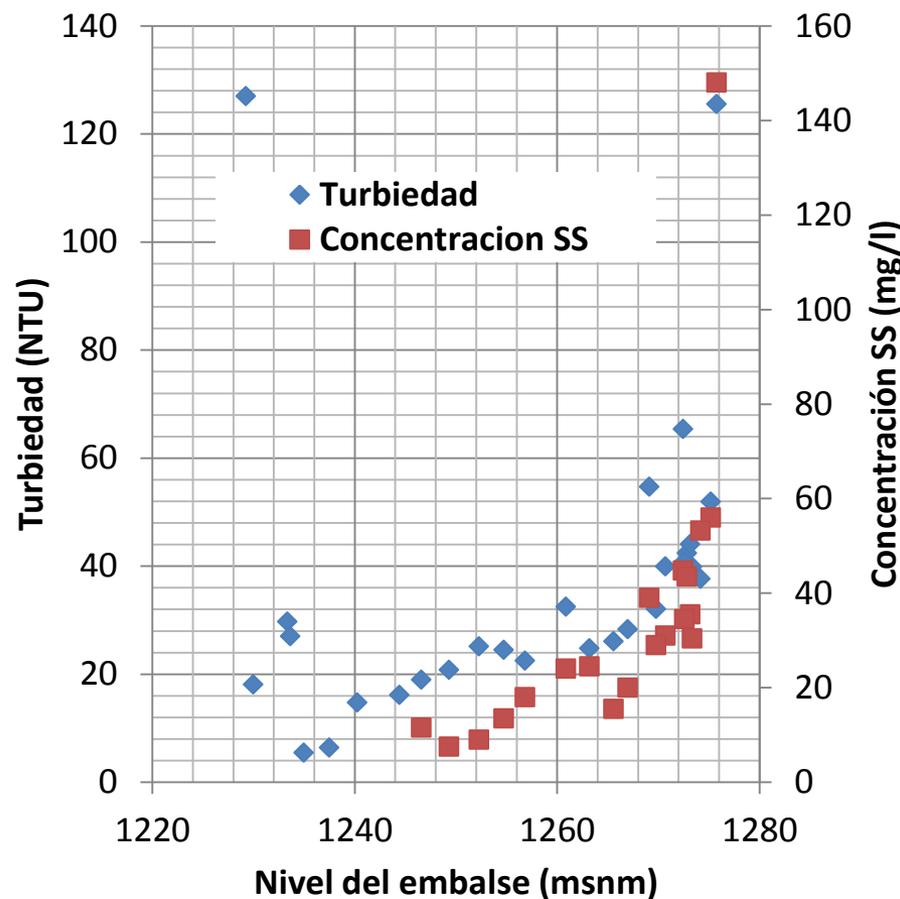
Tasa de erosión (pointing to E)  
 Concentración de partículas (pointing to C)  
 Dureza de partícula (pointing to H)  
 Tamaño partícula (pointing to D)  
 Geometría partícula (pointing to G)  
 Ángulo de impacto (pointing to f(α))  
 Velocidad de impacto (pointing to V)

## Turbiedad y sólidos suspendidos

### Embalse



### Fuga

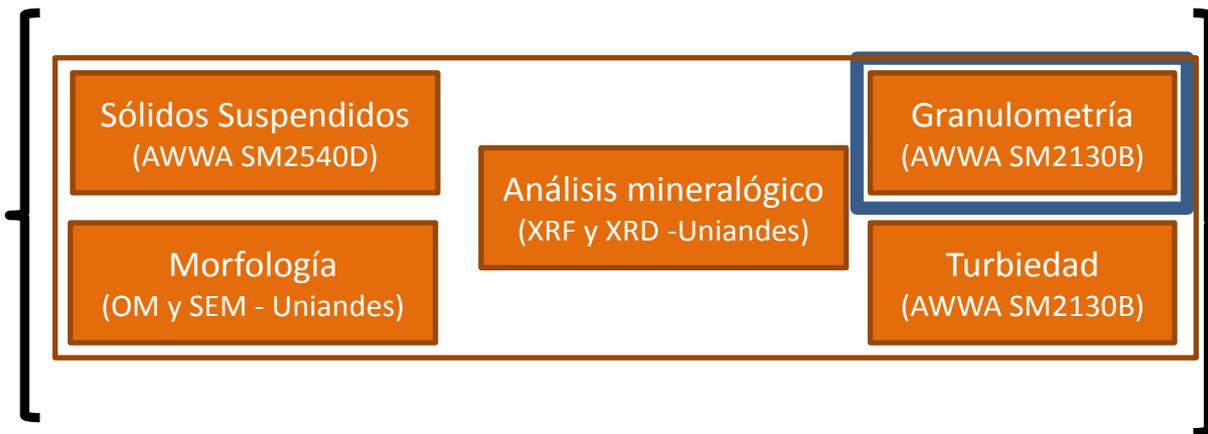


Las concentraciones de sedimentos más altas registradas son de 148mg/l en la descarga.

Bajo potencial abrasivo.

Muestras provenientes del embalse y la descarga.

Caracterización de la suspensión agua - sedimento



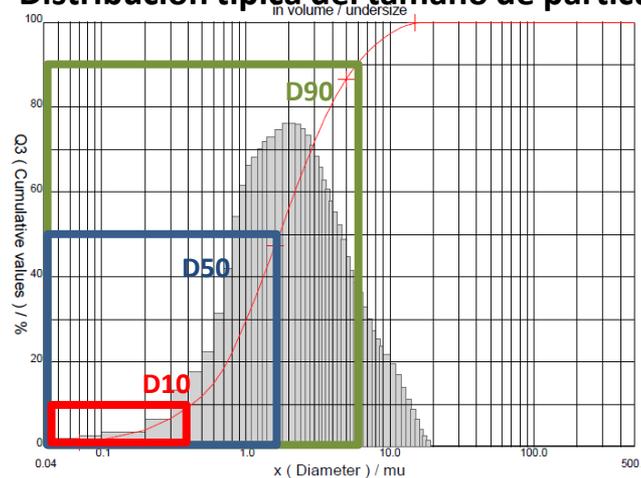
La **granulometría** permite determinar la distribución de tamaño de partículas

$$E = f(C * H * D * G * f(\alpha) * V^{2-3})$$

The equation is annotated with arrows pointing to each variable:

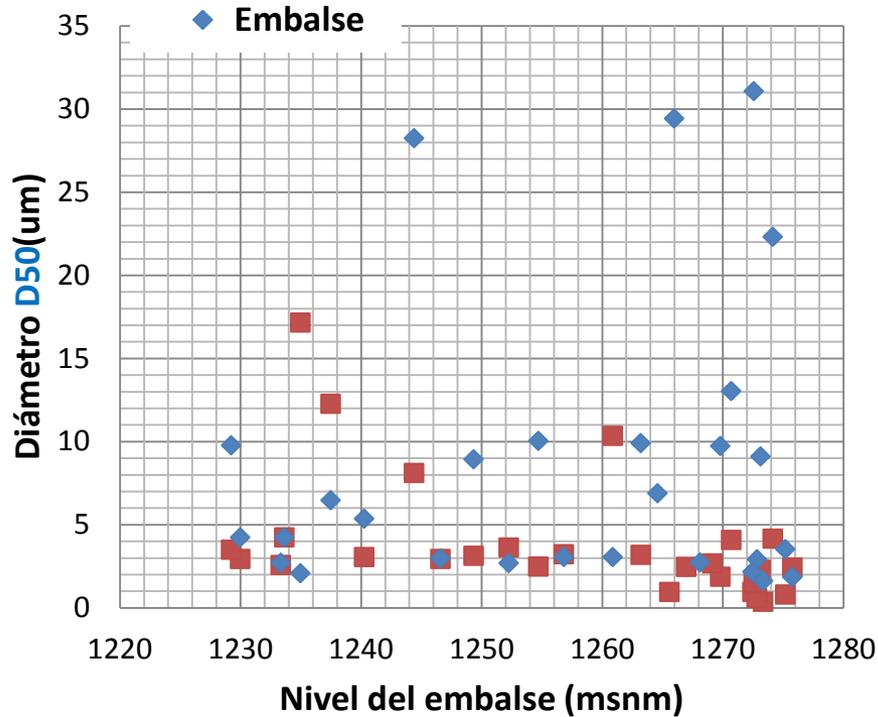
- $E$ : Tasa de erosión
- $C$ : Concentración de partículas
- $H$ : Dureza de partícula
- $D$ : Tamaño partícula
- $G$ : Geometría partícula
- $f(\alpha)$ : Ángulo de impacto
- $V$ : Velocidad de impacto

Distribución típica del tamaño de partícula

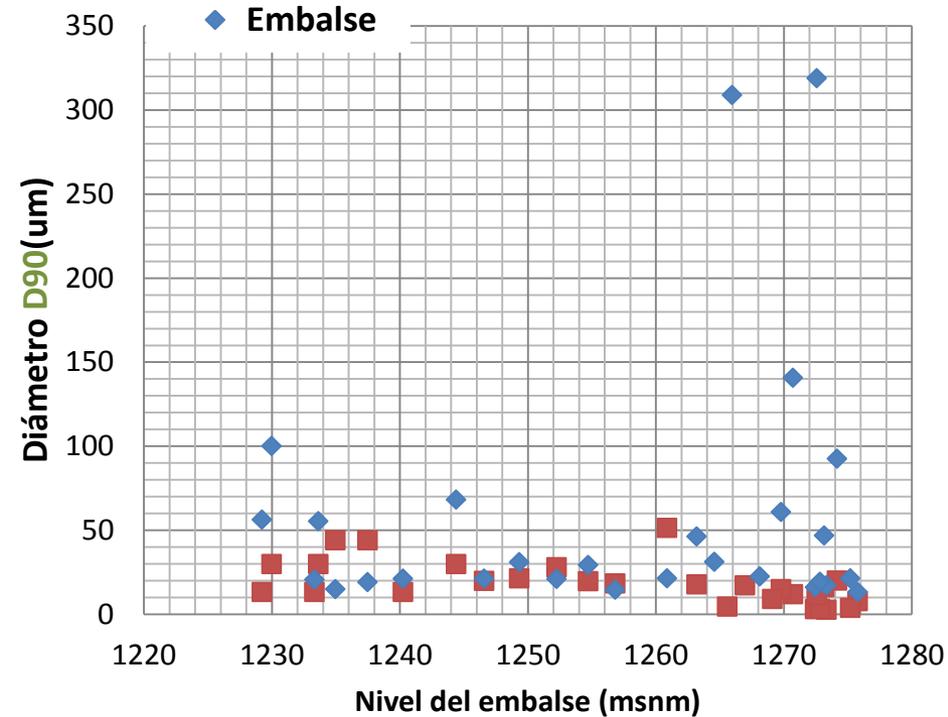


## Caracterización de muestras agua-sedimento

Variación del tamaño **D50** vs nivel del embalse



Variación del tamaño **D90** vs nivel del embalse



Las partículas que desgastan las componentes se encuentran en un rango de 0,3µm a 10µm. **Partículas muy pequeñas en comparación con otras centrales.**

Muestras provenientes del embalse y la descarga.

Caracterización de la suspensión agua - sedimento

Sólidos Suspendedos (AWWA SM2540D)

Granulometría (AWWA SM2130B)

Análisis mineralógico (XRF y XRD -Uniandes)

Morfología (OM y SEM - Uniandes)

Turbiedad (AWWA SM2130B)

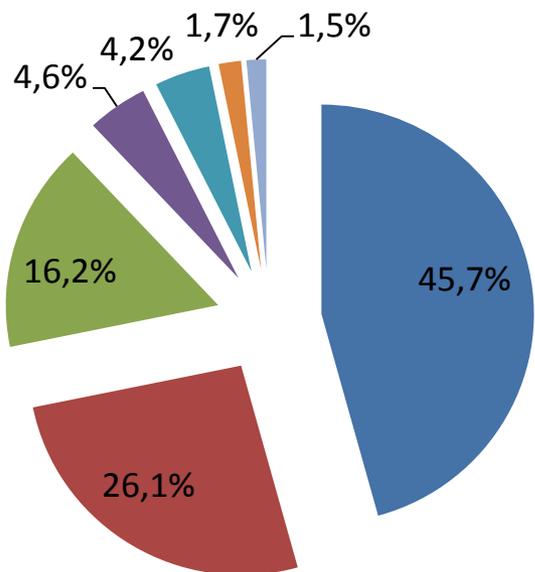
El análisis mineralógico permite identificar los minerales presentes y su proporción en peso de las muestras de sedimento y por medio de microscopía se determina su geometría (**morfología**)

$$E = f(C * H * D * G * f(\alpha) * V^{2-3})$$

Tasa de erosión → E  
 Concentración de partículas → C  
 Dureza de partícula → H  
 Tamaño partícula → D  
 Geometría partícula → G  
 Ángulo de impacto → α  
 Velocidad de impacto → V

## Caracterización de muestras agua-sedimento

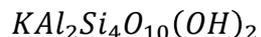
### Alto potencial abrasivo



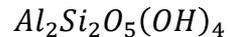
■ Cuarzo (1161 HV)



■ Illita (62 HV)



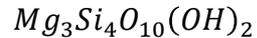
■ Caolinita (27 HV)



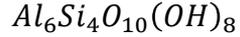
■ Anortoclasa (80 HV)



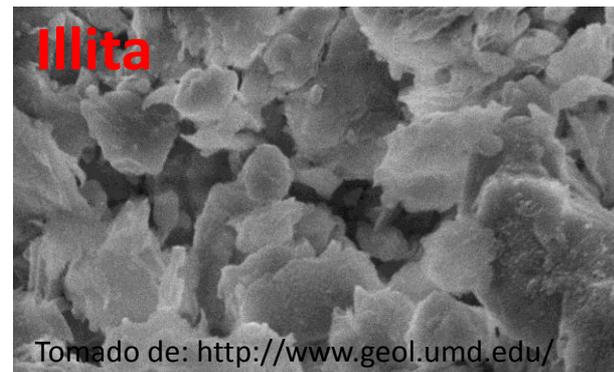
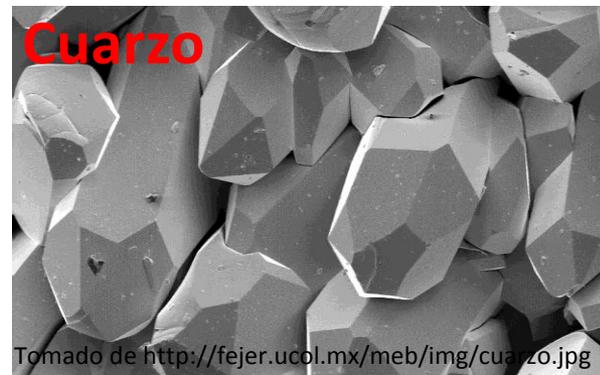
■ Talco (27 HV)



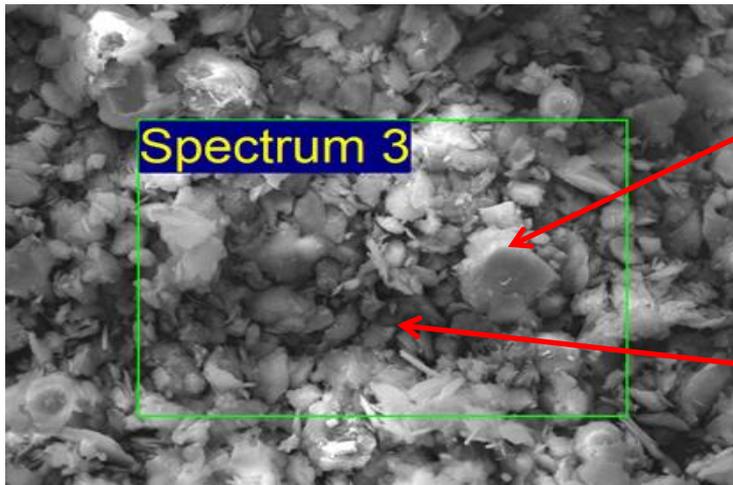
■ Chamosita (157 HV)



■ Anatasa (669 HV)



### Sedimentos embalse La Esmeralda

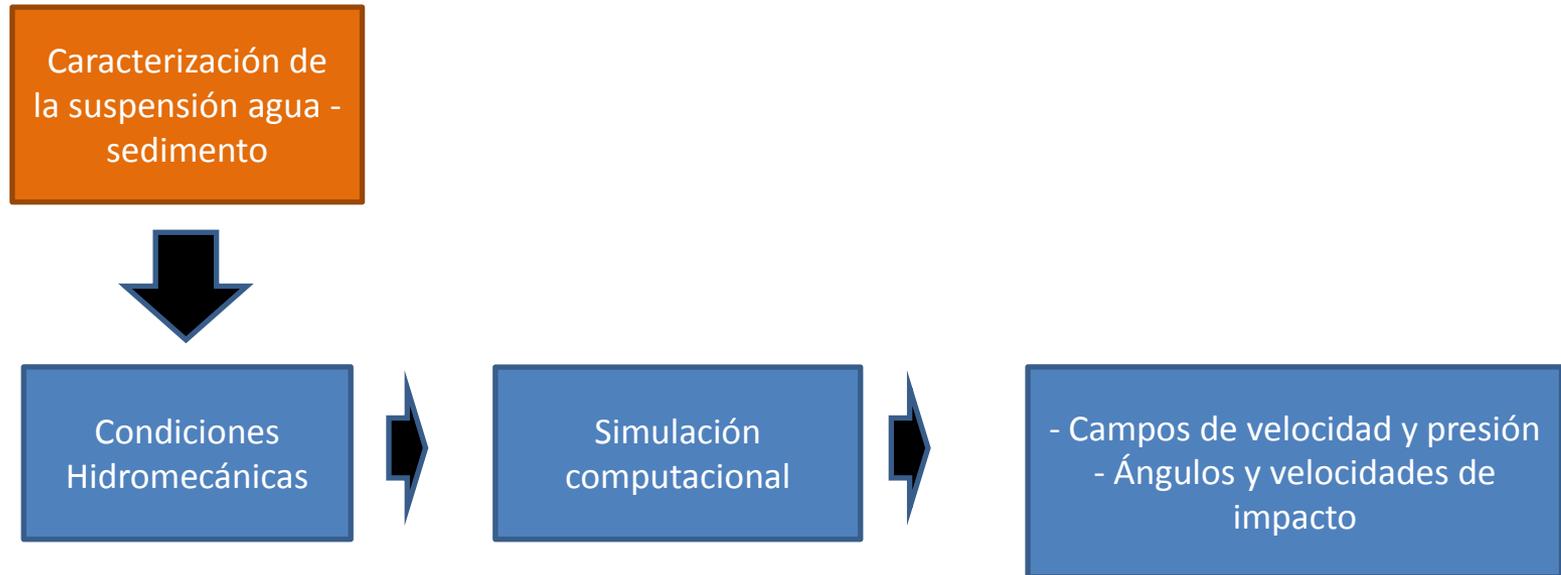


Formas poligonales con puntas agudas, características de minerales como el  $SiO_2$

Geometrías tipo hojuela características de aluminosilicatos

# Resultados

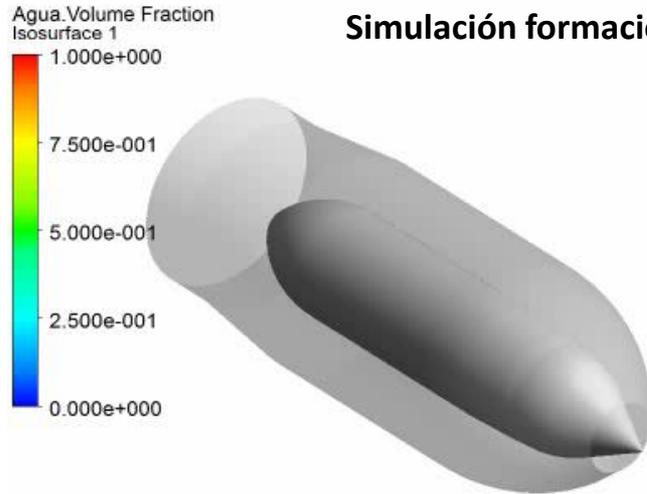
## Condiciones hidro-mecánicas



$$E = f(C * H * D * G * f(\alpha) * V^{2-3})$$

Tasa de erosión  
Concentración de partículas  
Dureza de partícula  
Tamaño partícula  
Geometría partícula  
Ángulo de impacto  
Velocidad de impacto

Simulación formación del chorro.



## Condición de apertura del inyector al 75%

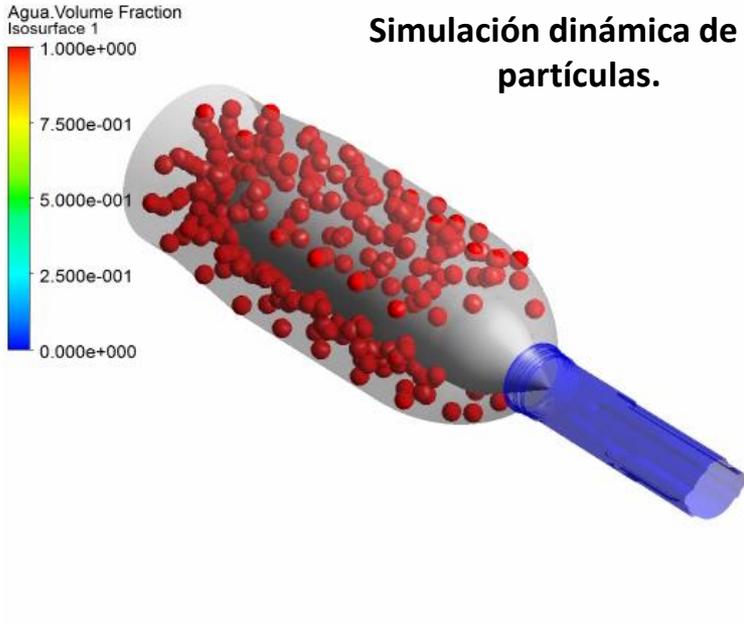
- El agua se acelera de 20 a 120m/s en 7 cm
- La superficie de la aguja soporta una presión cercana a 70bar.

Campo de velocidad sobre la aguja y a través del inyector



ANSYS  
FLUENT

Simulación dinámica de las partículas.



## Condición de apertura del inyector al 75%

El 5% de las partículas impactan las superficies.

La velocidad de impacto de partículas es cercana a 100m/s.

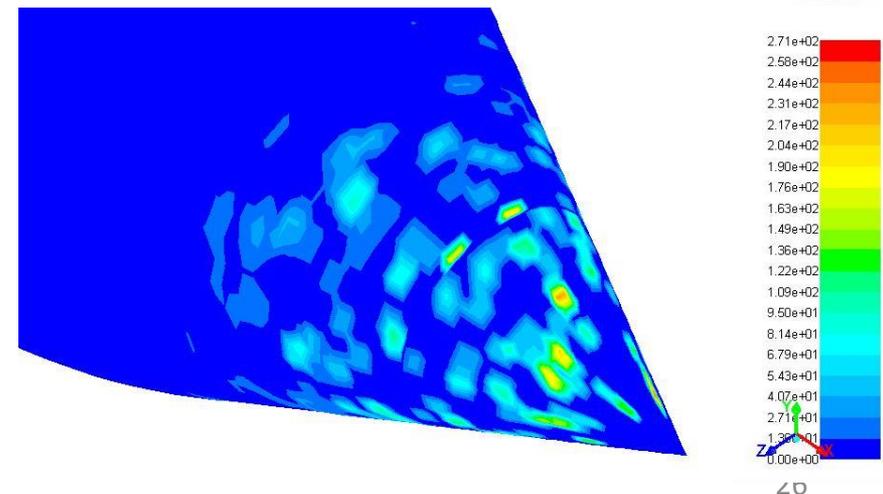
La aguja recibe impactos con bajos ángulos ( $0,2^{\circ}$ - $7^{\circ}$ )

La boquilla recibe impactos con ángulos de  $85^{\circ}$  a  $90^{\circ}$

La zona central de la aguja tiene mayor frecuencia de impactos.

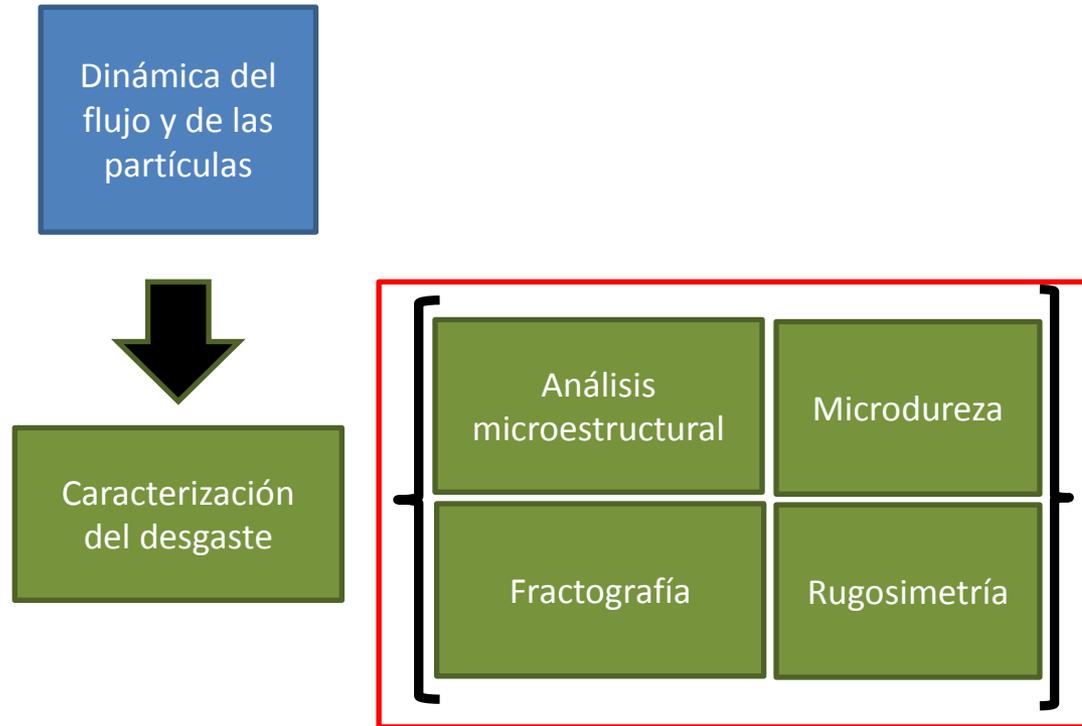
La boquilla tiene mayor frecuencia de impacto en la zona del sello.

Zonas de impacto de partículas sobre la aguja



# Resultados

## Caracterización del desgaste



$$E = f(C * H * D * G * f(\alpha) * V^{2-3})$$

Tasa de erosión

Concentración de partículas

Dureza de partícula

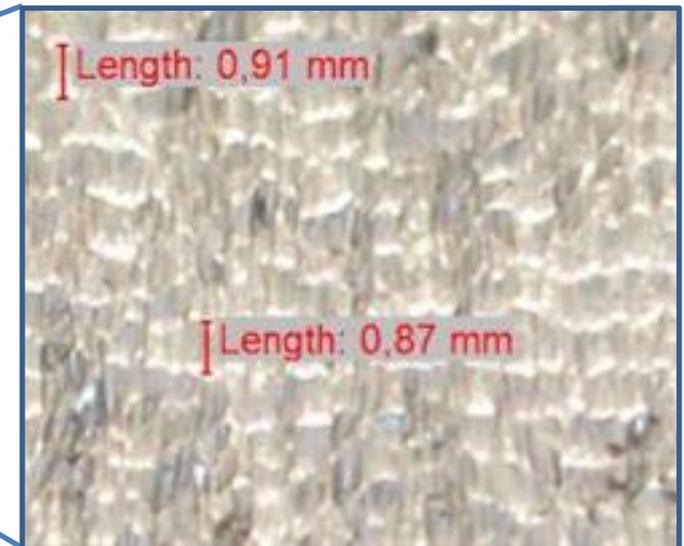
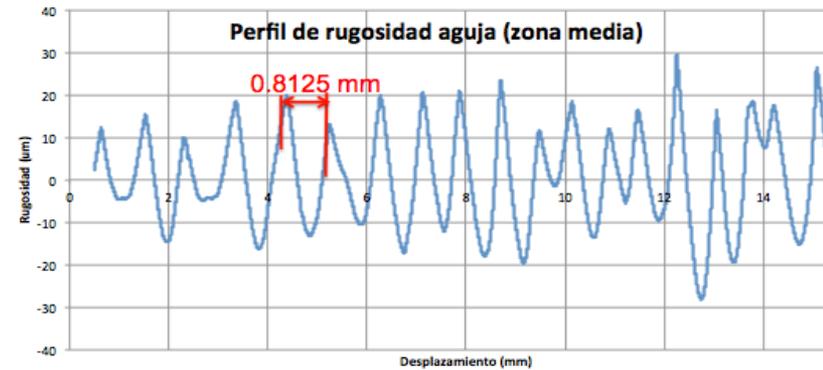
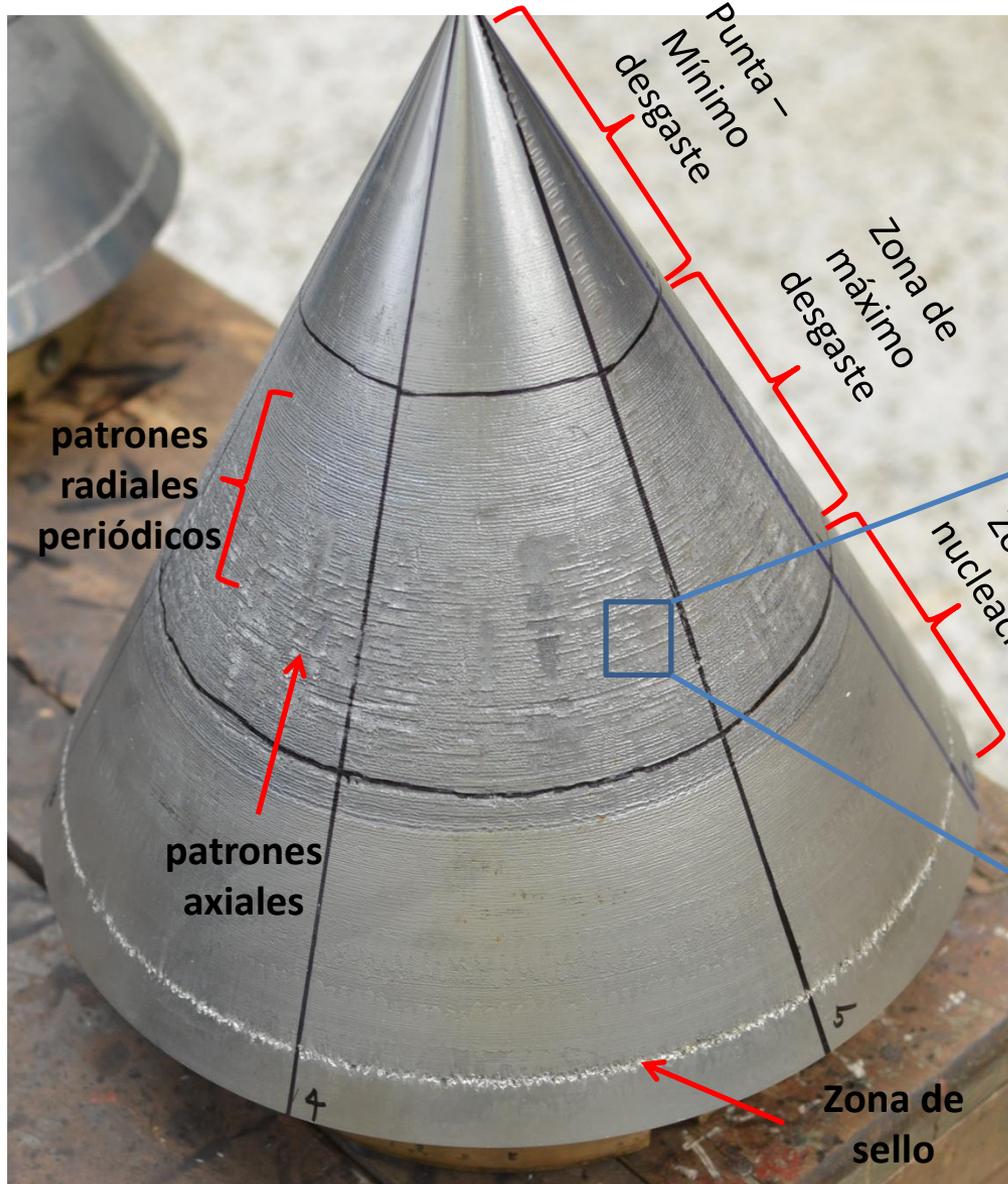
Tamaño partícula

Geometría partícula

Ángulo de impacto

Velocidad de impacto

## Caracterización del desgaste

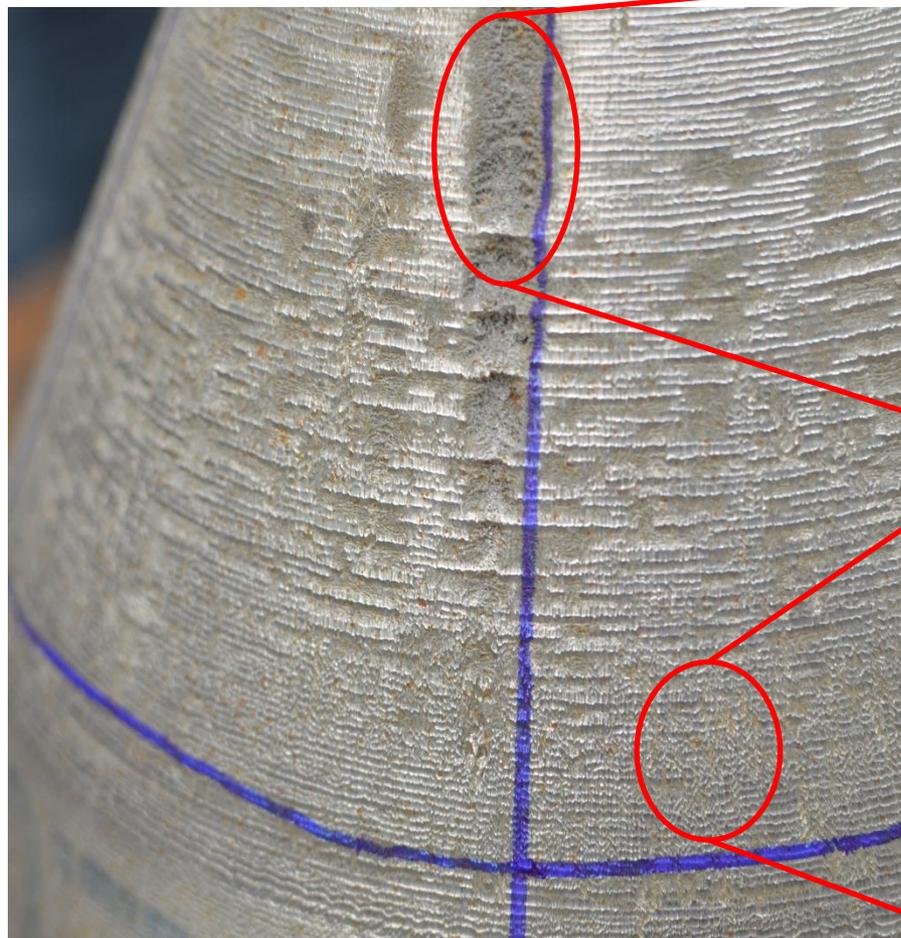


Las características determinan que es desgaste erosivo y validan la simulación computacional

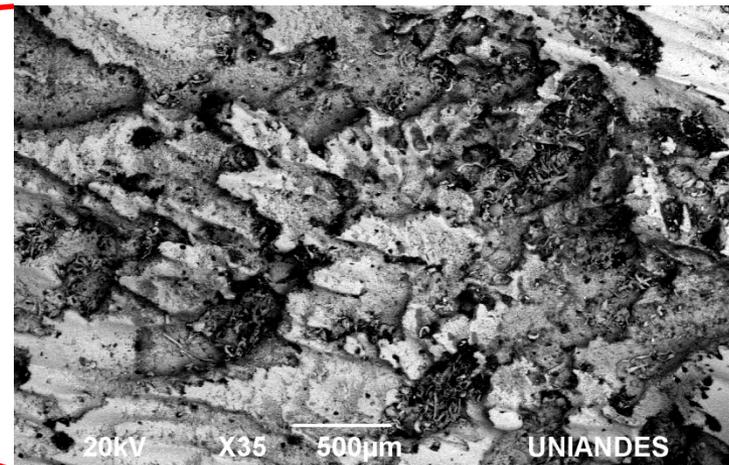
# Resultados

## Caracterización del desgaste

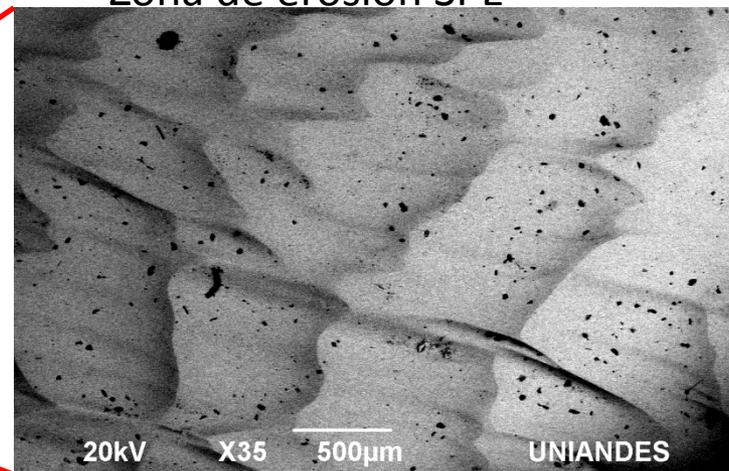
Patrones topográficos del desgaste



Zona de erosión cavitación

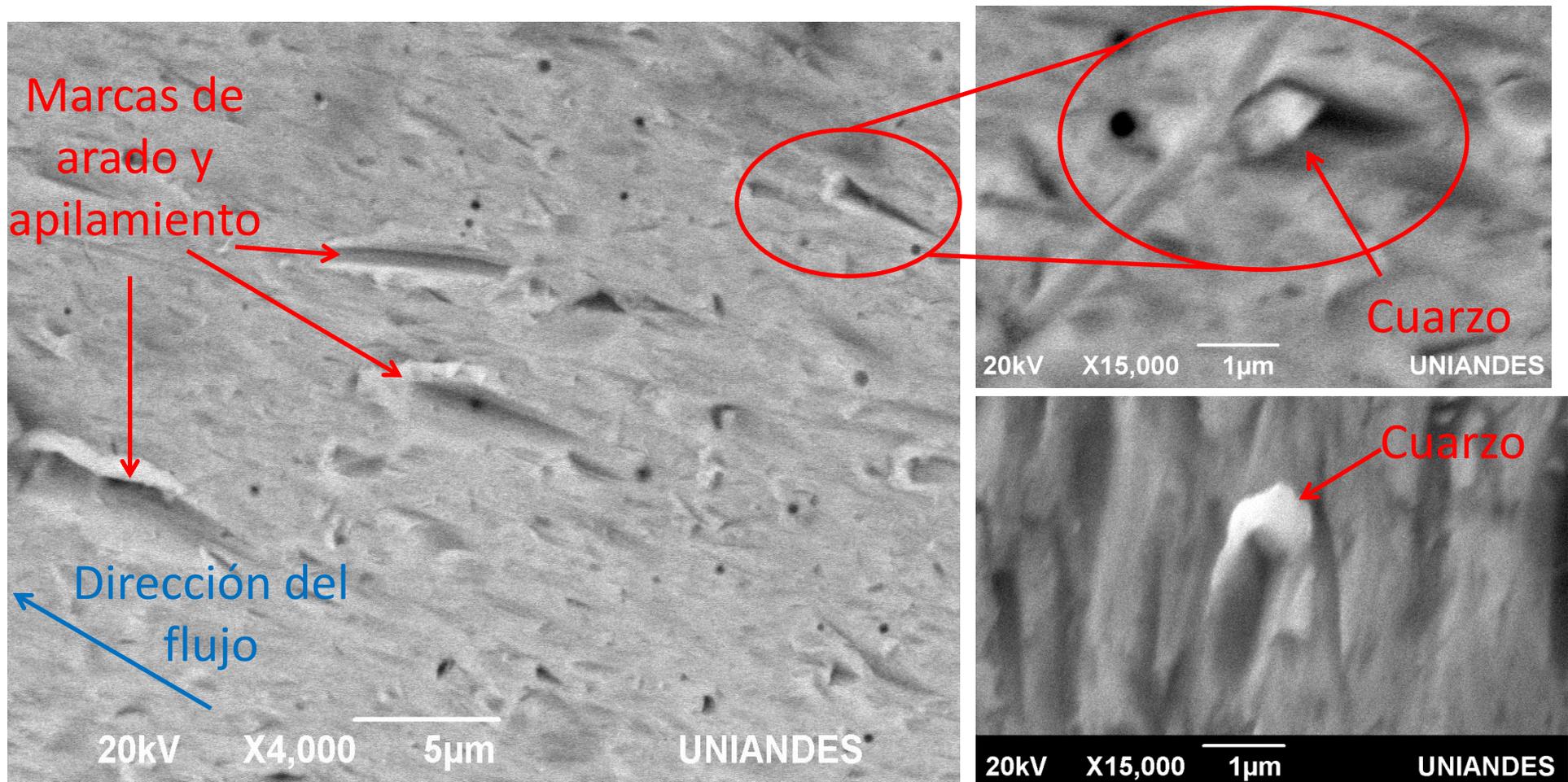


Zona de erosión SPE



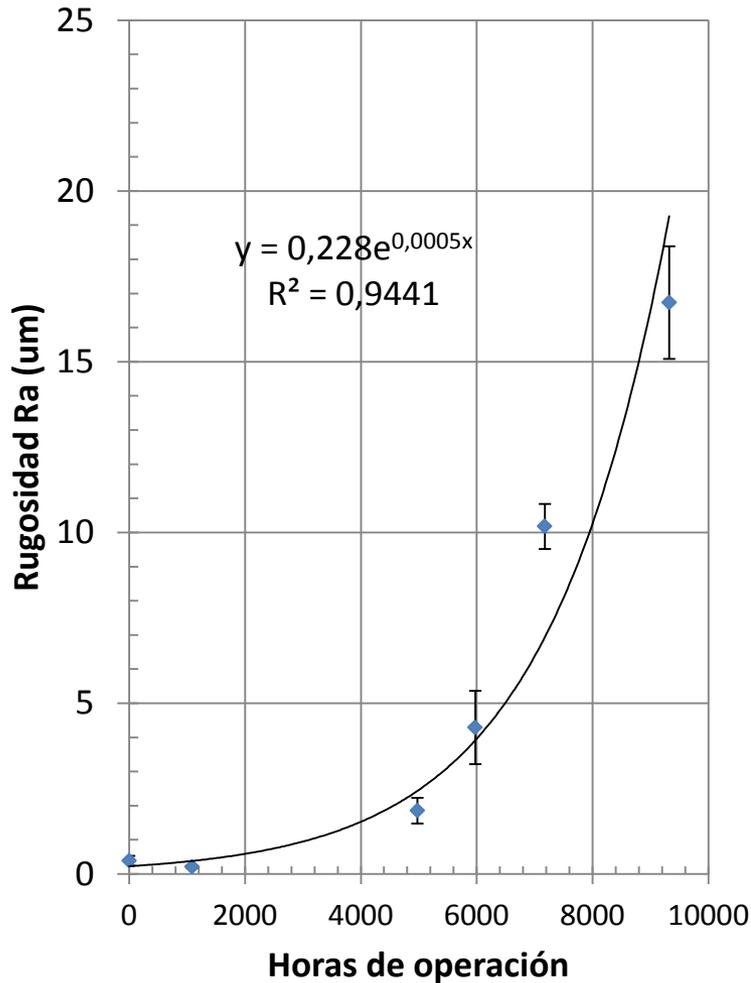
El desgaste inicia por efecto de las partículas y desencadena cavitación

### Morfologías de desgaste erosivo SPE



El mecanismo de pérdida de material es microcorte

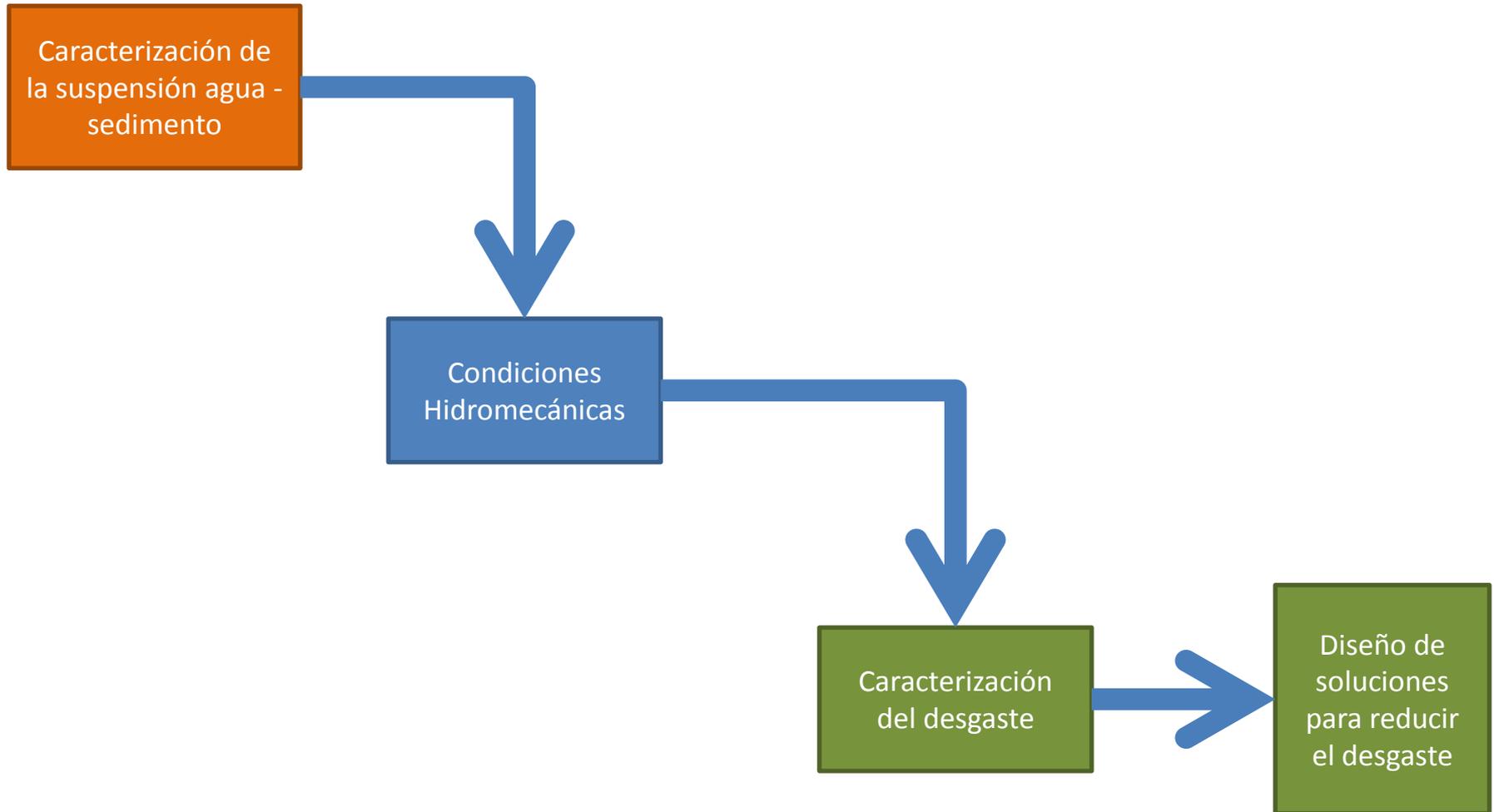
Variación de la rugosidad en función de las horas de operación



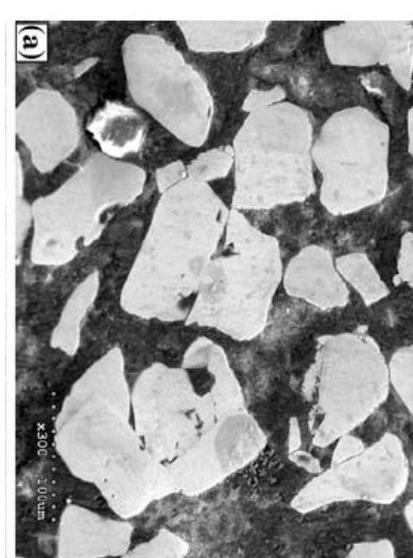
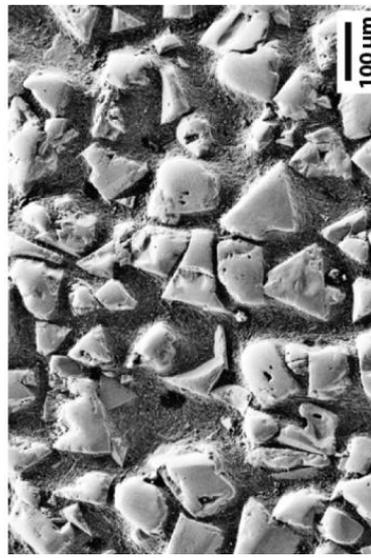
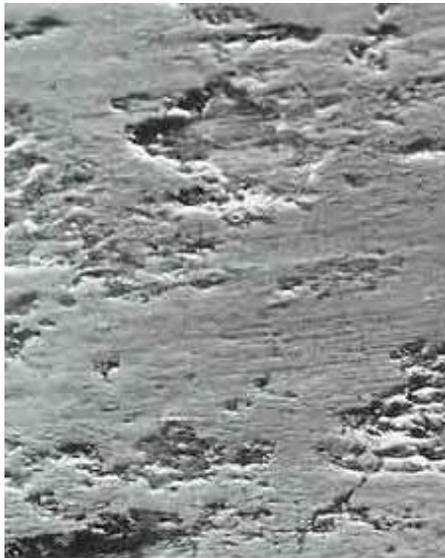
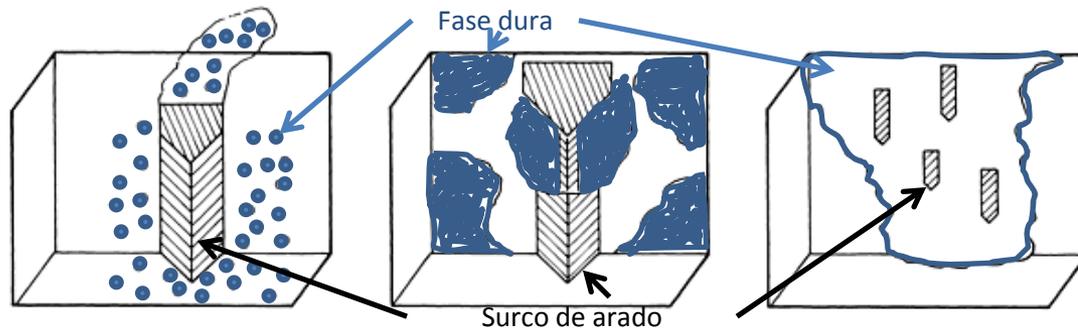
- El cambio en la rugosidad es una medida indirecta de la pérdida de material de la superficie
- El cambio en la rugosidad tiene un comportamiento exponencial dado que el desgaste es un proceso degenerativo.

## Resumen caracterización del desgaste

- El desgaste de las agujas se presenta en *dos etapas*: Erosión por partículas y cavitación
- El aumento en la concentración de sedimentos, aumenta la tasa de desgaste
- El aumento del tamaño de las partículas aumenta la tasa de desgaste
- Geometrías angulares en las partículas, aumentan la tasa de desgaste

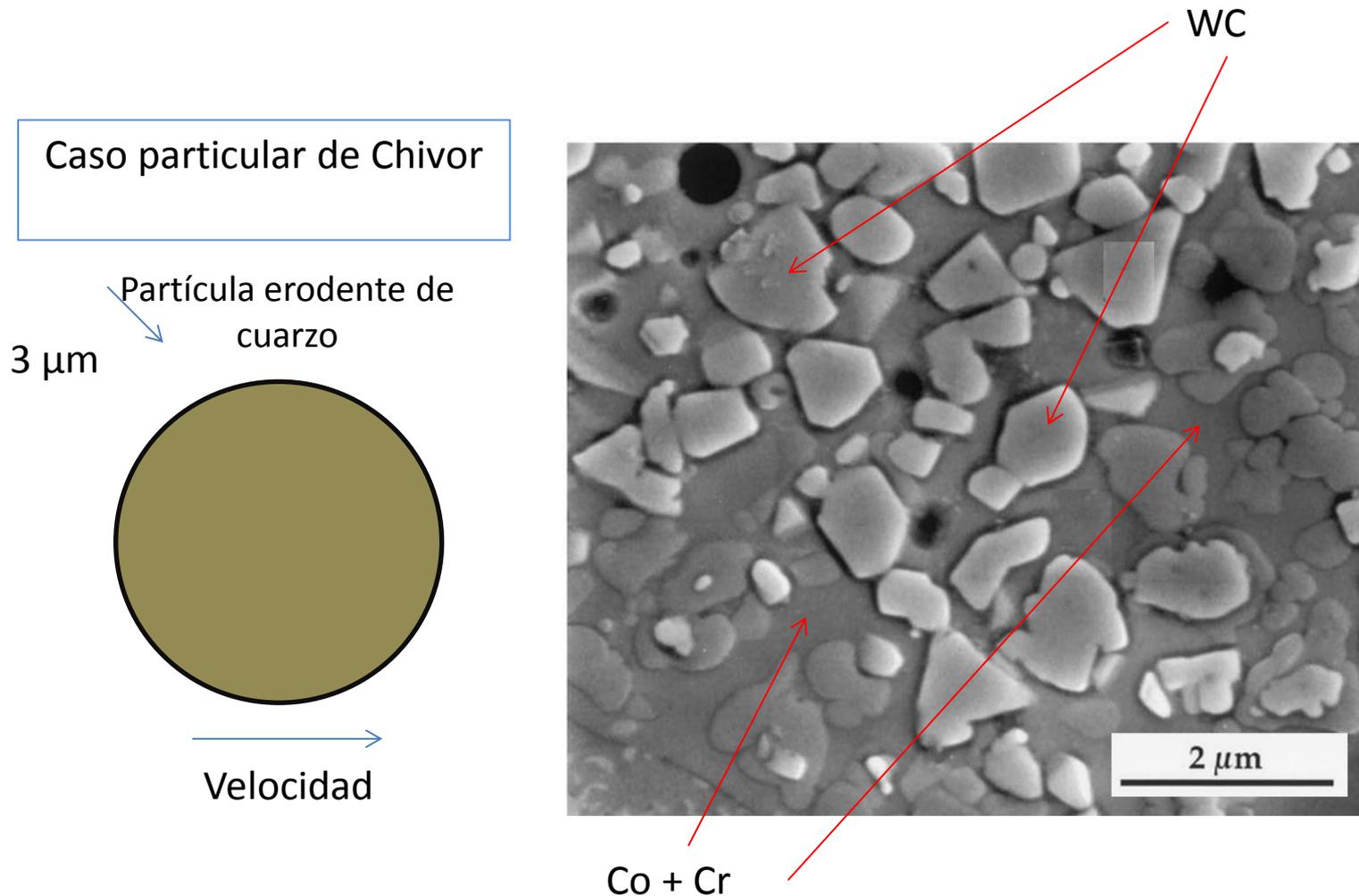


- El diseño de una superficie para reducir el desgaste debe involucrar microestructuras con fases duras y el tamaño adecuado según el tipo y la morfología de las partículas abrasivas.



El camino libre del ligante debe ser de menor tamaño que el de las partículas

- Definición de un recubrimiento apropiado:



- *Una alternativa para reducir el desgaste se diseña de manera puntual para cada central hidroeléctrica ya que la naturaleza de los sedimentos es característica de las cuencas de los embalses y las condiciones de operación y el diseño hidrodinámico de los componentes de las turbinas son específicos de cada proyecto.*
- *El aumento en la cantidad de sedimentos o en su tamaño tendrá repercusiones directas sobre el desempeño de las máquinas por lo que se debe tener estricto control de los mismos con el fin de pronosticar comportamientos y programas de mantenimiento.*

# Agenda

- Contexto
- Objetivo
- Metodología
- Resultados
- **Agradecimientos**



Imagen tomada de sitio Web de AES Gener. [www.gener.cl](http://www.gener.cl) 38

Dr. Jairo A. Escobar G. [jaiescob@uniandes.edu.co](mailto:jaiescob@uniandes.edu.co)

Ing. Andrés M. Morales B.

Ing. Juan F. Ortiz O.