

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA, LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE 1ra. Ed.



En colaboración con



Universidad Complutense de Madrid, España Universidad de El Salvador, El Salvador

TESIS DE GRADUACIÓN:

**“VALORACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO-TEÓRICO DE MATERIAL ORGÁNICO PROCEDENTE
DE RESIDUOS DE RELLENOS SANITARIOS Y DEL JACINTO ACUÁTICO (EICHHORNIA CRASSIPES)
DE LOS EMBALSES DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS”.**

Presenta: Ing. José Alberto Cardona Rodríguez

Asesora: Msc. GLORIA HAYDEE CERROS DE FLORES

León, Abril del 2014

Agradecimientos

- ✓ *Agradezco a Dios Todopoderoso por darme fuerza y sabiduría para completar este trabajo.*
- ✓ *A mi amada familia: mi padre José Ernesto Cardona, mi madre Rosa Mirian Rodríguez de Cardona, mi hermano Benjamín Ernesto Cardona Rodríguez y a mi gatita "Bonita" alias la "Bonnie", quienes siempre me han acompañado y apoyado en todos los proyectos de mi vida.*
- ✓ *Al coordinador de la Maestría Ing. Jaime Arévalo por el apoyo, la paciencia y la dedicación para llevar una obra tan importante como es la formación de profesionales en el área de energías renovables y medio ambiente.*
- ✓ *A mi asesora de tesis la Msc. Gloria Haydee Cerros por apoyarme y brindarme su valiosa asesoría técnica durante la elaboración de este documento.*
- ✓ *A la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) por autorizarme a utilizar información y datos internos para realizar los cálculos presentados en este documento.*
- ✓ *A mis amigos y conocidos que me apoyan cada día, en especial a: Edwin, Marcos, Marilyn, Juan Carlos, Eliud, Randy, Marcela, Yolanda, Dennis y todos mis compañeros de la Unidad Ambiental de CEL, amigos del Clan A y del Club PES.*
- ✓ *A mis compañeros y amigos de la maestría en especial a Juan C. Dahbura Ramos, Carlos Pocasangre y Caleb Nájera por su apoyo, amistad y dedicación durante la fase de estudio.*
- ✓ *A todos los profesores de la Maestría en especial al Dr. Armenta, Dr. Mendoza, Msc. Saavedra, Ing. Arévalo e Inga. Ana María Gonzales, por su enseñanzas y dedicación a la formación de profesionales en el área de energías renovables.*
- ✓ *A mi querida novia Rebeca Saraí Cruz Pérez por su cariño y apoyo durante cada etapa de este proyecto y a sus abuelitos que me tienen mucha paciencia cuando los visito, así como a su mascota Terry alias "Skippy" por cuidarnos y ser un amigo incondicional.*
- ✓ *A mi consejero Lic. Boris Barraza por su consejos y guía para mejorar cada día como persona.*

Dedicatoria

Mi Tesis la dedico con tomo mi amor y cariño a mi padre José Ernesto Cardona, a mi madre Rosa Mirian Rodríguez de Cardona, a mi hermano Benjamín Ernesto Cardona Rodríguez, a mi novia Rebeca Saraí Cruz Pérez y a todos mis amigos y amigas por apoyarme y darme siempre su cariño incondicional.

J.A.C.R.

Resumen

La presente tesis realiza la valoración del potencial energético-teórico de: a) Materia orgánica de rellenos sanitarios y b) Jacinto Acuático o Lirio Acuático (Eichhornia crassipes) procedente de los embalses de centrales hidroeléctricas. La valoración se efectúa con el fin de exponer dos alternativas, de materia prima, para el aprovechamiento energético y desarrollo de la energía renovable no convencional de biomasa en el país. Se presentan los fundamentos teóricos para la explotación de estos recursos y se calcula su potencial teórico en base a la producción y aprovechamiento del biogás que se pueda producir por su descomposición controlada.

Summary

This thesis makes the assessment of energy-theoretical potential: a) Organic matter from landfills and b) Water Lily or Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) from hydroelectric reservoirs. Evaluation is carried out in order to expose two alternatives, raw material, for energy use and development of non-conventional renewable biomass energy in the country. The theoretical basis for the exploitation of these resources are presented and their theoretical potential is calculated based on the production and use of biogas that can be produced by the controlled decomposition.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	6
2	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	7
3	OBJETIVOS.	10
4	MARCO TEÓRICO.	11
5	MARCO DE REFERENCIA GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.	37
6	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL EMBALSE DE LA C.H. CERRÓN GRANDE.	42
7	POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DEL METANO PARA INSTALACIONES DE LA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: COMISIÓN EJECUTIVA HIDROELÉCTRICA DEL RÍO LEMPA (CEL).	43
8	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
9	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL POTENCIAL DEL JACINTO ACUÁTICO CON GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.	47
10	CONCLUSIONES.....	48
11	RECOMENDACIONES.	49
12	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	50

1 INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento energético de los residuos sólidos comunes en los rellenos sanitarios del país es muy limitado, ya que de 11 rellenos municipales legalmente reconocidos¹, solo uno cuenta con tecnología de aprovechamiento del biogás para generación eléctrica, implicando que existe un potencial significativo para el aprovechamiento de los restantes 10 rellenos, más aún si incluyen: a) rellenos sanitarios de instituciones (como la CEL²), b) materia orgánica de botaderos clandestinos y c) residuos orgánicos de cuerpos de agua superficiales. De igual manera otra fuente de biomasa para la generación de biogás es la especie invasora *Eichhornia crassipes*, conocida como Jacinto Acuático o Lirio Acuático, presente en una gran área de cuerpos de agua lenticos, como embalses de centrales hidroeléctricas, lagos, lagunas, etc. Dicha especie afecta el medio ambiente y limita los reservorios disminuyendo los niveles de agua por la evo-transpiración producida por la planta. El aprovechamiento actual del Jacinto Acuático es parcial y limitado, en el país no se ha realizado un análisis de su potencial de generación de biogás.

Para proyectos de aprovechamiento de biomasa, en sus primeras etapas, es necesario incluir alternativas de materia prima como el Jacinto Acuático, posterior al análisis de su potencial energético. Un proyecto de esta índole que se desarrolla actualmente es la Planta de generación eléctrica con biogás, de CEL, que se encuentra en fase de pre-factibilidad y donde se prevé utilizar aguas residuales de tipo ordinario de colectores concentrados de ANDA³ combinada con otros residuos orgánicos.

El presente trabajo de graduación contiene una investigación de tipo teórica con el fin de determinar el potencial energético del material orgánico en rellenos sanitarios y del Jacinto Acuático. Se presenta un cálculo con ejemplos reales utilizando información que ha proporcionado CEL respecto a: a) Cantidad de residuos y desechos orgánicos de rellenos sanitarios institucionales y b) Cantidad de Jacinto Acuático promedio en el embalse de la Central Hidroeléctrica Cerrón Grande.

¹Según el Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales 2006 del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

²CEL: Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa.

³ANDA: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En el marco del plan quinquenal 2009-2014 del gobierno de El Salvador, en el que se fomenta la investigación, desarrollo y uso de tecnologías para el aprovechamiento de las fuentes de energías renovables no convencionales, es necesario realizar una valoración teórica del potencial energético del material orgánico disponible, como un primer paso para determinar posibles proyectos energéticos no convencionales, tales como: biodigestores, plantas híbridas de tratamiento de agua y productoras de biogás, generación de metano en rellenos sanitarios, etc.

Según los diagnósticos internos realizados por CEL el potencial de recuperación de los residuos y desechos orgánicos con que se dispone en los rellenos sanitarios de las Centrales Hidroeléctricas varía entre un 13-60 % aproximadamente, asimismo se calcula una producción de 0.33 kg de desechos por persona al día, de los cuales un promedio del 40% son de tipo orgánico o biodegradables, al aprovechar dicho potencial se podrían disminuir los costos por procesamiento de los desechos en los rellenos sanitarios y se alargará la vida útil de los mismos.

De igual manera se estima que anualmente solo en el embalse Cerrón Grande existe un área de aproximadamente 5 km² de Jacinto Acuático en la superficie del agua. Esta especie está considerada como una de las 100 especies más invasoras según la UICN⁴ y entre los impactos de esta especie se encuentra la reducción del volumen útil de generación por efecto de la evapotranspiración producida a través de la cubierta de la planta la cual es, según algunos estudios, mayor en comparación con la evaporación al estar la superficie descubierta. Por estas razones el estudio de alternativas para el tratamiento y aprovechamiento del Jacinto Acuático es de gran importancia.

El aprovechamiento energético de ambos tipos de materia orgánica es beneficioso para una gestión más eficiente de los rellenos sanitarios, como de los embalses de las centrales

⁴UICN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

hidroeléctricas, por lo que se justifica la investigación preliminar para establecer las bases de futuros proyectos para dicho aprovechamiento.

2.1 Antecedentes del aprovechamiento del Jacinto Acuático en El Salvador y en el mundo:

Entre algunas de las investigaciones más importantes realizadas internacionalmente, referentes al aprovechamiento de Jacinto Acuático tenemos:

- a. La producción de biocombustibles con Jacinto Acuático en El Pantanal en Suramérica (2012): "El Pantanal" o el "Gran Pantanal" es una llanura aluvial que cubre la parte más occidental de Brasil y partes aledañas de Bolivia y de Paraguay. Situado en su mayoría en Brasil, y conocido durante la época de la conquista española con el nombre de "*Laguna de Jarayes*", es una llanura aluvial inmensa que cubre algunas partes de Bolivia y de Paraguay. **Es el humedal más grande del mundo**, ubicado en la región del Mato Grosso y Mato Grosso do Sul brasileño y alcanzando en sus extremos hasta Paraguay y Bolivia, con una extensión total de 220.000 km². Es posiblemente el ecosistema más rico del mundo en biodiversidad de flora y fauna. En este estudio se analizó las potencialidades de generación de biocombustibles del Jacinto Acuático, determinando que es factible el uso de esta planta, incluso para obtener bio-etanol celuloso y otras formas de aprovechamiento como la de gasificación y obtención de metano.
- b. Bio-metanización de Jacinto de Agua usando aditivos y mezcla forzada en un bio-reactor (2006): en este trabajo se presenta un proyecto piloto que investiga los rendimientos en la producción de biogás a partir de una mezcla de Jacinto Acuático con diferentes tipos de biomasa como el estiércol de vaca y el carbón de madera. El resultado muestra que el Jacinto tiene un alto potencial para producir biogás y que el rendimiento de éste se puede mejorar mediante el secado y la combinación con estiércol de vaca. El efecto de la temperatura sobre el biogás en la producción también se ha estudiado en este trabajo. El análisis cuantitativo del biogás se llevó a cabo para determinar su composición, dando como principales componentes el Dióxido de Carbono (CO₂) y el Metano (CH₄).

A nivel nacional no se han realizado aún esfuerzos o estudios conocidos para determinar y cuantificar el potencial energético del Jacinto Acuático, no obstante, se han realizado acciones por mitigar el problema utilizando esta materia prima para la generación de papel artesanal y realizando extracciones de la planta desde los principales cuerpos de agua para que se descompongan en la tierra. Estas labores son muy localizadas y no generan un impacto significativo en el problema de la sobrepoblación de esta especie en los humedales.

En vista de lo anterior el MARN realizó la compra de una maquina extractora de Lirio Acuático con el fin de solventar el problema de manera más sistemática y eficaz, no obstante, para que este proceso sea factible económicamente se debe encontrar un uso rentable a la planta extraída como la generación de biogás.

2.2 Antecedentes del aprovechamiento del biogás en los rellenos sanitarios de El Salvador:

Respecto al aprovechamiento de la biomasa en El Salvador, el principal recurso biomásico utilizado para generar energía eléctrica es el bagazo de caña, así en el 2010 se tienen instalados 103.5 MW y se generó 179.9 GWh. El bagazo tiene un alto poder calorífico para producir energía, pues cada libra con un 50% de humedad alcanza las 3,000 BTU.

Según información de los ingenios se está en proceso de sustitución de equipos y expansión de la capacidad instalada. En el Ingenio El Ángel se prevé 15 MW (retiro de 10 MW y la instalación de nueva capacidad de 25 MW), a partir del período de zafra de 2011. En el Ingenio La Cabaña habría expansión de 15 MW, prevista a partir de noviembre de 2013.

No obstante se ha iniciado con el aprovechamiento del biogás de los residuos sólidos urbanos con proyectos de captación de biogás de rellenos sanitarios como es el caso del proyecto de generación de energía eléctrica mediante el proyecto de AES El Salvador, que adquirió los derechos de la empresa propietaria del relleno sanitario MIDES S.A. de C.V. para utilizar el gas metano que se obtiene de la descomposición de los desechos sólidos del relleno, que se colecta para quemarse y producir vapor y mover turbinas de capacidad combinada de 6 MW y cuya producción de energía eléctrica se inyecta a su propia red eléctrica de distribución en Nejapa.

3 OBJETIVOS.

3.1 General:

Realizar una valoración teórica del potencial energético del material orgánico procedentes de las instalaciones de CEL: residuos de rellenos sanitarios y Jacinto Acuático (*Eichhornia crassipes*) de los embalses de las centrales hidroeléctricas (CH's).

3.2 Específicos:

- ✓ Calcular el potencial energético de los residuos orgánicos que se disponen en los rellenos sanitarios de las CH's .
- ✓ Calcular el potencial energético del Jacinto Acuático presente en los embalses.
- ✓ Expresar cuantitativamente el potencial energético calculado para ambos tipos de biomasa en conjunto.

4 MARCO TEÓRICO.

4.1 Biogás:

La aplicación del proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de restos orgánicos sólidos y semi-sólidos y producción de biogás se ha incrementado en los últimos años.

El biogás consiste en residuos húmedos sometidos a fermentación anaerobia (Figura 1), consiguiéndose un producto que tiene, en términos generales, un 60% de metano y un 40% de CO₂. El biogás tiene la ventaja de poder ser considerado casi como un subproducto, siendo el motivo fundamental de la fermentación, en este caso, la reducción de la contaminación, sobre todo cuando se trata de residuos sólidos comunes.

Los requisitos para implantar una instalación de biogás son, además de la propia producción, que el residuo se pueda utilizar aún como abono y que, en conjunto, la rentabilidad económica esté asegurada.

Normalmente, hay dos métodos para producir biogás: 1) Método húmedo, cuando el sustrato tiene un máximo de 15% de materia seca, y el uso de las bombas (para transportar gases) es sencillo y 2) Método seco, cuando el sustrato tiene una proporción de materia seca del 25%, de mayor rendimiento en energía pero con mayores problemas para el manejo del material.

El proceso de producción de biogás es bastante complejo y se desarrolla en tres etapas:

- 1) Hidrólisis: una población de bacterias descomponen la materia orgánica en azúcares.
- 2) Acetogénica: los azúcares se transforman en ácidos orgánicos.
- 3) Metanogénica: se produce la transformación de las sustancias anteriormente obtenidas en metano (CH₄) y gases ácidos (SH₂ y CO₂)

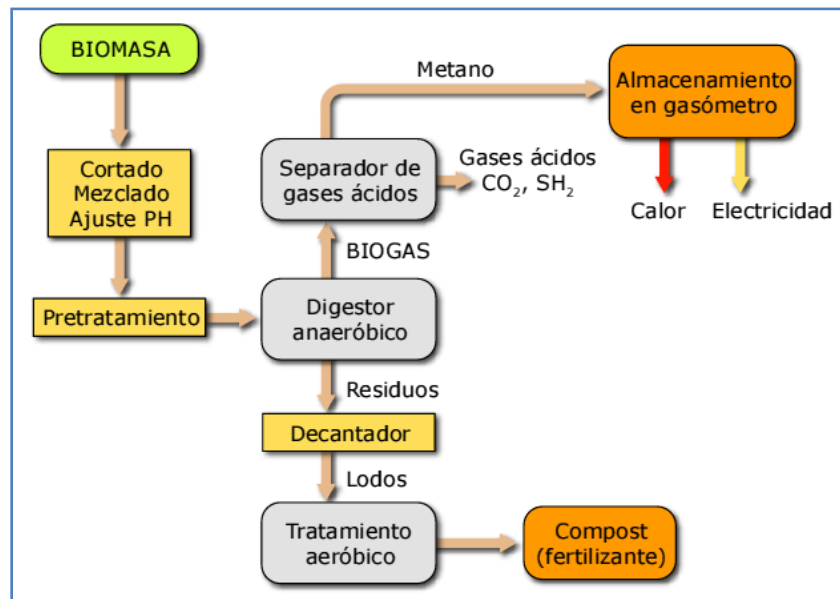


Figura 1. Esquema conceptual del proceso de digestión anaeróbica.

Los factores fundamentales que afectan al proceso son el tipo de biomasa y su composición, la temperatura del proceso, la acidez (que determina la producción de biogás y el porcentaje de metano), el contenido de sólidos (no excesivamente líquido para que los microorganismos puedan alimentarse y no excesivamente espeso para que puedan moverse) y el tiempo de retención, que depende del tipo de biomasa, pero que se encuentra entre 10 días y un mes.

Productividad de metano.

Uno de los parámetros que permite evaluar la generación de metano a partir del proceso de fermentación de la materia orgánica es la productividad de metano o productividad metanoica (Weiland P. 1995). Este parámetro se define como la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo respecto de la materia dispuesta en el reactor. La expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un determinado resto orgánico en un tiempo determinado, es la siguiente:

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} * t} \quad (\text{Ecuación-1})$$

Donde:

V_{CH_4} es el volumen de metano generado

$V_{reactor}$ es el volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador

t es el tiempo de residencia

La producción de metano, tiene un límite y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digestor. La fórmula que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado, es la siguiente:

$$M_{Max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org|total}} \quad (\text{Ecuación-2})$$

Donde:

V_{CH_4} es el volumen máximo de metano generado

$S_{org-total}$ es la cantidad de materia orgánica total utilizada en todo el proceso

4.2 Rellenos Sanitarios

Un vertedero controlado o relleno sanitario es una instalación en la que se han tomado las medidas necesarias para evitar que la contaminación producida y contenida en los residuos llegue al componente hídrico y atmosférico afectando el medio ambiente y la salud humana. Los vertederos incontrolados serían, los que no han tomado ninguna medida preventiva o correctora y representan un riesgo para el medio ambiente y la salud pública.

Las características básicas de un relleno sanitario son:

- ✓ Residuos aislados del medio mediante una barrera impermeable.
- ✓ Control del espacio ocupado y de la estabilidad del depósito: en cada jornada de trabajo se deben compactar los residuos a medida que se depositan.
- ✓ Control de animales (roedores, insectos y aves): en cada jornada de trabajo se deben cubrir los residuos con arcilla u otro material térreo adecuado.

- ✓ Captación y tratamiento de lixiviados y gases de descomposición.
- ✓ Clausura y recuperación del espacio ocupado una vez finalizada la vida de uso.



Figura 2. Relleno sanitario de tipo mecanizado en Usulután.

Las ventajas e inconvenientes de los rellenos sanitario se presentan a continuación:

Ventajas:

- ✓ Sistema que no deja residuos en superficie.
- ✓ Costos económicos de implantación y de explotación razonablemente reducidos respecto a otras alternativas de tratamiento.
- ✓ Tecnología de explotación sencilla.
- ✓ Flexibilidad en cuanto a las cantidades variables de residuos a tratar.
- ✓ Rapidez entre la decisión de construir la instalación y su puesta en marcha.
- ✓ Posibilidad de recuperar el espacio del terreno una vez clausurado.
- ✓ Construcción sencilla.

Inconvenientes:

- ✓ Necesidad de control y captación de gases y líquidos.
- ✓ Ubicación alejada de los centros de producción (distancias de transportes mayores).
- ✓ Grandes necesidades de espacio.
- ✓ Posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas y aguas superficiales.
- ✓ No aceptación por parte de la población del área de influencia indirecta de la presencia de la instalación.
- ✓ Alternativas limitadas para la utilización del relleno una vez finalizada su vida útil.
- ✓ Impacto sobre el paisaje.

La puesta en marcha de un relleno sanitario se caracteriza por un conjunto de acciones que suponen las siguientes etapas:

1. Localización del terreno.
2. Preparación del área de vertido.
3. Explotación del vertedero.
4. Recogida de las aguas superficiales y lixiviados.
5. Desgasificación del vertedero.



Figura 3. Desarrollo esquemático de la vida de un relleno sanitario.

Tipos de rellenos sanitarios.

- Según clase de residuo depositado.
 - ✓ Tradicional con residuos sólidos urbanos seleccionados: no acepta ningún tipo de residuo de origen industrial, ni tampoco lodos.
 - ✓ Tradicional con residuos sólidos urbanos no seleccionados: acepta además de los residuos típicos urbanos, industriales no peligrosos y lodos previamente acondicionados
 - ✓ Rellenos para residuos triturados: recibe exclusivamente residuos triturados, aumenta la vida útil del relleno y disminuye el material de cobertura.
 - ✓ Rellenos de seguridad: recibe residuos que por sus características deben ser confinados con estrictas medidas de seguridad.

- ✓ Relleno para residuos específicos: son rellenos que se construyen para recibir residuos particulares como cenizas, escoria, entre otros.
- ✓ Rellenos para residuos de construcción: son rellenos que se hacen con materiales inertes y que son residuos de la industria de la construcción.
- Según las características del terreno utilizado.
 - ✓ En áreas planas o llanuras: más que relleno es una depositación en una superficie. Las celdas no tienen una pared o una ladera donde apoyarse, es conveniente construir pendientes adecuadas utilizando barandas de apoyo para evitar deslizamientos. No es conveniente hacer este tipo de relleno en zonas con alto riesgo de inundación.
 - ✓ En quebrada: se debe acondicionar el terreno estableciendo niveles aterrazados, para brindar una base adecuada que sustente las celdas. Se deben realizar las obras necesarias para captar las aguas que normalmente escurren por la quebrada y entregarlas a su cauce aguas abajo del relleno.
 - ✓ En depresiones: se debe cuidar el ingreso de aguas a la depresión, tanto provenientes de la superficie o de las paredes por agua infiltrada. La forma de construir el relleno dependerá del manejo que se dé al biogás o a los líquidos percolados.
 - ✓ En laderas de cerros: normalmente se hacen partiendo de la base del cerro y se va ganando altura apoyándose en las laderas del cerro. Es similar al relleno de quebrada. Se deben aterrazar las laderas del cerro aprovechando la tierra sacada para la cobertura y tener cuidado de captar aguas lluvias para que no ingresen al relleno.
 - ✓ En ciénagas, pantanos o marismas: método muy poco usado por lo difícil de llevar a cabo la operación, sin generar condiciones insalubres. Es necesario aislar un sector, drenar el agua y una vez seco proceder al relleno. Se requiere equipamiento especializado y mano de obra.

- Según los métodos de compactación de los residuos.
 - ✓ Mecanizado: el relleno sanitario mecanizado es aquel diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias. Por sus exigencias es un proyecto de ingeniería bastante complejo que va más allá de operar con equipo pesado. Esto último está relacionado con la cantidad y el tipo de residuos, la planificación, la selección del sitio, la extensión del terreno, el diseño, la ejecución del relleno, la infraestructura requerida (tanto para recibir los residuos como para el control de las operaciones), el monto y manejo de las inversiones, y los gastos de operación y mantenimiento. Para operar este tipo de relleno sanitario se requiere del uso de un compactador de residuos sólidos, así como equipo especializado para el movimiento de tierra: tractor de oruga, retroexcavadora, cargador, volquete.

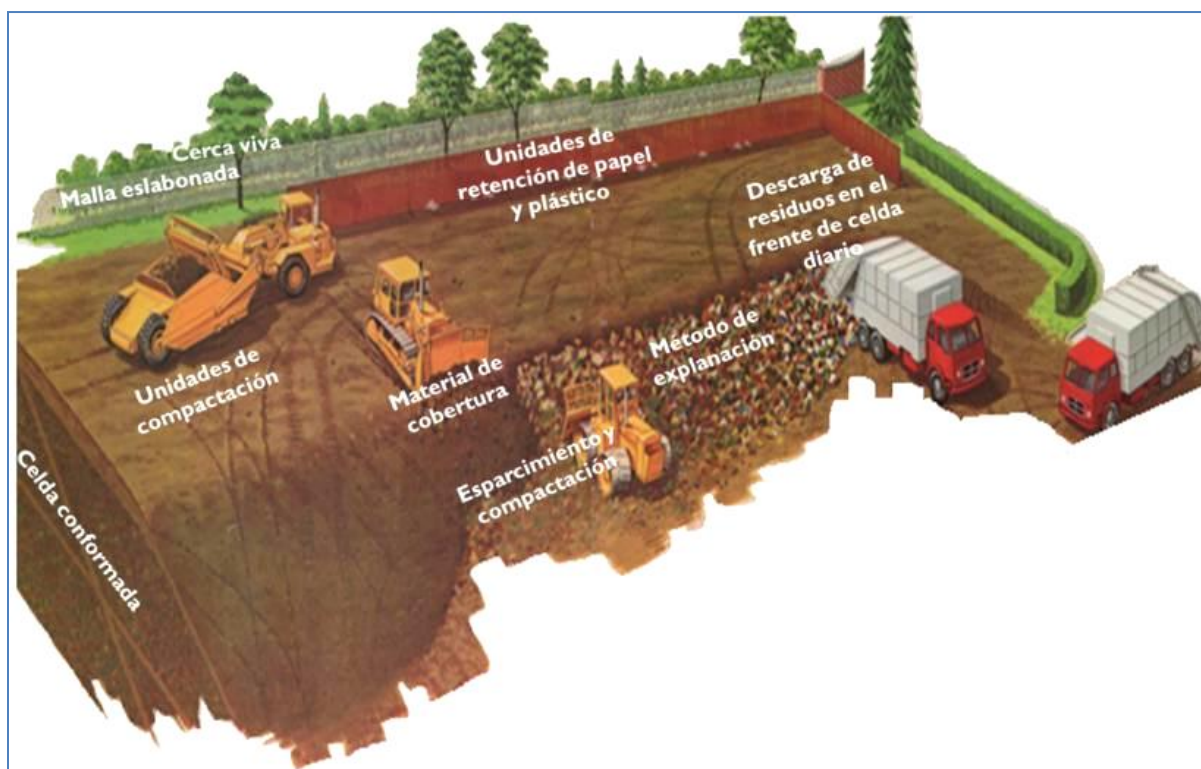


Figura 4. Esquema de relleno sanitario mecanizado.

- ✓ Semi-mecanizado: cuando la población genere o tenga que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos en el relleno sanitario, es conveniente usar maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual, a fin de hacer una buena compactación de los residuos, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno. En estos casos, el tractor agrícola adaptado con una hoja topadora o cuchilla y con un cucharón, o rodillo para la compactación, puede ser un equipo apropiado para operar este tipo de relleno al que podríamos llamar semi-mecanizado.

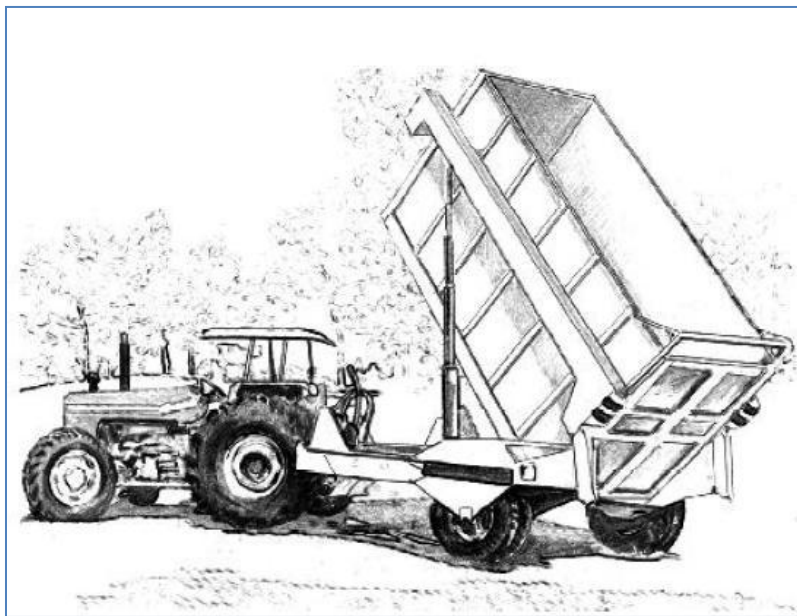


Figura 5. Tractor agrícola utilizado en rellenos sanitarios semi-mecanizados.

- ✓ Manual: es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen menos de 15 toneladas diarias, además de sus condiciones económicas, no están en capacidad de adquirir el equipo pesado debido a sus altos costos de operación y mantenimiento. El término manual se refiere a que la operación de compactación y confinamiento de los residuos puede ser ejecutada con el apoyo de una cuadrilla de hombres y el empleo de algunas herramientas.

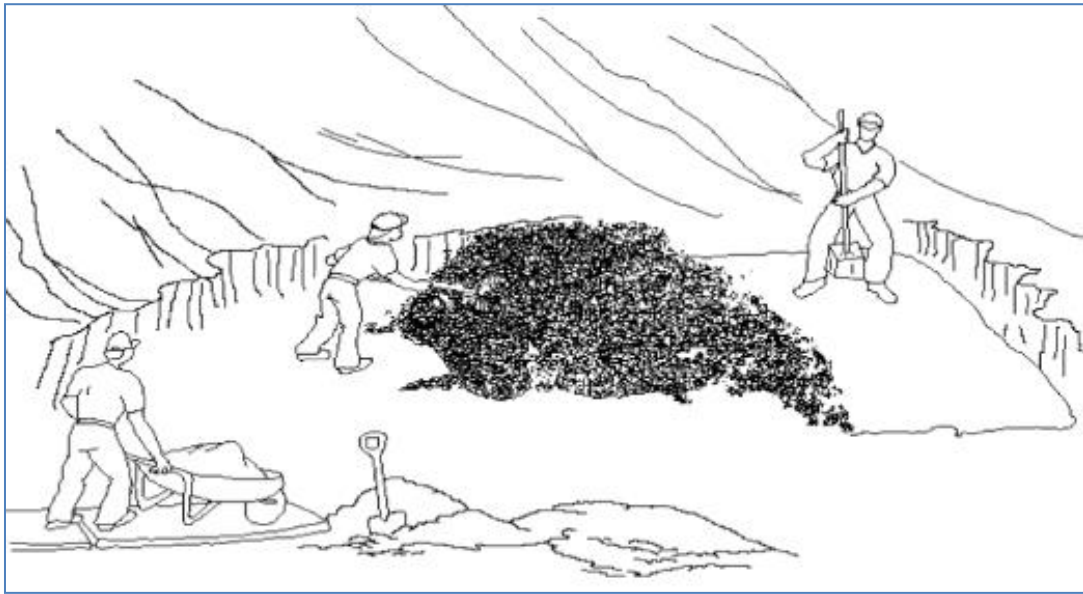


Figura 6. Esquema de operación en una trinchera de un relleno sanitario tipo manual.

Los tipos de rellenos sanitarios que se encuentran en El Salvador son:

- a) Mecanizados.
- b) Semi-mecanizados.
- c) Manual, tipo trinchera (rellenos utilizados en las instalaciones de CEL).

4.3 Aprovechamiento energético en rellenos sanitarios:

Los residuos sólidos comunes, conocidos también como residuos sólidos urbanos (RSU), se originan, básicamente, como resultado de la actividad humana en sus domicilios, aunque también se suelen incluir los residuos que se generan en pequeñas industrias y que no tienen utilidad y no requieren un tratamiento especial. El incremento del consumo en el mundo ha llevado aparejado el incremento en la generación de residuos, que amenaza al medio ambiente. Existen varias opciones para disponer los residuos sólidos comunes, entre éstas se encuentra la recuperación energética.

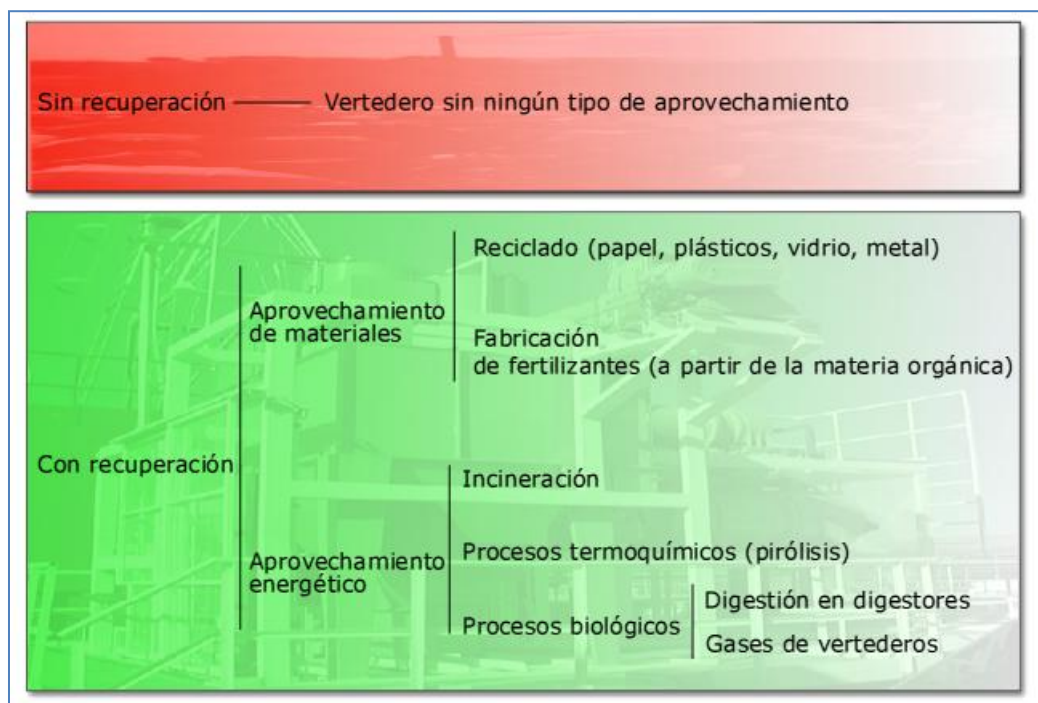


Figura 7. Posibles actuaciones para disponer los residuos sólidos comunes.

Los diversos procesos a los que pueden someterse los RSU con el propósito de extraer su energía química almacenada ya han sido descritos anteriormente, sin embargo, debido a las características particulares de estos residuos (composición muy heterogénea), se describirán aquí las diferencias principales con los procesos ya comentados, las cuales se centran fundamentalmente en los pre y post-tratamientos empleados.

La composición física de los RSU es muy variada y depende de muchos factores. Una composición típica suele estar integrada por un porcentaje alto (50%) de materia orgánica, que es fermentable; otro porcentaje, también relativamente alto (35%), de material con la propiedad de ser combustible (papel, cartón, maderas, textiles, plásticos, etc.); y, el resto, constituido por materiales tales como vidrios, metales, etc.

La materia orgánica enterrada en los vertederos (Rellenos Sanitarios) sufre un proceso de descomposición que da lugar a la generación de gases (entre ellos metano $\text{—CH}_4\text{—}$). Este gas

puede ser captado mediante la instalación de tuberías perforadas que permiten recogerlo y conducirlo a la superficie (Figura 8).

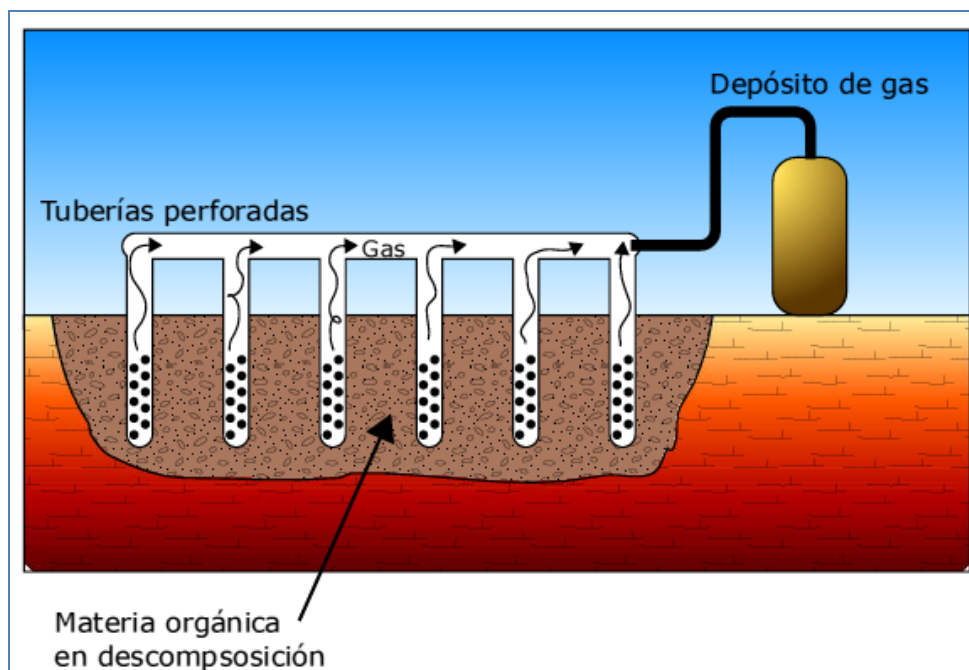


Figura 8. Esquema conceptual de recuperación de gases de vertedero.

Existen compañías que diseñan, construyen y mantienen sistemas de captación de gas metano. El sistema de captación de gas consiste en pozos perforados verticalmente y una serie de tubos laterales (Figura 9).

La extracción del gas se lleva a cabo mediante "soplantes" (compresores). Asimismo, existen sistemas de energía modulares para convertir el gas de efecto invernadero en energía eléctrica (Figura 10).



Figura 9. Instalaciones para la captación de biogás en Rellenos Sanitarios.



Figura 10. Sistema de energía modular para convertir el biogás en energía eléctrica.

La metanización de los RSU exige un sofisticado pre-tratamiento pero hay que ser consciente que, con frecuencia, dichos procesos no son capaces de discernir entre fracción orgánica e inorgánica. Los procesos biológicos, ya sean aerobios (compostaje) o anaerobios (metanización), son los más efectivos para el tratamiento de residuos con alta carga orgánica, como es el caso de los RSU, que se caracterizan por un DQO de más de 250,000 ppm.

Existen diferencias básicas entre ambos procesos, por ejemplo, el compostaje transforma el 80% de la materia orgánica en forma de biomasa y el 20% restante como CO_2 y H_2O , mientras que la metanización transforma la materia orgánica en una mezcla de biomasa (5%) y biogás (95%), susceptible de ser aprovechado como combustible (Figura 11).

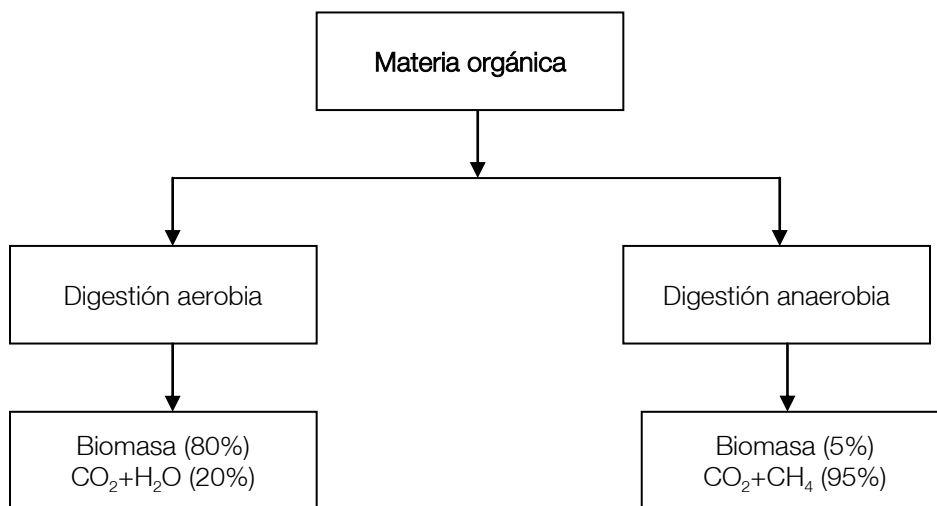


Figura 11. Rendimiento de los procesos biológicos para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU.

La metanización es un proceso biológico que, en ausencia de oxígeno, transforma la materia orgánica en metano (entre un 50% y un 80% del total del biogás generado) y dióxido de carbono (entre un 20% y un 50%); es una tecnología adecuada para tratar fangos procedentes de aguas residuales, fracción fermentable de RSU, desperdicios de animales, etc. Esta fermentación puede llevarse a cabo en digestores en los que se controla la temperatura y el tiempo de residencia de los residuos.

La degradación anaerobia de la fracción orgánica tiene lugar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Materia orgánica} + \text{Nutrientes} + \text{Microorganismos} = \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S} + \text{Materia orgánica} + \text{Microorganismos} \quad (\text{Ecuación-3})$$

Variantes de la metanización

Es preciso indicar que, al margen de los sistemas seco y húmedo, el tamaño del digester es fundamental. Muchos digestores extraídos de modelos han fracasado debido a la variación o alteración de la caracterización del RSU del que se tomaba de referencia. Por lo general son válidos los siguientes principios:

- ✓ El proceso mesofílico es más flexible, es decir más adaptable a las variaciones de composición de los RSU. No obstante el trabajar a baja temperatura (sobre los 37 °C) no resulta tan efectivo como el termofílico (máximo 65 °C). Aún así la mayoría de las plantas se decantan por los procesos mesofílicos.
- ✓ La metanización en condiciones mesofílicas de temperatura (35-37 °C) tienen bajo requerimiento energético pero en un rango térmico termofílico (55-65 °C) a pesar que las necesidades energéticas son superiores, la velocidad de degradación es mayor así como la eficacia de destrucción de los organismos patógenos.
- ✓ La metanización genera un biogás (en promedio de 9% en términos de peso) y un digestato que se envía a compost que resulta ser por término medio del 30%.

Teóricamente el potencial energético de los RSU puede estimarse, en función de las experiencias mundiales, en aproximadamente **100 m³ de metano (a presión atmosférica) por cada tonelada de residuo.**

4.3 Aprovechamiento energético del Jacinto Acuático:

Se puede aprovechar la biomasa para la generación de energía limpia, de tal manera que se reduce la contaminación en el ambiente, generando menos cantidades de CO₂ producido por combustibles fósiles, ya que combustionando la biomasa se genera CO₂ neutro que a su vez es aprovechado por las plantas para la fotosíntesis. La necesidad de buscar fuentes alternas de energía que no repercuta negativamente en el desarrollo de una población, debe al menos ser de fácil acceso, viable y sostenible.

El Jacinto Acuático es una planta adaptable, se puede desarrollar en cualquier medio, y tiene la característica de ser considerada plaga; su desarrollo en un medio supone pérdidas millonarias a los países, el costo de desalojo es elevado y afecta los reservorios artificiales y naturales de agua.

En lo que respecta a obtención de biomasa, se tiene ejemplos de obtención de metano a partir de alimentos considerados desechos, a través de la cepa del cerdo exclusivamente, o cualquier otra cepa de origen animal, pero esta clase de materia prima implica dificultades debido a que se compite con el ámbito social, por ser fuentes alimenticias además de sus diversos usos.

El Jacinto Acuático es bastante común en nuestro medio, su abundancia corresponde a que en el país se encuentran las condiciones climáticas y nutricionales óptimas para su crecimiento y desarrollo. La ausencia de predadores naturales, estrategia reproductiva y capacidad de resistir condiciones adversas caracteriza el éxito de esta especie para colonizar cuerpos de agua; es considerada maleza y está dentro de la lista de las 100 especies más invasoras del mundo, además que representa pérdidas millonarias en muchos países debido a que esta planta tiene la capacidad de taponar vías fluviales generando importantes problemas en canales de riego agrícolas y afecciones a los ecosistemas ribereños. Además que su capacidad de digestión lo hace una materia prima recomendable.

La mayor parte de las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas mediante la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón), todos ellos fuentes No Renovables de energía, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente, por el interés predominante de la producción de energía sobre el efecto ecológico. La aparición de los combustibles fósiles desplazó el uso y la investigación de las energías renovables no convencionales.

La investigación sobre obtención de biomasa a partir del Jacinto Acuático, permitirá obtener una fuente alternativa de energía renovable y evitar el uso masivo de energía proveniente de combustibles fósiles.

Características del Jacinto Acuático:

El análisis de esta planta es esencial para la investigación y el desarrollo del biogás. En las Figuras 12 y 13 se muestra un esquema y una fotografía de la especie respectivamente. El Jacinto Acuático de nombre científico *Eichhornia crassipes* es una planta invasora, por tal razón es necesario obtener un beneficio que rentabilice los costos de remoción y los impactos causados por esta planta en los cuerpos de agua.

	
Figura 12. Dibujo de una planta de Jacinto Acuático	Figura 13. Fotografía del Jacinto Acuático

Origen y distribución geográfica

- ✓ Área de origen: América del Sur, principalmente en las llanuras de Venezuela y Colombia.
- ✓ Distribución secundaria: Estados Unidos, México, Centroamérica, Las Antillas y partes más cálidas del hemisferio occidental y los trópicos del Viejo Mundo.

Usos actuales

- ✓ Como alimento para ganado.
- ✓ Fabricación a escala artesanal de papel.
- ✓ Compost y abono natural.
- ✓ En algunas plantas de tratamiento de agua se utiliza como bio-remediador por su capacidad de absorción de algunos metales pesados.

Entre sus características más notables están:

- ✓ Es una especie flotante de raíces sumergidas.
- ✓ Se han distribuido prácticamente por todo el mundo, ya que su aspecto ornamental originó su exportación a estanques y láminas acuáticas de jardines en climas templados y cálidos.
- ✓ Son consideradas malas hierbas, que pueden "taponar" en poco tiempo una vía fluvial o lacustre.
- ✓ En verano produce espigas de flores lilas y azuladas que recuerda vagamente a la del Jacinto.
- ✓ Las raíces son muy características, negras con las extremidades bancas cuando son jóvenes, negro violáceas cuando son adultas.
- ✓ Ofrece un excelente refugio para los peces protegiéndolos del sol excesivo, de las heladas y a los alevines del embate de los benteveos (*Pitangus sulphuratus*).

- ✓ Las raíces constituyen un excelente soporte para el desove de las especies ovíparas (carasius, carpas, etc.), se puede utilizar en crianza de peces en acuarios, donde en época de fresa los ejemplares jóvenes de esta planta sirven para que los peces desoven.
- ✓ Carece de tallo aparente, provisto de rizoma, muy particular, emergente, del que se abre un rosetón de hojas que tienen una superficie esponjosa notablemente inflada en forma de globo que forma una vejiga llena de aire, mediante la que el vegetal puede mantenerse sobre la superficie acuática.
- ✓ Hojas sumergidas lineares, y las emergidas, entre obovadas y redondeadas, provistas de pequeñas hinchazones que facilitan la flotación.
- ✓ Se cultiva a una temperatura entre 20-30 °C. No resiste los inviernos fríos.
- ✓ Necesita para desarrollarse aguas estancadas o con poca corriente e intensa iluminación.
- ✓ Se multiplica mediante división de rizomas.
- ✓ Durante el verano se reproduce fácilmente por medio de estolones que produce la planta madre, llegan a formarse verdaderas "islas" de gran porte.
- ✓ Esta especie está considerada entre las 100 especies más invasoras del mundo. Como consecuencia de su proliferación está creando, en ríos y lagos importantes, problemas en canales de riego agrícolas y afecciones a los ecosistemas ribereños, ya que cubre como una manta toda la superficie del río, por su fácil reproducción vegetativa y sexual.
- ✓ Como es invasora, puede que al retirar el exceso de un estanque o acuario particular, vaya a parar a entornos naturales y cause estos daños ecológicos.
- ✓ En países africanos, sudamericanos, EEUU, etc. está causando pérdidas millonarias. Es por ello que hoy en día se desaconseja su utilización por particulares, para evitar que se siga extendiendo esta plaga a los ríos por imprudencia en su uso.

El Jacinto Acuático (*Eichhornia crassipes*) se considera como una de las malezas acuáticas mundialmente más dañinas debido a los preocupantes efectos adversos causados al medioambiente dulceacuícola que se encuentran estrechamente relacionados con su alta facilidad de desarrollo y de dispersión (Figuras 14 y 15).

Las alteraciones en las tasas de evo-transpiración (aumento de la velocidad de vaporización del agua), la reducción en la penetración de la luz, el incremento de la turbidez y la acidez del agua así como la modificación del balance de los principales gases disueltos, son algunas de las consecuencias que genera la incontrolable cantidad de este vegetal.



Figuras 14 y 15. Efecto invasor del Jacinto Acuático en los cuerpos de agua.

La alteración de estas condiciones, aunadas a otros factores, se traduce finalmente en una pérdida considerable de la biota natural que ahora proveerá de un hábitat para el desarrollo de patógenos y vectores de enfermedades infecciosas como la malaria, dengue y otras semejantes.

Así como presenta una amenaza también puede revertirse en un buen aprovechamiento, puesto que además de actuar como un filtro natural, los densos tapetes móviles presentan un recurso nutricional muy valioso como fuente de proteínas para la alimentación animal, materia prima para la fabricación de papel, combustible o abono verde para la producción agrícola.

Su rápida reproducción, sobre todo asexual, así como la ausencia de depredadores naturales en los nuevos lugares de su introducción, han provocado la rápida diseminación de la planta a diversos cuerpos acuáticos cubriendo extensas áreas de los mismos.

Otros datos relevantes de la planta son:

- ✓ Ritmo de multiplicación: En un período de 10 meses de observación (8 en época seca y 2 en la de lluvia), una sola planta madre puede generar 438 plantas hijas, como promedio.
- ✓ Incremento de masa: La misma planta madre, en los 10 meses de observación, origina un incremento promedio de 18.7 gr. de peso original a 262 gr.; y de 17.25 cm. de altura a 118.025 cm.
- ✓ Presión promedio de las colonias de Jacinto: 1.4 kg/cm².

En la Tabla 1 y 2 se presentan las características físicas promedio de una planta de Jacinto Acuático.

Tabla 1. Características físicas promedio del Jacinto Acuático

No.	Parámetro	Valor (unidad)
1	Densidad promedio del Jacinto escurrido por unidad de superficie	23 kg/m ²
2	Densidad promedio del Jacinto escurrido	0.25 kg/l
3	Densidad promedio del Jacinto triturado	0.25 kg/l
4	Peso promedio	1.25 kg/planta
5	Longitud promedio de la planta con la raíz	1.36 m
6	Longitud promedio de la raíz	0.87 m

Tabla 2. Composición del Jacinto Acuático

No.	Parámetro	Valor (%)	
		Bulbos y hojas	Planta completa
1	Humedad	93.23	94.09
2	Proteína cruda	18.78	18.55
3	Extracto etéreo	3.99	3.99
4	Cenizas	12.71	16.23
5	Fibra cruda	16.58	17.23

La composición de la biomasa del Jacinto y de sus elementos principales es:

Tabla 3. Composición de biomasa y de elementos principales del Jacinto Acuático (Español).

	Límite inferior	Límite superior	Valor central	Referencia
Contenido de agua (%)				
w	85	95	90	
Materia seca (%)				
Celulosa	18	31	24	Bolenz <i>et al.</i> 1990; Chanakya <i>et al.</i> 1993
Semi-celulosa	18	43	30	Poddar <i>et al.</i> 1991; Patel 1993
Lignina	7	26	16	Bolenz <i>et al.</i> 1990; Chanakya <i>et al.</i> 1993
cenizas	15	26	20	Bolenz <i>et al.</i> 1990; Abdelhamid, Gabr 1991
Composición de elementos (%)				
C	33	43.3	38.4	Chynoweth <i>et al.</i> 1981; Matsumura 2002
H	5.3	6.4	5.85	
O	27.5	28.8	28.1	
N	1.5	4.3	2.9	
S	0.35	0.59	0.47	
P	0.7	0.84	0.77	
K	2.75	2.8	2.78	
Ca	0.95	1.68	1.32	
Na	0.88	2	1.44	

Tabla 3.1 Composición de biomasa y de elementos principales del Jacinto Acuático (Inglés).

	Lower limit	Upper limit	Central value	Reference
Water content (%)				
w	85	95	90	This study
Dry Matter (%)				
Cellulose	18	31	24	Bolenz <i>et al.</i> 1990; Chanakya <i>et al.</i> 1993
Hemicellulose	18	43	30	Poddar <i>et al.</i> 1991; Patel 1993
Lignin	7	26	16	Bolenz <i>et al.</i> 1990; Chanakya <i>et al.</i> 1993
Ashes	15	26	20	Bolenz <i>et al.</i> 1990; Abdelhamid, Gabr 1991
Elemental composition (%)				
C	33	43.3	38.4	Chynoweth <i>et al.</i> 1981; Matsumura 2002
H	5.3	6.4	5.85	
O	27.5	28.8	28.1	
N	1.5	4.3	2.9	
S	0.35	0.59	0.47	
P	0.7	0.84	0.77	
K	2.75	2.8	2.78	
Ca	0.95	1.68	1.32	
Na	0.88	2	1.44	

De la Tabla 2 se puede apreciar que el Jacinto Acuático al contener una gran cantidad de humedad (aprox. 95%) es una materia prima que se puede adaptar a una digestión anaerobia húmeda, aprovechando el contenido de agua, y a la vez esto es una ventaja al combinarse con otro tipo de biomasa seca para crear condiciones que favorezcan el crecimiento microbiano que produce la descomposición y generación del biogás.

Potencial de producción de metano con Jacinto Acuático.

Según los estudios realizados de obtención de biogás, con Jacinto Acuático, la producción de metano puede darse de una digestión simple (utilizando el Jacinto como única biomasa) o compuesta (utilizando el Jacinto en combinación con otro tipo de biomasa).

Para la digestión de tipo húmeda del Jacinto Acuático en condiciones mesofílicas (35-37 °C), y como única biomasa, se tiene un 45% de metano del biogás producido y un rendimiento de 2.1 litros de CH₄ por cada 10 kg de Jacinto seco, lo cual se considera un rendimiento bajo.

No obstante para digestión de tipo húmeda, manteniendo una relación agua:biomasa de 1:1, a diferentes condiciones de temperatura, desde mesofílicas hasta termofílicas, pero combinando el Jacinto Acuático con otro tipo de biomasa como el estiércol de ganado y el carbón de madera los rendimientos son mayores, los cuales se presentan en las Tablas 4 a 6.

Tabla 4. Producción de biogás por biodigestión de mezcla de Jacinto Acuático con estiércol de ganado (cow dung) a diferentes temperaturas y proporciones (Español).

Temperatura (°C)	Producción de gas por kg de entrada, l/kg				
	9.0 kg de Jacinto de agua y 1.0 kg de estiércol de vaca	9.25 kg de Jacinto de agua y 0.75 kg de estiércol de vaca	9.5 kg de Jacinto de agua y 0.5 kg de estiércol de vaca	9.75 kg de Jacinto de agua y 0.25 kg de estiércol de vaca	10.0 kg de Jacinto de agua
25	306	283	224	215	208
30	417	392	341	327	303
35	498	504	463	449	441
40	505	492	452	437	416
45	418	407	364	338	315
50	443	461	422	416	431
55	454	475	459	454	438
60	389	426	409	415	344

Tabla 4.1. Producción de biogás por biodigestión de mezcla de Jacinto Acuático con estiércol de ganado (cow dung) a diferentes temperaturas y proporciones (Inglés).

Temperature in the digester, °C	Gas production per kg of the input, litre/kg				
	9.0 kg of water hyacinth and 1.0 kg of Cow dung	9.25 kg of water hyacinth and 0.75 kg of Cow dung	9.5 kg of water hyacinth and 0.5 kg of Cow dung	9.75 kg of water hyacinth and 0.25 kg of Cow dung	10.0 kg of water hyacinth
25	306	283	224	215	208
30	417	392	341	327	303
35	498	504	463	449	441
40	505	492	452	437	416
45	418	407	364	338	315
50	443	461	422	416	431
55	454	475	459	454	438
60	389	426	409	415	344

Tabla 5. Producción de biogás por biodigestión de mezcla de Jacinto Acuático con carbón de madera (wood charcoal) a diferentes temperaturas y proporciones (Español).

Temperatura (°C)	Producción de gas por kg de entrada, l/kg				
	9.0 kg de Jacinto de agua y 1.0 kg de carbón de madera	9.25 kg de Jacinto de agua y 0.75 kg de carbón de madera	9.5 kg de Jacinto de agua y 0.5 kg de carbón de madera	9.75 kg de Jacinto de agua y 0.25 kg de carbón de madera	10.0 kg de Jacinto de agua
25	262	219	206	198	208
30	356	344	319	304	303
35	458	398	376	387	441
40	442	384	374	362	416
45	377	363	323	317	315
50	383	374	344	352	431
55	391	348	338	333	438
60	332	316	307	312	344

Tabla 5.1. Producción de biogás por biodigestión de mezcla de Jacinto Acuático con carbón de madera (wood charcoal) a diferentes temperaturas y proporciones (Inglés).

Temperature in the digester, °C	Gas production per kg of the input, litre/kg				
	9.0 kg of water hyacinth and 1.0 kg of wood charcoal	9.25 kg of water hyacinth and 0.75 kg of wood charcoal	9.5 kg of water hyacinth and 0.5 kg of wood charcoal	9.75 kg of water hyacinth and 0.25 kg wood charcoal	10.0 kg of water hyacinth
25	262	219	206	198	208
30	356	344	319	304	303
35	458	398	376	387	441
40	442	384	374	362	416
45	377	363	323	317	315
50	383	374	344	352	431
55	391	348	338	333	438
60	332	316	307	312	344

Tabla 6. Concentración del biogás producto de la biodigestión de mezcla de Jacinto Acuático con estiércol de ganado y con carbón de madera (Español).

Materiales	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)
Jacinto Acuático y carbón de madera	60	39.94	0.03	0.01	0.02
Jacinto Acuático y estiércol de vaca	64.0	35.94	0.03	0.01	0.02

Tabla 6.1. Concentración del biogás producto de la biodigestión de mezcla de Jacinto Acuático con estiércol de ganado y con carbón de madera (Inglés).

Materials	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)
Water hyacinth and wood charcoal	60	39.94	0.03	0.01	0.02
Water hyacinth and cow dung	64.0	35.94	0.03	0.01	0.02

En las Tablas 4 y 5 se observa que las mayores producciones de gas se dan en una relación de 90% de Jacinto Acuático y en un rango de temperaturas entre 35 y 40 °C, es decir entre la escala mesofílica y termofílica.

La Tabla 6 demuestra que la producción de metano es alta (entre 60-64%) respecto al biogás generado y que el grado de gases contaminantes como el H₂S es bajo. Se observa además que la mayor cantidad de metano se produce al combinar el Jacinto con estiércol de ganado (64% de metano).

El subproducto obtenido en estos procesos de digestión es un compost que puede ser utilizado como fertilizante orgánico.

5 MARCO DE REFERENCIA GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.

Ubicación geografía de los componentes a analizar:

Rellenos Sanitarios

Los 3 rellenos a estudiar son parte de las instalaciones de las Centrales Hidroeléctricas Guajoyo, 5 de Noviembre y 15 de Septiembre, las cuales se encuentran en:

Tabla 7. Ubicación geográfica aproximada de las Centrales Hidroeléctricas.

No.	Central Hidroeléctrica	Coordenadas	Departamento
1	Guajoyo	14°13'40.50"N 89°28'23.00"O	Santa Ana
2	5 de Noviembre	13°59'27.64"N 88°45'27.53"O	Cabañas
3	15 de Septiembre	13°37'24.06"N 88°33'36.70"O	San Vicente



Figura 16. Central Hidroeléctrica Guajoyo.



Figura 17. Central Hidroeléctrica 5 de Noviembre.



Figura 18. Central Hidroeléctrica 15 de Septiembre.



Figura 19. Caracterización de desechos en el relleno sanitario de la CH Guajoyo.



Figura 20. Pesado de desechos en la CH 15 de Septiembre.



Figura 21. Caracterización de desechos en el relleno sanitario de la C.H. 5 de Noviembre.



Figura 22. Recolección de desechos en la C.H. Cerrón Grande.

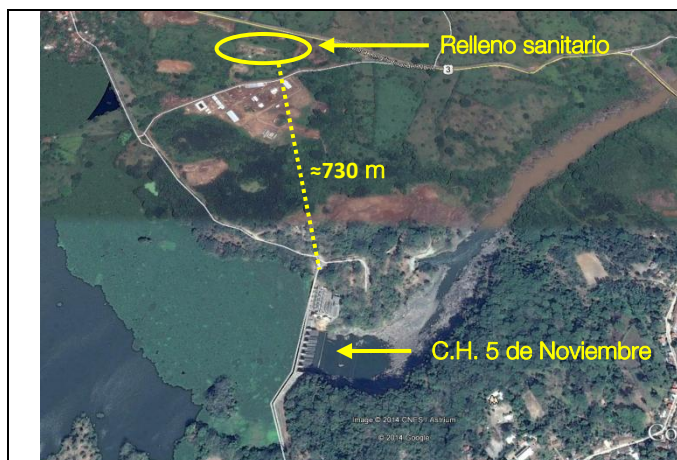


Figura 23. Ubicación del relleno sanitario respecto a la C.H. 5 de Noviembre.



Figura 24. Ubicación del relleno sanitario respecto a la C.H. Guajoyo.

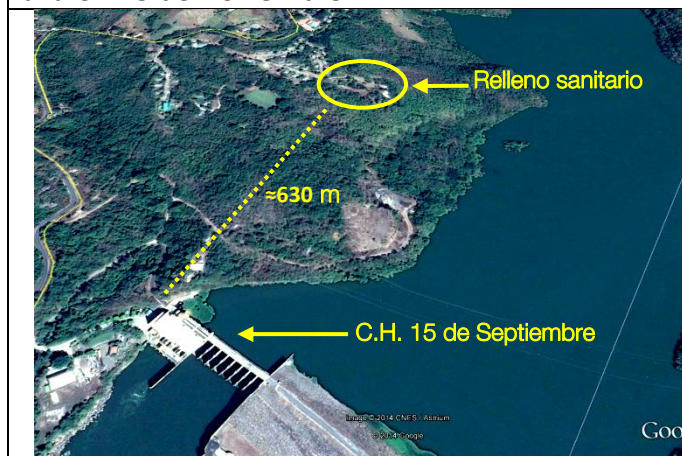


Figura 25. Ubicación del relleno sanitario respecto a la C.H. 15 de Septiembre.

Jacinto Acuático

El embalse de estudio (debido a la disponibilidad de información y por ser el de mayor área) es de la C.H. Cerrón Grande, utilizando los datos del proyecto para la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de CEL se tiene la siguiente imagen del área concentrada de Jacinto Acuático en dicho embalse.

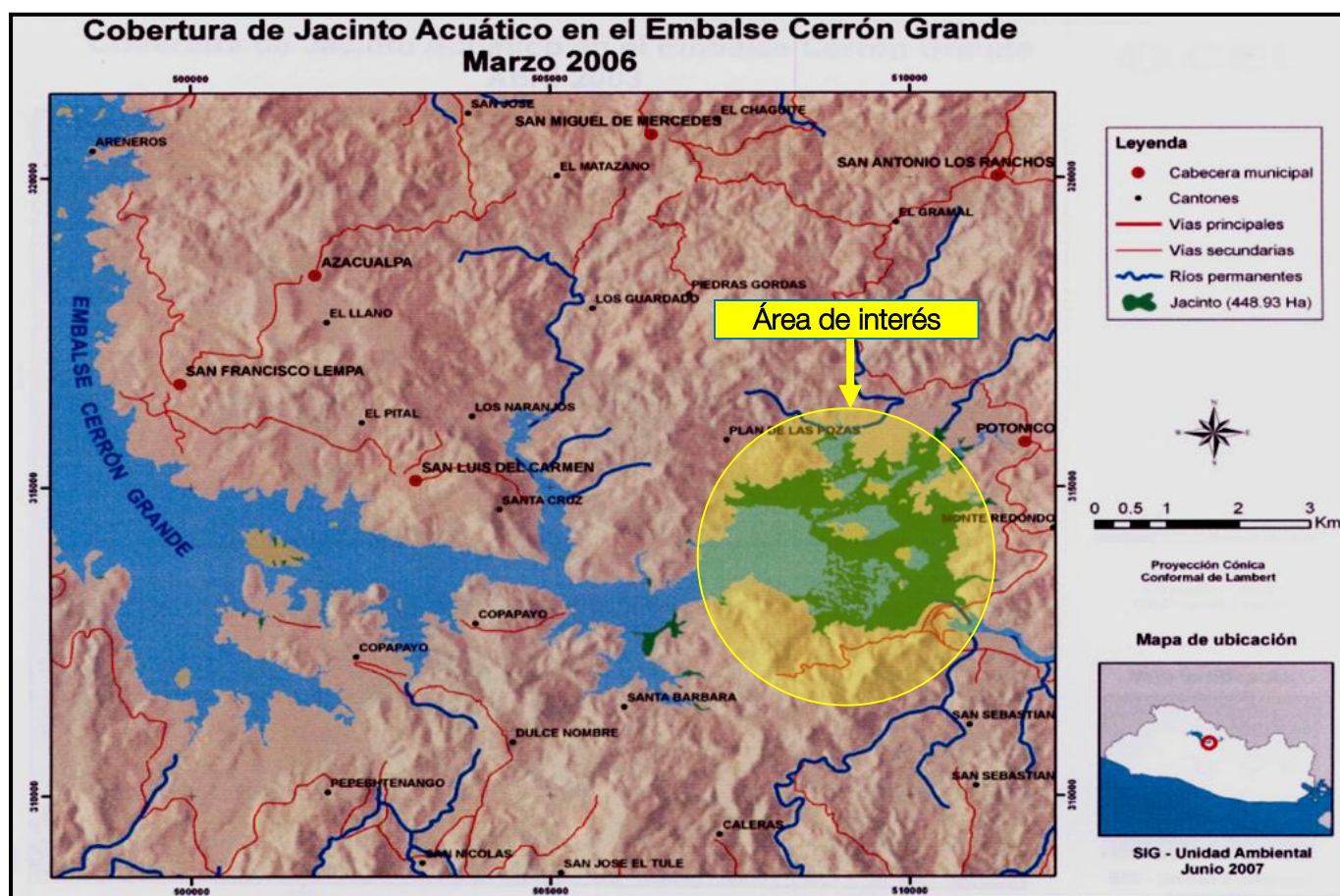


Figura 26. Cobertura de Jacinto Acuático en el embalse de la C.H. durante marzo de 2006



Figura 27. Central Hidroeléctrica Cerrón Grande.

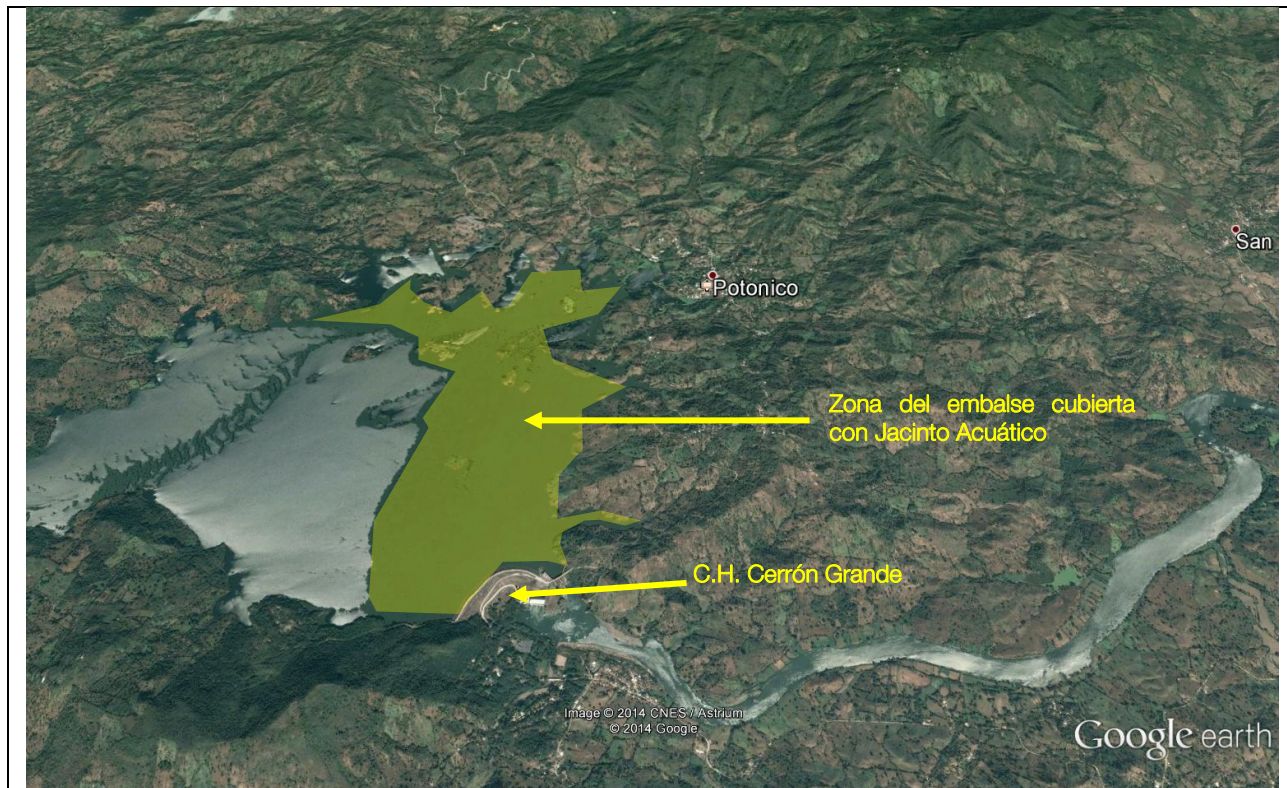


Figura 28. Situación Actual 2014 del Jacinto Acuático en el embalse Cerrón Grande.

Se observa una tendencia del Jacinto Acuático a acumularse en la zona del embalse cercana al dique lo que facilitaría la logística para su recolección y transporte a una futura planta de biogás.

6 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL EMBALSE DE LA C.H. CERRÓN GRANDE.

Del Informe de monitoreo de la calidad del agua en la cuenca del río Iempa, 2003-2008 de CEL (2010) se extrae la siguiente tabla resumen de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua del embalse de la C.H. Cerrón Grande:

Figura 29. Resumen estadístico de los resultados de análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en el Embalse Cerrón Grande, 2003 a 2008

Parámetro	Unidades	Límite máximo para vida acuática	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación estándar	Cantidad de análisis
Físicos							
Temperatura	(°C)	25°-30°	33.79	24.29	27.25	1.445	508
Conductividad Eléctrica	(μS/cm)	150-500	520	122.7	238.10	43.527	508
pH	unidades	6.5 – 8.6	9.67	6	7.44	0.729	508
OD	(mg/L)	4 - 5	10.09	0	1.62	2.177	488
Oxígeno Saturado	%	No establecido	200	0	24.13	33.563	491
SDT	(g/L)	0.500	0.35	0.08	0.15	0.031	495
Turbidez	NTU	No establecido	689.7	0	42.08	130.103	282
Químicos							
Nitrógeno Total	mg/L	0.6	4.37	0.02	0.81	0.74	108
DBO ₅	mg/L	3	82.50	0.10	3.37	8.35	108
Fosfatos	mg/L	0.025	20.65	0.38	1.81	2.80	108
Nitratos	mg/L	90	16.34	0.00	3.47	4.36	108
Sulfatos	mg/L	No establecido	71.18	6.21	16.95	11.79	36
Cloruros	mg/L	No establecido	21.28	6.74	11.99	2.72	36
Bicarbonatos	mg/L	No establecido	168.00	78.00	107.66	18.45	35
Sodio	mg/L	No establecido	47.00	1.40	22.05	7.11	108
Magnesio	mg/L	No establecido	12.50	2.00	5.39	1.91	107
Calcio	mg/L	No establecido	54.40	6.50	19.35	8.44	107
Sílice	mg/L	No establecido	31.54	7.16	15.45	6.00	36
Dureza	mg/L	No establecido	174.53	25.29	70.55	26.69	108
Boro	mg/L	No establecido	N.D.	N.D.	N.D.	0	35
Fenoles	mg/L	2.56	0.00	N.D.	N.D.	0	5
Arsénico	mg/L	0.034	0.01	N.D.	0.00	0.002	54
Mercurio	mg/L	0.014	0.35	N.D.	0.02	0.07	108
Cadmio	mg/L	0.002	0.01	N.D.	0.00	0.002	54
Cobre	mg/L	0.013	0.01	N.D.	0.00	0.004	53
Cromo	mg/L	0.57	0.06	N.D.	0.01	0.01	36
Plomo	mg/L	0.065	0.01	N.D.	0.00	0.002	54
Cromo Hexavalente	mg/L	0.016	0.00	N.D.	N.D.	0	18
Plaguicidas							
Lindano	mg/L	0.00095	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Heptacloro	mg/L	0.00052	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Heptacloro epóxico	mg/L	0.00052	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Aldrin	mg/L	0.003	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Dieldrin	mg/L	0.00024	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Endosulfán	mg/L	0.00022	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
DDT	mg/L	0.0011	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Metil Paratión	mg/L	No establecido	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Diazinón	mg/L	0.00017	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Malatión	mg/L	0.0001	N.D.	N.D.	N.D.	0	45
Paratión	mg/L	0.000065	N.D.	N.D.	N.D.	0	9
Etién	mg/L	No establecido	N.D.	N.D.	N.D.	0	9
Microbiológicos							
Coliformes totales	NMP/100 mL	No establecido	3,500,000	N.D.	1,394	71,404.05	104
Coliformes fecales	NMP/100 mL	10,000	1,300,000	N.D.	52	1,422.56	104

* Notas: N.D.: Concentraciones no detectables (ver tabla 2.1). Se somborean los datos que no cumplieron con la norma de referencia

7 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DEL METANO PARA INSTALACIONES DE LA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: COMISIÓN EJECUTIVA HIDROELÉCTRICA DEL RÍO LEMPA (CEL).

6.1 Residuos sólidos urbanos

Tabla 8. Evaluación del potencial energético de los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios de CEL.

No.	Relleno Sanitario	Cantidad de RSU diario (kg/día)	Cantidad de RSU anual (kg/año)	Total de materia orgánica anual* (kg/año)	Potencial anual de producción de metano (m ³ /año)**	Potencial anual de producción de energía (kWh/año)***
1	C.H. Guajoyo	225.00	82,125.00	32,850.00	3,285.00	19,578.60
2	C.H. 5 de Noviembre	315.32	115,091.80	46,036.72	4,603.67	27,437.89
3	C.H. 15 de Septiembre	45.58	16,636.70	6,654.68	665.47	3,966.19
					Total	50,982.68

*Según datos estimados el 40% de la materia dispuesta en estos rellenos es de tipo orgánica.

** 100 m³ CH₄/ 1000 kg de desechos

***5.96 kWh/m³ de metano

Ejemplo de cálculo:

C.H. Guajoyo.

$$\text{Potencial anual energía} \left(\frac{kWh}{año} \right) = \text{Potencial de metano} \left(\frac{m^3}{año} \right) \times 5.96 \frac{kWh}{m^3 \text{ de metano}} \quad \text{Ecuación-4}$$

$$\text{Potencial anual energía} \left(\frac{kWh}{año} \right) = 3,285.00 \left(\frac{m^3}{año} \right) \times 5.96 \frac{kWh}{m^3 \text{ de metano}} = 19,578.60 \frac{kWh}{año}$$

6.2 Jacinto Acuático

Del proyecto para la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de CEL se tiene la siguiente tabla del área de Jacinto Acuático en el embalse de la C.H. Cerrón Grande (Figura 26).

Tabla 9. Área por año de superficie del Jacinto Acuático en el embalse de la C.H. Cerrón Grande.

No.	Año	Superficie	
		Hectáreas (ha)	km ²
1	1998	699.28	6.99
2	1999	673.98	6.74
3	2000	658.81	6.59
4	2001	378.97	3.79
5	2002	358.31	3.58
6	2003	394.19	3.94
7	2006	641.28	6.41
8	2007	432.29	4.32
Promedio		529.64	5.30

Se procederá a calcular el potencial energético del Jacinto Acuático del embalse de la C.H. Cerrón Grande considerando lo siguiente:

- ✓ Porcentaje del Jacinto a utilizar en la mezcla con otra biomasa: 90%.
- ✓ Temperatura de la biodigestión: 40.00 °C.
- ✓ Superficie promedio del Jacinto en el embalse: 5.30 km² o 5,300,000.00 m²
- ✓ Porcentaje del Jacinto a utilizar del total disponible: 80.00% (área aproximada de 4,240,000.00 m²), para garantizar una renovación y poder utilizarlo anualmente.
- ✓ Densidad por superficie de 23.00 kg/m² por lo cual la masa de Jacinto a utilizar es de 97,520,000.00 kg húmeda.
- ✓ Masa seca del 5% y una masa total de biomasa combinada de 5,417,777.78 kg.

Tabla 10. Evaluación del potencial energético del Jacinto Acuático del embalse de la C.H. Cerrón Grande.

No	Tipo de biomasa	Producción de biogás (l/kg)	Producción de metano (%)	Potencial anual de producción de metano (m ³ /año)	Potencial anual de producción de energía (kWh/año)*
1	Jacinto Acuático y estiércol de vaca	505.00	60.00	1,641,586.67	9,783,856.533
2	Jacinto Acuático y carbón de madera	442.00	64.00	1,532,580.98	9,134,182.628

*5.96 kWh/m³ de metano

Se observa un mayor potencial de generación teórico con el Jacinto Acuático respecto a la biomasa de los rellenos sanitarios, por lo cual es más productivo, para generar metano, utilizar esta planta en biodigestores controlados que disponerla en dichos rellenos.

Ejemplo de cálculo:

Jacinto Acuático y carbón de madera

$$\text{Potencial anual energía} \left(\frac{kWh}{\text{año}} \right) = \text{Potencial de metano} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) \times 5.96 \frac{kWh}{m^3 \text{ de metano}} \quad \text{Ecuación-5}$$

$$\text{Potencial anual energía} \left(\frac{kWh}{\text{año}} \right) = 1,532,580.98 \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) \times 5.96 \frac{kWh}{m^3 \text{ de metano}} = 9,134,182.63 \frac{kWh}{\text{año}}$$

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El resumen de resultados se presenta a continuación:

Tabla 11. Resumen de resultados de potencial anual de producción de energía.

No.	Biomasa	Potencial anual de producción de energía (kWh/año)	Potencial anual de producción de energía (GWh/año)
1	Biomasa combinada de los 3 rellenos sanitarios	50,982.68	0.051
2	Promedio de biomasa de Jacinto Acuático del embalse Cerrón Grande, combinado con otro tipo de desecho orgánico	9,459,019.58	9.46

El potencial energético combinado de los rellenos sanitarios de las Centrales Hidroeléctricas es bastante inferior al del Jacinto Acuático del embalse Cerrón Grande, lo que demuestra la importancia de esta materia orgánica y sus posibilidades si se tomara en cuenta todo el Jacinto Acuático de los embalses de las 4 Centrales Hidroeléctricas, así como el beneficio desde el punto de vista ambiental que se obtendría al extraer esta especie de dichos reservorios.

No obstante, cabe destacar que el potencial de los rellenos sanitarios es significativo si se toma en cuenta que la extracción del biogás, aumenta su vida útil por su descompresión y mejora los procesos de descomposición de la materia orgánica, por el intercambio de oxígeno. Por tanto para rellenos sanitarios a escala manual de tipo trinchera, como es el caso de los construidos en las instalaciones de las Centrales Hidroeléctricas, se recomienda instalar solamente la fase de captación de biogás a través de la perforación de chimeneas y mantener un descompresión e intercambio de oxígeno dentro de los rellenos, esta medida es más económica puesto que no requiere la inversión de la maquinaria, equipos y logística que implica la etapa de aprovechamiento a través de la generación de energía eléctrica.

Para el caso del Jacinto Acuático es necesario que se realicen experimentos a escala piloto para validar estos resultados.

9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL POTENCIAL DEL JACINTO ACUÁTICO CON GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.

Tabla 12. Comparación del potencial energético del Jacinto Acuático con la generación hidroeléctrica actual.

Biomasa	Potencial anual de producción de energía (GWh/año)	Generación Media Anual (GWh/año)*			
		C.H. Guajoyo	C.H. Cerrón Grande	C.H. 5 de Noviembre	C.H. 15 de Septiembre
Promedio de biomasa de Jacinto Acuático del embalse Cerrón Grande, combinado con otro tipo de desecho orgánico	9.46	64.20	488.00	457.40	605.20
Porcentaje respecto a generación por Central Hidroeléctrica (%)	-	14.74 %	1.94 %	2.07 %	1.56 %

*Datos obtenidos del sitio web de CEL (www.cel.gob.sv).

Se destaca el hecho que el potencial de generación del Jacinto Acuático, presente en el embalse Cerrón Grande, represente aproximadamente un 15% de la generación anual de la C.H. Guajoyo, lo cual indicaría que la biomasa combinada de los 4 embalses presentaría un aumento significativo en la oferta anual de energía eléctrica del país y contribuiría a la diversificación de la matriz energética nacional. Este potencial podría aumentarse considerablemente si se optimiza el proceso de biodigestión a través de la experimentación a escala planta piloto.

10 CONCLUSIONES.

- ✓ El potencial de generación de metano, en un proceso de digestión, combinando el Jacinto Acuático con otro tipo biomasa es mayor, en comparación al de los rellenos sanitarios manuales, pero a la vez es necesario un tratamiento preliminar como la reducción del Jacinto Acuático a través de la trituración, esto con el fin de aumentar el área de contacto de la matriz de la biomasa del Jacinto Acuático para la reacción anaerobia.
- ✓ El efecto del aumento de la temperatura en la digestión anaerobia de la mezcla de Jacinto Acuático con otro tipo de biomasa es significativo en la producción de metano y presenta su mayor rendimiento entre las frontera de temperaturas mesofílica y termofílica.
- ✓ El potencial de aprovechamiento de los RSU que serán dispuestos en los rellenos sanitarios de CEL, a pesar que no es significativo como el de la biodigestión del Jacinto Acuático, puede volverse rentable si se compara con el aumento de la vida útil según la cantidad de residuos que se disponen en cada relleno contra la inversión inicial para la adecuación de los sistemas de captación del biogás.

11 RECOMENDACIONES.

- ✓ Tomar en cuenta el potencial de generación de metano del Jacinto Acuático (en digestión combinada) para el proyecto de la Planta de producción de biogás de CEL (en fase de factibilidad) con aguas residuales de captaciones de ANDA y de residuos orgánicos procedentes de rastros y mercados del área metropolitana de San Salvador .
- ✓ Realizar una investigación a escala de planta piloto para validar lo expuesto en esta tesis referente al potencial de metanización del Jacinto Acuático durante la descomposición en combinación con diferentes tipos de materia orgánica.
- ✓ Realizar una investigación con biodigestores a escala de planta piloto para determinar el potencial de la digestión anaerobia de Jacinto Acuático combinado con aguas residuales de tipo ordinario, con el fin de evaluar su potencial como materia prima en el proyecto de Planta de producción biogás de CEL .
- ✓ Perforar chimeneas para evacuación de gases en las trincheras ya utilizadas y construir para las nuevas trincheras, de los rellenos sanitarios de CEL, para descomprimir los residuos ya dispuestos y facilitar posibles adecuaciones de aprovechamiento energético del biogás.
- ✓ En futuras expansiones o construcción de nuevos rellenos sanitarios se deben tomar en cuenta, desde la fase de diseño, los sistemas de captación y procesamiento de biogás con el fin de optimizar el proceso y disminuir los costos de la implementación de dichos sistemas.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DE DESECHOS SÓLIDOS EN LAS INSTALACIONES DE CEL Y COMUNIDADES ALEDAÑAS A LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS GUAJOYO Y CERRÓN GRANDE (CEL-2010).
- Documento del proyecto "CONSULTORÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN CEL" (CEL-2007).
- INFORME DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO LEMPA, 2003-2008 (CEL-2010).
- Manejo de malezas para países en desarrollo. (Estudio FAO Producción y Protección Vegetal-1996).
- Centrales de energías renovables (2° edición, UNED-PEARSON editorial, 2013).
- Los Biocombustibles (2° edición, Ediciones Mundi-Prensa, 2008).
- Reciclaje de residuos industriales (Xavier Elías, 2° edición, 2009).
- Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor Con Biomasa Obtenida Del Jacinto De Agua (*Eichhornia crassipes*), (Montenegro Aquino, 2010).
- Biofuel production from water hyacinth in the Pantanal wetland (Bergier, 2012).
- BIOMETHANATION OF WATER HYACINTH USING ADDITIVES UNDER FORCED MIXING IN A BIO REACTOR (Raja-Lee, 2012).
- Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales (MARN-BID, 2006).
- Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos (Sogari Noemí, 2003).
- Tipos de rellenos sanitarios (<http://relleno.galeon.com/tipos.html>).
- Potencial de generación anual de las Centrales Hidroeléctricas (<http://www.cel.gob.sv>).