

# MODELADO MATEMÁTICO AVANZADO DE DIGESTORES ANAEROBIOS MEDIANTE TÉCNICAS BASADAS EN CÓDIGOS CFD

1º JORNADA TÉCNICA EN DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES:

DIGESTION ANAEROBIA

Javier Climent

*Grupo de Fluidos Multifásicos  
Departamento de Ingeniería  
Mecánica y Construcción*



Castellón, 7 y 8 de julio 2016

# 1. INTRODUCCIÓN

Unidades de proceso

## APLICACIONES CFD en EDAR

- Tanques de homogeneización
- Reactores biológicos
- Decantadores
- Digestores anaerobios
- Equipos UV
- Biofilms
- Nuevas Tecnologías, etc...



## ● Hidrodinámica

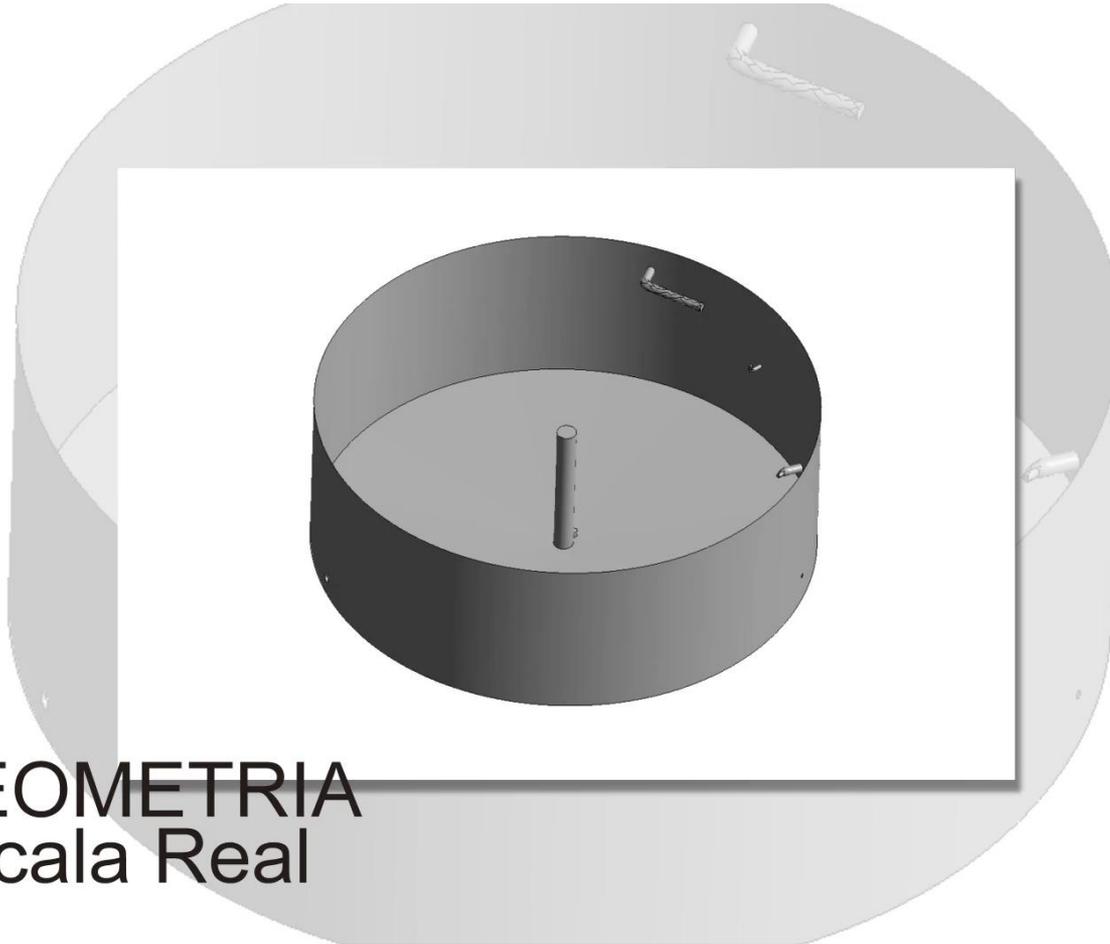
- Geometrías y C. Contorno
- Efecto de la aireación
- Agitadores, Deflectores
- Caracterización del fluido

## ● Procesos en EDAR

- Transferencia de masa
- Modelos biológicos
- Modelos de sedimentación
- Modelos de radiación (UV)
- Etc.

## 2. ELABORACIÓN MODELO CFD

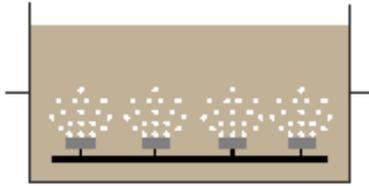
¿Cómo desarrollar un modelo CFD aplicado a EDAR?



GEOMETRIA  
Escala Real

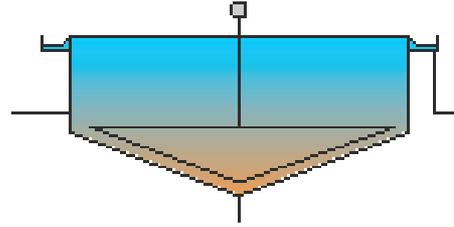
# 3. RETOS DE LA MODELIZACIÓN CFD EN EDAR

## Biorreactor



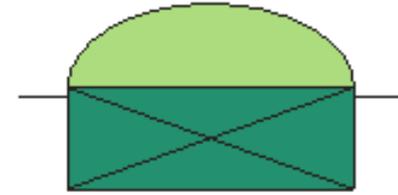
- Modelo Bifásico
- Transferencia de masa
- Agitación
- Etc.

## Decantador

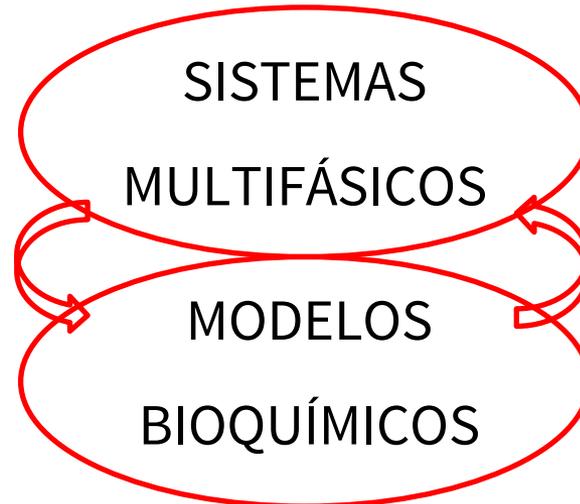


- Sedimentación
- Espesado
- Manto de fangos
- Etc.

## Digestor



- Interacción de 3 fases
- Producción biogás
- Degradación fase sólida
- Etc.

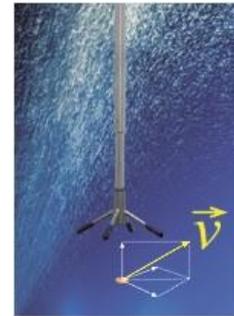


# 4. MEDIDAS EXPERIMENTALES Y VALIDACIÓN

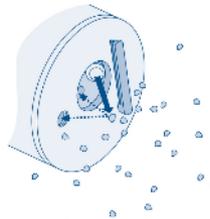
## Nuevas necesidades de medida

Elevada precisión temporal y espacial

SOLIDOS			LIQUIDO	GAS
Medida dinámica detallada de la posición del manto de fango	Medida Concentración de solidos	Medida distribución y velocidad	Medida detalla de la velocidad 3D fluido	Medida detallada de la fase gas: tamaño, velocidad



SONATAX



SOLITAX©



VECTRINO  
NORTEK©



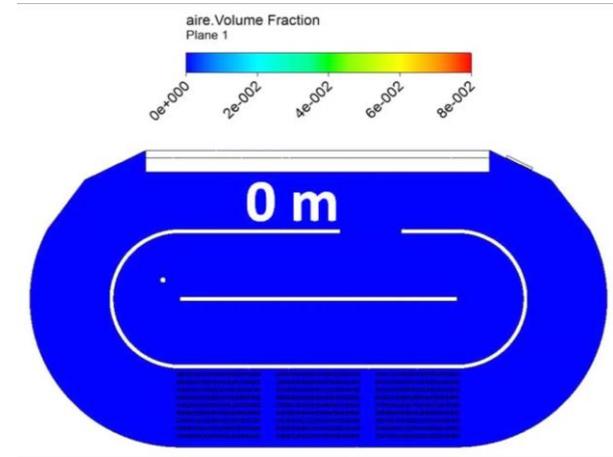
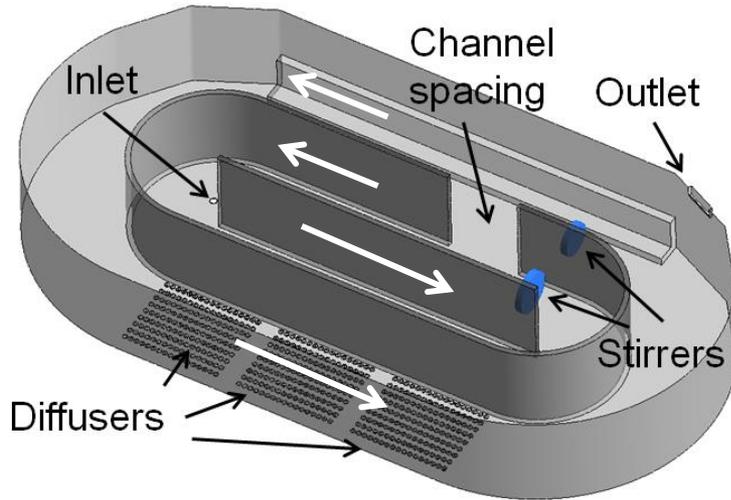
# MODELADO HIDRODINÁMICO

Casos de Aplicación CFD

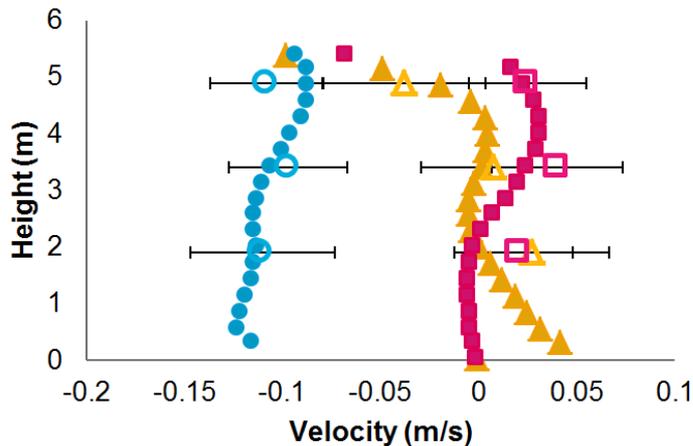
# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## REACTOR BIOLÓGICO A ESCALA REAL

- Campaña exhaustiva de medidas experimentales con aire y sin aire



### Perfiles de velocidad en X, Y, Z



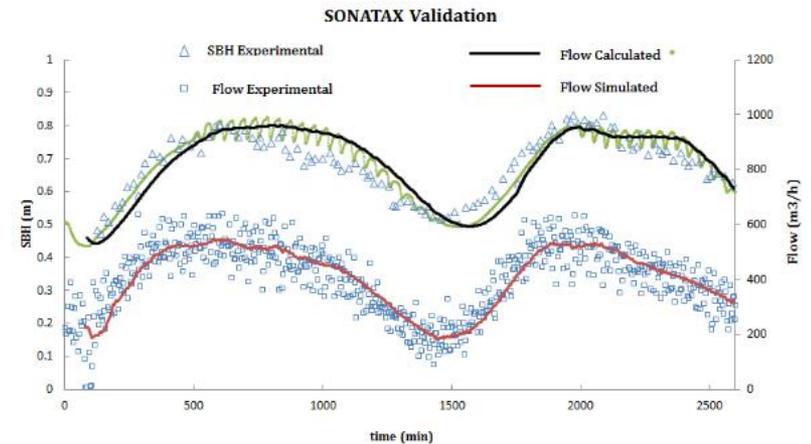
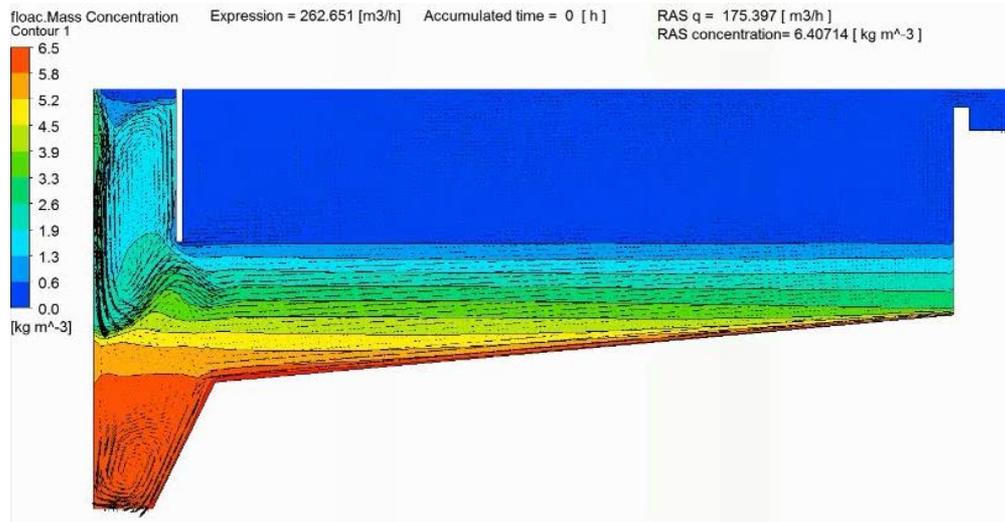
### 51 Puntos de medida



# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## DECANTADOR SECUNDARIO A ESCALA REAL

- Calibración:
  - Caudal dinámico
  - Velocidad sedimentación
  - Reología
- Validación:
  - Altura de manto de fangos
  - Solidos en suspensión (SST)



# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

Limitaciones en realizar medidas en un digester anaerobio

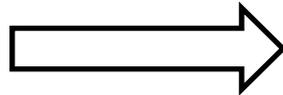
- Medidas directas en el interior



- Digestor escala piloto



- Medidas indirectas



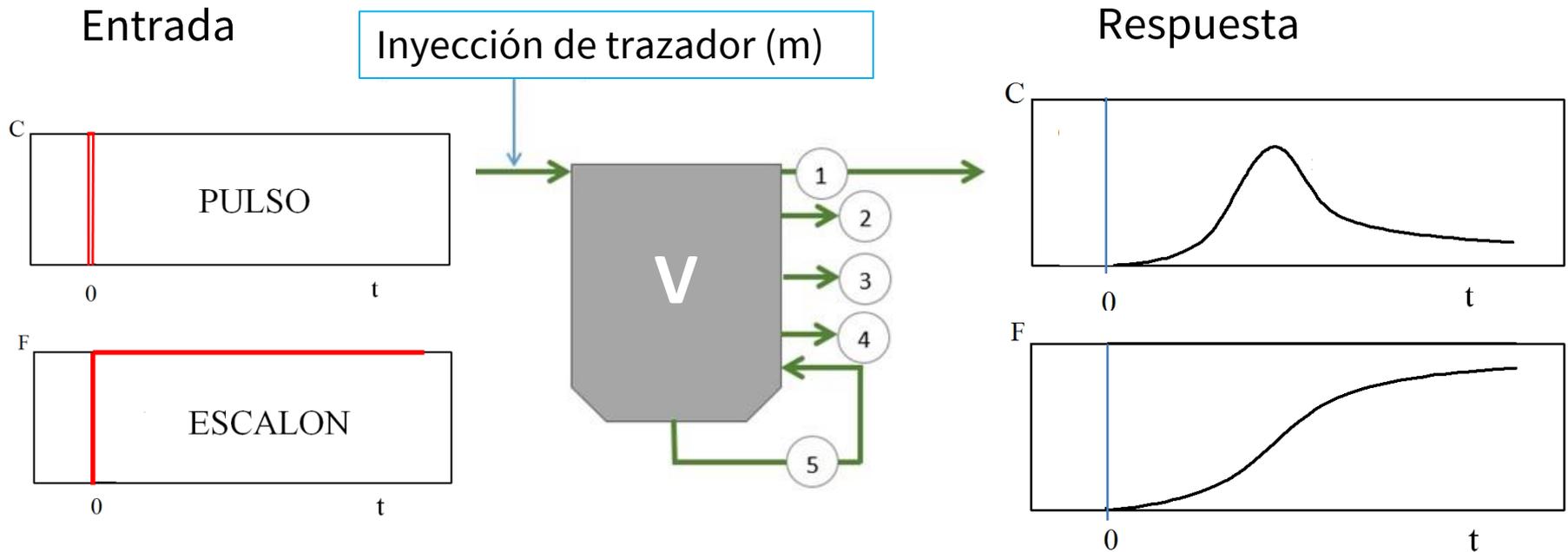
Conocimiento global del sistema

- Hidrodinámica: trazadores inertes, caudales, Temperatura

# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

Técnica de los trazadores inertes “estímulo respuesta”

- Perturbación en la entrada del reactor y medida transitoria en la salida



- Estudio analítico de la curva en la salida

# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

Técnica de los trazadores inertes “estímulo respuesta”

○ ¿Qué se puede obtener?

▪ Calculo del **tiempo medio de residencia** real

▪ Caracterización del comportamiento del flujo

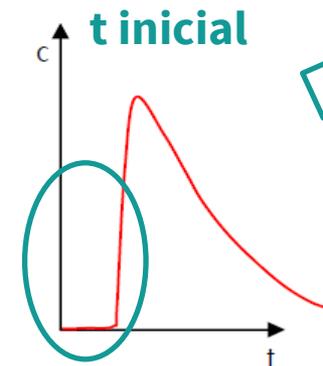
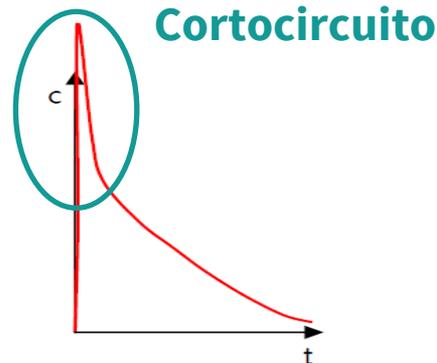
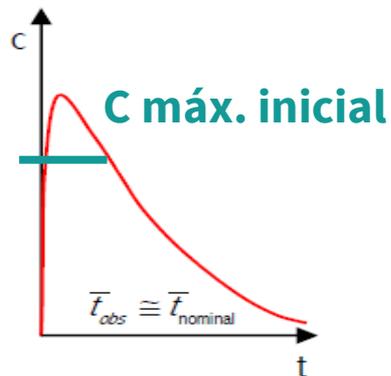
➤ **Cortocircuitos** hidráulicos

➤ **Volumen muerto**

▪ **Mezclado**

▪ **Validar modelos hidrodinámicos** (simulación en EDAR)

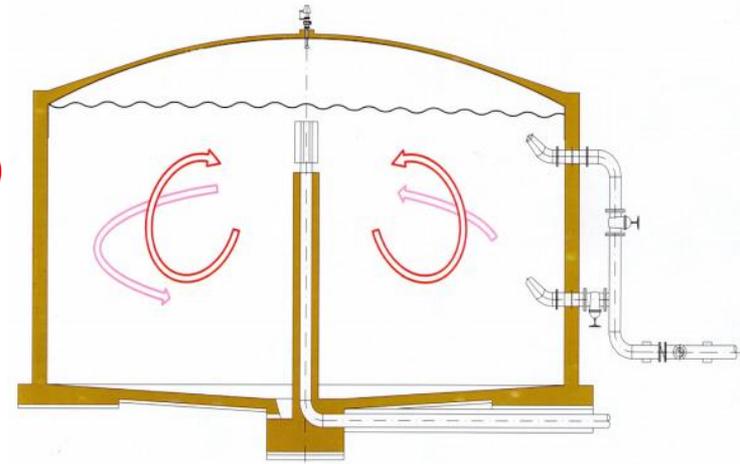
INFORMACIÓN  
DESDE TIEMPO DE  
MUESTREO INICIAL



# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## Sistemas de agitación más comunes

- Agitación mecánica (SCABA)
- Bomba externa de recirculación (DYNOMIX)
- Lanzas (biogás comprimido)
- Bomba mezcladora
- Bomba externa + gas (HEATAMIX)



## Parámetros de funcionamiento globales (recomendación EPA)

- Hydraulic Retention Time (HRT): Volume of liquid / inlet flow = **20 días**
- Tiempo de Renovación (DVTT) = Volume of liquid / Recycling flow = **5 horas**
- Unit Power (UP): **2 W/m<sup>3</sup>** (Internos) y **6 W/m<sup>3</sup>** (externos)
- Velocity Gradient (G) = (UP/dynamic viscosity) <sup>0.5</sup> = **50 s<sup>-1</sup>**

# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## Caso 1. Estudio de un digestor a escala real (DYNOMIX)

### OBJETIVOS:

- Estudiar el funcionamiento del sistema de agitación
- Calcular un **volumen muerto** en el interior
- Punto de funcionamiento de la recirculación



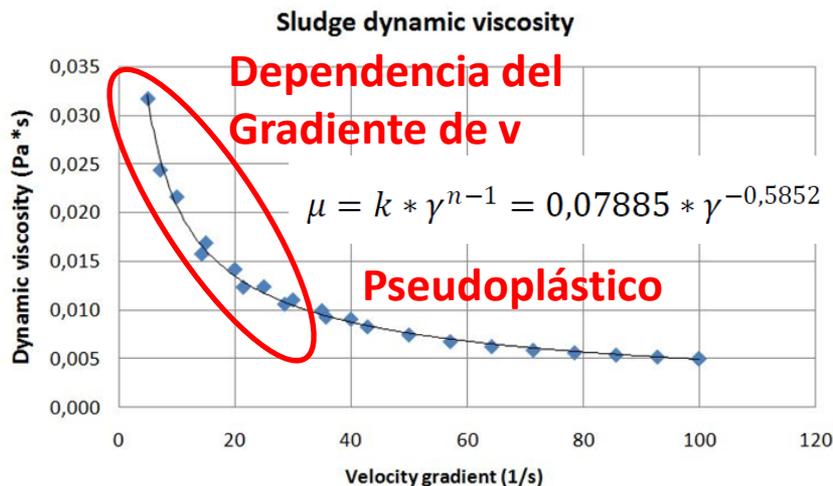
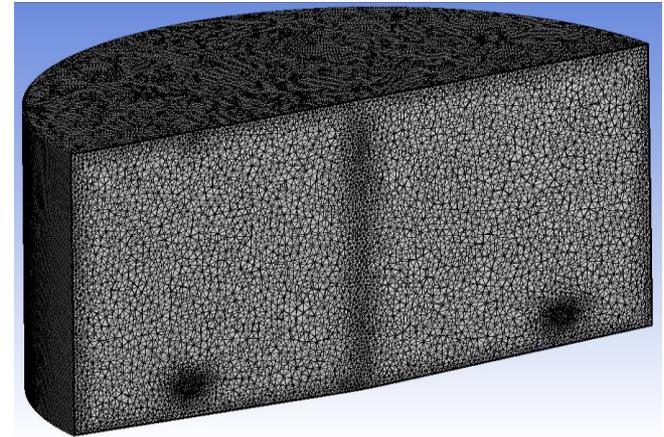
- Volumen = **3200 m<sup>3</sup>**
- Diámetro = **21 m**
- Altura líquido = **9,2 m**
- Caudal influente = **145 m<sup>3</sup>/día**
- Caudal intercambiador = **145 m<sup>3</sup>/día**
- TRH teórico = **22 días**

# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## Caso 1. Estudio de un digester a escala real (DYNOMIX)

- Modelo CFD en una fase
- Análisis **sensibilidad de malla**
- Modelo reológico No-newtoniano
- Caracterización de la **viscosidad a 38°C**
- **Trazadores** (Fluoresceína) 37 días
- Ensayos de estabilidad (**adsorción**)

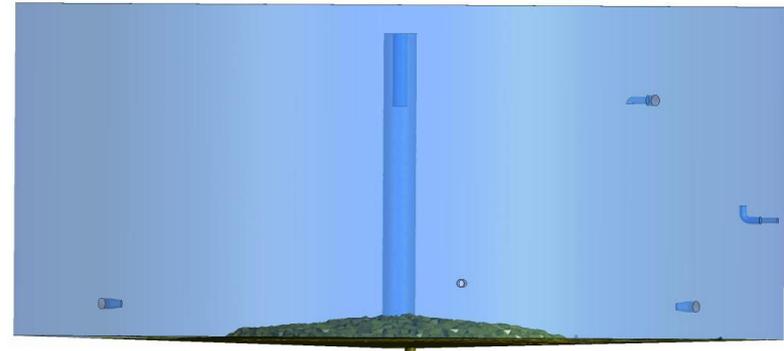
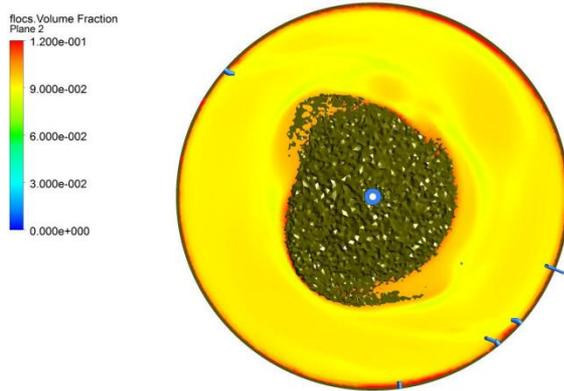
2M vs 800.000 nodos



# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

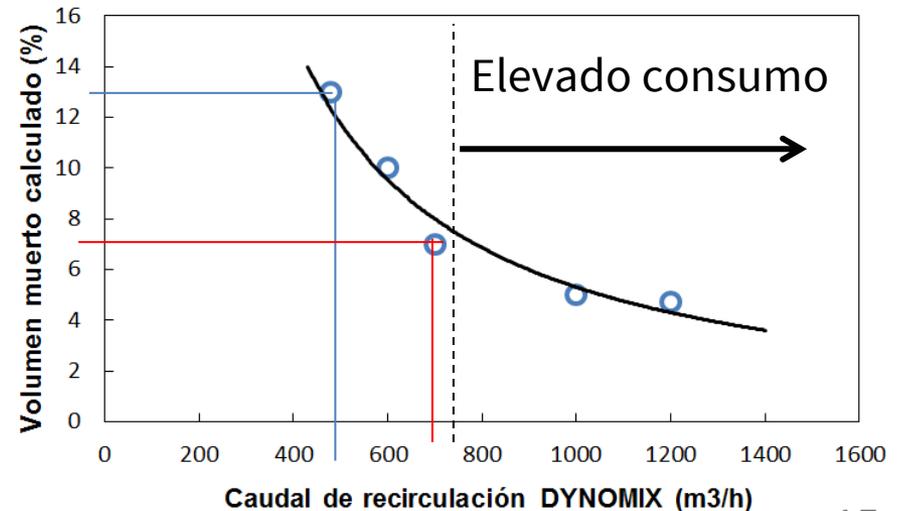
## Caso 1. Estudio de un digestor a escala real (DYNOMIX)

- Zonas de baja velocidad < 5% de la velocidad máxima



- Vm intrínseco en zona central

	Vm = 13%
	DTTV = 6,75h
	Vm = 7 %
	DTTV = 4,75h

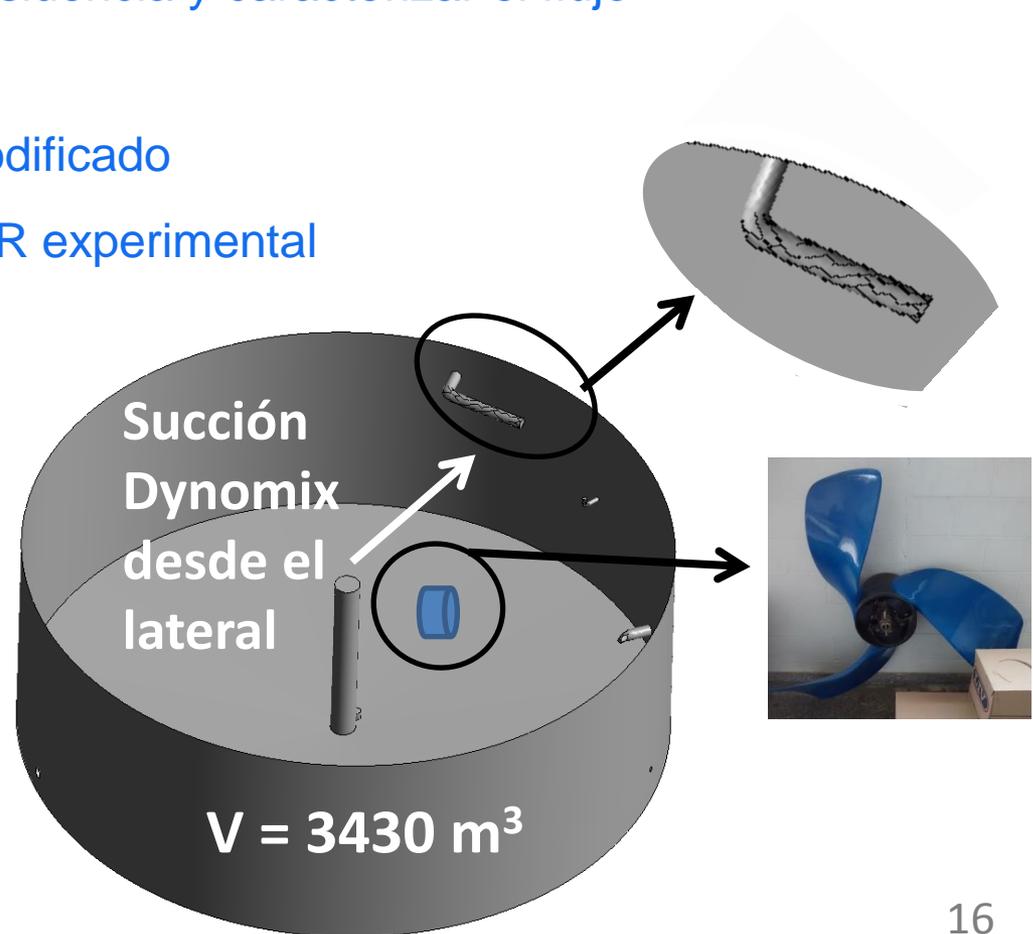


# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## Caso 2. Estudio de un digester a escala real (DYNOMIX)

### Objetivos

- Calcular el tiempo medio de residencia y caracterizar el flujo
  - comparar dos trazadores
- Evaluar sistema DYNOMIX modificado
- Validar modelo CFD con la DTR experimental

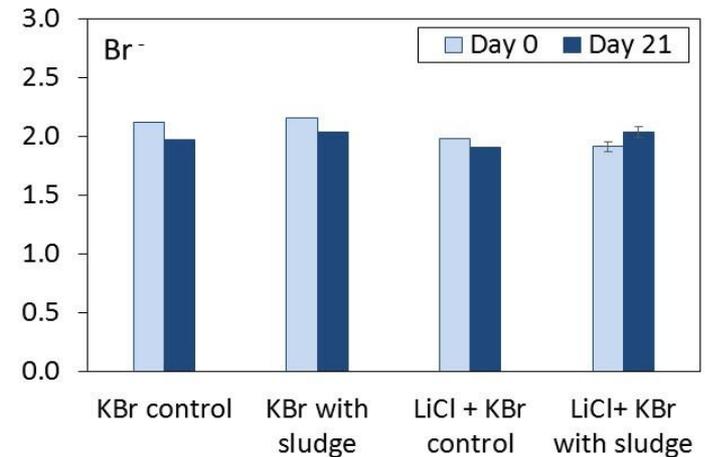
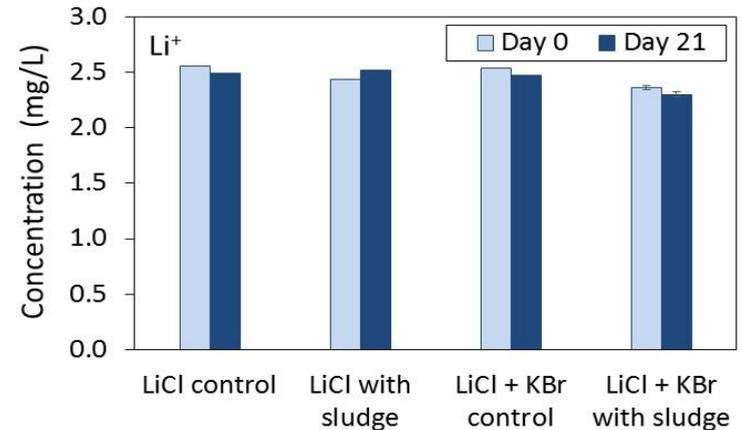


# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## Caso 2. Estudio de un digestor a escala real (DYNOMIX)

- Estabilidad de los trazadores
  - Adsorción de trazador despreciable
  - Interacción nula
- Comparativa entre trazadores

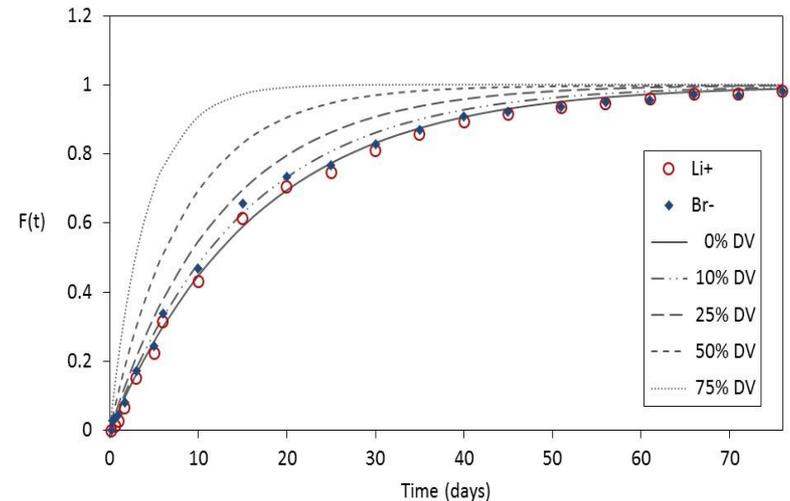
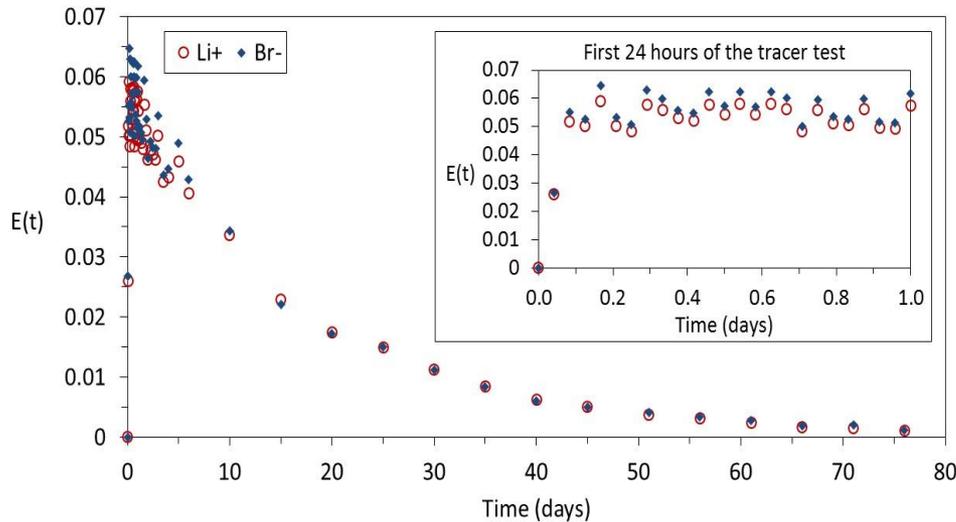
	LiCl	KBr	
Detección	catiónica	aniónica	
Detección	0,025	0,010	ppm
masa	50	15	kg
masa	16	67	%
Blanco	ausencia	presencia	
Precio	+	-	



# 5. MODELADO HIDRODINÁMICO

## Caso 2. Estudio de un digestor a escala real (DYNOMIX)

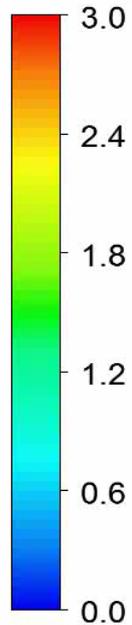
- Valores RTD muy similar
- Tiempo medio calculado = TRH (teórico)
- Sistema perfectamente mezclado
- Volumen muerto calculado cercano a 0%



# 5. Funcionamiento hidráulico digestores de lodos

## Caso 2. Validación del modelo CFD

Tracer [ppm]



Time = 0.000 [ h ]

Suction to Dinomix

to Heat  
exchanger

Dinomix 1

Dinomix2

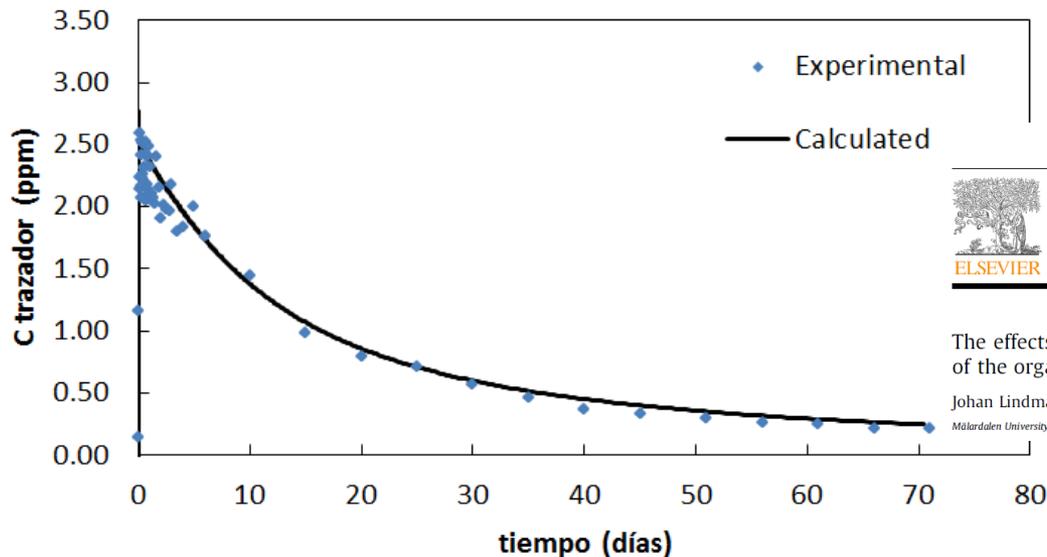
Inlet

Tracer Outlet = 0.00 ppm

# 5. Funcionamiento hidráulico digestores de lodos

## Caso 2. Validación del modelo CFD

- Obtención de concentraciones a la salida máximas esperadas
- **Reducir potencia de agitación causa cortocircuito**
- **Analizar agitación intermitente**



The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste  
Johan Lindmark\*, Per Eriksson, Eva Thorin  
Mälardalen University, School of Business, Society & Engineering, PO Box 883, SE-721 23 Västerås, Sweden



*Reducing mixing intensity from continuous mixing to an **intermittent mixing regime** can also improve gas production (Kaparaju et al., 2008).*

# SISTEMAS MULTIFÁSICOS MODELADO BIOQUÍMICO

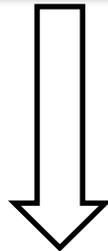
Casos de Aplicación CFD

# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO

## MODELOS BIOQUÍMICOS

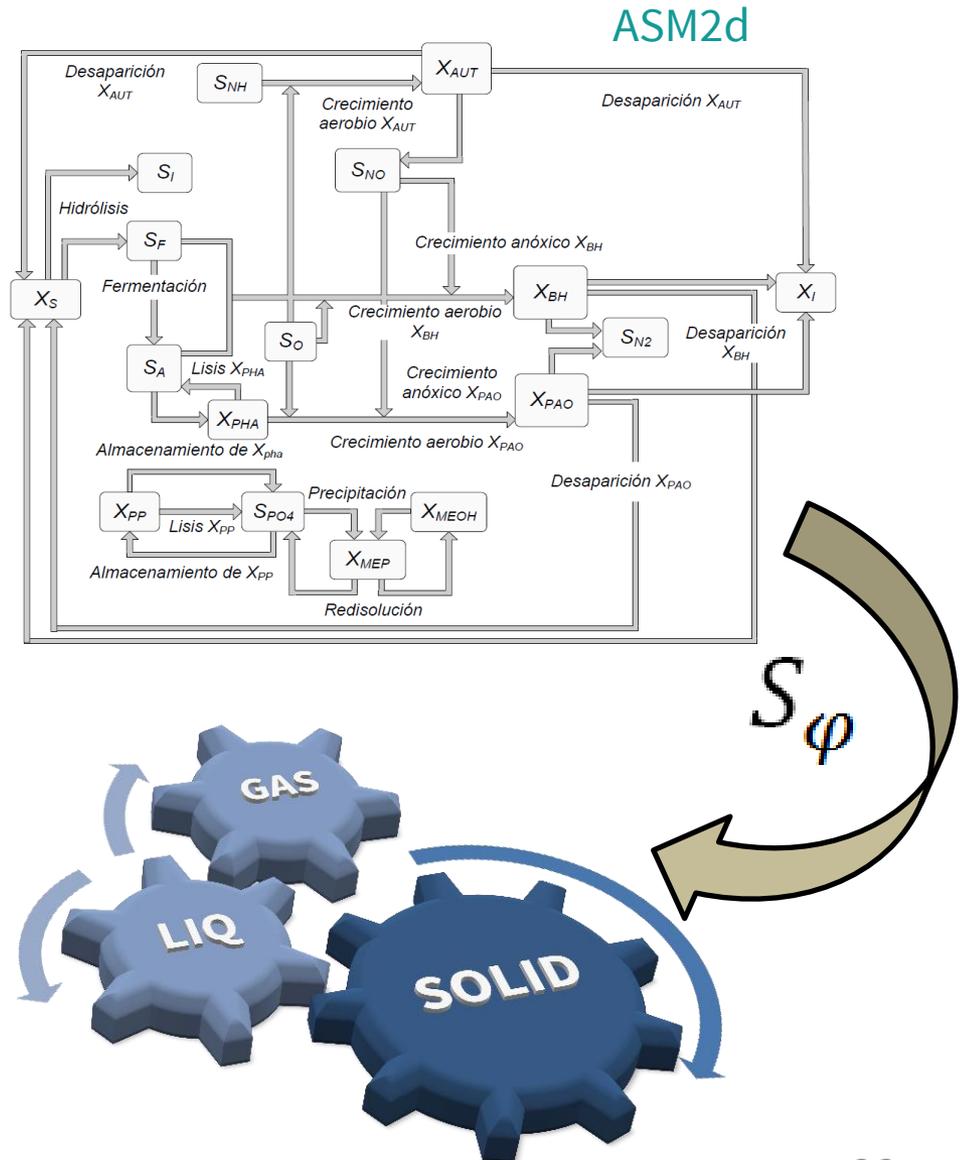
VARIABLES DE ESTADO  
REACCIONES BIOQUÍMICAS  
CONSTANTES CINÉTICAS / EST.

ASM1, ASM2d,  
ADM1, etc.

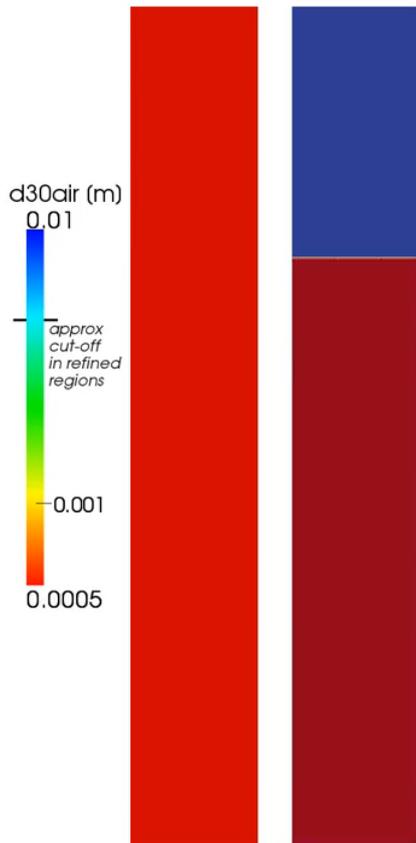


## MODELO CFD

ECUACIONES DE  
TRANSPORTE



# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO



## ○ Modelo CFD multifásico

**GAS:** Fase dispersa

**SÓLIDO:** Fase dispersa  
/ Algebraica

## POPULATION BALANCE MODEL (PBM)

- Coalescencia
- *Break-up*

- Floculación
- Erosión

## ○ Transferencia de masa

$$\Gamma = k_L a^* (C^* - C_L)$$

### ○ **a:** area interfacial

Calculada por el código  
Modelo PBM  
Modelo IATE

### ○ **Parámetro $k_L$ :**

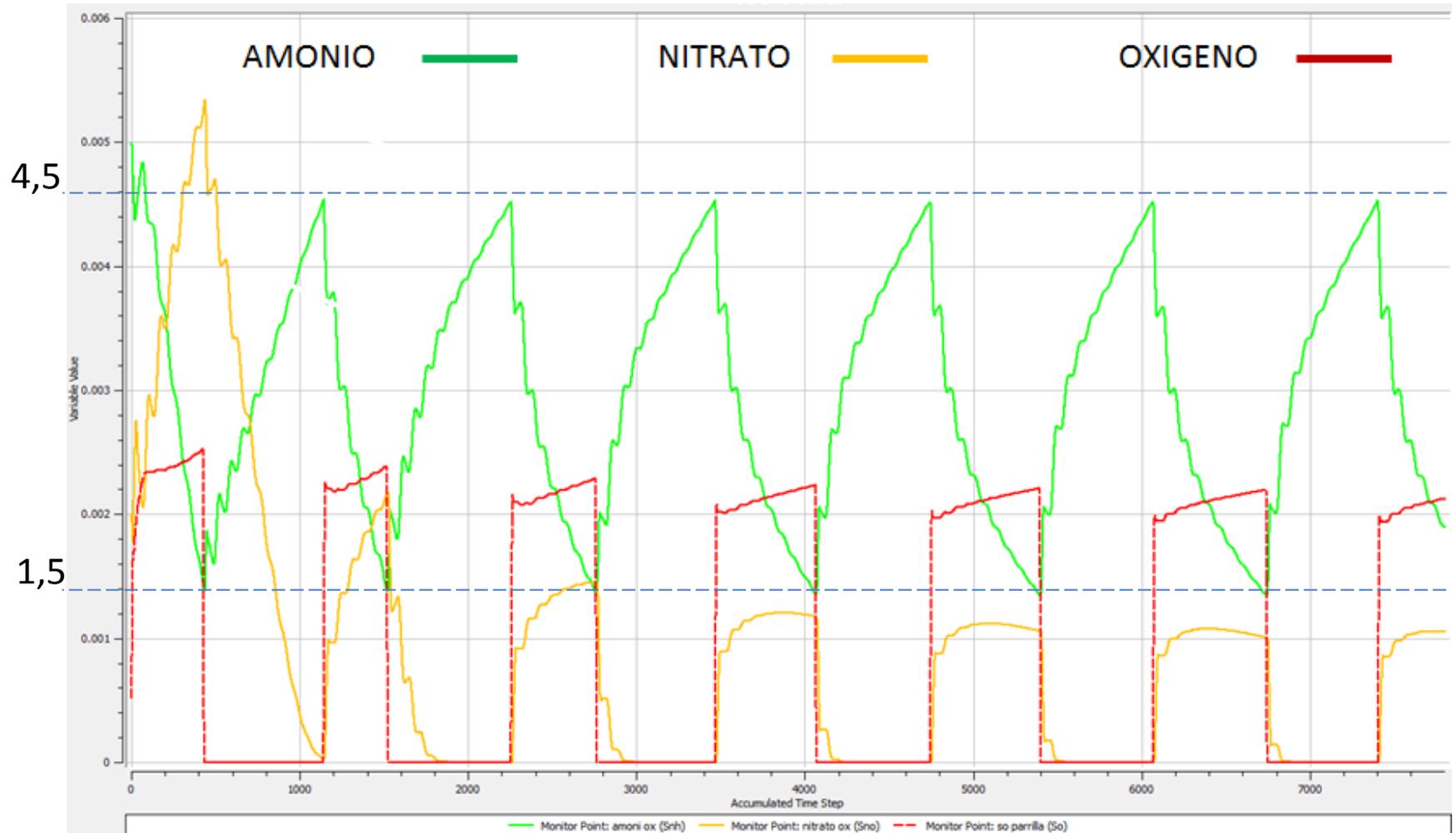
Experimental función:  
• Hidrodinámica  
• Bioquímica

### ○ **$k_L a$ :** coeficiente global

Parámetro  
experimental medido

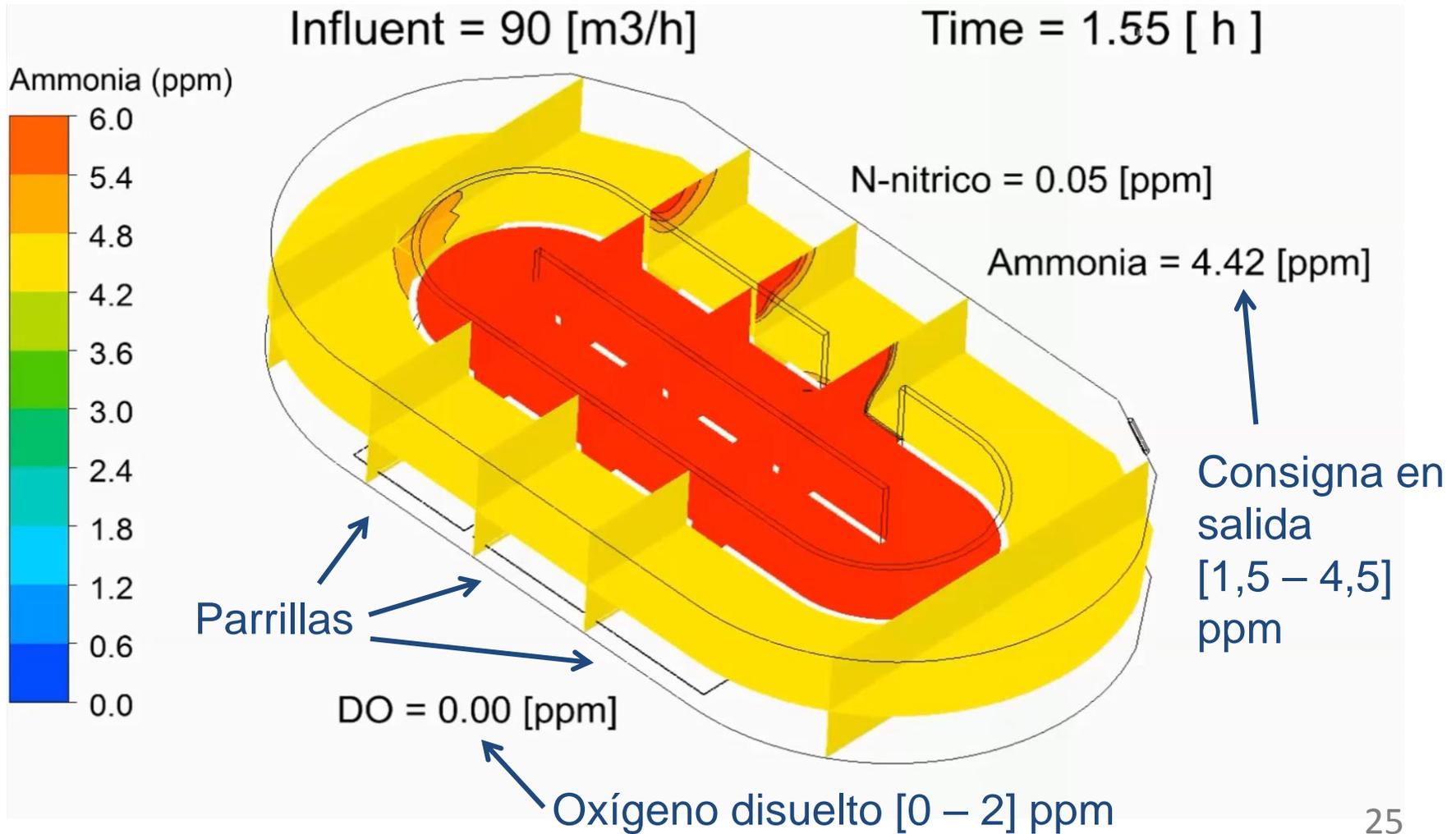
# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO

## CICLOS DE AERACIÓN REACTOR BIOLÓGICO



# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO

## CICLOS DE AERACIÓN REACTOR BIOLÓGICO



# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO

M. Analíticos	Modelo ADM1	CFD-ADM
<b>Explotación diaria</b> <b>Validación simple</b> No predicción No transitorio No hidrodinámica	<b>Explotación diaria</b> Validación compleja <b>Predicción</b> <b>Transitorio</b> No hidrodinámica	No explotación Validación compleja <b>Predicción</b> <b>Transitorio</b> <b>Hidrodinámica</b>



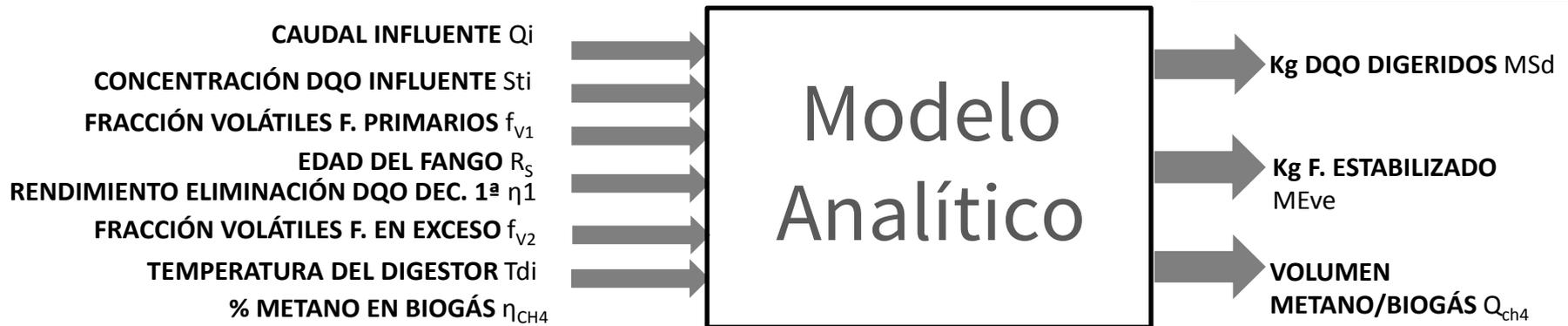
# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO

## Herramientas analíticas

- Herramienta útil para la explotación
- No capacidad de predicción
- Basadas en fracción volátil de los fangos 1º y 2º
- Verificadas a partir de la producción de biogás

INPUTS

OUTPUTS



$$mQ_{bg} = mQ_{ch4} / \eta_{ch4} = 0.525 / \eta_{ch4} \cdot [\eta_{dp} \cdot (mE_{v1}) + f_{av} \cdot mE_{v2}) + \eta_{dn} \cdot (1 - f_{av}) \cdot mE_{v2}]$$

Coeficiente estequiométrico = 0,75

Fango 1º

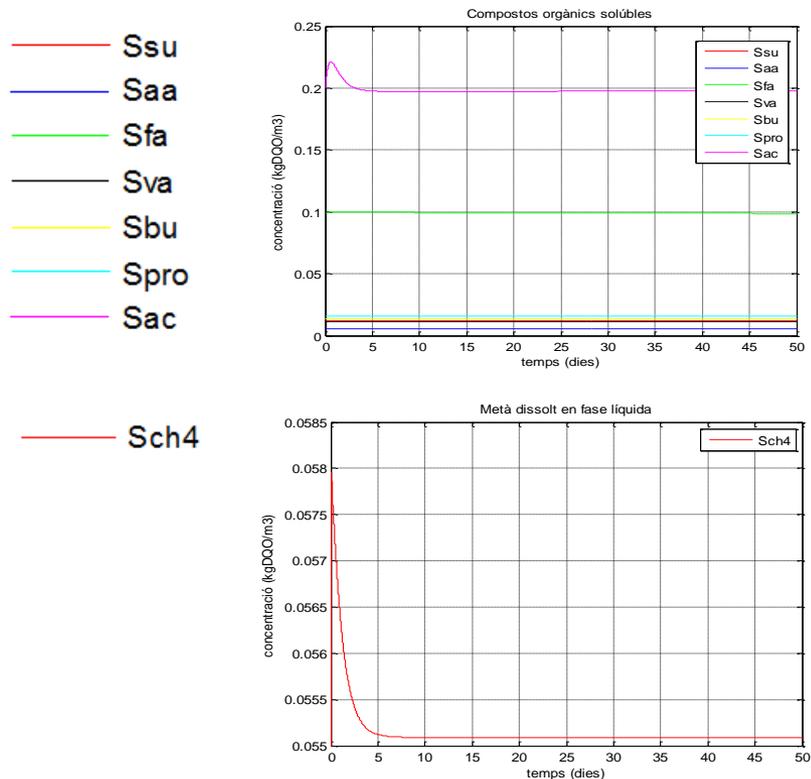
Fango 2º

Mackenzie&Davis  
Adrianus

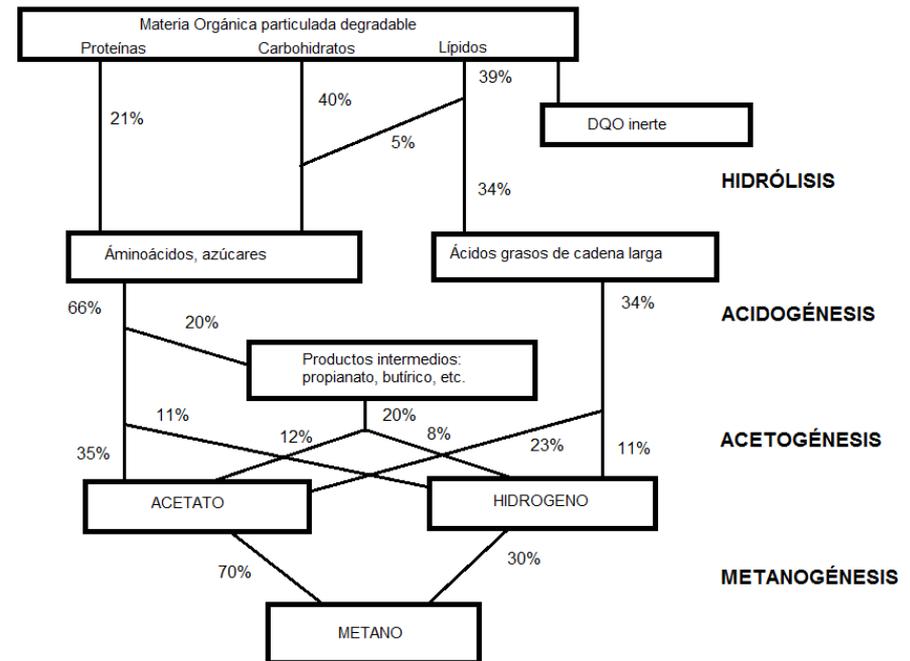
# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO

## Modelo ADM1 (Matlab / software EDAR)

- Herramienta útil para la explotación
- Capacidad de predicción
- Evolución de las variables (transitorio)
- Calibración compleja de las variables de estado
- Verificación experimental compleja



### Etapas ADM1



# 6. IMPLEMENTACIÓN MODELADO BIOQUÍMICO

## Modelo ADM-CFD (implementación)

### Optimización del proceso

- Abordar **nuevos diseños**: mejorar el proceso con cambios:
  - Geometría
  - Elementos internos
  - Agitación
- Estudiar **homogeneidad** del flujo (temperatura)
- **Seguimiento espacial** de las variables de estado
- Crear modelos compartimentados
- Estudiar la **producción local de biogás** desde
  - transferencia
  - disminuir metano soluble

# 7. CONCLUSIONES

- CFD es una herramienta de simulación complementaria a otras y que cada vez es más utilizada en simulación de procesos en EDAR
- Herramienta de uso complejo con alto coste de computación en que se ha de limitar y simplificar los modelos a resolver para que tenga una aplicación práctica en la explotación
- Reproducir en detalle y a escala real en 3D el comportamiento hidrodinámico, lo que permite atender a defectos de flujo específicos
- Profundizar en la eficiencia de los digestores anaerobios

MODELADO MATEMÁTICO AVANZADO DE  
DIGESTORES ANAEROBIOS MEDIANTE  
TÉCNICAS BASADAS EN CÓDIGOS CFD

Gracias por su  
atención

Castellón, 7 y 8 de Julio 2016

**Javier Climent**

[jcliment@uji.es](mailto:jcliment@uji.es)

*Grupo de Fluidos Multifásicos*

*Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción*

**Universitat Jaume I**

*Campus Riu Sec s/n, 12071 Castellón*



**UNIVERSITAT  
JAUME I**