

POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN URUGUAY



Biología de Procesos para el Ambiente

Instituto de Ingeniería Química – Facultad de Ingeniería

Agradecimientos

A las autoridades y personal de la Dirección Nacional de Energía del MIEM por el impulso dado para llevar adelante este trabajo.

A las autoridades y personal de la Dirección Nacional de Medio Ambiente del MVOTMA por facilitar el acceso a información sobre generación de residuos en Uruguay.

RESUMEN	1
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 MOTIVACIÓN, LA MATRIZ ENERGÉTICA Y LA NECESIDAD DE BUSCAR FUENTES ALTERNATIVAS	3
1.2 LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	4
1.2.1 FUNDAMENTOS	4
1.2.1 TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS	7
1.2.2 TRATAMIENTO DE SUSTRATOS SÓLIDOS	10
1.3 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS	12
2 DESCRIPCIÓN DE LA BIOMASA DISPONIBLE	13
2.1 EFLUENTES LÍQUIDOS	13
2.1.1 EFLUENTES INDUSTRIALES	13
2.1.1.1 INDUSTRIA FRIGORÍFICA	13
2.1.1.2 INDUSTRIA LÁCTEA	15
2.1.1.3 VINAZA DE DESTILERÍA	18
2.1.2 EFLUENTES DOMÉSTICOS	19
2.2 RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES	21
2.2.1 CHACINADOS	21
2.2.2 INDUSTRIA FRIGORÍFICA	22
2.2.3 AVÍCOLAS	24
2.2.4 PROCESADORA DE PESCADO	25
2.2.5 ACEITERAS	25
2.2.6 INDUSTRIA LÁCTEA	26
2.2.7 INDUSTRIA ARROCERA	27
2.2.8 INDUSTRIA VITIVINÍCOLA	28
2.2.9 MALTERÍAS Y CERVECERÍAS	29
2.2.10 LAVADEROS DE LANA	30
2.2.11 CURTIEMBRES	31
2.2.12 ASERRADEROS	33
2.2.13 PAPELERAS	33
2.3 RESIDUOS SÓLIDOS AGROPECUARIOS	34
2.3.1 CULTIVOS DE TEMPORADA	34
2.3.2 RESIDUOS FORESTALES	34

2.4	RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	36
2.5	CULTIVOS ENERGÉTICOS	37
3	POTENCIAL DE METANIZACIÓN	39
4	ESTIMACIÓN DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO	43
4.1	CRITERIOS GENERALES UTILIZADOS	43
4.1.1	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	43
4.1.2	POTENCIAL CALÓRICO	45
4.2	RESULTADOS	45
5	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS PRELIMINARES	51
5.1	COSTOS	51
5.1.1	COSTOS DE INVERSIÓN	51
5.1.2	COSTOS DE OPERACIÓN	52
5.1.3	OTRAS CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE COSTOS	53
5.2	CONSIDERACIONES SOBRE LA FACTIBILIDAD DE GENERAR ENERGÍA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE CULTIVOS ENERGÉTICOS	54
6	CONCLUSIONES	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	GLOSARIO	67
	ANEXOS 1 - PROYECTO DE PLANTA CENTRALIZADA	71
	ANEXO 2 - TRATAMIENTO DE VINAZA DE DESTILERÍA	75
	ANEXO 3 - TRATAMIENTO DE SUERO DE LECHE	79

RESUMEN

Partiendo de relevar la producción nacional y de datos de generación de residuos obtenidos de organismos oficiales se ha hecho una estimación de la generación de residuos orgánicos capaces de ser tratados mediante digestión anaerobia. Conjuntamente con una estimación de las posibilidades reales de captación de dichos residuos y teniendo en cuenta los potenciales de metanización de los mismos, se ha estimado el potencial de generación de metano a partir de residuos en el país. Los resultados indican que, en la situación actual, podría alcanzarse una generación de energía equivalente a entre el 1.3 y el 2.1% de la energía primaria total. Esta cifra, a pesar de su poca incidencia en el total, debe mirarse a la luz de un enfoque de desarrollo sostenible: a la vez de generar energía renovable, se están cumpliendo los requerimientos relacionados con el tratamiento de los residuos para cumplir las necesidades ambientales.

Algunas industrias como la frigorífica, la láctea y la destilería de bioetanol se destacan por su contribución y por la factibilidad de implementar en los propios establecimientos industriales los sistemas de tratamiento y generación de biogás. En otros casos, particularmente para los residuos de la actividad agraria, las dificultades de captación hacen menos sencilla la opción, requiriéndose probablemente la instalación de plantas centralizadas que procesen sustratos de diversos orígenes.

Debido a los cambios en muchas áreas productivas pueden surgir nuevas oportunidades de procesamiento anaerobio o incrementarse los volúmenes actuales. Se analiza también el impacto que podría tener la utilización de “cultivos energéticos”, esto es cultivos específicamente implantados para alimentar digestores para la producción de biogás.

Por último se aportan algunos elementos de costeo de instalaciones que permiten realizar una primera aproximación económica a la hora de encarar un proyecto concreto.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN, LA MATRIZ ENERGÉTICA Y LA NECESIDAD DE BUSCAR FUENTES ALTERNATIVAS

Uruguay, un país de 3.286.314 habitantes según el Censo del año 2011 (INE, 2012), presentó una oferta de energía primaria de 4217 ktep y un consumo final de energía de 3504 ktep (kilo toneladas de equivalentes de petróleo) en el año 2010 (DNE, 2012). Para dicho año, el 49% de la energía primaria fue importada, correspondiendo a 2008 ktep al petróleo y 64 ktep al gas natural. En cuanto al consumo final existieron tres rubros que demandaron el 84% del total: El transporte (980 ktep), el sector residencial (748 ktep) y la industria (1218 ktep). El resto corresponde al comercio y los servicios (330 ktep) y al agro y la pesca (225 ktep).

La matriz energética nacional nos muestra entonces un país altamente dependiente de la importación de energía, en particular de la derivada de hidrocarburos. Está claro que en un futuro no demasiado lejano la escasez de petróleo elevará los precios de este tipo de energía a niveles insospechados, por lo cual urge buscar soluciones tecnológicas que permitan la sustitución de hidrocarburos importados. Por otra parte, en momentos donde el cuidado del ambiente se torna en un objetivo primordial a escala internacional (tómese a modo de ejemplo el Protocolo de Kyoto sobre el efecto invernadero y las actuales conversaciones internacionales para su continuación) las soluciones a desarrollar deben encararse además desde el punto de vista de la sostenibilidad; es así que se apunta a la utilización de fuentes de energía renovables o a la valorización de residuos con fines energéticos, cumpliendo a la vez con las necesidades ambientales.

La utilización de desechos, tanto industriales como municipales, es una temática que hasta el momento ha sido desarrollada con el objetivo fundamental de disminuir los niveles de contaminación de los vertidos. No obstante, en las circunstancias actuales al objetivo anterior puede agregarse el de recuperar la energía contenida en los residuos, valorizando entonces lo que hasta el momento había sido considerado simplemente como un desecho, además de realizar el correspondiente tratamiento sobre el residuo.

El avance del conocimiento científico y tecnológico acerca de los procesos que ocurren en las transformaciones biológicas de materiales orgánicos permite hoy plantearse el desafío de buscar soluciones económicamente viables apuntando a la obtención de energía. Sin embargo, el desarrollo concreto de la tecnología de generación y la posibilidad de que pueda acoplarse con un uso en términos rentables debe estudiarse en concreto y optimizarse para cada tipo de residuo o material a valorizar energéticamente.

1.2 LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

1.2.1 FUNDAMENTOS

La Digestión Anaerobia (DA) es una tecnología que se ha desarrollado fundamentalmente en las últimas tres décadas y ha llegado a constituirse hoy en un elemento medular dentro de una concepción integrada de los sistemas de tratamiento de residuos (van Lier *et al.*, 2001; Lettinga, 2001, Lema y Omil, 2001). A su vez es una tecnología accesible para los países subdesarrollados (Foresti, 2001), pues no requiere una inversión en infraestructura y desarrollo tecnológico imposibles de alcanzar. En particular ha sido extensamente aplicada al tratamiento de distintos tipos de residuos líquidos (van Lier *et al.*, 2001) y sólidos (De Baere, 2000). En la actualidad, los cambios en el escenario global (efecto invernadero, crisis energética) han puesto sobre la mira la construcción de una economía basada fuertemente en la aplicación de biotecnologías (Ahring y Westermann, 2004; Holbein y Layzell, 2004; Holm-Nielsen *et al.*, 2009) y en tal sentido comienzan a afirmarse conceptos como el de “biorefinería”, basados en la transformación biotecnológica de biomasa, en sustitución de las tradicionales refinerías basadas en la transformación del petróleo y sus derivados (Verstraete *et al.*, 2004), apuntando también a la recuperación energética (Nishio y Nakashimada, 2007; Levin *et al.*, 2007; Jingura y Matengaifa, 2009). Asimismo, la tecnología anaerobia ha demostrado ser más favorable que la aerobia en el tratamiento de residuos desde el punto de vista de la generación de gases de efecto invernadero (Cakir y Stenstrom, 2004), e incluso puede competir con otros biocombustibles (Power y Murphy, 2009). También se ha desarrollado el concepto de “energías verdes” o amigables con el medio ambiente, cuyo uso genera menor cantidad de emisiones, como la producción de hidrógeno y metano a partir de biomasa o materiales orgánicos en general (Beneman *et al.*, 2004; Han y Shin, 2004). En este panorama la Digestión Anaerobia tiene un papel clave, pues naturalmente los productos generados en los distintos pasos metabólicos pueden utilizarse como fuentes de energía (hidrógeno, metano) en calderas, motores de combustión interna o celdas de combustible (Caners, *et al.*, 2004; Trogisch *et al.*, 2004) o bien como materia prima para otras transformaciones (generación de ácidos grasos volátiles, con el objeto de obtener metano y/o de fabricar biopolímeros u otras sustancias orgánicas).

La conversión de sustancias orgánicas a metano es un proceso complejo que implica distintas poblaciones de microorganismos, responsables de las distintas reacciones involucradas. La Figura 1.1 muestra un esquema de las distintas etapas bioquímicas (Batstone *et al.*, 2002).

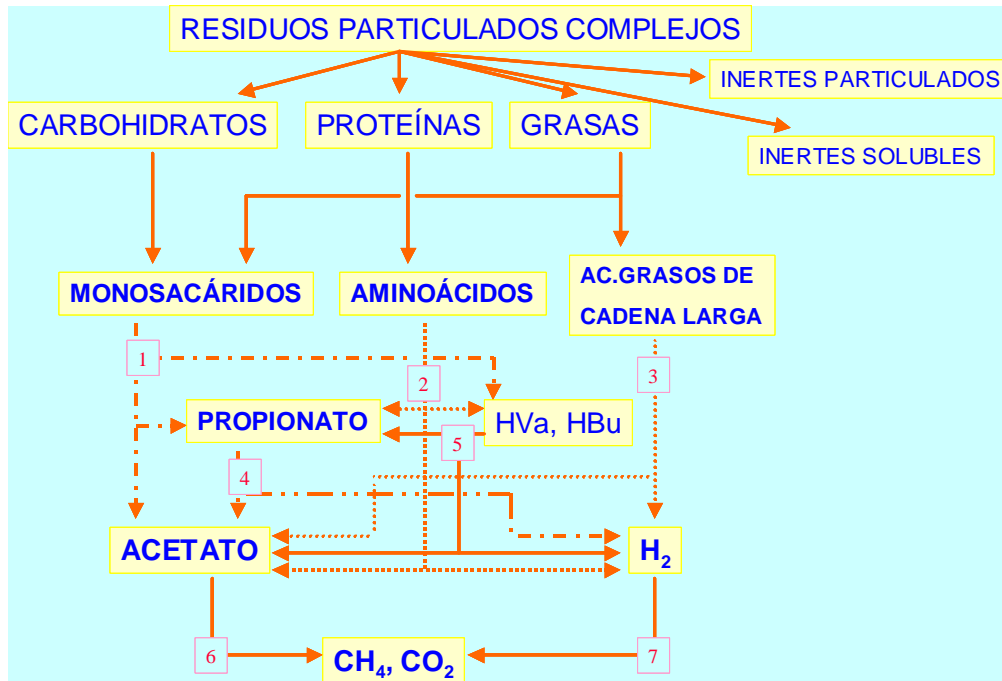


Figura 1.1 Procesos bioquímicos involucrados en la digestión anaeróbica; (1) acidogénesis a partir de azúcares, (2) acidogénesis a partir de aminoácidos, (3) acetogénesis a partir de AGCL, (4) acetogénesis a partir de propionato, (5) acetogénesis a partir de butirato y valerato, (6) metanogénesis acetoclástica, (7) metanogénesis hidrogenotrófica.

La Digestión Anaerobia comprende múltiples procesos que están relacionados, que involucran diferentes poblaciones de microorganismos que deben actuar en forma armónica a los efectos de que se de la degradación completa de la materia orgánica a metano y anhídrido carbónico. Las moléculas más complejas deben hidrolizarse primero a moléculas más pequeñas (azúcares, lípidos y proteínas), que a su vez se transforman en los pasos subsiguientes en moléculas más pequeñas en particular ácidos grasos volátiles (AGV), hidrógeno y anhídrido carbónico), culminando en los procesos de metanogénesis, a partir de ácido acético o a partir de hidrógeno y CO_2 . También puede conducirse el proceso hacia la producción de hidrógeno, que es un vector energético considerado clave para la energía del futuro. Para cada sustrato en particular se requiere ajustar las condiciones en las cuales se optimizan los procesos.

Las reacciones bioquímicas están normalmente catalizadas por enzimas intra o extracelulares. La desintegración de sustancias complejas a sus constituyentes particulados y la subsiguiente hidrólisis enzimática a sus monómeros solubles es normalmente extracelular. La degradación de los materiales solubles es realizada por los microorganismos intracelularmente y produce

el consiguiente crecimiento de biomasa. Además de las reacciones bioquímicas se dan procesos fisicoquímicos tales como asociación y disociación de sustancias iónicas, transferencia gas-líquido, precipitación y solubilización. Del delicado equilibrio entre todas estas etapas y el funcionamiento simbiótico de las distintas poblaciones de microorganismos y la eventual competencia con otros procesos depende el resultado final.

El tratamiento anaerobio de sólidos agrega al proceso ciertas peculiaridades. En primer lugar la etapa de lisis del material particulado pasa a tener una importancia clave e incluso puede ser el paso limitante de todo el proceso. En segundo lugar pueden existir problemas importantes de transferencia de masa si no se logra una uniformización o mezcla suficiente del material. Sin perjuicio de ello, la alta concentración de materia orgánica hace que la utilización de materiales sólidos resulte muy atractiva a los efectos de la obtención de energía.

Un desarrollo actual en etapa experimental de la tecnología anaerobia está pasando, como decíamos, por la generación de hidrógeno a partir de la fermentación de carbohidratos. En este caso se busca generar las condiciones que maximicen la producción de hidrógeno y además eviten su consumo por las bacterias metanogénicas. Se han utilizado diferentes tipos de reactores a escala de laboratorio: reactores continuos agitados (Yang *et al.*, 2007; Lin y Lay, 2005), UASB (Venkata Mohan *et al.*, 2007; Chang y Lin, 2004), EGSB (Guo *et al.*, 2008), siendo los más utilizados los reactores continuos agitados (Wang y Wan, 2009). Respecto a las condiciones de operación se busca trabajar a bajos pH (5 - 6) (Hawkes *et al.*, 2007) y altas cargas orgánicas en relación a las cargas habituales para procesos de producción de metano (mayor a 20 kgDQO/m³.d) (Kraemer y Bagley, 2007; Hallenbeck, 2009). La mayor parte de las experiencias reportadas en bibliografía han utilizado como sustrato glucosa o sacarosa (Wang y Wan, 2009; Hawkes *et al.*, 2007), sin embargo en los últimos años se ha empezado a trabajar con efluentes industriales, fundamentalmente de la industria alimentaria (Venkata Mohan *et al.*, 2007; Venetsaneas *et al.*, 2009).

La producción de hidrógeno máxima teórica es de 4molH₂/mol glucosa debido a restricciones termodinámicas que no permiten una mayor eficiencia. Esto implica que la mayor parte del DQO aún permanece sin modificar por lo que queda un remanente de materia orgánica que puede ser metanizada posteriormente (Ueno *et al.*, 2007; Koutrouli *et al.*, 2009; Venetsaneas *et al.*, 2009; Davila *et al.*, 2009; Castelló *et al.*, 2009). Más allá de que desde el punto de vista de recuperación energética el resultado no sea demasiado distinto al de la metanización completa del sustrato, el hidrógeno es un combustible limpio, que puede obtenerse de otras fuentes y por lo tanto la producción a partir de residuos complementa esta versatilidad.

1.2.2 TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS

El desarrollo más importante de la tecnología anaerobia para el tratamiento de efluentes se dio a partir del concepto de reactores de alta tasa, en los que el tiempo de retención celular de los microorganismos se desvincula del tiempo de retención hidráulica en el reactor. Con ello se consiguen varios objetivos entre los que se destacan: poder obtener una mayor carga aplicada por unidad de volumen, la especialización lograda por los microorganismos y el integrar en un solo reactor el tratamiento y la separación de fases. El tipo de reactor más aplicado es el UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) cuyo esquema se muestra en la Figura 2. En la parte inferior del reactor, donde se ubica la alimentación al reactor, se conforma un manto de lodos anaerobios donde se produce la degradación de la materia orgánica. En la parte superior existe un sistema que separa la fase gaseosa de la líquida y que actúa además como sedimentador de los sólidos que hubieran ascendido hasta allí. En muchas aplicaciones se logra un lodo granular donde los microorganismos se consorcian en un gránulo sin necesidad de soporte y producen entonces un lodo con muy bajo Índice Volumétrico de Lodos (IVL) y propiedades de sedimentación óptimas. Con los reactores UASB se alcanzan cargas aplicadas por encima de los 10 kgDQO/m³.d.

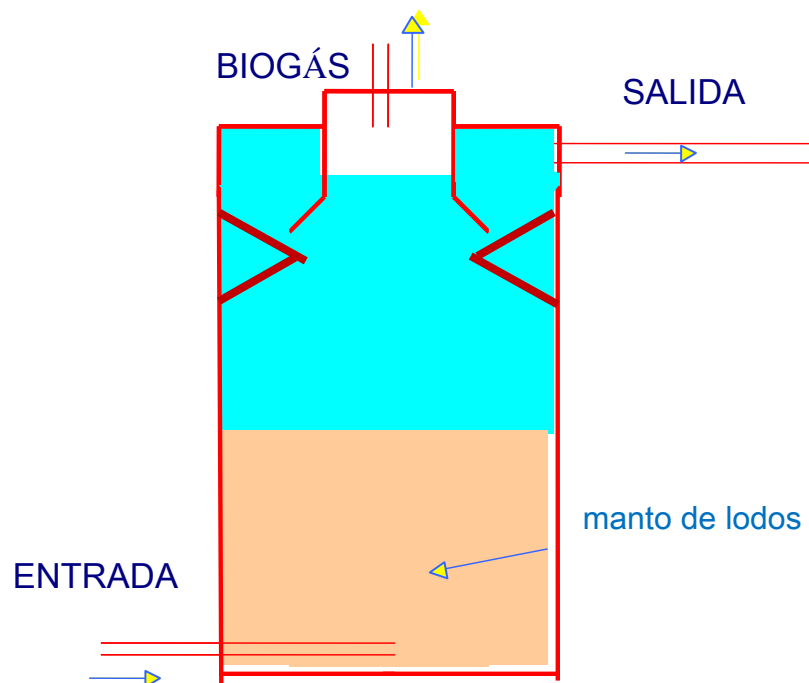


Figura 1.2 Esquema de reactor UASB.

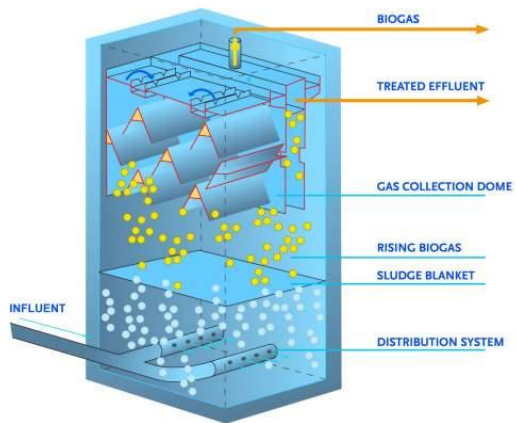


Figura 1.3 Reactor tipo UASB BIOPAC® de Paques.

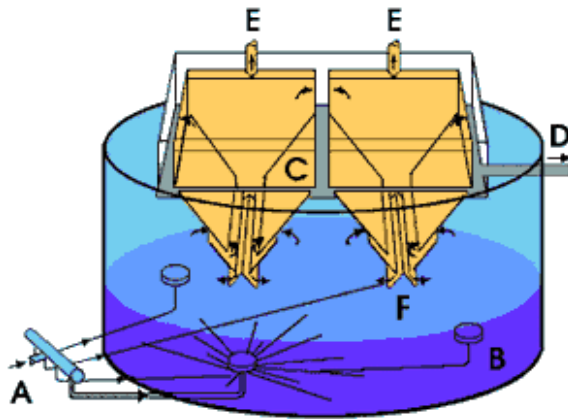


Figura 1.4 Reactor tipo UASB de BIOTHANE®

Otro tipo de reactores son los filtros anaerobios que involucran un material de soporte sobre el que crecen adheridos los microorganismos en forma de biofilm pero en los que también se desarrolla una importante cantidad de biomasa dispersa en los intersticios del relleno. Unos de los aspectos críticos desde el punto de vista técnico-económico es entonces la selección del relleno. Los primeros rellenos con piedras de tipo canto rodado eran relativamente baratos pero dejaban un volumen útil muy pequeño y por lo tanto no eran demasiado eficientes. Rellenos sintéticos permiten un aprovechamiento mayor del volumen del reactor (espacio hueco del orden del 90%) pero tienen el inconveniente de su costo, que en nuestras regiones puede ser limitante. Los filtros anaerobios no necesitan un sistema de separación de fases pues el propio filtro actúa reteniendo los sólidos. Por otro lado la posibilidad de oclusión por crecimiento excesivo de la biomasa o simplemente por retención de sólidos está presente, por lo que deben preverse sistemas de retrolavado para limpieza y desobstrucción.

También se han ensayado reactores híbridos, que combinan la existencia en su parte inferior de un manto de lodos con un filtro anaerobio en su parte superior. De esta forma se intenta preservar los aspectos positivos del concepto de UASB combinado con un filtro que además de eliminar el sistema de separación de fases retiene los sólidos previniendo eventuales lavados de la biomasa del reactor.

Los reactores de lecho fluidizado también se han utilizado con éxito para el tratamiento anaerobio. La biomasa normalmente crece adherida a un soporte inerte tal como arena o carbón activado lo que permite aumentar la densidad de las partículas y prevenir el lavado como consecuencia de las relativamente altas velocidades de flujo. Estas últimas promueven una gran turbulencia, disminuyendo drásticamente las resistencias a la transferencia de masa entre el líquido que contiene la sustancia a degradar y el biofilm donde se encuentran los microorganismos. Las altas velocidades de flujo llevan a diseñar reactores con relación altura/diámetro grandes y consecuentemente con necesidades de espacio pequeñas.

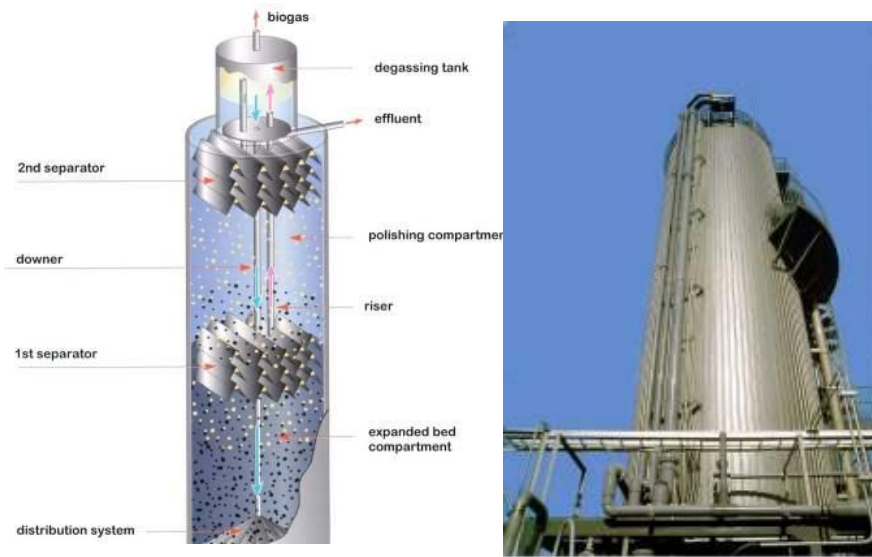


Figura 1.5 Reactores tipo IC, BIOPAC®

Como extensión del concepto de reactor UASB en combinación con el concepto de fluidización, se han desarrollado los reactores de lecho expandido (EGSB, expanden granular sludge bed), similares a los lechos fluidizados pero sin soporte inerte para el biofilm. Los EGSB aprovechan al máximo la alta sedimentabilidad de los gránulos anaeróbicos y operan con velocidades ascensionales de más de 8 m/h (hasta 30 m/h), mediante un aumento en la relación altura/diámetro respecto a los UASB tradicionales (altura entre 12 y 20 m) y una recirculación externa. El sistema de separación de fases es algo más sofisticado que en los UASB. Se alcanzan cargas orgánicas por encima de los 20 kgDQO/m³.d y la recirculación permite además trabajar con un amplio rango de concentraciones sin inconvenientes. La

eliminación de la resistencia a la transferencia de masa hacia el biofilm producida por la turbulencia permite trabajar en condiciones psicrófilas con buen éxito, así como con efluentes de bajas concentraciones de materia orgánica (menos de 1 gDQO/L). También se ha indicado su uso para efluentes que tienden a generar problemas de espuma en los sistemas UASB.

Otro tipo de reactor que se desarrollado es el de circulación interna (IC), que combina en su parte inferior un reactor de lecho expandido y en su parte superior un compartimiento de tipo UASB para el pulimiento del efluente. Los reactores de recirculación interna aprovechan el principio del “gas lift”. Estos reactores están equipados con dos sistemas de separación sólido-gas, uno de ellos a mitad de altura y otro en el extremo superior. La mezcla gas-líquido colectada en la zona central se transporta hacia el extremo superior donde se desgasifica. Entonces el líquido retorna al extremo inferior donde se mezcla con la corriente de entrada.

1.2.3 TRATAMIENTO DE SUSTRATOS SÓLIDOS

Los mismos procesos microbiológicos que ocurren en los sistemas de tratamiento de líquidos se dan en los sistemas de tratamiento de sustratos sólidos. Sin embargo existe una diferencia fundamental: por tratarse de un sustrato sólido es imposible separarlo de la biomasa, también sólida y por lo tanto los tiempos de residencia en el reactor del sustrato y de los microorganismos son iguales. Teniendo en cuenta las velocidades de crecimiento de los microorganismos anaerobios se necesitan tiempos del orden de los 20 a 60 días para evitar que el digestor se “lave” de microorganismos. En el proceso de tratamiento anaerobio parte de los sólidos son convertidos finalmente a metano y dióxido de carbono, con la consiguiente reducción neta de sólidos.

Los sustratos a digerir anaeróbicamente pueden ser muy diversos: desde residuos sólidos que generan las agroindustrias a lodos producidos en las plantas de tratamiento aerobias, pasando por residuos agrícolas, residuos animales, residuos urbanos y cultivos plantados específicamente para generar biogás. Existen sistemas que operan en el rango mesófilo de temperatura (35 a 37°C) y otros que operan en condiciones termofílicas (55°C). Algunos sistemas operan en discontinuo y otros en continuo y dentro de estos últimos las características del mezclado pueden ser distintas. Por último hay sistemas que operan con bajo contenido de sólidos (5 a 10%, “digestión húmeda”) y otros que lo hacen con alto contenido de sólidos (20%, “digestión seca”). Algunas opciones implican el pretratamiento mecánico de los residuos para disminuir el tamaño de los sólidos. Otras opciones separan el

proceso en dos fases, una fase hidrolítica que pasa la materia orgánica a la fase líquida y posteriormente este líquido es tratado en un reactor anaerobio convencional (Lissens *et al.*, 2001).

Lodos de plantas de tratamiento aerobias - Todas las plantas de tratamiento biológico de líquidos generan lodos. Estos lodos normalmente deben ser tratados para lograr su transformación en un lodo inocuo, que pueda disponerse en el terreno, y con una importante destrucción de patógenos. El producto final normalmente es estable, inocuo y puede utilizarse como acondicionador de suelos (Malina, 1992). La digestión de lodos produce metano en cantidad suficiente como para ser utilizado en el propio calentamiento y mezclado del reactor e incluso se produce un exceso que puede usarse en otros fines energéticos, incluyendo las propias necesidades de un sistema aerobio de tratamiento de líquidos (Borzacconi *et al.*, 1999). La reducción de sólidos normalmente está en un rango del 25 al 45%. Normalmente se requieren largos tiempos de retención, superiores a los 10 días, por lo que los reactores son relativamente grandes.

Residuos Sólidos Urbanos (RSU) - Los residuos sólidos que se producen en la actividad urbana (domiciliarios y de actividades comerciales e industriales) contienen una fracción biodegradable muy importante que puede ser tratada anaeróbicamente. El destino final de los RSU suele ser la disposición controlada en el terreno denominada relleno sanitario. El relleno sanitario es una obra de ingeniería que confina los residuos en forma controlada minimizando el volumen y los impactos sobre el medio ambiente (Tchobanoglous *et al.*, 1994). En el confinamiento en terreno de los residuos el oxígeno atrapado entre ellos se consume rápidamente y entonces se generan condiciones anaerobias. Por lo tanto ocurren los mismos procesos biológicos descritos más arriba. En tal sentido puede concebirse al relleno sanitario como un gigantesco biorreactor anaerobio (Pholand, 1977). En una concepción moderna del relleno se lo diseña para la extracción de biogás, con lo que más allá de ser un sitio de disposición final se realiza también una valorización energética de los residuos. Lamentablemente en nuestra realidad se ha descuidado bastante la disposición final de RSU y normalmente lo que existen son vertederos más o menos controlados y en los que no se realiza ninguna captación.

Otra alternativa para el tratamiento y valorización de la fracción orgánica de los RSU son los digestores de sólidos (De Baere y Mattheeuws, 2008). Si bien los principios de funcionamiento son los mismos que se describieron más arriba, en este caso particular suele resultar clave el proceso de selección y separación previa de dicha fracción orgánica. También puede mejorarse la performance de los digestores con diversas alternativas de pretratamiento (químico, enzimático, térmico, mecánico).

1.3 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS

El objetivo de aplicar la tecnología anaerobia para la obtención de un recurso energético debe cruzarse con las posibilidades de su utilización, tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista de la sustentabilidad económica. En el caso de los efluentes de complejos agroindustriales, obligados por la normativa ambiental a tratar el efluente, la aplicación dentro del sistema de tratamiento de la tecnología anaerobia puede permitir la obtención de biogás, que eventualmente puede utilizarse en forma más o menos directa en la propia industria, disminuyendo así el gasto de energía, además de no necesitar consumo extra de energía como otro tipo de tratamientos. A modo de ejemplo, una empresa de nuestro país dedicada al malteado de cebada ha puesto en funcionamiento un reactor anaerobio para el tratamiento de sus efluentes líquidos y está produciendo un promedio de 300 m³ de biogás por día, con un contenido de metano del 77% (López *et al.*, 2004; Borzacconi *et al.*, 2006). Esto significa una generación de energía de unos 700 millones de kilocalorías por año en caso de ser quemado el biogás. Si bien se trata de una empresa con un alto consumo de energía no deja de ser un aporte para nada despreciable en términos absolutos (Borzacconi *et al.*, 2004), y el diseño del quemador fue proyectado para el aprovechamiento energético. En ese caso en particular ha podido demostrarse mediante el uso de indicadores energéticos, económicos y ambientales la supremacía de la opción anaerobia más pulimiento aerobio frente a la alternativa tradicional aerobia (López *et al.*, 2008).

Los efluentes más concentrados, como por ejemplo la vinaza de la destilación de bioetanol o el suero de queso son potencialmente los más interesantes desde el punto de vista de la recuperación energética, pues presentan un mayor contenido de materia orgánica a convertir en biogás. Sin embargo hay aspectos asociados a las altas concentraciones de materia orgánica y sales de estos efluentes que es necesario estudiar con más detalle, pues pueden conducir a los microorganismos a situaciones de inhibición o stress.

2 DESCRIPCIÓN DE LA BIOMASA DISPONIBLE

2.1 EFLUENTES LÍQUIDOS

2.1.1 EFLUENTES INDUSTRIALES

Existe una amplia variedad de efluentes industriales que han sido tratado con éxito en sistemas anaerobios. Pueden citarse entre otros: maltería, cervecería, bebidas, destilerías, pulpa y papel, industria alimenticia, industria farmacéutica, levaduras, lixiviado, etc. (Lettinga y Hulshof Pol, 1992; Borzacconi y López, 1994; Frankin, 2001). Se relevarán aquellos que potencialmente puedan tener mayor impacto en el país sin perjuicio de otras aplicaciones.

2.1.1.1 INDUSTRIA FRIGORÍFICA

La industria frigorífica o de mataderos constituye el eslabón industrial de la cadena cárnica bovina (Gabinete Productivo, 2009). Los frigoríficos eran 34 en todo el país y se repartieron una faena de más de 2,2 millones de cabezas durante el año 2007. Cabe destacar, que solo 20 de ellos realizaron exportaciones durante el mencionado año. En Uruguay, aproximadamente el 70 % de la demanda de ganado se encuentra concentrada en las 10 principales plantas de faena.

Los efluentes de frigorífico resultan de los procesos de desangrado, desosado, mondonguería, tripería y lavado de corrales. Se producen tres tipos de efluentes: aguas rojas, aguas verdes y aguas cloacales. Las aguas rojas son generadas fundamentalmente en la playa de faena y contienen principalmente material lipídico y proteico. Las aguas verdes provienen de los procesos de mondonguería y lavado de corrales y presentan alto contenido de material sólido lignocelulósico y grasas. Las aguas cloacales provienen de los servicios sanitarios y vestuarios. La mezcla de las distintas corrientes genera un efluente complejo que contiene proteínas,

compuestos lignocelulósicos y grasas, en forma soluble y como sólidos en suspensión (Martínez *et al.*, 2006). La Tabla 2.1 muestra la caracterización típica de los efluentes de un establecimiento típico (Martínez *et al.*, 2006):

Tabla 2.1 Caracterización de las distintas corrientes de efluentes de la industria frigorífica.

Parámetro	Aguas rojas	Aguas verdes	Cloacales
Flujo (m ³ /d)	1900	800	200
Temperatura (°C)	29	23	20
DQO total (mg/L)	6700	21000	730
DQO soluble (mg/L)	2400	3600	550
SST (mg/L)	1900	12000	400
SSV (mg/L)	1600	10000	200
Grasas (mg/L)	1200	1700	10
DQO/NTK	25	40	8
DQO/P	390	310	150
pH	6.5	7.5	7.5

Con el fin de cuantificar el potencial de sustitución de combustibles fósiles mediante el uso del biogás, se realizó un relevamiento de información disponible en DINAMA (Dirección Nacional de Medio Ambiente, del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente) relativa a la generación de efluentes y residuos sólidos en el sector frigorífico, focalizado en los mataderos de bovinos. Esta información se procesó para obtener índices de generación de residuos y efluentes representativos de la realidad nacional. Bajo acuerdo de confidencialidad se relevaron los datos de interés de los informes presentados a DINAMA entre 2008 y 2010 por los frigoríficos cuyo rubro principal es la carne bovina. El aporte de información de profesionales y operadores de plaza, así como la información relevada por el Departamento de Ingeniería de Reactores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en proyectos anteriores complementó la información de las fuentes oficiales.

En relación a las aguas residuales se tomaron los valores de faena en toneladas en pie, los valores de caudales medios de efluentes, y se promediaron los valores disponibles de concentraciones de DQO luego de las unidades de pretratamiento para separación de sólidos. La información relevada abarca 18 frigoríficos que representan el 88% de la faena de bovinos realizada en el país.

Considerando los caudales de efluentes y el volumen de faena, resulta en promedio una carga de DQO a tratar de 23 kilogramos por tonelada en pie faenada. El número de cabezas faenadas anualmente en promedio entre 2008 y 2010 es de 2:247.541 (INAC, 2011).

Asumiendo un peso medio por cabeza de 485kg, resulta una carga anual a ser tratada de 25.071 toneladas de DQO.

2.1.1.2 INDUSTRIA LÁCTEA

Los efluentes líquidos de la industria láctea se generan fundamentalmente en los procesos de limpieza de las instalaciones, donde se arrastran con agua, y usando ácidos, álcalis y/o detergentes, los restos de leche.

En los reactores anaerobios de flujo ascendente de manta de lodos (UASB) el efluente lácteo puede generar problemas, debido a su alto contenido de material graso, en el entorno al 40% de la materia orgánica. Este material graso es, en principio, de degradación más difícil, por lo que se acumula en el reactor, rodeando a la biomasa activa, impidiendo la transferencia de sustratos desde el medio líquido y, dado que generalmente tiene una densidad baja, tiende a favorecer la flotación del sólido, que se acumula bajo la campana de captación de biogás o se escapa con el efluente líquido. Para evitar estos problemas normalmente se realiza una separación física de la grasa, generalmente por flotación por aire disuelto, y luego se llevan a cabo los procesos biológicos. En Uruguay se ha llevado a cabo una experiencia exitosa a escala real (Passeggi *et al.*, 2009) con un reactor anaerobio de alta tasa al que se le han introducido las siguientes modificaciones: i) sistema de extracción del material flotante que se acumula bajo la campana de captación, ii) digestor anaerobio auxiliar para ese material flotante y iii) sedimentador externo para minimizar el escape de biomasa. La extracción de flotantes actúa de forma periódica evitando la formación de una costra en la parte del separador de fases que impediría la correcta evacuación del biogás. El sedimentador evita el lavado del reactor, particularmente en la etapa de arranque, cuando las características de sedimentación no son suficientemente buenas. El digestor anaerobio de material flotado termina de degradar la materia orgánica generando más biogás; la salida de dicho digestor se devuelve al reactor de tratamiento de líquidos, con lo cual también se recupera biomasa activa. En estas condiciones el sistema viene funcionando en forma estable desde el año 2005 y en estos momentos se está implementando en una nueva industria. También está en marcha un proyecto para la optimización y posterior comercialización del sistema a escala regional.

Adicionalmente a lo que normalmente se incluye como efluentes líquidos se encuentra la generación de suero lácteo, como consecuencia de la producción quesera. En general el suero es visto como un recurso valioso. En plantas grandes puede procesarse para obtener subproductos y en plantas chicas suele ser aprovechado como complemento de alimentación animal, por lo que no es considerado como agua residual. No obstante en ciertos momentos o cuando no es posible implementar el procesamiento o la logística correspondiente para su aprovechamiento, puede convertirse en un residuo, que muchas veces va a parar a los

sistemas de tratamiento. Se trata entonces de un líquido con una concentración muy alta de materia orgánica, que por lo tanto presenta un muy alto potencial de metanización.

La tecnología anaerobia para el tratamiento del suero lácteo aún no está implementada a escala real en el país. Sin embargo se han llevado a cabo varias experiencias exitosas a escala de banco con sistemas en una y dos fases, en las que no se han identificado obstáculos hasta el momento para su implementación a escala real.

Tabla 2.2 Valores medios declarados para las principales industrias relevadas

Establecimiento	Caudal medio (m3/d)	DQO media (mg/L)	DBO5 media (mg/L)	A&G media (mg/L)
1	1758	1793	937	306
2	1315	3351	1793	579
3	285	6380	2410	340
4	449	2452	1735	448
5	773	2592	1387	377
6	1415	5096	3189	717
7	653	4587	2224	490
8	162	5711	2667	34
9	190	1551	949	262
10	280	3077	1854	268
11	62	-	-	-
12	300	2200	1360	200
13	706	715	435	145
14	483	10972	6944	1694
15	78	-	985.5	323
16	274	2665	1900	240
17	-	778	549	-
18	106	3793	2768	353
19	319	-	682	33
20	3	1433	759	49
21	52	-	-	-
22	30	-	687	43
23	-	940	260	43
24	17	2700	1300	250
25	15	-	1575	2250

Bajo acuerdo de confidencialidad se relevaron los datos de interés de los informes presentados a DINAMA entre 2009 y 2011 por las principales industrias lácteas del país. Se

complementó con información propia del Departamento de Ingeniería de Reactores del IIQ. Los datos de generación global de leche y producción se tomaron de los reportes publicados por el MGAP (Serie Estadísticas Agropecuarias). El relevamiento de la información oficial abarcó a 25 industrias procesadoras de leche. Considerando las 16 plantas más importantes se abarca el 86% de la leche remitida a planta. En la Tabla 2.2 se presenta en forma resumida la principal información declarada sobre la generación de efluentes.

De las 16 plantas principales, y considerando el global de las emisiones, se extrajeron los indicadores de generación de efluentes que figuran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores medios para efluentes de la industria láctea.

$2.7 \text{ m}^3_{\text{efluente}}/\text{m}^3_{\text{leche procesada}}$
$9.7 \text{ kgDQO}/\text{m}^3_{\text{leche procesada}}$
$3.6 \text{ kgDQO}/\text{m}^3_{\text{efluente}}$
$2.0 \text{ kgDBO}_5/\text{m}^3_{\text{efluente}}$
$0.49 \text{ kgA\&G}/\text{m}^3_{\text{efluente}}$

De acuerdo con estos índices para los 1472 millones de litros de leche remitidos a la industria en 2009 se estarían generando unos 4.0 millones de metros cúbicos de efluente con unos 1.43 millones de kg de DQO en toda la industria.

La mayoría de las industrias cuentan con sistemas de lagunas anaerobias seguidas por lagunas facultativas. En algunos casos hay también lagunas aireadas. Sin perjuicio de lo anterior, hay dos de las plantas más grandes que presentan propuestas de tratamiento diferentes: una de ellas presenta como elemento fundamental de tratamiento del efluente un sistema de flotación por aire disuelto, tratando los lodos flotados en un digestor de sólidos; otra presenta un sistema de lagunas pero en el que las lagunas anaerobias están cubiertas, por lo que se recogería el biogás en ellas formado. Otras dos plantas presentan sistemas anaerobios pero distintos de lagunas: una utiliza un reactor anaerobio de contacto y otra un reactor de flujo ascendente (UASB modificado, mencionado anteriormente).

Suero - De consultas a los propios involucrados y cruce de información se puede estimar que las principales industrias queseras, aquellas que normalmente manejan el suero en forma independiente del efluente, generan unos 300.000 m³/año de suero. Puede estimarse una concentración que oscila entre los 55 y 60 gDQO/L. Por lo tanto la carga orgánica anual sería de unas 17000 ton DQO.

2.1.1.3 VINAZA DE DESTILERÍA

En el año 2005 el gobierno nacional decidió la necesidad de comenzar a producir etanol y biodiesel con materias primas nacionales para diversificar la matriz energética nacional con el objetivo de: i) aumentar la soberanía energética del país; ii) disminuir consumo de petróleo; iii) disminuir la emisión de gases efecto invernadero; iv) desarrollar cadenas agroindustriales; v) promover el desarrollo económico y social de distintas regiones del país. En ese marco y teniendo en cuenta la Ley de agrocombustibles del 2007 es que se implanta el proyecto sucroalcoholero de Bella Unión, con una proyección de plantaciones de 10000 Há de caña de azúcar y 4000 Há de sorgo azucarado para la producción de etanol, azúcar y energía eléctrica. La destilería se proyecta con una capacidad de producción de 120 m³/d de alcohol.

Durante la extracción de la caña se genera un jugo que luego de fermentado se somete a destilación, generándose además un sólido denominado bagazo. Este sólido en general se utiliza para alimentar las calderas de generación de vapor, aunque también podría utilizarse como sustrato para un proceso de digestión anaerobia de sólidos (Van Haandel, 2004), mejorando el rendimiento energético del complejo.

Tabla 2.4 Valores medios típicos de vinaza de distintos orígenes, Tomado de Wilkie *et al* (2000).

Parámetro	Melaza de caña	Jugo de caña	Melaza de remolacha	Otros celulósicos
DBO ₅ (g/L)	39	17	45	28
DQO (g/L)	85	30	91	61
NTK (g/L)	1.2	0.6	3.6	2.8
P total (mg/L)	190	130	160	30
K (g/L)	5.1	2.0	10.0	0.04
SO ₄ (g/L)	3.5	1.47	3.7	0.7
pH	4.46	4.04	5.35	5.35

De la destilación del jugo fermentado resulta por un lado el alcohol y por otro lado un residuo líquido con una concentración relativamente importante de alcohol y otros componentes orgánicos denominado vinaza. Puede asumirse que por litro de etanol producido se generan unos 13 a 15 litros de vinaza (Van Haandel, 2004; Pant y Adholeya, 2006) con una

concentración que puede abarcar un amplio rango de valores según el origen de la misma. Wilkie *et al.* (2000) realizan una exhaustiva revisión bibliográfica abarcando la caracterización de la vinaza proveniente de distintas fuentes y un resumen muy apretado de sus resultados se presenta en la Tabla 2.4.

La concentración de la materia orgánica en la vinaza parece depender fuertemente de las condiciones de diseño y operación de cada destilería y del origen del jugo, pues se registra un amplio rango de valores que va entre 20 y 33 gDQO/L para las vinazas a partir de jugo de caña y entre 48 y 120 gDQO/L para vinazas a partir de melazas, con una fracción biodegradable también fuertemente variable (Wilkie *et al.* 2000). Esto hace necesario una caracterización particular para cada caso que permita ajustar el tratamiento y efectuar un dimensionamiento adecuado de las instalaciones.

Si se considera una producción de 120 m³ de alcohol por día, se generarán unos 1800 m³ de efluente por día; suponiendo que tiene una concentración media de 54 gDBO₅/L (valor medio en la zafra 2012 en Bella Unión) se tendría una carga a tratar de unos 97.000 kg DQO/día. Desde el punto de vista ambiental el efluente generado sería entonces aproximadamente equivalente al que genera una población de más de un millón de habitantes. Dada la alta concentración del efluente y según las leyes vigentes el mismo debe ser tratado antes de ser vertido a curso de agua. En el caso de ALUR Bella Unión se previó la utilización de este efluente para riego de las propias plantaciones de caña, recuperándose así los nutrientes. Pero más allá del contenido de nutrientes, como el efluente tiene una concentración tan alta de materia orgánica puede originar problemas en su disposición directa en el suelo, por lo que también es conveniente un tratamiento para reducir la carga orgánica. En el caso particular de ALUR Bella Unión, además, el riego debe realizarse a contra zafra, esto es, básicamente en el verano, siendo que la zafra termina normalmente en octubre o noviembre. Esto obliga a almacenar todo el efluente generado durante la zafra para poder después regar. Por lo tanto resulta más importante aún realizar el tratamiento del efluente. Pero desde el punto de vista de la recuperación energética resulta un efluente ideal por su altísima concentración de materia orgánica con lo cual puede resultar un aporte significativo en términos de la producción de energía del complejo agroindustrial.

2.1.2 EFLUENTES DOMÉSTICOS

Uruguay tiene una población de 3.286.314 habitantes, un 94.7% urbano, 1.319.108 de los cuales viven en Montevideo, con una población urbana de casi el 99%; en el resto del país el

91.7% de la población también es urbana (INE, 2012). En la ciudad de Montevideo las aguas cloacales son responsabilidad de la Intendencia y en 2009 se alcanzó el 91% de cobertura de la zona urbana (IM, 2012); las aguas cloacales (sin separación de pluviales) se vierten en el Río de la Plata por medio de un emisario submarino, luego de un tratamiento primario. En el resto del país la responsabilidad por los efluentes domésticos es de Obras Sanitarias del Estado (OSE); algunas ciudades del litoral costero tienen vertido directo también.

Al año 2008 la cobertura de saneamiento en el interior del país era del 38% de la población nucleada en centros urbanos; respecto a las conexiones de agua potable representan el 43% en promedio y en las capitales departamentales asciende 63% (OSE, 2012).

Las poblaciones que tienen planta de tratamiento o pretratamiento en el interior suman un total de 735.262 personas. En dos ciudades hay solo pretratamiento y en una hay una planta anaerobia (Pando). Para Ciudad de la Costa (Canelones), Pando y alrededores se está construyendo una planta de tratamiento con reactores anaerobios.

Pueden considerarse los siguientes valores medios para el agua cloacal: 480 mgDQOtotal/L, 230 mgDQOsoluble/L, 170 mg SST/L y 120 mgSSV/L (López *et al.*, 2000). Considerando un valor típico de 200 L/persona/día (Metcalf-Eddy, 2002) puede estimarse entonces en 6.5×10^7 kg de DQO por año lo que se vierte actualmente al sistema de saneamiento en todo el país. Pero si se descuentan las ciudades que vierten directamente al mar con apenas un tratamiento primario (Montevideo y Maldonado-Punta del Este), la carga sería de unos 1.6×10^7 kg de DQO por año. Aproximadamente el 92% de esta carga sería tratado en sistemas aerobios de distinto tipo y el 8% restante en sistemas anaerobios.

La utilización de metano en reactores anaerobios para aguas cloacales en general no es económicamente viable por tratarse de un efluente muy diluido; incluso una fracción importante del metano se escapa disuelta en el propio efluente (Van Haandel y Lettinga, 1994). Eventualmente podría utilizarse para calentar los propios sistemas de tratamiento. Sin embargo, dado que implican un considerable ahorro energético respecto a los sistemas aerobios (en aireación), si se tornan atractivos como opción a seleccionar para el tratamiento; tal es el ejemplo de la planta de tratamiento de Ciudad de la Costa.

En los sistemas aerobios se genera una cantidad significativa de lodo de purga que normalmente se estabiliza mediante digestores anaerobios. Tomando un factor de rendimiento de 0.4 kgSSV/kgDQO significaría la generación de unas 6000 toneladas anuales de SSV que podrían tratarse anaeróbicamente.

2.2 RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES

Existe un buen número de industrias que procesan materia prima principalmente de origen agropecuario y que generan residuos sólidos pasibles de ser degradados anaeróbicamente. A continuación se listan las principales industrias, indicando el volumen de producción y los índices de generación de residuos.

2.2.1 CHACINADOS

Los residuos generados son básicamente restos del proceso de producción, residuos de embalaje (no pasibles de degradación anaeróbica) y barros de los desengrasadores que normalmente incluyen los sistemas de efluentes.

Tabla 2.5 Producción industrial y generación de residuos de la industria del chacinado. Elaborado a partir de Diagnóstico de Generación de Residuos Sólidos Industriales, DINAMA 2004.

Departamento	Producción		Residuos sólidos (ton/año)		
	Nº Empresas	Producción (ton/año)	Restos de proceso	Residuos de embalaje	Barros desengrasador
Canelones	5	3746	208	154	318
Maldonado	1	49	3	2	4
Monevideo	9	15991	888	659	1359
Salto	1	480	27	20	41
San José	3	1318	73	54	112
PAÍS	19	21584	1199	889	1834

Tabla 2.6 Índices de generación de residuos de la industria de chacinado.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/ton chacinados)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Restos de proceso	56	80	13
Residuos de embalaje	41	98	9
Barros desengrasador	85	250	30

2.2.2 INDUSTRIA FRIGORÍFICA

En mataderos y frigoríficos se generan residuos sólidos en los sistemas de tratamiento de aguas (rejas, tamices, barros de sistemas aiereados), que incluyen el contenido ruminal de los animales, restos de carcasas, etc.

Tabla 2.7 Producción y generación de residuos sólidos en la industria frigorífica.
Elaborada en base a datos de INAC y Diagnóstico de Residuos Sólidos de DINAMA.

Departamento	Nº Empresas	Producción				Residuo sólido (ton/año)			
		Cabezas faenadas/año				Sólidos tratamiento de aguas rojas	Sólidos tratamiento de aguas verdes	Barros biológicos	Residuos de embalaje
		Bovinas	Ovinas	Suinas	Equinas				
Artigas	3	2990	47735	105		30	289	151	6
Canelones	12	888635	1073470	75230	34765	4118	39040	41221	866
Cerro Largo	2	172610	15155			679	6443	7429	143
Colonia	6	129300	20725	44570		570	5396	6193	120
Durazno	2	15180	222625			146	1385	748	31
Florida	1	3960	335	925		17	159	183	4
Lavalleja	2	39420	22030	24515		194	1834	2048	41
Maldonado	2	34870	9265	1570		142	1343	1525	30
Montevideo	4	170510	17990	44350		730	6908	7961	153
Paysandú	3	45205	99310	5185		222	2102	2059	47
Rivera	1		58430			23	216	25	5
Salto	2	8410	29110	18145		68	637	628	14
San José	2	68760	120900			315	2991	3009	66
Soriano	1	11195	5590	215		46	437	487	10
Tacuarembó	2	161280	24515			639	6058	6946	134
PAÍS	45	1752325	1767185	214815	34765	7803	73952	79117	1640

Del total de los residuos sólidos orgánicos, el contenido ruminal y el estiércol de los corrales representa cerca del 90% del volumen total. El 10% restante corresponde a residuos de rejas, graseras y sedimentadores de la línea de aguas rojas. De acuerdo a información de INAC, por cabeza se generan 36 kg de contenido ruminal. A esto debemos sumar 5 kg por cabeza de estiércol recolectado en corrales y 4 kg por cabeza de sólidos separados en la línea de aguas rojas. En el contenido ruminal el contenido medio de sólidos secos es del 13% de los cuales el 85% son sólidos volátiles. Para el resto de los sólidos se asume un 15% de sólidos secos con 80% de sólidos volátiles. La práctica más extendida para disponer estos residuos es su vertido en el campo, aunque existen otras prácticas como la quema, el uso por parte de ladrilleras y para alimento de cerdos.

Tabla 2.7 Índices de generación de residuos de la industria frigorífica.

Residuo sólido		Índice (kg residuo/cabeza faenada)		
		Valor medio	Valor máx	Valor mín
Sólidos de tratamiento de aguas rojas	vacunos*	3.9	14.0	0.8
	ovinos	0.4	1.4	0.1
	suinos	1.3	4.7	0.3
Sólidos de tratamiento de aguas verdes	vacunos*	37.0	50.0	15.0
	ovinos	3.7	5.0	1.5
	suinos	12.0	17.0	0.5
Barros biológicos	vacunos*	43.0	50.0	30.0
	ovinos	0.4	5.0	3.0
	suinos	14.0	17.0	10.0
Residuos embalaje	vacunos*	0.8	1.3	0.2
	ovinos	0.1	0.1	0.0
	suinos	0.3	0.4	0.1

(*) o equinos

En los reactores para sólidos estos residuos pueden sufrir una reducción de hasta el 45% en su contenido de volátiles, generando 490 litros de metano por kilogramo de sólido volátil gasificado. A partir de los datos anteriores se deduce que por tonelada faenada se generan residuos sólidos orgánicos con un contenido próximo a los 10.4 kilogramos de sólidos volátiles. Mediante digestión anaerobia, por cada tonelada faenada se podría obtener 2,3 metros cúbicos de metano.

Asociada a los mataderos y frigoríficos existen industrias que procesan subproductos de la misma.

Tabla 2.8 Producción de subproductos de la industria frigorífica.

Proceso productivo	Producción (ton/año)	Consumo M.P (ton/año)
Harina de carne y hueso	84000	252000 (hueso y grasa)
Sebo	54000	
Grasas comestibles	1560	1920 (sebo)
Tripas	1300	1400
Harina de sangre	18000	

Tabla 2.9 Generación de residuos en la industria de subproductos. A partir de Diagnóstico de DINAMA 2004.

Departamento	Residuos sólidos (ton/año)					
	Barros del tratamiento de efluentes		Tierras filtrantes y filtros	Restos de tripas	Sal de barrido	Grasa, carne y emulsión de grasa y proteínas hidrolizadas
	Desengrasadores	Biológicos				
Canelones	6	6	0	0	0	0
Montevideo	51	51	36	120	180	132
PAÍS	57	57	36	120	180	132

2.2.3 AVÍCOLAS

La producción avícola se encuentra concentrada mayormente en el Departamento de Canelones. Los residuos pasibles de degradación son los restos de la faena y limpieza así como los barros de los desengrasadores.

Tabla 2.10 Producción y generación de residuos en avícolas. Elaborado en base a Diagnóstico de Generación de Residuos, DINAMA 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción	Residuos sólidos (ton/año)		
		Producción (ton ave faenada/año)	Resto de faena	Plumas	Barros desengrasador
Canelones	6	50874	7631	3714	661
Lavalleja	1	461	69	34	6
Montevideo	1	1692	254	124	22
Salto	1	216	32	16	3
PAÍS	9	53243	7986	3887	692

Tabla 2.11 índices de generación de residuos de industria avícola.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/ton ave faenada)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Restos de faena	150	180	130
Plumas	73	80	71
Barros desengrasador	13		

2.2.4 PROCESADORAS DE PESCADO

Tabla 2.12 Producción y generación de residuos sólidos de la industria procesadora de pescado. Elaborado a partir de Diagnóstico de DINAMA, 2000.

Departamento	Nº Empresas	Producción	Residuos sólidos (ton/año)		
		Producción (ton pescado procesado/año)	Resto de pescado	Residuos embalaje	Barros desengrasador
Canelones	2	16985	7304	42	425
Lavalleja	1	8820	3793	22	221
Montevideo	4	38320	16478	96	958
PAÍS	7	64125	27574	160	1603

Tabla 2.13 Índices de generación de residuos de la industria procesadora de pescado.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/ton pescado procesado)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Restos de pescado	430	630	270
Residuos embalaje	2.5	2.7	2.4
Barros desengrasador	25		

2.2.5 ACEITERAS

Tabla 2.16 Producción y generación de residuos sólidos de la industria aceitera. Elaborada a partir de Diagnóstico de DINAMA, 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción	Residuos sólidos (ton/año)			
		Producción (ton/año)	Tierras de blanqueo	Residuos de embalaje	Barros de PTE	Cenizas
Montevideo	1	24000	96	115	890	87
Treinta y Tres	1	2400	187	1		1500
PAÍS	2	26400	283	116	890	1587

Tabla 2.17 Índices de generación de residuos sólidos de la industria aceitera.

Residuo sólido		Índice (kg residuo/ton aceite refinado)	
		Valor medio	
Tierras de blanqueo	Aceite de arroz	78	
	Aceite de girasol	4	
Residuos de embalaje		0.5	
Barros de tratamientos de efluentes		37	

2.2.6 INDUSTRIA LÁCTEA

Tabla 2.18 Producción y generación de residuos sólidos de la industria láctea. Elaborado en base a Diagnóstico de DINAMA, 2000.

Departamento	Nº Empresas	Producción	Residuos sólidos (ton/año)		
		Producción (m3 leche procesada/año)	Barros del tratamiento de efluentes	Residuos de embalaje	Suero de leche m3
Canelones	1	159000	10	254	135150
Cerro Largo	1	14400	1	23	5814
Colonia	10	400750	25	641	115653
Florida	1	369600	23	591	
Maldonado	1	25200	2	40	
Montevideo	1	60000	4	96	
Paysandú	3	31270	2	50	19941
Río Negro	1	41470	3	66	24225
Rivera	1	10080	1	16	
Salto	1	16800	1	27	8721
San José	7	335640	21	537	75809
Soriano	2	28020	2	45	12113
Treinta y Tres	1	3060	0	5	1122
PAÍS	31	1495290	94	2392	398547

Tabla 2.19 Índices de generación de residuos en la industria láctea.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/m3 leche procesada)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Barros PTE	0.063	0.18	0.053
Residuos embalaje	1.6	3.1	2
	Índice (m3 suero/m3 leche procesada para quesos)		
Suero leche	0.85	0.94	0.68

2.2.7 INDUSTRIA ARROCERA

Tabla 2.20 Producción y generación de residuos en los molinos arroceros. Elaborado en base a Diagnóstico de DINAMA, 2000.

Departamento	Nº Molinos arroceros	Producción	Residuos sólidos (ton/año)	
		Arroz c/cáscara que entra a los molinos (ton/año)	Cáscara de arroz	Residuos de prelimpieza
Artigas	8	180437	36087	1985
Cerro Largo	6	270357	54071	2974
Lavalleja	2	164358	32872	1808
Montevideo	1	160190	32038	1762
Rivera	1	55382	11076	609
Rocha	5	199493	39899	2194
Salto	1	25011	5002	275
Tacuarembó	2	98853	19771	1087
Treinta y Tres	6	166145	33229	1828
PAÍS	34	1320224	264045	14522

Tabla 2.21 índices de generación de residuos en los molinos arroceros.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/ton arroz de entrada)
	Valor medio
Residuos de prelimpieza	11
Cáscara de arroz	200

2.2.8 INDUSTRIA VITIVINÍCOLA

Por tratarse de una actividad sazonal, la producción de residuos está concentrada en pocos meses del año.

Tabla 2.21 Producción y generación de residuos en la industria vitivinícola. Elaborado en base a datos de INAVI, 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción	Residuos sólidos (ton/año)		
		Producción (m3 vino/año)	Escobajos	Borras	Orujos
Canelones	164	65198	2445	2445	7335
Colonia	17	6703	250	250	755
Montevideo	68	34018	1275	1275	3825
San José	12	2413	90	90	270
Otros	18	4227	160	160	475
PAÍS	279	112559	4220	4220	12660

Tabla 2.22 Índices de generación de residuos en la industria vitivinícola. Elaborado en base a Diagnóstico de DINAMA, 2000.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/ton uva vinificada)
Escobajos	30
Borras	30
Orujos	90
Tartratos	Sin cuantificar, son mínimos
Coadyuvantes de filtración y clarificación	Sin cuantificar, son mínimos

2.2.9 MALTERÍAS Y CERVECERÍAS

Tabla 2.23 Producción y generación de residuos de malterías y cervecerías. Elaborado en base a Diagnóstico DINAMA, 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción		Residuos sólidos						
		Producción ton cebada malteada /año	Producción cerveza y malta /año	Toneladas residuos sólidos maltería			Toneladas residuos sólidos cervecería			
				Polvillo	Residuos maltería	Barros tr.efluente	Levaduras	Tierras de diatomeas	Residuos embalaje	Farelo y trubs
Colonia	1	54000		432	3726	108				
Montevideo	1	59760	87600	478	4123	120	1140	175	790	9285
Paysandú	1	117441		940	8103	235				
Lavalleja	1		30000				390	60	270	3180
PAÍS	4	231200	117600	1850	15952	463	1530	235	1060	12465

Tabla 2.23 Índices de generación de residuos en malterías.

Residuo sólido maltería	kg residuo/ton cebada malteada
Polvillo y casullo	8
Residuo maltería	69
Barros tratamiento de efluentes	2

Tabla 2.24 Índices de generación de residuos en cervecerías.

Residuo sólido cervecerías	kg residuo/ton cerveza		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Farelo y trubs	106	120	65
Levaduras	13	15	8
Tierras de diatomeas	2	3	2
Residuos de embalaje	9	12	8

2.2.10 LAVADEROS DE LANA

Tabla 2.25 Producción y generación de residuos en lavaderos de lana. Elaborado en base a Relevamiento de DINAMA, 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción	Residuos sólidos (ton/año)				
		Producción (ton lana sucia procesada/año)	Barros del sedimentador	Grasa recuperada	Barros decanter	Polvo de lana	Residuos comunes y embalajes
Flores	2	15400	462	293		246	123
Florida	2	9100	273	173		146	73
Montevideo	3	14200	426	270	576	227	114
San José	2	2350	71	45		38	19
PAÍS	9	41050	1232	780	576	657	328

Tabla 2.26 Índices de generación de residuos sólidos en lavaderos de lana.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/ton lana sucia)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Grasa recuperada	19	29	9
Barros del sedimentador	30	43	26
Barros de decanter	107		
Polvos de lana	16	34	2.5
Residuos comunes y embalajes	8	11	1

Tabla 2.27 Producción y generación de residuos en curtiembres vacunas. Elaborado en base a Diagnóstico de DINAMA, 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción cueros/año	Residuo sólido (ton/año)					
			Residuos s/curtir	Residuos curtidos	Barros tr.efluentes	Pinturas y solventes	Embalaje prod.químicos	
							Env.plás y met	Bolsa plás y cartón
Canelones	1	55045	479	116	248	5	6	2
Florida	1	375000	3263	788	1688	34	41	11
Montevideo	7	1089125	9475	2287	4901	99	120	33
Paysandú	2	1323600	11515	2780	5956	120	146	40
San José	1	229200	1994	481	1031	21	25	7
PAÍS	12	3071970	26726	6452	13824	279	338	93

Tabla 2.31 Índices de generación de residuos en curtiembres vacunas.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/cuero)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Residuos sin curtir	8.7	9.4	6.5
Residuos curtidos	2.1	2.8	1.9
Barros trat. Efluentes	4.5		
Restos de pinturas y solventes	0.09		
Envases plásticos y metálicos	0.11		
Bolsas plásticas y de cartón	0.03		

Tabla 2.32 Producción y generación de residuos en curtiembres ovinas. Elaborado en base a Diagnóstico de DINAMA, 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción	Residuo sólido (ton/año)						
		Cueros /año	Residuo s/curtir	Residuo curtido	Barros tr.efluente	Pinturas y solventes	Embalaje prod.químicos		Grasa en percloroetileno
							Env. plás y met	Bolsa plás y cartón	
Canelones	2	326460	392	108	375	6	7	2	65
Colonia	1	32400	39	11	37	1	1	0	6
Montevideo	8	928570	1114	306	1068	17	20	6	186
San José	1	384000	461	127	442	7	8	2	77
PAÍS	12	1671430	2006	552	1922	31	36	10	334

Tabla 2.33 Índices de generación de residuos en curtiembres ovinas.

Residuo sólido	Índice (kg residuo/cuero)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Residuos sin curtir	1.2	1.6	0.06
Residuos curtidos	0.3	0.5	0.2
Barros trat. Efluentes	1.2		
Grasa en percloroetileno	0.2		
Restos de pinturas y solventes	0.018		
Envases plásticos y metálicos	0.022		
Bolsas plásticas y de cartón	0.006		

2.2.13 ASERRADEROS

Tabla 2.34 Índices de generación de residuos en aserraderos. Elaborado en base a Diagnóstico de DINAMA, 2004.

Residuo sólido	Índice (ton residuo/ton M.P.)		
	Valor medio	Valor máx	Valor mín
Aserrín	0.18	0.32	0.12
Post aserrío	0.25	0.29	0.2

2.2.14 PAPELERAS

Tabla 2.35 Producción y generación de residuos de fábricas de papel y cartón. Elaborado en base a Diagnóstico de DINAMA, 2004.

Departamento	Nº Empresas	Producción		Residuos sólidos (ton/año)					
		Producción (ton/año)		Corteza	Residuos de disgregación	Lodos de disgregación	Dregs	Lodos de cal y grits	Lodos de efluentes
		Celulosa	Papel y cartón						
Canelones	1		20940		1600	3600			1200
Colonia	1	32500	56980	3210			1200	35000	sd
Soriano	1	3300	35840	1000	1500	sd			sd
PAÍS	3	35800	113160	4210	3100	3600	1200	35000	1200

2.3 RESIDUOS SÓLIDOS AGROPECUARIOS

2.3.1 CULTIVOS DE TEMPORADA

Dentro de los cultivos de temporada tenemos los cereales y los oleaginosos fundamentalmente. En los últimos años, debido al alza de los precios internacionales el cultivo de soja ha avanzado espectacularmente. La Tabla 2.4 muestra valores de la superficie sembrada y la producción para el año 2011.

Tabla 2.4 Cultivos de temporada

Período	Cultivo	Superficie (miles de ha)		Producción (miles de ton)	Rendimiento (ton/ha sembrada)
		Sembrada	Cosechable		
Primavera	Trigo	404.0	401.4	1300.7	3.22
	Cevada	61.9	61.9	186.4	3.01
	Avena	22.3	22.1	33.7	1.506
	Otros	3.9	2.9		
	TOTAL	492.1	488.2	1520.8	
Invierno	Soja	863.2	859.5	1816.8	2.105
	Girasol	10.0	9.8	9.1	0.91
	Maíz	96.0	95.6	529.1	5.51
	Sorgo	35.3	33.9	138.3	3.916
	TOTAL	1004.5	998.8	2493.3	2.482

En este tipo de producción, los principales residuos generados son la paja y los restos que quedan tras la cosecha. No constituye una práctica habitual el hecho de recoger dichos residuos, que normalmente quedan en el propio suelo y contribuyen al mismo mediante la degradación natural.

2.3.2 RESIDUOS FORESTALES

A partir de la década del 60 el desarrollo forestal en Uruguay comienza a visualizarse como viable y con posibilidades de dinamizar tanto el medio rural como la economía en su

conjunto. A fines del año 1968, se aprueba la primera Ley Forestal (N° 13.723) para promover la actividad en su fase primaria, a través de exoneraciones tributarias y líneas de crédito. En este contexto, a partir de 1990 comienza, un sostenido aumento en la plantación de árboles a gran escala. Entre los años 1990 y 2000 se forestó a una tasa promedio de casi 50 mil hectáreas por año, con un máximo de 83 mil implantadas en 1998.

Al año 2010 la superficie forestada era de 1.721.658 Ha, de las cuales 752.158 corresponden a bosques naturales y cerca de 1 millón de hectáreas a plantaciones, predominando el género eucalipto con 676.096 Há seguido por el pino con 274.568 Ha Se identifican cuatro regiones: la zona litoral oeste, con una superficie afectada con prioridad forestal de unas 250.000 Há, y aproximadamente un 40% de los suelos plantados, más del 80% de eucalipto y con destino principal la producción de pulpa de celulosa; la región norte con una superficie afectada de unas 280.000 Ha y aproximadamente un 40% de los suelos plantados, con 65% de pino y 35% de eucalipto, y destino principal la madera sólida (aserrado, debobinado); la región sureste con una superficie afectada de unas 186.000 Ha y aproximadamente un 25% de los suelos plantados, principalmente eucalipto y destino pulpa de celulosa; y región centro-este, con una superficie afectada de unas 120.000 Há y aproximadamente el 10% de ella plantado, con predominio de eucalipto y destino principal pulpa de celulosa y madera sólida (Sociedad de Productores Forestales, 2012).

La extracción actual (año 2011) es de unos 6.2 millones de metros cúbicos con destino a pulpa de celulosa, unos 2.4 millones de metros cúbicos utilizados como combustible directo y aproximadamente 1.9 millones de metros cúbicos para madera sólida (enchapados, tableros).

Entre los residuos forestales hay que distinguir los provenientes de los procesos industriales de los provenientes del manejo y de la cosecha del bosque. Estos últimos constituyen potencialmente una valiosa fuente de energía pero sin embargo es compleja la captación en función de su dispersión y la necesidad de contar con una logística operacional muy aceitada. En la industria procesadora en cambio, la biomasa se encuentra localizada en la propia industria por lo que su captación es muy sencilla.

El contenido de lignina de este tipo de residuos impide una buena metanización de los mismos, por lo que eventualmente podría ser más conveniente utilizarlos en procesos térmicos.

2.4 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los estudios más recientes en el área de residuos sólidos urbanos (RSU) fueron realizados en el marco de la realización del Plan Director de Residuos Sólidos para el Area Metropolitana (Fitchner – LKSur, 2005). Sin embargo son suficientemente generales como para que los valores de generación sean extrapolables a todo el país.

	Tasa de generación (kg/hab.d)		
	Domiciliarios	Residuos sólidos domiciliarios y de pequeños generadores	RSU
Montevideo	0.50	0.88	1.22
Canelones	0.38-0.50	0.62	0.82
San José	0.38-0.50	0.62	0.77
Area Metropolitana	0.38-0.50	0.83	1.14

Considerando que Montevideo tiene una población urbana de 1.306.082 habitantes y el resto del país una población urbana de 1.804.619 habitantes (INE, 2012) y tomando para el resto del país las tasas de Canelones, se tendría una generación de RSU de 3073 toneladas de RSU diarias en todo el país.

Hasta el momento el destino final de los RSU es hacia vertederos, más o menos controlados, o rellenos sanitarios, no realizándose ningún otro tipo de tratamiento. En Las Rosas (Maldonado) y en este último tiempo en Montevideo se extrae el biogás del relleno. La generación del biogás depende de múltiples factores: composición de los residuos, tipo de relleno, condiciones de operación, condiciones climáticas, etc. por lo que es difícil estimarla. En experiencias realizadas en Montevideo se obtuvo una velocidad de producción de 0.25 Nm³ de biogás por tonelada de residuo húmedo y por día, con un 60% de metano (López *et al.*, 1998). Según Chamy y Vivanco (2007) se generan 60 m³ de biogás por tonelada de residuo.

2.5 CULTIVOS ENERGÉTICOS

Se refieren a cultivos realizados con el objetivo de que la propia cosecha sea el sustrato de la digestión anaeróbica y de esa manera producir biogás. Hasta el momento no se ha planteado esta posibilidad en el país, pero constituye una alternativa que está teniendo mucha aceptación principalmente en Europa (Berglund y Börjesson, 2006; Smyth *et al.*, 2009; Prochnow *et al.*, 2009; Poeschl *et al.*, 2010). Teniendo en cuenta la necesidad de buscar fuentes alternativas de energías renovables y que no todas las tierras aptas para cultivo son utilizadas actualmente, puede ser una alternativa a analizar. Por ejemplo, en Europa, del total de las tierras arables se propone destinar entre un 10 y un 30% para cultivos destinados a la producción de energía (AEBIOM, 2011). En términos de país también correspondería evaluar si el ahorro derivado de disminuir la importación de combustibles fósiles no compensa la eventual sustitución de tierra actualmente dedicada a otros usos productivos para ser utilizada en cultivos energéticos.

3 POTENCIAL DE METANIZACIÓN

El grado de metanización de un sustrato orgánico depende de las condiciones en las que se esté llevando a cabo el proceso, tipo de reactor, tiempo de residencia si el sistema es continuo, tiempo de reacción si es discontinuo, temperatura, grado de mezcla, microorganismos presentes, etc. El grado de metanización es función de la biodegradabilidad anaeróbica del sustrato pero también tiene en cuenta que no todo el sustrato se transforma en biogás, una parte en el entorno del 10% se transforma en nuevos microorganismos. Experiencias llevadas a cabo en distintas condiciones y a distintas escalas permitirían encontrar las condiciones óptimas de degradación y en consecuencia el potencial de metanización. De la revisión de la bibliografía pueden obtenerse valores para los distintos tipos de residuos (probablemente en distintas condiciones). Con ellos puede estimarse entonces la degradación por unidad de masa de residuos (expresada como DQO o SSV).

Conocidas entonces la producción de metano (o de biogás, y en este caso también el contenido de metano en el mismo) y la generación global de residuos, puede calcularse el **potencial teórico** energético máximo a partir de la metanización total de dichos residuos.

Sin embargo, está claro que, por diversos motivos, solo es posible captar una fracción del total de residuos. Siempre existen restricciones que tienen que ver con la capacidad de recolección o el eventual uso alternativo que tengan los residuos. Aplicando estas restricciones llegamos al **potencial disponible** de metanización, esto es, la cantidad de energía bajo forma de metano que hipotéticamente podría llegar a alcanzarse. En general no existe un inventario detallado que permita hacer el cálculo en forma precisa, por lo que recurriremos a la estimación de valores mínimo y máximo de captación de residuos que darán lugar a una franja posible de potencial disponible. Una primer consideración para fijar los porcentajes mínimo y máximo de captación será el observar si la generación del residuo se da en forma dispersa, relativamente agrupada o concentrada. Siguiendo ese orden, es lógico que el grado de captación de los residuos se incremente. Así por ejemplo, un residuo forestal se genera en forma muy dispersa y la fracción pasible de ser recolectada será muy pequeña; un residuo industrial probablemente se de en forma concentrada en la propia industria y por tanto relativamente fácil de captar en un alto porcentaje. Un caso intermedio puede ser el de residuos que se den en unidades productivas pequeñas pero que se puedan agrupar

geográficamente para el tratamiento en una planta centralizada. Además, como se decía mas arriba hay que considerar en cada caso las peculiaridades del residuo y eventualmente si ya tiene un destino consolidado.

Desde el punto de vista energético el biogás generado será utilizado para la generación eléctrica, la generación térmica o ambas combinadas. El **potencial técnico** corresponde entonces a la energía eléctrica y térmica que puede producirse. Habrá que considerar aquí las restricciones tecnológicas relativas a la conversión de energía y estas dependen del equipamiento y en general del tamaño (a mayor tamaño tienden a ser más eficientes).

Definido el potencial técnico, se deben considerar los aspectos relativos a la rentabilidad económica, dando lugar así al **potencial económico**, esto es, la fracción del potencial técnico que es factible económicamente de ser producida. Esto depende de numerosos factores, regionales y locales y debe ser evaluado a nivel de cada proyecto en condiciones específicas, por lo que escapa de las posibilidades de este trabajo. Además de ser económicamente factible deberán evaluarse las restricciones que establecen las normativas vigentes, restricciones logísticas y de otro tipo que dan lugar al **potencial implementable** efectivamente (que en el mejor de los casos podría coincidir con el económico).

Para el cálculo del potencial se considera la producción de residuos expresada en sólidos volátiles o en DQO y, considerando el índice de producción de metano por SV o por DQO removido se puede obtener el potencial teórico. Considerando luego los máximos y mínimos de disponibilidad de dichos residuos puede estimarse la franja de potencial disponible. En las siguientes tablas se presenta el índice de producción utilizado, que ha sido escogido según la referencia correspondiente y los porcentajes mínimo y máximo de disponibilidad que se han estimado en cada caso en base a las características particulares del residuo.

Tabla 3.1 Índices de metanización y estimación de disponibilidad de residuos sólidos de industrias procesadoras de materias primas agropecuarias.

INDUSTRIA	RESIDUO	METANIZACIÓN (L CH ₄ /kgSV)	DISPONIBILIDAD (%)		OBSERVACIONES
			MIN	MAX	
Chacinados	Restos de proceso	216	10	25	Labatut <i>et al.</i> , 2000
	Barros desengras.	278	50	80	Long <i>et al.</i> , 2012
Frigoríficos	Contenido ruminal, estiércol de corrales y sólidos de rejas	540	50	80	Bioproa, 2011
Avícolas	Restos de faena	550	10	25	Salminen y Rintala, 2002
	Desengrasador	278	50	80	Long <i>et al.</i> , 2012
Pescado	Restos de pescado	390	10	25	Mshandete <i>et al.</i> , 2004
	Desengrasador	278	50	80	Long <i>et al.</i> , 2012
Aceitera	Tierras de blanqueo	400	50	90	Agencia Anadaluz de la Energía, 2011
	Barros PTE	340	50	90	Vivanco y Chamy, 2007
Láctea	Barros PTE	340	50	90	Vivanco y Chamy, 2007
	Suero	424	5	30	Labatut <i>et al.</i> , 2000
Vitivinícola	Escobajos	180	30	50	Gunaseelan, 2004
	Borras	283	30	50	Gunaseelan, 2004
	Orujos	283	30	50	Gunaseelan, 2004
Cervecera	Res. Maltería	245	70	90	Agler <i>et al.</i> , 2010
	Barros PTE	340	70	90	Vivanco y Chamy, 2007
	Levaduras	560	70	90	Zupančič <i>et al.</i> , 2012
Textiles	Barros PTE	340	40	70	Vivanco y Chamy, 2007
Lavadero de lana	Barros sedim.	150	70	90	Estimado
	Grasa recuperada	150	70	90	Estimado
	Barros decanter	150	70	90	Estimado
Aserradero	Aserrín	64	30	50	Eleazer <i>et al.</i> , 1997
	Post aserrío	64	30	50	Eleazer <i>et al.</i> , 1997

Tabla 3.2 Índices de metanización y estimación de disponibilidad de residuos sólidos de producción hortifrutícola.

CULTIVO	RESIDUO (% prod.)	METANIZACIÓN (L CH ₄ /kgSV.)	DISPONIBILIDAD (%)		OBSERVACIONES
			MIN	MAX	
Naranja	3	250	15	25	Galí <i>et al.</i> , 2009
Mandarina	5	250	15	25	Galí <i>et al.</i> , 2009
Limón	3	250	15	25	Galí <i>et al.</i> , 2009
Pomelo	22	250	15	25	Galí <i>et al.</i> , 2009
Manzana	25	180	15	25	Galí <i>et al.</i> , 2009
Tomate	20	300	15	25	Raposo <i>et al.</i> , 2011
Zanahoria	10	300	15	25	Raposo <i>et al.</i> , 2011
Papa	15	335	15	25	Labatut <i>et al.</i> , 2011

Tabla 3.3 Índices de metanización y estimación de disponibilidad de residuos sólidos de cultivos de temporada.

CULTIVO	RESIDUO	METANIZACIÓN (L CH ₄ /kgSV.)	DISPONIBILIDAD (%)		OBSERVACIONES
			MIN	MAX	
Trigo	paja	304	10	15	Hashimoto, 1989
Maíz	paja	317	10	15	Dinuccio <i>et al.</i> , 2010
Cebada	paja	219	10	15	Dinuccio <i>et al.</i> , 2010
Girasol	paja	260	10	15	Antonopoulou <i>et al.</i> , 2010
Sorgo	paja	228	10	15	Gunaseelan, 2004
Soja	paja	260	10	15	Antonopoulou <i>et al.</i> , 2010
Caña de azúcar	paja	177	10	15	Nzila <i>et al.</i> , 2010
Arroz	paja	226	10	15	Contreras <i>et al.</i> , 2012

4 ESTIMACIÓN DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

4.1 CRITERIOS GENERALES UTILIZADOS

Las posibilidades de utilización del potencial energético del biogás son variadas y deben analizarse en cada caso concreto. La más evidente es la combustión directa en una caldera sustituyendo gas natural o fuel oil, pero esto implica la existencia de dicha caldera en el lugar de generación, más allá de la eventual articulación con el sistema de energía de la empresa. Por eso una alternativa muy buscada es la transformación en energía eléctrica, que permite una generación a distintas escalas y en forma distribuida. La energía eléctrica puede utilizarse a la interna del emprendimiento industrial o volcarse a la red pública. Aún en este caso la recuperación de calor está determinada por las características propias del emprendimiento y su ubicación respecto a los potenciales usuarios. Además debe recordarse que muchas veces parte del calor debe utilizarse en la propia calefacción del reactor.

También es posible pensar en la existencia de plantas “centralizadas”, que reciban residuos de distintos tipos y procedencias para realizar la codigestión de los mismos, generando biogás y produciendo un digestado que debería distribuirse entre los productores agrarios. Estas plantas pueden funcionar como empresa independiente dedicada específicamente al tratamiento y valorización de residuos, brindando servicios a los generadores y produciendo energía y un digestado con valor agronómico.

4.1.1 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En la utilización del biogás para generar energía eléctrica se utilizan mayoritariamente motores de combustión interna de ciclo Otto (Chamy y Vivanco, 2007; Poeschl *et al.*, 2010).

Los motores de combustión interna se fabrican en un rango de potencia amplio (desde las decenas de kW hasta 20 MW) y tienen rendimientos globales (térmico y eléctrico sumados) entre el 70 y el 80%. La transformación de la energía del combustible en energía eléctrica varía entre un 30 y un 40%; las unidades más grandes tienden a ser más eficientes. El sistema de refrigeración del motor permite recuperar parte del calor. En general se requieren dos sistemas de refrigeración, uno que opera entre los 85 y los 99°C y otro que opera entre 70 y 40°C, que enfrían los cilindros del motor el aceite refrigerante y el aire de entrada. Pueden representar alrededor del 30% de la energía suministrada al motor por el combustible. La otra posibilidad de recuperar calor la representan los gases de escape que salen a temperaturas entre 350 y 550°C y representan entre un 25 y 35% de la energía aportada por el combustible (Chamy y Vivanco, 2007). Eventualmente pueden utilizarse circuitos de refrigeración con intercambiadores externos, inclusive acoplados con calderas de recuperación acuotubulares.

Otra posibilidad de conversión a energía eléctrica es la utilización de microturbinas, tecnología que rápidamente está perfeccionándose y bajando de costo y que resulta bastante flexible y apropiada para pequeños emprendimientos. Alternativamente se está trabajando también en las denominadas celdas de combustible o “fuel cell” que transforman directamente el metano en energía eléctrica combinando procesos electroquímicos y microbiológicos (Noll, 2006).

Para el cálculo del potencial se ha considerado la utilización de motores de combustión. Si bien la eficiencia de los motores ha aumentado en los últimos años, a los efectos de la estimación del potencial se ha querido ser conservador. Como criterio de estimación en los casos que implicarían motores relativamente pequeños se ha supuesto una eficiencia de transformación a energía eléctrica de 30% y en los casos donde se podría colocar un motor grande se ha tomado un 35% de eficiencia.

Chamy y Vivanco (2007) proponen la siguiente expresión empírica que relaciona la eficiencia de conversión a energía eléctrica en función de la capacidad eléctrica del motor:

$$\text{Rendimiento eléctrico (\%)} = 0.0306 \times \ln(\text{kWe}) + 0.1828$$

El potencial energético del metano es de 34.7 MJ/Nm³ y conocido el caudal de metano puede calcularse el potencial energético disponible en cada caso.

4.1.2 POTENCIAL CALÓRICO

Partiendo de la base de que se implementan motores de combustión interna para la conversión a electricidad, los sistemas de refrigeración del motor y de enfriamiento de los gases permiten el aprovechamiento calórico. A los efectos de la estimación del potencial se supuso una eficiencia de recuperación entre el 35 y el 40% según el tamaño eventual del sistema.

Las posibilidades de uso de este calor dependerán fuertemente de las condiciones particulares del emprendimiento. Posiblemente parte del potencial de calor deba usarse para mantener la temperatura de los propios digestores y eventualmente el sobrante podría usarse para otros objetivos siempre y cuando esto sea factible en las condiciones concretas. Si se trata de un establecimiento industrial esto es mucho más factible que en el caso de que se esté considerando aisladamente una planta que procese residuos o un establecimiento agropecuario por ejemplo.

4.2 RESULTADOS

La Figura 4.1 muestra los resultados del potencial de los residuos sólidos de las agroindustrias. Se observa la predominancia de la industria láctea y esto se debe a la inclusión del suero (en la hipótesis de que va a ser tratado en un digestor de sólidos) como potencial sustrato para la metanización. Dado que no existe una política clara sobre la utilización del suero, este resultado hay que considerarlo con precaución ya que solo reflejaría la realidad si se tomaran decisiones explícitas y programadas en las industrias. Obsérvese que se ha tomado un mínimo de 5% de captación de suero, que correspondería a la fracción que aún en la hipótesis de mayor utilización igualmente se descartaría, y como máximo un 40% que correspondería a una política explícita de valorización energética de este subproducto.

Sin considerar la industria láctea, el mayor potencial se genera en la industria frigorífica. En su conjunto (considerando bovinos, ovinos y equinos) alcanzan entre el 31% y el 47% del potencial de producción de metano del sector agroindustrial. Buena parte de la producción se

genera en industrias relativamente grandes, por lo que sería factible pensar en la implantación de sistemas de metanización de esos residuos.

En la Figura 4.2 se muestra el potencial de metanización de residuos de cultivos hortifrutícolas, En general se trata de residuos de poda, descarte de frutos, etc., muchas veces en un contexto de productores medianos y pequeños. La implementación de su captación para la metanización no siempre será viable con la infraestructura actual, pero podrían aportar en el caso de que existiesen plantas centralizadas que recibieran diversos tipos de residuos.

La Figura 4.3 muestra el potencial que se genera a partir de los restos de cosecha de cultivos de temporada. En general la práctica habitual no implica la recolección de estos residuos y buena parte de ellos se dejan directamente en el campo, por lo que habría que cambiar las prácticas usuales y eso puede chocar contra otros objetivos, particularmente agronómicos y de manejo del suelo.

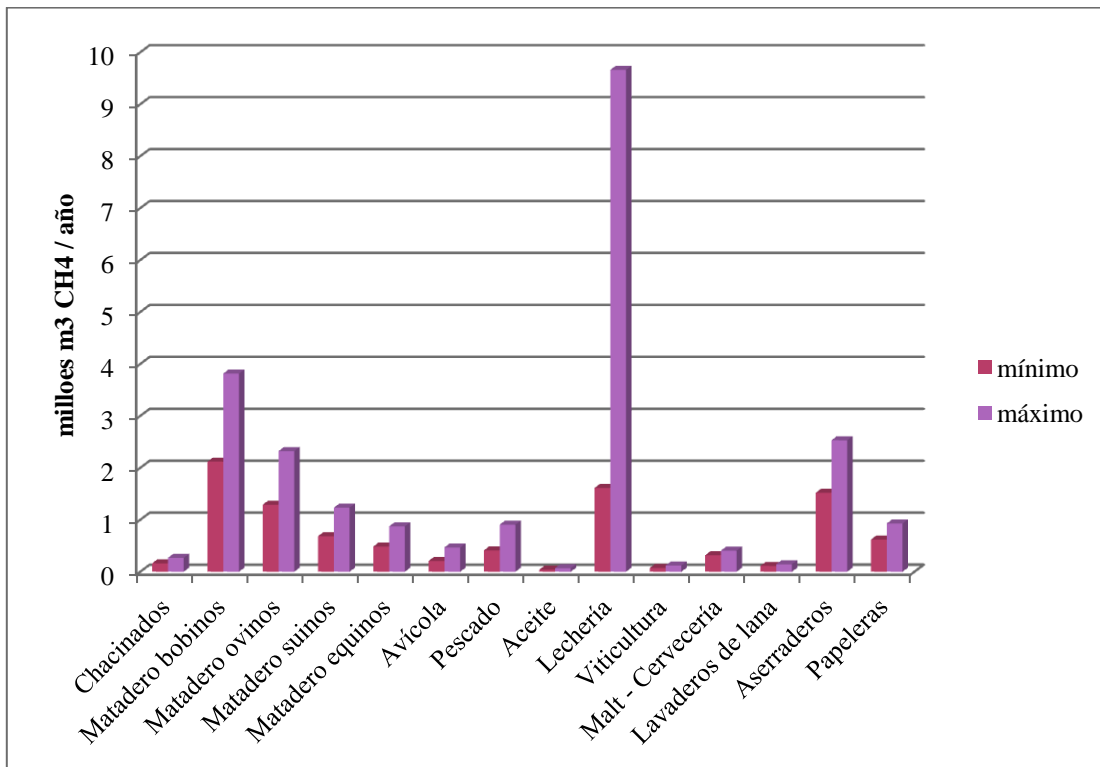


Figura 4.1 Potencial de producción de metano en agroindustrias.

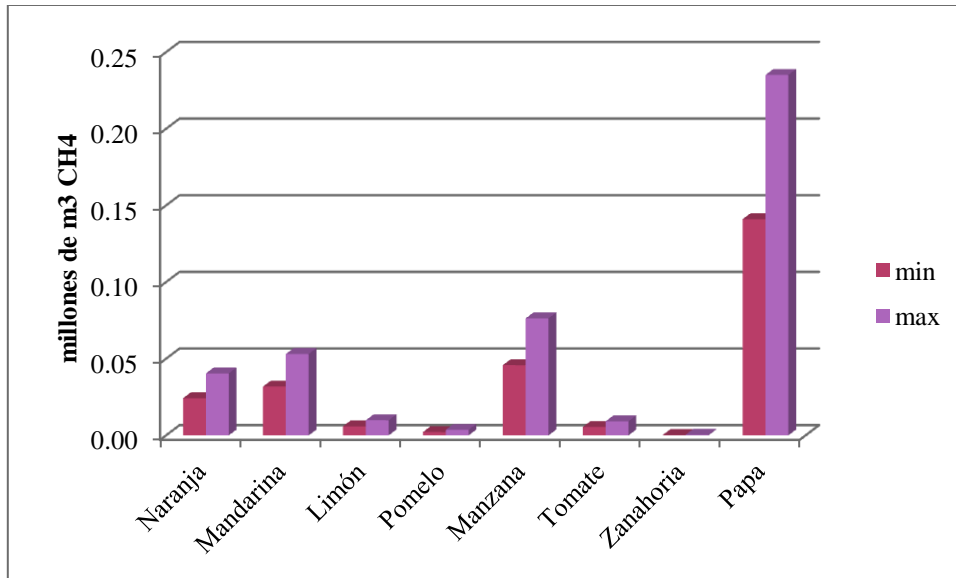


Figura 4.2 Potencial de producción de metano en residuos de cultivos hotifrutícolas.

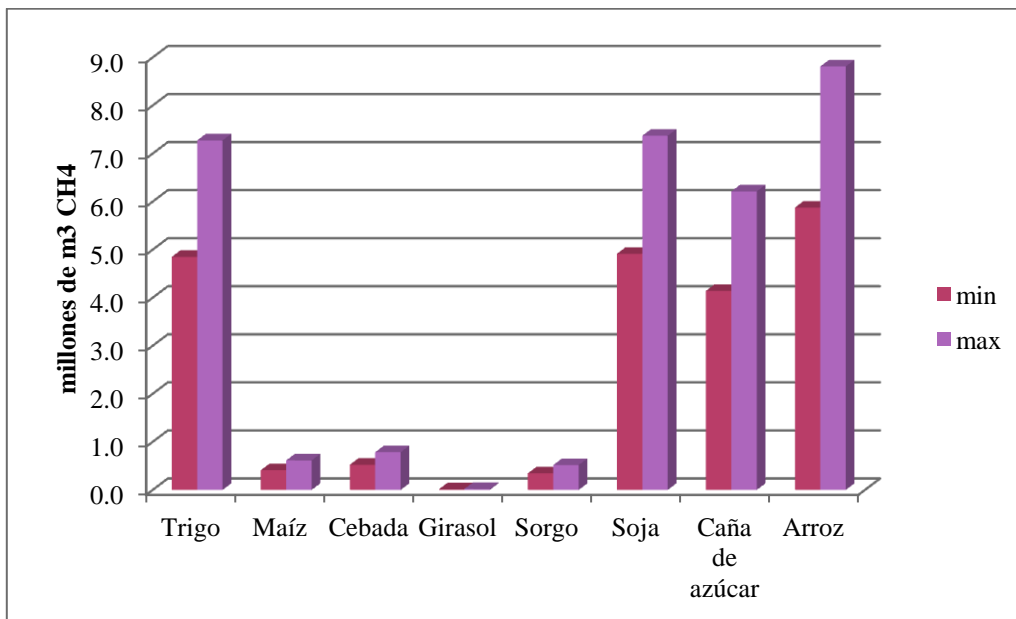


Figura 4.3 Potencial de producción de metano en residuos agrícolas de cultivos de temporada.

La Figura 4.4 y la Tabla 4.1 muestran el potencial de cada grupo de residuos anteriores junto con los de otros residuos particulares y efluentes líquidos de especial interés. Dentro de la categoría “Estiércol” se ha considerado el estiércol generado en los tambos y también en

otros establecimientos de engorde a corral (“feed lots”), considerando la situación actual. En los establecimientos tradicionales, basados en el pastoreo en campo, solo es posible recoger una fracción de las excretas de los animales, en los momentos en que éstos están en la sala de espera para el ordeño. Por otra parte, muchos establecimientos de engorde a corral actualmente instalados no han previsto un sistema para la captación regular de las excretas, por lo que es prácticamente imposible captar el sustrato fresco. No obstante, esta es una categoría que está teniendo cambios muy importantes en los últimos tiempos debido a la aparición de tambos estabulados con miles de cabezas, donde es posible recoger la totalidad de las excretas y también por el crecimiento muy importante del número de feed lots para carne. Por lo tanto la contribución de la categoría “estiércol” puede crecer en forma importante. Por ejemplo cada 1000 cabezas de ganado estabulado, considerando una captación de las excretas del 90%, se generarían unos 200.000 m³ de metano por año, y 70 kW de potencia eléctrica instalada.

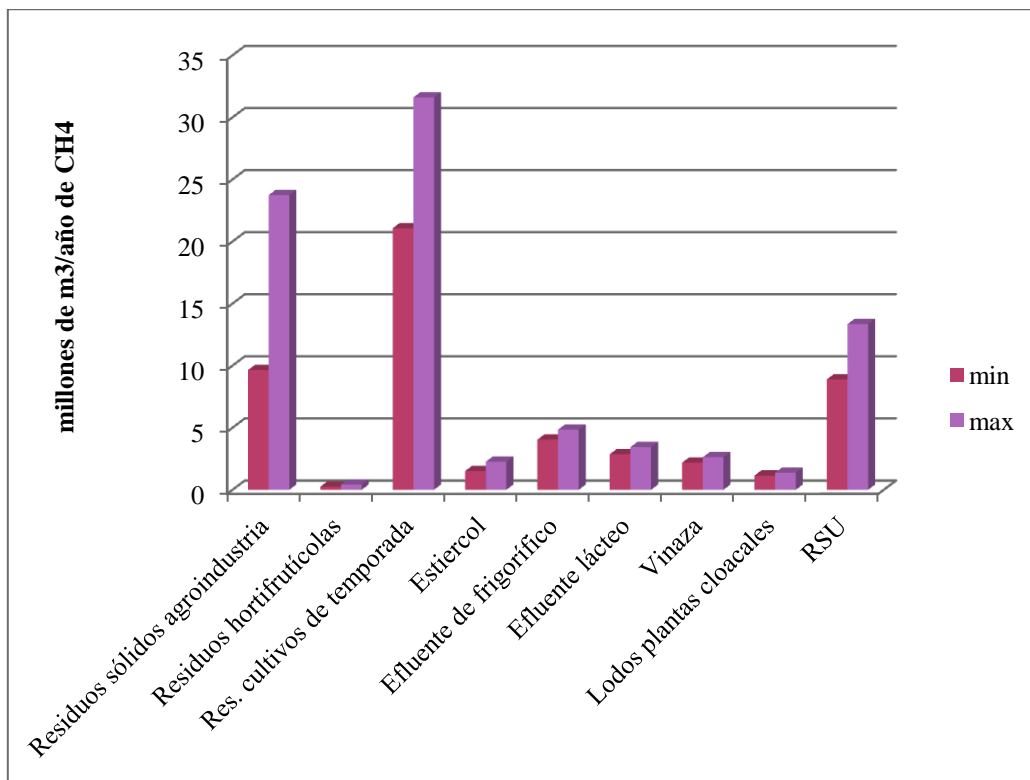


Figura 4.4 Producción de metano a partir de distintos residuos. Estimación de mínima y de máxima.

De los efluentes líquidos se destacan particularmente por su volumen en el país los de la industria frigorífica y la industria láctea. Se trata de efluentes relativamente concentrados que normalmente han sido tratados mediante sistemas de lagunas, pero que podrían ser tratados en sistemas de reactores con captación de biogás, si se resuelven ciertos problemas específicos de cada efluente. El caso de la vinaza de destilería también se destaca por tratarse de un efluente con una elevadísima concentración. En la actualidad hay una planta en Bella Unión y se está proyectando otra en Paysandú.

Las plantas de tratamiento de aguas cloacales son mayoritariamente aerobias en la actualidad y generan lodos que pueden digerirse anaeróbicamente con producción de biogás. Se ha considerado la situación actual en materia de plantas construidas por OSE; en la medida de que se construyan más plantas aerobias por el aumento en la cobertura podría crecer el potencial.

Tabla 4.1 Potencial de los principales tipos de residuos, capacidad de generación de electricidad y calor.

	Metano (millones de m ³ /año)		Energía eléctrica (GWh/año)		Potencia eléctrica (MW)		Calor (TJ/año)	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Residuos sólidos agroindustria	10	24	30.6	75.4	6.9	14.0	129	309
Residuos hortifrutícolas	0.3	0.4	0.8	1.3	0.1	0.1	3	5
Res. cultivos de temporada	20	29	58.2	87.2	6.3	9.5	247	371
Estiercol	1.5	2.3	4.4	6.5	0.5	0.7	18	27
Efluente de frigorífico	4.0	4.9	13.6	16.4	1.6	1.9	49	59
Efluente lácteo	2.9	3.4	9.1	10.9	1.0	1.2	35	42
Vinaza	2.2	2.6	7.4	8.9	0.8	1.0	27	32
Lodos plantas cloacales	1.1	1.4	3.9	4.7	0.4	0.5	94	113
RSU	8.9	13.3	30.0	45.0	3.4	5.1	108	162
total	52	84	162	263	21	34	649	1052

Finalmente los residuos sólidos urbanos (RSU) constituyen un sustrato importante para la metanización, ya sea que se los disponga en rellenos sanitarios con captación de biogás o se los trate en biodigestores. Cualquiera de las dos opciones implica una propuesta clara en materia de gestión de RSU y la inversión en obras de infraestructura, ya sea nuevos rellenos o digestores.

Analizando los resultados vemos que el potencial total de producción de metano, entre 52 y 84 millones de metros cúbicos al año corresponde a una cifra equivalente a 1.3 a 2.1% de la energía primaria total que maneja el país. Si analizamos el potencial de generación de energía eléctrica los 21 a 34 MW de potencia representan entre el 1.9 y el 3.0% de la demanda media.

Podemos comparar estos resultados con valores de otros países obtenidos en estudios de características similares. Por ejemplo Chamy y Vivanco (2007) estiman un potencial de capacidad instalable para generación eléctrica de alrededor del 3.5% de la capacidad de Chile en ese momento. Gómez *et al.* (2010) reportan que la digestión anaerobia de RSU, lodos de aguas cloacales y excretas animales podría representar el equivalente al 2.82% de la generación eléctrica en España y a un 2.0% de la energía primaria consumida. Ribeiro y Silva (2009) indican que entre el 1.16 y el 1.24% de la energía eléctrica de Brasil podría generarse a partir de la digestión anaerobia de vinaza, cloacales, excretas y relleno sanitario. Según Poeschl *et al.* (2010b) la generación de electricidad a partir de biogás en Alemania en el año 2008 equivalía al 1.6% de la demanda y el potencial técnico permitiría multiplicar por seis la producción.

En los resultados globales obtenidos para nuestro país no ha sido considerada la posibilidad de digerir anaeróbicamente “cultivos energéticos”, como se hace en varios países europeos, particularmente en Alemania, en co-digestión con excretas de animales. Una variable importante en este caso es el rendimiento agronómico de los cultivos; considerando un valor conservador de 3 toneladas de materia seca por hectárea y por año (Smyth *et al.*, 2009, consideran cuatro veces más, 12 tMS/ha.año), un 90% de SV y una producción de 250 m³CH₄/tSV año (Smyth *et al.*, 2009, consideran como promedio 300 m³CH₄/tSV año), se obtendrían 675 m³CH₄ por hectárea y por año. Si tenemos en cuenta los requerimientos energéticos para la operación agrícola (12% del total), el pretratamiento y mezclado de los residuos (5%), los requerimientos energéticos del digestor (15%) y el transporte del digestado (3%) (siguiendo a Smyth *et al.*, 2009), la energía neta es un 65% que equivale a 15.3 GJ o bien 366 kep. Dependiendo de la superficie que eventualmente se destinara a dichos cultivos podría incrementarse significativamente el potencial de biogás. Tomando como base la energía primaria total utilizada en el año 2011 (3413 ktoep) se requerirían unas 93.000 hectáreas por cada punto porcentual de dicha cantidad. Por ejemplo con una superficie equivalente a la mitad de lo que hoy se dedica a pradera mejorada podría generarse el 12% de la energía primaria del país. Estos números pueden mejorarse si se incrementa la productividad agronómica.

5 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS PRELIMINARES

5.1 COSTOS

El estudio de costos debe hacerse sobre cada proyecto concreto; aquí presentaremos algunos elementos tomados de la bibliografía que pueden ayudar a hacer estimaciones preliminares.

5.1.1 COSTOS DE INVERSIÓN

Motor de cogeneración – Lantz (2012) propone la siguiente ecuación en función de la capacidad eléctrica instalada:

$$C_{MC} (\text{€/kWe}) = 4639 C_e^{-0.333}$$

Donde C_e es la capacidad eléctrica instalada en kWe y C_{MC} es el costo en euros del motor de cogeneración para las plantas combinadas de potencia y calor (CHP). Para microturbinas de gas el mismo autor indica un costo de entre 800 y 1800 €/kW para instalaciones menores a 1 MWe y de aproximadamente 1360 €/kW para una turbina de 100 kW.

Conexión a la red – Chamy y Vivanco (2007) los estiman para la realidad chilena en U\$S 10.000, pero esto puede variar según las circunstancias del caso.

Costo del digester y otros equipos de planta – Según Chamy y Vivanco (2007) estos costos (sin considerar el motor de cogeneración) se calculan de acuerdo a un valor de U\$S 2000 / kWe. Por ejemplo para una planta de 2000 kWe de potencia instalada serían unos 4 millones de dólares.

Costo de edificación - Se estima como un 10% de los costos del motor de cogeneración, el digestor y el resto de los equipos. En el ejemplo de 2000 kWe de potencia instalada serían unos U\$S 490.000.

Costos de conexión a red de vapor – Se estiman en U\$S 20.000, independientemente de la capacidad instalada.

Costos de planificación, permisos, etc - Se estiman en un 10% de la suma de los demás costos.

5.1.2 COSTOS DE OPERACIÓN

Costos de mantenimiento del motor – Según Lantz (2012) los costos anuales se pueden estimar según la expresión

$$C_m (\text{€/kWh}) = 4.9406 C_e^{-0.2219}$$

Según Lantz (2012) es necesario renovar el motor luego de unas 25000 a 35000 horas cuando se trata de motores con ignición por compresión y en el caso de los motores con ignición por bujía, que suelen ser algo más costosos, unas 80000 horas si se les hace una revisión de mantenimiento intermedia, cuyo costo se puede estimar en $P (\text{€}) = 7977 C_e + 16534$. Los costos generales de mantenimiento los estima entre 13 y 25 €/MWh, dependiendo de la escala.

Si el mantenimiento se hace por cuenta propia, excluyendo los costos de mano de obra el costo de mantenimiento puede estimarse en unos 4 €/MWh, y el tiempo requerido para mantenimiento es en promedio de 1 a 1.2 horas por semana. Alternativamente el costo de mantenimiento puede estimarse en un 4% del costo de inversión original.

Para las microturbinas el autor estima una vida útil de aproximadamente 80000 horas y el costo de mantenimiento es de unos 4 €/MWh para una turbina de 100 kW y de unos 10 €/MWh para una turbina de 60 kW.

Costos de mantenimiento de equipos - Se estiman según los mismos autores en un 2% de los costos de inversión.

Costos de personal – Variará según el lugar pero pueden estimarse en promedio a 8 U\$S/hora.

5.1.3 OTRAS APROXIMACIONES PARA EL CÁLCULO DE COSTOS

Murphy y Power (2009) presentan las siguientes ecuaciones para el cálculo de costos para digestores de residuos sólidos de tipo DRANCO:

Costos de capital para la producción de biogás, la depuración del mismo y la compresión en Euros por tonelada al año

$$C_c = 300666 x^{-0.5967}$$

donde x es la cantidad de residuos tratados en toneladas por año. Los costos operativos, en Euros por tonelada serían

$$O_c = -7.8241 \ln(x) + 115.44$$

A su vez, Murphy y McKeogh (2004) plantean un costo para las plantas combinadas de potencia y calor (CHP) que va desde los 2500 €/kWe para plantas de pocas decenas de kWe a unos 1500 €/kWe para 100kWe y poco más de 1000 €/kWe para 500 kWe. Los costos de operación para la planta CHP los estiman en € 0.01/kWh. En el caso de uso como combustible para transporte estiman los costos de capital para el depurador de biogás en € 7860 por m³ de biogás enriquecido en metano por hora y los costos operativos de este equipo en € 0.03 por m³ de biogás enriquecido en metano.

Para plantas agroindustriales (excretas de animales más cultivos energéticos) incluyendo digestor y CHP, Goulding y Power (2013) presentan la siguiente expresión:

$$C_c = 21080 x^{-0.5367}$$

con el costo en €/tpa y x , la cantidad de excretas y cultivos energéticos tratada en toneladas por año (tpa). Los mismos autores plantean, para el caso de utilización en transporte, los siguientes costos expresados en € por tonelada de alimentación: sistema de depuración, 61.67; unidad de compresión 6.48; estaciones de distribución: 71.40. Englobando todos los

pasos el costo de capital para una planta que biometaniza residuos sólidos agroindustriales para producir biometano para transporte los expresan según:

$$C_c = 1066.2 x^{0.8455}$$

con C_c en €/tpa y x en tpa.

5.2 CONSIDERACIONES SOBRE LA FACTIBILIDAD DE GENERAR ENERGÍA A PARTIR DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE CULTIVOS ENERGÉTICOS

La posibilidad de utilizar cultivos con fines directamente energéticos, esto es, cultivar para alimentar con esos cultivos digestores de sólidos, abre en primer lugar la polémica en torno al uso de la tierra y la competencia con la producción de alimentos. Sin embargo mirando desde un punto de vista más global las necesidades energéticas también deben ponderarse, y particularmente la necesidad de sustituir combustibles fósiles. Mirado desde un enfoque país también debería tenerse en cuenta los recursos que se captan con las exportaciones de alimentos y los que se gastan con la importación de energía.

Un análisis somero del uso de la tierra nos indica que puede haber margen para realizar determinadas modificaciones sin que se afecte negativamente la producción de alimentos. De los 17.6 millones de hectáreas de la superficie terrestre del país, 16.4 están dedicados a actividades agropecuarias. De ellos, 13.2 millones de hectáreas están dedicados a la cría de ganado bovino y ovino mayoritariamente, y solo un 17% de estas últimas constituye las praderas mejoradas o campos destinados a cultivo de forraje. Parecería haber margen para incrementar esta proporción aún en zonas y con especies en las que la productividad no sea demasiado elevada. Smyth *et al.* (2009), analizando el caso de Irlanda asumen productividades de 12 toneladas de materia seca por hectárea y por año, pero esto puede variar según el tipo de suelo, la variedad seleccionada y la modalidad de cosecha. Colocándonos en una posición conservadora tomaremos el valor de 3 toneladas de materia seca por hectárea y por año. Asumiendo un contenido de sólidos volátiles del 90% y una producción de 250 m³CH₄/ton SV, tendríamos una producción de 675 m³CH₄/año por cada hectárea, que equivalen (descontando los requerimientos del sistema) a una energía neta de 366 kep.

En el año 2010 se gastaron 1152.1 millones de dólares en importación de petróleo crudo que corresponden a un equivalente energético de 1950.8 ktep; resulta un costo de 0.59 U\$S/kep. En la producción de electricidad se consumieron el equivalente a 265.6 ktep de fuel oil, diesel oil y gas oil en ese año. Considerando la producción de biogás por hectárea se necesitarían 0.73 millones de hectáreas para cubrir esa producción de electricidad. Esto, con ser una superficie importante representa solo 6.7% de la superficie destinada a cría de ganado en pradera natural (no mejorada). Parecería ser una cantidad suficientemente pequeña como para no implicar grandes distorsiones en el esquema de producción actual.

¿Cuánto se obtiene por cada hectárea si la producción ganadera correspondiente se exporta? En el año 2010 se exportaron 1129 millones de dólares en carne bovina, 232 millones de dólares en cueros, 199 millones de dólares en lanas, 138 millones de dólares en bovinos en pie, 78.7 millones de dólares en carne ovina y 0.65 millones de dólares en ovinos en pie, o sea un total de 1777 millones de dólares generados en 13.2 millones de hectáreas. Considerando que de la carne bovina el 40% y un 45% de la ovina se destinó al mercado interno y asumiendo que el resto de la producción se exportó, se llega a un ingreso bruto por exportaciones de U\$S 197 por hectárea. Por otro lado si miramos la sustitución de importación de petróleo crudo que se destinó a electricidad, al utilizar cultivos energéticos se estaría evitando de importar U\$S 216 por hectárea.

Los cálculos anteriores constituyen sin duda una aproximación muy gruesa a la realidad y no tienen en cuenta infinidad de aspectos concretos que habría que profundizar, tales como las posibilidades agronómicas de los suelos, productividades de especies, infraestructura logística para la captación y el procesamiento, inversiones necesarias, aspectos sociales y culturales, etc. Sin embargo indican que la producción de energía a través de la metanización de cultivos no necesariamente es un planteo descabellado para la realidad uruguaya y en un marco de aumento de los precios del petróleo, que puede ser viable económicamente (habría que hacer los correspondientes estudios de inversión) y que tampoco implica una distorsión demasiado grande del esquema productivo tradicional.

6 CONCLUSIONES

La aplicación de la tecnología anaerobia presenta un potencial interesante en el Uruguay. Debido a su matriz productiva la generación de residuos líquidos y sólidos con importante contenido de materia orgánica convierten a esta tecnología en una opción clara para el tratamiento de los mismos. Desde el punto de vista energético los tratamientos anaerobios no solamente tienen un consumo pequeño de energía para su funcionamiento sino que, al generar biogás, se convierten en una opción interesante para la valorización energética de la materia orgánica. Se alcanzan así dos objetivos, la reducción de los impactos ambientales de los vertidos sobre el medio receptor y la generación de energía renovable.

La contribución de la energía obtenida mediante digestión anaerobia de residuos no tiene mayor incidencia en la matriz energética nacional, alcanzando potencialmente a valores entre el 1 y el 2% de la energía primaria total. No es esta una particularidad del país pues se encuentran valores comparables en otras regiones. Sin embargo debe recordarse que, en general, de todas maneras deben realizarse inversiones para realizar el tratamiento de dichos residuos y entonces estas pueden aprovecharse para generar además energía y así contribuir a mejorar la ecuación económica, además del ahorro en combustibles fósiles que ello implica.

Las posibilidades reales de implementación dependen mucho de la capacidad para recoger los residuos. Así en la actividad industrial la captación es relativamente fácil en general y pueden implementarse soluciones en la propia industria, que a la vez de tratar los residuos permitan aprovechar internamente la generación de energía o eventualmente convertirla en energía eléctrica y volcarla a la red pública. En otros casos, como los residuos forestales o de la actividad agrícola, la recolección en general es difícil y no entra dentro de las prácticas habituales por lo que la capacidad de utilización real es mínima.

En los casos de industrias en general se puede pensar en reactores o digestores dentro del propio emprendimiento industrial. Algunas industrias se destacan por su importancia tales como la industria frigorífica, la industria láctea y la producción de bioetanol. Particularmente

se trata de establecimientos industriales donde podría implementarse sin mayores restricciones la tecnología.

En otros casos, como por ejemplo los residuos agrícolas, la solución pasará por una planta centralizada que reciba residuos de distintos orígenes, los procese, genere energía eléctrica y un digestado que pueda utilizarse como acondicionador de suelos.

La realidad productiva está cambiando aceleradamente en algunas áreas; por ejemplo el crecimiento de establecimientos con ganado estabulado plantea el desafío de la gestión de dichos residuos y puede implicar un aumento importante en la capacidad de generación de metano.

Las decisiones políticas que se tomen respecto a los residuos sólidos urbanos va a afectar en forma importante el hecho de que pueda pensarse en ese tipo de residuos como potencial fuente de biogás.

Por último, la consideración de cultivos plantados específicamente con el propósito de la biometanización, más allá de las discusiones que puedan darse sobre el uso de la tierra, si podría tener un impacto significativo sobre la matriz energética.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AEBIOM (European Biomass Association) (2011) 2011 Annual Statistical Report on the contribution of Biomass to the Energy System in the EU27.
- Antonopoulou, G., Stamatelatos, K., Lyberatos, G. (2010) Exploitation of rapeseed and sunflower residues for methane generation through anaerobic digestion: the effect of pretreatment, 2nd International Conference on Industrial Biotechnology (IBIC 2010), 11- 14 April, 2010 - Padua, Italy
- Agencia Andaluza de la Energía (2011) Estudio básico del biogás, http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/estudio_basico_del_biogas_0.pdf (accedida el 11/12/2012).
- Agler, M.T., Aydinkaya, Z. Cummings, T.A., Beers, A.R., Angenent, L.T. (2010) Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: a comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures, *Bioresource Technology*, **101**, 5842-5851.
- Ahring, B.K., Westermann, P. (2004) Redefining the role of anaerobic digestion, en *Proceedings del 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, Montreal, Canadá, octubre 2004, p.1145.
- Benemann, J.R., Cannizzaro, C.M., Cooney, M. (2004) Biological production of hydrogen-methane mixtures for clean electricity, en *Proceedings del 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, Montreal, Canadá, octubre 2004, p.654.
- Berglund, M., Börjesson, P. (2006) Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production, *Biomass and Bioenergy*, **30**, 254-266.
- Borzacconi, L., López, I. (1994), Relevamiento de reactores anaerobios en América Latina, en *Tratamiento Anaerobio*, Viñas, Soubes, Borzacconi y Muxi eds., Montevideo.
- Borzacconi, L., López, I., Gazzola, A., Anido, C. (1998) Estimación de la producción de biogás en un relleno sanitario, Memorias del XXVI Congreso Interamericano de AIDIS, Lima, Perú.
- Borzacconi, L., López, I., Mallo, M., Martínez, J. (1999). Potential biogas production from sludges and MSW in Uruguay, ORBIT 99, Papadimitriou y Díaz (eds.), Weimar, Alemania.
- Borzacconi, L., López, I., Passetgi, M. (2004) Potencial para la producción de bioenergía en Uruguay, Proceedings del International Workshop Bionergy for a Sustainable Development, 8-9 november 2004, Viña del Mar, Chile.
- Borzacconi, L., López, I., Passetgi, M. (2006) Start up and steady state results of a full scale UASB reactor treating malting wastewater, *Wat. Sci. & Tech.*, **54** (2), pp. 261-268.
- Cakir, F. Y., Stenstrom, M.K. (2004) Greenhouse gas production: a comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology, en *Proceedings del 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, Montreal, Canadá, octubre 2004, p.1058.

- Caners, C., Wheeldon, I., Peppley, B., Karan, K. (2004) Treatment and utilization of wastewater plant biogas as fuel for a solid oxide fuel cell, en *Proceedings del 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, Montreal, Canadá, octubre 2004, p.1089.
- Castelló, E., García y Santos, C., Iglesias, T., Paulino, G., Wenzel, J., Borzacconi, L., Etchebehere C. (2009) Feasibility of biohydrogen production from cheese whey using a UASB reactor: Links between microbial community and reactor performance. *Int J of Hydrogen Energy*, **34** (14), 5674 – 5682.
- Chamy, R., Vivanco, E. (2007) Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás, *Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (Comisión Nacional de Energía / Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH*.
- Chang, F.Y., Lin, C.Y. (2004) Biohydrogen production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor, *Int. J. Hydrogen Energy*, **29**, 33–39.
- Contreras, L.M., Schelle, H., Sebrango, C.R., Pereda, I. (2012) Methane potential and biodegradability of rice Straw, rice husk and rice residues from the drying process, *Wat. Sci. Tech.*, **65** (6), 1142-1149.
- Davila-Vazquez, G., Alatríste Mondragón, F., de León-Rodríguez A., Razo-Flores E. (2008) Fermentative hydrogen production in batch experiments using lactose, cheese whey and glucose: Influence of initial substrate concentration and pH. *Int J of Hydrogen Energy*, **33**, 4989 – 4997.
- Davila-Vázquez, G., Cota-Navarro, C., Rosales-Colunga, L., de León-Rodríguez, A., Razo-Flores, E. (2009) Continuous biohydrogen production using cheese whey. Improving the hydrogen production rate. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 4296–4304.
- De Baere, L. (2000), Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art, *Water Science and Technology*, **41** (3), 213-222.
- De Baere, L., Mattheeuws B. (2008) State of the art 2008 – Anaerobic digestion of solid waste, *Waste Management Word*, **9** (4), <http://www.waste-management-world.com/articles/print/volume-9/issue-4/features/state-of-the-art-2008-anaerobic-digestion-of-solid-waste.html> (accedida el 20/2/2013).
- Dinuccio, E., Balsari, P., Gioelli, F., Menardo, S. (2010) Evaluation of the biogás productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses, *Bioresorce Technology*, **101**, 3780-3783.
- DNE (Dirección Nacional de Energía – Ministerio de Industria, Energía y Minería), 2012, <http://www.miem.gub.uy/gxpsites/hgxpp001?5,6,236,O,S,O,MNU;E;72;1;73;3;MNU> (accedida el 14/8/2012).
- Eleazer, W.E., Odle, W.S., Wang, Y.S., Barlaz, M.A. (1997) Biodegradability of municipal solid waste componentes in laboratory-scale landfills, *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 911-917.
- Fitchner – LKSur (2005) Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Area Metropolitana.
- Foresti, E. (2001) Perspectives of anaerobic treatment in developing countries, *Water Science and Technology*, **44** (8), 141-148.
- Frankin, R.J. (2001), Full-scale experiences with anaerobic treatment of industrial wastewater, *Wat. Sci. & Tech.*, **44** (8), 1-6.

- Gabinete Productivo (2009) Cadenas de Valor (I), ISBN: 978-9974-8191-0-8, accesible en página www.miem.gub.uy (14/8/2012).
- Galí, A., Benabdallah, T., Astals, S., Mata-Alvarez, J. (2009) Modified versión of ADM1 model for agro-waste application, *Bioresource Technology*, **100**, 2783-2790.
- Gómez, A., Zubizarreta, J., Rodrigues, M., Dopazo, C., Fueyo, N. (2010) Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain, *Renewable Energy*, **35**, 498-505.
- Goulding, D., Power, N. (2013) Which is the preferable biogas utilization technology for anaerobic digestion of agricultural crops in Ireland: biogas to CHP or biomethane as a transport fuel?, *Renewable Energy*, **53**, 121-131.
- Gunaseelan, V.N (2004) Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks, *Biomass & Bioenergy*, **26**, 389-399.
- Guo, W., Ren, N., Wang, X., Xiang, W., Meng, Z., Ding, J., Qu, Y., Zhang, L. (2008) Biohydrogen production from ethanol-type fermentation of molasses in an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor, *Int. J. Hydrogen Energy*, **33**, 4981 – 4988
- Hallenbeck, P. (2009) Fermentative hydrogen production: Principles, progress, and prognosis, *Int J of Hydrogen Energy*, **34** (17), 7379-7389.
- Hallenbeck P. , Ghosh D. (2009) Advances in fermentative biohydrogen production: the way forward? *Trends in Biotechnology*, **27**(5), 287 – 297.
- Hammes, F., Kalogo, Y., Verstraete, W. (2000) Anaerobic digestión technologies for closing the domestic water carbon and nutrient cycles, *Water Science and Technology*, **41** (3), 203-212.
- Han, S.K., Shin, H.S. (2004) Development of an innovative two-stage process, a combination of acidogenic hydrogenesis and methanogenic, en *Proceedings del 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, Montreal, Canadá, octubre 2004, p.755.
- Hashimoto, A.G. (1989) Effect of Inoculum/substrate ratio on methane yield and production rate from straw, *Biological Wastes*, **28**, 247-255.
- Hawkes FR, Hussy I, Kyazze G, Dinsdale R, Hawkes DL. (2007) Continuous dark fermentative hydrogen production by mesophilic microflora: principles and progress. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **32**(2), 172–184.
- Holbein, B.E., Layzell, D.B. (2004) Anaerobic digestion: cornerstone and workhorse o a sustainable bionergy technology cluster, en *Proceedings del 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, Montreal, Canadá, octubre 2004, p. 1077.
- Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T., Oleskowicz-Popiel, P. (2009) The future of anaerobic digestion and biogas utilization, *Bioresource Technology* **100**, 5478-5484.
- IM (Intendencia de Montevideo, 2012) <http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/saneamiento> (accedido 21/8/2012)
- INAC (Instituto Nacional de Carnes), 2011, Anuario Estadístico 2011, accesible en http://www.inac.gub.uy/innovaportal/v/7576/1/innova.net/anuario_estadistico_2011 (accedido el 14/8/2012)

- INE (Instituto Nacional de Estadística), 2012, <http://www.ine.gub.uy/censos2011/index.html> (accedida el 14/8/2012)
- Jingura, R.M., Matengaifa, R. (2009) Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1116-1120.
- Koutrouli, E.C., Kalfas, H., Gavala, H.N., Skiadas, I.V., Stamatelatou, K., Lyberatos, G. (2009) Hydrogen and methane production through two-stage mesophilic anaerobic digestion of olive pulp, *Bioresource Technology*, **100**, 3718-3723.
- Kraemer, J.T., Bagley, D.M. (2007) Improving the yield from fermentative hydrogen production, *Biotechnol. Lett.*, **29**, 685-695.
- Labatut, R.A., Angenent, L.T., Scott, N.R. (2011) Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates, *Bioresource Technology*, **102**, 2255-2264.
- Lema, J.M., Omil, F. (2001) Anaerobic treatment: a key technology for a sustainable management of wastes in Europe, *Water Science and Technology*, **44** (8), 133-140.
- Lantz, M. (2012) The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden – A comparison of different CHP technologies, *Applied Energy*, **98**, 502-511.
- Lettinga, G. (2001) Digestion and degradation air for life, *Water Science and Technology*, **44** (8), 157-176.
- Lettinga, G., Hulshoff Pol, L. (1992), UASB process design for various types of wastewaters, en *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*, Malina y Pohland eds., Technomic Publishing Company, USA, ISBN 87762-942-0.
- Levin, D.B., Zhu, H., Beland, M., Cicek, N., Holbein, B.E. (2007) Potential for hydrogen and methane production from biomass residues in Canada, *Bioresource Technology*, **98**, 654-660.
- Lin, C.Y., Lay, C.H. (2005) A nutrient formulation for fermentative hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora, *Int J Hydrogen Energy*, **30**, 285-292.
- Lissens, G., Vandevivere, P., De Baere, L., Biey, E.M., Verstraete, W. (2001), Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion, *Wat. Sci. & Tech.*, **44** (8), 91-102.
- López, I., Martínez, J., Mallo, M., Borzacconi, L., Fuentes, I., Saldanha, M., Dellepere, A. (2000) Arranque de reactores de manta de lodos para el tratamiento de aguas domésticas a escala real en un país de clima templado, VI Latin American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion, Recife, Brasil
- López, I., Passeggi, M., Borzacconi, L., Fuentes, I., Lieberman, L. (2004), Transformación de un tanque imhoff en reactor anaerobio para tratamiento de efluente de maltería sobre la base de una experiencia piloto, Memorias del XXIX Congreso Interamericano de AIDIS, agosto 2004, Puerto Rico, edición en CD.
- López, I., Passeggi, M., Barcia, R., Borzacconi, L. (2008) Alternativa Anaerobia-Aerobia en un tratamiento de efluente a escala real: optimización energética y minimización de lodos. *Ingeniería Química*, **34**, 4-8.
- Long, J.H., Aziz, T.N., de los Reyes III, F.L., Ducoste, J.J. (2012) Anaerobic co-digestion of fat, oil and grease (FOG): A review of gas production and process limitations, *Process Safety and Environmental Protection*, **90**, 231-245.

- Malina, J.F., Jr. (1992), Anaerobic sludge digestion, en *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*, Malina y Pohland eds., Technomic Publishing Company, USA, ISBN 87762-942-0.
- Martínez, J., Mallo, M., Galisteo, M., Viñas, M. (1996) Evaluación de una planta de tratamiento de efluentes de frigorífico y matadero a escala real, Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 25, México, D.F, 2-7 nov. 1996.
- Metcalf-Eddy (2002) *Wastewater Engineering, treatment and reuse* (4th ed), Ed. McGraw-Hill, ISBN-13: 978-0071241403.
- Mshandete, A. Kivaisi, A., Rubindamayugi, M., Mattiasson, B. (2004) Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes, *Bioresource Technology*, **95**, 19-24.
- Murphy, J.D., McKeogh, E. (2004) Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste, *Renewable Energy*, **29**, 1043-1057.
- Murphy, J.D., Power, N. (2009) Technical and economic analysis of biogas production in Ireland utilizing three different crop rotations, *Applied Energy*, **86**, 25-36.
- Nishio, N, Nakashimada, Y. (2007) Recent Development of Anaerobic Digestion Processes for Energy Recovery from Wastewater, *J. of Bioscience and Bioengineering*, **103** (2), 105-112.
- Noll, K. (2006) Microbial Fuel Cells, in *Fuel cell technology: reaching towards commercialization* (Engineering materials and processes), Ed. Springer (Sammes, Nigel M., ed.), ISBN-10: 1852339748.
- Nzila, C., Dewulf, J., Spanjers, H., Kiriamiti, H., van Langenhove, H., (2010) Biowaste energy potential in Kenya, *Renewable Energy*, **35**, 2698-2704.
- OSE (Obras Sanitarias del Estado, 2012), Indicadores de cobertura, http://www.ose.com.uy/s_indicadores_cobertura.html (accedida el 20/8/2012).
- Panesar P., Kennedy J., Gandhi D. , Bunko K. (2007) Bioutilisation of whey for lactic acid production—review. *Food Chemistry*, **105**, 1-14.
- Pant., D. Adholeya, A. (2007) Biological approaches for treatment of distillery wastewater: a review, *Bioresource Technology*, **98**, 2321-2334.
- Passeggi, M., López, I., Borzacconi, L. (2009) Integrated anaerobic treatment of dairy industrial wastewater and sludge, *Wat. Sci. Tech.*, **59** (3), 501-506.
- Pholand, F. (1977) Landfill bioreactors developments for solid waste managemnt, en *Proceedings 8th International Conf. On Anaerobic Digestion, vol.1, pp. 59-66*.
- Power, N.M., Murphy, J.D. (2009) Which is the preferable transport fuel on a greenhouse gas basis; biomethane or ethanol?, *Biomass and Bioenergy*, en prensa.
- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P. (2010) Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways, *Applied Energy*, **87**, 3305-3321.

- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P. (2010b) Prospects for expanded utilization of biogas in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 1782-1797.
- Prochnow, A., Heiermann, M., Plöchl, M., Linke, B., Idler, C., Amon, T., Hobbs, P.J. (2009) *Bioresource Technology*, **100**, 4931-4944.
- Ribeiro, K., Silva, E.E. (2009) Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil, *Biomass and Bioenergy*, **33**, 1101-1107.
- Salminen, E.A., Rintala, J.A. (2002) Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading, *Water Research*, **36**, 3175-3182.
- Smyth, B.M., Murphy, J.D., O'Brien, C.M. (2009) What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 2349-2360.
- Sociedad de Productores Forestales (2012), <http://www.spf.com.uy/forestacion-en-uruguay/plantaciones/> (accedida el 22/8/2012).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S.A. (1994) *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid, España, ISBN 84-491-1766-2.
- Trogisch, S. Bergmair, J., Hoffmann, J., Daza, L. (2004) Biogas usage in fuel cells as an alternative application: results of the field trials, en *Proceedings del 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, Montreal, Canadá, octubre 2004, p.1096.
- Ueno, Y., Tatara, M., Fukui, H., Makiuchi, T., Goto, M., Sode, K. (2007) Production of hydrogen and methane from organic solid wastes by phase-separation of anaerobic process, *Bioresource Technology*, **98**, 1861-1865.
- Van Haandel, A.C. (2004) Intergrated energy production and reduction of the environmental impact at alcohol distillery plants, *Proccedings Anaerobic Digestion 2004, 10th world Congress, Montreal, Canada*.
- Van Haandel, A.C., Lettinga, G. (1994) *Tratamento Anaeróbico de Esgotos, Um manual para regioes de clima quente*, Ed. Campina Grande-PB, Brasil.
- van Lier, J.B., Tilche, A., Ahring, B.K., Macarie, H., Moletta, R., Dohanyos, M., Hulshoff Pol, L.W., Lens, P., Vestraete, W. (2001) New perspectives in anaerobic digestion, *Wat. Sci. & Tech.*, Vol. 43, nº, 1, pp.1-18.
- Venetsaneas, N., Antonopoulou, G., Stamatelatou, K., Kornaros, M., Lyberatos, G. (2009) Using cheese whey for hydrogen and methane generation in a two-stage continuous process with alternative pH controlling approaches, *Bioresource Technology*, **100**, 3713-3717.
- Venkata Mohan, S., Lalit Babu, V., Sarma, P.N. (2007) Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor (AnSBR): effect of organic loading rate, *Enzyme Microb. Technol.*, **41**, 506-515.
- Wang, J, Wan, W. (2009) Factors influencing fermentative hydrogen production: a review, *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**, 799-811.
- Wilkie, A.C., Riedesel, K.J., Owens, J.M. (2000) Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks, *Biomass and Bioenergy*, **19**, 63-102.

Yang, P., Zhang, R., Mc Garvey, J. & Benemann, J. (2007) Biohydrogen production from cheese processing wastewater by anaerobic fermentation using mixed microbial communities, *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, 4761–4771.

Zupančič, G.D., Škrjanec, I., Marinšek, R. (2012) Anaerobic co-digestion of excess brewery yeast in a granular biomass reactor to enhance the production of biomethane, *Bioresource Technology*, **124**, 328-337.

GLOSARIO

- Acetogénesis - Generación de acetato, mediando la acción de microorganismos.
- Acidogénesis - Generación de sustancias ácidas a partir de otras más complejas mediando la acción de microorganismos.
- A&G - Aceites y Grasas.
- AGCL - Ácidos Grasos de Cadena Larga, ácidos carboxílicos con cadenas mayores a cinco carbonos.
- AGV - Ácidos Grasos Volátiles, ácidos carboxílicos de cadena corta, hasta cinco carbonos.
- ALUR - Alcoholes del Uruguay, empresa agroenergética del grupo ANCAP.
- ANCAP - Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland.
- Biogás - Gas generado biológicamente en condiciones anaerobias, compuesto mayoritariamente por metano y anhídrido carbónico, con trazas de otros gases como sulfhídrico.
- CO₂ - Anhídrido carbónico.
- DA - Digestión anaerobia, proceso mediante el cual la materia orgánica es degradada por un consorcio de microorganismos en ausencia de oxígeno.
- DBO₅ - Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días), medida de la materia orgánica degradable aeróbicamente.
- DNE - Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Minería.
- DINAMA - Dirección Nacional de Medio Ambiente, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.

DQO	- Demanda Química de Oxígeno, medida de la materia orgánica en un efluente o residuo.
EGSB	- Expanded Granular Sludge Bed reactor, reactor de lecho granular expandido.
Hidrólisis	- Descomposición de sustancias complejas en otras más simples, en medio acuoso y mediando en general sustancias químicas o enzimas.
IC	- Internal Circulation reactor, reactor de circulación interna, que utiliza el principio de "gas lift" en condiciones anaerobias.
IM	- Intendencia de Montevideo.
INAC	- Instituto Nacional de Carnes.
INE	- Instituto Nacional de Estadísticas.
IVL	- Índice Volumétrico de Lodos, parámetro indicador de las características de sedimentación de un lodo.
ktep	- kilo tonelada equivalente de petróleo, equivalente energético a mil toneladas de petróleo.
Lodo	- lodo de planta de tratamiento: conformado por el exceso de microorganismos que se genera en el tratamiento biológico de un efluente líquido.
MGAP	- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
Metano	- Gas, de fórmula CH ₄ .
MS	- Material Seco
NTK	- Nitrógeno Total Kjeldahl.
OSE	- Obras Sanitarias del Estado.

- Relleno sanitario - Sitio de disposición final de residuos sólidos en los que se compacta y cubre en forma regular de modo de disminuir el impacto ambiental y sanitario.
- RSU - Residuos Sólidos Urbanos, residuos generados en domicilios, comercios y pequeñas industrias que se colectan en la ciudad. Fracción orgánica: básicamente restos de comida, papel y material fácilmente degradable.
- Metanogénesis - Generación de metano; acetoclástica: a partir de acetato; hidrogenotrófica: a partir de hidrógeno y anhídrido carbónico.
- SSV - Sólidos Suspendidos Volátiles, medida de la materia orgánica insoluble.
- SV - Sólidos Volátiles, medida de la materia orgánica.
- UASB - Up flow Anaerobic Sludge Bed reactor, reactor anaerobio de manta de lodos de flujo ascendente.

ANEXO 1

PROYECTO DE PLANTA CENTRALIZADA PARA RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES

Se presenta aquí un apretado resumen del Proyecto del Fondo para la Promoción de Tecnología Agropecuaria, FPTA nº 279 “Desarrollo y validación de tecnología anaerobia para obtener mejoradores de suelo a partir de residuos agroindustriales, realizado por el grupo BIOPROA de la Facultad de Ingeniería, el Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía y la empresa Ecogestiones. En el Proyecto se hicieron experiencias con de digestión anaerobia de mezclas de residuos en reactores de laboratorio y en un reactor piloto de 5 m³ construido especialmente, evaluándose la eficiencia de degradación y la producción de biogás. Con el material digerido se hicieron ensayos agronómicos de fertilidad en macetas y en parcelas. Finalmente se realizó un diseño preliminar de la planta y una evaluación económica de costos e ingresos.

Justificación del proyecto

Dos problemas: i) Los suelos degradados incrementan los costos de la producción hortícola desplazando a pequeños productores. ii) Las agroindustrias de Canelones deben adaptar sus sistemas de gestión y tratamiento de residuos sólidos a la nueva normativa de la DINAMA que entrará en vigencia próximamente.

Una oportunidad: Los residuos agroindustriales pueden transformarse en mejoradores de suelo con producción asociada de energía, mediante una tecnología que está disponible en el país.

Principales residuos identificados: Contenido ruminal, Estiércol, Descarne de curtiembre, Lodos de purgas de PTE, Grasa de láctea, Residuos de mercado, Orujo y borras, Alimentos vencidos, Purines de cerdo, Sólidos de aguas rojas, Cama de pollo, Finos de tabacalera.

Principales resultados de la digestión anaerobia:

	Reactor de Laboratorio			Reactor Piloto
	Primer Período	Segundo Período	Tercer Período	
Intervalo (días)	50 a 165	165 a 224	224 a 288	50 a 146
Tiempo de estadía (d)	30	20	27	30
Carga (gSV/L/d)	2,94	4,76	4,72	2,87
Eficiencia	54%	47%	49%	47%
Lbiogás/Lreactor/d	1,76	2,51	2,18	1,58
Lbiogas/gSValim	0,60	0,53	0,46	0,55
CH4 en Biogás	64%	66%	68%	65%

Proyección de resultados a una planta centralizada:

Ubicación: Canelones, sobre Ruta 5

Generadores considerados: 5 frigoríficos, 2 curtiembres, 1 láctea y una aceitera

Volumen de residuos: 17500 ton/año

Volumen de digestor necesario: 2200 m³

Generación de metano: 2450 m³/d

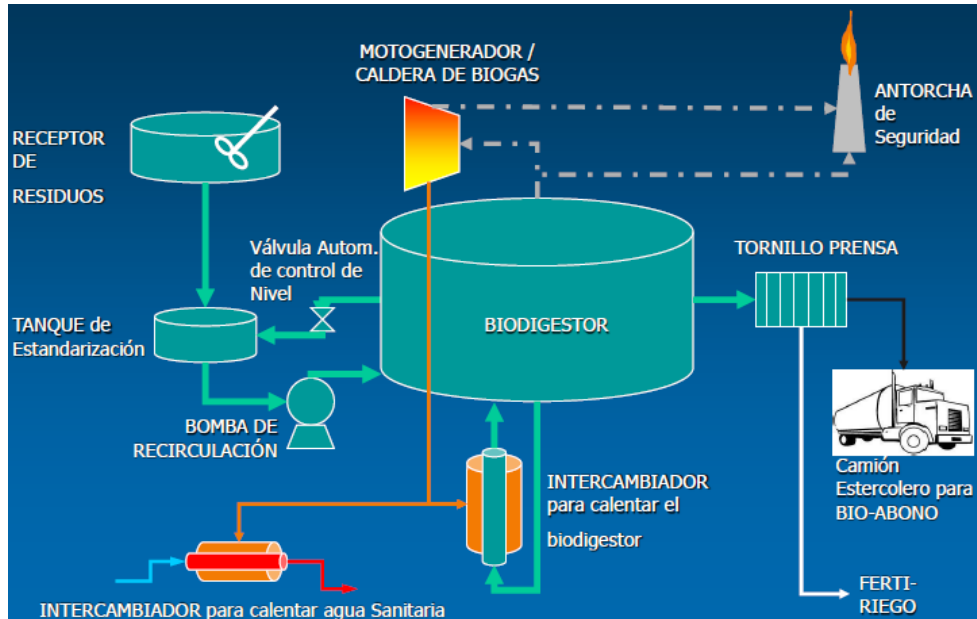
Generación eléctrica: 350 kW

Generación térmica: 6.8 millones de kcal/d

Producción de bioabono fluido: 67 m³/d (fraccionable en 24ton/d de compost y 43m³/d para ferti-riego)

Aportes del bioabono: Materia Seca, 1750 ton/año; Nitrógeno, 37 ton/año; Fósforo, 11 ton/año, Potasio, 4 ton/año; Magnesio 12 ton/año; Calcio, 61 ton/año

Esquema del proceso:



Inversión (sin impuestos):

DETALLE	U\$S
Biodigestores	400.000
Recepción de residuos	40.700
Antorcha de Seguridad	20.000
Motogenerador	300.000
Equipos de Transferencia de Calor	89.200
Camión Estercolero	120.000
Equipos complementarios	236.400
Terreno	100.000
Montaje industrial / construcción civil	195.000
TOTAL	1.501.300

Ingresos estimados de la planta centralizada:

DETALLE	UNIDADES AL AÑO	CANTIDAD	PRECIO ESTIMADO (U\$S)	TOTAL (U\$S)
Ingresos por tratamientos	ton	17.462	30	522.860
Venta de energía eléctrica	MWh	3.008	90	270.720
Venta de bioabono	ton	5.200	40	206.000
Créditos por Bonos de Carbono	Emisión media	20.000	14	280.000
TOTAL				1.282.580

ANEXO 2

TRATAMIENTO DE VINAZA DE DESTILERÍA

Se han realizado varias experiencias trabajando con distintos reactores a escala de banco (en Proyecto financiado por ANCAP) y con un reactor de escala real de 100 m³ instalado en la propia destilería de Bella Unión (Proyecto financiado por ANII-ALUR).

Principales resultados de las experiencias a escala de banco

Se trabajó con reactores de tipo UASB (6 L) y de tipo EGSB (12 L en total). En una primera etapa se alimentó a los reactores con vinaza proveniente de la actual destilería de Paysandú (a partir de melaza, en genral) y posteriormente se trabajó con vinaza de la destilería de Bella Unión. En términos generales puede afirmarse que la vinaza puede ser tratada por reactores anaerobios de alta tasa con resultados exitosos. Más allá de los problemas operativos ocurridos en la operación de laboratorios (rotura y taponamiento de mangueras, rotura de timer, descuidos operativos varios), se pudo operar los reactores en forma estable hasta valores de carga importantes.



Figura 1 Reactores UASB



Figura 1 Reactor EGSB

Para la vinaza de Paysandú en el reactor UASB se logró trabajar con una carga promedio de 13 kgDQO/m³.d con una remoción del 70% entre abril y julio de 2009. Si se toma como porcentaje de DQO degradable anaeróbicamente el 85%, el reactor estaría trabajando por encima del 80% de remoción efectiva. El reactor EGSB por otro lado trabajó entre agosto y octubre de 2009 con una carga de 10 kgDQO/m³.d (referida al volumen total del reactor; o sea el doble si lo referimos al volumen activo) y una remoción promedio de 69%, que también implicaría entonces una remoción efectiva superior al 80%. Se alcanzó a trabajar con vinaza diluida al 65%.

Trabajando con la vinaza de Bella Unión el reactor UASB logró trabajar en forma estable en octubre de 2009 con una carga promedio de 10.5 kgDQO/m³.d y una remoción promedio de 69%. Dado que en este caso la degradabilidad anaerobia era del 72% esto implicaría una remoción efectiva del entorno del 95%. Para el EGSB se operó en octubre-noviembre de 2009 con una carga de 12 kgDQO/m³.d (referida al volumen activo del reactor) y una eficiencia de remoción del 68% (que implicaría también una remoción efectiva de más del 90%). En este caso se alcanzó a trabajar con vinaza diluida al 45%.

En el trabajo de laboratorio no se encontraron elementos importantes que hagan inclinar la opción hacia el UASB o hacia el EGSB. En cualquiera de los casos hubo problemas operativos pero no asociados al comportamiento del reactor en si sino a rotura de bombas, timers, etc. Cabe destacar que el UASB se operó con una velocidad de flujo algo mayor que lo habitualmente recomendado a los efectos de lograr una mayor expansión del lecho, sin que se detectara una pérdida significativa de lodo. De esta forma se pudo mejorar el contacto entre sustrato y microorganismos y evitar canalizaciones. Trabajar en el UASB con una mayor velocidad ascensional que la habitual (y de esta forma tender hacia el funcionamiento del EGSB) redundaría beneficios en este caso en que las concentraciones son muy elevadas.

En función de las experiencias en el laboratorio la meta de trabajar con una carga entre 10 y 15 kgDQO/m³.d y remociones por arriba del 70% parece perfectamente alcanzable a escala real, donde se minimizarían los problemas de control de caudal y variaciones de concentración asociadas al almacenamiento prolongado del efluente. Cabe recordar que teniendo en cuenta la biodegradabilidad anaerobia de la vinaza se estaría trabajando probablemente al máximo de las posibilidades de remoción.

El arranque de los reactores parecería no generar inconvenientes más allá de los conocidos y puede realizarse en dos o tres semanas, siempre y cuando se realice un seguimiento estricto de las variables. Particularmente al trabajar con concentraciones tan altas es necesario seguir un control estricto pues los saltos de concentración en valor absoluto son importantes y pueden constituirse en una sobrecarga que puede no ser absorbida por el reactor. Controlar la concentración de AGV y la relación AGV/AB, así como la producción de gas son claves para los momentos en que se está aumentando la carga.

Estudios realizados en continuo para evaluar la posible inhibición debido a la alta concentración de potasio presente en la vinaza en principio indican que la biomasa puede aclimatarse a trabajar en esas condiciones y no sería un problema real, al menos a mediano plazo.

Principales resultados de las experiencias a escala real

En el año 2011 se construyó e instaló el reactor en el complejo de ALUR Bella Unión, aunque, lamentablemente solo se pudieron aprovechar 45 días de zafra. Como se partió de relativamente poca cantidad de lodo no aclimatado no se pudo acelerar el arranque. Por tal motivo la carga volumétrica alcanzada en esta primera etapa fue de entre 2.0 y 2.5 kgDQO/m³.d, muy variable debido a las variaciones en la concentración de la vinaza. No obstante la carga por unidad de sólidos osciló en torno a 0.4 kgDQO/kgSSV.d, aunque se

alcanzaron picos que duplican ese valor. La remoción de DQO se mantuvo bastante estable entre 60 y 70%.



Figura 3 Reactor de 100 m³ ubicado en la planta de ALUR Bella Unión.

En la zafra 2012 se operó el reactor desde el principio, partiendo del lodo que había quedado en el reactor tras varios meses de inactividad. Se llegó a operar por un lapso de 100 días hasta el fin de la zafra (en este año, particularmente corta), con distintos porcentajes de dilución, pero hacia el final alimentando con vinaza cruda, sin diluir. Se llegó a operar en esas condiciones con cargas de entre 4 y 5 kgDQO/m³.d y en el entorno de 0.6 kgDQO/kgSSV.d, con remoción media de DQO del 79%. Luego de un primer período de arranque el lodo comenzó a crecer, lo que permitió aumentar la carga aplicada; sobre el final de la zafra comenzó a observarse la aparición de pequeños gránulos.

ANEXO 3

TRATAMIENTO ANAEROBIO DE SUERO DE LECHE

El suero de leche es un subproducto de la industria láctea; puede ser utilizado directamente como alimento para animales, secarlo, filtrarlo y obtener un concentrado de proteína y/o lactosa que es utilizado como suplemento nutricional o tratarlo anaeróbicamente con el objetivo de obtener energía y viabilizar su disposición.

El suero lácteo descremado está compuesto fundamentalmente de lactosa, proteínas y sales minerales (Panesar *et al.*, 2007). El tratamiento anaerobio del suero puede ser realizado en una o en dos etapas. La desventaja de realizarlo en una etapa es la posibilidad de acidificación del reactor debido a la baja capacidad buffer y la alta carga orgánica que presenta el suero; pero por otro lado tiene la ventaja de ser más simple. En el caso del tratamiento en dos fases se busca maximizar la producción de hidrógeno en la primera fase y la producción de metano en la segunda fase; se ha avanzado mucho en estos últimos años debido a los estudios que se vienen realizando en el tema de producción de biohidrógeno a nivel mundial (Hallenbeck y Ghosh, 2009). En particular, en el caso del suero lácteo, éste ha sido utilizado como sustrato bajo la forma de suero en polvo y por lo tanto sin carga microbiana (Yang *et al.*, 2007; Davila Vázquez *et al.*, 2009).

Tratamiento en una sola etapa

En el caso de tratamiento en una sola etapa el objetivo se centró en determinar la carga máxima a alcanzar, evaluar distintas estrategias de arranque y estudiar la acidificación del reactor y alternativas para evitarla. Respecto al arranque del reactor, éste se realiza aumentando la carga orgánica aplicada a medida que la biomasa inoculada crece y se aclimata.

Se alcanzó a operar a una carga de 10gDQO/L.d con una concentración de suero de 30 gDQO/L (dilución al medio aproximadamente). Se operó el reactor con velocidades ascensionales de 4m/h, mayores a las recomendadas para reactores UASB (que son de 1m/h) lo cual favoreció el desprendimiento de gas y redujo los problemas de flotación del lodo. Con suero concentrado se logró una operación estable y alta eficiencia, para cargas de hasta 5 gDQO/Ld.

Se ensayó un sistema con un tanque previo para disminuir el agregado externo de alcalinidad llegando a valores de 0,2 gNaHCO₃ agregada / gDQO. Este valor podría ser ajustado aún más a la baja ya que los valores de pH en el reactor estaban por encima de 7,5.

La perspectiva de trabajos a futuro debería ir por el lado de ensayar un reactor EGSB y de trabajar con suero concentrado para evitar la dilución del efluente, o diluido con efluente lácteo tratado, para aprovechar su alcalinidad.

Tratamiento en dos fases

En el caso del tratamiento en dos fases se estudió únicamente la fase de producción de hidrógeno, centrándonos en la evaluación del inóculo y en definir las condiciones de operación para este efluente que nos permitan maximizar la producción de hidrógeno. También se estudió la influencia de la carga microbiana de la alimentación (como consecuencia de trabajar con suero crudo) en la biomasa desarrollada en el reactor.

Se utilizó compost como inóculo, que resultó una fuente de biomasa apropiada para la producción de hidrógeno. Con este inóculo y utilizando una alta carga orgánica en el arranque, se evitó la producción de metano y la fermentación propiónica. El reactor UASB fue adecuado para la producción de hidrógeno, presentó una biomasa con buenas propiedades de sedimentación sin problemas para ser retenida en el reactor. Se logró mejorar el rendimiento de hidrógeno respecto al trabajo previo (Castelló *et al.*, 2009), pero aún se está lejos del rendimiento teórico. Este bajo rendimiento se puede explicar por la selección de una población mixta con presencia tanto de productores de hidrógeno (*Clostridium*, *Ruminococcus* y *Enterobacter*) como de otros organismos no productores (*Lactobacillus*, *Dialister* y *Prevotella*). Se necesita más trabajo para entender la competencia entre estos grupos y lograr enriquecer la biomasa en organismos de interés mediante el manejo de las condiciones de operación.

Los microorganismos agregados con la alimentación pertenecen al género *Buttiauxella* (fermentador con bajo rendimiento en la producción de hidrógeno) y *Streptococcus* (fermentador láctico). Aunque estos organismos no resultaron dominantes en el reactor pueden competir por el sustrato y disminuir el rendimiento.

El tratamiento de suero de queso en dos fases, una acidogénica con producción de hidrógeno y luego otra con producción de metano es una alternativa factible que aún debe ser más estudiada de forma de mejorar la eficiencia obtenida.