



# II Ciclo de 20 MasterClass

AGUASRESIDUALES.INFO

# MasterClass 11



“Uso de simuladores para optimizar la recuperación de compuestos y energía en las EDAR avanzadas”

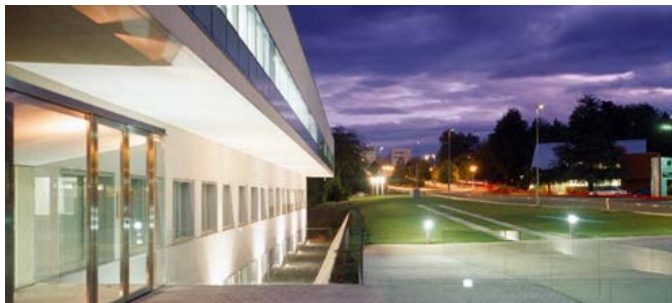
Patrocinada por:



**Eduardo Ayesa**

Investigador principal División de Agua y Salud del CEIT  
Profesor en TECNUN  
**Doctor** Ingeniero Industrial





**+235**  
PERSONAS  
EN  
PLANTILLA

**+350** PhDs  
**+400** Investigadores  
TRANSFERIDOS A LA  
INDUSTRIA

**+100** Proyectos europeos

## Artículos Científicos

**+1300** publicaciones científicas indexadas  
**+2000** publicaciones a Congresos Internacionales

## Spin-offs

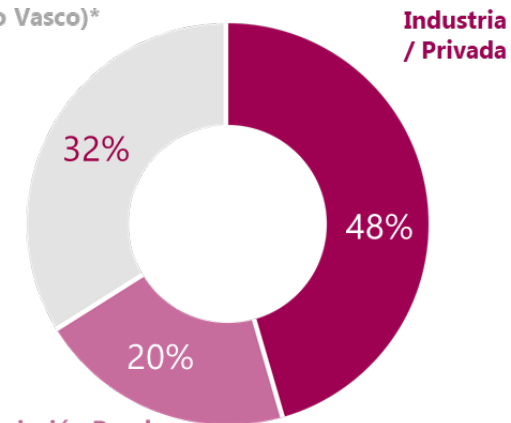
**+300** Puestos de trabajo  
creados  
**+200** Millones de euros de  
ingresos

PRESUPUESTO 2023

**€ 24,5 Millones**

## Fuentes de financiación y tipo de investigación

Financiación Pública  
Competitiva (Europa,  
Gobierno Central,  
Gobierno Vasco)\*



Financiación Basal  
Gobierno Vasco \*

\*Investigación aplicada / Generación de conocimiento

## Soluciones Medio Ambiente



Tratamiento de aguas  
residuales



Gestión y valorización de  
residuos orgánicos



Optimización circuitos  
de agua en la industria



Soluciones digitales en  
el sector del agua



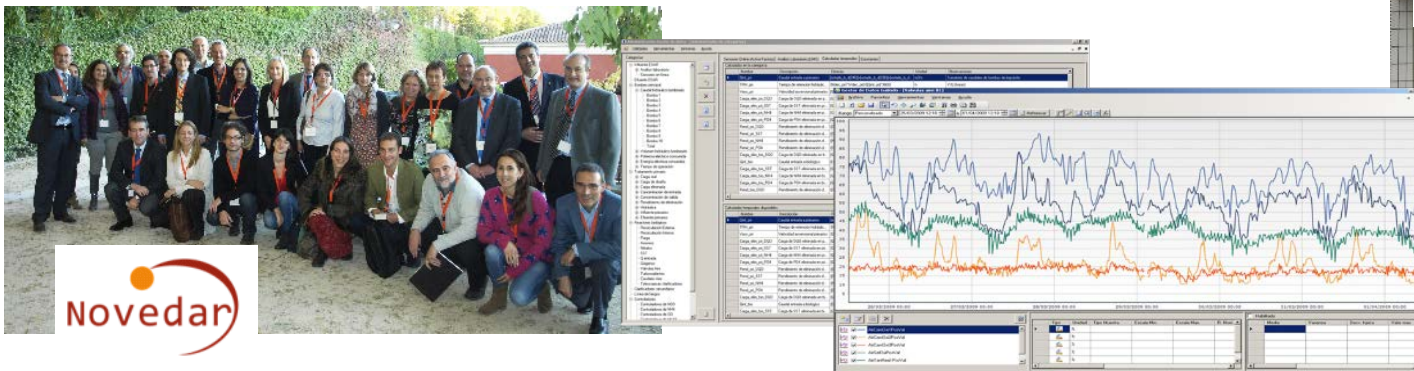
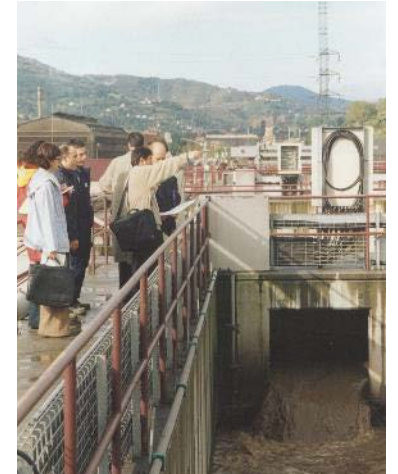
Consultoría avanzada en  
el tratamiento de aguas y  
residuos



Simulación y análisis de  
calidad de agua en ríos

## Ceit: 40 años en el desarrollo de simuladores de EDAR

- Simulaciones ASM1 en FORTRAN (1987). Seminarios IWA de KolleKolle (Copenhagen) años 90.
- Coordinadores COST-682 que generó el benchmarking de simulación IWA-BSM1 (1991-1998).
- Construcción de **simuladores de diseño** para empresas de ingeniería (Daisy, EDAR) (1994-2001).
- Estudios de **diseño de EDAR** por simulación (Vitoria, Bilbao, Pamplona) (1994-1997).
- **Diseño de controladores** por simulación para la EDAR de Galindo-Bilbao (1998).
- Organizadores de la conferencia **IWA-Watermatex 2011** en San Sebastián (2011).
- Responsables de la línea de simulación en el proyecto NOVEDAR Consolider (2008-2011)
- Estudios de simulación en más 40 EDARs.
- 20 **tesis doctorales** en modelado y simulación de EDARs.



# Índice

## 1. Evolución en el modelado matemático y simulación de EDARs

- Nuevas necesidades en el diseño y operación de las EDAR.
- El modelado integral de las EDAR.

## 2. Uso de simuladores para optimizar la recuperación de compuestos y energía en las EDAR avanzadas

- Análisis integral de los flujos de masa y energía en las EDAR.
- Algunos ejemplos ilustrativos.

## 3. Líneas de futuro

- Herramientas digitales emergentes

# Índice

## 1. Evolución en el modelado matemático y simulación de EDARs

- Nuevas necesidades en el diseño y operación de las EDAR.
- El modelado integral de las EDAR.

## 2. Uso de simuladores para optimizar la recuperación de compuestos y energía en las EDAR avanzadas

- Análisis integral de los flujos de masa y energía en las EDAR.
- Algunos ejemplos ilustrativos.

## 3. Líneas de futuro

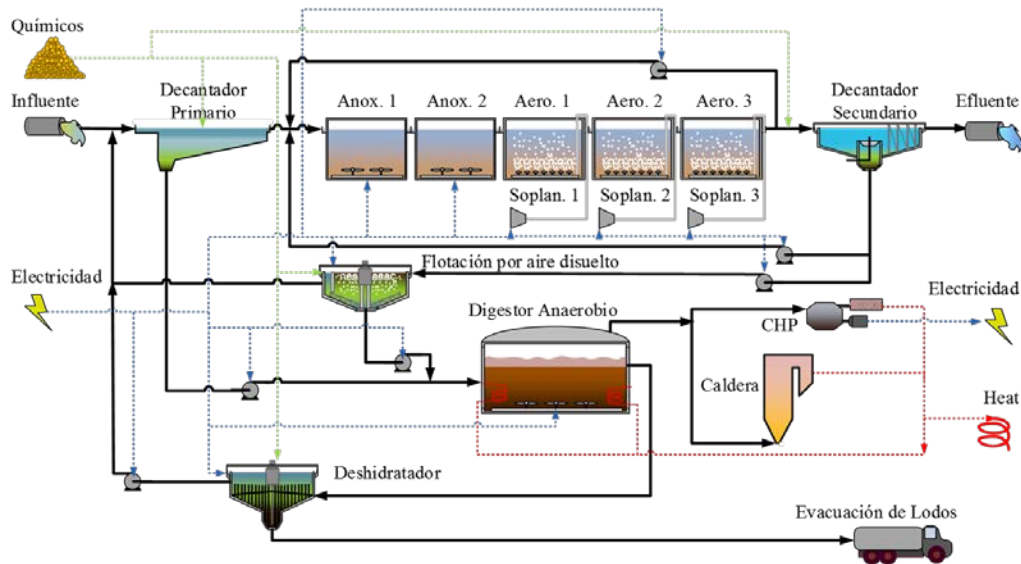
- Herramientas digitales emergentes

## Nuevas necesidades en el diseño y operación de EDAR

Las modernas EDAR son cada vez más flexibles y eficientes, pero también más **complejas**:

- Múltiples procesos físicos, químicos y biológicos **interrelacionados** entre sí.
- **Procesos dinámicos** con diferentes tiempos de respuesta.
- Los **criterios tradicionales de diseño y operación** (rígida) son insuficientes.

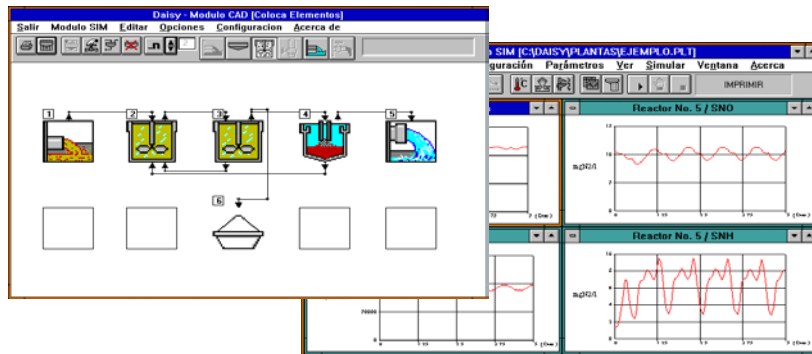
Los simuladores dinámicos de EDAR son herramientas muy **útiles** en este contexto.



# Nuevas necesidades en el diseño y operación de EDAR

Simuladores de EDAR: tecnología madura pero también en constante evolución

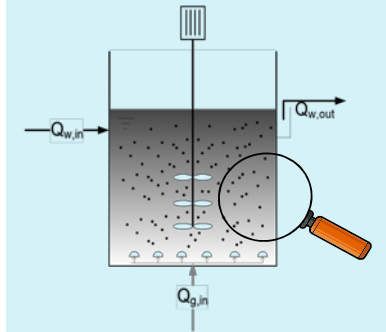
- En continua **evolución** y validación desde los años 80
- Incorporación progresiva de nuevas transformaciones
  - Eliminación de C, N, P
  - Ambiente aerobio, anóxico, anaerobio
  - Procesos biopelícula, almacenamiento de sustrato



Simulador Daisy 1.0: J. Suescun, A. Rivas, E. Ayesa, L. Larrea (1994)

## Modelos clásicos

		Continuity				
Component	$i$	1	2	3	Process Rate, $\rho_i$	
$j$	Process	$X_B$	$S_S$	$S_O$	$[ML^{-3}T^{-1}]$	
1	Growth	1	$-\frac{1}{Y}$	$-\frac{1-Y}{Y}$	$\frac{\mu S_S}{K_S + S_S} X_B$	
2	Decay	-1		-1	$b X_B$	
Observed Conversion Rates $ML^{-3}T^{-1}$		$r_i = \sum_j r_{ij} = \sum_j r_{ij} \rho_j$				Kinetic Parameters:
Stoichiometric Parameters:						Maximum specific growth rate: $\mu$
True growth yield: $Y$		Biomass $[M(COD) L^{-3}]$	Substrate $[M(COD) L^{-3}]$	Oxygen (negative COD) $[M(-COD) L^{-3}]$		Half-velocity constant: $K_S$
						Specific decay rate: $b$

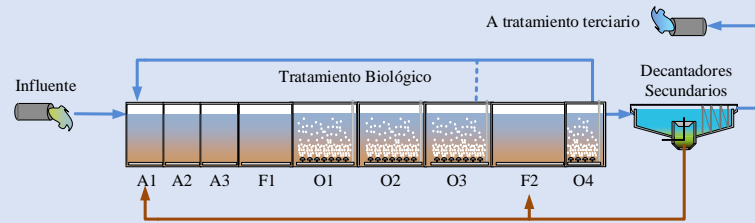


C	N			Línea aguas	1980	UCTOLD Dold <i>et al.</i>
C	N			Línea aguas	1987	ASM1 Henze <i>et al.</i>
C	N	P		Línea aguas	1989	UCTPHO Wentzel <i>et al.</i>
C	N	P	$P_{Chem}$	Línea aguas	1992	ASM2 Henze <i>et al.</i>
C	N	P	$P_{Chem}$	Línea aguas	1995	ASM2d Henze <i>et al.</i>
C	N	P		Línea aguas	1997	B&D Barker <i>et al.</i>
C	N			Línea aguas	1999	ASM3 Henze <i>et al.</i>
C	N	P		Línea aguas	2001	ASM3-bioP Rieger <i>et al.</i>
C	N			Línea fangos	2002	ADM1 Batstone <i>et al.</i>
C	N	P		Línea aguas	2004	TUDP Meijer

... ..



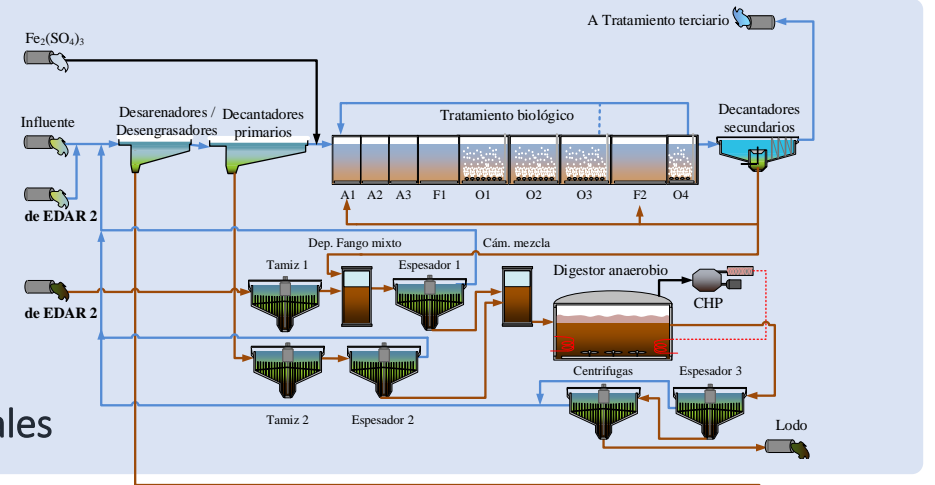
# Nuevas necesidades en el diseño y operación de EDAR



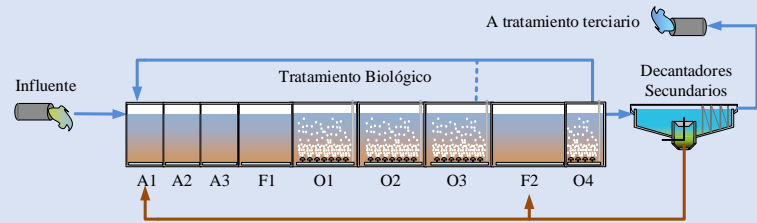
Del análisis local...



A las soluciones globales



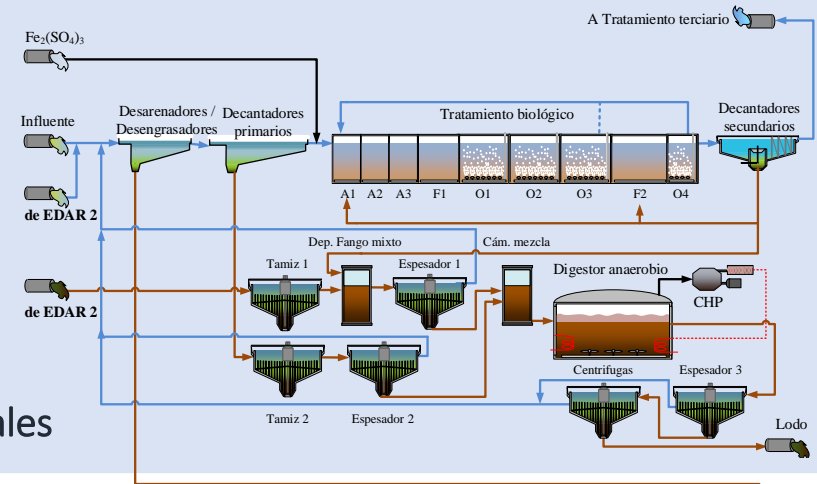
# Nuevas necesidades en el diseño y operación de EDAR



Del análisis local...



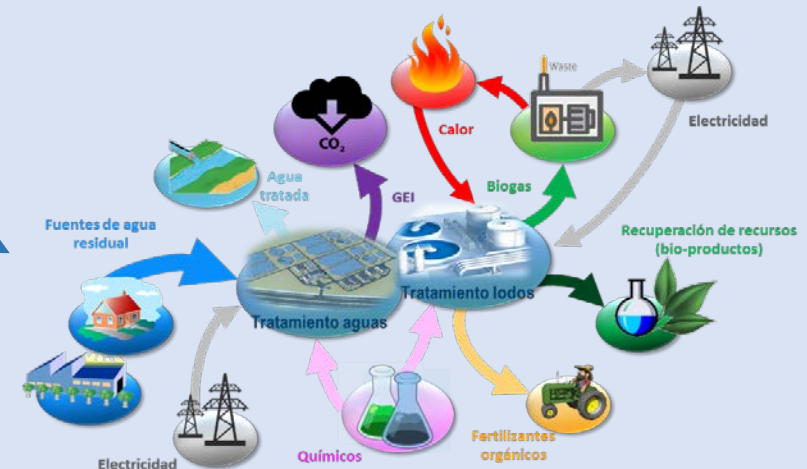
A las soluciones globales



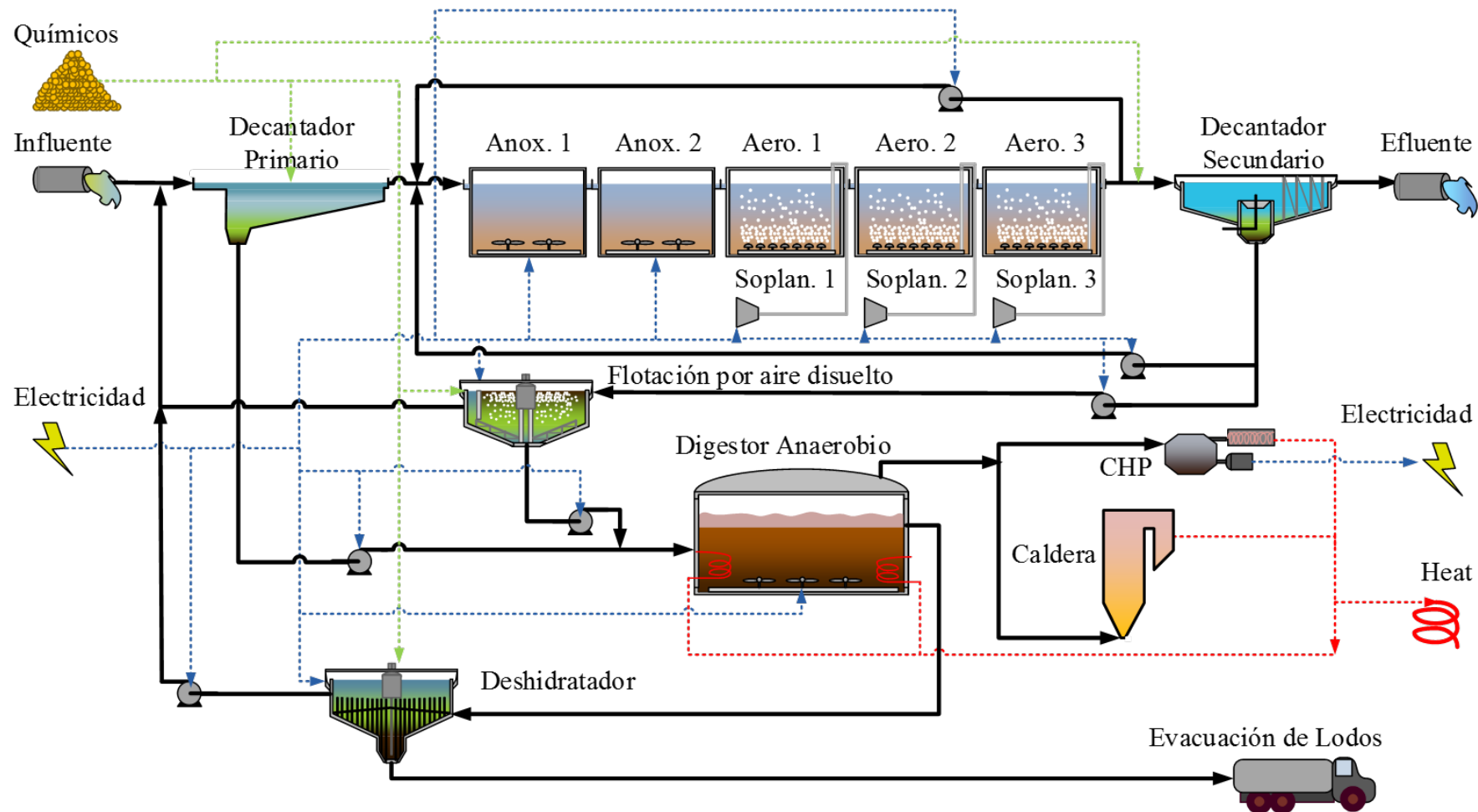
De la calidad efluente...



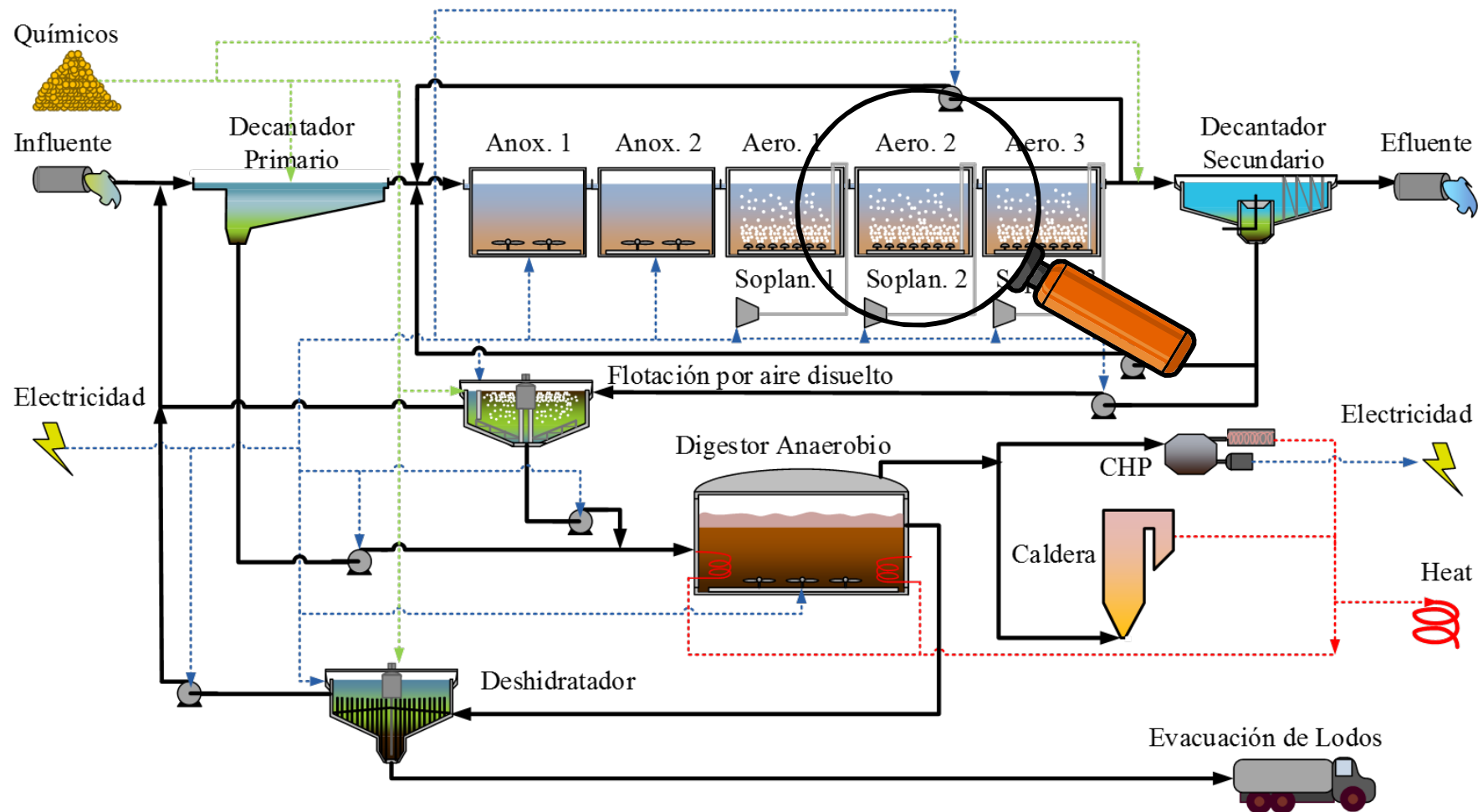
Al balance energético y la  
 recuperación de compuestos



## El modelado integral de las EDAR



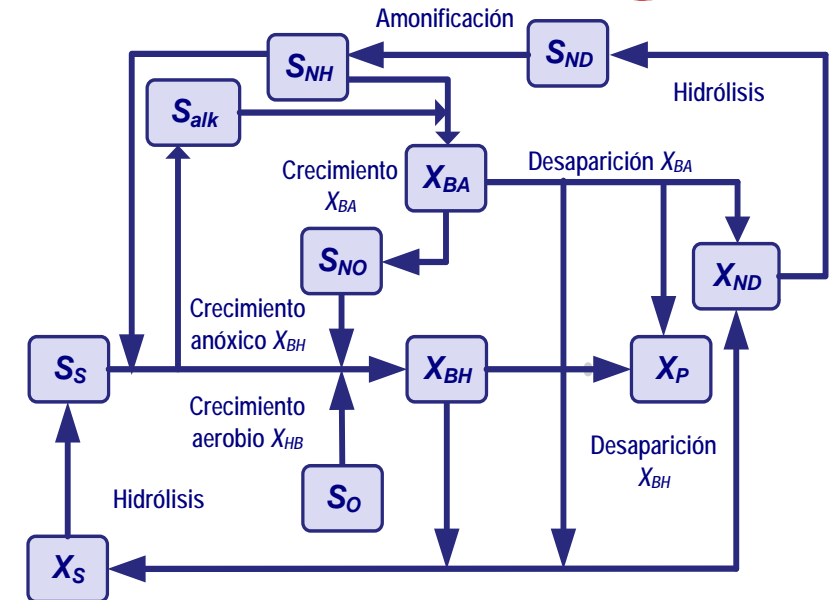
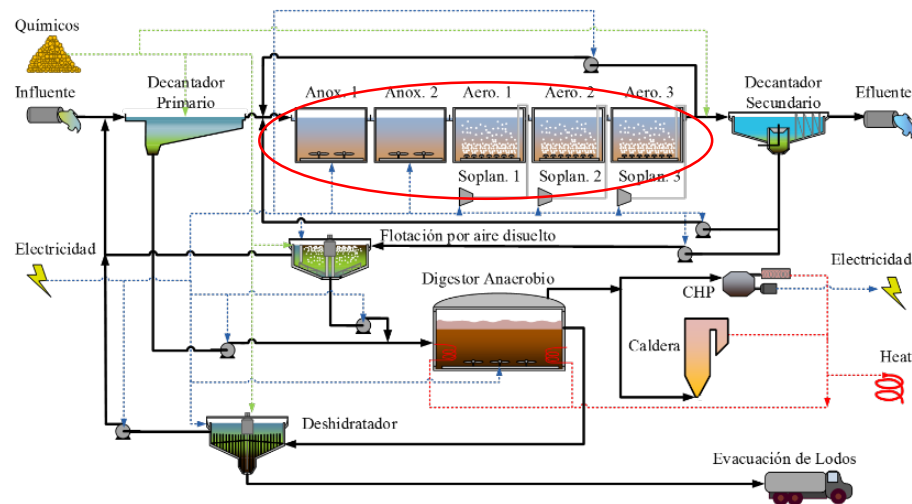
# El modelado integral de las EDAR



# El modelado integral de las EDAR

## ASM1:

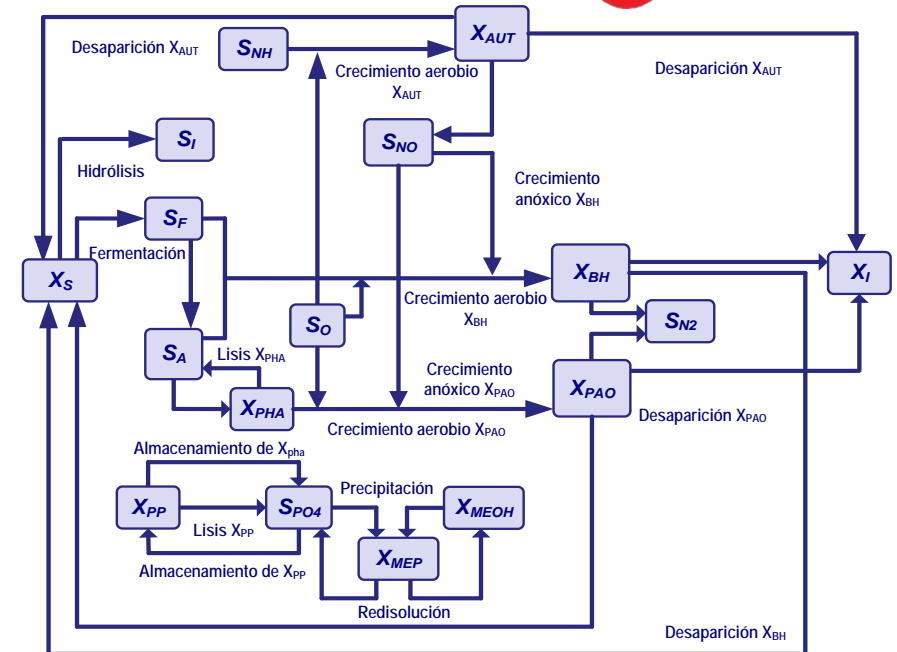
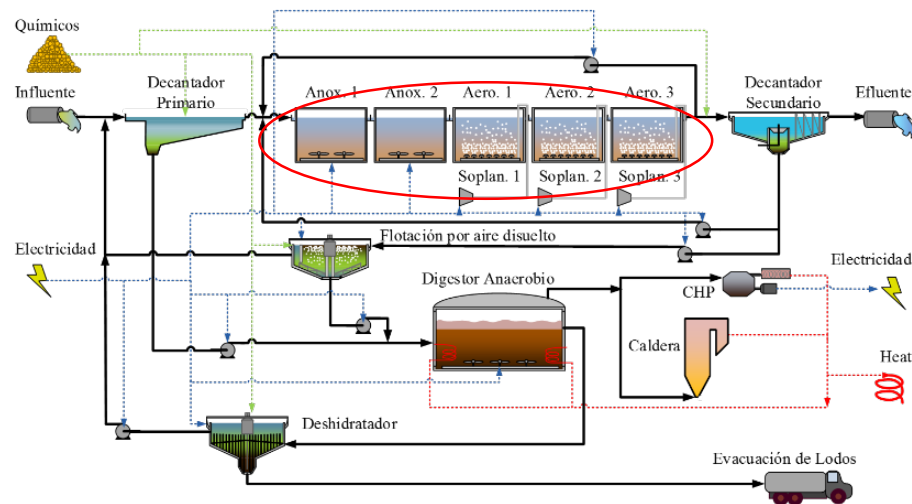
- Eliminación biológica de C y N
  - Bacterias heterótrofas y nitrificantes autótrofas
- Sustrato biodegradable
  - Componentes lentamente y rápidamente biodegradables ( $X_S$ ,  $S_S$ )
- Continuidad en DQO y N
  - Componentes orgánicos  $\rightarrow$  DQO
  - Contenido en N de los componentes ( $i_{N,X}$ )
- Alcalinidad



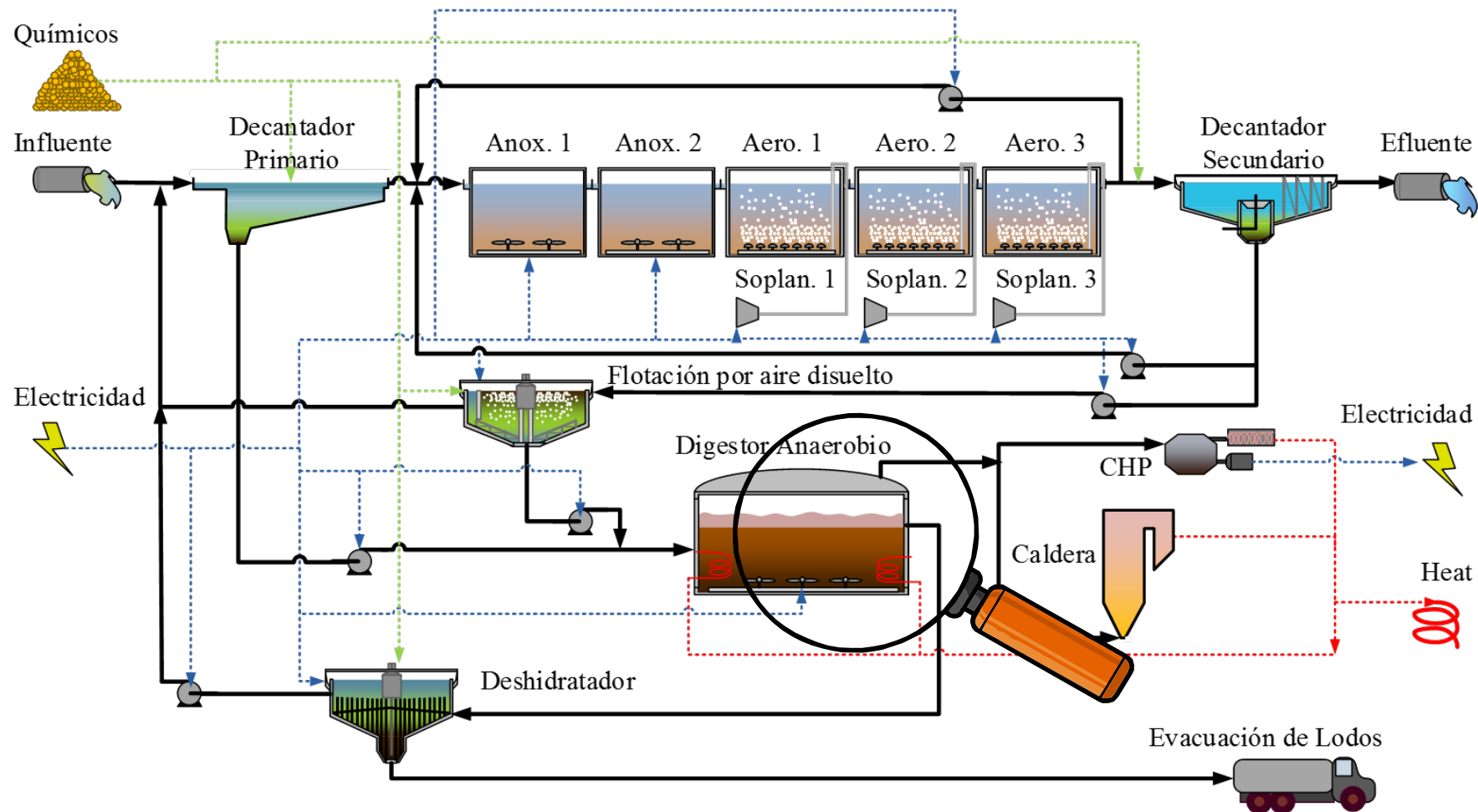
# El modelado integral de las EDAR

## ASM2/2d:

- Eliminación biológica de C, N y P
  - Bacterias heterótrofas, nitrificantes y acumuladoras de P
- Sustrato biodegradable
  - Caracterización de sustratos fermentables y fermentados ( $X_S$ ,  $S_A$ ,  $S_F$ )
- Continuidad en DQO, N y P
  - Componentes orgánicos  $\rightarrow$  DQO
  - Contenido en N y P de los componentes ( $i_{N,X}$ ,  $i_{P,X}$ )
- Alcalinidad



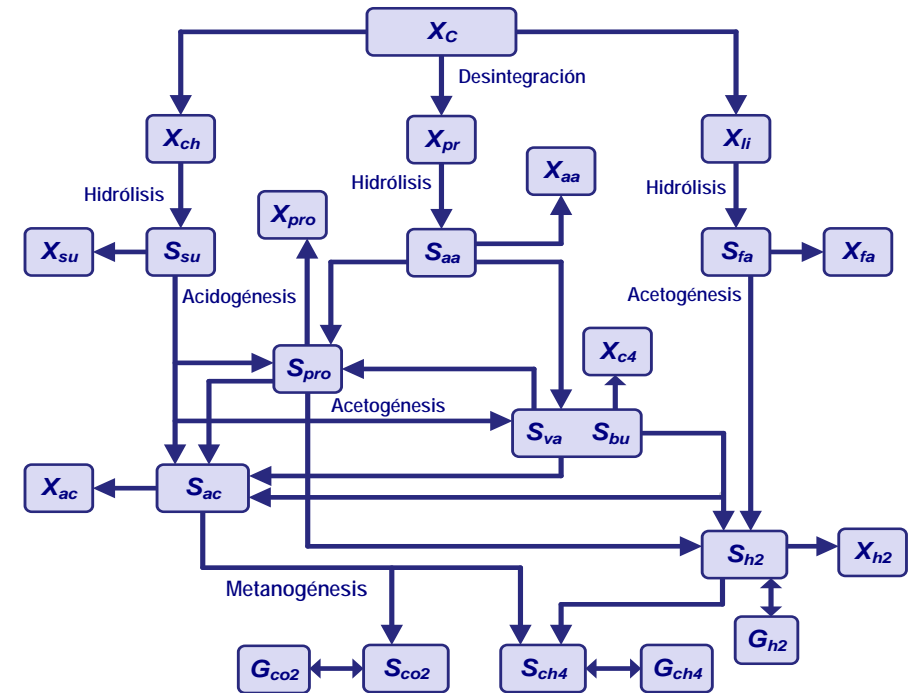
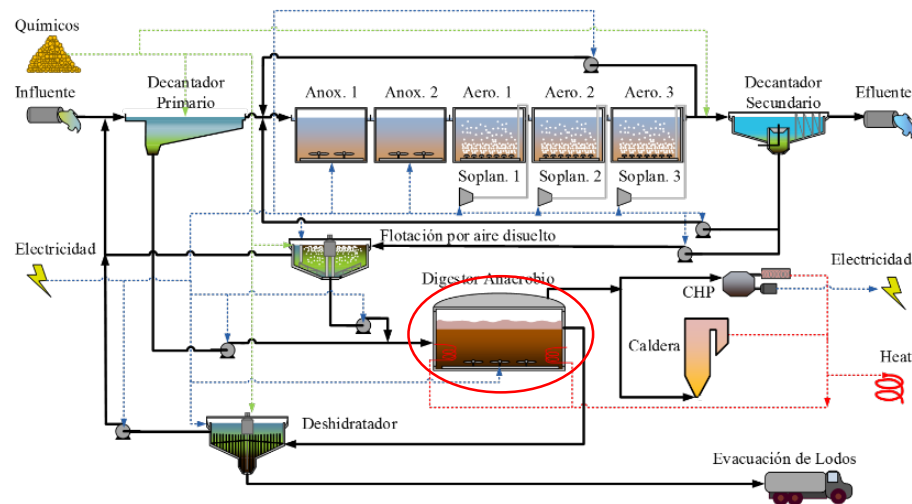
# El modelado integral de las EDAR



# El modelado integral de las EDAR

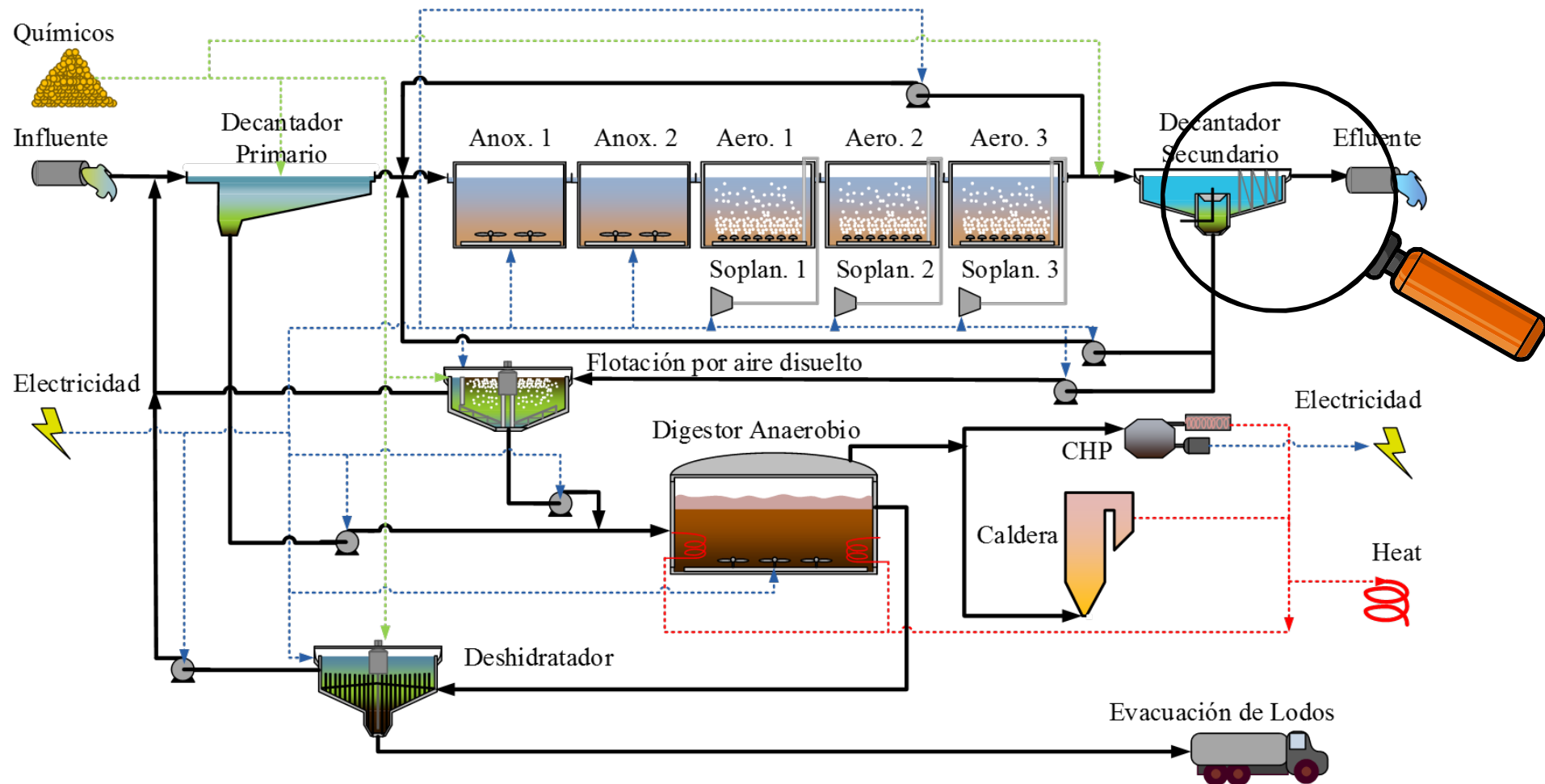
## ADM1:

- Degradación anaerobia de DQO
  - Bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas
- Sustrato biodegradable
  - Particulado (carbohidratos, proteínas, grasas) y Soluble (monómeros, VFA)
- Continuidad en DQO, C y N
  - Componentes orgánicos → DQO
  - Contenido en N y C de los componentes ( $i_{N,X}$ ,  $i_{C,X}$ )
- Equilibrio ácido-base y cálculo de pH





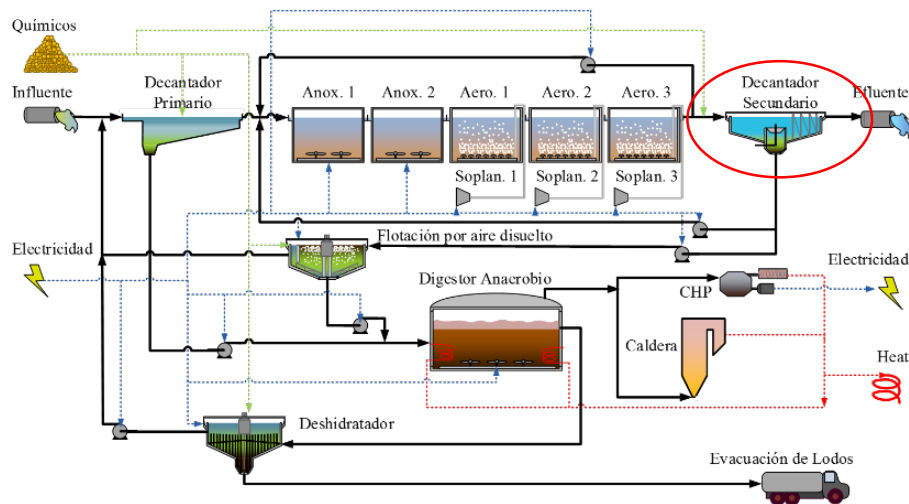
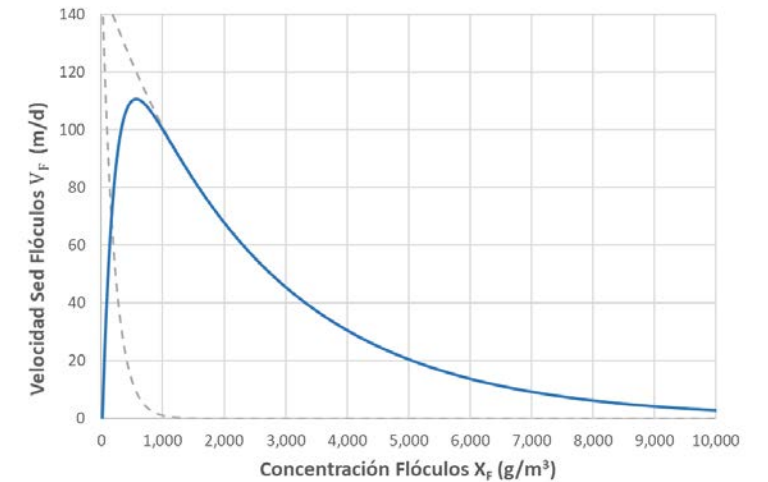
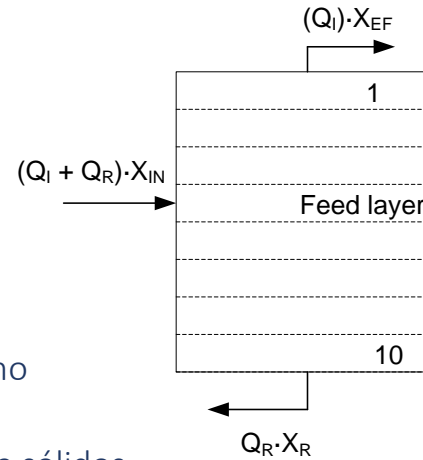
# El modelado integral de las EDAR



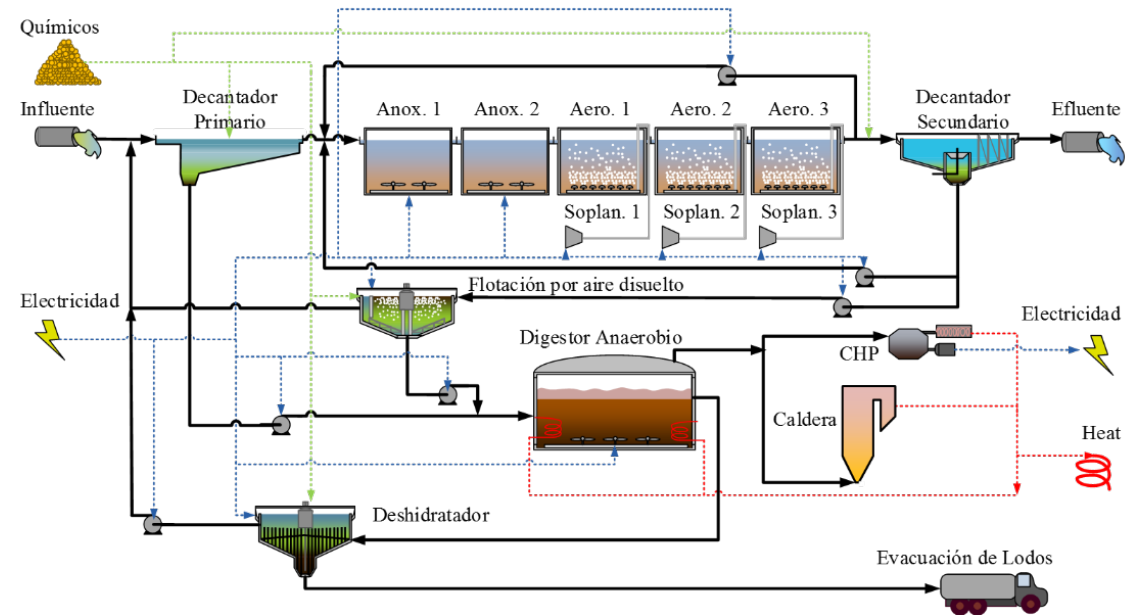
# El modelado integral de las EDAR

## Modelos de capas (1D):

- Modelo de transporte: movimiento de partículas
  - Advección del líquido
  - Sedimentación de las partículas
- Resolución numérica
  - División en capas horizontales de mezcla completa
  - Predicción del movimiento de los sólidos en cada capa como resultado de advección + sedimentación
  - Velocidad de sedimentación función de la concentración de sólidos.



## El modelado integral de las EDAR



- Problemas de **compatibilidad** entre componentes
  - Descripción de nitrógeno orgánico entre ASM1, ASM2, ADM1
  - Descripción del sustrato carbonoso entre ASM1, ASM2 y ADM1
  - Conversión entre Sólidos Suspendidos Totales (SST) y fracciones de DQO
  - Equivalencia entre alcalinidad en ASM1 y ASM2 y predicción de pH en ADM1

Dificultad para construir de manera sencilla y rigurosa un modelo global de las EDAR

## El modelado integral de las EDAR



### Transformadores específicos entre los modelos estándar

- Reglas de conversión automática entre componentes diferentes.
- Ej.: ASM1-ADM1 (Copp et al., 2003), Interfaces CBIM (Vanrolleghem et al., 2005), etc.
- No siempre garantizan la continuidad de masa elemental.
- Su diseño y sintonización requiere un conocimiento avanzado de las simplificaciones.

### Modelo Único General

- Componentes y transformaciones para reproducir todos los procesos en una EDAR
- Ej.: Biowin (Jones and Tákacs, 2004), BNRM1 (Seco et al., 2004), etc.
- Sin flexibilidad para adaptarse al caso de estudio.

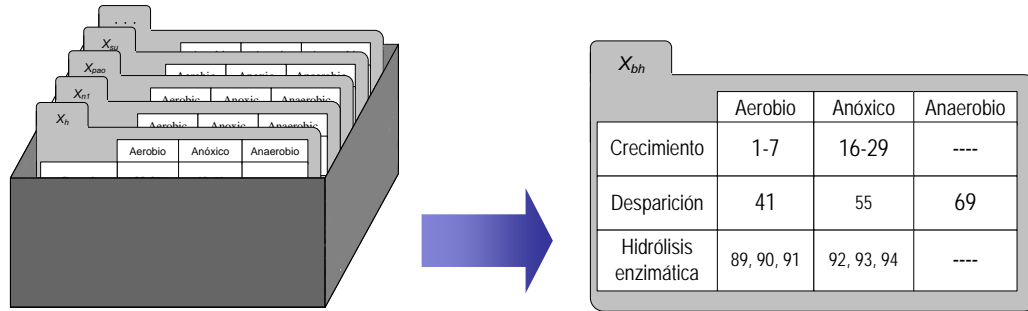
### Metodologías PWM de construcción de modelos “a medida”

- Selección de componentes y transformaciones a la medida del caso de estudio.
- Ej.: Librerías PWM de Ceit (2007-2015).
- Combinación de transformaciones con estructura flexible y expandible.

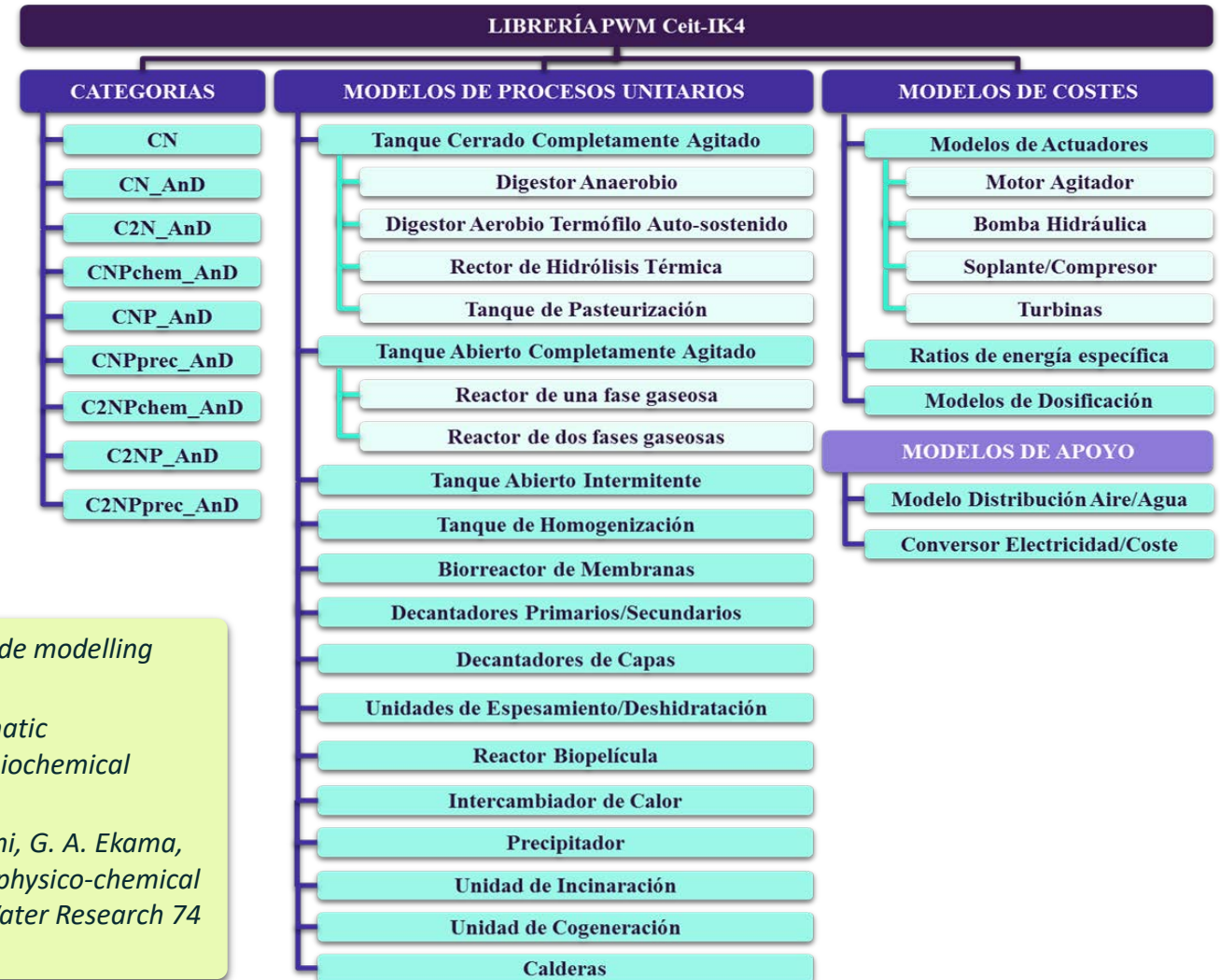
# El modelado integral de las EDAR

## Construcción de modelos “a medida”

Selección de componentes y transformaciones a la medida del caso de estudio.



- P. Grau, M. de Gracia, P. Vanrolleghem and E. Ayesa (2007). A new Plant-wide modelling methodology for WWTPs. *Water Research* 41, No. 19, pp. 4357-4372.
- T. Fernández-Arévalo, I. Lizarralde, P. Grau and E. Ayesa (2014). New systematic methodology for incorporating dynamic thermal modelling in multi-phase biochemical reactors. *Water Research* 60, pp. 141-155.
- I. Lizarralde, T. Fernández-Arévalo, C. Brouckaert, P. Vanrolleghem, D.S. Ikumi, G. A. Ekama, E. Ayesa and P. Grau (2015). A new general methodology for incorporating physico-chemical transformations into multi-phase wastewater treatment process models. *Water Research* 74, pp. 239-256.



# Índice

## 1. Evolución en el modelado matemático y simulación de EDARs

- Nuevas necesidades en el diseño y operación de las EDAR.
- El modelado integral de las EDAR.

## 2. Uso de simuladores para optimizar la recuperación de compuestos y energía en las EDAR avanzadas

- Análisis integral de los flujos de masa y energía en las EDAR.
- Algunos ejemplos ilustrativos.

## 3. Líneas de futuro

- Herramientas digitales emergentes

# Uso de simuladores para optimizar la recuperación de compuestos y energía en las EDAR avanzadas

## Proyecto NOVEDAR Consolider (2008 – 2012)

- *“Conception of the Sewage Treatment Plant of the XXI Century. Development, implementation and evaluation of technologies for the treatment and resources recovery from wastewaters”*

## Recuperación de compuestos y energía en una EDAR

- Gestión óptima de los flujos de masa (C, N, P)
- Clave 1: **utilización eficiente de la DQO** disponible reduciendo al máximo la oxidación a  $\text{CO}_2$ 
  - Línea de aguas: desnitrificación, almacenamiento ( $X_{\text{PAO}}$ )
  - Línea de fangos: biogás
- Clave 2: **eliminar o recuperar nutrientes** en las corrientes más apropiadas (retornos normalmente)
  - Recuperación de P y N por precipitación de estruvita
  - Eliminación de N sin consumo de C mediante Anammox

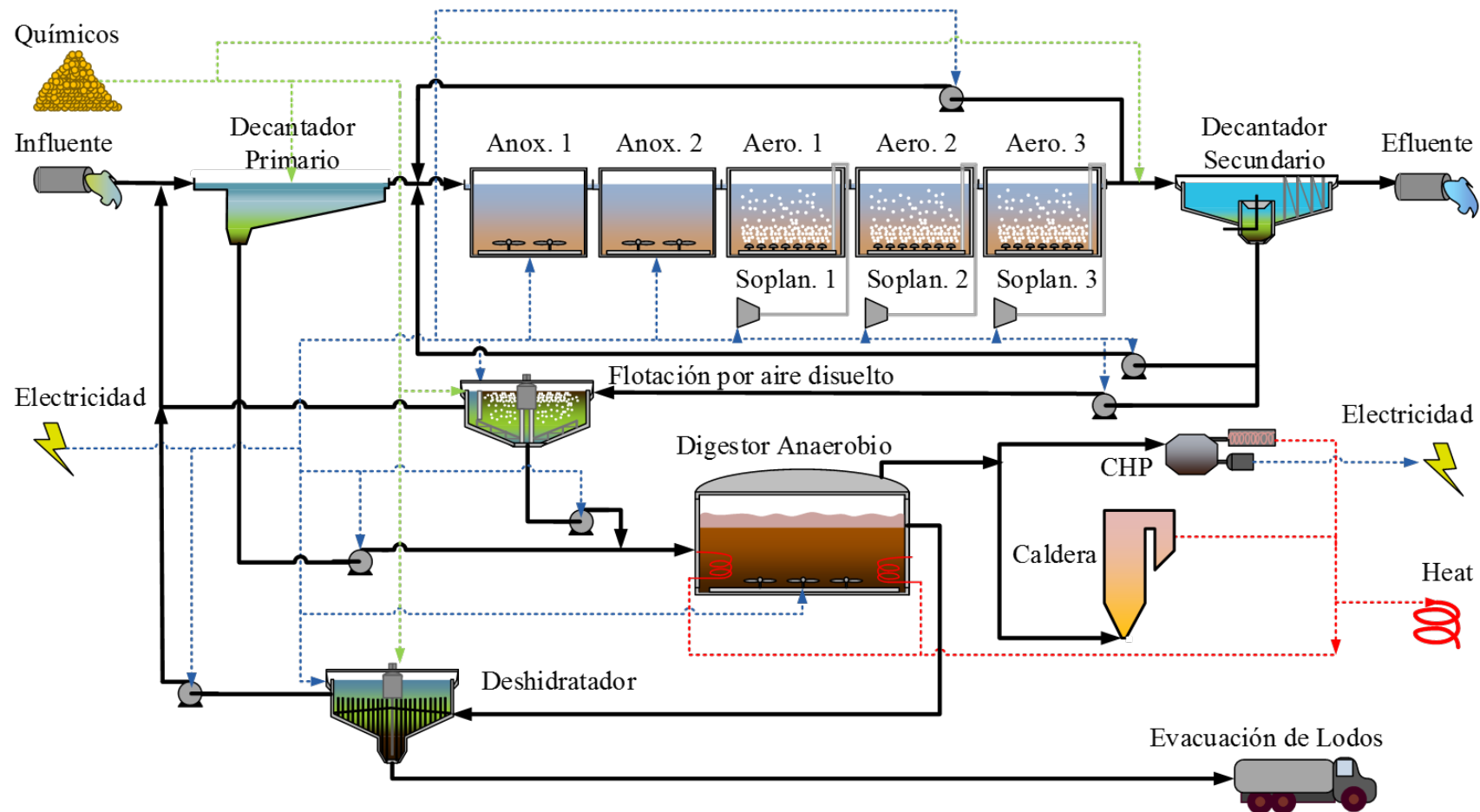
## Modelado integral

- Las herramientas de modelado y simulación de toda la EDAR permiten analizar los **flujos de masa** y seleccionar las tecnologías más adecuadas para cada necesidad. Análisis **cuantitativo**.



# Análisis integral de los flujos de masa y energía en las EDAR

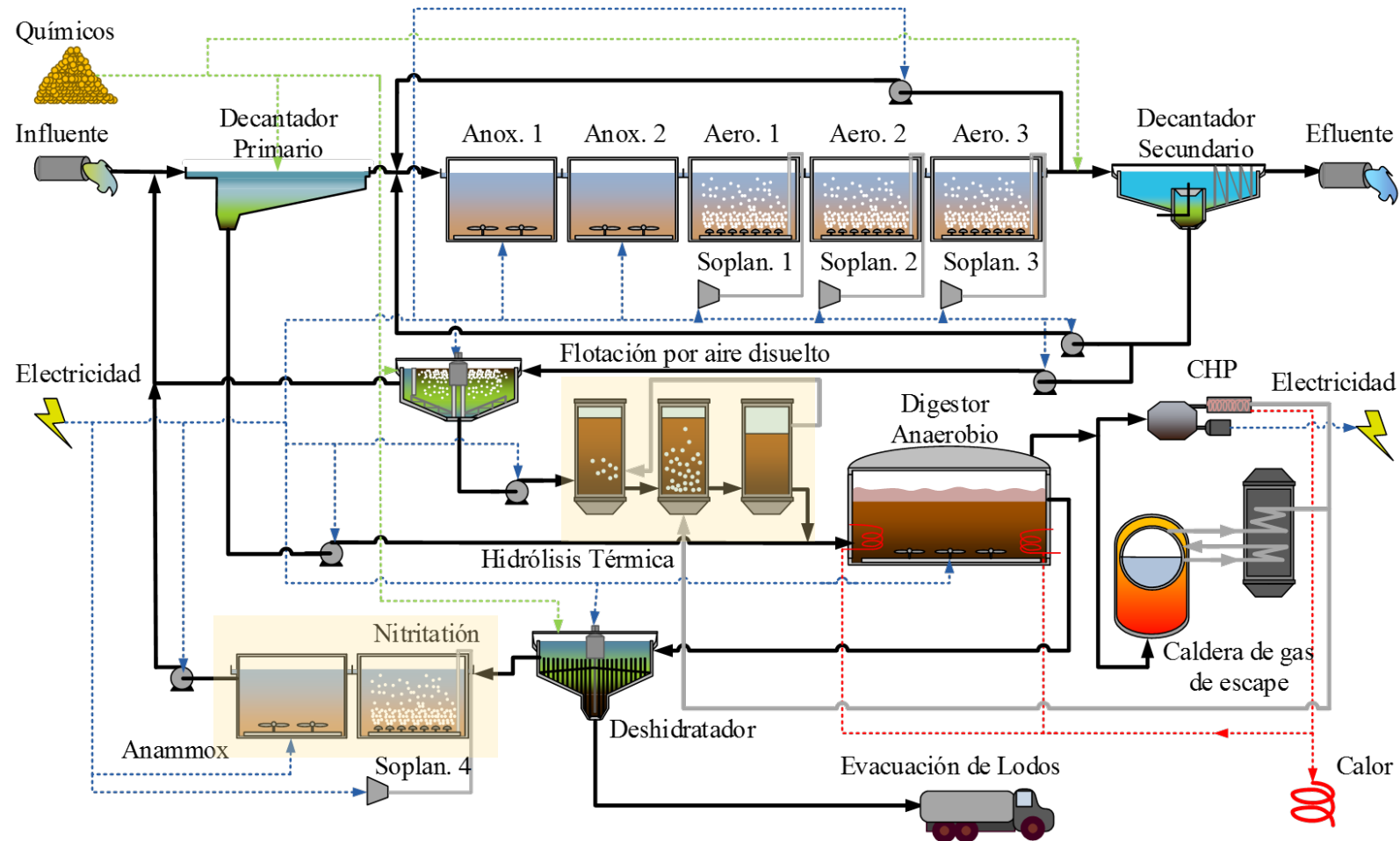
## EDAR CONVENCIONAL



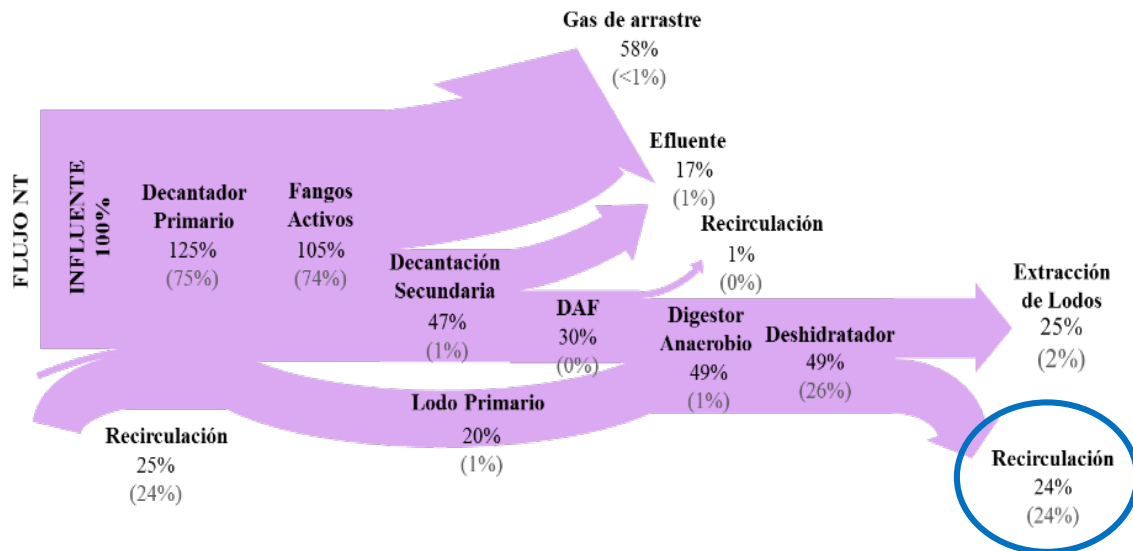
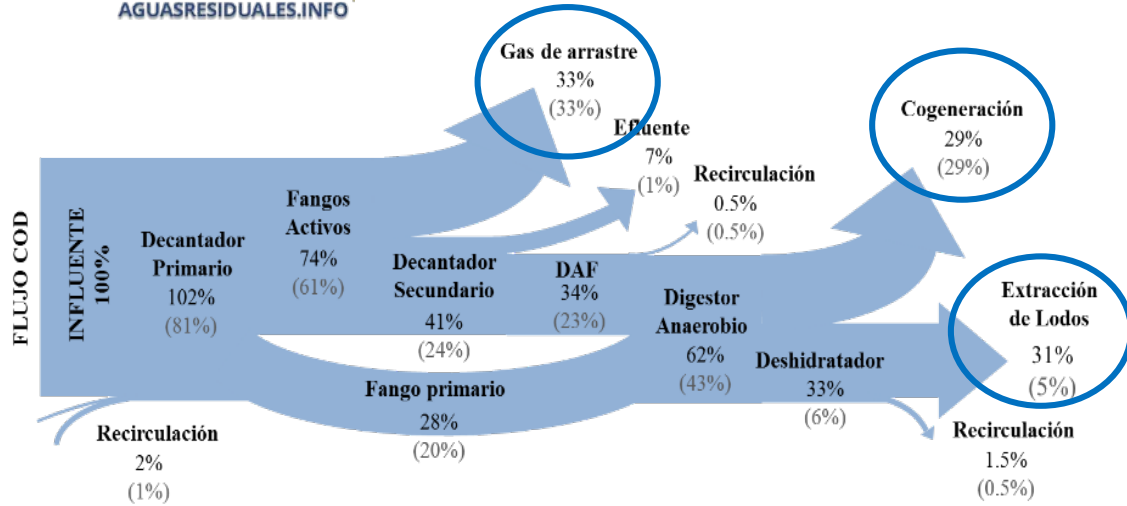


# Análisis integral de los flujos de masa y energía en las EDAR

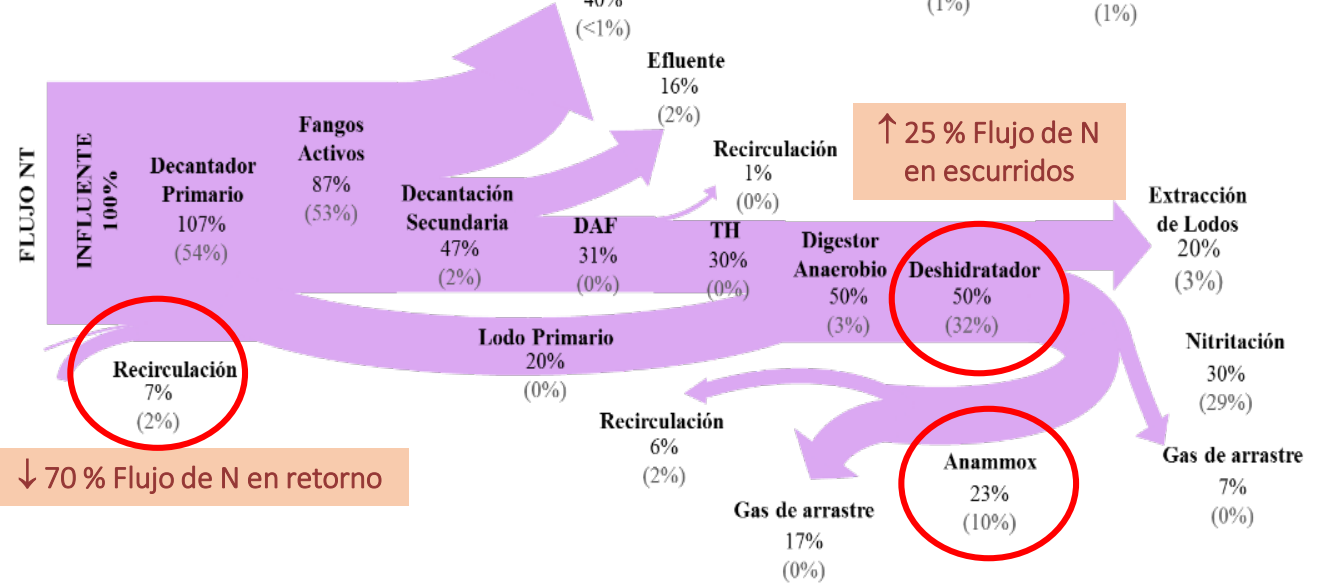
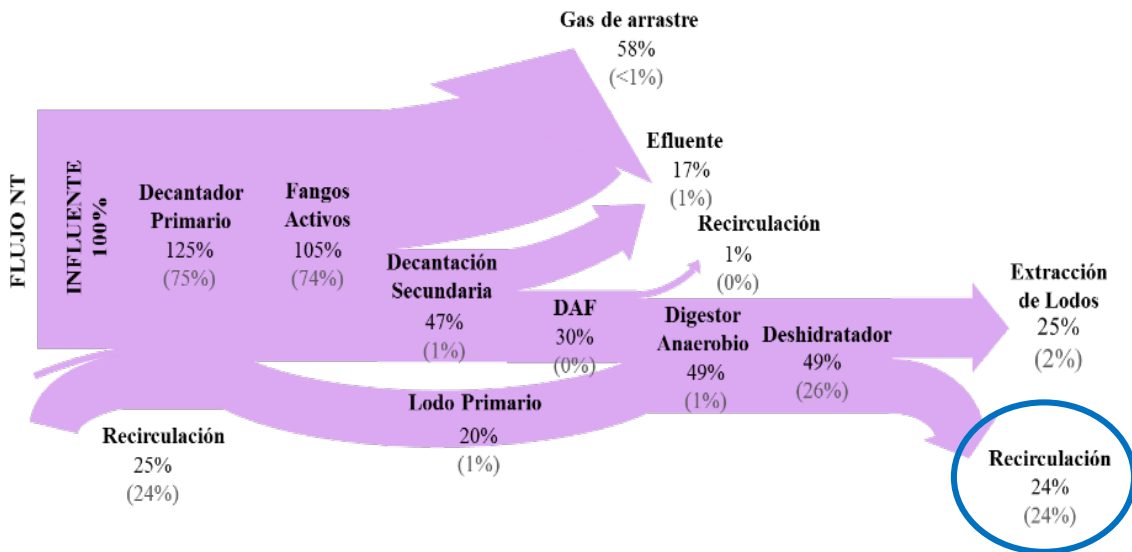
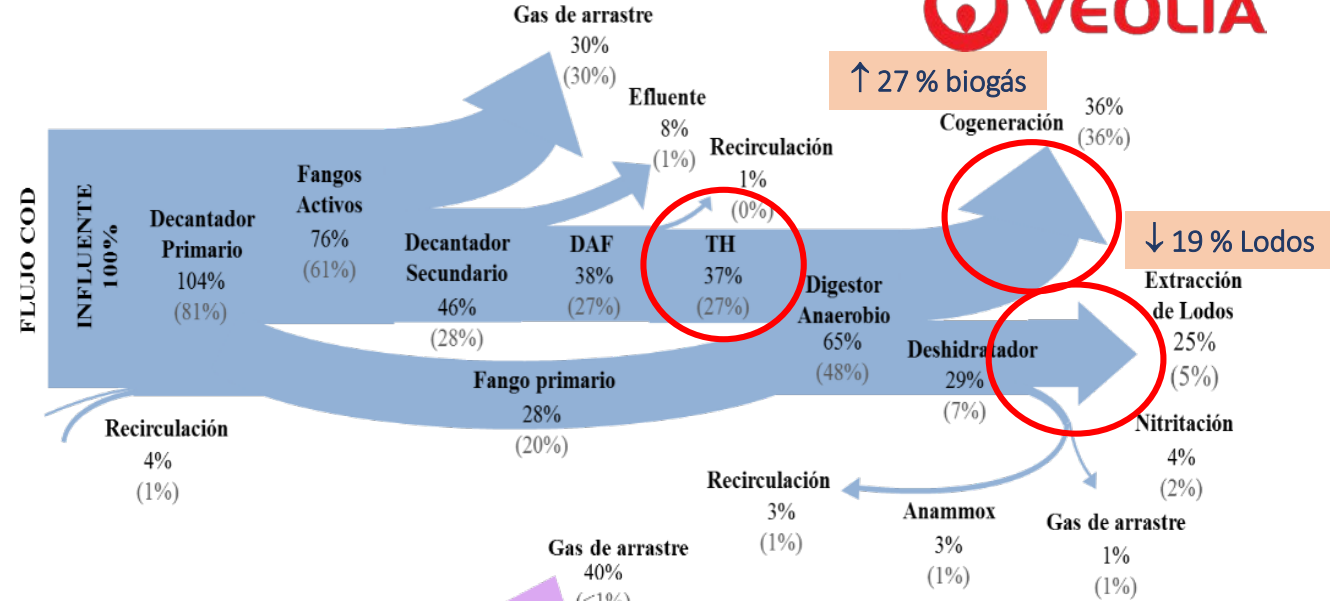
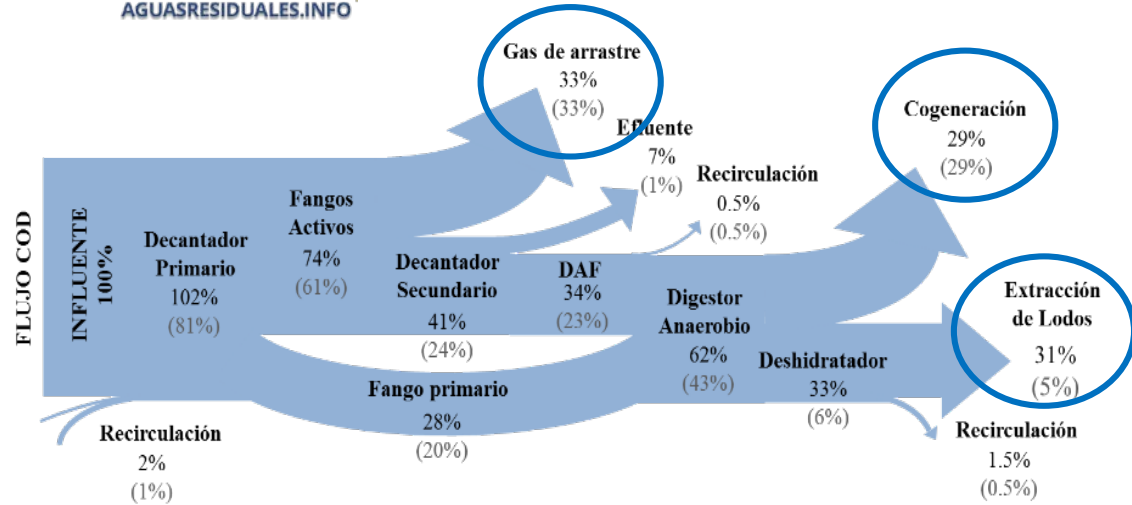
EDAR MEJORADA



# Análisis integral de los flujos de masa y energía



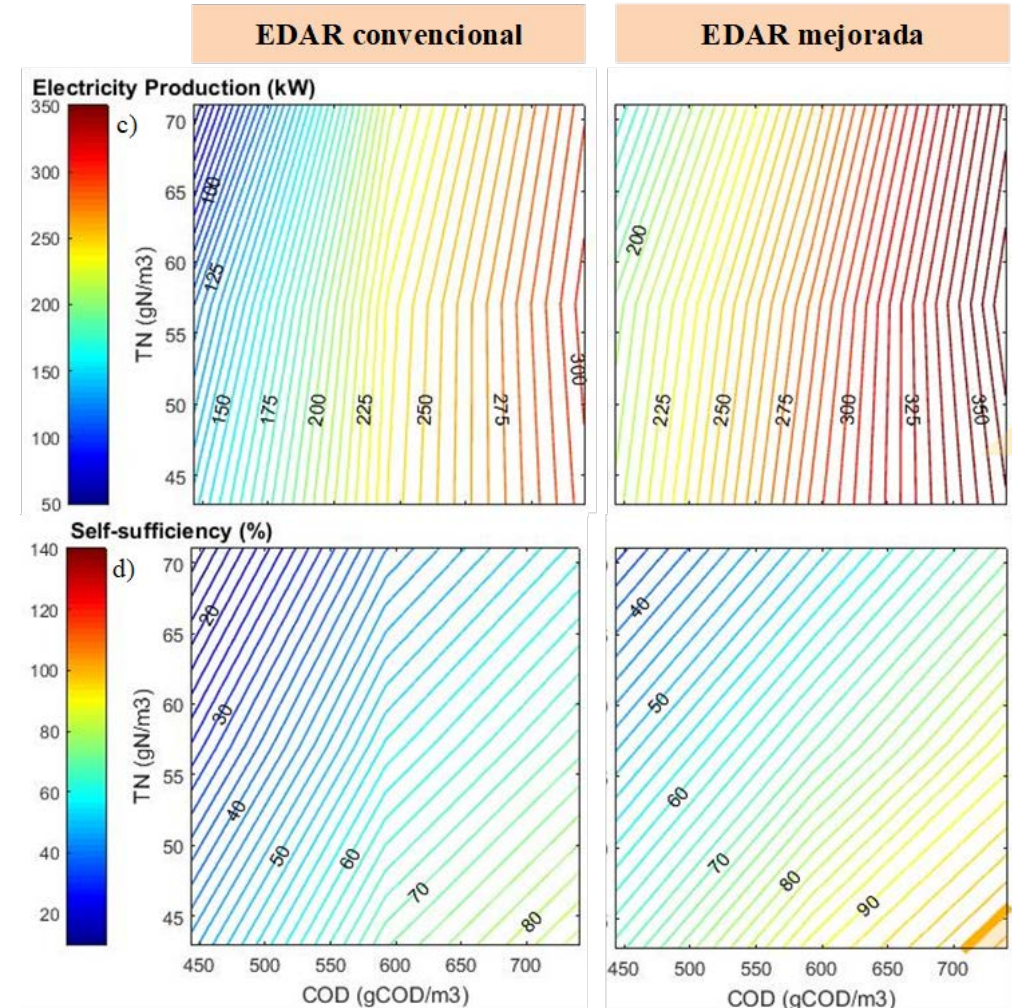
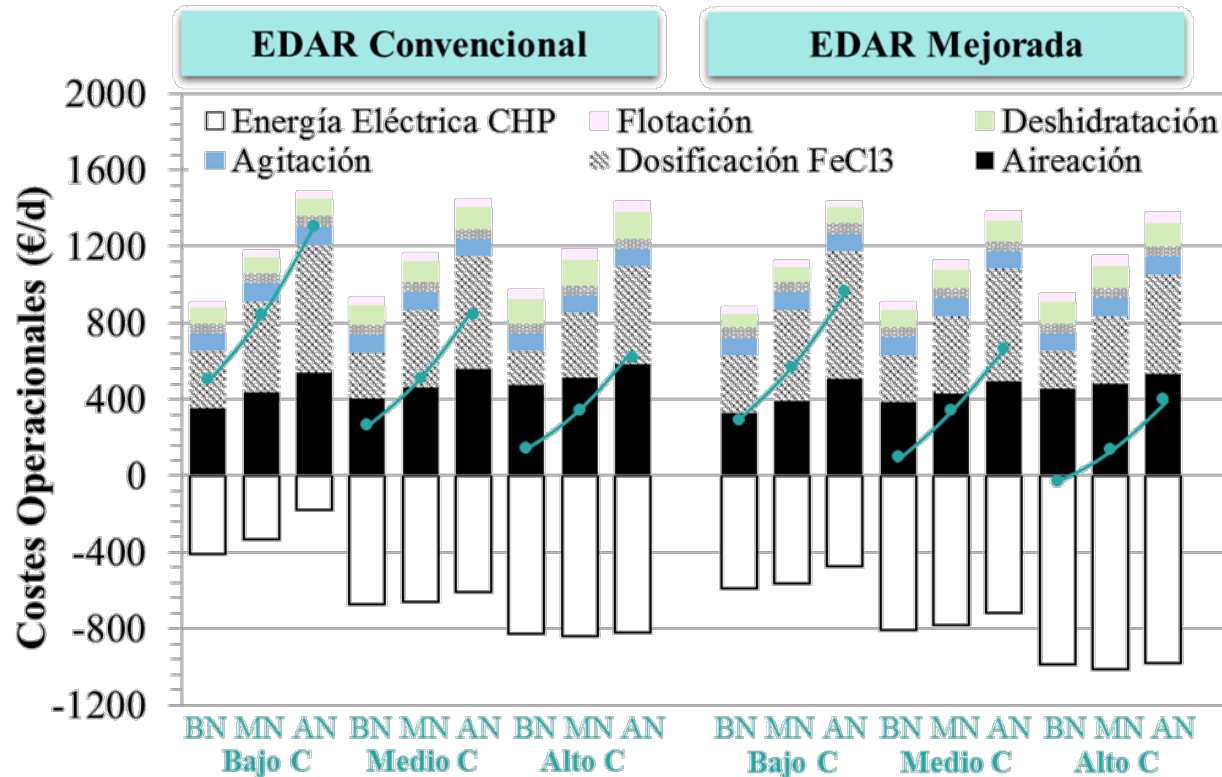
# Análisis integral de los flujos de masa y energía



# Análisis integral de los flujos de masa y energía en las EDAR

El balance energético global depende

- Tecnologías incorporadas (biogás, aireación, etc.)
- Relación C/N/P del agua residual afluyente



## Uso de los simuladores para optimizar la operación

¿Puedo reducir costes?  
¿Puedo mejorar el efluente?  
¿Puedo producir más **biogás**?

¿Podría **eliminar P**  
biológicamente?  
¿Podría recuperar **estruvita**?  
¿Sería rentable hacerlo

¿En cuánto tiempo  
amortizaría unos  
**controladores** automáticos?



etc.

### Protocolo Ceit para Optimización de Operación

Recopilación de información experimental y de diseño

Tratamiento de datos experimentales

Construcción del modelo global de planta en plataforma sim.

Análisis y caracterización del agua influente

Calibración/Validación

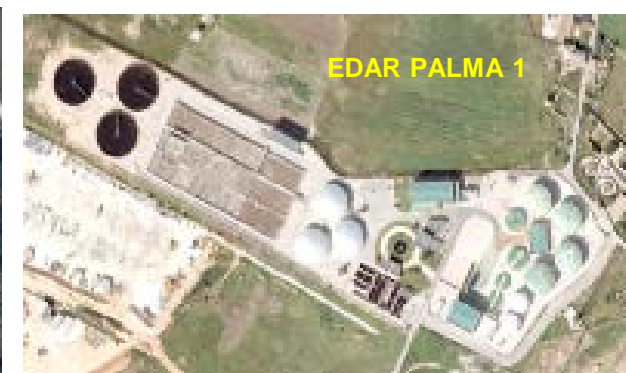
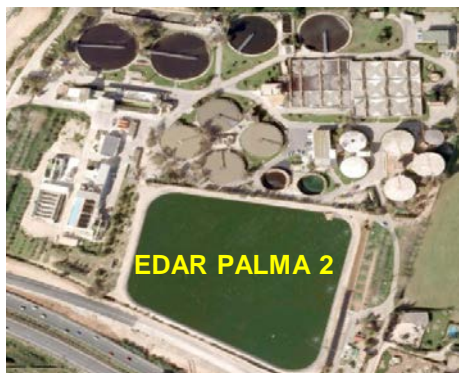
Diagnostico de operación

Análisis de escenarios por simulación

Propuesta de mejoras

Herramienta de gran ayuda para

- Diagnóstico y optimización de la operación de las EDAR
- Estudio de la amortización de mejoras o equipamientos
- Análisis de ofertas en concursos de explotación



## Algunos ejemplos ilustrativos

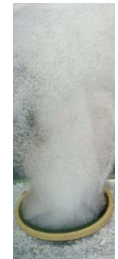
EDAR La Cartuja: Análisis por simulación del efecto de renovar el sistema de aireación de los reactores



BURBUJA GRUESA



BURBUJA FINA

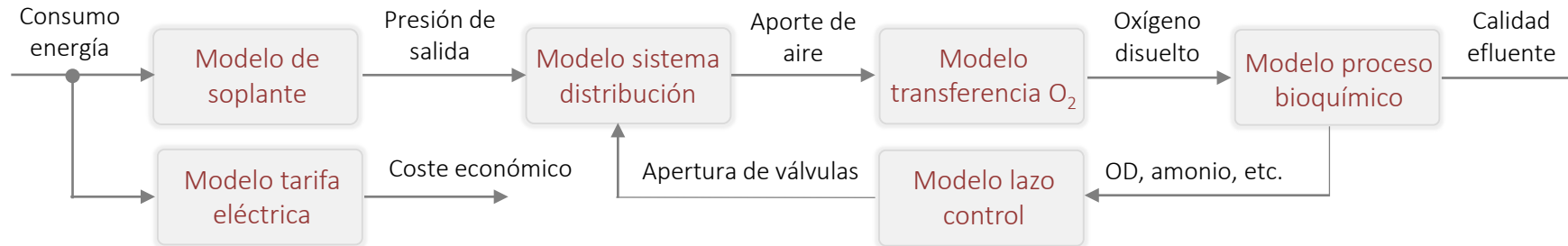


### Características de la EDAR La Cartuja (Zaragoza)

- 1.200.000 p.e.
- Eliminación biológica de DQO y eliminación físico-química de P
- 3 líneas paralelas (operación con 2 líneas)
- Sistema de aireación diseñado para operar con burbuja gruesa

## Algunos ejemplos ilustrativos

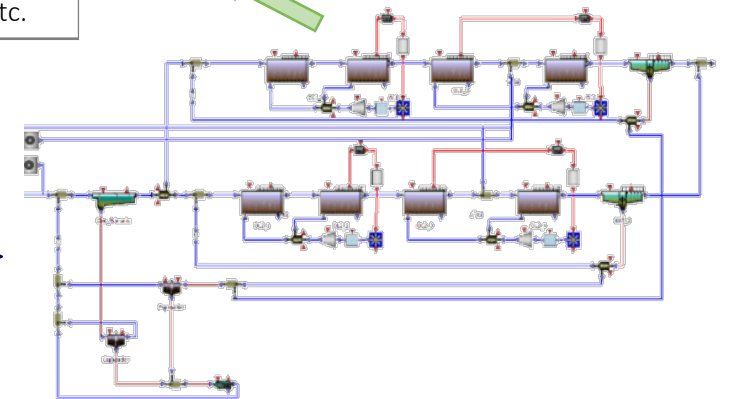
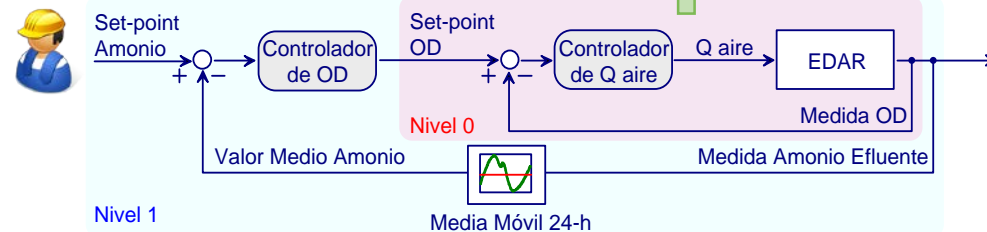
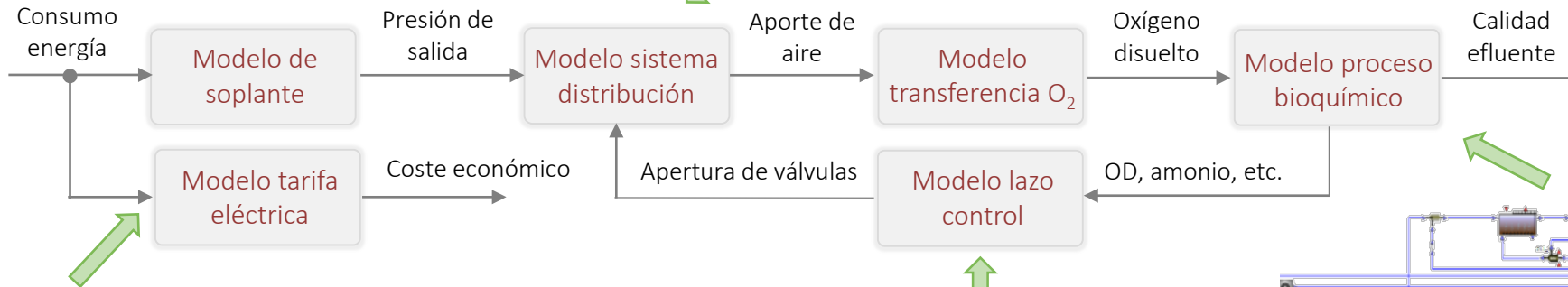
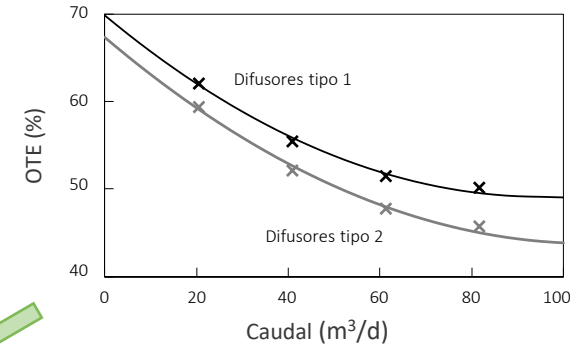
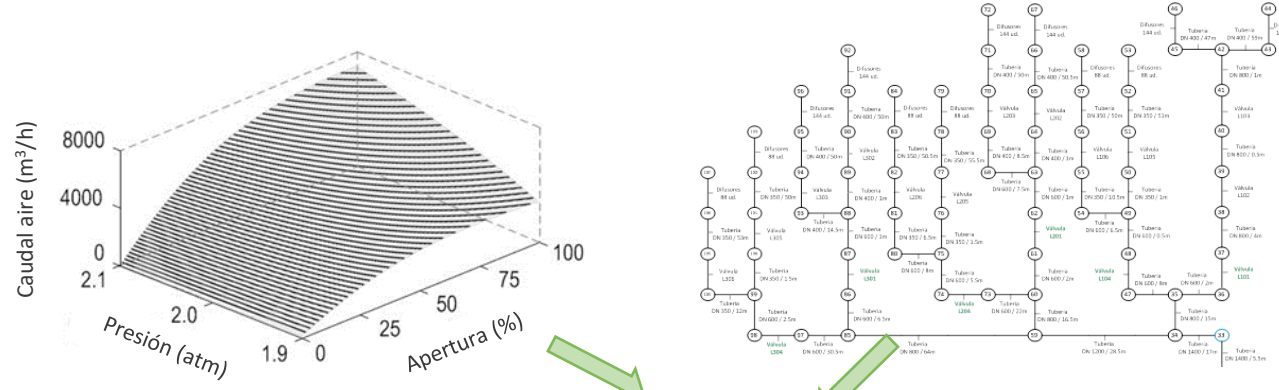
EDAR La Cartuja: Análisis por simulación del efecto de renovar el sistema de aireación de los reactores





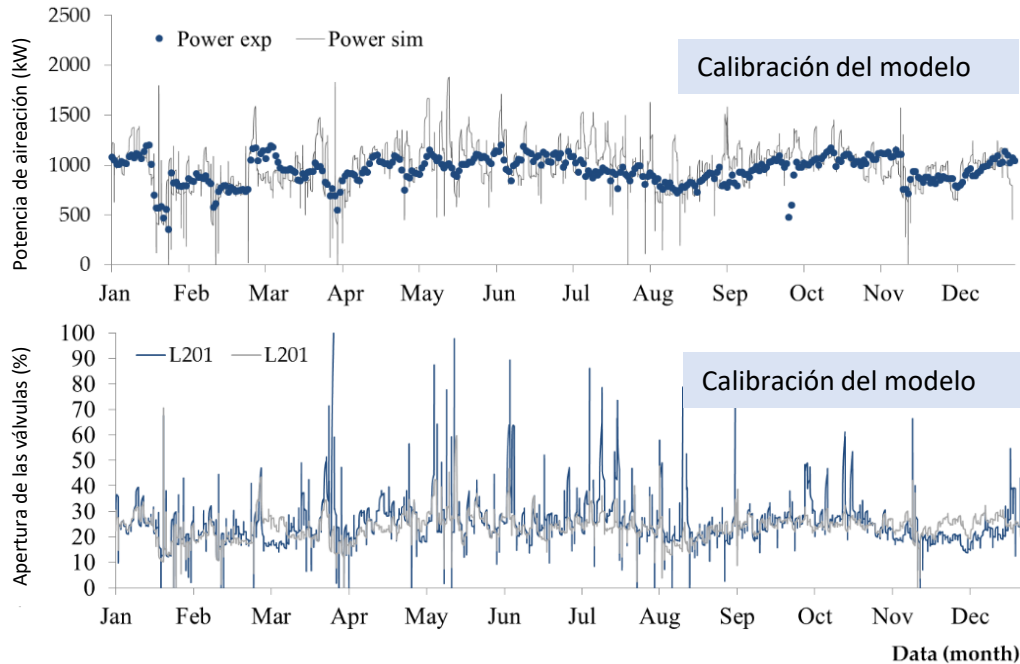
# Algunos ejemplos ilustrativos

## EDAR La Cartuja: Análisis por simulación del efecto de renovar el sistema de aireación de los reactores



## Algunos ejemplos ilustrativos

### EDAR La Cartuja: Análisis por simulación del efecto de renovar el sistema de aireación de los reactores

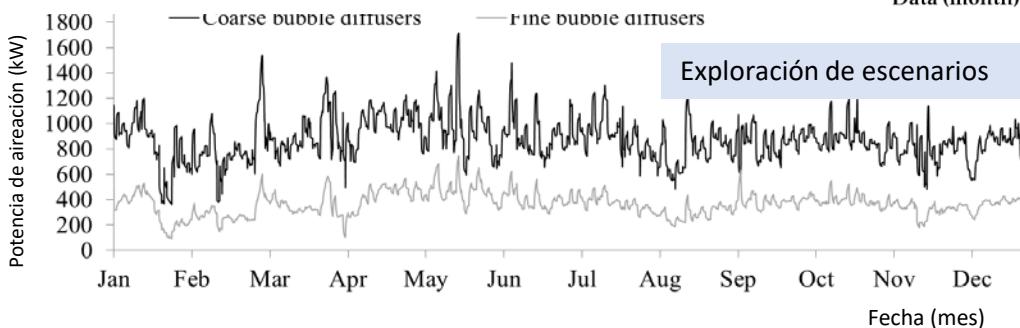
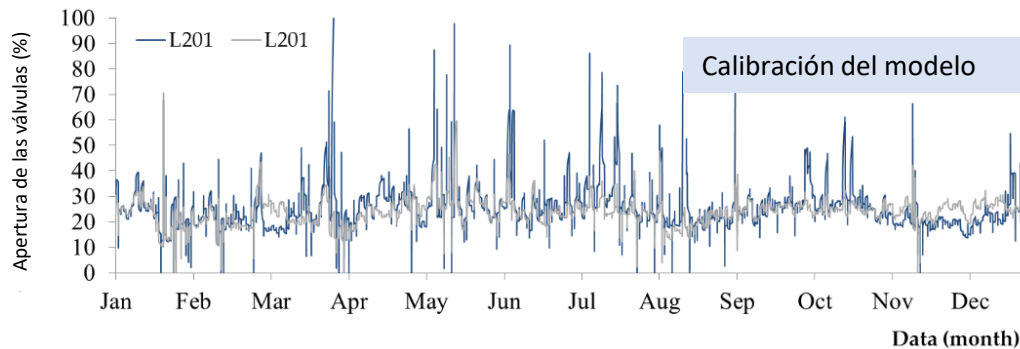
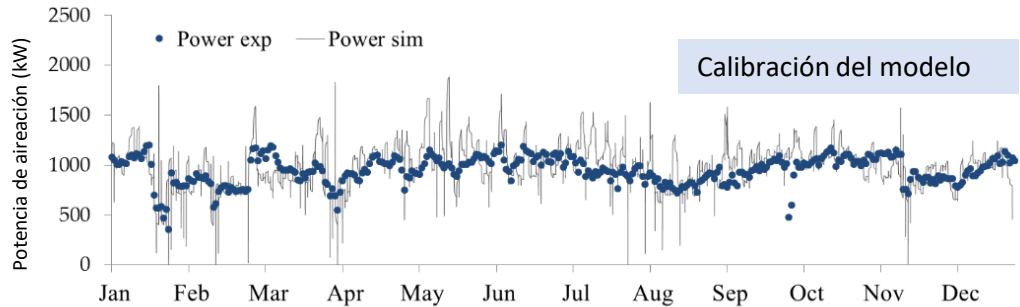


#### A. Calibración del modelo con datos históricos

- Datos históricos con el sistema de aireación existente (burbuja gruesa).
- Contraste de datos de potencia, caudal de aire, apertura de válvulas y OD.

# Algunos ejemplos ilustrativos

## EDAR La Cartuja: Análisis por simulación del efecto de renovar el sistema de aireación de los reactores

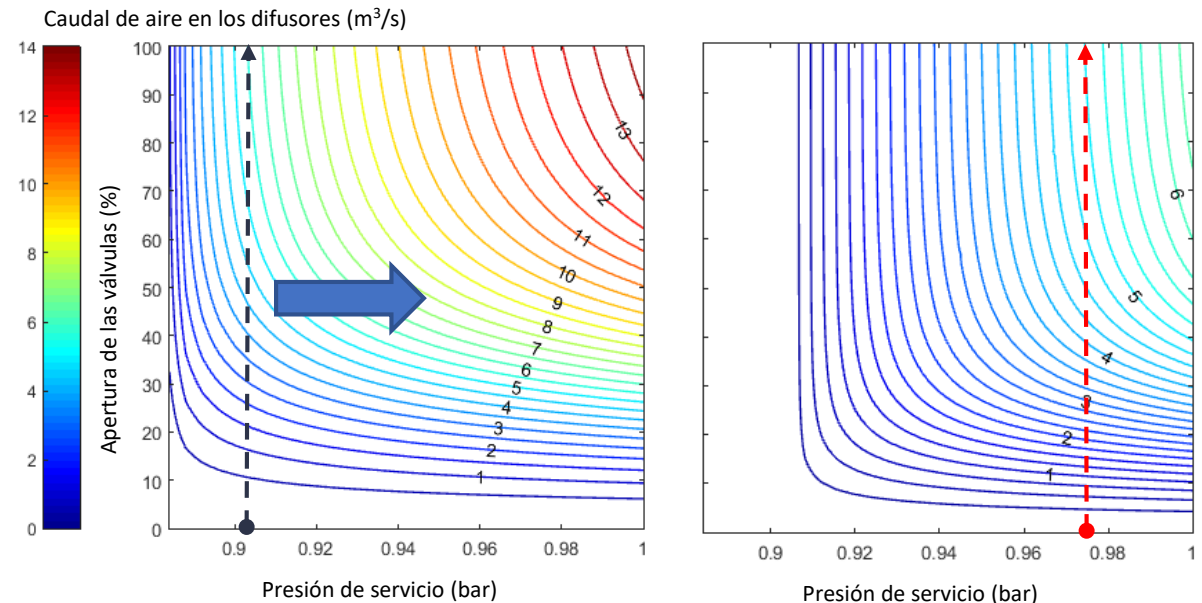


### A. Calibración del modelo con datos históricos

- Datos históricos con el sistema de aireación existente (burbuja gruesa).
- Contraste de datos de potencia, caudal de aire, apertura de válvulas y OD.

### B. Exploración de nuevos escenarios

- Previsión de resultados futuros para la operación con burbuja fina.
- Reducción de un 52% en el aporte de aire y de un 50% en la potencia.
- Ligero incremento de la presión de impulsión (análisis de las soplantes).



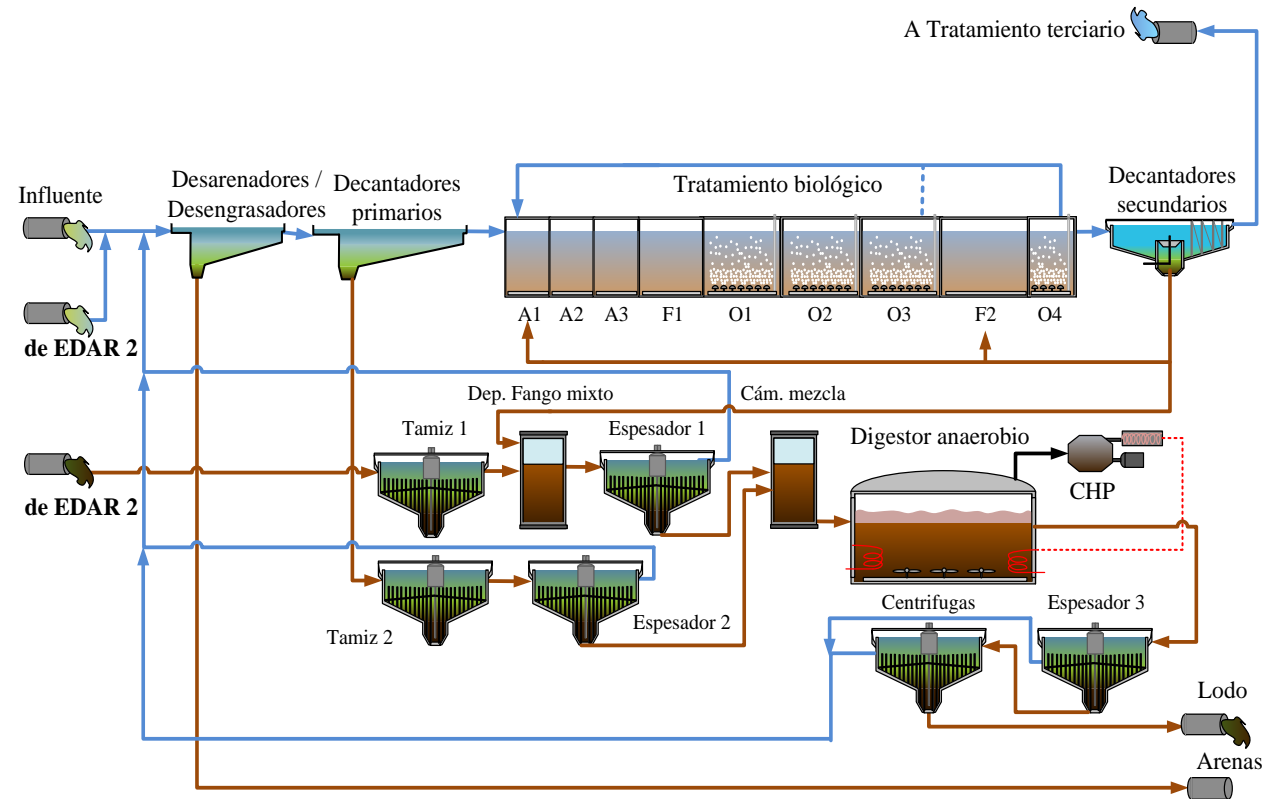
## Algunos ejemplos ilustrativos

### EDAR Palma I: Análisis técnico-económico de las alternativas de recuperación / eliminación de P



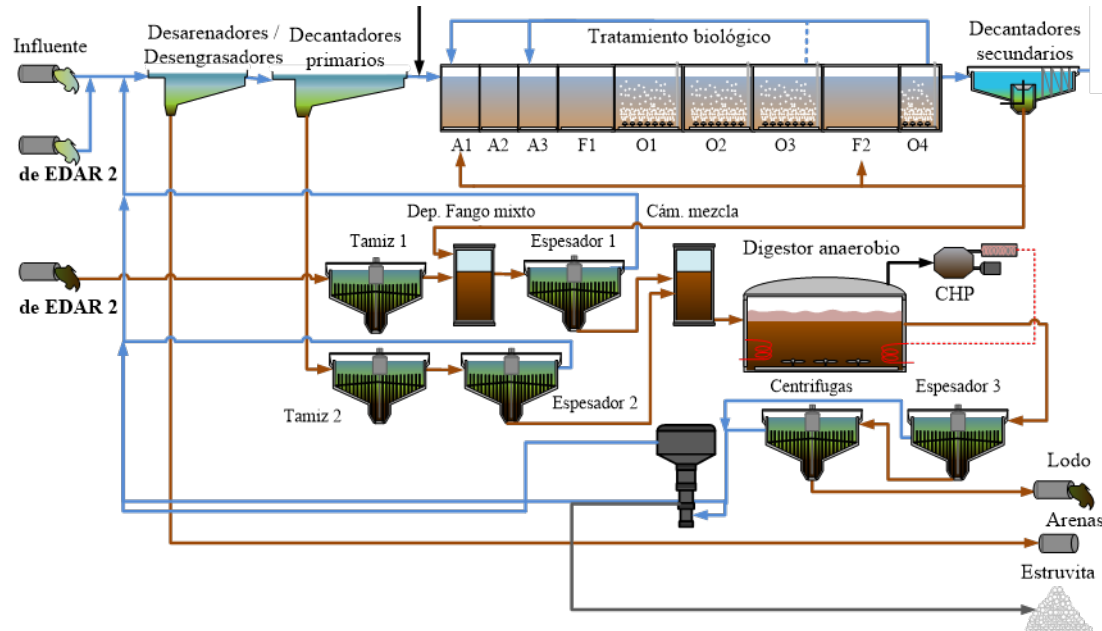
#### Características de la EDAR

- Caudal diario de 50.000 m<sup>3</sup>/d
- Eliminación biológica de C y N
- Eliminación físico-química de P

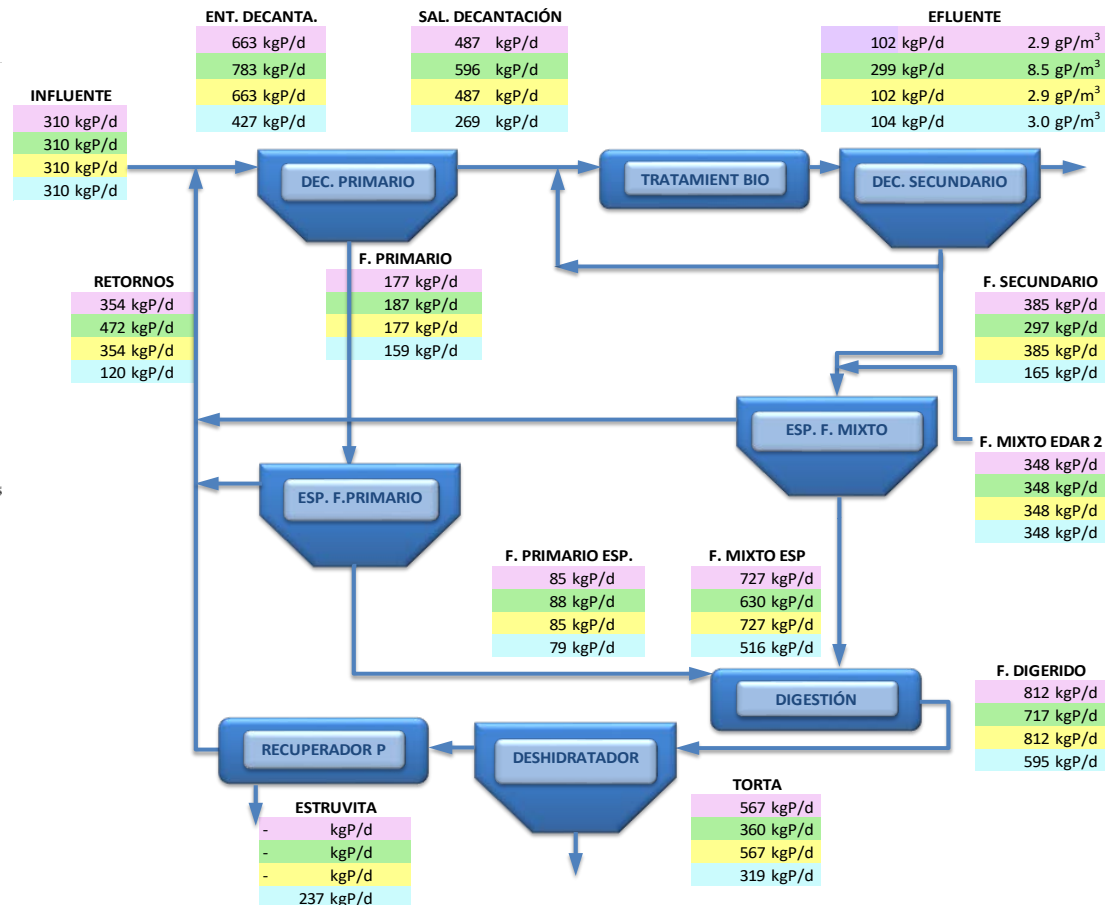


# Algunos ejemplos ilustrativos

## EDAR Palma I: Análisis técnico-económico de las alternativas de recuperación / eliminación de P



ALT	Configuración	P-PO <sub>4</sub> ef	Fe <sup>+3</sup> (%)
ALT.1	DN + Precip Fe <sup>+3</sup>	2.8 gP/m <sup>3</sup>	-
ALT.2	A <sub>2</sub> O	7.9 gP/m <sup>3</sup>	-100 %
ALT.3	A <sub>2</sub> O + Precip Fe <sup>+3</sup>	2.8 gP/m <sup>3</sup>	-30 %
ALT.4	A <sub>2</sub> O + Estruv.	2.5 gP/m <sup>3</sup>	-100 %



INFLUYENTE	ENT. DECANTA.	SAL. DECANTACIÓN	EFLUYENTE
310 kgP/d	663 kgP/d	487 kgP/d	102 kgP/d
310 kgP/d	783 kgP/d	596 kgP/d	299 kgP/d
310 kgP/d	663 kgP/d	487 kgP/d	102 kgP/d
310 kgP/d	427 kgP/d	269 kgP/d	104 kgP/d

RETORNOS	F. PRIMARIO	F. SECUNDARIO
354 kgP/d	177 kgP/d	385 kgP/d
472 kgP/d	187 kgP/d	297 kgP/d
354 kgP/d	177 kgP/d	385 kgP/d
120 kgP/d	159 kgP/d	165 kgP/d

F. MIXTO EDAR 2	F. PRIMARIO ESP.	F. MIXTO ESP
348 kgP/d	85 kgP/d	727 kgP/d
348 kgP/d	88 kgP/d	630 kgP/d
348 kgP/d	85 kgP/d	727 kgP/d
348 kgP/d	79 kgP/d	516 kgP/d

F. DIGERIDO
812 kgP/d
717 kgP/d
812 kgP/d
595 kgP/d

ESTRUVITA	TORTA
- kgP/d	567 kgP/d
- kgP/d	360 kgP/d
- kgP/d	567 kgP/d
237 kgP/d	319 kgP/d

# Índice

## 1. Evolución en el modelado matemático y simulación de EDARs

- Nuevas necesidades en el diseño y operación de las EDAR.
- El modelado integral de las EDAR.

## 2. Uso de simuladores para optimizar la recuperación de compuestos y energía en las EDAR avanzadas

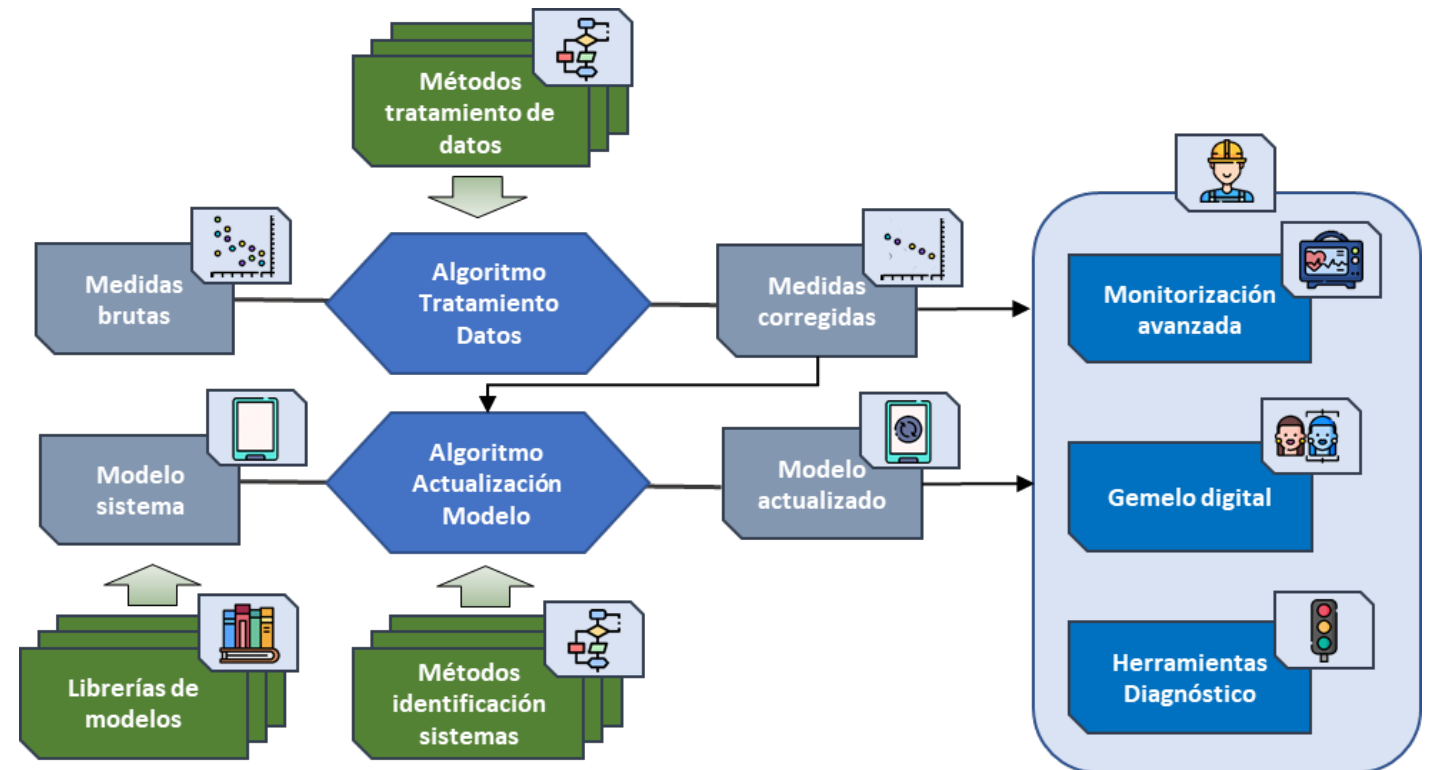
- Análisis integral de los flujos de masa y energía en las EDAR.
- Algunos ejemplos ilustrativos.

## 3. Líneas de futuro

- Herramientas digitales emergentes

## Herramientas digitales emergentes

- Herramientas de gestión de datos
- Gemelos digitales
- Control automático avanzado
- Sistemas de Ayuda a la Decisión



**Gracias por vuestra  
atención.**

---





# II Ciclo de 20 MasterClass

AGUASRESIDUALES.INFO