

UNIVERSIDAD METROPOLITANA
ESCUELA GRADUADA DE ASUNTOS AMBIENTALES
SAN JUAN, PUERTO RICO

UTILIZACIÓN DE LODOS SANITARIOS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA

Requisito parcial para la obtención del
Grado de Maestría en Ciencias en Gerencia Ambiental
en Evaluación y Manejo de Riesgo Ambiental

Por
Myrna M. Orama Molina

Mayo 2009

DEDICATORIA

*A mi abuelo querido, por ser mi inspiración, mi fortaleza,
y por enseñarme a siempre dar lo mejor de mí.
A nuestro ambiente, por su hermosura y grandeza.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón al personal de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) de Puerto Rico, Claribel Morales del Laboratorio Ambiental de la AAA, Carlos Meléndez e Hidalgo Díaz, ambos Supervisores de la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo. A ellos agradezco toda la ayuda, información y cooperación brindada para realizar nuestro estudio. A mi comité de tesis, Dra. Beatriz Zayas, Wilfredo Hernández y Christian Vélez, por sus consejos, comentarios y apoyo durante el desarrollo de este estudio pero sobretodo, por su tiempo y por honrarme al ser parte de mi comité de tesis. De igual modo, mis más sinceras gracias al Prof. Santos Rohena y a la Prof. María Ortiz por sus respectivas aportaciones en mi trabajo. Agradezco de manera especial a mi hermano, Agro. José A. Orama Molina por su aportación e ideas para la realización y redacción del documento de tesis y a mi abuelo, Antonio Orama González por creer en mí y por su entusiasmo en el tema. A mi esposo Cristino D. Correa Sierra, a mi amiga del alma Alexandra Reyes Casillas, a mi madre Margarita Molina Adorno y demás familiares y amigos, gracias por nunca dudar de mi, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento que me motivaron a completar este grado. A todos GRACIAS, porque sin ustedes no hubiese podido lograrlo.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	xi
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
Trasfondo del problema	1
Problema de estudio.....	5
Justificación del estudio.....	7
Pregunta de investigación	8
Metas y objetivos.....	8
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	9
Trasfondo histórico.....	9
Marco conceptual	13
Estudios de casos.....	33
Marco legal.....	35
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	43
Área de estudio.....	43
Diseño metodológico	44
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
CAPÍTULO VI. PLAN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN PUERTO RICO	71
LITERATURA CITADA	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Resultados de Caracterización Química de Lodos Sanitarios Planta de Tratamiento Primario de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio 2007 a Octubre 2007).	87
Tabla 2: Comparación de Resultados Promedio para Sustancias en Mayor Concentración vs. Límites Establecidos.....	88
Tabla 3: Comparación de Tecnologías de Digestión Anaeróbica Seca (Suplidores: Kompogas, Dranco y Valorga).	89
Tabla 4: Análisis de Costos para Instalación de Digestión Anaeróbica de 7,500 TPY (basado en información obtenida de Bluestem, 2004).....	90
Tabla 5: Análisis de Ingresos vs. Costos de Operación y Mantenimiento para Instalación de Digestión Anaeróbica de 7,500 TPY (basado en información obtenida de Bluestem, 2004).	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Concentraciones de Bario para Muestras de Lodos Sanitarios, Planta de Tratamiento de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio - Octubre 2007).....	93
Figura 2. Concentraciones de 2-Butanona para Muestras de Lodos Sanitarios, Planta de Tratamiento de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio - Octubre 2007).	94
Figura 3. Concentraciones de Hidrocarburos de Petróleo Totales (TPHs) para Muestras de Lodos Sanitarios, Planta de Tratamiento de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio - Octubre 2007).....	95

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

AAA – Autoridad de Acueductos y Alcantarillados

AAE – Autoridad de Asuntos de Energía

ADS – Autoridad de Desperdicios Sólidos

AEE – Autoridad de Energía Eléctrica

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Register

bb/d – barriles por día

BTUs – British Thermal Units

CAA – Clean Air Act

CAFE – Corporate Average Fuel Economy

CFR – Código de Regulaciones Federales (“Code of Federal Regulations”)

CHP – combined heat and power

COD – Chemical oxygen demand

DOE – Department of Energy

DRO – diesel range of organics

EC – European Commission

EIA – Energy Information Administration

EPAA – Emergency Petroleum Allocation Act

EPAct – Energy Policy Act

EPCA – Emergency Policy and Conservation Act

EPCRA – Emergency Planning and Community Right-to-Know Act

GNL – gas natural licuado

GRO – gasoline range of organics

IARC – Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (“International Agency for the Research of Cancer”)

IDLH – Immediately Dangerous to Life and Health

IEA – International Energy Agency

IPCS – International Program of Chemical Security

JCA – Junta de Calidad Ambiental

JP – Junta de Planificación

kW – kilowatts

kWh – kilowatts por hora

MCL – Nivel máximo de contaminación (“Maximum Contaminant Level”)

MDL – Límite mínimo de detección (“Minimum Detection Limit”)

MGD – millones de galones por día

MW – megawatts

NECPA – National Energy Conservation Policy Act

NEPA – National Environmental Policy Act

NIOSH – National Institute for Occupational Safety and Health

NPDES – National Pollutant Discharge Elimination System

NRC – National Research Council

OCPR – Oficina del Contralor de Puerto Rico

OSHA – Occupational Safety and Health Administration

OWS – Organic Waste Systems

POST – Parliament Office of Science and Technology

ppb – partes por billón

ppm – partes por millón

PURPA – Public Utility Regulatory Policies Act

RCRA – Resource Conservation and Recovery Act

RFS – Renewable Fuel Standard

TPH – Hidrocarburos de Petróleo Totales (“Total Petroleum Hydrocarbons”)

TPY – toneladas por año (“tons per year”)

UE – Unión Europea

UK – Reino Unido (“United Kingdom”)

UNEP – United Nations Environment Programme

USC – Congreso de los Estados Unidos (“United States Congress”)

USEPA – Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (“United States Environmental Protection Agency”)

WEF – Water Environment Federation

RESUMEN

Con el propósito de determinar la viabilidad de la utilización de lodos sanitarios como alternativa energética, realizamos un estudio donde evaluamos los lodos sanitarios generados por una planta de tratamiento primario en Puerto Rico. Utilizando datos de caracterización química de los lodos producidos por la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo, realizamos un análisis de riesgo para determinar si los mismos tenían el potencial del causar contaminación ambiental. Luego de evaluar el perfil toxicológico de aquellas sustancias en mayor concentración (bario, 2-butanona e hidrocarburos de petróleo) identificamos que, en el aspecto químico, los lodos sanitarios generados por la Planta de Puerto Nuevo no presentan riesgo potencial de contaminación. Como resultado, identificamos además que estos lodos no requieren medidas de manejo especializadas, adicionales a las ya establecidas por el 40 CFR Parte 503 y las agencias reguladoras concernientes. Finalmente y luego de realizar una evaluación detallada de las técnicas y prácticas existentes de producción de biogás a partir de lodos sanitarios, identificamos que el sistema de digestión anaeróbica DRANCO es el más adecuado para procesar los lodos generados por la Planta de Puerto Nuevo. Este sistema tiene la capacidad de generar biogás utilizando lodos con una concentración de sólidos totales entre un 20% - 50%. Además, el sistema Dranco no requiere mezclado mecánico y puede ajustarse para procesar alrededor de 7,500 TPY, cantidad de lodos generados por la Planta de Puerto Nuevo anualmente. Como parte del estudio, realizamos un análisis de costos para determinar la viabilidad de la implementación de un sistema de digestión anaeróbica en términos económicos. Entre nuestros resultados, encontramos que económicamente la implementación de un sistema de digestión anaeróbica para producir biogás de lodos sanitarios podría ser viable. Al mismo tiempo, este sistema podría generar aproximadamente 5.5 MWh/año siendo capaz de suplir las necesidades de aproximadamente 764 residencias en Puerto Rico. Estos resultados demostraron la viabilidad de la utilización de lodos sanitarios como alternativa energética, lo cual podría representar un alivio en el consumo de combustibles fósiles.

ABSTRACT

This study was performed to determine the viability of using sewage sludge as an alternative for energy production. In this study, the sewage sludge produced by a primary wastewater treatment plant in Puerto Rico was evaluated. A risk assessment to identify potential risk of the sludge was performed using the chemical characterization data of the sludge produced by the Puerto Nuevo Wastewater Treatment Plant. Upon evaluation of the toxicological profile of the substances in higher concentration (barium, 2-butanone, and total petroleum hydrocarbons), it was determined that the sewage sludge produced by the Puerto Nuevo Wastewater Treatment Plant did not represent a risk of chemical contamination. As a result, it was also concluded that this sludge did not require specialized management in addition to the requirements of the 40 CFR, Part 503, and regulatory agencies. Finally, after a detailed evaluation of the existing techniques and practices available to produce biogas from sewage sludge, the DRANCO anaerobic digestion system was identified as the most adequate option to process the sewage sludge generated by the Puerto Nuevo Wastewater Treatment Plant. This system is capable of processing sludge with a total solids concentration ranging from 20% to 50%. In addition, the DRANCO system does not require mechanical mixing and can be adjusted to process about 7,500 TPY, which is the amount of sludge yielded annually by the Puerto Nuevo Wastewater Treatment Plant. As part of the study, a cost analysis was also performed to determine the economical viability of the implementation of an anaerobic digestion system in Puerto Rico. Our results showed that the implementation of an anaerobic digestion system to produce energy can be viable in terms of costs. Also, such a system could be capable of producing approximately 5.5 MWh/year being able to cover the energy needs of about 764 houses in Puerto Rico. These results demonstrated the viability of using sewage sludge to produce energy, which could represent a relief in the consumption of fossil fuels.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Trasfondo del problema

Con el paso de los años, hemos sido testigos del aumento substancial en la cantidad de desperdicios generados en Puerto Rico. La producción de desperdicios sólidos y aguas residuales o usadas ha aumentado debido a factores como el crecimiento poblacional y la evolución industrial. Este aumento provocó que tanto los desperdicios sólidos como las aguas usadas se convirtieran en un problema ambiental que, hoy por hoy, no ha podido resolverse.

En un estudio realizado en el 2003, la Autoridad de Desperdicios Sólidos (ADS) estimó que la cantidad de desperdicios sólidos depositados en los sistemas de relleno sanitario (vertederos) de Puerto Rico era aproximadamente 69,200 toneladas semanales (ADS, 2004a). Para el 2005, la cantidad de desperdicios sólidos depositada en los vertederos en base diaria fue estimada en 12,639 toneladas, lo que constituye aproximadamente 88,473 toneladas semanales (JP, 2006a). Esto significa que, en un término de 2 años, la cantidad de desperdicios sólidos depositados en los vertederos aumentó cerca de un 28%.

De acuerdo a la ADS (2004a), algunos de los factores que han agravado el problema de manejo de desperdicios sólidos son las circunstancias geográficas de la isla y las limitaciones en disponibilidad de terrenos para disponer de los desperdicios. Esto redundará en el hecho de que la infraestructura existente no es del todo adecuada para la

cantidad de desperdicios generados. Desde la década del 1990, la mayor parte de los vertederos de la Isla han tenido que ser cerrados por no cumplir con requisitos de diseño o regulaciones ambientales. Los pocos que quedan disponibles, hoy día, ya están alcanzando su vida útil (ADS, 2004a). En adición, la contaminación de agua, suelo y aire generada a consecuencia del mal manejo de los vertederos ha limitado las alternativas de disposición de desperdicios.

Al problema de los desperdicios sólidos se le añade el manejo y tratamiento de las aguas usadas. Se estima que cada persona genera aproximadamente 20 galones diarios de aguas usadas (Ceráme-Vivas, 2001). Aunque se han construido nuevas plantas de tratamiento de aguas usadas y se han realizado mejoras a algunas de las ya existentes, estos sistemas no dan abasto. Más aún, del tratamiento de aguas usadas se generan grandes cantidades de lodos o cienos cuyo manejo y disposición acrecienta la cantidad de desperdicios sólidos a ser dispuestos al ambiente.

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (USEPA, por sus siglas en inglés), se estima que en Estados Unidos se generan aproximadamente 8 millones de toneladas de lodos sanitarios al año. De éstos, alrededor del 41% es utilizado en aplicaciones al terreno. Esto incluye procesos agrícolas en los que se utilizan los lodos como abono o fertilizante. El resto es incinerado (22%), sometido a tratamientos más avanzados (12%), o depositado en vertederos (17%). Solamente un 7% de éstos es utilizado beneficiosamente (USEPA, 2006a).

En el caso de Puerto Rico, el mercado agrícola es bastante reducido. Por esta razón, la cantidad de lodos generados en el tratamiento de aguas usadas sobrepasa la demanda del producto para su utilización local en aplicaciones al terreno. Tampoco

existen en Puerto Rico suficientes instalaciones para la incineración de lodos sanitarios o tratamientos avanzados para su reducción y/o disposición. Debido a estas limitaciones, la mayor parte de los lodos generados en la isla son depositados en vertederos. Este hecho ha contribuido a limitar el espacio en los vertederos, reduciendo su vida útil y agravando los impactos en el medio ambiente.

Para atender este problema, el gobierno ha implantado leyes más restrictivas con el propósito de crear medidas eficientes para el manejo de los desperdicios. Como resultado de nuevas regulaciones ambientales, surgen programas de reciclaje y reducción de desperdicios. Sin embargo, estas acciones no han sido exitosas en resolver del todo la problemática ambiental que enfrenta Puerto Rico en relación a los desperdicios sólidos.

Pero si bien el manejo de los desperdicios es un problema serio, éste es sólo uno de muchos problemas ambientales a los cuales nos enfrentamos. Tanto en Puerto Rico como a nivel global, la calidad de los recursos naturales se ha deteriorado enormemente. El aire, el agua y el suelo han sufrido los impactos del ser humano en todos los aspectos reduciendo su calidad considerablemente. Esto se debe no sólo al mal manejo de los desperdicios sino a muchos otros factores, entre los cuales se encuentran el aumento en la demanda de energía y las necesidades de transporte.

Alrededor del 80% de toda la energía producida en el mundo proviene de la utilización de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. Los combustibles fósiles comenzaron a utilizarse a mediados del siglo XVII, a partir de la Revolución Industrial (Chiras, 2001). Hoy día, son la principal fuente de energía alrededor del mundo. Éstos son utilizados en muchos procesos, ya sea para producir energía eléctrica, como combustible para automóviles, en procesos industriales, en

sistemas de calefacción, entre otros.

En Puerto Rico, cerca del 83% de la energía eléctrica generada es obtenida por la quema de combustibles derivados del petróleo (Autoridad de Asuntos de Energía [AAE], n.d.). Diariamente, el consumo de energía aumenta debido al crecimiento poblacional y al desarrollo de nuevas industrias. En adición, factores como el desparrame urbano han acrecentado las necesidades de transporte por lo que cada día hay más y más vehículos de motor transitando las calles y carreteras de Puerto Rico. Todos estos elementos han promovido el incremento en la demanda y el consumo de combustibles fósiles durante las últimas décadas, especialmente del petróleo y sus derivados. Sin embargo, la alta dependencia del petróleo ha tenido efectos notables no solo en el medioambiente sino en el aspecto económico.

La mayor parte del combustible utilizado en Puerto Rico es importado del exterior. Esto nos hace vulnerables a fluctuaciones en suministro y los aumentos en costos. Dado a que el petróleo es obtenido de fuentes no renovables, los abastos de este combustible van disminuyendo a diario a causa del ritmo acelerado al cual se consume este recurso. A consecuencia de la alta demanda y las bajas en suministros de petróleo, los costos directos de producción de energía (i.e., energía eléctrica, transporte, etc.) aumentan.

Al igual que Puerto Rico, muchos otros países del mundo se han enfrentado al problema de manejo de los desperdicios sólidos y a la escasez de combustible debido a las bajas en los suministros de petróleo. La necesidad de buscar alternativas que solucionen estos dos problemas ha dado paso a nuevas tecnologías, cuya intención es hacer de un problema un beneficio. Utilizando este concepto, países como Alemania,

Reino Unido, China, Dinamarca, entre otros, inclusive algunos estados de Estados Unidos, han implementado el uso de los lodos sanitarios como una alternativa para producir energía.

Los lodos obtenidos del tratamiento de aguas usadas son sustancias ricas en materia orgánica. Éstos pueden utilizarse para producir biogás, el cual es una mezcla de gases compuesto principalmente de gas metano y dióxido de carbono (Rajkumar-Abraham et al., 2007). Este gas es producido naturalmente por la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, como los lodos y otros desperdicios orgánicos. En base a éstas características, el biogás se considera un combustible renovable.

En los últimos años, la generación de biogás se ha convertido en una alternativa para el tratamiento o manejo de desperdicios sólidos biodegradables. Con la utilización de lodos sanitarios para producción de biogás, muchos países han podido reducir la cantidad de desperdicios depositados o desechados al ambiente y, al mismo tiempo, atender sus necesidades energéticas.

Problema de estudio

Los desperdicios sólidos pueden ser clasificados como peligrosos o no peligrosos, de acuerdo a sus características físicas y químicas. No obstante, ambos pueden degradar la calidad del aire, el agua o el suelo si no son manejados adecuadamente. Esto, a su vez, afecta el bienestar humano, la vida silvestre y vegetal.

Los lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas usadas están catalogados como un desperdicio sólido no peligroso. Aunque no es peligroso, este tipo de lodo o cieno es uno de los principales contaminantes al medio ambiente (JCA, 2002).

La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) de Puerto Rico opera actualmente 62 plantas de tratamiento de aguas usadas a través de Puerto Rico, Vieques y Culebra. Éstas sirven a poco más de la mitad de la población de la Isla (55%), y procesan un promedio de 308 millones de galones diarios (MGD) de aguas usadas. Aunque en su mayoría, las plantas de tratamiento de la AAA proveen un tratamiento secundario, existen cinco (5) de nivel primario en donde solamente se remueven sólidos insolubles y grasas. Es en estas plantas donde se procesa el mayor volumen de aguas usadas del país.

Los lodos generados del tratamiento primario de aguas usadas no son sometidos a tratamientos químicos o biológicos durante el proceso. Para que puedan ser dispuestos de forma segura y efectiva, estos lodos deben ser caracterizados y, de ser necesario, sometidos a algún tipo de tratamiento que reduzca su potencial de contaminación. Esto se debe a que los lodos resultantes del tratamiento de aguas usadas pueden estar contaminados con compuestos orgánicos o inorgánicos los cuales pueden afectar el medio ambiente del área en el que serán dispuestos.

Aunque algunos países del mundo continúan buscando soluciones viables para atender la problemática del manejo de lodos sanitarios, unos cuantos ya han encontrado alternativas beneficiosas y viables para satisfacer sus necesidades. Desde tiempos antiguos, se conoce que durante la descomposición de desperdicios orgánicos se producen gases altamente combustibles. Este tipo de gas es conocido hoy día como biogás y es utilizado alrededor del mundo como fuente de energía.

Como sabemos, la dependencia a los combustibles fósiles ha tenido consecuencias económicas serias debido a los constantes aumentos en los costos de combustible. Por lo tanto, este estudio va dirigido a evaluar la posibilidad de utilizar,

como fuente de energía, el lodo producido por una planta de tratamiento primario de aguas usadas. Esta alternativa permitiría reducir el consumo de combustibles no renovables. De este modo, se maximizan los beneficios, minimizando los impactos ambientales y a la salud.

Justificación del estudio

Los lodos generados por el tratamiento de aguas usadas están considerados actualmente como una de las principales fuentes de contaminación ambiental. Hoy día, se generan grandes cantidades de lodos y la mayor parte de estos es depositada en los vertederos. Factores como la reducción en la vida útil y el incumplimiento ambiental han ocasionado que muchos vertederos tengan que ser cerrados, limitando grandemente las alternativas de disposición de lodos.

El manejo inadecuado de los desperdicios especialmente los lodos sanitarios puede provocar serios problemas ambientales y de salud. Por esta razón, es imperativo buscar alternativas sustentables para manejar estos desperdicios de modo que se reduzcan sus impactos al ambiente. Un ejemplo de estas alternativas es el uso de los lodos sanitarios para producir energía o biogás.

A nivel global, los combustibles fósiles derivados del petróleo son la principal fuente de energía. Sin embargo, esta fuente de combustible es finita y no renovable. Esto significa que, eventualmente, la disponibilidad del petróleo disminuirá, haciendo necesario buscar otras fuentes de energía. Por su parte, los lodos sanitarios son considerados una fuente de energía renovable. Esto ha sido comprobado por países como Alemania, Dinamarca, Reino Unido, entre otros, los cuales han logrado aliviar en gran

medida la cantidad de desperdicios depositados o desechados al ambiente y, al mismo tiempo, atender sus necesidades energéticas utilizando esta técnica.

Por lo tanto, entendemos que es de suma importancia evaluar la posibilidad de utilizar los lodos producidos del tratamiento de aguas usadas como una fuente de energía alterna. Esta alternativa ayudaría no tan solo a solucionar el problema de manejo y disposición de los desperdicios, sino que atacaría otro problema ambiental y económico como lo es el uso de combustibles fósiles.

Pregunta de investigación

¿Es viable utilizar los lodos generados por una Planta de Tratamiento Primario de Aguas Usadas para generar energía en Puerto Rico?

Metas y objetivos

La meta principal de nuestro trabajo fue determinar si la utilización de lodos sanitarios para producir energía o biogás es una alternativa viable para el manejo de los mismos. Los siguientes objetivos delinearon el estudio para contestar nuestra pregunta de investigación:

- Evaluar el riesgo potencial de los lodos generados por una Planta de Tratamiento Primario de Aguas Usadas para determinar su potencial de contaminación.
- Evaluar las técnicas de manejo de lodos sanitarios para determinar cuáles son las más apropiadas para el tipo de lodo bajo estudio.
- Evaluar las tecnologías existentes de producción de biogás para identificar cuál presenta mejor calidad energética y viabilidad económica.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

Trasfondo histórico

En las últimas décadas, la población de Puerto Rico ha aumentado significativamente. Para la década del 1950, la población de la Isla se estimaba en unos 2,210,703 habitantes (JP, 2006a). Cincuenta años más tarde, para el año 2000, la densidad poblacional mostraba un incremento de aproximadamente un 70%, estimándose en unos 3,808,610 de habitantes (JP, 2006a). Esta alza poblacional trajo consigo muchos cambios. Uno de los más importantes y notables fue el crecimiento económico e industrial. Puerto Rico pasa de una economía agrícola a una economía industrial moderna con la llegada de industrias farmacéuticas y de manufactura en general. Todos estos cambios trajeron consigo adelantos tecnológicos favorables y beneficiosos para la comunidad puertorriqueña. No obstante, tanto el crecimiento poblacional como industrial multiplicaron el consumo de recursos naturales y la generación de desperdicios.

El consumo de agua, por ejemplo, aumentó considerablemente a consecuencia de los factores antes mencionados. La demanda de este elemento creció tanto que, para el año 2004, se estimó que la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) producía alrededor de 628 millones de galones de agua potable por día (mgd). Dicha demanda era generada por más de un millón de clientes, de los cuales 91% corresponde a residencias y el 9% a industrias, comercios y gobierno (JP, 2006a).

A medida que aumentó el consumo de agua potable, surgió la necesidad de

establecer medidas para manejar las aguas luego de su utilización. Esto llevó a la implantación de Plantas de Tratamiento de Aguas Usadas y Estándares de Calidad de Agua. A través de Puerto Rico, Vieques y Culebra, existen actualmente unas 62 plantas de tratamiento de aguas usadas (regionales y municipales). Estas son operadas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA). Sin embargo, poco menos de la mitad del agua potable suplida por la AAA a las residencias e industrias del país (308 mgd) es devuelta a los sistemas de la autoridad como agua usada para recibir tratamiento. El resto de las aguas usadas en Puerto Rico son tratadas en pozos sépticos (AAA, 2007) o descargadas directamente a cuerpos de agua o sistemas subterráneos.

Aquellas aguas que son recibidas por los sistemas de alcantarillado sanitario reciben diferentes tipos de tratamiento de acuerdo al tipo de planta a las que son dirigidas. Sin embargo, los sólidos suspendidos y/o disueltos en el agua removidos como parte del proceso de tratamiento. Estos sólidos forman lo que se conoce como lodos sanitarios, también denominados biosólidos. Debido a que no existe un uso identificado para estos sólidos, los mismos son por lo general depositados en los vertederos de la Isla, sumándose a la gran cantidad de desperdicios depositados en ellos.

Estas circunstancias agravan el problema de manejo de los desperdicios sólidos ya que al aumentar la razón de consumo de recursos, la cantidad de desperdicios generados aumenta proporcionalmente. En la Isla, el problema creado por la generación excesiva de desperdicios se ha exacerbado por las limitaciones en disponibilidad de espacio y lugares para la disposición de los mismos. El impacto del incremento en desperdicios sólidos en Puerto Rico se dejó sentir aún más a partir de la década de 1990. Gran parte de los sistemas de relleno sanitario (vertederos) del país fueron cerrados por no cumplir con

reglamentaciones ambientales y porque excedían su capacidad de tratamiento. Las limitaciones para la disposición de los desperdicios sólidos llevaron tanto al gobierno a crear regulaciones ambientales, como por ejemplo la Ley para la Reducción y Reciclaje de Desperdicios Sólidos en Puerto Rico creada en el 1992, para promover la recuperación y reutilización de desperdicios. Sin embargo, estas leyes no han sido exitosas en reducir la cantidad de desperdicios generados y dispuestos.

Adicional a esto, el desarrollo de la Isla tanto en términos poblacionales como industrial y económico ha propiciado un incremento en la demanda y necesidad energética. Durante los últimos 25 años, la demanda de energía eléctrica ha crecido aproximadamente un promedio de 3.5% por año (EIA, 2007a).

Desde la época de la Revolución Industrial, la producción de energía esta basada en combustibles fósiles. Este tipo de combustible tiene una disponibilidad limitada ya que proviene de fuentes no renovables. Por ende, el costo de combustible es cada vez más elevado. De acuerdo con las estadísticas de la Administración de Información Energética de los Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés), para el año 2000 en Puerto Rico se consumieron alrededor de 200,000 barriles por día (bbl/d) de petróleo, cifra que aumentó a aproximadamente 235,000 bbl/d para el 2005 (EIA, 2007b). Todo este combustible fue importado y destinado a suplir tanto la demanda de transporte como la generación de energía eléctrica. Otros combustibles fósiles utilizados, aunque en menos escala, son el gas natural licuado (GNL) y el carbón, ambos igualmente importados.

La dependencia en combustibles fósiles ha tenido impactos notables en la economía de Puerto Rico. A pesar de que el desarrollo industrial mejoró la economía,

esta mejora se vio afectada en la década del 1970. Para el año 1973, el precio del petróleo se triplicó como consecuencia de un embargo impuesto por las naciones árabes que suplían petróleo a los Estados Unidos. El repentino aumento en los precios del petróleo llevó a Estados Unidos a una recesión que también afectó a Puerto Rico. Como consecuencia hubo un alza en la tasa de desempleo, se redujo los estándares de vida y la actividad de la construcción. Esto llevo al gobierno a establecer nuevas políticas gubernamentales que fomentaran nuevamente el crecimiento económico. De aquí surgen dos leyes importantes. El “Emergency Petroleum Allocation Act” (EPAA) creada en el año 1973 con el propósito de asegurar una distribución equitativa y establecer precios justos de los recursos de petróleo. El “Energy Policy and Conservation Act” (EPCA) la cual entró en vigor en el año 1975, creada para incentivar la producción de petróleo, aumentar la eficiencia de los automóviles en cuanto a consumo de combustible, establecer una reserva de petróleo, entre otros muchos objetivos (EIA, 2002).

En esa misma década, para el año 1977, el gobierno de los Estados Unidos crea el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés) para administrar los asuntos relacionados a este tema. No obstante, es en la década de los ochenta que la economía se recupera ligeramente cuando los precios se mantienen más estables y los costos del petróleo bajan (EIA, 2002).

Pero, a pesar de que los precios del petróleo estuvieron relativamente bajos por muchos años, en la última década hemos podido observar como el precio de este combustible ha vuelto a dispararse dramáticamente. A raíz de los elevados costos del crudo, los costos de producción de energía y transporte también han aumentado considerablemente. Por esta razón y dado el hecho que el petróleo es un combustible no

renovable, actualmente se estudian fuentes alternas de combustibles que limiten la dependencia al petróleo y demás combustibles fósiles. De estos estudios, surgen nuevas fuentes de energía renovables como la energía hidráulica, la eólica, entre otras alternativas ecológicas que incluyen la generación de biocombustibles como el biogás a través de desperdicios sólidos y biomasa.

Marco conceptual

Las aguas usadas o residuales son cualquier desperdicio líquido desechado a través de los drenajes sanitarios de residencias e industrias tales como inodoros, baños, lavamanos y fregaderos. Es decir, las aguas usadas son básicamente agua potable contaminada por el uso que le damos. Aunque una gran parte de ésta es líquida, el agua usada también se compone de una parte sólida que consiste, principalmente, de materia orgánica como grasas, proteínas, y material fecal (desperdicios fisiológicos humanos y de animales). Igualmente, puede contener sólidos inorgánicos (arena, grava, tierra), microorganismos vivos (bacterias, virus, hongos), gases disueltos (oxígeno, sulfuro de hidrógeno, gas carbónico) y otros desperdicios de industrias o comercios (USEPA, 1999a).

Cuando las aguas usadas salen de su punto de generación, por lo general van dirigidas a uno de dos sitios: un pozo séptico o al alcantarillado sanitario. Los pozos sépticos son sistemas para el tratamiento de aguas usadas, usualmente utilizados en áreas rurales o en lugares donde no hay accesibilidad a sistemas de alcantarillado sanitario. Éstos poseen una capacidad de tratamiento limitada a flujos pequeños por lo que son mayormente utilizados para procesar aguas usadas de residencias, escuelas o edificios

pequeños. En este tipo de sistema, el agua pasa a un tanque donde los sólidos son removidos por decantación o asentamiento. Una vez los sólidos se depositan en el fondo del tanque, los líquidos se filtran al terreno (USEPA, 1999b).

Por el contrario, el alcantarillado sanitario procesa por lo general flujos de agua más grandes. Este consiste de una red de tuberías que conducen las aguas usadas hasta una planta de tratamiento. En estas plantas, se procesan las aguas usadas las cuales son purificadas para que puedan ser devueltas al ambiente mediante tratamientos mecánicos, químicos y/o biológicos. Existen tres tipos de tratamiento de agua:

- *Tratamiento primario:* consiste en la remoción física de objetos grandes mediante procesos mecánicos. Los sólidos inorgánicos como arena, grava, ramas de árboles, etc. son removidos a través de rejillas, parillas, desarenadores y/o trituradores (Chiras, 2001). Luego, el agua pasa a un tanque sedimentador donde los sólidos orgánicos suspendidos se depositan en el fondo por gravedad, mientras que los líquidos permanecen en la superficie. Los sólidos depositados (denominados lodos sanitarios) son transferidos a tanques digestores donde se convierten en sustancias inertes al ser descompuestos por la actividad bacteriana. Finalmente, son secados al sol o con máquinas para reducir su volumen de modo que puedan ser utilizados como fertilizante (abono o estiércol) o como relleno sanitario para los vertederos (AAA, 2007).
- *Tratamiento secundario:* consiste principalmente en la destrucción de la materia orgánica contenida en el agua por medio de procesos biológicos (Chiras, 2001). Los lodos resultantes del tratamiento primario entran a un

tanque donde se les añaden microorganismos que descomponen la materia orgánica en solución o en suspensión. En este paso, el afluente del tratamiento primario pasa a un tanque de asentamiento o clarificador secundario en donde ocurre un segundo asentamiento de lodos para remover sólidos residuales aun suspendidos en el agua. Luego de este proceso, las aguas remanentes son sometidas a desinfección mediante la adición de cloro para eliminar organismos patógenos (Manahan, 1994). El tratamiento secundario más común y mayormente utilizado en Puerto Rico es el de lodos activados. Este proceso consiste en tratar las aguas en tanques de aireación profundos añadiéndoles bacterias, protozoarios y otros microorganismos cultivados. El efluente entra a este tanque en donde permanece por cierto tiempo en agitación constante para mantener el suministro de oxígeno necesario para que las bacterias degraden la materia orgánica (UPR, 2002).

- *Tratamiento terciario o avanzado:* se enfoca en remover contaminantes y/o metales pesados remanentes en el agua de modo que el efluente pueda ser reutilizado o devuelto al ambiente totalmente purificado (Davis & Cornwell, 1998). Aunque este tipo de tratamiento suele ser costoso, han surgido alternativas más económicas que permiten proveer un tratamiento adicional a las aguas resultantes del tratamiento secundario. Ejemplo de este tipo de tratamiento es la utilización de químicos y/o sustancias coagulantes que promueven el asentamiento o la remoción del nitrógeno y el fósforo disueltos en el agua. Otra opción es la utilización de humedales artificiales o plantas acuáticas que consumen los nitratos y fosfatos remanentes en el agua.

Un producto secundario de los procesos de tratamiento de aguas usadas son los residuos sólidos removidos del agua, conocidos como lodos sanitarios o cienos. En el Reglamento Sobre Los Servicios De Agua y Alcantarillado de la AAA (2003), se define el concepto de lodos sanitarios como cualquier sólido o semisólido residual que es generado por los procesos de tratamiento de agua. Se les da el nombre de lodos porque son un material líquido espeso de olor fuerte que contiene aproximadamente un 10% de sólidos suspendidos (WEF & USEPA, 2000). Aunque los lodos sanitarios consisten principalmente de desechos fisiológicos humanos, éstos pueden contener sustancias inorgánicas, contaminantes biológicos (virus, bacterias y parásitos), y gases disueltos provenientes de desperdicios comerciales, industriales o domésticos desechados a través del alcantarillado sanitario.

Existen diferentes tipos de lodos sanitarios. Las diferencias están basadas en el tipo de tratamiento y cantidad de lodo generado. En el tratamiento primario, por ejemplo, se producen lo que conocemos como lodos primarios crudos. Se dice que son crudos porque no reciben ningún tipo de tratamiento químico o biológico. Por otro lado, los lodos producidos del tratamiento secundario (lodos secundarios) son generados después de que el agua es sometida a procesos biológicos para remover los sólidos orgánicos disueltos. Por último, los lodos terciarios son generados por procesos más avanzados en donde el agua y los sólidos reciben tratamientos químicos (WEF & USEPA, 2000).

Para que puedan ser dispuestos de manera eficiente y adecuada, los lodos sanitarios líquidos deben ser sometidos a tratamientos conforme al método de disposición a aplicarse. Algunos de los tratamientos que pueden ser aplicados son (WEF & USEPA, 2000):

- *Deshidratación*: reduce el contenido de agua de los lodos para hacer más fácil su manejo y/o reutilización en otros procesos. Algunos procesos para reducir el contenido de agua son: “dewatering” (remoción de agua a través de filtros prensa, filtros de vacío o centrifugación); espesamiento (solidificación por secado al sol, sedimentación por gravedad o por técnicas mecánicas), o secado termal.
- *Estabilización Biológica (Digestión)*: descomposición de la materia orgánica por acción bacteriana. La digestión puede ser anaeróbica, aeróbica, o por compostaje. La digestión anaeróbica se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, mientras que la aeróbica ocurre en presencia de oxígeno. En estos procesos, cuando la materia orgánica se consume totalmente, los microorganismos mueren y son utilizados como alimento por otras bacterias. Durante el proceso ocurre una reducción en el volumen de los sólidos y se produce dióxido de carbono. El compostaje, por otro lado, es un proceso aeróbico controlado en donde los sólidos se mezclan con sustancias con alto contenido de carbono, nitrógeno, oxígeno y agua, como aserrín, paja y madera, para fomentar la actividad microbiana. Durante este proceso se destruyen la mayoría de los microorganismos patógenos, permitiendo que los sólidos resultantes puedan ser utilizados de forma segura en aplicaciones al terreno.
- *Estabilización Química*: aunque este proceso no reduce la cantidad de material orgánica biodegradable contenida en los lodos, crea condiciones de proceso que inhiben a los microorganismos reduciendo el proceso de descomposición y los olores. El proceso más común es el tratamiento de cal u otro material

alcalino para elevar los niveles de pH en los sólidos y reducir el nivel de acidez por un periodo determinado de tiempo.

Aunque los lodos sanitarios también pueden ser dispuestos en forma cruda, el propósito principal de los tratamientos es reducir las cantidades a ser dispuestas así como su potencial de contaminación. Luego de recibir el tratamiento correspondiente, los lodos deben ser manejados y/o dispuestos de acuerdo a sus características, volumen, disponibilidad de alternativas y/o espacio, consideraciones técnicas y requisitos regulatorios del lugar. Algunas de las opciones de manejo y disposición de lodos sanitarios son las siguientes:

- *Aplicaciones al terreno* (USEPA, 1999b): los residuos sanitarios se utilizan como fertilizantes o acondicionadores de suelo. En algunos lugares su aplicación está sujeta al tipo de pre-tratamiento que reciban los lodos antes de ser utilizados. Existen tres tipos de aplicaciones al terreno: la aplicación superficial, la incorporación sub-superficial (los lodos no tratados o crudos se colocan debajo de la superficie del suelo) y los métodos de entierro (ej. lagunas de retención, zanjas, y rellenos sanitarios).
- *Incineración*: reduce el volumen de lodos a ser dispuestos como desperdicio sólido o líquido. Este método es mayormente utilizado cuando los lodos no son apropiados para aplicación al terreno o por la indisponibilidad de espacio. Su ventaja es que destruye completamente la materia orgánica y la ceniza resultante es alrededor del 25% del volumen original de lodos (Pagán-Alvarado, 2007).

De no recibir el manejo adecuado, los lodos sanitarios pudieran representar una

amenaza tanto a la salud como al medio ambiente. Como sabemos, estos están constituidos por una diversidad de organismos microbiológicos que pueden causar infecciones parasíticas u otras enfermedades, así como metales pesados, dioxinas, y otras sustancias químicas que pueden contaminar el suelo o las aguas subterráneas al entrar en contacto con éstos (USEPA, 2003).

Pese a los posibles riesgos que puedan representar los lodos sanitarios, éstos pueden utilizarse de manera beneficiosa para la sociedad. En la actualidad, existen varias alternativas que permiten la reutilización de algunos tipos de lodos sanitarios. Como mencionamos anteriormente, la aplicación al terreno es un método de disposición de lodos que a su vez permite utilizar beneficiosamente los lodos sanitarios. Por su contenido orgánico y cantidad de nutrientes, los lodos sanitarios pueden servir de abono para cultivos, como recubrimiento en sistemas de relleno sanitario o como agregado para materiales de construcción. Lamentablemente, no todos los tipos de lodos pueden utilizarse para estos propósitos. En ocasiones los lodos deben recibir algún tipo de tratamiento antes de ser aplicados al terreno, especialmente cuando se utilizan como abono para cultivos de consumo humano.

No obstante, existen otras alternativas como por ejemplo la producción de biogás. El biogás es un gas que se forma naturalmente durante la descomposición de materiales orgánicos. El mismo está compuesto principalmente de metano, en una concentración por volumen de 55% - 77% aproximadamente y dióxido de carbono en un 30-45%. Dependiendo de su fuente, el biogás puede contener pequeñas cantidades de sulfuro de hidrogeno, vapor de agua (saturado), oxígeno y trazas de otros hidrocarburos (Krich et al., 2005).

Entre las principales fuentes de biogás encontramos los digestores anaeróbicos o biodigestores de las plantas de tratamientos de aguas usadas y los sistemas de relleno sanitario o vertederos. En ambos sistemas se procesan altas cantidades de materia orgánica por lo que el biogás se genera en grandes volúmenes. Aparte de las plantas de tratamiento y los vertederos, el biogás puede formarse durante la descomposición de desperdicios de animales y desperdicios de instalaciones procesadoras de alimentos, o por medio de plantas de gasificación, entre otros métodos (Carrillo, 2004).

Durante el proceso de digestión anaeróbica, microorganismos descomponen la materia biodegradable en ausencia de oxígeno convirtiendo el carbón orgánico presente en los lodos en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) (USEPA, 2007a). Este proceso ocurre de forma natural y consiste de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (USEPA, 2007a).

- *Hidrólisis:* En esta etapa, bacterias que actúan solo en presencia de agua (hidrolíticas) convierten el material orgánico complejo e insoluble (como los carbohidratos, lípidos y proteínas) en compuestos solubles. Estas bacterias segregan enzimas que añaden una molécula de agua a los compuestos complejos (polímeros) para romper el enlace covalente, convirtiéndolos en compuestos más simples (monómeros) (USEPA, 2007b).
- *Acidogénesis:* Los compuestos orgánicos solubles (incluyendo los productos de la hidrólisis) son fermentados por la acción de bacterias acidogénicas. Estas bacterias producen enzimas que convierten compuestos solubles en ácidos grasos volátiles, CO_2 e hidrógeno (H_2) (Wiesmann, Choi & Dombrowski, 2007).

- *Acetogénesis:* Los ácidos grasos volátiles producidos durante la acidogénesis son convertidos en acetato, CO₂ y H₂ también por actividad bacteriana (bacterias acetogénicas) (USEPA, 2007a).
- *Metanogénesis:* El acetato y H₂ producido en la acetogénesis es utilizado por bacterias metanogénicas y metabolizado para formar CH₄ y más CO₂ (Wiesmann, Choi & Dombrowski, 2007). La mezcla de CH₄ y CO₂ en una proporción aproximada de 60% CH₄ y 40% CO₂, es lo que conocemos como biogás (Noyola et al., 2006).

Para que la digestión anaeróbica se logre de forma efectiva, existen algunos parámetros que deben ser monitoreados y/o controlados durante el proceso. Estos son: pH, temperatura, velocidad de mezclado y tiempo de retención (Carballa et al., 2006).

- *pH:* es importante debido a que cada reacción química o etapa del proceso de digestión anaeróbica (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) requiere condiciones específicas de pH para poder lograrse efectivamente (Goodwin & Zeikus, 1987). Mantener el pH dentro de los parámetros requeridos por el proceso es crítico sobretodo para las bacterias metanogénicas ya que estas son sensitivas a cambios en pH. El rango óptimo de pH para el proceso de digestión anaeróbica se encuentra entre 6.8 – 7.2 (USEPA, 2006c).
- *Temperatura:* Aunque la digestión puede llevarse a cabo a diferentes rangos de temperatura, cada etapa o reacción que ocurre en el proceso requiere condiciones termales específicas. Cambios abruptos en las condiciones de temperatura pueden resultar en un proceso ineficiente debido a que propicia la

muerte de los microorganismos productores de metano. Por lo tanto, este se considera un parámetro crítico en el proceso de digestión anaeróbica (USEPA, 2006c).

- *Velocidad de Mezclado*: este parámetro contribuye en lograr el desempeño óptimo de un digestor anaeróbico. Un mezclado efectivo ayuda a la recirculación de material orgánico digerido, aumentando la razón de estabilización de los lodos y, por consiguiente, la producción de biogás. Esto a su vez, reduce la cantidad de energía que necesita el proceso, así como los costos de mantenimiento y limpieza limitando la cantidad de material que se deposita en el fondo del digestor (McFarland, 2001).
- *Tiempo de retención*: se refiere al tiempo teórico que toma en remplazar todo el volumen de material que se encuentra en el reactor o digestor anaeróbico (Lundén, 2003). Éste depende directamente de la temperatura y del tiempo en que ocurren cada una de las reacciones del proceso (hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis) (De la Rubia et al., 2002). De acuerdo con Van Haandel y Van der Lubbe (2007), la remoción de sólidos volátiles en el proceso de digestión anaeróbica, está directamente relacionado a la razón de producción de biogás. El tiempo de retención determina la eficiencia o razón de remoción de sólidos volátiles en el material lo cual es directamente proporcional a la cantidad de biogás producido (Van Haandel y Van der Lubbe, 2007).

Otros factores como la alcalinidad, total de sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, demanda química de oxígeno (COD) y temperatura del material orgánico o lodos utilizados como sustrato también influyen en el desempeño de un

digestor anaeróbico (Ghangrekar & Kahalekar, 2003). Estos parámetros deben ser controlados con el propósito de aumentar la actividad microbiana así como la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica de material orgánico (Verma, 2002).

Existen muchas teorías relacionadas al inicio del uso del biogás. Aunque no hay evidencia cierta de cuando o quienes utilizaron el biogás por primera vez, se dice que este combustible ha sido utilizado para usos directos como calentar agua o cocinar desde hace más de 2000 a 3000 años. En la actualidad, el biogás es utilizado como fuente alternativa de combustible en muchos lugares alrededor del mundo. Por su composición e inflamabilidad, este gas formado naturalmente ha demostrado ser una alternativa a los combustibles fósiles. El biogás puede utilizarse en cualquier equipo diseñado para uso con gas natural ya sea para calefacción, iluminación o producción de energía eléctrica, así como en motores de combustión interna de gasolina o diesel (Krich et al., 2005).

Algunas de las ventajas o beneficios del uso y/o producción de biogás son las siguientes (USEPA & ICF, 2004):

- produce menos hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, particulado y polvo durante su combustión que el diesel convencional
- es renovable ya que ocurre naturalmente durante la descomposición de desperdicios de animales o alimentos y lodos sanitarios. Por lo tanto, mientras animales y humanos existan en el planeta, habrá una fuente continua de producción de biogás
- la producción de biogás sirve para controlar los olores producidos por los desechos orgánicos como los lodos sanitarios y desperdicios de animales ya que ciertos procesos reducen los ácidos volátiles que promueven estos olores

- es costo efectivo ya que la materia prima para su producción es accesible
- los métodos de producción de biogás son una alternativa de tratamiento y disposición de lodos sanitarios y desechos agrícolas

A pesar de todas las ventajas que pueden tener la producción y/o utilización del biogás, la desventaja principal es que su potencial de mercadeo es limitado por varias razones. Por ejemplo, muchas de las tecnologías disponibles para producción de biogás se encuentran en etapa experimental y/o necesitan equipos grandes y costosos. En adición, algunos procesos son sensibles a cambios en temperatura, pH, velocidad y tipo de carga, o requieren aplicaciones adicionales para tratar el gas producido. Esto los hace difíciles de manejar y, por consiguiente, la inversión inicial es costosa.

No obstante, el biogás continúa evolucionando para convertirse en una alternativa renovable al uso de combustibles fósiles. Países alrededor del mundo han implementado el uso de biogás en plantas de cogeneración de energía, reduciendo significativamente el consumo de otros combustibles y, por ende, aminorando costos e impactos ambientales.

Biogás en Estados Unidos

En los Estados Unidos se comenzaron a desarrollar pequeños sistemas de producción de biogás a raíz de la recesión económica de los años '70 cuando los precios del crudo se elevaron. Durante los años 1975 al 1990 se instalaron alrededor de 140 sistemas de producción de biogás alrededor de los Estados Unidos. Sin embargo, estos sistemas no fueron desarrollados al máximo y eventualmente muchos de éstos dejaron de utilizarse (USEPA, 2002).

No obstante, Estados Unidos ha visto la creciente necesidad de buscar alternativas

para producción de energía y por ende, ha volteado su mirada nuevamente al biogás. Para el 2002 ya existían aproximadamente 70 sistemas de producción de biogás en operación y otros 35 estaban programados para construirse en el 2004 (Moser et al., 2007). La experiencia que ha tenido Estados Unidos con estos sistemas y el apoyo económico de programas federales y estatales, han hecho que en los últimos dos años el número de sistemas de generación de biogás en los Estados Unidos haya aumentado en alrededor de un 30% (Rajkumar-Abraham et al., 2007). La mayoría de estos sistemas han sido establecidos en granjas agrícolas.

Estados como Nueva York, Connecticut, Oregon, Carolina del Norte, Virginia, Iowa, Illinois y California son algunos de los que cuentan con instalaciones agrícolas con sistemas de producción de biogás en operación. Cada uno ha instalado sistemas diferentes con propósitos diferentes. Por ejemplo, algunas vaquerías de Nueva York, Connecticut y Oregon han instalado digestores que trabajan con los residuos producidos en estas instalaciones con el propósito de suplir la energía que necesitan para sus procesos. En Carolina del Norte, Virginia y Iowa, algunas granjas utilizan sistemas que producen biogás como los digestores anaeróbicos para manejar los desperdicios animales, específicamente el estiércol, y controlar olores (Moser et al., 2007).

Un estudio realizado por el programa AgStar de la USEPA en "Craven Farms", Oregon nos muestra la capacidad de producción energética que tiene un digestor instalado en este lugar desde el año 1996. Este digestor fue instalado con el propósito de manejar el estiércol producido por las 1000 vacas con las que contaba la granja. Al presente, esta instalación produce electricidad equivalente a aproximadamente \$24,000/año entre otros ingresos por la venta de sólidos (fibra digerida). Igualmente, una

vaquería de Candor, New York instaló un digestor y sistema de calderas en 1997. Este sistema produce aproximadamente 70 kilovatios por hora (kWh) de energía equivalente a un ingreso de \$30,000 anuales, agua caliente y otros ingresos por la venta de sólidos. Además de los beneficios económicos que les ha traído la instalación de digestores, ambas plantas ha reportado reducción en la concentración de patógenos y en los olores producidos por los desperdicios.

En esta misma línea, la granja de cerdos “Royal Farms No.1” en Tulaware, California, envía el estiércol generado a una laguna de producción de biogás. Este sistema genera aproximadamente 170kW de energía, los cuales satisfacen la demanda de electricidad y calor que necesita la granja para operar.

La experiencia de estas instalaciones ha traído beneficios tan notables que ha servido de motivación para la construcción de mas unidades alrededor del país. Inclusive, estas experiencias han dado paso a la implantación de nuevas regulaciones que no solo contribuyen a controlar la contaminación provocada por este tipo de industrias sino a expandir los beneficios energéticos de los desperdicios.

Biogás en la Unión Europea (UE)

En la Unión Europea (UE) se explota el biogás para producir energía desde hace más de 12 años. Alrededor de los países que conforman la UE, existen aproximadamente 4000 estaciones de producción de biogás (Rajkumar-Abraham et al., 2007). Sin embargo, debido a la escasez de infraestructura y otros problemas o limitaciones, solo la mitad del biogás producido es utilizado para producción de energía. Algunos de los países europeos que utilizan biogás se presentan a continuación:

- Austria: es uno de los países de la UE que, aunque no cuenta con un programa nacional para producción de biogás, ha implementado leyes que regulan el manejo de los lodos sanitarios. En este país la cantidad de desperdicios orgánicos depositados en los vertederos esta regulada por lo que los lodos sanitarios producidos deben ser manejados de otra manera. A pesar de que existen diferentes alternativas de tratamiento, la mayoría de los lodos sanitarios generados en Austria son tratados por digestión anaeróbica. Al 2006, existían en Austria aproximadamente 134 digestores anaeróbicos. Estos sistemas producen entre 75 y 100 millones de metros cúbicos de biogás al año, lo cual representa un 25.8% del biogás total producido. Otros métodos de producción de biogás en ese país son: plantas de recobro de gas producido en los vertederos, plantas de co-fermentación en instalaciones agrícolas, plantas de tratamiento anaeróbico de aguas usadas, y plantas de digestión de desperdicios biológicos. Todos estos sistemas producen un total aproximado de 264 - 414 millones de metros cúbicos de biogás al año (Braun, 2007).
 - Dinamarca: es uno de los países europeos en donde el concepto de plantas de biogás centralizadas se ha desarrollado desde 1987. En estas plantas se procesan desperdicios de múltiples instalaciones agrícolas, municipales e industriales. Para el 1997, ya existían un total de 20 plantas centralizadas en Dinamarca que generaban biogás para producir calor y energía (Holm-Nielsen & Al Seadi, 1997). Al 2007, este numero no ha cambiado (Holm-Nielsen & Al Seadi, 2007).
- En adición a los sistemas centralizados, existen en Dinamarca algunas plantas

de menor escala que tratan desperdicios de una sola instalación. Estas plantas han sido desarrolladas desde finales de 1980's y su producción de biogás se utiliza únicamente para la operación de dichas instalaciones. Aunque el número de plantas centralizadas no ha cambiado en 10 años, las plantas de menor escala han triplicado su número a unas 60 plantas.

En el 2007, alrededor del 3% de la energía renovable producida en Dinamarca proviene del biogás (Geels & Raven, 2007). Se espera que este porcentaje aumente con el surgimiento de nuevos proyectos así como la instalación de una planta experimental de biogás con la que se espera producir unos 850,000 metros cúbicos de biogás al año. Aunque inicialmente la instalación de plantas de biogás en Dinamarca tenía como propósito generar energía, hoy son consideradas un método de tratamiento para desperdicios orgánicos. Estas plantas han contribuido a la solución de un sinnúmero de problemas en el sector agrícola, energético y ambiental (Rajkumar-Abraham et al., 2007).

- Suecia: en este país europeo la mayor parte del biogás producido (43%) proviene principalmente de plantas de tratamiento de lodos sanitarios (Persson, 2007). La razón principal de esto son las estrictas regulaciones que tiene el país en cuanto al depósito de desperdicios orgánicos en los vertederos (Rajkumar-Abraham et al., 2007).

Una gran parte del biogás producido en Suecia es utilizado como combustible en automóviles y sistemas de transportación pública. Para el 1999, Suecia desarrolla un estándar nacional de biogás a través del cual solicita a todos los fabricantes de automóviles que incluyan en sus diseños motores que

puedan utilizar biogás (Persson et al., 2006). Para finales del 2006, ya existían en Suecia alrededor de 11,500 vehículos que podían utilizar tanto biogás como gas natural. En ese mismo año, cerca de 24 millones de metros cúbicos de biogás fueron utilizados como combustible en vehículos reemplazando casi 25 millones de litros de petróleo (Persson, 2007).

- Reino Unido (UK): es el país europeo líder en producción de biogás crudo. En el año 2004, su producción de biogás se estimó en unos 1,473 toneladas (Rajkumar-Abraham et al., 2007). Esto convirtió al biogás en la fuente de energía renovable mas importante del país, contribuyendo en alrededor del 30% de la energía generada (EC, 2007). Para el año 2005, alrededor del 4.2% de la energía renovable producida en el Reino Unido provenía del biogás (POST, 2007).

En su mayoría, el biogás en el Reino Unido se genera a base de estiércol de animales de granjas agrícolas. La co-digestión de lodos sanitarios municipales y otros desperdicios orgánicos agrícolas es limitada por las regulaciones y permisos que deben obtenerse para ello. No obstante, este país espera incentivar la utilización de energías renovables y aumentar su producción a 150 MW a través de sus políticas ambientales y programas.

- Alemania: similar a UK, es uno de los países líderes en producción y utilización de biogás. Un estudio técnico realizado en el año 2002 indico que Alemania tenía el potencial de generar alrededor de 136 millones de megavatios por hora de electricidad utilizando biogás (Kram, 2007). En el 2004, la producción de biogás se estimó en unas 1,291 toneladas. De los

países que conforman la Unión Europea, Alemania es el país donde se encuentra el mayor número de plantas de producción de biogás. Para el año 2006, se contabilizaron un total de 3,500 plantas en operación. Los sustratos por excelencia en estas plantas son los cultivos de energía y los desechos agrícolas, principalmente estiércol animal (Weiland, 2007).

Adicional a los ya mencionados, muchos otros países europeos como Francia, España, Italia, Irlanda, Bélgica, entre otros, también han establecido sistemas generadores de biogás a mayor o menor escala. No importa el tipo de sistema o el sustrato que utilicen para producir el gas combustible, prácticamente todos han sido implementados para tratar desperdicios, generar energía y reducir costos. Como podemos ver en los ejemplos anteriores, la utilización de combustibles renovables como el biogás en Europa ha aumentado en los últimos años. Este desarrollo y el aumento que se espera continúen teniendo la utilización de fuentes renovables como el biogás se debe primordialmente a la actual reducción en recursos fósiles y a las alzas en los precios por la compra de energía. Es por esto, que cada día mas países europeos establecen estos sistemas los cuales son a su vez reforzados por políticas ambientales estrictas que establecen sus gobiernos.

Biogás en Países en Desarrollo:

Muchos países en desarrollo han hecho de los combustibles renovables como el biogás su principal fuente de energía. Esto se debe a que no poseen la capacidad económica para suplir sus necesidades energéticas con otro tipo de combustible o para manejar sus propios desperdicios. Es por esto que han optado por alternativas que cubran estos dos propósitos.

- China: En este país el número de plantas de producción de biogás aumenta cada año. Desde la década del 1970, China ha jugado un papel importante en el desarrollo de tecnologías para producción de biogás. Entre los años 1975 y 1982, el desarrollo de sistemas de biogás se disparó, construyéndose alrededor de 7 millones de digestores para producir biogás. Los diferentes sistemas incluyen desde digestores caseros hasta sistemas más complejos de menor y mayor escala que generan más de 200 millones de metros cúbicos de biogás al año. La utilización de biogás en China ha sido promovida por el gobierno desde la década de los '80. Inicialmente, se implementó el uso del biogás como una manera para reducir la deforestación y uso de leña. Eventualmente, el biogás se ha convertido no solo en una fuente importante de energía sino en una forma de tratar los desperdicios humanos, de animales y hasta la basura generada por los habitantes de ese país (Runqing et al., 2005).
- India: la incursión de este país en la tecnología del biogás data desde hace más de 40 años. El primer sistema de biogás en India fue establecido en el 1962. Similar a China, este país también ha tenido un desarrollo exponencial en relación al número de sistemas de producción de biogás. Investigadores del tema indican que para el 2002 existían alrededor de 3.4 millones de sistemas domésticos alrededor de toda India. Este número aumentó a cerca de 3.8 millones para el 2005 (Rajkumar-Abraham et al., 2007). No obstante, estos números representan solo aproximadamente un 30% del potencial real que tiene India en cuanto a producción de biogás se refiere. En relación a los beneficios que ha experimentado India con la implantación de estos sistemas

se incluyen la reducción en el consumo de leña (madera) y una menor incidencia de enfermedades del pulmón y ojos causadas por el humo generado en la quema de madera. En adición, el desarrollo de plantas de mayor escala de producción de biogás ha contribuido a la generación de empleos y una reducción substancial en la cantidad anual de desperdicios dispuestos al ambiente (Kapdi et al., 2004).

Aunque China e India son los mayores productores de biogás entre los países en desarrollo, existen otros países que también utilizan este gas combustible. Vietnam por ejemplo, comenzó a utilizar el biogás desde hace escasamente 10 años. La razón principal para el uso de biogás en Vietnam ha sido contrarrestar las limitaciones de energía que tiene el país, esencialmente en las zonas rurales. Sistemas de diferentes capacidades y diseños se han establecido en estas zonas con el apoyo de programas nacionales para producir biogás a base de residuos agrícolas y domésticos (Rajkumar-Abraham et al., 2007). Igualmente Cuba, en el Caribe, comienza a implementar el uso del biogás desde el 1980 estimulado por la crisis de combustibles de la década del 1970. Para el año 2006, ya se habían construido en Cuba dieciocho (18) plantas en su mayoría a base de residuos animales (Contreras, 2006). Del mismo modo, millones de familias en demás países en desarrollo utilizan el biogás para calentar agua, cocinar entre otros usos domésticos.

Tanto los países desarrollados de Europa y América del Norte como países en desarrollo utilizan el biogás con los mismos propósitos. Aunque cada país ha implementado sistemas diferentes, el propósito principal es suplir la demanda de combustible ya sea para energía eléctrica, usos domésticos directos o transporte. Según

observamos, el biogás puede producirse de fuentes variadas como residuos agrícolas, desperdicios humanos y materiales orgánicos en general. Independientemente del sistema o sustrato que se implemente, los casos estudiados demuestran que el biogás es una alternativa real a los combustibles fósiles.

Estudios de casos

Aunque el biogás puede producirse de fuentes variadas, nuestro estudio va dirigido a estudiar la posibilidad de generar biogás en Puerto Rico utilizando lodos sanitarios. Los siguientes casos muestran como países alrededor del mundo han implementado diferentes técnicas para la producción de biogás utilizando lodos sanitarios como principal sustrato.

- Aberdeen, Escocia: Los lodos sanitarios producidos en esta ciudad son llevados a la Planta de Tratamiento de Nigg donde son estabilizados mediante un proceso conocido como pre-hidrólisis termal seguido por digestión anaeróbica. Durante este proceso se genera biogás en grandes cantidades. Parte de este biogás es utilizado en un motor CHP (“combined heat and power”) que combina energía y calor generando entre 500 y 1000 kW de energía. Este motor se mantiene en funcionamiento por un promedio de 16 horas diarias. El excedente de biogás es utilizado para suplir las necesidades energéticas del proceso de hidrólisis termal ya que es un proceso que requiere grandes cantidades de energía eléctrica y calor. El uso de biogás en esta planta ha resultado en una reducción considerable en costos de energía (Jolly et al., 2004).

- Sydney, Australia: Las plantas de tratamiento de aguas usadas de North Head, Malabar y Bondi tratan los lodos sanitarios generados mediante digestión, estabilización y remoción de agua (“dewatering”), entre otros procesos. En estas plantas se genera biogás durante el proceso de digestión de lodos el cual es utilizado para suplir parte de la energía necesaria en procesos internos. En la planta de Malabar el biogás es utilizado en un sistema de cogeneración dentro de la planta que produce energía eléctrica. En Bondi, la combustión de biogás a través de calderas suple el calor necesario para el funcionamiento de los digestores. En la planta de North Head, parte del biogás es utilizado para el calentamiento de digestores y el sobrante es flameado. La utilización de biogás en estas plantas provee la energía y el calor necesario para sus procesos. En la planta de North Head, por ejemplo, la utilización de biogás ha reducido el consumo de energía eléctrica en un 68% (Peters & Lundie, 2002).
- Allentown, Pennsylvania: la planta de tratamiento de aguas usadas de esta ciudad procesa un promedio de 40 mgd, sirviendo a una población de aproximadamente 195,000 habitantes. En el año 2001, esta planta implementó el uso del biogás generado por los digestores de lodos sanitarios para producir energía y calor necesario para sus procesos de tratamiento (Steckel, 2001). A partir de Agosto del 2001, este biogás comenzó a ser utilizado por la Compañía de Energía y Luz de Pennsylvania (“Pennsylvania Power and Light Company”). El biogás producido por la Planta de Allentown se traduce en unos 30 kW de energía eléctrica (Goldstein, 2002).

Como podemos observar en los ejemplos anteriores, el biogás generado de los

procesos de tratamiento de aguas usadas no es meramente un producto secundario o un desperdicio. Este gas es un combustible que puede ser utilizado para los mismos procesos de tratamiento dentro de las instalaciones donde se produce o ser suplido a compañías eléctricas para co-generar energía eléctrica. En cada uno de los casos mencionados, se observó una reducción considerable en el consumo de energía eléctrica ya que el biogás producido suple la energía necesaria para gran parte de los procesos internos.

Marco legal

A nivel federal, La Ley de Disposición de Desperdicios Sólidos (“Solid Waste Disposal Act”) fue creada en el 1965 por el Congreso de los Estados Unidos, para regular el manejo, almacenamiento y disposición de desperdicios sólidos (peligrosos y no peligrosos). Su enfoque principal fue establecer políticas para el manejo de los desperdicios sólidos. Esto incluye a los lodos sanitarios generados por las plantas de tratamiento de aguas usadas, ya que como mencionamos anteriormente, son catalogados desperdicios sólidos.

La Ley de Disposición de Desperdicios Sólidos fue enmendada en el 1976 por la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (“Resource Conservation and Recovery Act” - RCRA). RCRA regula el manejo de los desperdicios sólidos desde su generación hasta su disposición final (“cradle-to-grave”). Las metas principales de esta ley son:

- Proteger al público de posibles daños causados por la disposición de desperdicios;

- Fomentar la reutilización, reducción y reciclaje; y
- Establecer las medidas para la limpieza de derrames o desperdicios almacenados inadecuadamente.

El uso y disposición de los lodos sanitarios tratados (biosólidos) en los Estados Unidos esta regulado específicamente por el Código de Regulaciones Federales Titulo 40 (40 CFR), Subcapítulo O, Secciones 501 y 503 (USEPA, 2006b). En estas secciones, se establecen las regulaciones específicas para el manejo de los lodos sanitarios así como los estándares para el uso y la disposición de este desperdicio. La Sección 503 en especial regula la utilización de lodos sanitarios en aplicaciones al terreno, incineración y reducción de patógenos y vectores. Esta sección también incluye los requisitos de reportes y análisis para las instalaciones que manejan este desperdicio, así como los mecanismos de manejo, limites de contaminantes y estándares operacionales.

A nivel estatal, el manejo de los desperdicios sólidos esta asignado a la Autoridad de Desperdicios Sólidos a través de la Ley sobre Política Publica Ambiental (Ley Núm. 416 de 22 de septiembre de 2004). Basado en los requerimientos de esta ley, tanto la ADS como la Junta de Calidad Ambiental han establecido diferentes reglamentos que regulan los desperdicios sólidos en Puerto Rico. Estos son:

- Reglamento para el Manejo de los Desperdicios Sólidos No Peligrosos (Junta de Calidad Ambiental): este reglamento establece requisitos para el manejo, el almacenamiento, la transportación, el procesamiento y la disposición de los desperdicios sólidos no peligrosos. Este reglamento aplica a desperdicios domésticos los cuales incluyen basura, desechos y desperdicios sanitarios. Dentro de este reglamento, se establecen prohibiciones generales sobre el

manejo de biosólidos generados durante el proceso de composta y de cienos producidos del tratamiento de aguas usadas y pozos sépticos, así como disposiciones particulares para su recolección, almacenamiento y disposición final (JCA, 1998).

- Reglamento para la Reducción, Reutilización y el Reciclaje de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico (Autoridad de Desperdicios Sólidos): Este reglamento se crea con el propósito de incentivar la reducción del volumen de los desperdicios sólidos generados a través de nuevas estrategias y estableciendo requisitos para la administración adecuada de los Planes de Reducción, Reutilización y Reciclaje, reglas y reglamentos para modificar las prácticas de manejo y disposición de desperdicios; y medidas para desviar el depósito de materiales con potencial de reutilización y reciclaje en los sistemas de relleno sanitario (ADS, 2004b).

En adición a los ya mencionados, existen reglamentos y leyes adicionales que regulan los desperdicios sólidos peligrosos. Dado que los lodos generados del tratamiento de aguas sanitarias son considerados desperdicios no peligrosos, solo incluimos en la discusión aquellos reglamentos y requisitos aplicables.

En relación al tema de la energía, encontramos varias leyes federales cuyo propósito es alentar al desarrollo de combustibles renovables, fomentar la eficiencia energética y buscar alternativas a los combustibles fósiles. Algunas de estas son las siguientes:

- “Clean Air Act” (CAA): De acuerdo con Chiras (2001), la implementación de esta ley en el 1963 fue el primer intento de los Estados Unidos por reducir la

contaminación del aire. La Ley de Aire Limpio (CAA, por sus siglas en inglés), según enmendada, establece estándares de emisión de contaminantes de aire como el ozono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y material particulado, entre otros, comúnmente generados durante procesos de combustión. Su propósito principal es prevenir el deterioro significativo de la calidad del aire de la nación. A través de esta ley se refuerza el uso de combustibles limpios alternativos que según definidos por la ley, son aquellos que cumplen con los límites o estándares de emisión de contaminantes y los requerimientos aplicables bajo la ley (USCA, 1990).

- “National Environmental Policy Act” (NEPA): creada en el 1969, esta ley es un estatuto federal que declara una política nacional para minimizar los impactos al ambiente de acciones federales (USCA, 1982). Esto se refiere a que cada proyecto controlado o subsidiado por el gobierno federal debe ser evaluado mediante una declaración de impacto ambiental que considere los posibles impactos adversos al ambiente que pueda tener dicha acción (Chiras, 2001). Esto se relaciona al tema de utilización de lodos sanitarios para producción de energía en el sentido de que los sistemas de producción de este gas conllevan una evaluación de impacto ambiental antes de ser construidos. El propósito de estas evaluaciones es determinar cuan viable (ambientalmente) es la construcción de estos sistemas.
- “National Energy Act”: creada en el 1978 como respuesta a la crisis energética de esa época y a través de la cual se crean varios estatutos

legislativos dirigidos a la conservación de energía y utilización de fuentes alternas. Algunos de los estatutos legislativos relacionados al tema son:

- “Public Utility Regulatory Policies Act” (PURPA) – creada en el 1978 por la Ley Nacional de energía con el propósito de promover la utilización de fuentes renovables para producir energía eléctrica en la nación. A raíz de este estatuto se fundaron varias plantas co-generadoras para producir energía y vapor.
- “Energy Tax Act” – creada también en el 1978 por el Acta Nacional de energía, esta ley se enfocó en promover la conservación de energía, la eficiencia energética y la utilización de fuentes renovables a través de impuestos y créditos.
- “National Energy Conservation Policy Act” (NECPA) – promulgada igualmente en el año 1978 para reforzar la conservación de energía mediante auditorías u otros medios que redujeran la demanda energética de la nación. Otros estatutos creados bajo la Ley Nacional de Energía son el “Power Plant and Industrial Fuel Use Act” y el “Natural Gas Policy Act”, ambas relacionadas a la utilización de fuentes alternas para producción de energía eléctrica en la nación.
- “Energy Policy and Conservation Act” (EPCA): esta ley fue promulgada originalmente en el 1975 para establecer una reserva nacional de un billón de barriles de petróleo (conocida como Reserva de Petróleo Estratégica). La creación de esta ley se debió a la crisis de los años ’70, cuando las reservas de petróleo de los Estados Unidos se redujeron dramáticamente. Además de

mantener el suministro de combustibles fósiles en la nación, otro de los propósitos de esta ley era conservar las fuentes de energía existentes por medio de programas de conservación de energía; proveer vehículos y equipos domésticos eficientes; e implementar planes de conservación de energía que evitaran otra reducción en las fuentes energéticas del país.

- “Energy Policy Act” (EPAct): creada originalmente en el 1992 (EPAct 92), fomenta el cumplimiento con los estándares de eficiencia energética, uso de combustibles alternativos, investigación y desarrollo de combustibles convencionales, y el desarrollo de fuentes renovables de energía. Esta ley fue creada por el Congreso de los Estados Unidos con el propósito de reducir el consumo de petróleo mediante el uso de fuentes alternativas de energía. Se dice que uno de los propósitos del establecimiento de esta ley era fomentar el uso de gas natural para producir energía en lugar del petróleo (EIA, 2005).

En el 2005, el presidente de los Estados Unidos firma EPAct 2005 como una enmienda al Acta original (EPAct 92). Esta acta cubre el desarrollo de programas de investigación relacionados a la eficiencia energética, energía renovable, combustibles y fuentes de energía, entre otros. Además, con este estatuto se enmiendan otras leyes existentes como NECPA para revisar las metas de reducción en consumo energético; la Ley Disposición de Desperdicios Sólidos para establecer guías adicionales para el manejo de los desperdicios; la Ley de Conservación de energía para revisar los estándares de eficiencia energética entre otros cambios; la Política energética para revisar los incentivos a las instalaciones de producción de energía renovable; PUPRA

para mejorar los incentivos que promuevan la utilización de energías renovables y modernizar las instalaciones que provee servicios de energía eléctrica a las zonas rurales; entre otras enmiendas a diversas leyes federales.

Además de las leyes y estatutos antes mencionados, existen otros estándares también relacionados a la conservación de energía, utilización de combustibles renovables o fuentes alternas y estándares para el control de emisiones y contaminación del ambiente natural. Entre estas se encuentran:

- Corporate Average Fuel Economy (CAFE): que establece los estándares de consumo de combustibles para vehículos y camiones livianos.
- National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES): que establece los límites de descarga y emisiones de contaminantes al agua.
- Renewable Fuel Standard Program (RFS): establecido este año (2007) para fomentar la mezcla de combustibles renovables con combustible para vehículos de motor.

A pesar de que existen una decena de leyes relacionadas al tema de la conservación de energía y utilización de fuentes renovables, no fue hasta el año 2007 que Senadores del Congreso de los Estados Unidos propusieron una legislación para proveer incentivos específicamente para la producción de biogás. La legislación propuesta (“Biogas Production Incentives Act”) pretende proveer a los productores de biogás un crédito contributivo por cada millón de BTUs de biogás producido. Desafortunadamente, la propuesta solo incluye biogás producido de desperdicios animales y otros desperdicios agrícolas y orgánicos. Hasta el momento, no se ha considerado incluir biogás producido de desperdicios de plantas de tratamiento de aguas usadas (lodos sanitarios) o vertederos

(“landfill gas”) (Craig & Nelson, 2007).

A nivel estatal, la Ley de Política Pública Ambiental de Puerto Rico (Ley 416 del 22 de septiembre del 2004, según enmendada) establece que la Junta de Calidad Ambiental será responsable de establecer reglas y reglamentos que aumenten la eficiencia energética del país y promuevan la conservación de energía. No existen estatutos o reglamentos adicionales a los federales que establezcan estándares o regulaciones referentes a energía y/o utilización de combustibles. Los mismos están regulados bajo las leyes federales antes mencionadas las cuales van por encima de cualquier disposición estatal.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

El manejo y disposición de los lodos generados del tratamiento de aguas usadas es uno de muchos problemas ambientales a los cuales se enfrenta Puerto Rico. Disponer inadecuadamente de estos desperdicios puede ocasionar serios impactos al ambiente y a la salud humana. Debido al cierre de vertederos y a las alternativas limitadas para el manejo de los lodos sanitarios es imperativo buscar nuevas opciones. Éstas no sólo deben solucionar el problema sino representar un beneficio tanto para el ambiente como para la salud humana.

Al presente, existen alternativas versátiles y muy variadas para el tratamiento de lodos sanitarios. Una de estas alternativas es la utilización de lodos sanitarios para producir energía. Aunque esta alternativa ya es utilizada por varios países alrededor del mundo, en Puerto Rico no ha sido implantada, por lo que continuamos dependiendo de fuentes no renovables de combustibles cuyos abastos van decreciendo a diario.

Área de estudio

La producción de energía a través de lodos sanitarios puede lograrse al utilizar como combustible la mezcla de gases producida durante la descomposición de los mismos mediante digestión anaeróbica. Debido a que este método es utilizado en otros lugares del mundo, nuestro estudio va dirigido a determinar si es viable utilizar lodos sanitarios producidos por una planta de tratamiento primario de aguas usadas local para

este propósito. Esta alternativa representaría una fuente alterna de combustible y permitiría aliviar, en cierto modo, la cantidad de combustible fósil utilizado actualmente.

Diseño metodológico

A continuación, la metodología que utilizamos en el desarrollo de cada uno de los objetivos que constituyen nuestro estudio.

Evaluación del riesgo potencial de los lodos sanitarios generados por una Planta de Tratamiento Primario de Aguas Usadas para determinar su potencial de contaminación.

Utilizando datos de caracterización química de los lodos sanitarios o cienos generados por la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo provistos por el Laboratorio Ambiental de la AAA. Con estos datos, realizamos una evaluación de riesgo de tipo cualitativo basado en el Modelo del “National Research Council” (NRC) desarrollado en 1983. Este modelo consiste de 4 pasos o etapas, que son: Identificación del Riesgo o Peligro, Evaluación Dosis-Respuesta, Evaluación de Exposición, y Caracterización de Riesgo. Con cada uno de estos pasos analizamos aquellas sustancias químicas presentes en los lodos en mayor concentración y evaluamos su posible impacto ambiental y/o a la salud de acuerdo a sus concentraciones.

- a) *Identificación de Riesgo*: utilizando los datos de caracterización de lodos obtenidos de la AAA, determinamos los tipos de sustancias que los componen y realizamos los siguientes pasos:
 - i. Identificamos las sustancias que componen los lodos sanitarios en mayor concentración.
 - ii. Evaluamos si estas sustancias identificadas exceden los niveles permitidos.

- iii. Evaluamos datos científicos para identificar si la exposición a estas sustancias pudiera tener algún efecto notable en la salud humana.
- b) *Evaluación de Exposición*: comparamos las concentraciones de cada sustancia bajo estudio con los niveles seguros previamente determinados en estudios científicos anteriores y los límites establecidos por las agencias reguladoras.
- c) *Evaluación Dosis-Respuesta*: para aquellas con mayor concentración, describimos su mecanismo de acción dentro del cuerpo humano basado en información científica obtenida de la literatura. Además, identificamos las concentraciones de referencia estimadas de acuerdo a la información obtenida en la identificación de peligros y la evaluación de exposición realizadas en los pasos anteriores.
- d) *Caracterización de Riesgo*: en este último paso determinamos la naturaleza y/o magnitud del riesgo que representan los lodos sanitarios producidos por el tratamiento primario de aguas usadas. En esta etapa listamos posibles efectos adversos a la salud y e identificamos los de exposición permisibles o seguros para cada una de las sustancias presentes en mayor concentración.

Evaluación de las técnicas de manejo de lodos sanitarios para determinar cuáles son las más apropiadas para el tipo de lodo bajo estudio.

En base a los resultados de la evaluación de riesgo y a la clasificación de los lodos sanitarios generados por la Planta de Puerto Nuevo, determinamos los controles de manejo que deben tomarse en la utilización de los lodos sanitarios bajo estudio para producción de biogás. Estos controles incluyen, pero sin limitarse a equipo de protección, medidas de seguridad para manejo, transporte, disposición, y comunicación de riesgo.

Evaluación de las tecnologías existentes de producción de biogás para identificar cuál presenta mejor calidad energética y viabilidad económica.

Para identificar una tecnología viable para la producción de biogás, evaluamos las diferentes tecnologías o procesos disponibles actualmente. Esta evaluación fue basada en información obtenida de la literatura y en ejemplos de otros países que ya han implementado tecnologías con este propósito. Los criterios para seleccionar la tecnología más viable fueron:

- a) *Características del lodo*: basándonos en características tales como concentración de sólidos totales, porcentaje de humedad y razón de generación de los lodos bajo estudio, identificamos el proceso o tecnología disponible capaz de procesar ese tipo de lodo en la producción de biogás. En nuestra propuesta de estudio, este paso correspondía a evaluar la composición del biogás determinando cuál de las tecnologías disponibles sería capaz de producir biogás con las mejores características posibles en términos de composición y calidad energética. Sin embargo, no fue posible obtener datos de composición y calidad energética de la literatura basados en la composición de los lodos bajo estudio.
- b) *Capacidad de producción de biogás*: basado en las características de los lodos bajo estudio y en el tipo de proceso o tecnología más apropiada estimamos la cantidad de biogás que podría ser generado. En base a este número estimamos la capacidad de producción energética de los lodos.
- c) *Aspecto Económico*: utilizando datos de costos obtenidos de la literatura estimamos la inversión inicial requerida para la implementación de un sistema de producción de biogás en Puerto Rico al igual que los costos de operación y mantenimiento del sistema. Estos datos fueron utilizados para determinar la

viabilidad económica de implementar un sistema de producción de biogás en Puerto Rico.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para propósitos de nuestra investigación elegimos estudiar los lodos producidos por la Planta de Tratamiento de Aguas Usadas de Puerto Nuevo. Esta es una planta de tratamiento primario localizada en el Municipio de San Juan que sirve a la mayor parte de la Región Metropolitana de la Isla. Su capacidad es de 72 MGD, lo que representa alrededor de una cuarta parte del total de aguas usadas manejadas por la AAA (OCPR, 2004). Basado en información provista por la AAA, la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo genera aproximadamente 7,500 toneladas métricas (ó 16.5 millones de libras) al año de lodos sanitarios.

El propósito principal de nuestra investigación fue determinar la viabilidad de utilizar estos lodos para producir energía de forma que el manejo y tratamiento de estos desperdicios represente un beneficio para Puerto Rico. Este capítulo presenta los resultados obtenidos a través del estudio en respuesta a nuestra pregunta de investigación.

Evaluación del riesgo potencial de lodos generados por una Planta de Tratamiento Primario de Aguas Usadas

El primer paso de la evaluación consistió en determinar el riesgo potencial que representan los lodos sanitarios producidos por la Planta de Tratamiento Primario de Aguas Usadas de Puerto Nuevo. Para realizar la evaluación de riesgo, utilizamos datos de caracterización química de los lodos sanitarios producidos por esta planta de aguas usadas, provistos por el Laboratorio Ambiental de la AAA.

Los lodos sanitarios o cienos producidos por las plantas de tratamiento de aguas usadas de Puerto Rico son analizados para determinar presencia de metales, pesticidas, herbicidas, compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles. El muestreo rutinario se realiza aproximadamente 6 veces al año. La Tabla 1 presenta los resultados para las seis (6) muestras tomadas durante el año 2007. Estas muestras fueron tomadas en meses consecutivos (Junio a Noviembre 2007).

En las muestras evaluadas se observó presencia de compuestos orgánicos volátiles como 2-butanona (5 de 6 muestras), 1,4-diclorobenceno (2 de 6 muestras) y cloroformo (2 de 6 muestras). También, se observó presencia de metales como bario (5 de 6 muestras), plata (1 de 6 muestras) y cromo (1 de 6 muestras). Todas las muestras mostraron presencia de hidrocarburos de petróleo totales o TPH (“total petroleum hydrocarbons”), pero ninguna mostró presencia de pesticidas o herbicidas.

En base a estos resultados, decidimos evaluar aquellas sustancias cuya presencia se observó en prácticamente todas las muestras y determinar su riesgo potencial. Estas fueron: *bario*, *2-butanona* y los *hidrocarburos de petróleo (TPHs)*.

Bario

De acuerdo con la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), el Bario es un metal de color blanco-plateado que podemos encontrar en el ambiente de forma natural, principalmente combinado con otras sustancias. El sulfato de bario y el carbonato de bario son los compuestos de bario más comunes. Las concentraciones de bario en el ambiente se estiman en aproximadamente 0.0015 partes por billón (ppb) en el aire, 0.030 partes por millón (ppm) en el agua y de 15

a 3,500 ppm en el suelo.

Algunos compuestos de bario son utilizados en la manufactura de pinturas, vidrio, cerámicas, veneno para insectos o ratas y lubricantes, entre otros productos. Otros, como el sulfato de bario, son utilizados en radiografías y/o exámenes médicos (ATSDR, 2007). Las personas pueden exponerse al bario por inhalación, ingestión de alimentos o agua que contengan el metal, o a través de contacto con la piel (absorción dermal). Sin embargo, la absorción del bario depende de la solubilidad del compuesto con el cual se haya estado en contacto (ATSDR, 2007).

El Programa Internacional para la Seguridad Química de las Naciones Unidas (IPCS, por sus siglas en inglés) indica que poco menos del 10% del bario que entra al cuerpo humano es acumulado. En el cuerpo, el bario se metaboliza y es eliminado en su mayoría a través de las heces o la orina (IPCS, 1991). Aunque se ha observado que en los niños los niveles de absorción pueden ser mayores, no existen estudios que confirmen que los niños tengan una mayor sensibilidad a la sustancia que los adultos.

La EPA ha incluido a los compuestos de bario, con excepción del sulfato de bario, en la lista de sustancias tóxicas. El sulfato de bario no es considerado tóxico ya que no cumple con los criterios de toxicidad establecidos por la ley EPCRA. Para los demás compuestos, la dosis oral tóxica establecida en humanos es de alrededor de 200 - 500 miligramos (mg) o unos 2.86 – 7.14 miligramos por kilogramo (mg/kg). En animales, la dosis letal se estima entre 118 – 921 mg/kg (USEPA, 1997). El bario no ha sido clasificado como carcinógeno debido a que no existen estudios en humanos o animales que demuestren que el bario pueda causar algún tipo de cáncer (ATSDR, 2007).

Tanto la EPA, la Administración para la Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) y el Instituto Nacional para la Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) han establecido niveles de exposición para el bario. Para la EPA, el agua potable no debe contener más de 2.0 mg de bario por litro de agua (2.0 mg/L) (ATSDR, 2007). En el lugar de trabajo, OSHA establece un límite de exposición por jornada regular de 8 horas de 0.5 mg de compuestos solubles de bario por metro cúbico de aire (0.5 mg/m³). NIOSH, por su parte, solamente establece un límite de exposición para el cloruro de bario de menos de 50 mg/m³ (OSHA, 2004).

La Figura 1 muestra las concentraciones de bario de todas las muestras de lodos sanitarios evaluadas bajo este estudio. En base a estos resultados, calculamos el promedio para la concentración de bario en los lodos o cienos producidos por la Planta de Puerto Nuevo durante el año 2007, obteniendo un resultado de 0.301 mg/L. Este resultado no excedió el límite máximo de contaminación (MCL) de 100 mg/L establecido por el método de análisis de la EPA (método EPA 6010B) para metales ni los niveles de toxicidad establecidos por la agencias reguladoras.

2-Butanona

La 2-butanona es un líquido incoloro de aroma dulce, también conocido como metil-etil-ketona (MEK). Ésta es una sustancia orgánica volátil usualmente manufacturada a escala comercial aunque también puede producirse de forma natural (por ciertos árboles). Entre sus usos principales se encuentra la manufactura de pinturas, solventes y algunos adhesivos (ATSDR, 1992). La 2-butanona puede llegar a los residuos de plantas de tratamiento de aguas usadas a través de descargas industriales o

comerciales de la sustancia o productos que la contengan.

En el ambiente, la 2-butanona se evapora rápidamente cuando entra en contacto con el aire y se degrada al entrar en contacto con la luz solar (ATSDR, 1995). Las rutas de exposición de esta sustancia son a través de la respiración, la ingestión de alimentos o agua contaminados con la sustancia, o a través de la piel. Sin embargo, la 2-butanona no es una sustancia que se acumula en el cuerpo. Ésta es expulsada al exhalar o por medio de las heces o la orina (ATSDR, 1992).

Aunque no se han reportado muertes en humanos por exposición a 2-butanona (inhalación, ingestión o absorción dermal), algunos efectos por exposición aguda observados en humanos han sido irritación de las fosas nasales, garganta, ojos y piel. Estos efectos han sido mayormente observados a niveles de exposición de 100-200 ppm (OSHA, 2000). Otros efectos son depresión del sistema nervioso central, dolor de cabeza y náuseas (USEPA, 2000).

En cuanto a efectos relacionados a exposición crónica a 2-butanona, no existen estudios significativos en humanos que establezcan posibles efectos. En animales concentraciones extremadamente altas de 2-butanona han causado efectos leves en el sistema neurológico, hígado, riñones y sistema respiratorio (ATSDR, 1992).

El límite de exposición establecido tanto por OSHA como por NIOSH es de no más de 200 ppm de 2-butanona en el aire, en una jornada de trabajo de 40 horas semanales (OSHA, 2000; NIOSH, 2005). Para NIOSH, el límite de peligrosidad inmediata para vida y salud (IDLH – “Immediately Dangerous to Life and Health”) es de 3000 ppm (NIOSH, 2005). Para la USEPA, la cantidad reportable o que requiere se notifique a esta agencia en caso de descargas o escapes al ambiente es de 5,000 libras o

más de 2-butanona (USEPA, 1995). El límite de exposición de olor (“odor threshold”) establecido que establece la USEPA para esta sustancia es 5.4 ppm (USEPA, 2000). Para 2-butanona, no existe información suficiente para comprobar si ésta puede causar cáncer en animales o humanos. Por lo tanto, no ha sido clasificada como carcinógeno (USEPA, 2000).

Como observamos en la Figura 2, cinco (5) de las seis (6) muestras de lodos tomadas durante el año 2007 presentaron resultados para 2-butanona. El promedio de la concentración de 2-butanona observado en estas muestras fue de aproximadamente 0.145 mg/L. Este resultado está muy por debajo del límite máximo de contaminación (MCL) de 200 mg/L establecido por el método de análisis de la EPA (método EPA 8260B) para sustancias orgánicas volátiles.

TPH (“Total Petroleum Hydrocarbons”)

El término hidrocarburos de petróleo totales (TPH) se refiere a la familia de compuestos químicos derivados del petróleo o crudo. Esta medida es utilizada para determinar contaminación por petróleo o productos de petróleo. Se miden en términos de TPH ya que existen cientos de compuestos de petróleo, cada uno con una composición diferente, y no se considera práctico medir cada compuesto por separado (ATSDR, 1999). En el caso de la Planta de Puerto Nuevo, los TPH se miden en términos de compuestos orgánicos relacionados al diesel (“diesel range of organics”- DRO) y compuestos orgánicos relacionados a la gasolina (“gasoline range of organics”- GRO) utilizando el método EPA 8015.

Los compuestos de petróleo pueden entrar en contacto con el ambiente ya sea por derrames accidentales, escapes de industrias o por usos comerciales o domésticos, tubos de escape de automóviles (combustión de gasolina o diesel), entre otros. Algunos de estos compuestos pueden permanecer en el ambiente por mucho tiempo mientras que otros tipos de compuestos se evaporan al contacto con el aire, se disuelven en el agua o son descompuestos por acción microbiana (ATSDR, 1999).

La exposición a TPH puede ocurrir a través de las vías respiratorias, por ingestión de sustancias contaminadas o por contacto dermal. Al entrar al cuerpo humano, algunos tipos de hidrocarburos de petróleo suelen ser descompuestos en sustancias más simples y eliminados a través de la exhalación, las heces o la orina. Otros pueden convertirse en sustancias más peligrosas. No obstante, los efectos a la salud dependen de la sustancia a la cual se haya estado expuesta, la ruta y el tiempo de exposición, entre otros factores (ATSDR, 1999).

Algunas de las sustancias que componen la gasolina como el benceno, tolueno y el xileno, pueden afectar el sistema nervioso central o causar la muerte en caso de exposición prolongada a altas concentraciones. La ingestión directa de compuestos de petróleo como la gasolina o el keroseno causa irritación de la garganta y estómago, depresión del sistema nervioso central y dificultad para respirar. También, estos compuestos pueden causar efectos en el hígado, riñones, sistema inmunológico, vejiga, piel y ojos (ATSDR, 1999).

En cuanto a su potencial de causar cáncer, sólo el benceno ha sido clasificado como carcinógeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés). Otros compuestos como la gasolina y el benzo(a)pireno han

sido catalogados como posible y probable carcinógeno, respectivamente, basado en estudios realizados en humanos y animales. Sin embargo, la mayoría de los TPH aún no han sido clasificados (ATSDR, 1999).

En relación a los niveles de exposición para TPH, OSHA ha establecido un nivel de exposición permisible (PEL) en el lugar de trabajo de 500 ppm para destilados de petróleo en el aire. Los TPH son además regulados por la USEPA, la cual requiere se notifique al Centro Nacional de Respuestas a Emergencia en caso de derrames o descargas al ambiente de 10 libras o más de aquellos compuestos o derivados de petróleo catalogados como peligrosos (como el benceno) (ATSDR, 1999).

En el caso de la Planta de Puerto Nuevo, los lodos sanitarios son sometidos a análisis para determinar presencia de benceno y otros compuestos orgánicos relacionados a este como 1,4-diclorobenceno y clorobenceno, en adición al análisis de TPH (gasolina y diesel) que se realiza regularmente. Las concentraciones de TPH observadas en las muestras de lodos sanitarios de la Planta de Puerto Nuevo tomadas entre Junio y Noviembre del 2007 se muestran en la Figura 3. Aunque en la mayoría de las muestras evaluadas se observó presencia de TPH, ninguna mostró presencia de benceno o de alguno de los compuestos considerados altamente tóxicos o carcinógenos antes mencionados (Tabla 1). Las concentraciones de TPH observadas no pudieron compararse con parámetros establecidos por las agencias reguladoras dado que no existe un MCL para éstos.

Basado en la información evaluada, pudimos concluir que los lodos sanitarios producidos por la Planta de Puerto Nuevo no representan un riesgo potencial a la salud en el aspecto químico. Los resultados observados en las muestras evaluadas durante la

investigación demostraron que ninguno de los componentes o elementos químicos presentes en los lodos sanitarios excedieron los límites máximos de contaminación establecidos (Tabla 2).

Evaluación de las técnicas de manejo de lodos sanitarios

El propósito de evaluar las técnicas de manejo de lodos sanitarios fue determinar las técnicas más apropiadas para el manejo del tipo de lodo bajo estudio. La EPA clasifica los lodos sanitarios producidos por el tratamiento de aguas usadas en dos categorías (NIOSH, 2002):

- Clase A: biosólidos que han recibido tratamiento para reducir los niveles de organismos patógenos de modo que no estén sujetos a las regulaciones federales aplicables bajo el 40 CFR Parte 503.
- Clase B: biosólidos que han sido sometidos a tratamiento donde se reducen pero no se eliminan patógenos.

Los patógenos son microorganismos tales que causan enfermedades, entre ellos se encuentran algunos tipos de bacterias, virus, protozoarios, hongos, etc. Éstos organismos patógenos se encuentra en las aguas usadas asociado a la presencia de material fecal (USEPA, 2008). La clasificación establecida por la EPA es independiente del contenido de sustancias químicas o metales del lodo. Esto significa que tanto los biosólidos Clase A como los Clase B pueden contener metales u otras sustancias químicas (NIOSH, 2002).

Los lodos o cienos producidos por la Planta de Tratamiento de Aguas Usadas de Puerto Nuevo están clasificados como Clase B. Esta clasificación se debe a que estos lodos no reciben tratamiento para eliminar los organismos patógenos que pudieran

contener. Por lo tanto, el manejo, transporte y disposición de estos lodos está sujeto a las restricciones aplicables bajo el 40 CFR Parte 503.

Para los lodos Clase B, es necesario establecer medidas o controles para prevenir que los trabajadores o personas que manejan estos lodos estén expuestos a organismos patógenos que puedan causar enfermedades. Por esta razón, las agencias USEPA y NIOSH desarrollaron un listado de precauciones básicas que deben seguir los trabajadores de instalaciones donde se manejen lodos sanitarios. Entre los pasos básicos a seguir se encuentran los siguientes (NIOSH, 2002):

- Lavarse las manos con agua y jabón luego de estar en contacto con los biosólidos, antes de ingerir alimentos, y antes y después de utilizar los servicios sanitarios;
- Evitar tocarse la cara, boca, ojos, nariz, y otras partes del cuerpo, así como heridas abiertas;
- Ingerir alimentos en las áreas designadas, lejos de donde se manejan los biosólidos;
- No fumar, mascar goma o tabaco durante el manejo de biosólidos;
- Utilizar equipo de protección personal para evitar contacto con la piel;
- Remover el exceso de biosólidos de los zapatos de trabajo antes de entrar a un edificio o vehículo;
- Mantener heridas cubiertas con vendajes limpios;
- Utilizar ropa de trabajo limpia en base diaria y reservar los zapatos de trabajo sólo para manejo de biosólidos en el lugar de trabajo o durante su transporte.

Al mismo tiempo, se debe utilizar equipo de protección personal como respiradores, guantes, gafas de seguridad, botas, equipo de protección facial y vestimenta a prueba de agua para evitar la exposición a agua contaminada o contacto directo con los biosólidos. NIOSH recomienda, además, establecer programas de adiestramiento periódicos sobre prácticas de higiene estándares, utilización apropiada de equipo de seguridad y protección personal, así como el manejo adecuado de vestimenta contaminada y alimentos (NIOSH, 2002).

En cuanto a su potencial de contaminación química luego de realizar la evaluación de riesgo identificamos que los lodos producidos por la Planta de Puerto Nuevo no representan un riesgo a la salud o ambiente. Por consiguiente, no se requieren medidas adicionales especiales para el manejo de estos lodos.

Evaluación de tecnologías existentes de producción de biogás

Como mencionamos, la producción de biogás a partir de lodos sanitarios ocurre principalmente por un proceso llamado digestión anaeróbica. Al evaluar el proceso de digestión anaeróbica en detalle identificamos que el mismo puede tener diversas configuraciones ya que puede ser diseñado bajo una o varias de las siguientes condiciones:

- Una o múltiples etapas: la digestión anaeróbica puede ocurrir en un reactor simple donde todas las etapas de la digestión ocurren en una misma cámara, o en un reactor de dos pasos (“two-step”), también conocido como reactor de múltiples etapas. En este último, la hidrólisis, la acidogénesis y la acetogénesis ocurren en una cámara, mientras que la metanogénesis ocurre en

otra (Rulkens, 2008).

- Por lotes o continuo: los digestores anaeróbicos pueden ser diseñados para recibir material orgánico (lodos sanitarios) por lotes o de manera continua.
 - Proceso por lotes: cierta cantidad de material orgánico es alimentada al digestor. Luego, el digestor o reactor se sella hasta que el proceso de digestión se complete. Una vez completado el proceso, el reactor se vacía y se añade un nuevo lote de material (RISE-AT, 1998).
 - Proceso continuo: el material orgánico es alimentado continuamente. El material degradado pasa al fondo del reactor y es removido también de manera continua durante el proceso (RISE-AT, 1998).
- Temperatura: El proceso de digestión anaeróbica puede ocurrir a dos rangos de temperatura diferentes (De la Rubia et al., 2002).
 - Digestión mesofílica: la degradación de lodos o material orgánico ocurre a una temperatura entre 25°C - 40°C (Man-chang et al., 2006). Las bacterias que participan en la degradación de material orgánico a estas temperaturas se les conoce como bacterias mesofílicas.
 - Digestión termofílica: la digestión de lodos se realiza a una temperatura mayor de 45°C, por lo general entre 45°C y 55°C (Man-chang et al., 2006). Las bacterias capaces de sobrevivir a estas temperaturas se les denomina bacterias termofílicas.

De estos dos procesos, el termofílico ofrece un mayor rango metabólico y crecimiento bacteriano. Sin embargo, las bacterias termofílicas mueren más rápidamente que las mesofílicas haciendo el proceso menos

estable. En adición, el efluente del proceso termofílico es de una calidad menor al que resulta de un proceso mesofílico. Por consiguiente, el proceso mesofílico tiende a ser más utilizado que el termofílico (Man-chang et al., 2006).

- Contenido de Humedad y/o Sólidos: el afluente o el material alimentado al reactor se considera seco cuando tiene un contenido de sólidos alto, entre 20-40%; y húmedo cuando su contenido de sólidos es entre 10-15% (RISE-AT, 1998).

Según el Centro Regional para Servicio de Información del Sureste de Asia en Tecnología Apropiada (RISE-AT, por sus siglas en inglés), las configuraciones más comunes para el proceso de digestión anaeróbica son las siguientes (RISE-AT, 1998):

- Digestión Seca Continua: el material con 20-40% de sólidos (seco) es alimentado de forma continua a un reactor ya sea de mezclado continuo o de flujo de pistón (“plug-flow”) donde el afluente pasa a través del tanque sin ser mezclado (IEA, 2005). Este tipo de configuración es más favorable en condiciones termofílicas ya que el material o afluente es degradado a un tiempo de retención relativamente corto (entre 15 y 21 días) (IEA, 2005).
- Digestión Seca por Lotes: material con un 20-40% de sólidos es alimentado por tandas o lotes a un digestor sellado donde se deja que el proceso de digestión ocurra de forma natural. Luego que el proceso se completa, el digestor es abierto y el material es reemplazado por una nueva tanda. Entre cada tanda o lote, el lixiviado resultante se recircula para facilitar la inoculación de las bacterias que realizan la digestión (RISE-AT, 1998).

- Digestión Húmeda Continua de Un paso: el afluente húmedo (10-15% de sólidos) es alimentado a un reactor o digestor, usualmente de mezclado continuo donde todas las etapas de la digestión ocurren en el mismo digestor (Verma, 2002).
- Digestión Húmeda Continua de Varios Pasos: el afluente húmedo es inyectado a un reactor principal donde ocurren las primeras dos etapas de la digestión anaeróbica (hidrólisis y acidogénesis), pasando luego a un segundo reactor donde se completa el proceso (acetogénesis y metanogénesis) (Vandevivere et al., 2002).

Para seleccionar el proceso más adecuado para la digestión de los lodos de la Planta de Puerto Nuevo, visitamos esta instalación de tratamiento y durante una entrevista con el personal de manejo de lodos o cienos identificamos la siguiente información:

- Frecuencia de generación de lodo: La Planta de Puerto Nuevo opera 24 horas / 7 días a la semana. La generación de lodos o cienos es continua.
- Cantidad de lodo generado: durante el año 2007 la Planta de Puerto Nuevo generó aproximadamente 7,500 toneladas métricas (ó 16.5 millones de libras) al año. Esto representa alrededor de 20.5 toneladas métricas (ó 45,200 libras) diarias de lodos.
- Cantidad de sólidos totales: según información provista por personal de la AAA, los lodos producidos por la Planta de Puerto Nuevo contienen entre un 30% a un 40% de sólidos totales. Este porcentaje de sólidos cataloga los lodos sanitarios como lodos secos.

Utilizando en las condiciones antes mencionadas, determinamos que la alternativa más apropiada es un sistema de digestión seca continua. Los sistemas de digestión seca continua más comunes disponibles comercialmente son: Kompogas, Dranco y Valorga. Estos son todos sistemas de una etapa (“single stage”) que operan a concentraciones de sólidos totales entre 20% - 50% (Vandevivere et al., 2002).

Comparación de Tecnologías Identificadas

Kompogas

Esta tecnología fue desarrollada por la compañía del mismo nombre (Kompogas) en Suiza y consiste de un reactor cilíndrico de flujo de pistón (“plug-flow”) horizontal que opera a temperaturas termofílicas (45°C - 55°C) (Kayhanian et al., 2007). El mezclado del material dentro del reactor ocurre por acción mecánica y es más efectivo para sustratos con sólidos totales alrededor de 20%. Cuando el porcentaje de sólidos totales es menor tiende a ocurrir acumulación de partículas en el fondo del reactor, mientras que a concentraciones mayores de 20% ocurre resistencia en flujo (Vandevivere et al., 2002). Ambas condiciones afectan la efectividad del proceso por lo que el sistema va a requerir ajuste en el porcentaje de sólidos totales (Kayhanian et al., 2007). El tiempo de retención promedio de un sistema Kompogas es de 15 a 18 días y es capaz de operar 7 días a la semana sin la presencia constante de operadores (Zaher, 2007).

Dranco

El sistema Dranco cuyo nombre proviene del termino en inglés “Dry Anaerobic Composting” (compostaje anaeróbico seco) fue desarrollado en Bélgica para la década

del 1980 (Kayhanian et al., 2007). Este sistema consiste de un fermentador o reactor vertical de fondo cónico (en ángulo de 45°) (Bluestem, 2004). El proceso de mezclado se logra por recirculación del efluente. Los lodos o cienos son alimentados por la parte superior del reactor, extraídos por la parte inferior y devueltos a la entrada del reactor a través de un sistema de bombeo (Zaher, 2007). Los sólidos se mueven dentro del reactor por un proceso similar al sistema de flujo de pistón ('plug-flow') pero sin la necesidad de mezclado mecánico (Kayhanian et al., 2007).

El sistema Dranco ha demostrado ser efectivo para materiales con concentraciones de sólidos totales entre 20% - 50% (Vandevivere et al., 2002). Este sistema opera bajo condiciones mesofílicas (25°C - 40°C) con un tiempo de retención promedio de 18 a 24 días (Kayhanian et al., 2007).

Valorga

Este proceso de digestión seca fue creado por la compañía francesa del mismo nombre (Valorga) para el año 1984 (Bluestem, 2004). Este sistema consiste de un reactor cilíndrico vertical de flujo de pistón donde el mezclado se logra por recirculación del biogás generado durante el proceso (Vandevivere et al., 2002). El biogás es extraído de la parte superior del reactor y re-inyectado a alta presión a través de la parte inferior del sistema cada 15 minutos con la ayuda de inyectores mecánicos (Zaher, 2007).

El sistema Valorga es más efectivo cuando se utilizan sustratos con una concentración de sólidos totales de alrededor de 35%. El proceso se lleva a cabo bajo condiciones mesofílicas (25°C - 40°C) con un tiempo de retención promedio de 15 días (Kayhanian et al., 2007).

Luego de evaluar y comparar estas tres tecnologías o procesos, encontramos que el sistema Kompogas tiene restricciones en volumen, por lo que sería necesario instalar varios reactores en paralelo según las necesidades de la planta y el volumen de material que se requiera procesar (Vandevivere et al., 2002). Por el contrario, los sistemas Dranco y Valorga pueden ajustarse a la capacidad requerida siempre y cuando el volumen no exceda de 3300 m³ (Zaher, 2007). La Tabla 3 compara estas tres tecnologías, incluyendo sus ventajas y desventajas. Basado en este análisis, entendemos que la tecnología más adecuada para el tratamiento de los lodos sanitarios de la Planta de Puerto Nuevo es un sistema Dranco.

Análisis de Costos Implementación

En un estudio de viabilidad del proceso de digestión anaeróbica realizado por el Departamento de Recursos Naturales de Iowa y la Agencia de Desperdicios Sólidos Bluestem (2004), se analizaron instalaciones comerciales de producción de biogás por digestión anaeróbica en Europa donde este tipo de sistemas es más común. Este estudio identificó el costo promedio para la construcción de una instalación de digestión anaeróbica que procesa 36,000 toneladas de lodos al año (TPY) en unos \$9.4 millones basado en las siguientes presunciones:

- No hay costos directos por adquisición de terrenos
- Proceso de digestión anaeróbica seca continua con alta concentración de sólidos
- El tratamiento de gas será por medio de un “scrubber” que remueva sulfuro de hidrógeno

- Se instalarán transformadores para producir electricidad
- Costos indirectos son limitados a ingeniería, evaluación del lugar de construcción e inicialización (“start-up”) de la planta.

Con los datos utilizados por Bluestem para el análisis de costos pudimos estimar los costos aproximados para una instalación de digestión anaeróbica con capacidad para procesar 7,500 TPY (producidos por la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo) en unos \$2 millones para el año 2004. Utilizando las tablas de inflación del Departamento del Trabajo de los Estados Unidos, estimamos que para el año 2009 los costos de esta misma instalación serían aproximadamente \$2.25 millones, considerando un 12% de inflación (DOL, 2009) y un 10% de contingencia versus un 7.5% utilizado en el análisis de Bluestem. Esto representa un costo aproximado de \$306.00 por tonelada de lodos procesados. La Tabla 4 muestra el desglose de costos estimados para una instalación de 7,500 TPY.

Producción de biogás y análisis de ingresos vs. costos

Para calcular la cantidad de biogás promedio que puede producir un sistema de digestión anaeróbica utilizando los lodos producidos por la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo presumimos lo siguiente:

- Por cada libra de material seco se producen 6 ft³ de biogás (ANC, 1977).
- La concentración de sólidos totales de los lodos producidos por la Planta de Puerto Nuevo es de aproximadamente 35%.
- Se producen 550 Btu por cada 1ft³ de biogás con contenido de metano de 55% (ANC, 1977).

- El factor de conversión de Btu a kilowatts hora (kWh) es $3,412 \text{ Btu} = 1 \text{ kWh}$

Considerando que la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo produce aproximadamente 7,500 TPY ó 16.5 millones lbs/año de lodos, calculamos la cantidad aproximada de biogás a generarse en unos $34,722,807 \text{ ft}^3/\text{año}$ ($95,130 \text{ ft}^3/\text{día}$). Este resultado se traduce en unos 19 billones de Btu ó 5.5 millones de kWh (5,597 MWh) al año. Esta cantidad de energía equivale a un promedio de 3,275 barriles de petróleo (5.8 millones Btu/barril), 165,217 galones de gasolina (115,000 Btu/galón), ó 145,594 galones de petro-diesel (130,500 Btu/galón) al año (ORNL, n.d.). Según estimados realizados por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE), el consumo eléctrico promedio residencial en Puerto Rico es de unos 600 kWh al mes ó 7,200 kWh al año. Por lo tanto, este sistema tendría la capacidad de proveer energía eléctrica a aproximadamente 764 residencias al año.

Actualmente, la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (AEE) vende el kWh a aproximadamente \$0.05, sin considerar los costos por compra de combustible que actualmente rondan los \$0.13/kWh. Si consideramos la compra de combustible, los costos totales actuales por kWh son alrededor de \$0.18. Si no se consideran los costos por compra de combustible, el sistema de digestión anaeróbica propuesto podría generar un promedio de \$279,858.50 al año (a \$0.05/kWh) sólo en venta de energía eléctrica o ahorrarse esta cantidad de dinero en costos de operación si utiliza la energía producida para suplir las necesidades de la planta. Considerando un costo por kWh de \$0.18, los ingresos podrían ser \$1,007,490.59.

Para calcular los costos de operación de este sistema de digestión anaeróbica, presumimos lo siguiente (Bluestem, 2004):

- Los costos de operación y mantenimiento de una planta del sistema de digestión son aproximadamente 2.25% de los costos de instalación.
- Los costos de operación del sistema de generación de energía son \$0.0125/kWh.
- Costos promedio de labor son \$18/hr (esto incluye salario y beneficios provistos al empleado por el patrono).
- Factor de contingencia de 10% del total de costos de operación.

El resultado obtenido para el total de costos de operación y mantenimiento fue de \$307,146.40 anuales. Si asumimos un costo de \$0.18/kWh, tomando en consideración los costos actuales por kWh (\$0.05/kWh) y compra de combustible, este sistema podría tener una ganancia estimada de \$701,338.97. La Tabla 5 presenta un resumen de los resultados obtenidos. Con estos resultados, podemos decir que la implementación de una instalación de digestión anaeróbica utilizando los lodos sanitarios generados por la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo podría ser viable en términos económicos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El propósito principal de nuestra investigación fue determinar la viabilidad de utilizar los lodos sanitarios o cienos producidos por la Planta de Tratamiento Primario de Puerto Nuevo para producir energía. En la primera etapa del estudio, evaluamos el riesgo potencial de los lodos identificando aquellas sustancias químicas presentes en mayor concentración y determinando si estas representaban o no un riesgo a la salud. Basado en los resultados obtenidos, determinamos que los lodos producidos por la Planta de Puerto Nuevo no representan un riesgo potencial en el aspecto químico ya que ninguno de los elementos o compuestos presentes en mayor concentración excedían los límites máximos de concentración establecidos.

Además, se realizó una evaluación de las técnicas de manejo de lodos sanitarios para determinar las técnicas más apropiadas para el manejo de los lodos bajo estudio. Determinamos que, aunque los lodos de la Planta de Puerto Nuevo no representan un riesgo en el aspecto químico, estos están clasificados como Clase B ya que no reciben tratamiento para eliminar los organismos patógenos que pudieran contener. Por lo tanto, el manejo, transporte y disposición de estos lodos está sujeto a las restricciones aplicables bajo el 40 CFR Parte 503.

Como parte final, evaluamos el uso-beneficio de estos lodos identificando y comparando las tecnologías existentes y más apropiadas para su utilización en la producción de biogás y energía eléctrica. Luego de evaluar los procesos de digestión

anaeróbica seca: Kompogas, Dranco y Valorga, identificamos que el sistema Dranco es el más adecuado en base a las características de los lodos producidos por la Planta de Puerto Nuevo. Este sistema puede procesar materiales con concentración de sólidos totales entre 20% - 50%, no requiere ajuste de concentración de sólidos, su capacidad es ajustable de acuerdo a las necesidades de la planta y no requiere unidades de calentamiento adicional.

En el análisis de costos realizado identificamos que la construcción de una planta de digestión anaeróbica capaz de procesar 7,500 TPY de lodos sanitarios puede costar unos \$2.3 millones y producir unos 5,597 MWh al año. Esta cantidad de energía podría ser utilizada para cubrir parte del consumo energético que tiene la Planta de Puerto Nuevo. Tomando en consideración la razón de costos y tarifas por kWh que utiliza actualmente la AEE, este sistema podría ser viable generando ingresos o ahorros por la venta y/o utilización de la energía producida. En términos tecnológicos la utilización de los lodos sanitarios producidos por la Planta de Puerto Nuevo si es una alternativa viable para la producción de energía.

Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones surgen en base a los resultados obtenidos en nuestro estudio:

- Desarrollar investigaciones relacionadas a la implementación de sistemas de producción de biogás en Puerto Rico.
- Realizar estudios científicos que midan la composición del biogás y determinen la posible calidad energética del biogás generado por los lodos sanitarios producidos por las plantas de tratamiento de aguas usadas de Puerto Rico.

- Realizar estudios microbiológicos para determinar los tipos de bacterias más eficientes en el proceso de digestión anaeróbica de lodos sanitarios y resistentes a cambios en las condiciones del sistema (temperatura y pH).
- Evaluar la viabilidad de sistemas con capacidad de procesar un volumen mayor de lodos sanitarios.
- Realizar estudios a menor escala utilizando prototipos para determinar el desempeño del sistema bajo condiciones del clima tropical de Puerto Rico.

Limitaciones del estudio

A raíz de nuestros resultados y la información evaluada, identificamos las siguientes limitaciones para la implementación del sistema de digestión anaeróbica recomendado (Sistema Dranco) en Puerto Rico:

- El sistema Dranco es un sistema patentizado por la compañía OWS (“Organic Waste Systems”) localizada en Bélgica y no existe un distribuidor local o en los Estados Unidos.
- El análisis de costos no considera costos de acarreo de componentes no disponibles localmente.
- No existen instalaciones de producción de biogás que implementen el sistema Dranco en los Estados Unidos o en Puerto Rico.
- No hay experiencia previa del funcionamiento del sistema en climas similares al de Puerto Rico.

CAPÍTULO VI

PLAN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN PUERTO RICO

Para la implementación de un sistema de digestión anaeróbica en Puerto Rico, ya sea un sistema convencional o un sistema Dranco como el recomendado por nuestro estudio, es necesario evaluar factores relacionados al financiamiento, permisología y posible impacto ambiental que este tipo de proyectos pueda tener. El siguiente plan describe algunos de los puntos más importantes a considerarse para la implantación de un sistema de producción de biogás en la isla.

Evaluación del lugar de ubicación del sistema

Recomendamos realizar una evaluación del lugar donde se ubicará el proyecto. Esta evaluación deberá ser realizada por un asesor certificado con el propósito de determinar si la localización del proyecto es adecuada o no. Nuestro estudio no consideró la adquisición de terrenos ya que se entiende el sistema podría construirse dentro del área ocupada actualmente por la Planta de Tratamiento de Aguas Usadas de Puerto Nuevo. No obstante, este terreno debe ser evaluado para determinar si el mismo tiene las características adecuadas para soportar la construcción y operación de un sistema de digestión anaeróbica para producción de biogás.

Análisis de Costos

Como parte de nuestro estudio, realizamos un análisis para estimar la posible

inversión mínima requerida para establecer un sistema de digestión anaeróbica que produzca biogás utilizando los lodos sanitarios o cienos producidos por la Planta de Tratamiento de Aguas Usadas de Puerto Nuevo. Sin embargo, para determinar los costos reales que podría tener este proyecto es necesario evaluar e incluir costos de adquisición de terrenos y costos de acarreo de materiales no disponibles localmente, según aplique. En adición, se recomienda obtener un estimado de costos provisto por la compañía OWS, si se desea implementar la tecnología Dranco.

Evaluación ambiental

Según requerido por la Ley de Política Pública Ambiental de Puerto Rico (Ley 416 de 22 de septiembre de 2004, según enmendada) y el Reglamento de la Junta de Calidad Ambiental para el Proceso de Presentación, Evaluación y Trámite de Documentos Ambientales (2002), la agencia proponente debe presentar una Evaluación de Impacto Ambiental. En este caso, la agencia que decida implementar este proyecto debe presentar un documento a la Junta de Calidad Ambiental donde se identifique el posible impacto ambiental, si alguno, que pueda tener la construcción y operación de este sistema.

El proceso de desarrollo y generación del documento de Evaluación Ambiental debe seguir los requerimientos de dicho reglamento. La evaluación debe incluir, pero sin limitarse a, lo siguiente:

- Descripción de la ubicación del proyecto
- Evaluación e identificación de flora y fauna existente en el área de construcción

- Descripción de tipos y características de suelos en el área de construcción, incluyendo formaciones geológicas en o adyacentes al área del proyecto.
- Identificación del uso y zonificación actual del área de construcción
- Indicación de Zona Inundable
- Infraestructura existente
- Identificación y caracterización de aéreas ecológicamente sensitivas.

También se debe incluir una descripción detallada de la actividad propuesta que incluya la justificación y necesidad del proyecto, estimado de costos, manejo de aguas de escorrentías y desperdicios sólidos, generación de empleos, y las medidas de mitigación para minimizar cualquier impacto que pueda tener tanto la construcción como la operación del sistema, entre otros. El documento deberá ser sometido por la agencia proponente a la Junta de Calidad Ambiental y cualquier otra agencia concerniente para evaluación y comentarios. Este proceso es necesario para que la Junta de Calidad Ambiental pueda determinar si la actividad propuesta tiene o no un impacto significativo al ambiente.

Evaluación de composición y calidad energética del biogás

Dado que nuestro plan describe un sistema de producción de biogás basado en datos teóricos, se recomienda realizar investigaciones científicas para determinar la composición del biogás generado utilizando lodos sanitarios producidos en Puerto Rico. El propósito de esta evaluación es determinar el porcentaje de metano (CH₄) real del biogás generado y por consiguiente, su capacidad energética ya que la misma esta basada en la concentración de estos gases.

Asimismo, estudiar la composición del biogás ayudaría a determinar si son necesarios sistemas adicionales de tratamiento para remoción de sulfuro de hidrógeno u otras sustancias que tengan potencial de contaminación ambiental. Este factor ayudaría además a identificar con mayor precisión los costos totales del sistema y si el proyecto podría tener algún impacto significativo al ambiente.

Financiamiento

Dado que nuestro estudio fue dirigido a la implementación de este sistema en una instalación de tratamiento de aguas usadas manejada por el gobierno estatal, se debe evaluar la disponibilidad de fondos estatales y/o federales. Las siguientes agencias federales manejan programas para la implementación de fuentes alternas de energía y podrían representar una opción para adquirir los fondos necesarios para la construcción de un sistema de producción de biogás en Puerto Rico:

- Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE), a través de los programas “Biomass Energy Program” y “Federal Energy Management Program”
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA)
- Centro Nacional para la Investigación Ambiental (NCER, por sus siglas en inglés).
- Departamento de Tesorería de los Estados Unidos, a través del programa de Subsidios de Energía Renovable.

Estas agencias actualmente ofrecen préstamos y/o subsidios para la investigación, desarrollo e implementación de sistemas de generación de energía renovable en los

Estados Unidos. Las mismas podrían proveer el apoyo financiero necesario para la implementación del sistema de digestión anaeróbica recomendado.

Permisología

Para implementar un sistema de digestión anaeróbica para producción de biogás en Puerto Rico, se debe considerar la adquisición de los siguientes permisos, según aplique:

- Permiso de Construcción
- Permiso de Operación Título V (requerido para la construcción u operación de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos)
- Permiso NPDES (“National Pollutant Discharge Elimination System”) por posibles descargas de aguas de proceso y/o de escorrentía las cuales deben ser monitoreadas y reportadas.
- Permiso de Manejo de Desperdicios Sólidos para el manejo y disposición de material residual del proceso de digestión.
- Permiso de Control de Erosión y Sedimentación de Terrenos.

Estos permisos son requeridos por las agencias gubernamentales estatales y federales para la construcción y operación de cualquier proyecto, según aplique. En el caso de que se decida construir el sistema de producción de biogás dentro de los predios de la Planta de Tratamiento de Puerto Nuevo, deberán evaluarse los permisos existentes de la planta e identificar aquellos permisos que requieran ser revisados para incluir la nueva operación.

Los puntos antes mencionados representan algunos de los factores más importantes y necesarios para poder implementar un sistema de producción de biogás en Puerto Rico. Debido al dinamismo actual de la legislación estatal, federal e internacional que rige el desarrollo de sistemas de energía renovables, la implementación de este sistema podría no limitarse a los factores antes mencionados. Por lo tanto, es posible que se requiera un análisis exhaustivo de los factores presentes al momento de la ejecución de este plan.

LITERATURA CITADA

- Academia Nacional de Ciencias (1977). Design Criteria. *Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes*, Parte III, Capítulo 2, Págs. 74-83. Books for Business. Reimpreso en 2001.
- Administración de Asuntos de Energía [AAE] (n.d.). *Fuentes de Energía No Renovables*. Extraído marzo 11, 2007, http://www.aae.gobierno.pr/InformacionEnergetica/FuentesEnergias/no_renovables.asp.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] (1992). *Toxicological Profile for 2-butanone*. Extraído abril 8, 2008, <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp29.html>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] (1995). *ToxFAQs™ 2-Butanona*. Extraído abril 8, 2008, http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts29.html.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] (1999). *Public Health Statement for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)*. Extraído abril 9, 2008, <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/phs123.html>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] (2007). *Resumen de Salud Pública Bario (Barium)* CAS#: 7440-39-3. Extraído abril 7, 2008, http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs24.html.
- Asamblea Legislativa de Puerto Rico (2004). *Ley sobre Política Pública Ambiental del 22 de septiembre de 2004*. LPRÁ 416 §. Extraído noviembre 7, 2007, <http://www.lexjuris.com/lexlex/Leyes2004/lexl2004416.htm>.
- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados [AAA] (2003). *Reglamento Sobre Los Servicios De Agua y Alcantarillado*. Extraído septiembre 20, 2007 http://www.acueductospr.com/reglamentos/re_ser_agua_alcan/reglamento_espano_lre_ser_agua_espa_main.htm#indice_principal.
- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados [AAA] (2007). *Visión y Metas*. Extraído diciembre 2, 2007, http://www.acueductospr.com/1_nuestra_autoridad/vision_metas_acueductospr.htm.
- Autoridad de Desperdicios Sólidos [ADS] (2004a). *Plan Estratégico para el Manejo de Residuos Sólidos en Puerto Rico*. Extraído febrero 10, 2007, <http://www.ads.gobierno.pr>.

- Autoridad de Desperdicios Sólidos [ADS] (2004b). *Reglamento para la Reducción, Reutilización y el Reciclaje de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico*. Extraído septiembre 20, 2007, www.ads.gobierno.pr/reglamentos/ReglamentoReciclaje.pdf.
- Bluestem Solid Waste Agency & Iowa Department of Natural Resources [Bluestem] (2004). *Anaerobic Digestion Feasibility Study Final Report*. Extraído septiembre 13, 2008, <http://www.iowadnr.com/waste/policy/files/bluestem.pdf>.
- Braun, R. (2007). *Country Update Austria – 2007*. Instituto de Biotecnología Ambiental Departamento de Agro-biotecnología, Universidad de Recursos Naturales y Ciencias Aplicadas, Vienna. Extraído noviembre 4, 2007, http://www.iea-biogas.net/Dokumente/countryreports/07/report_austria_07.pdf.
- Carballa, M., F. Omil, A.C. Alder & J.M. Lema (2006). Comparison Between the Conventional Anaerobic Digestion of Sewage Sludge and its Combination with a Chemical or Thermal Pre-Treatment Concerning the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products. *Water Science & Technology*, Vol 53, No. 8 pp 109–117. IWA Publishing. Extraído septiembre 21, 2008, [http://www.usc.es/biogrup/2006%2053-8-109,117%20WST%20M.%20Carballa %20Comparison%20between...pdf](http://www.usc.es/biogrup/2006%2053-8-109,117%20WST%20M.%20Carballa%20Comparison%20between...pdf).
- Carrillo, Leonor (2004). *Energía de Biomasa*. 1ra Ed. S.S. Jujuy, Argentina. Extraído marzo 23, 2007, de www.unsa.edu.ar/matbib/ebiomasa.pdf.
- Ceráme-Vivas, M. (2001). *Ecología Puerto Rico*. Publicaciones Puertorriqueñas, Inc.
- Chiras, Daniel D. (2001). *Environmental Science: Creating a Sustainable Future*. 6th Ed. Jones and Barlett.
- Contreras, L. (2006). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. *Revista Futuros*, Volumen IV, Número 16. Extraído septiembre 12, 2007, <http://www.revistafuturos.info>.
- Craig, L. & B. Nelson (2007). *Bill to Promote Biogas Production and for other purposes*. United States Congress. Extraído noviembre 8, 2007, http://craig.senate.gov/releases/biogas_bill_2007.pdf.
- Davis, M. L. & D. A. Cornwell (1998). *Introduction to Environmental Engineering*. 3rd Edition. WCB/McGraw-Hill.
- De la Rubia, M.A., M. Perez, L.L. Romero & D. Sales (2002). Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Municipal Sludge Digestion. *Chem. Biochem. Eng. Q.* 16 (3) 119–124. Extraído abril 7, 2008, http://www.fkit.hr/cabeq/pdf/16_3_2002/Cabeq%202002-03_3.pdf.

- Departamento del Trabajo de los Estados Unidos [DOL] (2009). *Consumer Price Index (CPI) Inflation Calculator*. Extraído abril 10, 2009, http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm.
- Energy Information Administration [EIA] (2002). *Petroleum Chronology of Events 1970 – 2000*. Extraído septiembre 16, 2007, <http://www.eia.doe.gov>.
- Energy Information Administration [EIA] (2005). *Energy Policy Act of 1992 (Brief Description)*. Extraído noviembre 8, 2007, <http://www.eia.doe.gov>.
- Energy Information Administration [EIA] (2007a). *Official Energy Statistics from the US Government, International Energy Annual 2005, International Net Energy Consumption Tables*. Extraído septiembre 16, 2007, <http://www.eia.doe.gov>.
- Energy Information Administration [EIA] (2007b). *International Petroleum (Oil) Consumption Tables*. Extraído septiembre 16, 2007, <http://www.eia.doe.gov>.
- European Commission [EC] (2007). *United Kingdom – Renewable Energy Fact Sheet*. Extraído noviembre 7, 2007, http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/fact_sheets/renewables/renewables_uk_en.pdf.
- Geels, F. W. & R. Raven (2007). Socio-cognitive evolution and co-evolution in competing technical trajectories: biogas development in Denmark (1970-2002), *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. Extraído noviembre 4, 2007, <http://www.highbeam.com>.
- Ghangrekar, M. M. & U. J. Kahalekar (2003). Performance and Cost Efficacy of Two-stage Anaerobic Sewage Treatment. *Journal of the Institution of Engineers (India)*. Department of Civil Engineering, Government College of Engineering, Aurangabad. Extraído septiembre 18, 2008, <http://www.ieindia.org/publish/en/0903/sept03en3.pdf>.
- Goldstein, J. (2002). Electric Utilities Hook up To Biogas. *BioCycle Journal of Composting & Organics Recycling*, Marzo 2002. Extraído diciembre 10, 2007, <http://www.environmental-expert.com/articles/article1178.htm>.
- Goodwin, S. & J.G. Zeikus (1987). Eco-physiological Adaptations of Anaerobic Bacteria to Low pH: Analysis of Anaerobic Digestion in Acidic Bog Sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 53, No. 1, p. 57-64. Extraído septiembre 21, 2008, <http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?artid=203602&blobtype=pdf>.
- Governo, J. (2000). *Characterization and Quantification of Georgia's Municipal Biosolids Production and Disposal*. The University of Georgia College or Agricultural and Environmental Sciences for The Pollution Prevention Assistance, Division Department of Natural Resources, Atlanta, Georgia.

- Extraído septiembre 25, 2008, <http://outreach.engineering.uga.edu/publications/BiosolidsReport2000.pdf>.
- Holm-Nielsen, J. & T. Al Seadi (1997). *Biogas in Europe: A General Overview*. Extraído junio 10, 2007, <http://www.ecop.ucl.ac.be/aebiom/articles/biogas/biogas.htm>.
- Holm-Nielsen, J. & T. Al Seadi (2007). *Biogas in Denmark Country Up-date 2007*. Departamento de Bioenergía, Universidad de Dinamarca del Sur. Extraído noviembre 4, 2007, http://www.iea-biogas.net/Dokumente/countryreports/07/report_danemark_07.pdf.
- International Energy Agency [IEA] (2005). *Biogas Production and Utilization. IEA Bioenergy: T37:2005:01*. Extraído septiembre 14, 2008, <http://www.iea-biogas.net/Dokumente/Brochure%20final.pdf>.
- International Programme of Chemical Service [IPCS] (1991). *Barium Health and Safety Guide. Health and Safety Guide No. 46*. Extraído abril 7, 2008, <http://www.inchem.org/documents/hsg/hsg/hsg046.htm#SectionNumber:1.1>.
- Jolly, M., L. Nemeth, S. Arant, & T. Wilson (2004). *Recent Advances in Biosolids Stabilization 2004: Case Histories*. Extraído diciembre 9, 2007, <http://www.earthtech.com/news/whitepapers.htm>.
- Junta de Calidad Ambiental [JCA] (1998). *Reglamento para el Manejo de los Desperdicios Sólidos No Peligrosos*. Extraído febrero 17, 2007, <http://www.jca.gobierno.pr>.
- Junta de Calidad Ambiental [JCA] (2002). *Contaminación de Terrenos*. Extraído febrero 17, 2007, <http://www.jca.gobierno.pr>.
- Junta de Planificación [JP] (2006a). *Borrador Preliminar Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico, Perfil Puerto Rico*. Extraído febrero 8, 2007, <http://www.jp.gobierno.pr>.
- Junta de Planificación [JP] (2006b). *Borrador Preliminar Plan de Uso de Terrenos, Perfil Regional - Región Metropolitana*. Extraído marzo 8, 2007, <http://www.jp.gobierno.pr>.
- Kapdi, S.S., V.K. Vijay, S.K. Rajesh & R. Prasad (2004). *Biogas Scrubbing, Compression and Storage: Perspective and Prospectus in Indian Context*. Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology, New Delhi, India. Extraído noviembre 1, 2007, <http://www.sciencedirect.com>.
- Kayhanian, M., G. Tchobanoglous & R. Brown (2007). *Biomass Conversion Processes For Energy Recovery. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*,

Chapter 25, CRC Press.

- Kram, J. (2007). A New Day for Biogas: Germany Leads the Way in Europe, *Biomass Magazine*. Extraído julio 7, 2007, http://www.biomassmagazine.com/article-print.jsp?article_id=1156.
- Krich, K., D. Augenstein, JP. Batmale, J. Benemann, B. Rutledge, & D. Salour, (2005). *Biomethane from Dairy Waste: A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California*. USDA Rural Development. Extraído febrero 17, 2007, http://www.suscon.org/news/biomethane_report/index.asp.
- Lundén, A. (2003). *Biogas Production Anaerobic digestion of grains diluted in process water from a wastewater treatment plant*. Master of Science Thesis, Environmental Science Programme, Linköpings Universitet, Campus Norrköping, SE-601 74 Norrköping, Sweden.
- Manahan, S. E. (1994). *Environmental Chemistry*. 6th Edition. CRC Press.
- Man-chang, W., S. Ke-wei, & Z. Yong (2006). Influence of Temperature Fluctuation on Thermophilic Anaerobic Digestion of Municipal Organic Solid Waste. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7(3):180-185. Extraído abril 7, 2008, <http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?artid=1419061&blobtype=pdf>.
- McFarland, M. (2001). Biosolids and Sludge Processing. *Biosolids Engineering*. McGraw-Hill, Capítulo 3, Págs. 3.67 – 3.77. Extraído septiembre 21, 2008, <http://books.google.com/>.
- Moser, M., R. Mattocks, S. Gettier, & K. Roos (2007). *Benefits, Costs and Operating Experience at Seven New Agricultural Anaerobic Digesters*. Programa AgStar, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Extraído noviembre 4, 2007, <http://www.epa.gov/agstar/resources/ben.html>.
- National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH] (2005). *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: 2-Butanone*. Extraído abril 8, 2008, <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0069.html>.
- National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH] (2002). *Guidance for Controlling Potential Risks to Workers Exposed to Class B Biosolids*. Extraído abril 15, 2008, <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2002-149/pdfs/2002-149.pdf>.
- Noyola, A., J.J. Morgan-Sagastume & J.E. López-Hernández (2006). Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Environmental Science and Bio/Technology*, 5, 93-114.
- Oak Ridge National Laboratory [ORNL] (n.d.). *Quick-reference list of conversion factors used by the Bioenergy Feedstock Development Programs*. Bioenergy

- Feedstock Information Network. Managed by UT-Battelle for the United States Department of Energy. Extraído abril 18, 2009, http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/energy_conv.html.
- Occupational Safety and Health Administration [OSHA] (2000). *Related Information: Chemical Sampling - 2-Butanone / Hexone*. Extraído abril 8, 2008, <http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/mdt/mdt1004/1004.html>.
- Occupational Safety and Health Administration [OSHA] (2004). *Safety and Health Topics: Barium, Soluble Compounds (as Ba)*. Extraído abril 7, 2008, http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_219900.html.
- Oficina del Contralor de Puerto Rico [OCPR] (2004). *Informe Auditoria CP-05-07 Periodo Auditado 1 enero a 31 de diciembre 2003*. Extraído marzo 8, 2007, <http://www.ocpr.gov.pr/>.
- Oficina del Contralor de Puerto Rico [OCPR] (2005). *Informe Auditoria CP-06-03 (Rev.) Periodo Auditado 1 julio 2003 a 31 de febrero 2005*. Extraído febrero 9, 2007, <http://www.ocpr.gov.pr/>.
- Pagán-Alvarado, R. L. (2007). *Uso Beneficio De Los Lodos De Alcantarillado Sanitario A Través De La Composta: Proyecto Piloto Del Municipio De Barranquitas*. Disertación de tesis de maestría no publicada, Escuela de Ciencias y Tecnología, Universidad del Turabo, Gurabo, Puerto Rico.
- Parliament Office of Science and Technology [POST] (2007). *Number 282 Postnote: Energy and Sewage*. Extraído octubre 15, 2007, <http://www.parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf>.
- Persson, M. (2007). *Biogas – A Renewable Fuel For The Transport Sector For The Present And The Future*, Swedish Gas Center. Extraído noviembre 5, 2007, <http://www.sgc.se/rapporter/resources/Biogas%20info%2007.pdf>.
- Persson, M., O. Jönsson & A. Wellinger (2006). *Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection*, Swedish Gas Center. Extraído noviembre 5, 2007, http://www.iea-biogas.net/Dokumente/upgrading_report_final.pdf.
- Peters, G. M. & S. Lundie (2002). Life-Cycle Assessment of Biosolids Processing Options. *Journal of Industrial Ecology*, Volumen 5, Numero 2, Págs. 103-121.
- Rajkumar-Abraham, E., S. Ramachandran & V. Ramalingam (2007). Biogas: Can It Be an Important Source of Energy? *Environmental Science and Pollution Research*, Volumen 14, Número 1, Págs. 67 – 71.
- Regional Information Service Center for South East Asia on Appropriate Technology [RISE-AT] (1998). *Review of Current Status of Anaerobic Digestion Technology*

for Treatment of Municipal Solid Waste. Institute of Science and Technology Research and Development Chiang Mai University. Extraído abril 7, 2008, <http://ns.ist.cmu.ac.th/riseat/documents/adreview.pdf>.

Rulkens, W. (2008). *Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options*. *Energy & Fuels*, 22, 9-15.

Runqing, H., L. Juneng & W. Zhongying (2005). China's renewable energy law and biomass energy. *Industrial Biotechnology*, Págs. 222-227. Extraído noviembre 5, 2007, <http://www.liebertonline.com/doi/abs/10.1089/ind.2005.1.222>.

Steckel, J. K. (2001). City Uses Microturbines to Generate Electricity from Biogas. *WaterWorld*, Enero 2001. Extraído diciembre 10, 2007, <http://ww.pennnet.com/>.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2005). *Solids Waste Management*. Extraído septiembre 17, 2008, http://www.unep.or.jp/Ietc/Publications/spc/Solid_Waste_Management/Vol_I/17-Chapter11.pdf.

United States Congress [USC] (1982). *The National Environmental Policy Act of 1969, as Ammended*. Extraído noviembre 9, 2007, <http://www.nepa.gov/nepa/regs/nepa/nepaeqia.htm>.

United States Congress [USC] (1990). *Ley de Aire Limpio (Clean Air Act - CAA)*. Extraído noviembre 7, 2007, <http://www.epa.gov/air/caa/title1.html>.

United States Environmental Protection Agency [USEPA] & ICF Inc. (2004). *AgSTAR Handbook: A Manual for Developing Biogas Systems at Commercial Farms in the United States*, Second Edition. Extraído septiembre 30, 2007, <http://www.epa.gov/agstar/resources/handbook.html>.

United States Environmental Protection Agency [USEPA] (1995). *40 CFR Parts 117, 302, and 355 [SW H-FRL-5214-3] RIN 2050-AD33, Reportable Quantity Adjustments*. Extraído abril 8, 2008, <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-WASTE/1995/June/Day-12/pr-246.html>.

United States Environmental Protection Agency [USEPA] (1997). *Barium Compounds; Toxic Chemical Release Reporting; Community Right-to-Know*. Extraído abril 7, 2008, <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-TOX/1997/January/Day-03/pr-24225 DIR/pr-24225.html>.

United States Environmental Protection Agency [USEPA] (1999a). *Folleto informativo de sistemas descentralizados: Tratamiento y disposición de residuos sépticos* EPA 832-F-99-068. Extraído septiembre 3, 2007, <http://www.epa.gov/>.

United States Environmental Protection Agency [USEPA] (1999b). *Folleto informativo de sistemas descentralizados Tanque séptico - sistemas de absorción al suelo*.

- EPA 832-F-99-075. Extraído septiembre 30, 2007, <http://www.epa.gov>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2000). *Methyl Ethyl Ketone (2-Butanone)*. Technology Transfer Network Air Toxics Web Site. Extraído abril 8, 2008, <http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/methylet.html#ref1>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2002). The AgSTAR Program *Managing Manure with Biogas Recovery Systems Improved Performance at Competitive Costs*. EPA-430-F-02-004. Extraído septiembre 26, 2007, <http://www.epa.gov/agstar/pdf/manage.pdf>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2003). *Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503*. Oficina de Investigación y Desarrollo, Centro de Investigación Ambiental, Cincinnati, OH. Documento # EPA/625/R-92/013. Extraído noviembre 8, 2007, <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r92013/625R92013.pdf>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2006a). *Emerging Technologies for Biosolids Management*, EPA 832-R-06-005. Extraído febrero 15, 2007, <http://www.epa.gov>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2006b). *Código de Regulaciones Federales, Título 40 (40 CFR)*. Extraído noviembre 8, 2007, <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-I.info/chi-toc.htm>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2006c). *Biosolids Technology Fact Sheet Multi-Stage Anaerobic Digestion*. Extraído septiembre 21, 2008, <http://www.epa.gov/owm/mtb/multi-stage.pdf>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2007a). *Organics: Anaerobic Digestion. Region 9: Waste Programs*. Extraído mayo 15, 2008, <http://www.epa.gov/region09/waste/organics/ad/index.html>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2007b). *Methane Recovery from Manure: Control Odor and Produce Energy*. The AgStar Program. Extraído mayo 20, 2008, <http://epa.gov/agstar/resources/iowa1.html>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2008). *Information Collection Rule (ICR): Pathogen Information*. Extraído mayo 5, 2008, <http://www.epa.gov/enviro/html/icr/pathogens.html>.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2009). *The AgSTAR Program Frequent Questions*. Extraído mayo 2, 2008, <http://www.epa.gov/agstar/faq.html#5>.

- Universidad de Puerto Rico (2002). *Datos Marinos #52 Tratamiento para las Aguas Usadas*, Programa Sea Grant. Extraído septiembre 18, 2007, http://www.seagrantpr.org/espanol/catalogo/files/fact_sheets/52-tratamiento-aguas-usadas.PDF.
- Van Haandel A. & J. Van del Lubbe (2007). *Handbook Biological Wastewater Treatment Design and Optimization of Activated Sludge Systems*. Uitgeverij Quist; Chapter 8, Pág. 389-391.
- Vandevivere P., L. De Baere, & W. Verstraete (2002). Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. *Types of anaerobic digesters for solid wastes*, Capítulo 4. IWA Publishing. Extraído septiembre 15, 2008, http://www.adelaide.edu.au/biogas/anaerobic_digestion/pvdv.pdf.
- Verma, S. (2002). *Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes*. Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for Master of Science Degree in Earth Resources Engineering Department of Earth & Environmental Engineering, Fu Foundation School of Engineering & Applied Science, Columbia University.
- Water Environment Federation [WEF] & US Environmental Protection Agency [USEPA] (2000). *Biosolids Fact Sheet*. Project Water Environment. Recuperado Extraído marzo 15, 2007, <http://www.biosolids.org/docs/intro.pdf>.
- Weiland, P. (2007). *Country Updates: Germany*. Federal Agricultural Research Centre. Extraído noviembre 4, 2007, http://www.iea-biogas.net/Dokumente/countryreports/07/report_germany_07.pdf.
- Wiesmann, U., I.S. Choi, & E. Dombrowski (2007). *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*, Wiley-VCH, Capítulo 8, Pág. 169-170.
- Zaher, U., D. Cheong, B. Wu & S. Chen (2007). *Producing Energy and Fertilizer from Organic Municipal Solid Waste*. Department of Biological Systems Engineering Washington State University, Ecology Publication No. 07-07-024.

TABLAS

Tabla 1

Resultados de Caracterización Química de Lodos Sanitarios Planta de Tratamiento Primario de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio 2007 a Octubre 2007).

Sustancia	Fecha del Muestreo						Promedio	Unidades	Método de Análisis	Límites	
	Jun. 2007	Jul. 2007	Ago. 2007	Sept. 2007	Oct. 2007	Nov. 2007				MDL ¹	MCL ²
Arsénico	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/L	EPA 6010 B	0.005	5
Bario	0.442	0.182	0.226	0.287	0.370	BDL	0.301	mg/L	EPA 6010 B	0.005	100
Cadmio	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/L	EPA 6010 B	0.002	1
Cromo	BDL	BDL	BDL	BDL	0.007	BDL	0.007	mg/L	EPA 6010 B	0.002	5
Plomo	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/L	EPA 6010 B	0.005	5
Selenio	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/L	EPA 6010 B	0.005	1
Plata	BDL	BDL	BDL	0.006	BDL	BDL	0.006	mg/L	EPA 6010 B	0.002	5
Antimonio	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/Kg	EPA 6010 B	0.2	-
Berilio	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/Kg	EPA 6010 B	0.1	-
Talio	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/Kg	EPA 6010 B	0.5	-
Mercurio	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/L	EPA 7470 A	0.0002	0.2
TPH as DRO (C10-C18)	398	1114	1369	1458	1936	853	1188	mg/Kg	EPA 8015 B	10	-
TPH as GRO (C6-C10)	235	112	ND	173	73	237	166	mg/Kg	EPA 8015 B	10	-
Chlordane	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8081 A	0.005	0.03
Endrin	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8081 A	0.0005	0.02
Gamma - BHC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8081 A	0.0005	0.4
Heptachlor	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8081 A	0.0005	0.008
Heptachlor epoxide	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8081 A	0.0005	0.008
Methoxychlor	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8081 A	0.005	10
Toxaphene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8081 A	0.01	0.5
2,4,5-TP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8151 A	0.001	1
2,4-D	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8151 A	0.01	10
1,1-Dichloroethene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.001	0.7
1,2-Dichloroethane	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.001	0.5
1,4-Dichlorobenzene	ND	ND	0.002	ND	0.002	ND	0.002	mg/L	EPA 8260 B	0.001	7.5
2-Butanone (mg/L)	0.137	ND	0.108	0.158	0.171	0.150	0.145	mg/L	EPA 8260 B	0.015	200
Benceno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.001	0.5
Carbon tetrachloride	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.001	0.5
Chlorobenzene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.001	100
Chloroform	0.003	ND	ND	ND	ND	0.005	0.004	mg/L	EPA 8260 B	0.001	6
Tetrachloroethene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.001	0.7
Trichloroethene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.001	0.5
Vinyl chloride	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8260 B	0.003	0.2
2,4,5-Trichlorophenol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	0.05	400
2,4,6-Trichlorophenol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	0.5	2
2,4-Dinitrotoluene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	0.1	0.13
Hexachlorobenzene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	0.01	0.13
Hexachlorobutadiene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	0.25	0.5
Hexachloroethane	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	0.2	3
m,p-Cresol	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/L	EPA 8270 C	1	200
Nitrobenzene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	1.5	2
o-Cresol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	1	200
Pentachlorophenol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	3	100
Piridina	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	mg/L	EPA 8270 C	1	5
Corrosividad, pH	5.32	5.56	6.75	6.17	5.16	5.61	5.76	S.U.	EPA 9045 C	1	<2 - >12.5
Paint Filter Test	0	0	0	0	0	0	0	mL/100g	EPA 9095 A	0	-
Releasable Cyanide	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/Kg	SW 846 - 7.3.3	1	250
Releasable Sulfide	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0	mg/Kg	SW 846 - 7.3.4	1	500

¹MCL se refiere al nivel máximo de contaminante ("Maximum Contaminant Level").

²MDL se refiere al nivel máximo de detección del método utilizado ("Maximum Detection Limit").

Tabla 2

Comparación de Resultados Promedio para Sustancias en Mayor Concentración vs. Límites Establecidos.

Sustancia	Promedio	Límites		Límites Agencias			Unidades
		MDL	MCL	OSHA	NIOSH	USEPA	
Bario	0.301	0.005	100	0.0005	0.05	-	mg/L
2-Butanona	0.145	0.015	200	200	200	5.4	mg/L
TPH as DRO (C10-C18)	1188	10	-	500	-	-	mg/Kg
TPH as GRO (C6-C10)	166	10	-	500	-	-	mg/Kg

Tabla 3

Comparación de Tecnologías de Digestión Anaeróbica Seca (Suplidores: Kompogas, Dranco y Valorga).

Parámetro / Descripción	Kompogas	Dranco	Valorga
Concentración de Sólidos Totales	20%	20% - 50%	35%
Temperatura	Termofílica 45°C - 55°C (Requiere calentamiento)	Mesofílica 25°C - 40°C (Calentamiento opcional)	Mesofílica 25°C - 40°C (Calentamiento opcional)
Tiempo de Retención	15 - 18 días	18 - 24 días	15 días
Configuración	Flujo de Pistón ("Plug-Flow")	Flujo de Pistón ("Plug-Flow")	Mezclado Completo
Mezclado	Mecánico	Recirculación Lodos	Recirculación Biogás
Capacidad Reactor	Fija (max. 15,000 - 25,000)	Ajustable	Ajustable
Operación	Intervención mínima de operadores	Requiere intervención de operador	Requiere intervención de operadores
Material de Construcción	Acero	Acero Concreto	Concreto
Ventajas / Desventajas	Requiere ajuste de conc. de sólidos a ~ 20% Se recircula solo una pequeña porción de material para inocular el efluente fresco y promover la digestión	No requiere ajuste de conc. de sólidos Se recircula una porción grande de material para inocular el efluente fresco y promover la digestión	Requiere ajuste de conc. de sólidos a ~ 35% No ocurre recirculación de material Requiere mantenimiento constante de las boquillas de inyección de gas por obstrucción

Tabla 4

Análisis de Costos para Instalación de Digestión Anaeróbica de 7,500 TPY (basado en información obtenida de Bluestem, 2004).

Año	2004	2004	2009
Descripción	36,000	Toneladas por año 7,500	7,500
<i>Costos Indirectos</i>			
Ingeniería	\$ 192,500.00	\$ 40,104.17	\$ 44,916.67
Gerencia Construcción	\$ 40,000.00	\$ 8,333.33	\$ 9,333.33
Evaluación Lugar Const.	\$ 7,950.00	\$ 1,656.25	\$ 1,855.00
Inicialización ("Start-up")	\$ 113,700.00	\$ 23,687.50	\$ 26,530.00
Total	\$ 354,150.00	\$ 73,781.25	\$ 82,635.00
<i>Adquisiciones</i>			
Válvulas	\$ 1,058,110.00	\$ 220,439.58	\$ 246,892.33
Transformadores	\$ 26,423.00	\$ 5,504.79	\$ 6,165.37
Panel de Control	\$ 254,426.00	\$ 53,005.42	\$ 59,366.07
Mezcladores	\$ 475,101.00	\$ 98,979.38	\$ 110,856.90
Calentadores de Agua y Bombas	\$ 115,508.00	\$ 24,064.17	\$ 26,951.87
Unidad CHP	\$ 908,950.00	\$ 189,364.58	\$ 212,088.33
Tanques	\$ 2,104,520.00	\$ 438,441.67	\$ 491,054.67
Almacenamiento y Tratamiento de Gas	\$ 1,457,671.00	\$ 303,681.46	\$ 340,123.23
Instrumentación	\$ 406,690.00	\$ 84,727.08	\$ 94,894.33
Total	\$ 6,807,399.00	\$ 1,418,208.13	\$ 1,588,393.10
<i>Construcción</i>			
General	\$ 616,350.00	\$ 128,406.25	\$ 143,815.00
Electricidad	\$ 281,750.00	\$ 58,697.92	\$ 65,741.67
Instalaciones Mecánicas	\$ 715,248.00	\$ 149,010.00	\$ 166,891.20
Total	\$ 1,613,348.00	\$ 336,114.17	\$ 376,447.87
Costos Totales de Construcción	\$ 8,774,897.00	\$ 1,828,103.54	\$ 2,047,475.97
Contingencia	\$ 658,117.28	\$ 182,810.35	\$ 204,747.60
Costos Totales de Instalación	\$ 9,433,014.28	\$ 2,010,913.90	\$ 2,252,223.56
<i>Costo por Tonelada</i>	\$ 262.03	\$ 268.12	\$ 301.18

Tabla 5

Análisis de Ingresos vs. Costos de Operación y Mantenimiento para Instalación de Digestión Anaeróbica de 7,500 TPY (basado en información obtenida de Bluestem, 2004).

Descripción	Costo por kWh actual (basado en tarifa AEE)		Unidades
	sin compra combustible	con compra combustible	
	(\$0.05/kWh)	(\$0.18/kWh)	
<i>Ingresos por Electricidad</i>			
Cantidad de lodos totales	16,534,670	16,534,670	lbs/año
Cantidad de sólidos totales en lodos (35%)	5,787,135	5,787,135	lbs/año
Biogás generado (6 ft ³ /lb)	34,722,807	34,722,807	ft ³ /lb
Energía BTU (550 Btu/ft ³)	19,097,543,850	19,097,543,850	BTU/año
Electricidad kWh (3,412 Btu/kWh)	5,597,170	5,597,170	kWh/año
Total de Ingresos	\$ 279,858.50	\$ 1,007,490.59	\$/año
<i>Costos Operación & Mantenimiento*</i>			
Generador (\$0.0125/kWh)	\$ 69,964.62	\$ 69,964.62	\$/año
Digestor (2.25% de costos construcción)	\$ 50,675.03	\$ 50,675.03	\$/año
Labor (\$18.00/hr, 24hrs/365 días/año)	\$ 157,680.00	\$ 157,680.00	\$/año
Total	\$ 278,319.65	\$ 278,319.65	\$/año
Contingencia	\$ 27,831.97	\$ 27,831.97	\$/año
Total Costos Operación & Mantenimiento	\$ 306,151.62	\$ 306,151.62	\$/año
Ganancia/Pérdida	\$ (26,293.12)	\$ 701,338.97	\$/año
(Total de Ingresos - Total Costos de Op. & Mant.)			

*Los costos de operación y mantenimiento no consideran costos relacionados a permisos, utilidades y otros costos asociados al mantenimiento de la infraestructura.

FIGURAS

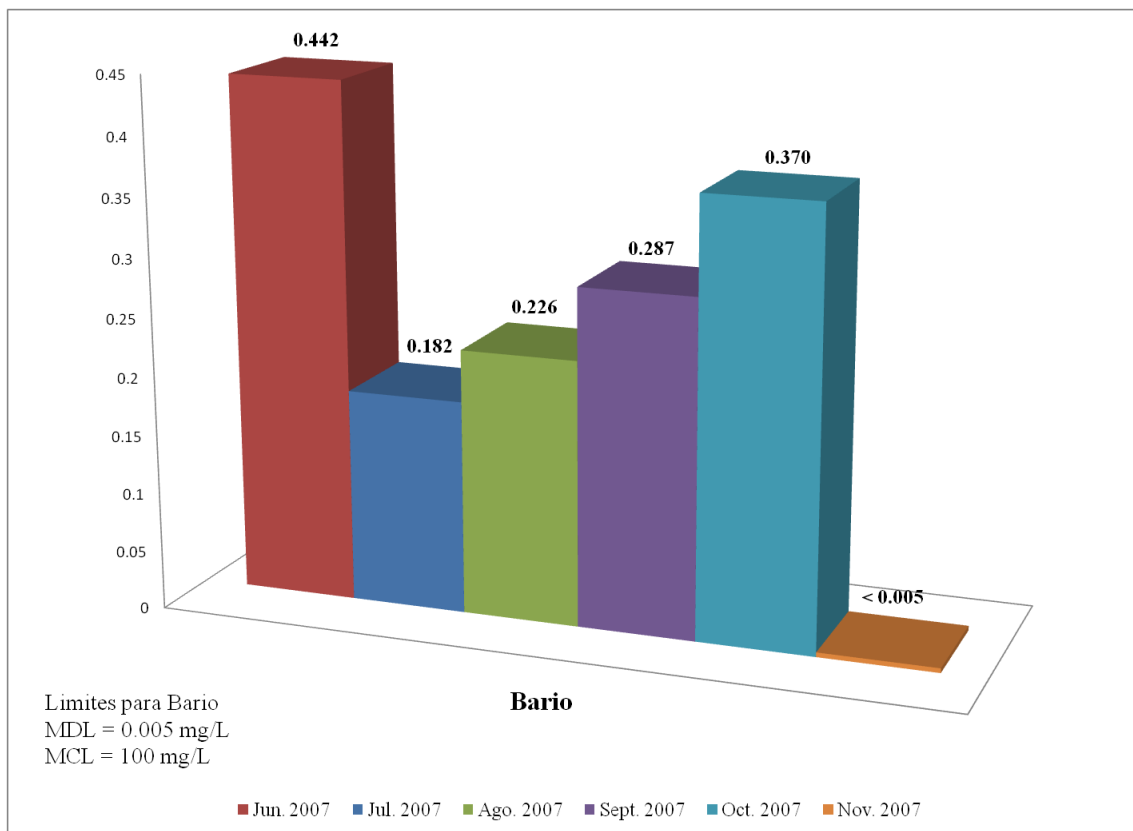


Figura 1. Concentraciones de Bario para Muestras de Lodos Sanitarios, Planta de Tratamiento de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio - Octubre 2007).

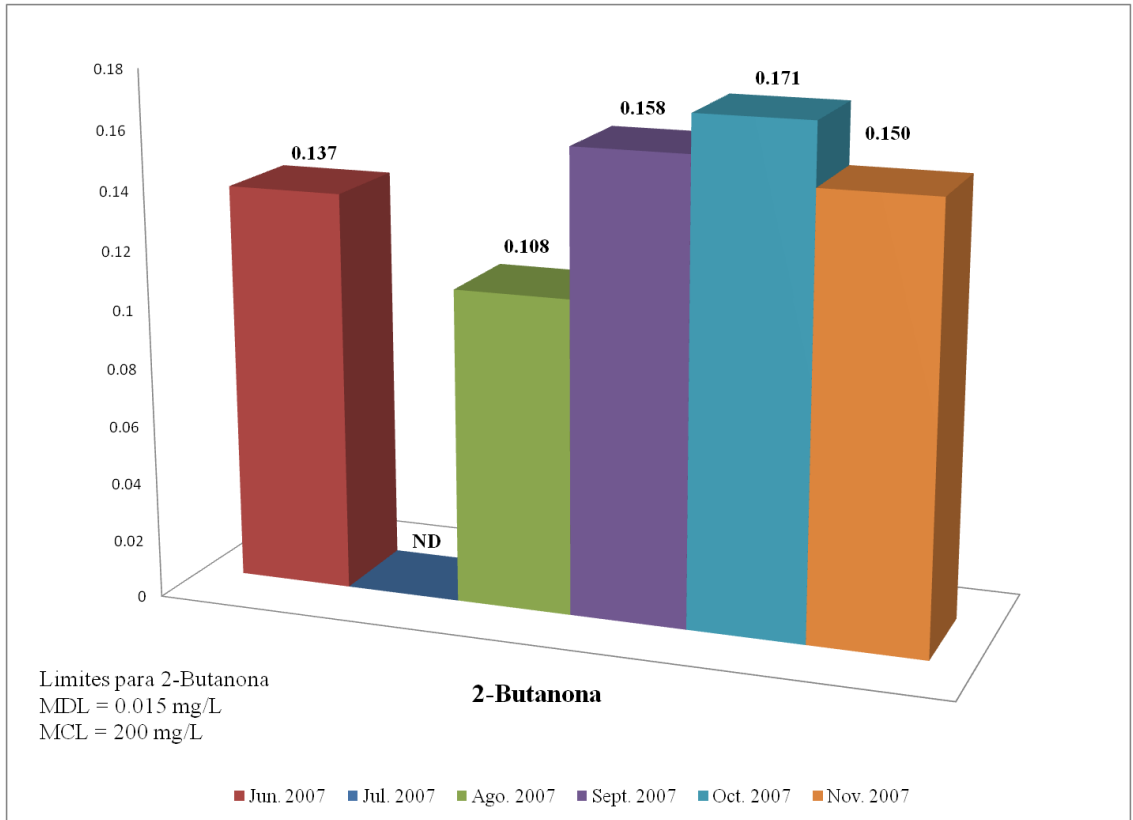


Figura 2. Concentraciones de 2-Butanona para Muestras de Lodos Sanitarios, Planta de Tratamiento de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio - Octubre 2007).

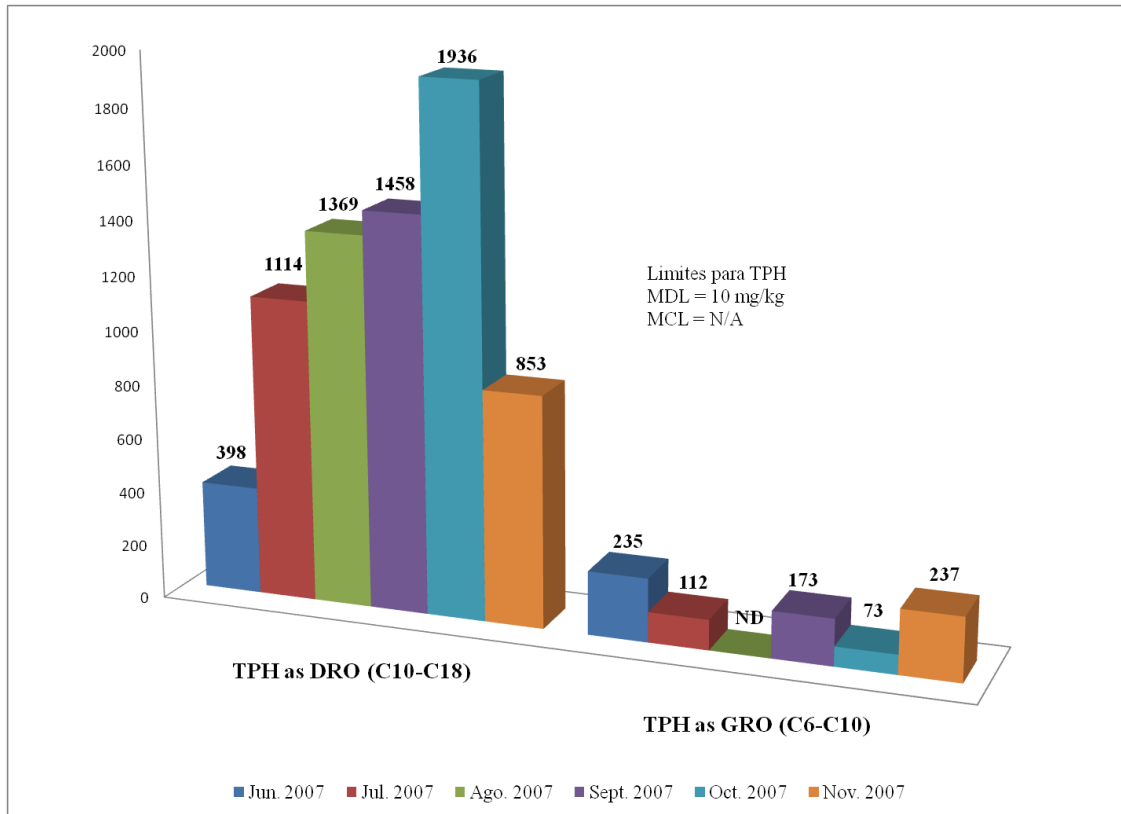


Figura 3. Concentraciones de Hidrocarburos de Petróleo Totales (TPHs) para Muestras de Lodos Sanitarios, Planta de Tratamiento de Aguas Usadas Puerto Nuevo (Junio - Octubre 2007).