



LA CODIGESTIÓN: Revisión de una realidad muy ventajosa en los aspectos medioambientales y económicos de la digestión anaerobia

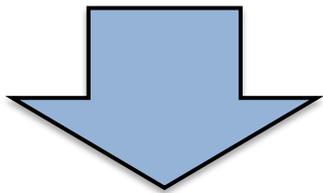
J.Mata-Alvarez y J. Dosta,
Dpt. Ingeniería Química

La codigestión anaerobia (coDA)

coDA: Mezcla de residuos en un digestor para crear sinergias en el medio de digestión o para **incrementar la carga orgánica** con el objetivo de mejorar la producción de biogas.

Sinergias interesantes:

- Equilibrio de nutrientes
- Suministro de macro y micronutrientes >> C/N ratio
- Dilución de sustancias inhibidoras o compuestos tóxicos.



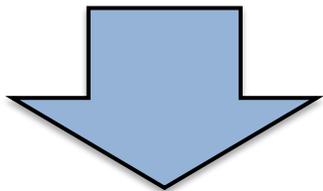
$$1 + 1 \geq 2$$

La codigestión anaerobia (coDA)

coDA: Mezcla de residuos en un digestor para crear sinergias en el medio de digestión o para **incrementar la carga orgánica** con el objetivo de mejorar la producción de biogas.

Sinergias interesantes:

- Equilibrio de nutrientes
- Suministro de macro y micronutrientes >> C/N ratio
- Dilución de sustancias inhibidoras o compuestos tóxicos.



$$1 + 1 \geq 2$$

$$1 + 1 = 2,2$$

La codigestión anaerobia (coDA)

Paràmetros

Factores, entre otros:

Balance bioquímico (C/N)
Inhibidores o tóxicos
pH
Alcalinidad
MO biodegradable
Humedad
...

Mezclado
Configuración
Temperatura
Modo alimentación
Control
...

Objetivo histórico: Probar que se produce más metano que en la mono-digestión

La DA es una tecnología desarrollada...

La mono-digestion de algunos sustratos presenta algunas dificultades



Lodos EDAR

Baja concentración de sólidos → Baja producción



Residuos ganaderos

Baja relación C/N



Residuos industriales

Bajo nitrógeno, adición químicos y temporalidad



Matadero

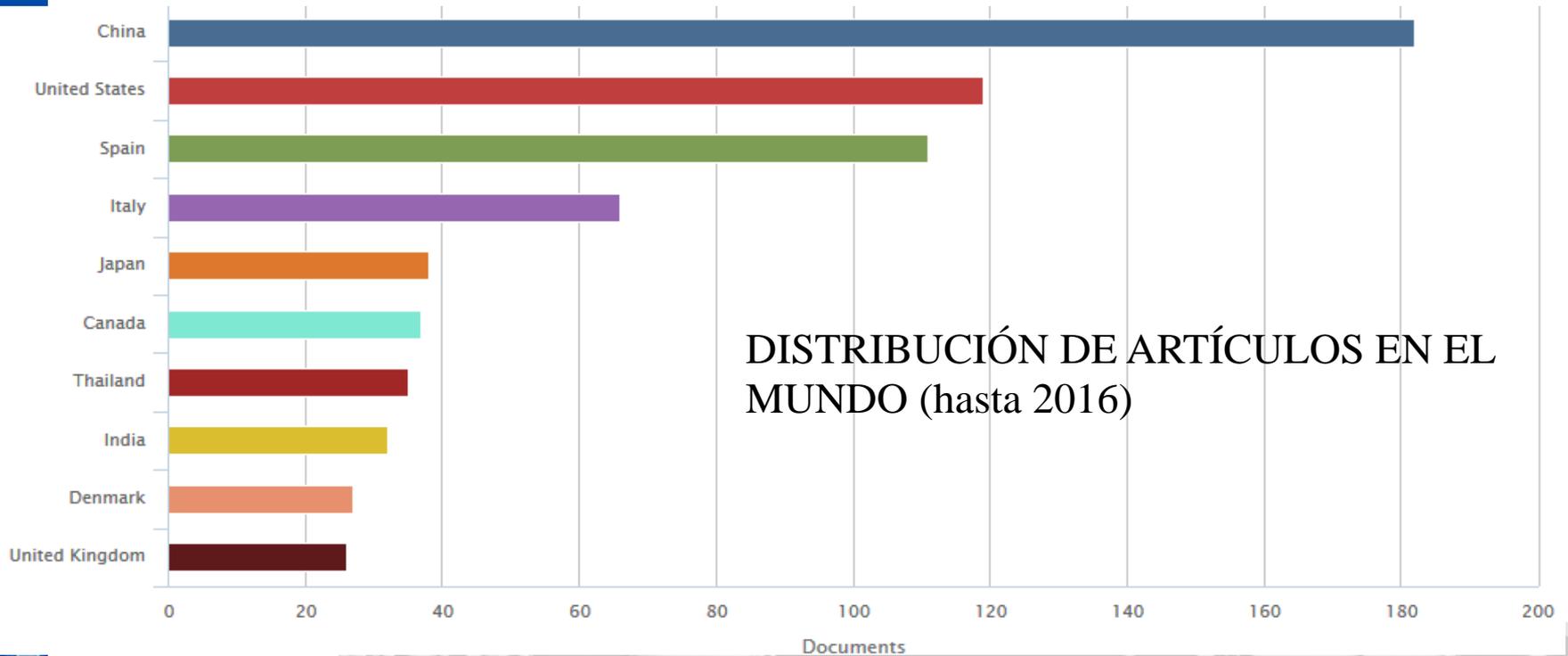
Concentraciones altas de amoníaco y grasas



Res. Lignocel.

Biodegradabilidad, falta de nitrógeno y temporalidad

La coDA puede solventar estos problemas

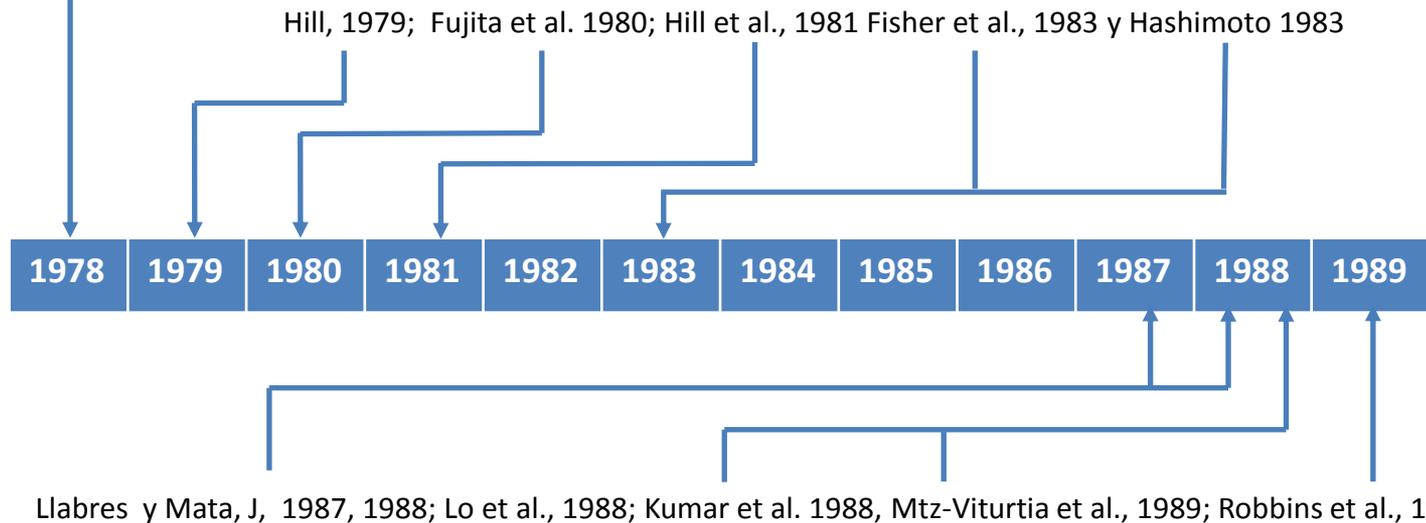


Orígenes de la coDA

Primeras referencias de coDA, con FD y RSU aparecen al final de los 70

Miller et al., 1978

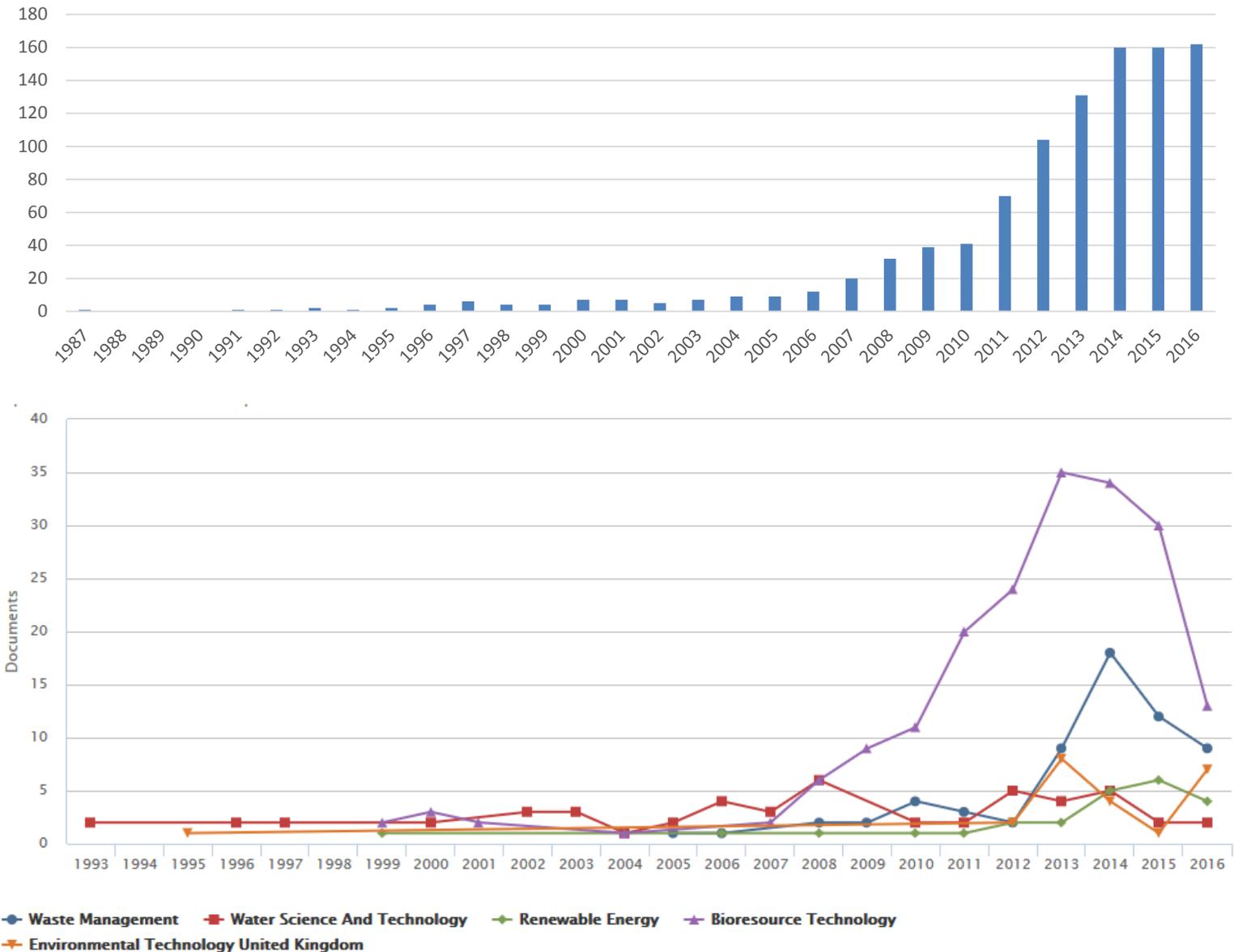
En el área de residuos agrícolas, las referencias iniciales, son también del mismo período



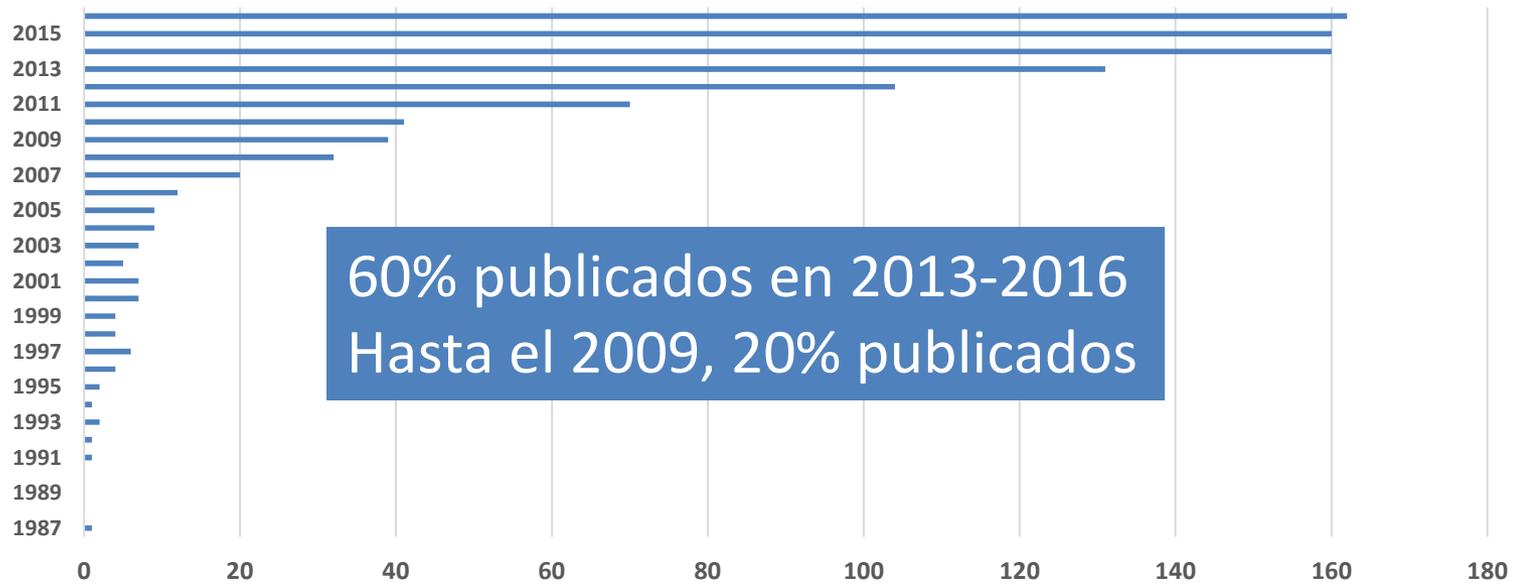
Más tarde otros autores estudiaron el comportamiento de otras mezclas de residuos

En estas primeras investigaciones estaban más orientadas hacia la mejora de rendimientos o aspectos cinéticos más que en aspectos energéticos

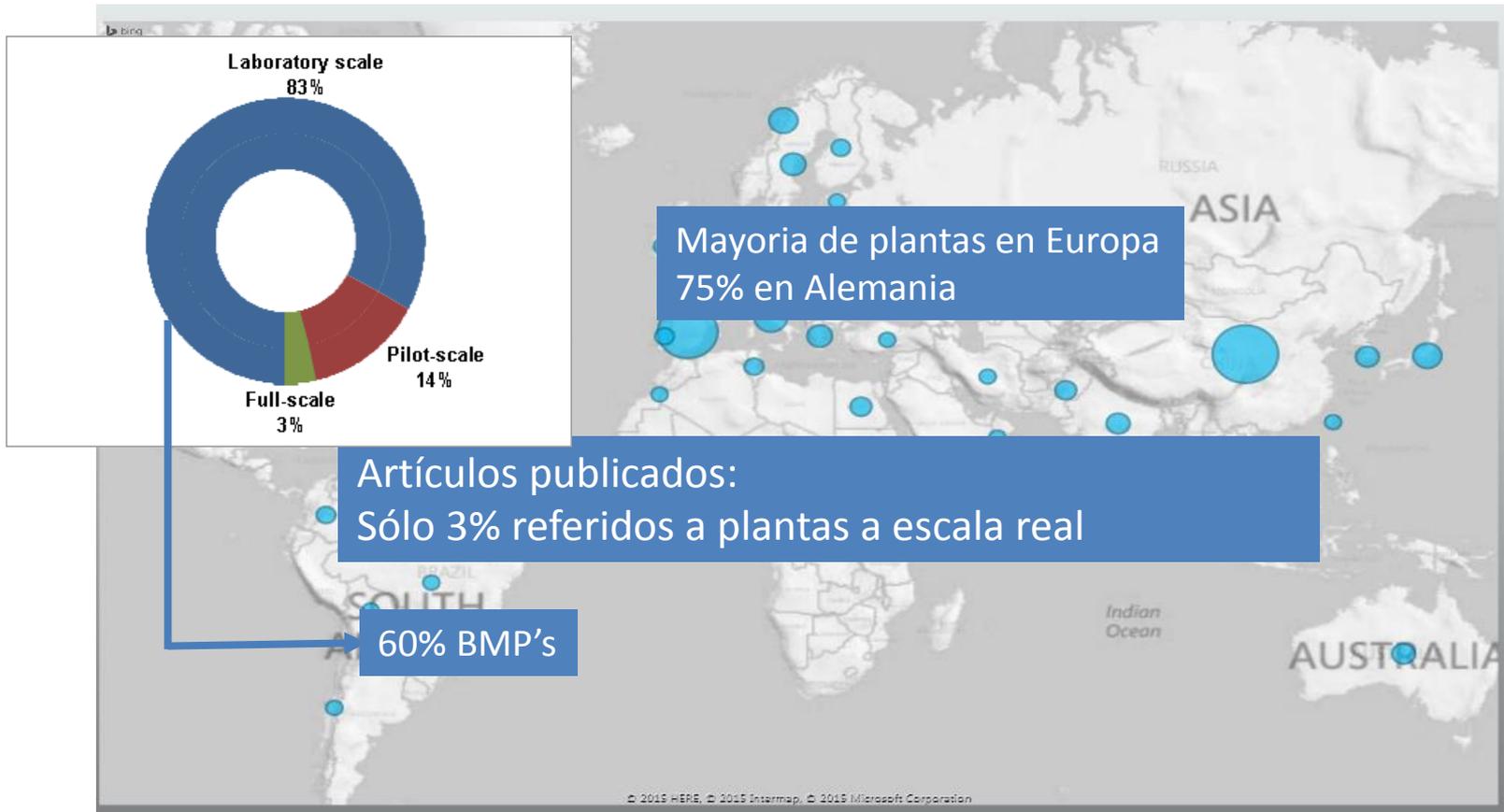
Evolución de los 1000 artículos



Evolución de los artículos



Pocos estudios de Plantas industriales de coDA



Principales sustratos

Ganaderos

Agro-industrial

FORSU

Lodos depuradora

Cultivos energéticos

Residuos industriales

Algas/Microalgas

Aspectos más estudiados

Temperatura

Relación C/N

Relaciones entre sustratos

Influencia contenido en lípidos

Influencia parámetros op. (temperatura, HRT)

Cambios de configuración

Tipo de inóculo

Objetivo principal

Incremento producción

Importante selección co-sustrato para:
Explotar sinergias
Mantener o aumentar la calidad del digestato

Contenido

- **Introducción**
- **Deyecciones como principal cosustrato**
 - Industrial / Res. Agrícolas (cultivos)
 - Pretratamientos
- **LD como principal cosustrato**
 - FORSU
 - FOG
 - GLICEROL
- **Dentro de la caja negra**
 - Dinámica microbiana
 - Modelado
- **Otras posibilidades para la coDA**
- **Conclusiones y perspectivas**

La coDA en la Agricultura e industria Agro-alimentaria



SHW $0.50\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{VS}^{-1}$
FW $0.35\text{--}0.50\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{VS}^{-1}$

Alcalinidad
Humedad
Nutrientes / micro

AD de estos residuos tiene un rendimiento bajo.

CM $0.20\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{VS}^{-1}$
PM $0.30\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{VS}^{-1}$

coDA ofrece una oportunidad con la ayuda de residuos agroindustriales para aumentar la eficacia del proceso (del 30 a más del 100%)

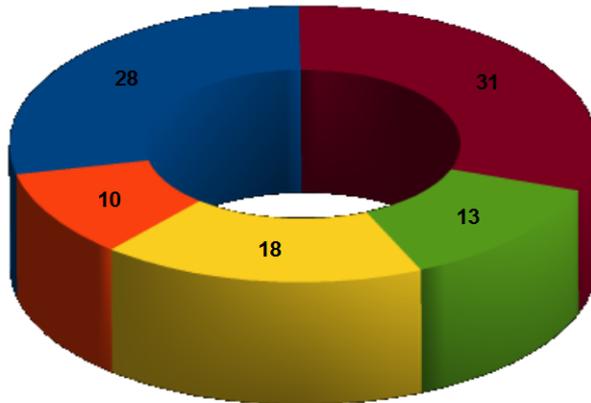
Emisiones GHG sector: 14,5% total



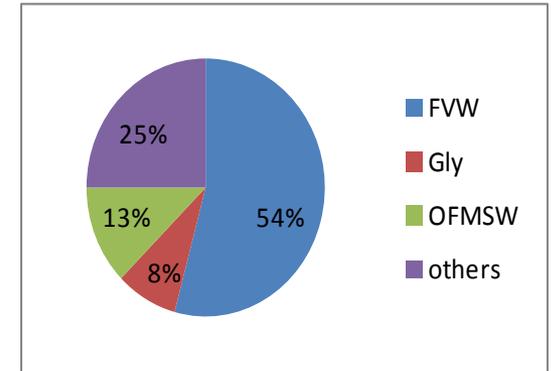
Área donde la coDA está más extendida (D)

Co-sustratos

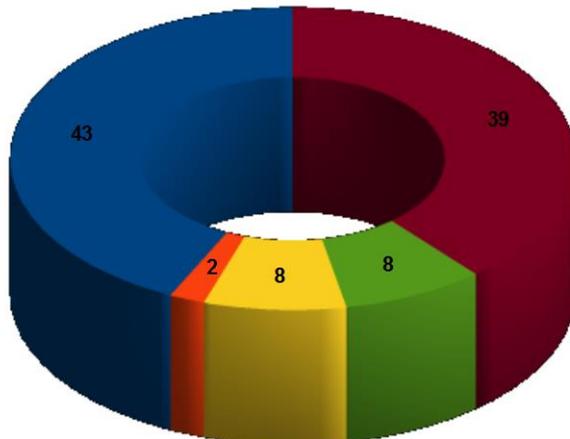
PM (%) - 2014 and 2015



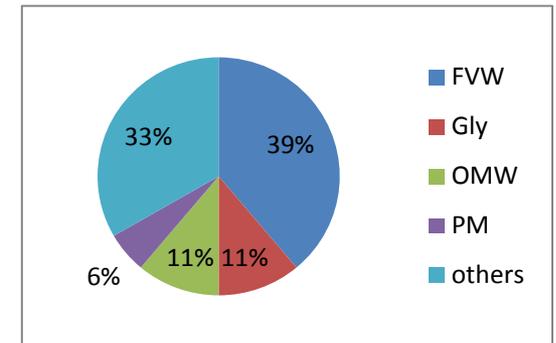
- Agro-Industrial
- OFMSW
- Industrial
- Others
- Energy Crops



CM (%) - 2014 and 2015



- Agro-Industrial
- OFMSW
- Industrial
- Others
- Energy Crops



Investigaciones y perspectivas en este sector

Temas más investigados dentro de este sector

- Reducción de la inhibición: Na^+ , K^+ , H_2S , NH_4^+ o polifenoles
- Estudios sobre estabilidad a altas cargas

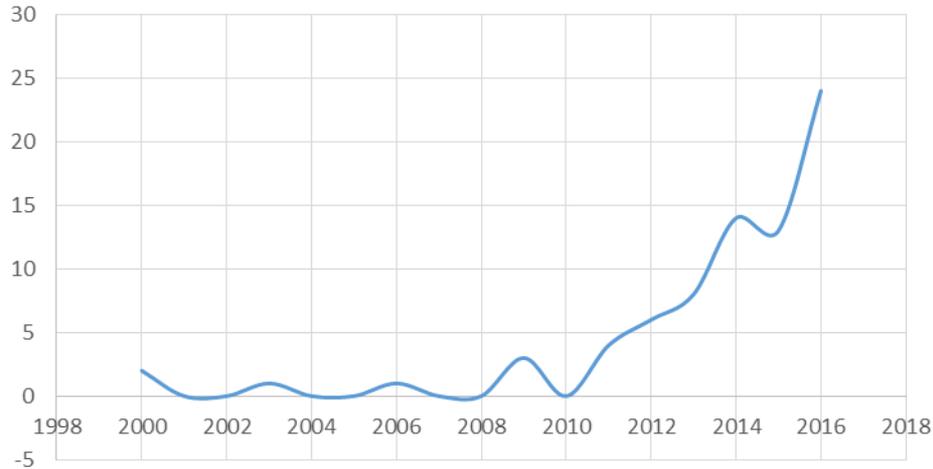
Como en muchos casos los sustratos fácilmente biodegradables no están disponibles, se precisa la búsqueda de sustratos adecuados más complejos



Uso de pretratamientos

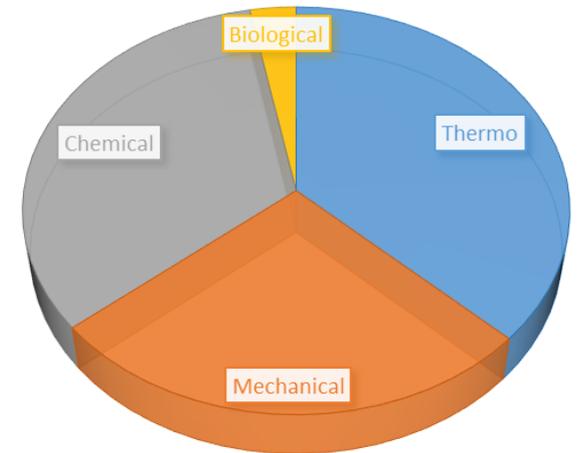
Pretratamientos

Artículos de coDA con pretratamiento



Muchos estudios están concentrados en residuos complejos, residuos vacunos, diversos tipos de pajas, algas, LD, etc.

- Gran disponibilidad de sustratos complejos tipo lignocelulósico
- Objetivo: Reducir las limitaciones impuestas por la etapa de hidrólisis

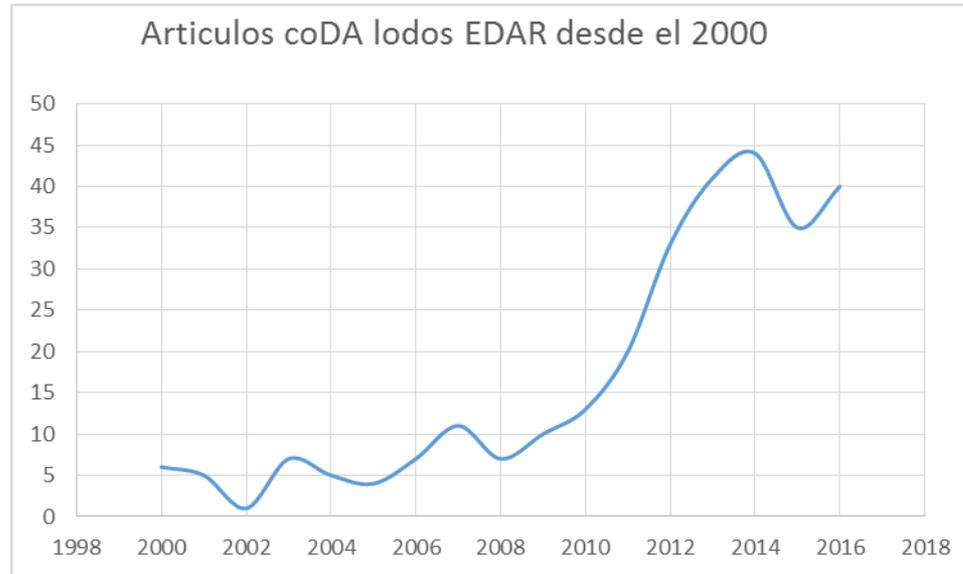




**Lodos de EDAR como
sustrato principal**

La coDA en la EDAR

Los LD son uno de los sustratos más estudiados (28 %)



Dificultad **búsqueda** cosustratos

Sistemas de los más utilizados industrialmente, No reportados

LD sustrato diluido

Sustrato universal

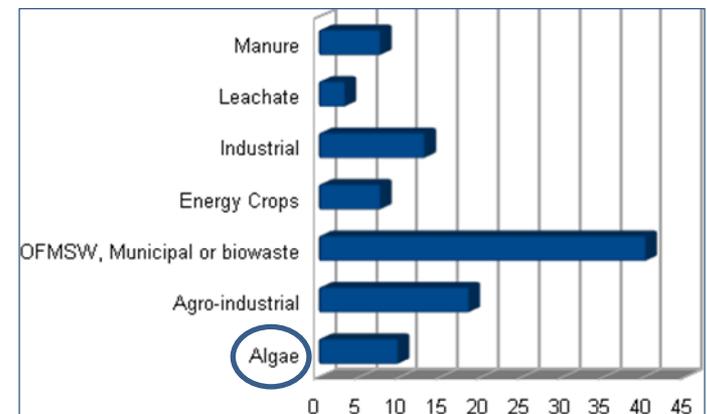
Rendimientos bajos, especialmente LS

Con coDA puede aumentar enormemente

FORSU/bioresiduo sigue siendo el más estudiado (contraste aplicación)

El segundo co-sustrato

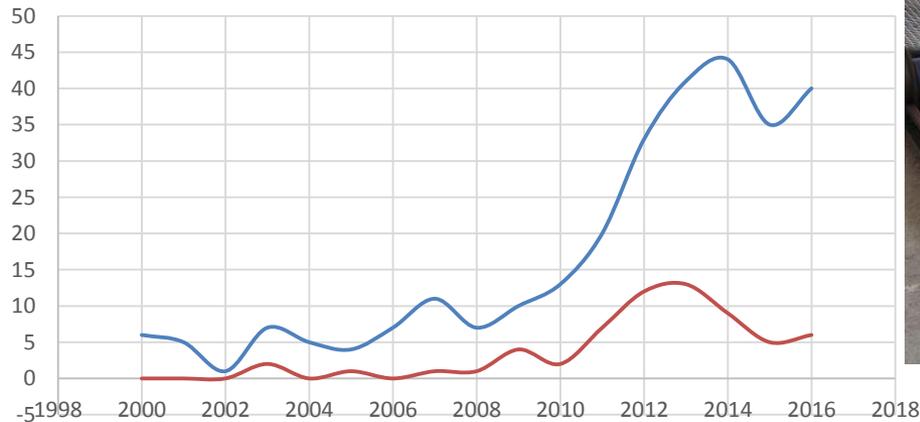
Número de artículos entre 2013 y 2015



La coDA en la EDAR

FOG es un cosustrato interesante pero muy problemático

Artículos coDA lodos EDAR desde el 2000
Paralelismo con FOG



(0.7 – 1.0 L CH₄/g VS)



- Inhibición por LCFA
- Baja solubilidad de los aceites y grasas
- Flotación de los lodos
- Atascos en los sistema de gas y líquido
- Problemas de espumas

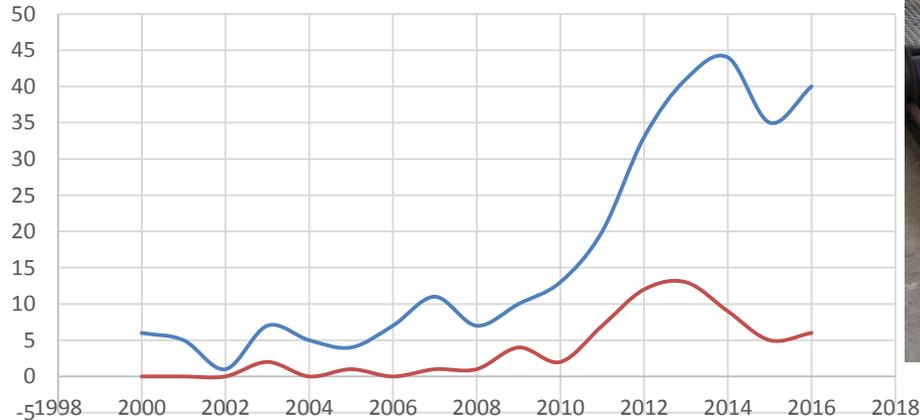
La adaptación de la biomasa
es clave

La coDA lodos EDAR-FOG

Es uno de los co-sustrato más estudiados (28 %)

FOG (grasas y aceites) es un cosustrato interesante pero muy problemático

Artículos coDA lodos EDAR desde el 2000
Paralelismo con FOG



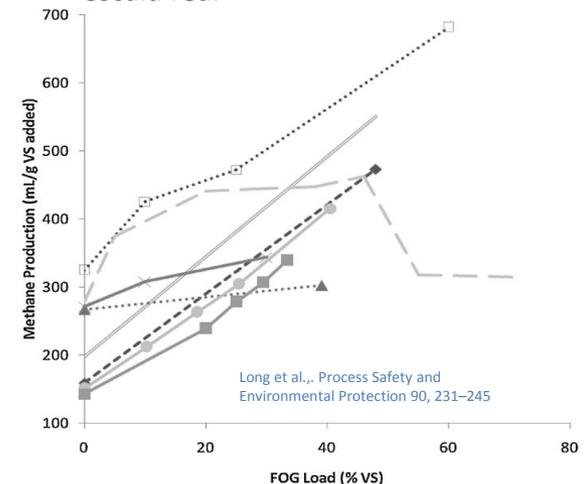
(0.7 – 1.0 L CH₄/g VS)



Se necesita más investigación para aclarar la influencia sobre la **producción de biogás** y la **deshidratabilidad** de factores tales como:

- Carga de FOG
- Configuración del reactor
- Intensidad del meclado

Resultados experimentales en lab., piloto y escala real



La coDA lodos EDAR-FORSU

Primera experiencia publicada en 1988, en un estudio a nivel de planta piloto en Treviso (Cecchi et al, 1988)

Objetivo de la coDA: Aumento de los rendimientos del digestor y de la venta de electricidad.



La inhibición por Na^+ (FW) y por NH_4^+ (LD) disminuye y la mezcla produce más biogas: $(1+1>2)$ (Dai et al. 2013)

La coDA Lodos EDAR (LD) – FORSU no ha sido demasiado reportada en la literatura

La planta de Treviso

El estudio prosiguió hasta la implementación en la planta industrial

(Cecchi et al., 1994; Pavan et al. 1998, 2000)



70.000 EI

Cofiguración EDAR: Johannesburg

Caudal AR: 24000 m³/d

Entrada FORSU-SO: 20 t/d



La coDA lodos EDAR-FORSU



Razon FD/FORSU (SV): 40/60
OLR aplicada: 0.78 kg SV/m³.d



La producción de biogás se incrementó en un factor de 3,4

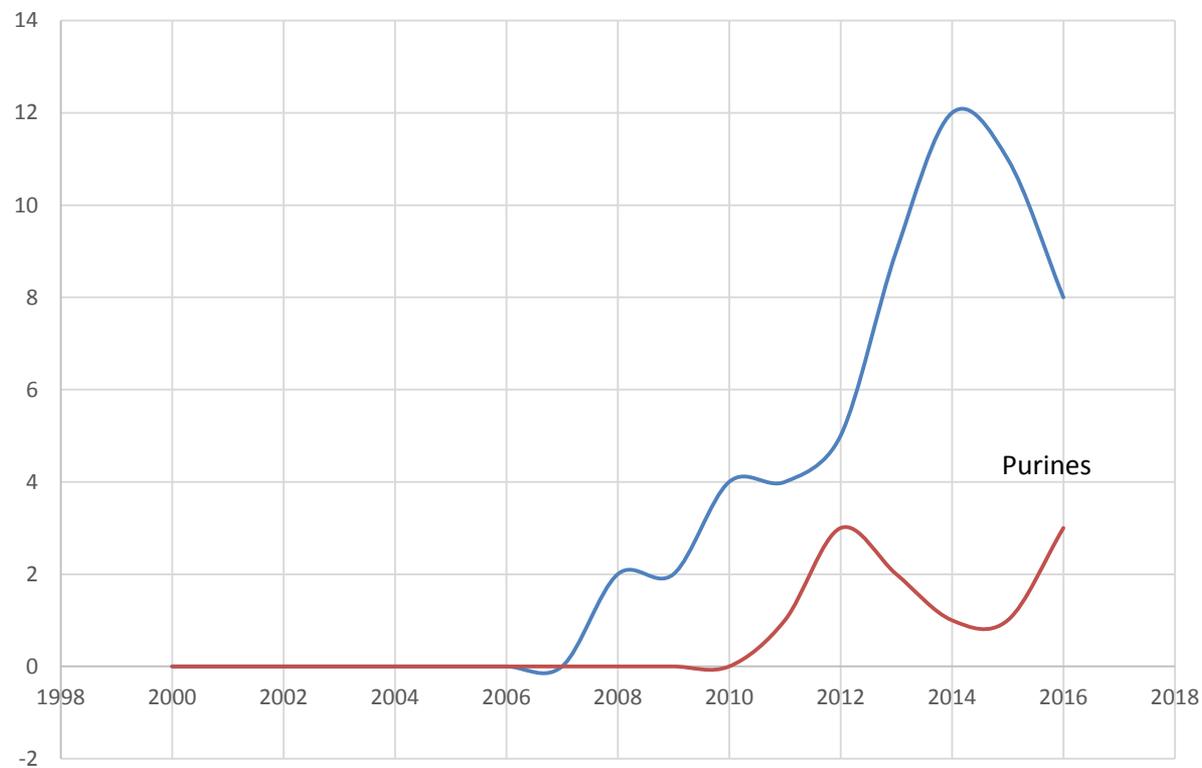
Parameter	Sludge only	Co-digestion
HRT, d	37.2	35.6
OLR, kgTVS/m ³ d	0.53	0.78
TS, g/Kg	36.0	41.0
TVS, %TS	62	67
GPR, m ³ /m ³ d	0.10	0.34
SGP, m ³ /kgTVS	0.13	0.43
pH	6.90	7.2
TA(4), mgCaCO ₃ /l	1865	3058

La coDA lodos EDAR-FORSU

Full scale results Meso vs. Thermo	Full scale mesophilic	Full scale thermophilic
OLR, kgTVS/m³d	1,62	1,28
SGP, m³/kgTVSa	0,35	0,55
GPR, m³/m³d	0,56	0,70
pH	7,2	7,6
TA(pH 6), mgCaCO₃/l	1073	1444
VFA, mgCOD/l	270,1	267,8
NH₃, gN/l	0,42	0,69

CODIGESTION LODOS DE DEPURADORA - GLICEROL

Articulos coDA Glicerol y otros

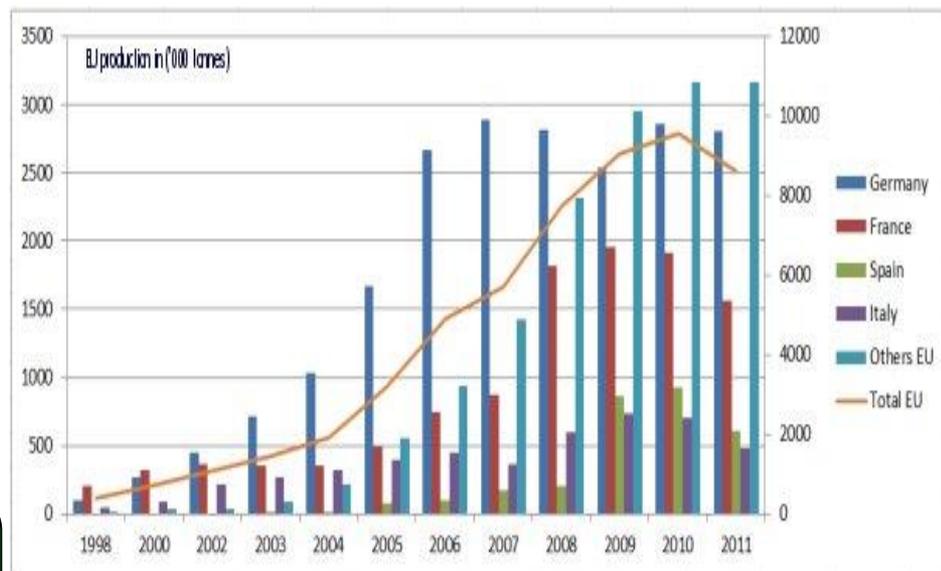
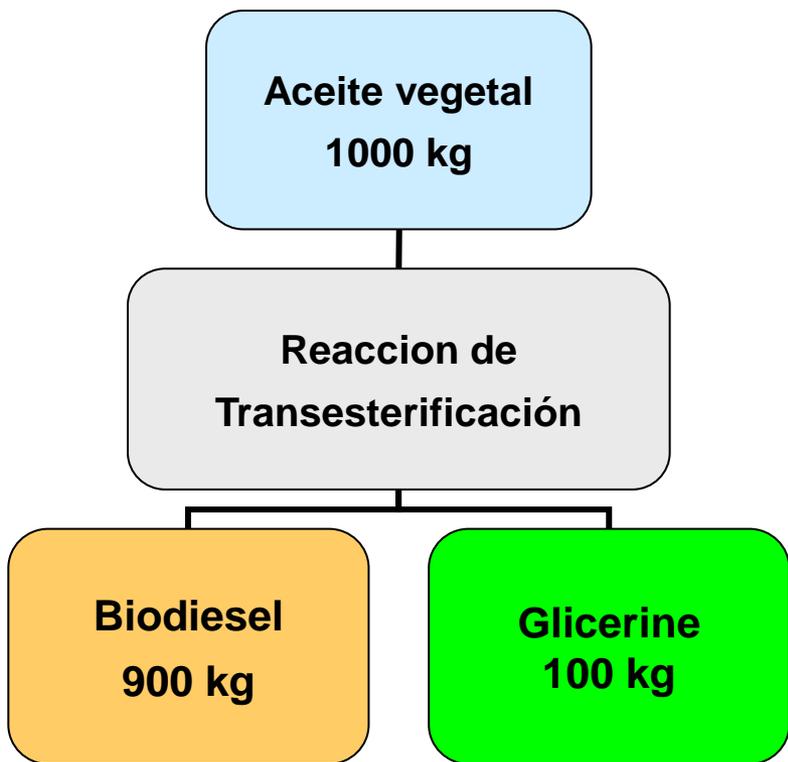


coDA Gly-LD

PRODUCCIÓN DE GLICEROL EN LA UE

EU-25 {

- 120 biodiesel plants
- Casi 10 millones de t producidas
- Capacidad de producción: 21 millones t



Eurostat, 2012

Últimos años (Mt)

2011	6.612
2012	8.900
2013	9.187

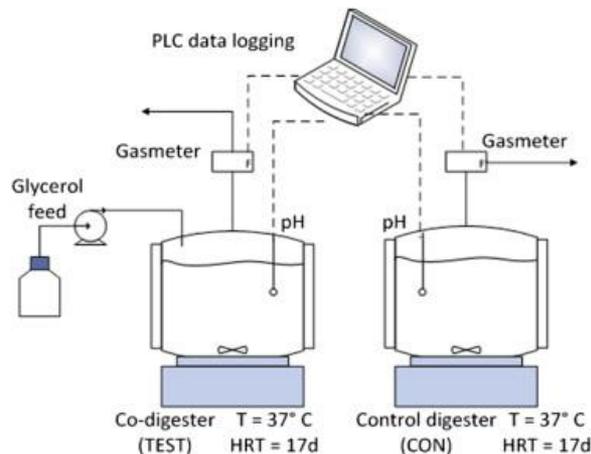
Estudio completo coDA LD-Gli

Jensen et al., 2014

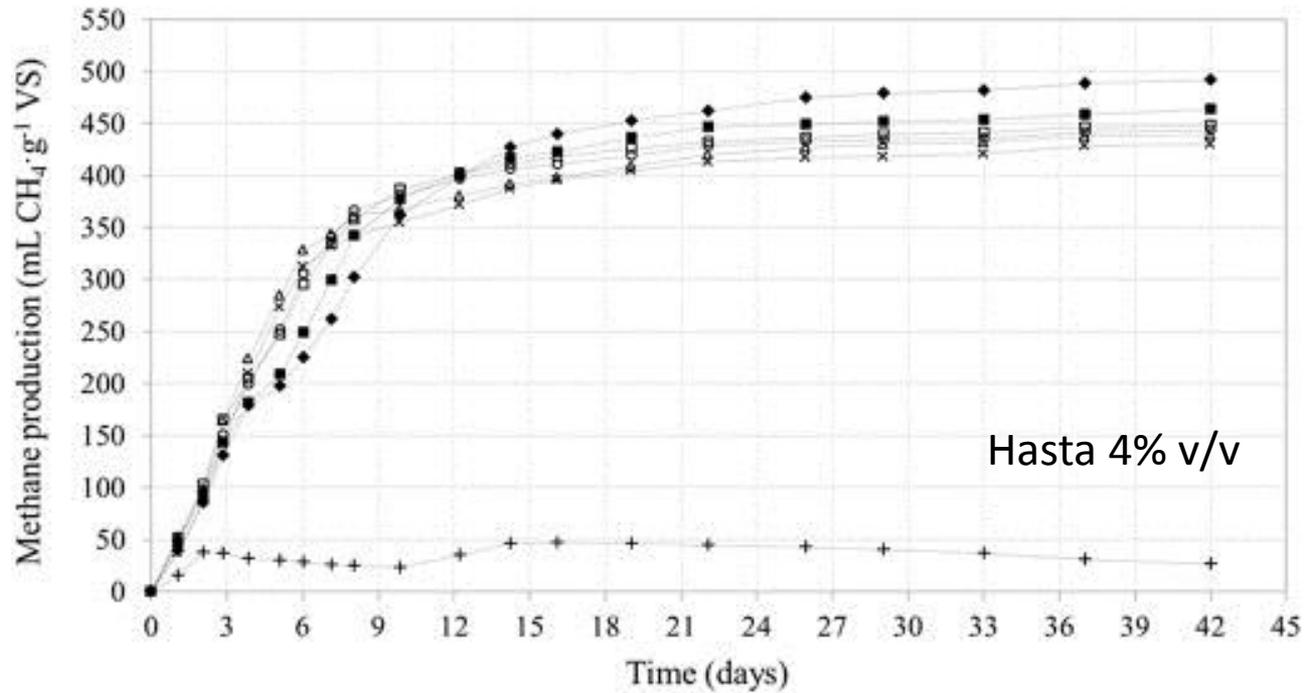
Estudio en discontinuo

Estudio en continuo

- Productividad
- Cinética/Simulación
- Calidad digestado
- Dinámica microbiana



Batch test mezclas LODOS-GLI

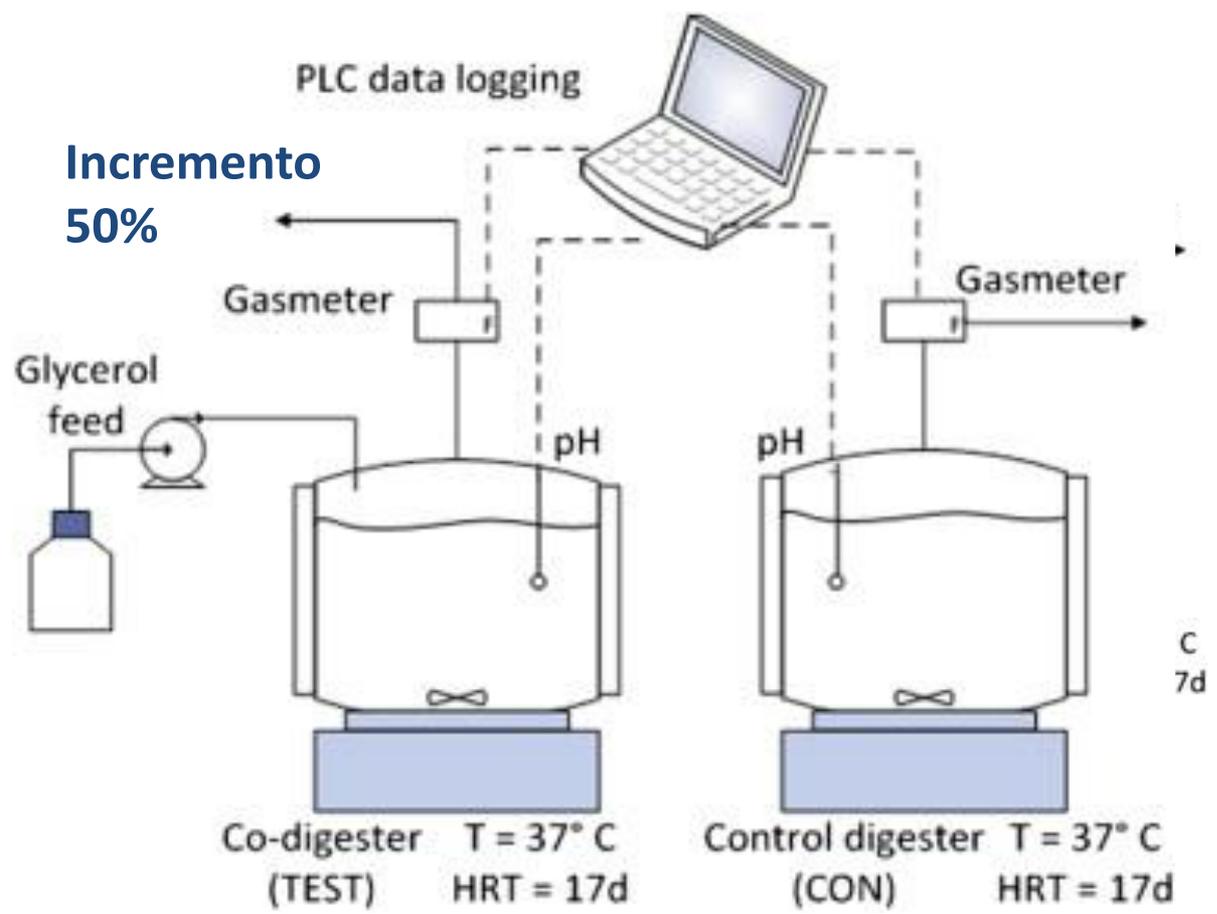


Cumulative methane production in the course of time for sewage sludge (x), glycerol (+) and each mixture: 0.25% GLY1 (△), 0.5% (○), 1% (□), 2% (■) and 4% (◆).

Potencial Glicerol
 370 mL CH₄/gVS a
 483 mL CH₄/gVS

Operación durante 200 días

Caudal 2% v/v
 OLR: 70%

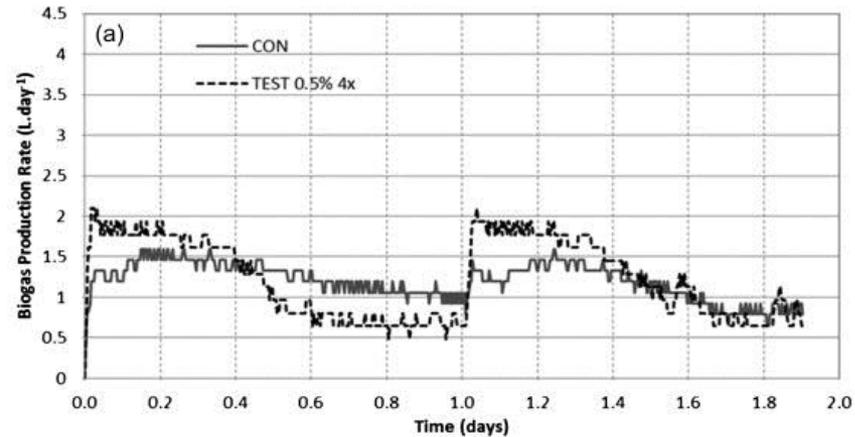


Respuesta 24h tras alimentación GLI

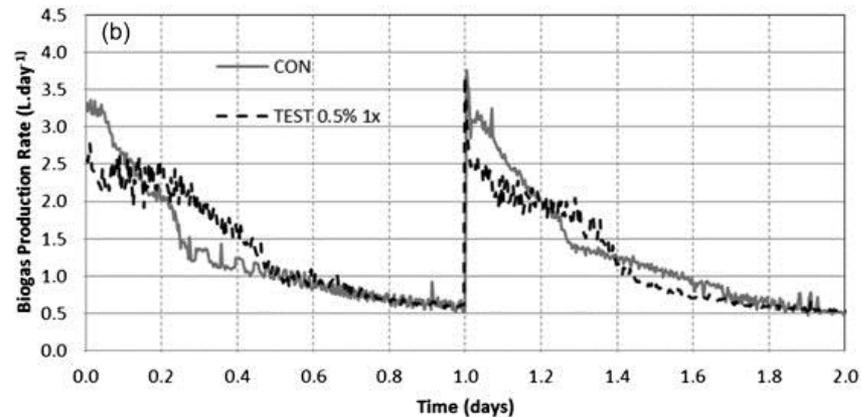
La **dosificación** se debe regular para :

- Impedir la **inhibición**
- Asegurar una suficiente **biodegradación** para
 - aumentar la producción
 - producir un producto estable.

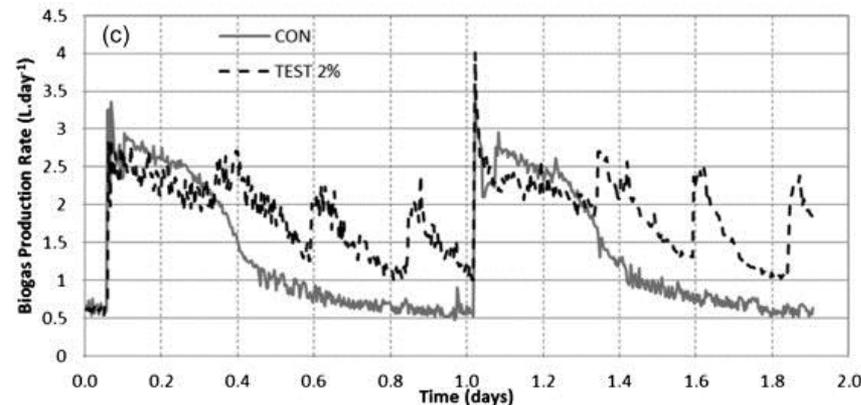
Control automático
opción necesaria para
un máximo rendimiento
de la coDA



0,12%
1 x dia



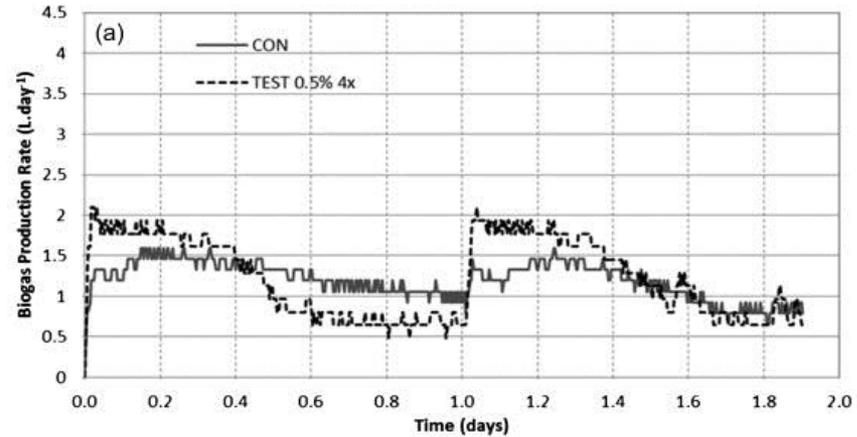
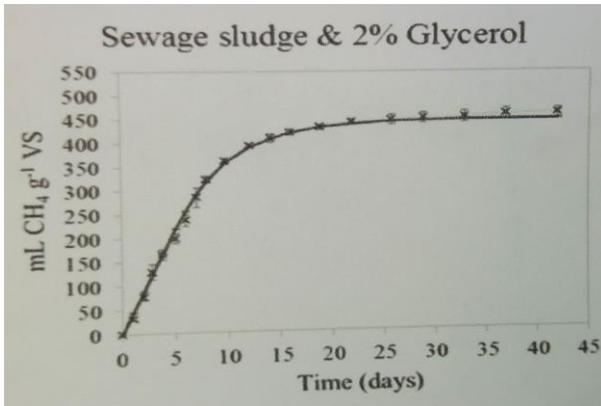
0,5%
1 x dia



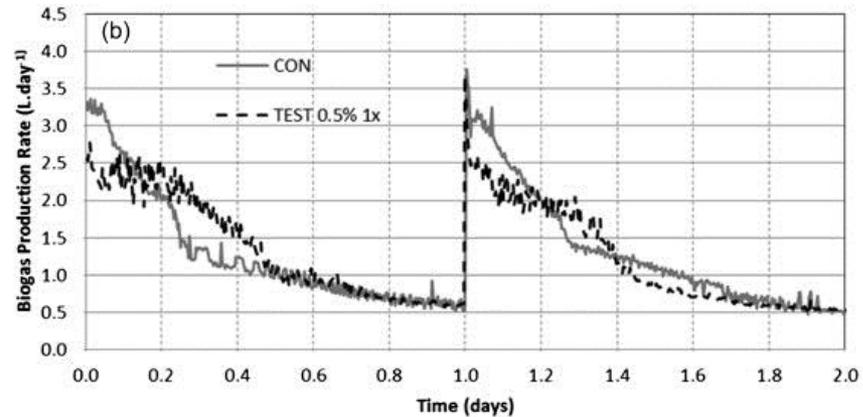
0,5%
4 x dia

La deshidratabilidad no varió, oscilando entre el 22-24%

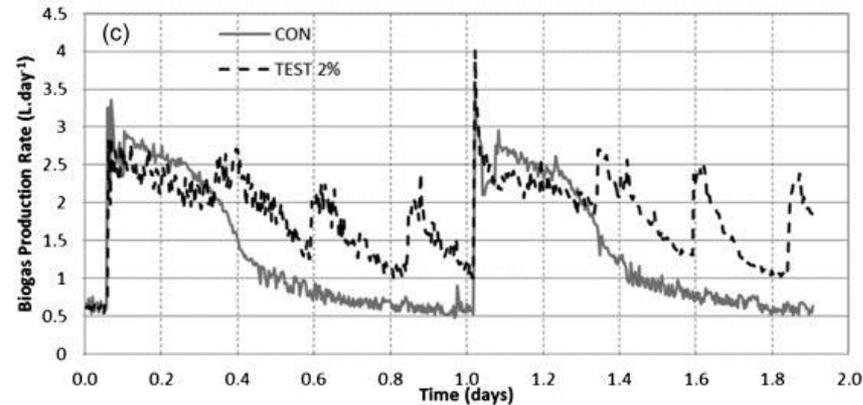
La inhibición se produce más por un aumento súbito de la OLR que por toxicidad



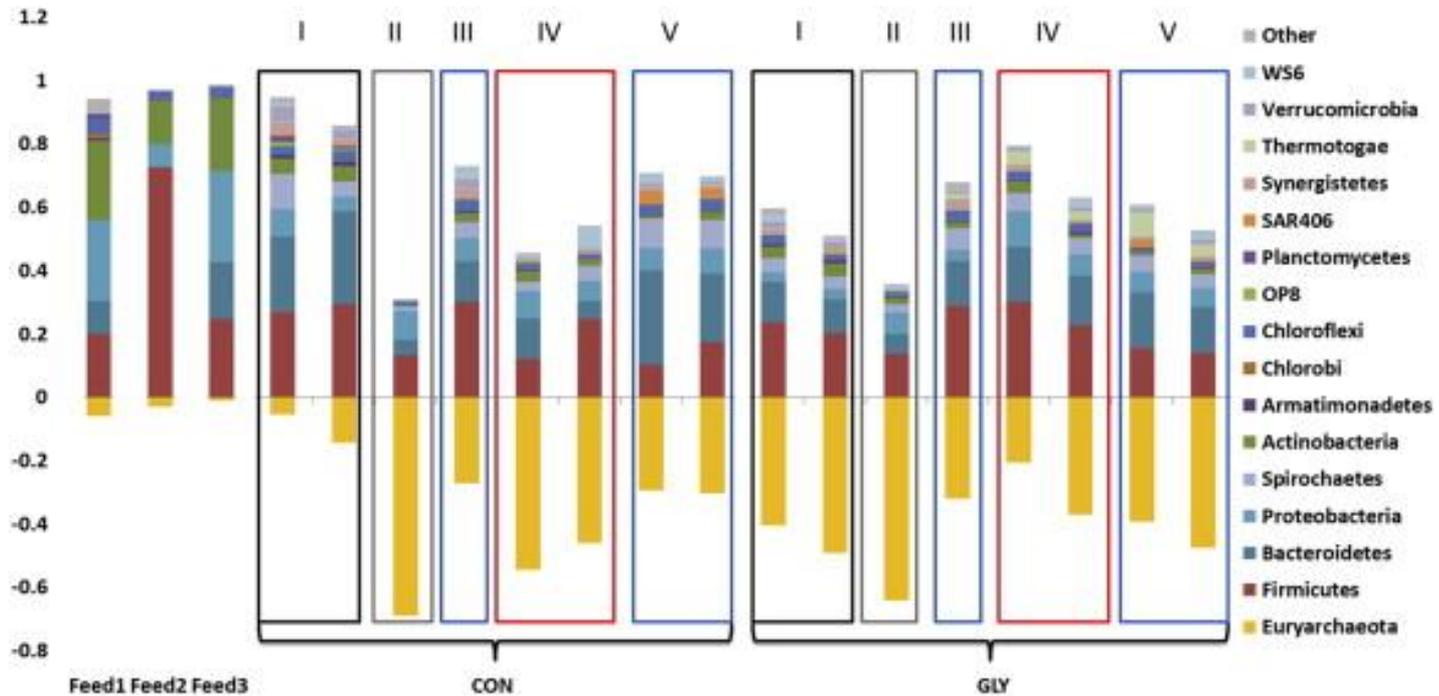
0,12%
1 x dia



0,5%
1 x dia



0,5%
4 x dia



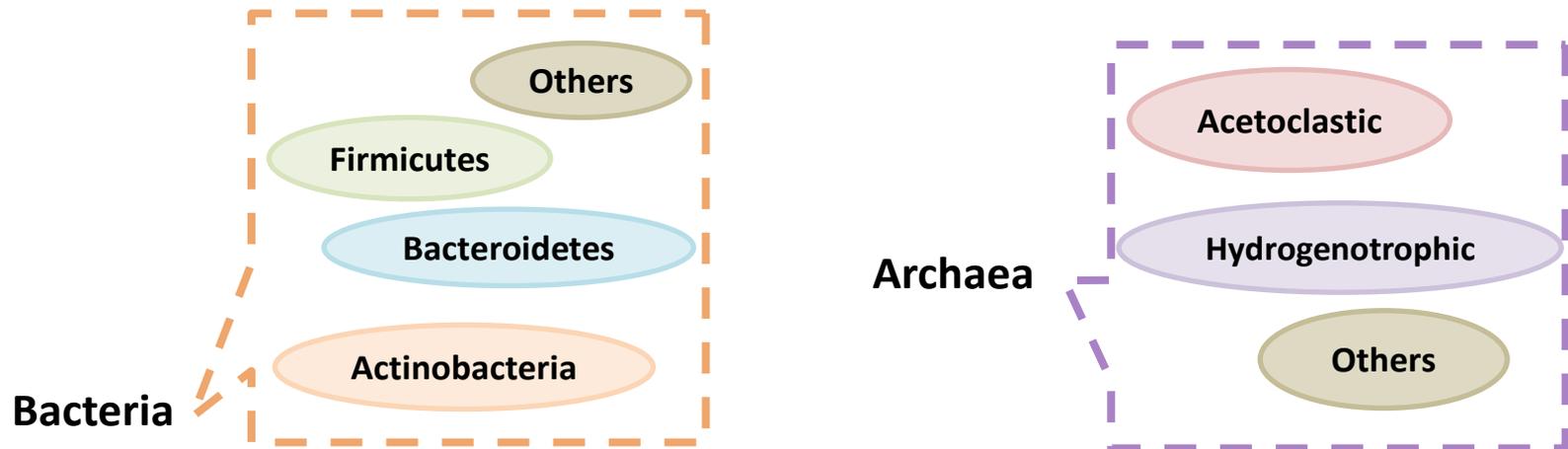
Abundancia relativa de grupos microbianos clave:
Bacterias parte inferior eje y
Archaea parte superior eje y

Contenido

- **Introducción**
- **Deyecciones como principal cosustrato**
 - Industrial / Res. Agrícolas (cultivos)
 - Pretratamientos
- **LD como principal cosustrato**
 - FORSU
 - FOG
 - GLICEROL
- **Dentro de la caja negra**
 - Dinámica microbiana
 - Modelado
- **Otras posibilidades para la coDA**
- **Conclusiones y perspectivas**

Dinámica microbiana en la coDA

El desarrollo de técnicas moleculares a (FISH, PCR, DGGE, T-RFLP, ...) estimulado el estudio de la dinámica microbiana

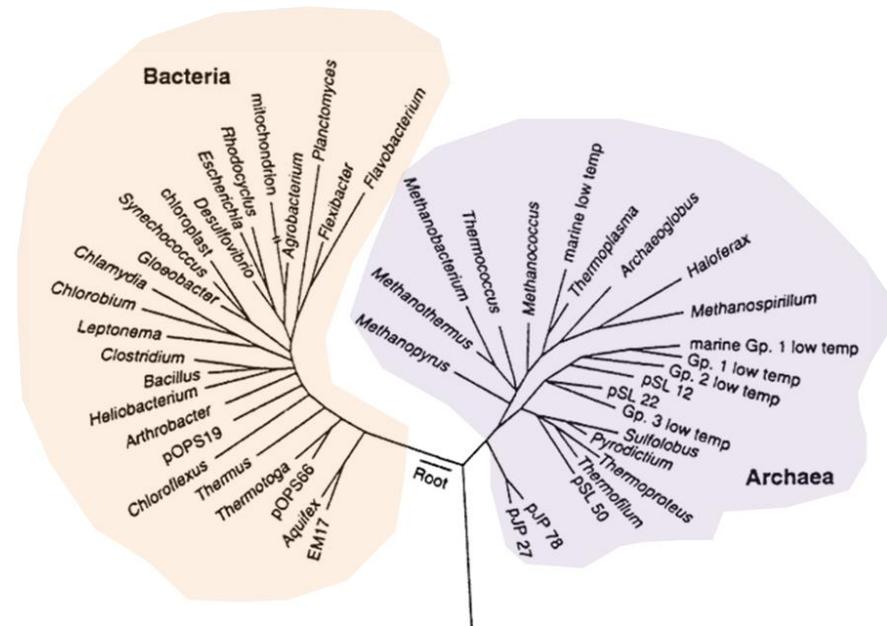


Tanto en la DA como en la coDA hay más conocimiento de la comunidad de bacterias que de la de archaea.

Dinámica microbiana en la coDA

En los artículos observados

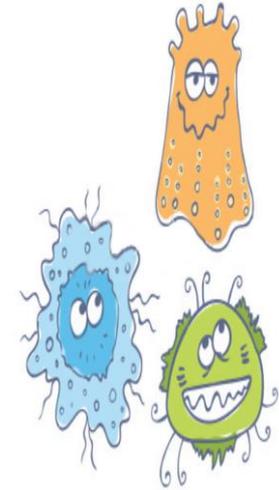
- Correlacionar la comunidad microbiana con:
 - Condiciones de operación (ORL, Temperatura, pH, AGV)
 - Composición del alimento
- Identificar la interacción entre bacterias y archaea.
- Búsqueda de nuevas especies bacterianas



Dinámica microbiana en la coDA

Algunos hechos observados

- La dinámica de los metanógenos está mas afectada por la **concentración de AGV y de NH_4^+** que por la adición de co-substrato.
- La población **bacteriana** parece más afectada que la **metanogénica** por la adición de un cosustrato.
- La diversificación de sustratos da lugar a una comunidad microbiana **más versátil y robusta**.

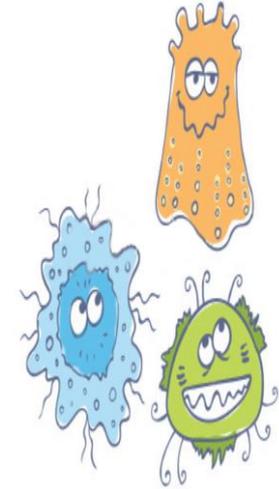


Gomez-Romero, J. et al., 2014
Owamah, HI et al., 2014
Jang, HM et al., 2015
Di Maria, F. y Baratta, M. 2015
Tomazetto, G et al.m 2014

Dinámica microbiana en la coDA

Como contrapunto:

- Sundberg et al. (2013) evaluando 14 plantas industriales de coDA encontraron que en algunas había **decrecido la diversidad** en comparación con la monodigestión de LD.
- Jensen et al. (2014) sobre coDA LD-Gli, encontraron un pequeño descenso (2%) de la riqueza microbiana que no se tradujo en síntomas de inestabilidad (AGV, PG menor, etc.)



Se require en todo caso más información

Contenido

- **Introducción**
- **Deyecciones como principal cosustrato**
 - Industrial / Res. Agrícolas (cultivos)
 - Pretratamientos
- **LD como principal cosustrato**
 - FORSU
 - FOG
 - GLICEROL
- **Dentro de la caja negra**
 - Dinámica microbiana
 - Modelado
- **Otras posibilidades para la coDA**
- **Conclusiones y perspectivas**

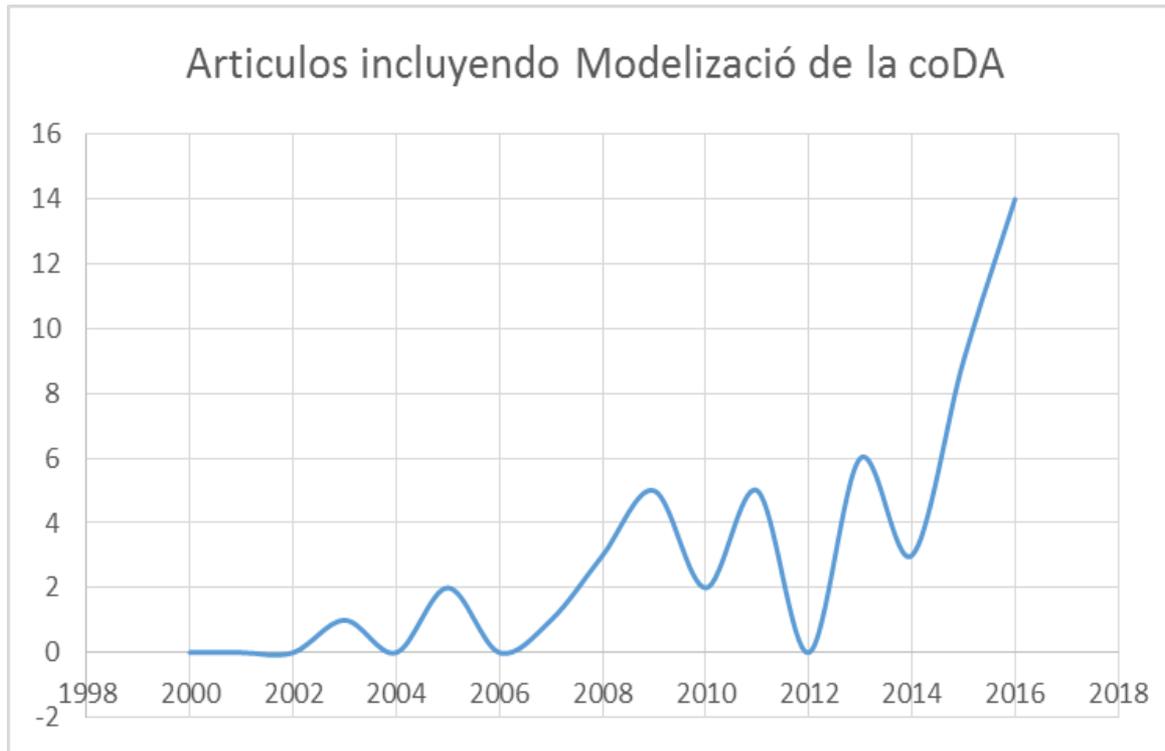
Entendiendo los procesos de coDA

La operación estable de la codigestión, junto con un rendimiento máximo no es simple y requiere un amplio conocimiento de la interconexión de las reacciones bioquímicas involucradas en la conversión de los sustratos.

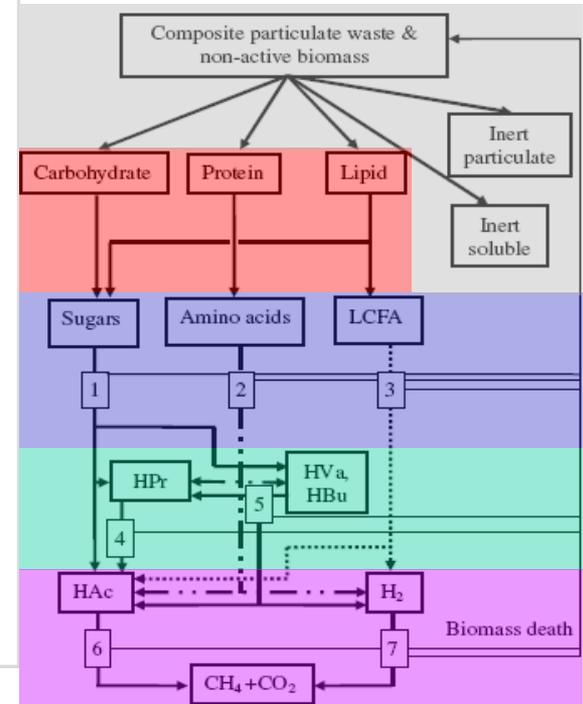
MODELIZACIÓN

- **Predecir** los cambios que se producen en el comportamiento del digestor al añadir un cosustrato
- **Evitar las sobrecargas.** (estimar el máximo % de cosustrato en la mezcla alimento)
- **Optimizar** la mezcla entre los sustratos
- **Ahorrar tiempo y dinero** en los experimentos de laboratorio, planta piloto y en algunos casos de pruebas a nivel planta industrial.

La modelización de la coDA



El modelo más utilizado desde 2002 es el ADM1



Desintegración
 Hidrólisis
 Acidogénesis
 Acetogenesis
 Metnogenesis

La modelización de la coDA

El modelo ADM1

Problema: **Calibración** de un gran número de parámetros no es práctico.

Utilizar los parámetros por defecto.

Algunos parámetros, cinéticos concentraciones iniciales y distribución, fraccionamiento (soluble/particulado) son críticos e influyen los resultados sustancialmente

Otros modelos

Difieren entre si (objetivos, nivel complejidad).
Limitada aplicabilidad.

Contenido

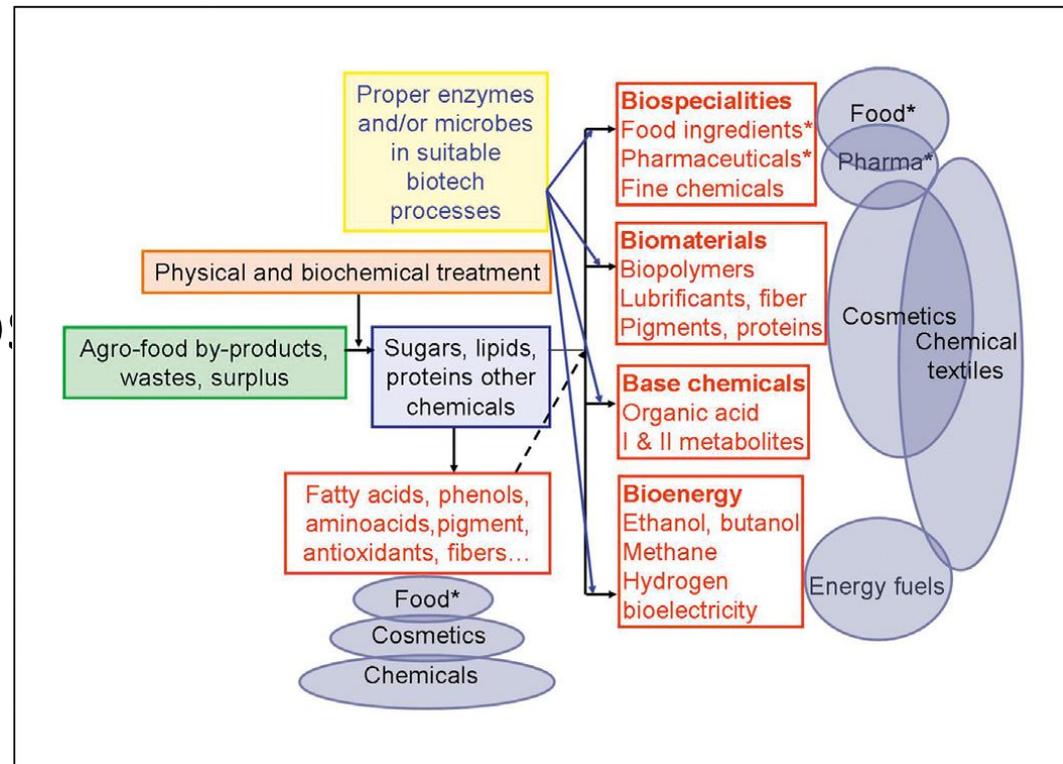
- **Introducción**
- **Deyecciones como principal cosustrato**
 - Industrial / Res. Agrícolas (cultivos)
 - Pretratamientos
- **LD como principal cosustrato**
 - FORSU
 - FOG
 - GLICEROL
- **Dentro de la caja negra**
 - Dinámica microbiana
 - Modelado
- **Otras posibilidades para la coDA**
- **Conclusiones y perspectivas**

Aspectos poco investigados

- Estabilidad y calidad del digestado (pieza importante para la planta): **Pral. Producto**
- Calidad del sobrenadante (ojo recirculaciones)
- Deshidratabilidad
- Diversidad microbiana -> robustez sistema microbiano
- La integración que supone la coDA favorece la economía de escala y el concepto de Biorefinería

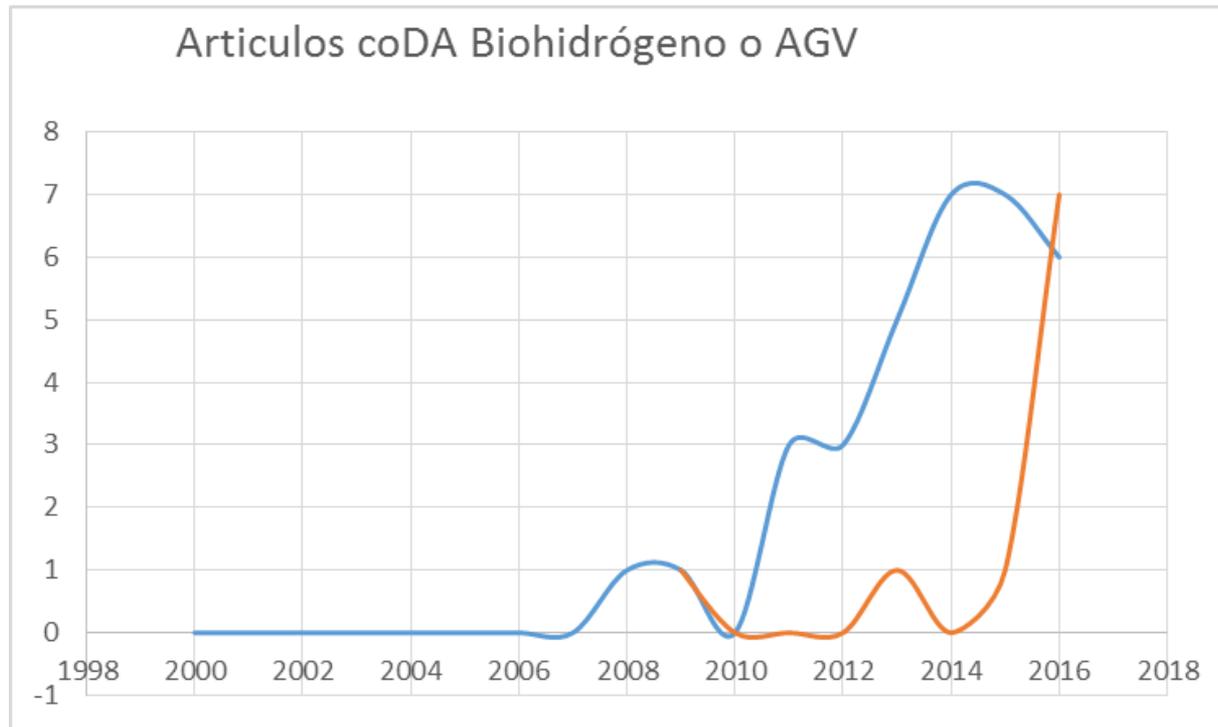
CoDA: En la biorefinería

- Importancia creciente recuperación de recursos de los residuos (economía circular)
- coAD tiene que contribuir a la viabilidad de los proyectos
- coF en cabeza y coAD en cola
- VFA como punto partida.



Posibles tendencias

La integración que supone la coDA favorece la economía de escala y el concepto de Biorefinería.



Contenido

- **Introducción**
- **Deyecciones como principal cosustrato**
 - Industrial / Res. Agrícolas (cultivos)
 - Pretratamientos
- **LD como principal cosustrato**
 - FORSU
 - FOG
 - GLICEROL
- **Dentro de la caja negra**
 - Dinámica microbiana
 - Modelado
- **Otras posibilidades para la coDA**
- **Conclusiones y perspectivas**

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS (1 de 3)

- La coDA es una opción muy **atractiva** tanto desde el punto **medioambiental** como **económico**, pero debe ser estudiada adecuadamente.
- Hasta la fecha se han publicado cerca de 1000 artículos sobre coDA, con más del 80% realizados a **escala de laboratorio** (60% BMP)
- Los **residuos ganaderos**, seguidos por los **LD** son los sustratos más utilizados para la coDA (necesidad aumento producción biogas)
- Los principales **cosustratos** son residuos **agroindustriales**, elegidos por su **disponibilidad, características y proximidad**
- Los **fácilmente biodegradables** son cada día más limitados. Los más complejos se deben **pretratar** por lo que hay que mejorar esta opción.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS (2 de 3)

- Se precisa más **investigación** para conocer los efectos de la adición de cosustratos en cuanto a **cinética y estabilidad del proceso**.
- La modelización es una **herramienta muy poderosa** y es preciso trabajar más en esta área par simplificar su aplicación. El modelo **ADM1**, pese a su complejidad, parece **el más adecuado para predecir las interacciones** que ocurren en la coDA
- Se precisan mas datos de **investigaciones orientadas** que puedan conducir a una mejora de la **modelización**, en particular aquellos aspectos relacionados con posibles **sinergias e inhibiciones**

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS (3 de 3)

- La **codigestion de LD y FOG** es una opción interesante por su alto BMP y otros factores de coste. Se necesitan, sin embargo, **más datos** que aporten luz sobre la identificación de las **condiciones óptimas del digestor** (carga, flujo, cantidad de cosustrato, etc.) y sobre la reducción de la **inhibición por LCFA**, por ejemplo, con pretratamientos o con la introducción de co-sustratos sobre los que se pueda adsorber los LCFA.
- En las investigaciones sobre la coDA se precisa desarrollar más información de los **efectos sobre los digestados** (calidad y características) ya que son muy **importantes en su aplicación práctica**
- El **cotratamiento** es una opción fundamental para la obtención de **AGV, como producto clave** en la **biorefinería**, siguiendo las tendencias que marcan las estrategias de la economía circular (energía-> materiales)

MUCHAS GRACIAS

jmata@ub.edu