

DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS ANAEROBIOS

2024



1

- Martes y jueves de 18 a 21 hs
 - Docentes:
 - Liliana Borzacconi (lilianab@fing.edu.uy)
 - Iván López (ivanl@fing.edu.uy)
 - Mauricio Passeggi (passeggi@fing.edu.uy)
 - Elena Castelló (elenacas@fing.edu.uy)
 - Cecilia Callejas (ceciliac@fing.edu.uy)
 - Plataforma EVA: <http://eva.fing.edu.uy>
 - / ► Postgrados / ► Posgrados de Maestría y Doctorado de Ingeniería Química / ► DOSA. Diseño y Operación de Sistemas Anaerobios
- Clave de Matriculación: DOSA

2

- El control de la contaminación ambiental y el uso de los recursos energéticos generan grandes desafíos para el desarrollo de la humanidad.
- La biotecnología, y en particular la biotecnología anaerobia, aparece como una alternativa sostenible que combina el tratamiento de residuos (u otros sustratos) con su valorización en la forma de otros productos y de energía renovable.

3

Desarrollo Sostenible

- El proceso de mejoramiento sostenido y equitativo de la calidad de vida de las personas, fundado en medidas apropiadas de conservación y protección del medio ambiente, de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras.

4



5

La tecnología anaerobia en el contexto de la Economía Circular

Crecimiento de la población
Urbanización

Escasez de materias primas
Energía, recursos renovables

Cambio climático
y preservación de ecosistemas

6

Economía Lineal
MATERIA PRIMA → PRODUCIR → CONSUMIR → DESECHAR → DESECHO

Economía Circular
MATERIA PRIMA → PRODUCIR → CONSUMIR Y USAR → RECYCLAR → DESECHO

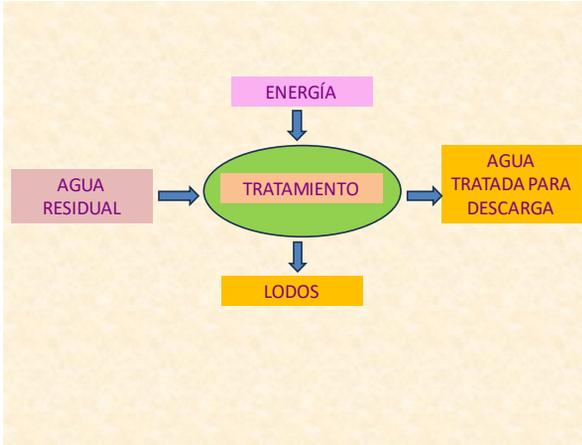
Una economía circular es restaurativa y regenerativa a propósito, y que trata de que los productos, componentes y materias mantengan su utilidad y valor máximos en todo momento, distinguiendo entre ciclos técnicos y biológicos.

7

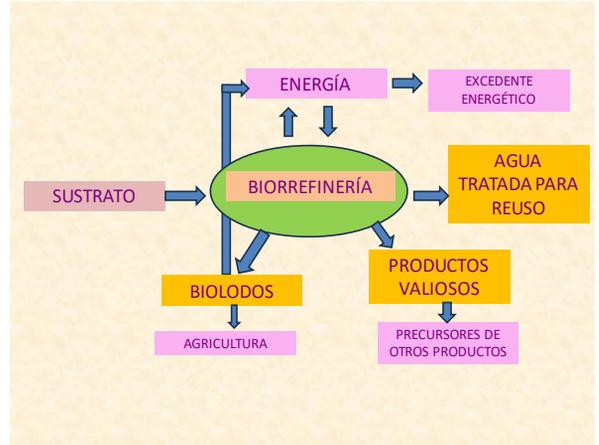
• Desde el punto de vista de la Ingeniería de Procesos surge también el concepto de **BIORREFINERÍA**

The diagram illustrates a biorefinery process flow. It starts with 'LA BIOMASA' (raw biomass) which is processed into 'BIOPROCESOS' (bioprocesses). The main cycle is labeled 'BIOFACTORIA' and '100%' 'de las aguas servidas son descontaminadas por Aguas Residuales, transformando los residuos en energía'. The process includes steps like 'PROCESOS', 'BIOPROCESOS', 'AGUA LIMPIA', and 'BIODIESEL'. A legend at the bottom lists 'BIODIESEL' components: metano, hidrógeno, metanol, and agua.

8



9



10



11



12

Tecnologías para la transformación de biomasa en energía

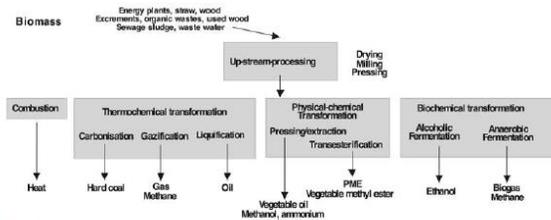


Figure 2.2 Applied technologies to transform biomass^[1] into secondary energy sources.

BioGas from Waste and Renewable Resources. An Introduction.
Dieter Deublein and Angelika Steinhauser
Copyright © 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
ISBN: 978-3-527-31841-4

13

Energy source	Energy balance Output/ Input [MJ/MJ]	Remarks
Rape oil	5.7	Energy recovery of the colza cake and green waste included
Ethanol	2.7	From wheat
Ethanol	1.6	From sugar beet
Ethanol	5.0	From sorghum
Electricity and heat	8.5	Energy recovery of the bagasse included
Electricity and heat	19.7	Combustion of the whole plant From cereals
Electricity and heat	14.2	Combustion of miscanthus plants (not dried)
Electricity and heat	20.4	Combustion of residual straw
Electricity and heat	19.0	Combustion of forest residual wood
Biogas	28.8	From excrement (CHP cycle)

BioGas from Waste and Renewable Resources. An Introduction.
Dieter Deublein and Angelika Steinhauser
Copyright © 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
ISBN: 978-3-527-31841-4

14

La digestión anaerobia es tan vieja como el mundo: es un proceso natural que involucra microorganismos de tipo *Bacteria* y de tipo *Archaea*, trabajando en conjunto para convertir las sustancias orgánicas en una gran variedad de intermediarios y finalmente en gas metano y anhídrido carbónico.

15

Algo de historia...

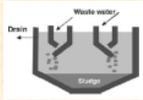
- Experimentos de van Leeuwenhoek en 1680, observa "very little animalcules"
- Volta que en 1776 descubrió un "aire combustible" que se formaba en los sedimentos de lagos, etc.
- En 1856 Reiset estudió el metano que se liberaba de pilas de estiércol.
- La primera aplicación a gran escala fue en aguas residuales en lo que se conoce como tanque séptico: "Mouras Automatic Scavenger" (1881), aunque la invención databa de veinte años atrás.
- Alrededor de 1890 W.D.Scott construye una especie de reactor híbrido entre un tanque digestor y un filtro anaerobio.



FIGURE 1.1. Diagram illustrating Leeuwenhoek's pepper tube experiment. (From Leeuwenhoek's letter no. 32 to the Royal Society of London, June 14, 1683.)

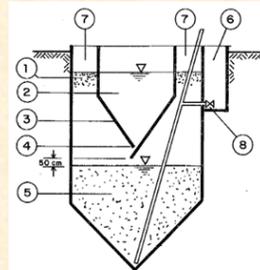
16

- Alrededor de 1880 en Massachusetts se construye un filtro anaerobio
- En 1895 se construye un tanque séptico en Inglaterra para tratar 230 m³/d y surgen en otros lados, comenzando asimismo la utilización del metano.
- En 1904 Travis pone en operación un proceso en dos etapas que es modificado en 1905 por Karl Imhoff en Alemania, popularizándose su tanque inmediatamente.



17

Tanque Imhoff



1. Lodos flotantes
2. Cámara de decantación
3. Tabiques inclinados para deslizamiento
4. Ranura de lodo
5. Cámara de digestión de lodo
6. Registro de toma
7. Evacuador de gas
8. Compuerta

Fuente: <http://www.bvise.paho.org/bvisead/scaw/02219/022515-18.pdf>

18

- El interés inicial por aplicar la DA a efluentes industriales puede atribuirse a Buswell y sus colaboradores a partir de los años 1920. Pero el énfasis se traslada entonces a la digestión anaerobia de los lodos.
- En los 60, trabajos en Sudáfrica (Clarigestor) y USA (Filtro anaeróbico)
- Si bien hay aplicaciones a lo largo del siglo XX el salto más importante se da a comienzos de los 80 con la consolidación del reactor UASB desarrollado por Lettinga y colaboradores en Holanda

19

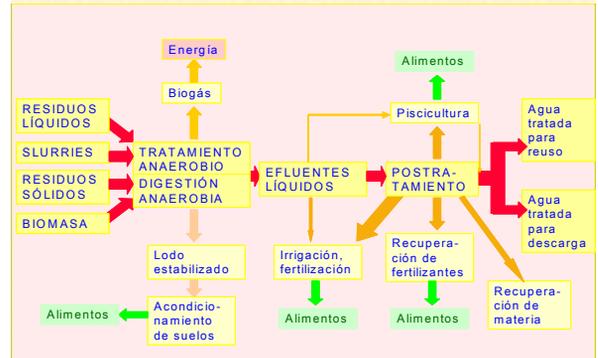
- La clave del suceso en las aplicaciones en *efluentes* de la tecnología anaerobia está en desacoplar el tiempo de residencia hidráulico del líquido con el tiempo de retención del sólido. Esto conduce a menores volúmenes con menores costos de inversión y a su vez a configuraciones más estables y con menores costos de operación.
- Esto no puede hacerse para residuos sólidos o lodos de plantas de tratamiento por lo que en este caso los tiempos de residencia son mucho mayores.

20

- El metano generado (y eventualmente el hidrógeno) tiene potencial como fuente de energía
- La producción neta de biosólido tiene potenciales aplicaciones como mejorador de suelos
- Se producen menos lodos y más estabilizados que en los procesos aerobios
- Se reduce sensiblemente la cantidad de patógenos
- Puede degradar algunos compuestos que son recalcitrantes en procesos aerobios
- Requiere menor volumen de reactor que otros procesos biológicos (un orden de magnitud)
- No requiere suministro extra de energía en cantidades importantes
- La operación es más sencilla que en sistemas aerobios (no hay que preocuparse por aireación y clarificación)

21

Tecnología Anaerobia como elemento clave de un sistema basado en la Protección Ambiental y la Conservación de Recursos



22

- Fermentación anaeróbica: la materia orgánica es catabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo por microorganismos anaerobios estrictos o facultativos. La propia materia orgánica actúa como aceptor y dador de electrones a la vez.
- Respiración anaeróbica: requiere aceptores de electrones externos (CO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- p.ej.)

23

Table 13. Microbial groups and their preferred electron acceptors and donors, and carbon sources.

Microbes	Electron Acceptor	Electron Donor	Carbon Source
<i>Methane-producing bacteria</i>			
Acetotrophic (or acetoclastic)	Acetate	Acetate	Acetate
Hydrogenotrophic	CO_2	H_2	CO_2
<i>Nitrate/nitrite-reducing bacteria</i>			
Heterotrophic denitrifiers	NO_3^- , NO_2^-	Organic carbon	Organic carbon
Autotrophic denitrifiers	NO_3^- , NO_2^-	S^0 or H_2	CO_2
<i>Sulfate-reducing bacteria</i>			
Acetotrophic (or acetoclastic)	SO_4^{2-}	Acetate	Acetate
Hydrogenotrophic	SO_4^{2-}	H_2	CO_2
Anaerobic ammonia-oxidizing bacteria	NO_2^-	NH_4^+	CO_2

24

- Rendimiento de biomasa:

$$Y = \frac{\Delta X}{\Delta S} \quad X \text{ biomasa (gSSV/L), } S \text{ sustrato (gDQO/L)}$$

El proceso metabólico de los microorganismos *aerobios* genera en total 38 mol ATP por mol de glucosa. Sin embargo, en los *anaerobios* se genera solo 4 mol de ATP. Por lo tanto, se genera mucha menos biomasa en los procesos anaeróbicos en comparación con los aeróbicos.

Process	Yield Coefficient (kg VSS/kg COD)	References
Acidogenesis	0.15	Henze and Harremoes (1983)
Methanogenesis	0.03	
Overall	0.18	
Anaerobic filter (mixed culture) (carbohydrate + protein as substrate)	0.115-0.121	Young and McCarty (1969)
Anaerobic treatment process	0.05-0.15	van Haandel and Lettinga (1994)

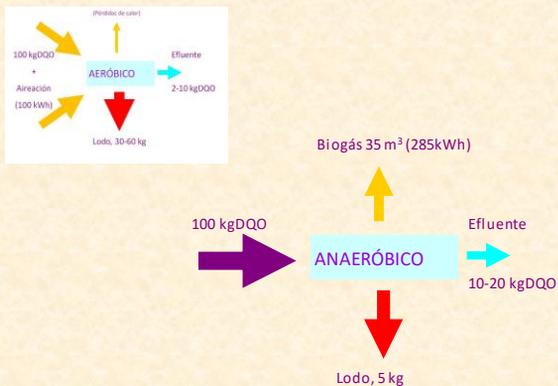
25

Balances de C y energía



26

Balances de C y energía



27

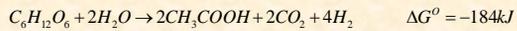
Recuperación energética

- Producción de metano: estequiométricamente 1 kg DQO genera 0.35 Nm³ de CH₄ y de acuerdo con su poder calorífico eso equivale a un potencial energético de 3.37 kWh, o bien 12.1 MJ, o bien 2900 kcal

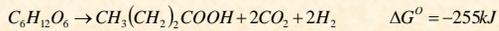
28

- **Producción de hidrógeno:**

- Fermentación acética



- Fermentación butírica



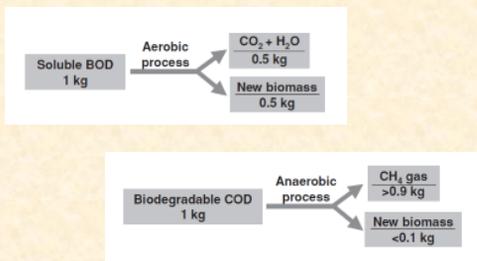
Normalmente predomina la fermentación butírica y solo se producen unos 2.5 moles de H_2 por mol de glucosa. Si se produjeran los 4 moles, equivaldría a 0.47L H_2 /gCOD pero normalmente los valores están en torno a la mitad.

29

- **Menores necesidades de energía:** No se requiere energía para suministro de oxígeno (se evitan 0.5-0.75 kWh por kg de DQO removido)
- **Menores necesidades de nutrientes**
- **Mayor carga orgánica volumétrica** (menor volumen de reactor, menor espacio)

30

Menor generación de lodo



31

Anaerobic treatment: a key technology for a sustainable management of wastes in Europe

J.M. Lema and F. Omil

Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, University of Santiago de Compostela, E-15782 Santiago de Compostela, Spain

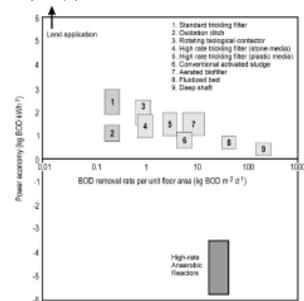


Figure 2 Comparison of aerobic and anaerobic processes in terms of power economy and space required (adapted from Hu et al., 1999)

32

Comparación entre tratamiento aerobio y anaerobio para industria azucarera (Lema y Omil, 2001)

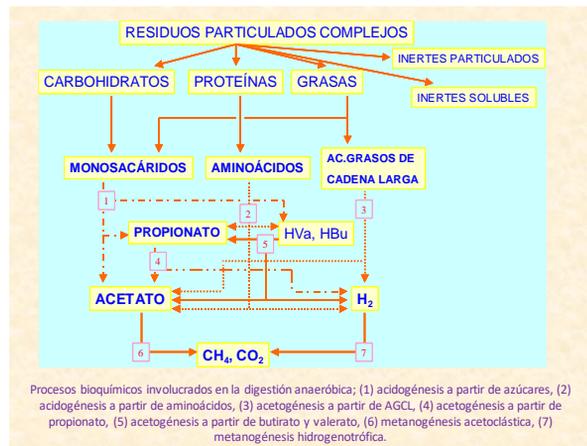
	ANAEROBIO	AEROBIO
Carga (tonDQO/año)	22.400	22.000
Prod. Lodos (ton/año)	1.500	7.500
Costos manejo lodos (€/año)	225.000	900.000
(% de las ventas)	0,3	1,5
Consumo neto de energía (MWh/año)	-	31.400
(% de las ventas)	-	0,25
Producción neta de energía (MWh/año)	26.880	-
(% de retorno en las ventas)	0,2	-
Superficie (m ²)	2.500	10.000

33

Producción de otras sustancias valorizables

- Ácido acético
- Ácido butírico
- Ácido láctico
- Butanol (fermentación ABE)
- Metanol (oxidación catalítica del metano)

34

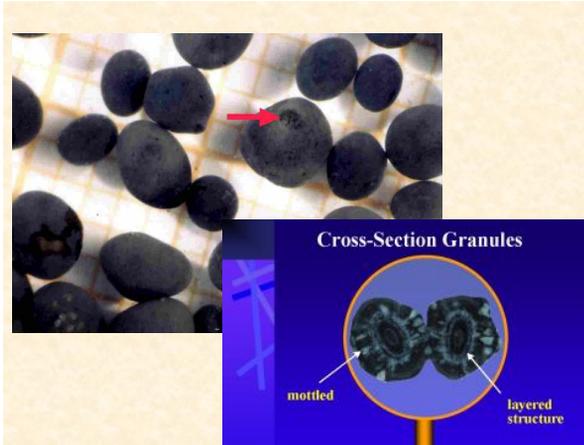


35

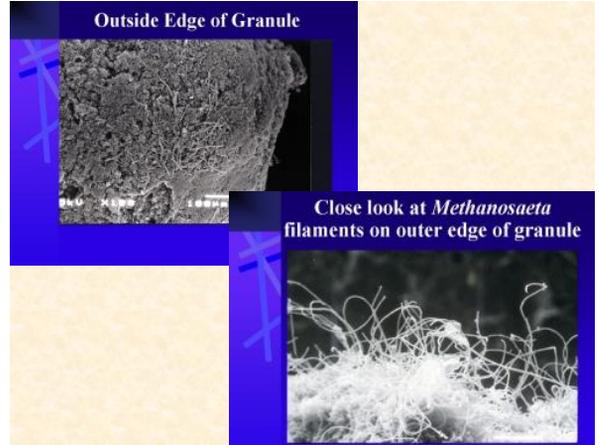
Sistemas para tratamiento de efluentes líquidos; lodo granular



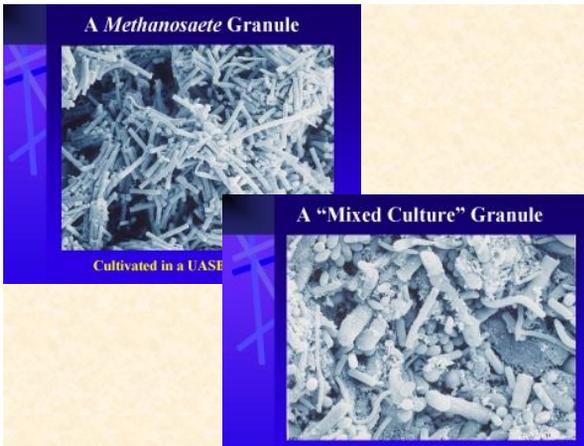
36



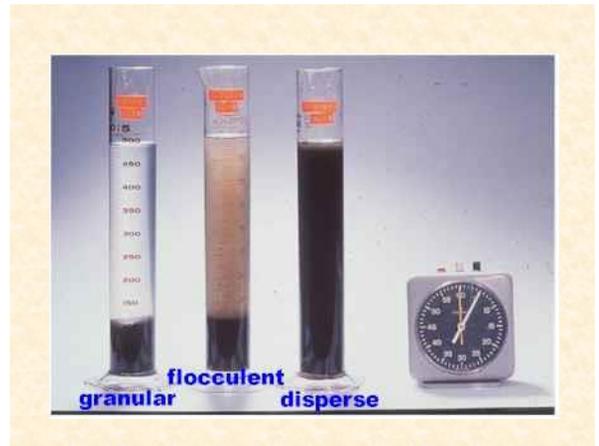
37



38



39

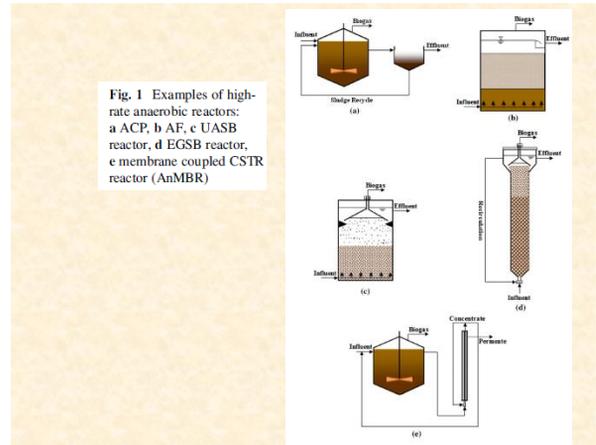


40

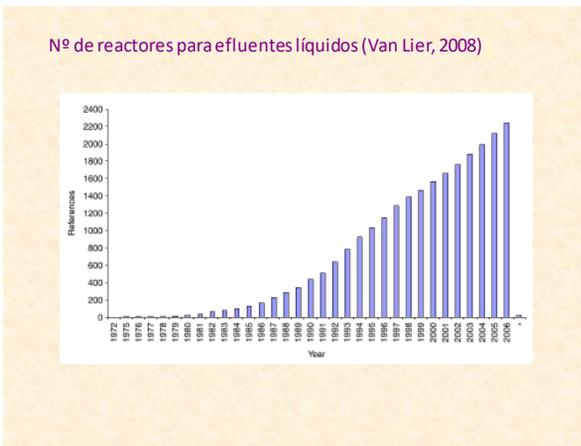
Table 2 Proposal for definition and characteristics of good quality granular sludge (photos: Paques BV)

Granular sludge examples	"Good quality granule" characteristics
 Potato wastewater grown granules	Metabolic activity: Specific methanogenic activity range of granular sludge: 0.1–2.0 kg COD-CH ₄ /kg VSS day Typical values for industrial wastewater: 0.3–1.0 kg COD-CH ₄ /kg VSS day
 Paper mill wastewater grown granules	Settability and other physical properties: Settling velocities: 2–100 m h ⁻¹ ; typically: 30–75 m h ⁻¹ Density: 1.00–1.05 g l ⁻¹ Diameter: 0.1–8 mm; typically: 0.15–4 mm Shape: spherical formed and well defined surface Color: black/gray/white

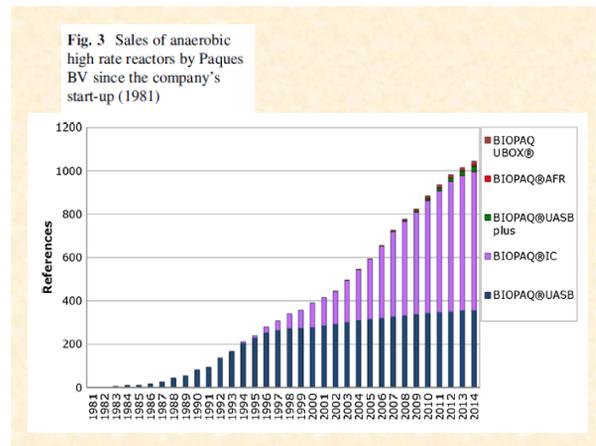
41



42

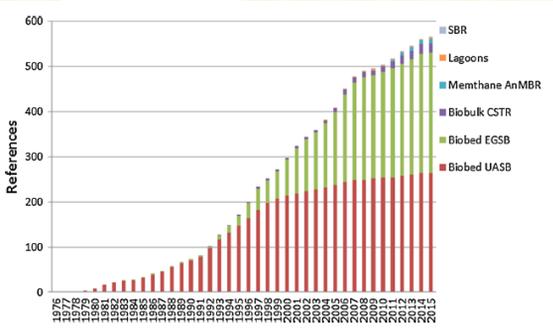


43



44

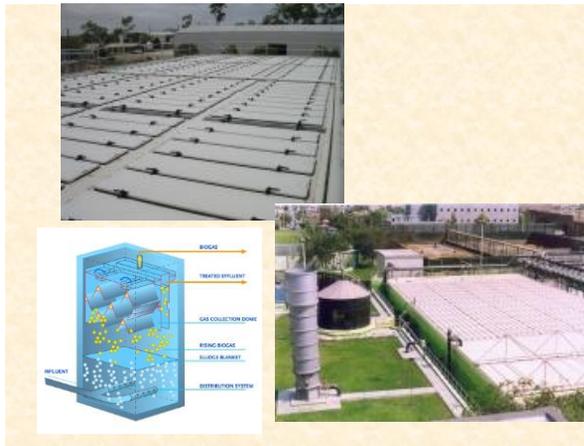
Fig. 4 Sales of anaerobic high rate reactors by Biothane-Veolia since the company's start-up (1976)



45



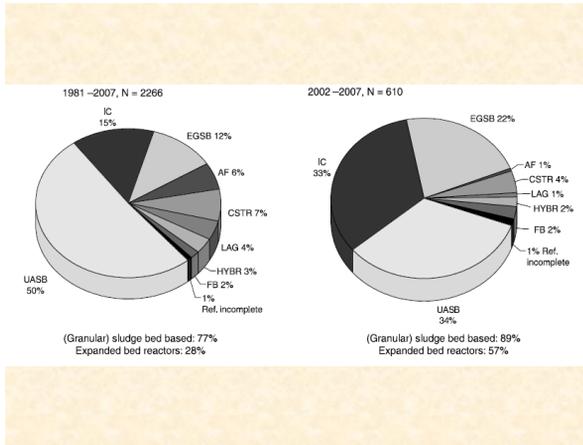
46



47



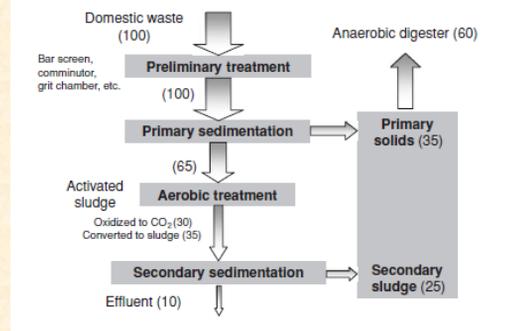
48



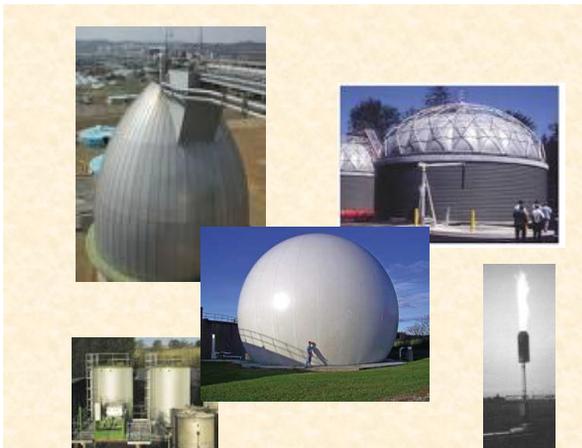
49

Tratamiento de lodos de depuradoras

En buena parte del SXX la DA estuvo asociada a la digestión de los lodos de las plantas de tratamiento aerobias de aguas domésticas.



50



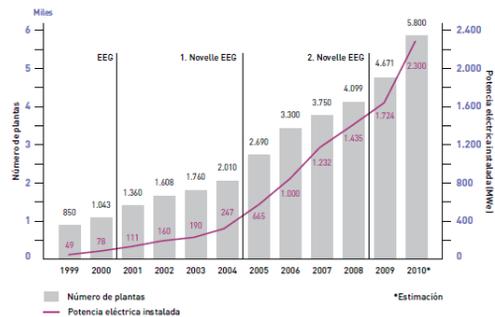
51

DA de residuos sólidos y lodos

- Extensamente implementado para lodos de plantas de tratamiento aerobias
- Aplicable también a residuos orgánicos urbanos, siempre que exista separación previa
- Codigestión con otros residuos orgánicos
- Digestión “húmeda” y “seca”
- Mesofílico / termofílico
- En una etapa o en dos
- Continuo / discontinuo
- Gran futuro de acuerdo a las nuevas normativas

52

Figura 10. Evolución del número de plantas de biogás y potencia eléctrica instalada (MWe) en Alemania (FNRR, 2010)



Título: Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020 Madrid, 2011
Autores: AINIA: Andrés Pazual, Begoña Ruiz, Paz Gómez GIRO: Xavier Fotiats, Belén Fernández

53

Tecnología anaerobia y desarrollo sostenible: "Desarrollo Sostenible es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades"

- Tendencia a minimizar las emisiones para disminuir los potenciales impactos (reducir, reusar, recuperar, reciclar)
- Tendencia al tratamiento de residuos in situ, sin mezclar ni diluir en la medida de lo posible
- Tendencia al aprovechamiento de los recursos, particularmente el energético

54

¿Por qué la DA coincide con los objetivos de una *producción limpia*?

- Eficiencia energética
- Menor generación de sólidos a disponer
- Son posibles altas cargas a altas concentraciones
- Estabilidad y pocos problemas operacionales
- Tratamiento de efluentes estacionales
- Biotransformación y biodegradación de xenobióticos
- No se emiten al aire compuestos volátiles peligrosos
- Tecnología flexible

55

LIMITACIONES

- Tiempo de arranque largo (sobre todo si no se posee un buen inóculo).
- Tiempo de recuperación relativamente largo frente a perturbaciones fuertes.
- Más sensible a cambios en condiciones ambientales (pH, temperatura, por ejemplo)
- Competencia con otros microorganismos (sulfato reductoras, p.ej.)
- No suelen alcanzarse las condiciones de vertido
- No remueve nutrientes

56