

**ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL SUBPRODUCTO
GENERADO EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL BAGAZO DE FIQUE**

LORENA THAREEN PLATA MARTÍNEZ

DAYANA RIVERA GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2011

**ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL SUBPRODUCTO
GENERADO EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL BAGAZO DE FIQUE**

LORENA THAREEN PLATA MARTÍNEZ

DAYANA RIVERA GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero Químico Ph.D.

Co-director (a)

LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO

Estudiante de doctorado de Ing. Química

Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2011

AGRADECIMIENTOS

A Colciencias y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la financiación de este proyecto.

Al PhD. Humberto Escalante Hernández por su dirección.

A la codirectora Ingeniera Liliana del Pilar Castro Molano por su colaboración e incondicional apoyo.

A las doctoras Carolina Guzmán y Claudia Ortiz por su colaboración.

Al bacteriólogo Alex Velásquez por su crítica opinión y colaboración.

Al grupo de investigación del laboratorio de Biotecnología por su colaboración, ánimo y amistad.

A nuestros compañeros de la universidad por su apoyo incondicional, por los alegres y tristes momentos compartidos, y por su contribución hacia el alcance de esta meta.

DEDICATORIA

*A DIOSITO por estar siempre hay,
dándome el valor en los momentos tristes y alegres
de la vida.*

*A mi Papá, por sus consejos y apoyo, a mi Mami, por su amor y compañía, a los
dos por su esfuerzo y sacrificio con mi educación.*

A mis Hermanos por su cariño y cada momento vivido.

*A Dayis por su paciencia y tiempo para alcanzar este logro y a todos mis
Amigos por sus buenos deseos y los ratos alegres compartidos.*

Lorena Thareen Plata Martínez

A Dios por ser mi guía y fortaleza.

*A mi madre, por compartir mis alegrías y tristezas, por confiar en mis decisiones, por su
adorable compañía en el camino hacia mis sueños.*

A mi Padre, por su paciencia, por su apoyo y por sus palabras sabias.

A mi hermano por su cariño, por enseñarme a no desmayar y seguir adelante.

A ellos por ser la fuerza que me inspira a continuar cada día.

Dayana Rivera González

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 Metodologías y modelos de selección de tecnologías	18
2.2 Alternativas para el manejo y disposición de LE	20
2.2.1 <i>Incineración</i>	21
2.2.2 <i>Compostaje</i>	21
2.2.3 <i>Acondicionamiento de suelos</i>	21
2.2.4 <i>Producción de ladrillos</i>	22
2.2.5 <i>Producción de concentrado para animales</i>	22
2.3 Procesos de estabilización.....	22
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
3.1 Caracterización microbiológica y fisicoquímica de LE.....	24
3.2 AHP para selección de la tecnología para el aprovechamiento de LE	24
3.2.1 <i>Modelización del problema</i>	24
3.2.2 <i>Definición de escalas de ponderación</i>	26
3.2.3 <i>Evaluación de prioridades y síntesis del problema</i>	26
3.3 Ensayos experimentales de las tecnologías seleccionadas.....	26
3.3.1 <i>Estabilización del efluente</i>	27
3.3.2 <i>Acondicionador de suelos</i>	27
3.3.2.1 <i>Bioensayo de germinación en Lactuca Sativa L</i>	28
3.3.2.2 <i>Evaluación del acondicionador de suelos</i>	28
3.3.3 <i>Producción de concentrado para animales</i>	29
3.3.3.1 <i>Ensayo de citotoxicidad en células VERO</i>	30
3.3.3.2 <i>Pruebas de aceptabilidad de CAB en roedores</i>	30

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1 Caracterización microbiológica y estabilización del LE	32
4.2 Caracterización fisicoquímica del LE	34
4.3 Selección de las tecnologías para el aprovechamiento del LE	37
4.4 Ensayo experimental de las tecnologías seleccionadas	44
4.4.1 <i>Acondicionamiento de suelos</i>	44
4.4.2 <i>Producción de concentrados para animales</i>	47
5. CONCLUSIONES.....	51
6. RECOMENDACIONES	52
7. REFERENCIAS.....	53
8. BIBLIOGRAFIA	61
9. ANEXO.....	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Dosis aplicación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para la estabilización de LE.	27
Tabla 2. Dosis de biol aplicada a los ensayos.	28
Tabla 3. Formulaciones para la elaboración del CAB.	30
Tabla 4. Caracterización microbiológica del efluente obtenido en la DABF antes y después de la estabilización.	32
Tabla 5. Análisis Bromatológico del LE.	35
Tabla 6. Reporte fisicoquímico en base húmeda del LE.	36
Tabla 7. Indicadores de degradación de la materia orgánica para el LE.	37
Tabla 8: Análisis de sensibilidad para las alternativas evaluadas.	41
Tabla 9. Variables respuesta para cada tratamiento según la dosis de biol aplicada.	44
Tabla 10. Resultados de los cambios fisicoquímicos del suelo después de la aplicación del biol.	46
Tabla 11. Variables de respuesta para la evaluación del CAB.	48

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variación del pH en el tratamiento de Estabilización Alcalina del LE.....	33
Figura 2. Comparaciones binarias para el subcriterio costos de inversión empleando <i>Expert Choice</i> V.11.5	38
Figura 3. Matriz de valoración global para las alternativas evaluadas mediante <i>Expert Choice</i> V.11.5	39
Figura 4. Jerarquización de las técnicas de disposición mediante <i>Expert Choice</i> V 11.5	40
Figura 5. Análisis de sensibilidad empleando <i>Expert Choice</i> V 11.5	42
Figura 6. Distribución de medias para el crecimiento vegetal durante el ensayo...45	
Figura 7. Distribución de medias para el Consumo de Alimento (CA) según las formulaciones.....	49
Figura 8. Distribución de medias para el Coeficiente de Digestibilidad Aparente (CDA) según las formulaciones.	49

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo. Evaluación de las alternativas según los criterios.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura

AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
BF	Bagazo de Fique
CA	Consumo de Alimento
CAB	Concentrado Animal a partir de Biosol
CVA	Conversión Alimenticia
DA	Digestibilidad Aparente
DABF	Digestión Anaerobia del Bagazo de Fique
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
GP	Ganancia de peso
IC ₅₀	Concentración Inhibitoria 50
LE	Lodo Efluente
RFV	<i>Relative Feed Value</i> , Valor alimenticio relativo
SV	Sólidos Volátiles
U.S. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VERO	Células de riñón de mono verde africano

RESUMEN

TITULO: ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL SUBPRODUCTO GENERADO EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL BAGAZO DE FIQUE.*

AUTORES: PLATA MARTÍNEZ LORENA THAREEN **

RIVERA GONZÁLEZ DAYANA **

PALABRAS CLAVES: Bagazo de Fique, Lodo Efluente, AHP, *Expert Choice*.

CONTENIDO:

En Colombia el proceso de beneficio del fique genera 15 mil ton de bagazo /ha sembrada. La caracterización fisicoquímica y el poder calorífico del Bagazo de Fique (BF) lo hacen idóneo como fuente de carbono para la producción de biogás. La digestión anaerobia del BF, utilizando como inóculo la mezcla de líquido ruminal y lodo de cerdo, genera 0,45 m³ CH₄/kg de Sólidos Volátiles y como subproducto un Lodo Efluente (LE). La inadecuada disposición del LE ocasionaría problemas ambientales en aguas subterráneas y suelos afectando el ecosistema del área donde se depositen. La caracterización fisicoquímica y microbiológica del LE, reportó un contenido de fibras, minerales, micronutrientes y un valor alimenticio relativo que permite clasificarlo como forraje tipo *Prime* y como un biosólido clase B según el contenido de patógenos. Mediante la metodología *Analytical Hierarchy Process* (AHP) y el software *Expert Choice v.11.5*, el acondicionamiento del suelo y la producción de concentrado para animales fueron seleccionadas como las alternativas adecuadas para el aprovechamiento industrial del LE. La evaluación experimental del acondicionador de suelos se realizó en un suelo franco-arenoso mediante tres proporciones de mezcla entre biosólido-tierra y un ensayo control sin biosólido, donde fue cultivado pasto alpiste. Para el concentrado animal se diseñaron tres formulaciones variando la relación fuentes energéticas/fuentes proteicas y una formulación control sin biosólido, que fue valorado en roedores (hámsters). Una vez establecidas las formulaciones del concentrado para animales y el acondicionador de suelos, se realizó una prueba de citotoxicidad en células de mono verde africano y un bioensayo de germinación en *Lactuca Sativa L* respectivamente. El ensayo experimental de las alternativas tecnológicas seleccionadas en este estudio, permitieron establecer que estas contribuyen al tratamiento y cierre del ciclo de vida del proceso de producción biogás a partir del BF de manera sostenible.

* *Proyecto de Grado. Modalidad investigación.*

** *Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Humberto Escalante Hernández. Codirector: Ing. Liliانا del Pilar Castro Molano.*

ABSTRACT

TITLE: ALTERNATIVES FOR IMPROVEMENT OF BY-PRODUCT GENERATED IN FIQUE'S BAGASSE ANAEROBIC DIGESTION *

AUTHORS: PLATA MARTÍNEZ LORENA THAREEN **

RIVERA GONZÁLEZ DAYANA **

KEYWORDS: Fique's bagasse, AHP, Expert Choice.

CONTENTS:

In Colombia, fique benefit process produce 15000 tons of bagasse waste per seeded ha. Fique's Bagasse (FB) is a suitable carbon source for biogas production according to its physicochemical characterization and heating power. Currently, FB anaerobic fermentation using as inoculums a mixture of Rumen Fluid and Pig Manure, generate methane yield of 0,45 m³ CH₄/Kg added VS. A significant amount of sludge - effluent (SE) is generated as a by-product. The inadequate disposition of SE would cause environmental problems in underground waters and grounds having affected the ecosystem of the area where they are deposited. Its physico-chemical and microbiological characterization determine a content of fibers, minerals, micronutrients and relative feed value that allows to classify it like forage Prime type and a biosolid class B according to the content of pathogens. By means of the methodology Analytical Hierarchy Process (AHP) and software Expert Choice v.11.5, the preparation of the soil conditioner and the animal feed production was selected like the alternatives adapted for the industrial advantage of SE. The experimental evaluation of the soil conditioner was realised in a franc-sandy ground by means of three proportions of mixture between biosolid-soil and soil without biosolid was used as a control test. *Phalaris canariensis* grass seeds were grown on each plot. Experimental assay of rodents animal feed (hamster) included three formulations varying the relation of energetic/protein sources. A conventional feed without biosolid was used as a formulation control. Once established the formulations of the animal feed and the soil conditioner, it was realized a cytotoxic test using Vero cell line and a bio-assay of germination *Lactuca sativa*. The experimental test of the selected technological alternatives in this study, allowed establishing that these contributing to the treatment and sustainability of biogas production and to the Fique's Bagasse close loop lifecycle.

* *Working Grade. Research mode.*

** *Physicochemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering.
Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández. Co-director: Ing. Lilibana del Pilar Castro Molano.*

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia el proceso de beneficio del fique genera aproximadamente 15 mil ton de residuo (bagazo)/ha sembrada, los cuales causan contaminación en el ambiente debido a la incorrecta disposición [1,2]. La caracterización fisicoquímica del Bagazo de Fique (BF) indica una adecuada relación carbono/nitrógeno y un poder calorífico (3.298 kcal/kg), que lo hace idóneo como fuente de carbono para la producción de biogás [3]. La digestión anaerobia de BF, utilizando como inóculo la mezcla de líquido ruminal y lodo de cerdo, genera 0,45 m³ CH₄/kg de Sólidos Volátiles (SV) [4] y como subproducto un Lodo Efluente (LE). Este LE, generado debido al sustrato no degradado y a la muerte o lisis de los microorganismos involucrados en el bioproceso, representa una reducción del 45,88% de SV. En Santander se generan 3.000 ton de BF/ha sembrada. Si el proceso de digestión anaerobia de BF es implementado a nivel industrial se producirían aproximadamente 37.000 m³ de LE/año-ha [1]. La inadecuada disposición de LE ocasionaría problemas ambientales en aguas subterráneas (por lixiviados) y en suelos afectando el ecosistema del área donde se depositen.

Es necesario estudiar alternativas tecnológicas para un correcto aprovechamiento del subproducto LE. A nivel de ingeniería existen diferentes métodos de decisión que permiten la selección de tecnologías adecuadas para un determinado proceso. Por lo anterior el objetivo de este trabajo de investigación fue determinar mediante la metodología *Analytical Hierarchy Process* (AHP) las dos alternativas más convenientes para el aprovechamiento industrial del LE, y de esta forma cerrar el ciclo de procesamiento del BF de manera sostenible.

Adicionalmente, las dos tecnologías seleccionadas se probaron experimentalmente con el fin de evaluar de manera preliminar aspectos relacionados con su aplicación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Metodologías y modelos de selección de tecnologías

Existen herramientas metodológicas que generalmente acompañan la toma de decisiones y facilitan el proceso de selección de alternativas en diferentes necesidades industriales. Estas metodologías permiten considerar múltiples aspectos o criterios, que contribuyen a la valoración de una tecnología en particular frente a otras alternativas.

Entre los métodos de evaluación multicriterio discretos más conocidos, gracias a las distintas versiones implementadas con software, se encuentran:

- *Multiattribute Utility Theory* (MAUT): Esta teoría asume que el decisor siempre va a preferir la solución que maximiza su utilidad considerando un conjunto de criterios que le afecten. Este método presenta una ordenación de las alternativas consideradas en términos de su utilidad parcial [5,6].
- *Elimination and (et) Choice Translating Algorithm* (ELECTRE): Este método es especialmente útil en contextos en los cuales no existen diferencias claras entre las alternativas. Se basa en la ponderación y agregación de valores otorgados a cada uno de los criterios; mediante un indicador de concordancia y otro de discordancia, que serán los que finalmente aclaren si una alternativa satisface o no los criterios de aceptabilidad [6,7].
- *Preferente Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE): Esta metodología es utilizada para tratar problemas multicriterio con un conjunto finito de alternativas factibles. Se basa en el principio de comparación por pares y admiten la existencia de alternativas incomparables [6-8].
- *Analytical Hierarchy Process* (AHP): Pertenece al grupo de procedimientos clásicos, es probablemente el más conocido y utilizado de los métodos de análisis multicriterio [6,7].

En la aplicación de la metodología AHP para la toma de decisiones en la selección de una tecnología ingenieril, es de gran ayuda el software *Expert Choice* [9]; el cual facilita los procesos de decisión, ofrece completos resultados y análisis de sensibilidad que contribuyen a deducir las mejores alternativas y tomar una decisión final óptima [10]. El método de evaluación y decisión multicriterio AHP se fundamenta en las siguientes etapas:

Modelización del problema

En esta etapa se construye la estructura jerárquica (jerarquización) en donde el problema de decisión (objetivo) ocupa el nivel más alto, de forma que los criterios y subcriterios ocupan los niveles intermedios (con base en los cuales las alternativas son evaluadas según su capacidad de satisfacer el objetivo) y el nivel más bajo comprende las opciones de decisión o alternativas [6,10,11].

Evaluación y priorización de alternativas y criterios

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se realizan comparaciones pareadas (matriz de comparación) de los elementos del modelo (criterios, subcriterios y alternativas), mediante la asignación de un valor de la escala de *Saaty* para cada comparación [6,10,11].

El método AHP está diseñado para obtener una escala de preferencia para los elementos que participan en una decisión. El decisor debe realizar comparaciones pareadas de los elementos y asignar una puntuación a dichas comparaciones, en un escala de 1 (igual importancia) a 9 (extrema importancia de una elemento en relación a otro) según *Saaty*. Los números pares se utilizan para expresar situaciones intermedia. Si hay n elementos, esto se traduce en una matriz $n \times n$ (matriz de comparaciones pareadas) en la que los elementos en posiciones opuestas a la diagonal principal son recíprocos el uno del otro [10,12].

Mediante el software *Expert Choice* se crean las matrices de comparaciones respecto a un criterio en concreto. La información recopilada en la matriz indica que el elemento de la fila es «x veces» más importante que el de la columna, salvo si el número está en rojo, en cuyo caso indica lo contrario (la comparación de un elemento consigo mismo da un valor de uno) [10].

Una vez que las alternativas se han comparado respecto de cada uno de los criterios, el software define para cada criterio los coeficientes asignados a las distintas alternativas. El software calcula, a partir de la información recogida en las distintas matrices de comparación, el vector de prioridades locales (alternativas respecto a cada uno de los criterios) y globales (criterios respecto al objetivo) [10].

Síntesis del problema

Una vez efectuadas las comparaciones binarias entre los criterios, subcriterios y alternativas, *Expert Choice* asigna el valor correspondiente a los vectores en forma numérica y gráfica. Este proceso permite obtener la jerarquización de las alternativas mostrándose en forma conjunta la importancia de cada criterio [10]. Adicionalmente el software realiza análisis de sensibilidad, para observar y estudiar los efectos de cambios en las jerarquías al modificar la importancia de los criterios [13].

2.2 Alternativas para el manejo y disposición de LE

Existen diversos estudios enfocados al tratamiento y uso de residuos como LE. Teniendo en cuenta la caracterización fisicoquímica y microbiológica de LE se encuentran técnicas para su disposición como: la incineración [14,15], vertido al mar [16,17], aprovechamiento de lignina [18], producción de ladrillos [19,20], producción de biodiesel [21], compostaje [22], acondicionamiento de suelos [23] y producción de alimento para animales [24].

2.2.1 Incineración

Este tratamiento térmico permite la reducción del volumen de lodos, la minimización de la generación de olores, la destrucción térmica de compuestos orgánicos tóxicos y la posibilidad de convertir el residuo en energía útil [14,25,26]. Sin embargo, la incineración no constituye un método de eliminación completa pues aproximadamente el 30% de los lodos se convierten en cenizas, que en algunos casos son consideradas como altamente tóxicas debido a su contenido de metales [14]. La aceptación pública de la incineración impone que los gases de combustión sean sometidos a extensa limpieza para cumplir con límites de emisiones normalmente exigibles para la incineración de estos residuos [26,27].

2.2.2 Compostaje

El compostaje es una de las tecnologías más utilizadas para el tratamiento de efluentes [22]. El proceso de compostaje se lleva a cabo en pilas donde se requiere el uso de materiales de soporte (astillas de madera, residuos de poda y jardinería, forrajes, cáscaras de cereales) para evitar la formación de grumos, mejorar la homogenización y porosidad de la materia orgánica y disminuir el porcentaje de humedad. Durante la transformación del residuo se alcanza condiciones termófilas con las que se logra la reducción de patógenos [27,28]. Esta alternativa ha sido implementada para reciclar lodos residuales, producir abonos a bajos costos, además de beneficios económicos y ambientales [22,29].

2.2.3 Acondicionamiento de suelos

El uso de lodos de aguas residuales como acondicionador de terrenos para cultivos es una práctica promovida por su valor agronómico, su capacidad de recuperar los nutrientes del suelo perdidos a causa del cultivo excesivo [30-32]. Para la disposición de los lodos sobre el suelo es necesario someter el residuo a un tratamiento de estabilización previa (generando biosólidos), debido a contaminantes orgánicos o metales pesados, exceso de materia orgánica, lixiviados y presencia de patógenos [30,31,33]. Los biosólidos deben estar en la

categoría clase A para ser aplicados (en forma líquida en la superficie o inyectados) sin restricciones al suelo [23].

2.2.4 Producción de ladrillos

Por su alto contenido de humedad (80%) los lodos pueden ser utilizados para la fabricación de ladrillos [34]. Entre las ventajas asociadas a esta tecnología se encuentran la inmovilización de metales pesados, la oxidación de la materia orgánica, destrucción de patógenos, reducción en los costos de materia prima y el mejoramiento de la sinterización y propiedades de aislamiento térmico debido a la adición de estos residuos [19,20,35,36].

2.2.5 Producción de concentrado para animales

Sustratos como residuos agroindustriales y efluentes de subproductos asociados a la intensificación agrícola pueden emplearse en la producción de alimentos para animales, con lo que se consigue la disminución del costo en la alimentación [24,37,38]. Investigaciones han permitido el uso de residuos de materiales lignocelulósicos (maguey y bagazo de fique) en forma de ensilados, ya que la alta densidad energética y bajo nivel de pH permite un fácil proceso de ensilaje [39,40]. Además, en Cuba se ha estudiado la obtención de prebióticos a partir del *Agave Fourcroydes*, para emplearse como aditivo en la alimentación de cerdos y otras especies animales [42].

2.3 Procesos de estabilización

Para la implementación de algunas tecnologías debido a la presencia de microorganismos patógenos hace necesario, un proceso adicional de estabilización de LE que permitan cumplir con las reglamentaciones para la disposición de estos residuos [14,43]. Entre los procesos de estabilización se encuentran la digestión anaerobia, compostaje, digestión aerobia, pasteurización,

irradiación gamma y estabilización alcalina [43,44]. El grado de estabilización del proceso se mide teniendo en cuenta la concentración de SV y la reducción de organismos patógenos indicadores [45].

En la estabilización alcalina se utilizan cantidades de cal (CaO o $(\text{CaOH})_2$) que permiten aumentar el pH a 12 unidades por más de dos horas de contacto y que se mantenga en 11 unidades en las 72 horas siguientes [44-46]. En la estabilización el alto pH crea un ambiente que detiene o retarda las reacciones microbianas, además de la reducción de microorganismos patógenos presentes en el biosólido [44,47].

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el aprovechamiento del LE se analizaron las tecnologías: incineración, compostaje, producción de ladrillos, acondicionamiento de suelo y producción de concentrado para animales. El desarrollo experimental de este trabajo se dividió en tres etapas: Caracterización fisicoquímica y microbiológica de LE, Aplicación de la metodología *AHP* para selección de tecnologías para el aprovechamiento de LE y Ensayo experimental de las tecnologías seleccionadas.

3.1 Caracterización microbiológica y fisicoquímica de LE

El LE utilizado en este estudio fue obtenido del proceso de DABF llevado a cabo en reactores *batch* operados a 21 °C y un tiempo de fermentación de 20 días [3]. Las muestras de LE se sometieron a caracterización microbiológica y fisicoquímica. La caracterización microbiológica consistió en cuantificar microorganismos indicadores de contaminación como Coliformes totales y fecales, *salmonella* y huevos de helminto. Para la caracterización fisicoquímica del LE se realizó un análisis bromatológico, reporte en base húmeda e indicadores de degradación de la materia orgánica. La caracterización microbiológica se hizo en los laboratorios de la Escuela de Bacteriología y Laboratorio Clínico de la Universidad Industrial de Santander y el análisis fisicoquímico en los Laboratorios Dr. Calderón de la ciudad de Bogotá.

3.2 AHP para selección de la tecnología para el aprovechamiento de LE

3.2.1 Modelización del problema

En esta etapa mediante el software *Expert Choice*, se definieron los elementos de la estructura jerárquica: objetivo, criterios, subcriterios y alternativas [9].

Subcriterios ambientales

Con base en recomendaciones bibliográficas [13,48], los subcriterios ambientales valorados fueron las *descargas* (subproductos líquidos, sólidos y gaseosos) emitidas con la implementación de cada una de las tecnologías. Además, se evaluaron los efectos previsibles directos o indirectos de cada tecnología sobre el aire, la flora, la fauna, el suelo y el agua (*efectos de contaminación*). La alternativa con menores impactos sobre el entorno fue ponderada con la mejor calificación.

Subcriterios económicos

Se consideraron como subcriterios económicos basados en la bibliografía [13,49,50]: *los costos de inversión, costos de operación y servicios industriales* involucrados en el desarrollo de las tecnologías de disposición. La alternativa con menores costos económicos fue ponderada con la mejor calificación.

Subcriterios operacionales

Los subcriterios operacionales fueron: *proceso, transferencia tecnológica y madurez de la tecnología* seleccionados a partir de la bibliografía [49,50]. En el subcriterio de *proceso* se evaluaron el acondicionamiento de la materia prima (LE u otros) y las etapas necesarias para la ejecución de la alternativa. La *transferencia tecnológica* se evaluó teniendo en cuenta la viabilidad de implementación de las técnicas de disposición en las zonas figueras; y la *madurez de la tecnología* se valoró de acuerdo a la investigación, montajes piloto y plantas instaladas. A la alternativa con menores implicaciones operacionales fue atribuida la mejor calificación.

Subcriterios sociales

Con base en recomendaciones bibliográficas [48,49] en este criterio se evaluó: *la generación de empleo, la aceptación social y el impacto sobre la cadena productiva del fique*. Se pretende que con la implementación de estas prácticas de disposición se contribuya al bienestar social, aumento de la productividad y competitividad de la Cadena Productiva del Fique (CADEFIQUE).

3.2.2 Definición de escalas de ponderación

La forma en que se evaluaron los subcriterios se debió a información bibliográfica y balances de masa, que permitió establecer un preorden de las alternativas en cada criterio (Anexo). Se realizaron las comparaciones binarias siguiendo la jerarquía del modelo: objetivo, criterios, subcriterios y finalmente alternativas. Las comparaciones se llevaron mediante matrices de ponderación, asignando un valor numérico en cada comparación según el preorden establecido anteriormente. El valor se confirió usando la escala de Saaty [11,12].

3.2.3 Evaluación de prioridades y síntesis del problema

Una vez alimentado el software con las matrices de ponderación para las tecnologías, *Expert Choice* calculo los vectores de prioridades locales y globales, y entrego información sobre la jerarquización del problema. Adicionalmente se realizó el análisis de sensibilidad, para observar y estudiar los efectos de cambios en las jerarquías al modificar la importancia de los criterios.

3.3 Ensayos experimentales de las tecnologías seleccionadas

Las tecnologías seleccionadas mediante el software: acondicionamiento de suelos y producción de concentrado para animales fueron probadas experimentalmente.

3.3.1 Estabilización del efluente

Para la estabilización del LE se realizaron tres ensayos (D-1, D-2, D-3) en los cuales se adicionaron distintas cantidades de Ca(OH)_2 como se muestra en la Tabla 1. Se estableció un período de monitoreo del pH de 10 días en los tratamientos. Las variables de respuesta del proceso de estabilización fueron: pH y análisis microbiológico de los ensayos después del tratamiento. Estos ensayos determinaron la dosis de Ca(OH)_2 requerida para lograr mantener el pH en valores que permiten la eficaz reducción de patógenos [15].

Tabla 1. Dosis aplicación de Ca(OH)_2 para la estabilización de LE.

Ensayo	Dosis de Ca(OH)_2 aplicada (kg Ca(OH)_2 /kg lodo seco)
D-1	0,14
D-2	0,19
D-3	0,25

Fuente: *autores*

Una vez estabilizado el biosólido se procedió a separarlo, mediante un tamiz de malla #16, en dos fracciones: parte líquida (biol), destinada para acondicionador de suelos y parte sólida (biosol) empleada como base para la producción de concentrado para animales.

3.3.2 Acondicionador de suelos

Las pruebas experimentales con el biol como acondicionador de suelos se realizaron de acuerdo a las siguientes etapas:

3.3.2.1 Bioensayo de germinación en Lactuca Sativa L.

Antes de la utilización del biol como acondicionador de suelos se realizó un ensayo de fitotoxicidad en semillas de lechuga (*Lactuca Sativa L.*) [51]. En esta prueba, la fitotoxicidad puede deberse a factores como la materia orgánica, elevadas relaciones C/N, concentraciones de amonio, el pH y compuestos orgánicos que pueden influir en la germinación de semillas [52,53].

Además de este tipo de bioensayos deben complementarse ensayos de campo, en los cuales la cantidad de LE agregado al suelo debe ser la adecuada de acuerdo con sus necesidades particulares [52,53]. El bioensayo de germinación para el biol fue realizado en el Laboratorio de Indicadores de Calidad de Aguas y Lodos de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá según el protocolo del manual de técnicas de análisis de suelos [51].

3.3.2.2 Evaluación del acondicionador de suelos

La evaluación del acondicionador de suelos se realizó mediante una prueba experimental, la cual consistió en aplicar diferentes dosis de acondicionador sobre un suelo Franco-arenoso proveniente del municipio de Mogotes, Santander. En la Tabla 2 se presentan las dosis aplicadas para cada uno de los ensayos. Ocho días después de la incorporación del biol, se procedió a la siembra de pasto alpiste (*phalaris canariensis*).

Tabla 2. Dosis de biol aplicada a los ensayos.

Ensayo	Dosis (kg biol/ m ²)
E-Control	0
E-1	9,1
E-2	18,2
E-3	36,5

Fuente: *autores*

Como variables de respuesta fueron tenidas en cuenta la altura de las plantas, necrosis de las hojas y formación de agregados, además de los cambios en la concentración de nutrientes del suelo tratado [54,55,56].

3.3.3 Producción de concentrado para animales

Los concentrados para animales se elaboran de acuerdo a una fórmula genérica establecida para cada especie animal. La formulación de un concentrado para rumiantes debe contemplar un 65,5% de fuentes energéticas (harina de maíz, sorgo, y trigo), 20% de fuentes proteicas (harina de soya, sangre y pescado), 10% de carbohidratos (melaza) y un 4,5% de minerales [57]. Se ha reportado, el uso de estiércol fermentado (efluente) como suplemento en la alimentación de bovinos, mezclas de excretas (gallinas, cerdos y vacas) en alimentación de conejos, además del uso de lodos residuales como suplementos para cerdos [58,59]. Por lo anterior, se utilizó el biosol para formular una dieta animal que permita suplir aportes energéticos.

Para la formulación del Concentrado para Animales a partir del Biosol (CAB) se tomó como base una dieta genérica para rumiantes; compuesta por una relación fuentes energéticas/proteicas de 3,3 denominada R-Control. Se estimó conveniente evaluar tres relaciones (R-1, R-2 y R-3) las cuales fueron 1,5; 3 y 4,5 respectivamente, en las que se utilizó el biosol como parte de las fuentes energéticas.

Para la preparación del alimento, el biosol fue previamente secado durante 30 horas a 60°C y posteriormente mezclado con otros ingredientes según las formulaciones mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Formulaciones para la elaboración del CAB.

Ingredientes	R-Control*	R-1 =1,5	R-2=3	R-3=4,5
	%	%	%	%
Biosol	-----	36,2	44,8	49
Salvado de trigo	45,9	-----	-----	-----
Harina de maíz	19,7	15,5	19,2	21
Harina de soya	20,0	33,8	21,5	15,5
Melaza	10,0	10,0	10,0	10,0
Sal Mineralizada	3,5	3,5	3,5	3,5
Urea	1,0	1,0	1,0	1,0

*Combillas 2000, Fuente: autores

3.3.3.1 Ensayo de citotoxicidad en células VERO

Para la elaboración de un alimento para animales a partir de residuos se recomienda realizar ensayos de toxicidad celular [23]. Estos ensayos son relativos y dependen del grado de dilución, pH y la relación C/N de la muestra. La citotoxicidad del CAB con mayor contenido de biosol (R-3) se evaluó a diferentes diluciones en células de riñón de mono verde africano (Vero ATCC CCL-81) mediante la técnica del MTT (3-[4,5-dimetiltiazol-2-yl]-2,5-difeniltetrazolio bromuro) [60]. Los ensayos de citotoxicidad se realizaron en los laboratorios del Centro de Investigaciones en Enfermedades Tropicales (CINTROP) de la Universidad Industrial de Santander.

3.3.3.2 Pruebas de aceptabilidad de CAB en roedores

El CAB fue diseñado con base en una dieta para rumiantes, dadas algunas limitaciones, para mayor facilidad de manejo en el laboratorio y por recomendaciones del CINTROP, la prueba se realizó en hámsters domésticos.

Los experimentos se realizaron por replicas usando *hámsters* machos con un peso promedio de 40 ± 6 g y 5 semanas de edad; los cuales se ubicaron en jaulas

individuales. El CAB fue suministrado diariamente a cada grupo (2 individuos) de *hámster* según la relación establecida. La prueba tuvo una duración de 30 días donde el alimento y el agua fueron ofrecidos *ad libitum* [59]. El Consumo de Alimento (CA), la Ganancia de Peso (GP), la Conversión Alimenticia (CVA) y la Digestibilidad Aparente (DA) fueron las variables de respuesta estudiadas [59].

El análisis de los resultados se llevo a cabo utilizando el software StatGraphics Centurion XV, StatPoint Inc., Virginia, EE.UU [61].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización microbiológica y estabilización del LE

Se hizo necesaria la estabilización del LE debido a la presencia de microorganismos patógenos como coliformes fecales y totales (antes de estabilización) como se observa en la Tabla 4. Es de resaltar la ausencia de *Salmonella sp.* y huevos de helminto, los cuales se pudieron ver inhibidos en el proceso de DABF. La caracterización microbiológica de LE permitió clasificarlo como biosólido clase B, debido principalmente al contenido de coliformes fecales, lo cual impone requisitos adicionales, como restricción de acceso público al sitio de aplicación y limitación de consumo para el ganado [22], por lo cual se hizo necesario el proceso de estabilización alcalina.

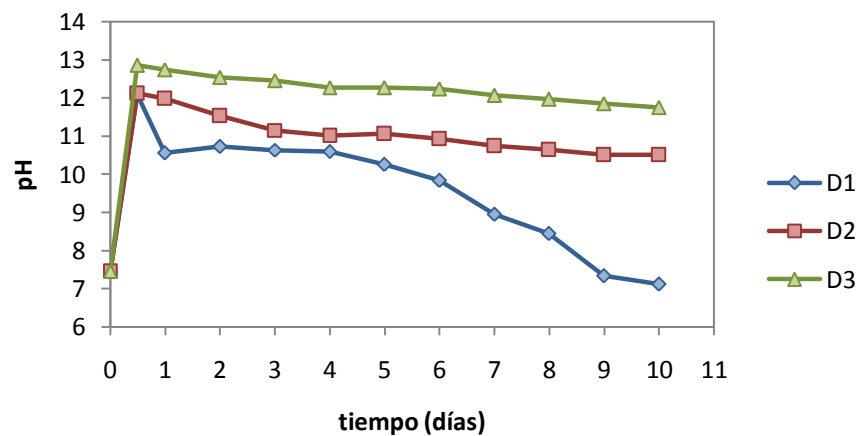
Tabla 4. Caracterización microbiológica del efluente obtenido en la DABF antes y después de la estabilización.

Análisis Microbiológico	Unidad	Antes de la Estabilización	Posterior a la Estabilización	Técnica de medición	Clasificación según la EPA*	
					Clase A	Clase B
Coliformes Totales	NMP/g ST	$4,1 \times 10^9$	No detectable	NMP en caldo LMX Fluorocult.		
Coliformes Fecales	NMP/g ST	$5,8 \times 10^5$	No detectable	NMP en caldo LMX Fluorocult	< 1000 NPM /g ST	< 2×10^6 NPM g ST
Salmonella sp.	Presenci a	Ausente	Ausente	Pruebas Bioquímicas e identificación serológica.	< 3 NPM /4 g ST	
Huevos de Helmintos	HH/ 4 g ST	0	0	Flotación en ZnSO ₄ .	< 1 huevo/4 g ST	

*US EPA: Environmental Protection Agency, Fuente: autores

En la Figura 1 se muestran las variaciones de pH para cada uno de los ensayos de estabilización. Se observó que la adición de Ca(OH)_2 en el ensayo D-1 (0,14 kg de Ca(OH)_2 / kg de lodo seco) no logró mantener el pH en el tiempo estipulado por la norma U.S. EPA, lo que indica que esta dosis no es suficiente para la reducción de patógenos [44-46]. De igual forma, el comportamiento del ensayo D-3 (0,25 kg de Ca(OH)_2 / kg de lodo seco) a lo largo del tratamiento mantuvo el pH en un rango entre 12-13, lo que significa que la cantidad de cal adicionada es alta para los requerimientos del proceso de estabilización, dificultando la posterior utilización del LE en actividades agrícolas [22,43]. El pH de D-2 se mantuvo en un intervalo entre 11-12 demostrando que 0,19 kg Ca(OH)_2 /kg lodo seco es la adecuada para la estabilización de LE [15].

Figura 1. Variación del pH en el tratamiento de Estabilización Alcalina del LE.



Fuente: *autores*

El proceso de estabilización alcalina permitió una efectiva reducción de los coliformes fecales y totales a valores no detectables. La calidad microbiológica del LE posterior a su estabilización (Tabla 4), permitió alcanzar las especificaciones para biosólidos clase A según la U.S. EPA, que aprueba su disposición segura o su uso en la agricultura sin restricciones [47].

4.2 Caracterización fisicoquímica del LE

El Análisis Bromatológico-*Van Soest* mostrado en la Tabla 5 permitió encontrar en el LE propiedades como proteína bruta, minerales y energía, que pueden ser aprovechadas en tecnologías que permitan su reutilización. Es de resaltar la clasificación del biosólido como un forraje tipo *Prime* (excelente) según la *American Forage and Grassland Council* debido a su valor alimenticio relativo (*RFV*). Una clasificación tipo *prime* del LE garantiza altos aportes nutricionales en la alimentación animal [62]. Con el proceso de estabilización, el alto nivel de pH provocó una disminución de contenidos de carbono, causando la disminución de la proporción de fibras y hemicelulosa. Aun cuando se reduce el contenido de fibras y algunos minerales, estas propiedades permite que el LE sea empleado en la producción de ladrillos, concentrados para animales y la incineración.

El reporte de caracterización fisicoquímica en base húmeda (Tabla 6) determinó bajas concentraciones de metales pesados y contenido de nutrientes que resalta la posibilidad de su aprovechamiento en tecnologías como el acondicionamiento del suelo y el compostaje. La disminución de algunos minerales se dio por aumento de pH que puede producir la volatilización principalmente de carbono y nitrógeno [63].

Tabla 5. Análisis Bromatológico del LE.

Parámetro	Unidades	Antes de Estabilización	Después de Estabilización	
	FDN	%	44,65	38,90
Fibras	FDA	%	18,41	18,26
	FDK	%	3,40	3,04
Proteína bruta	%	14,88	12,75	
Lignina	%	1,30	1,34	
Celulosa	%	0,00	0,00	
Hemicelulosa	%	11,41	1,70	
Carbohidratos no estructurados	%	41,42	42,80	
Cenizas	%	29,52	41,79	
Minerales	Fósforo	%	3,83	2,87
	Potasio	%	1,1	1,11
	Calcio	%	2,96	8,64
	Nitrógeno	%	2,38	2,04
	Magnesio	%	2,44	2,22
Energías	Energía Digerible	Kcal/Kg	3305	3309
	Energía Metabolizable	Kcal/Kg	2710	2714
Valor alimenticio relativo (RFV)			156,12	179,44

Fuente: *autores*

Tabla 6. Reporte fisicoquímico en base húmeda del LE.

Parámetro	Unidades	Antes de Estabilización	Después de Estabilización
Nitrógeno total	g/L	3,30	0,40
Potasio	g/L	0,93	1,90
K ₂ O	g/L	1,12	2,28
Fosforo	g/L	3,70	4,20
P ₂ O ₅	g/L	8,50	9,60
Azufre	g/L	1,00	0,83
Cobre	g/L	0,08	0,08
Zinc	g/L	0,15	0,17
Carbono orgánico Oxidable	g/L	45,80	32,30
Relación C/N		13,88	80,75

Fuente: *autores*

El aumento en el contenido de fósforo, al concluir el ensayo se debió a una reacción de inmovilización del fósforo, ya que se forma un precipitado de fosfato de calcio, condición reportada en la literatura [63]. El aumento en la relación C/N después del proceso de estabilización se debe a la formación de iones amonio que son volatilizados a causa de la elevación de pH. Aún cuando el biol se ve desfavorecido por esta relación, se puede complementar con un abono nitrogenado que permita el aprovechamiento de los demás nutrientes.

En la Tabla 7 se presentan los Indicadores de degradación de la materia orgánica.

Tabla 7. Indicadores de degradación de la materia orgánica para el LE.

Parámetro	Unidades	Antes de estabilización	Después de estabilización	% de disminución
D.B.O	mg O ₂ /L	10.833	3.525	32,54
D.Q.O	mg/L O ₂	65.944	16.800	25,48
S.V	% p/p	28,48	4,30	15,10

Fuente: *autores*

El proceso de estabilización alcalina redujo el contenido de SV, DQO y DBO del LE debido principalmente al ataque de las biomoléculas por parte del álcali, el cual genero volatilización de parte de la materia orgánica, favoreciendo la reducción de atracción de vectores que pudiera generarse a causa del uso del biosólido [47]. Estas condiciones aseguran que los biosólidos puedan ser almacenados para su posterior utilización. Los resultados confirman que el tratamiento alcalino realizado fue efectivo para la estabilidad de la materia orgánica [63].

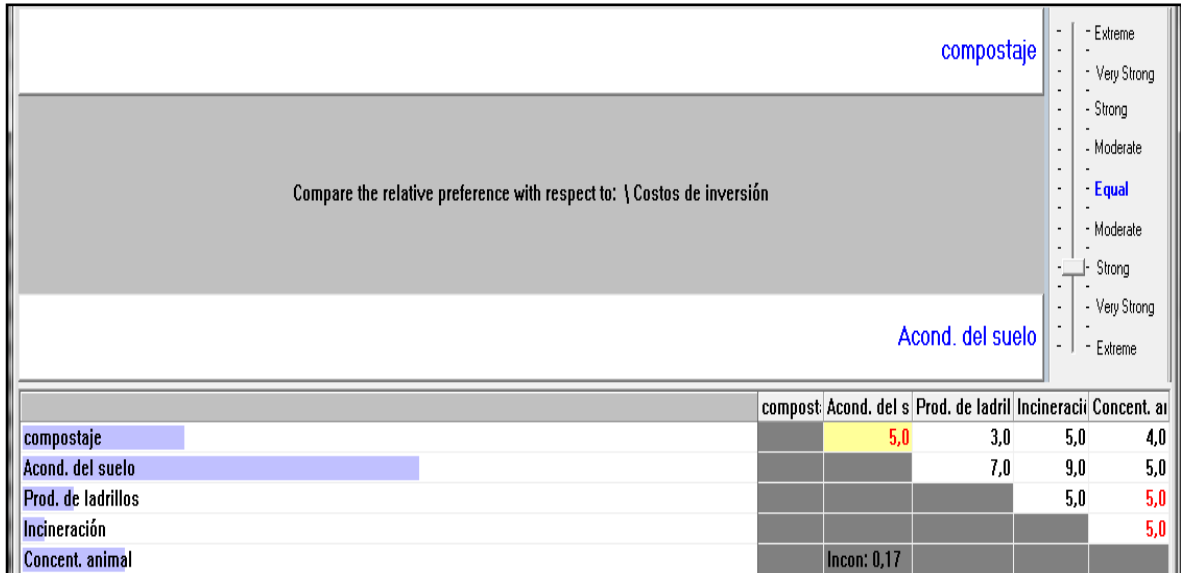
4.3 Selección de las tecnologías para el aprovechamiento del LE

Al implementar la metodología AHP fue posible analizar la conveniencia o no de cada alternativa según los criterios ambiental, operacional, económico y social. La revisión bibliográfica permitió incluir aspectos cuantitativos y cualitativos, que contribuyeron a la selección de la tecnología para el aprovechamiento de LE (Anexo).

Definición de escalas de ponderación

La Figura 2 muestra un ejemplo de las comparaciones binarias realizadas siguiendo la jerarquía del modelo: objetivo, criterios, subcriterios y finalmente alternativas. Las comparaciones se realizaron en matrices de valoración, asignando un valor numérico en cada comparación según la escala de Saaty.

Figura 2. Comparaciones binarias para el subcriterio costos de inversión empleando Expert Choice V.11.5



Fuente: *autores*

En la Figura 2 se observa la matriz de comparación para el subcriterio de costos de inversión, en esta comparación el software genera como mejor alternativa al acondicionamiento del suelo por ser una tecnología que requiere muy pocos equipos para su implementación.

Evaluación de prioridades y síntesis del problema

Una vez alimentado el software con las matrices de ponderación para cada uno de los subcriterios, criterios y tecnologías, *Expert Choice* calculó los vectores de prioridades locales y globales, que contribuyeron a la jerarquización de las alternativas. La Figura 3, muestra la matriz de valoración global para las alternativas evaluadas.

Figura 3. Matriz de valoración global para las alternativas evaluadas mediante Expert Choice V.11.5

Alternativa	Total	Descargas (L: .750)	Efectos de contaminación (L: .250)	Costos de inversión (L: .110)	Costos de operación (L: .567)	Servicios industriales (L: .323)
compostaje	.401	.339	.327	.404	.413	.399
Acond. del suelo	.881	1,000	.535	1,000	1,000	1,000
Prod. de ladrillos	.167	.127	.137	.130	.113	.128
Incineración	.110	.074	.080	.057	.050	.056
Concent. animal	.546	.590	1,000	.260	.269	.231

Proceso (L: .731)	Transferencia tecnológica (L: .081)	Madurez de la tecnología (L: .188)	Generación de empleo (L: .738)	Aceptación social (L: .170)	Impacto sobre la cadena productiva del fique (L: .092)
.493	.417	1,000	.662	.376	1,000
1,000	1,000	.394	.146	.660	.682
.175	.126	.202	.962	.177	.193
.075	.046	.661	.767	.066	.065
.349	.287	.100	1,000	1,000	.460

Fuente: autores

En la matriz de valoración global, las barras amarillas representan los coeficientes o prioridades asignados a cada alternativa. Estos valores corresponden al vector de importancia que el software calcula con las matrices de comparación alimentadas. Las barras grises representan la jerarquización de las alternativas evaluadas, obtenida a partir de las comparaciones binarias.

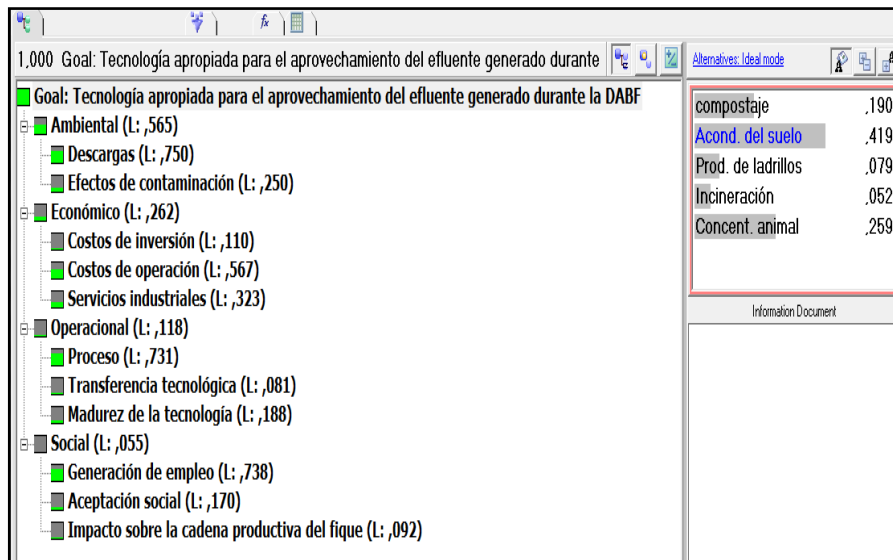
Síntesis del problema

La Figura 4 muestra de forma conjunta, la importancia relativa de cada criterio (izquierda) y la ordenación (derecha) correspondiente de las tecnologías a partir de las comparaciones binarias. La importancia de los criterios en contribución al objetivo encontrada mediante el software fue: ambiental 0,565; económico 0,262; operacional 0,118 y para el social 0,055 mostrados en la Figura 4. Como resultado del proceso de decisión multicriterio se obtuvo como alternativa más conveniente

al acondicionamiento del suelo seguida por la producción de concentrado para animales.

Aun cuando el criterio social presenta el menor valor de importancia, el aprovechamiento del subproducto generado en la DABF beneficia de manera indirecta este criterio, ya que se busca evitar prejuicios en la comunidad debido a una incorrecta disposición del LE generado si se implementa industrialmente la producción de biogás a partir de BF.

Figura 4. Jerarquización de las técnicas de disposición mediante Expert Choice V 11.5



Fuente: autores

Análisis de sensibilidad

La Tabla 8 muestra los efectos en el orden de prioridad para las alternativas ante variaciones en los pesos relativos de los criterios. Por ejemplo, cuando la

contribución del criterio económico es modificada del rango (0-0,61) a otro más alto el orden de prioridad cambia a: Acondicionamiento del Suelo (AS) – Compostaje (C) – Producción de Concentrado para Animales (PCA) – Producción de Ladrillos (PL) – Incineración (I).

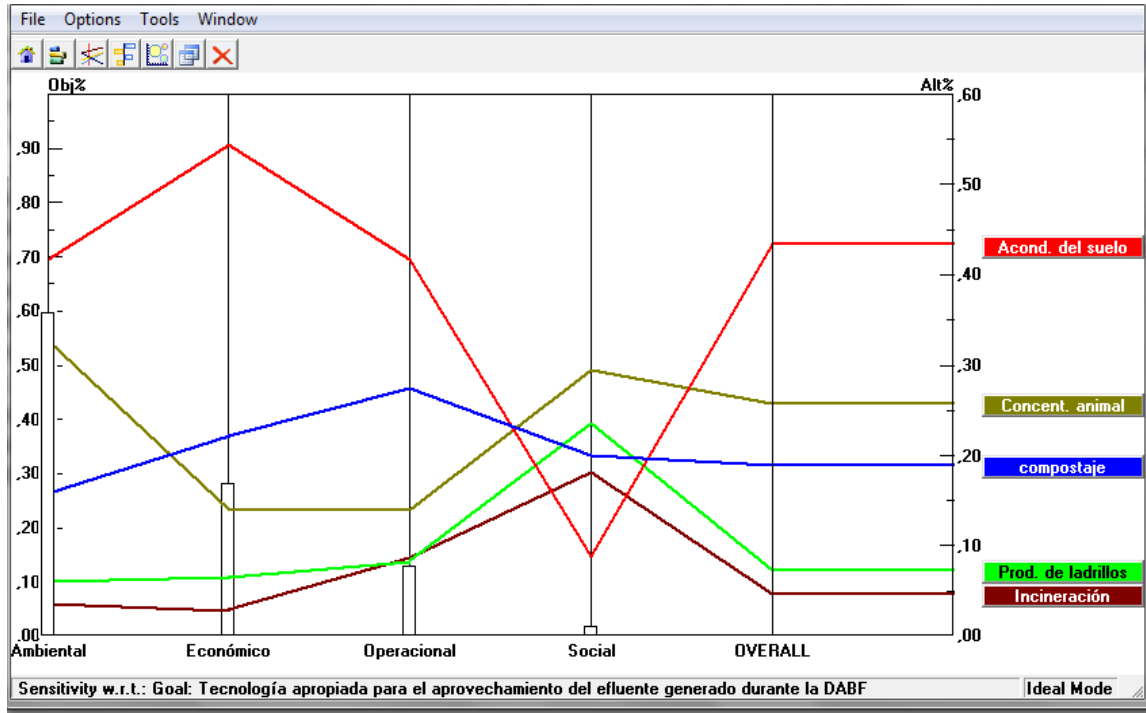
Tabla 8: Análisis de sensibilidad para las alternativas evaluadas.

Criterios	Rango de contribución	Orden de prioridad para alternativas
Ambiental	(0-0,21) (0,21-1)	(AS-C-PCA-PL-I) (AS-PCA-C-PL-I)
Económico	(0-0,61) (0,61-1)	(AS-PCA-C-PL-I) (AS-C-PCA-PL-I)
Operacional	(0-0,52) (0,52-1)	(AS-PCA-C-PL-I) (AS-C-PCA-PL-I)
Social	(0-0,43) (0,43-0,72)	(AS-PCA-C-PL-I) (PCA-AS-C-PL-I)
	(0,72-0,79) (0,79-0,98)	(PCA-C-AS-PL-I) (PCA-C-PL-AS-I)
	(0,98-1)	(PCA-PL-C-AS-I)

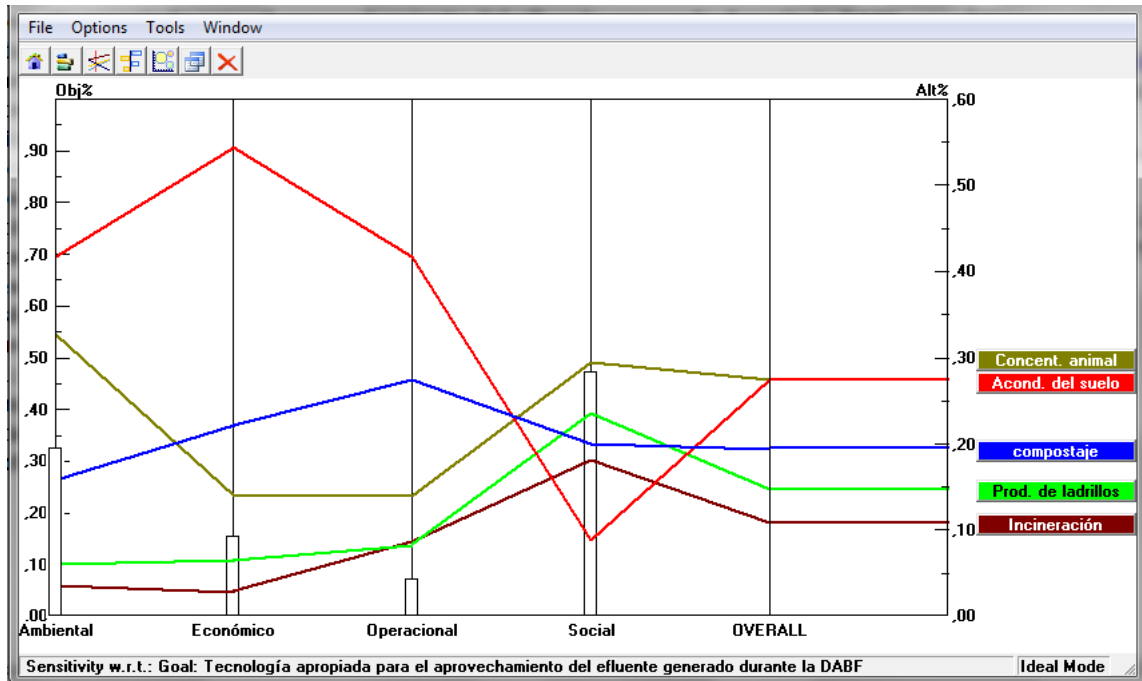
Fuente: *autores*

La Figura 5 muestra modificaciones en la jerarquía al realizar cambios en el peso relativo del criterio social. El acondicionamiento de suelos ocupa la menor escala jerárquica en el criterio social debido a la escasa generación de empleo en esta tecnología comparada con las demás. En la figura 5b se observa que el acondicionamiento de suelos pasa al segundo orden de la jerarquía al aumentar la importancia de este criterio por encima de 0,43. Como se muestra en la Figura 5 (a y b) el acondicionamiento de suelos y la producción de concentrado para animales sigue ocupando la mejor ubicación jerárquica en el mayor rango del peso relativo para el criterio social (0-0,72). Se puede observar que el acondicionamiento de suelos y la producción de concentrado para animales son alternativas adecuadas para el tratamiento de LE, aun desde punto de vista social, criterio con el menor peso en la jerarquía.

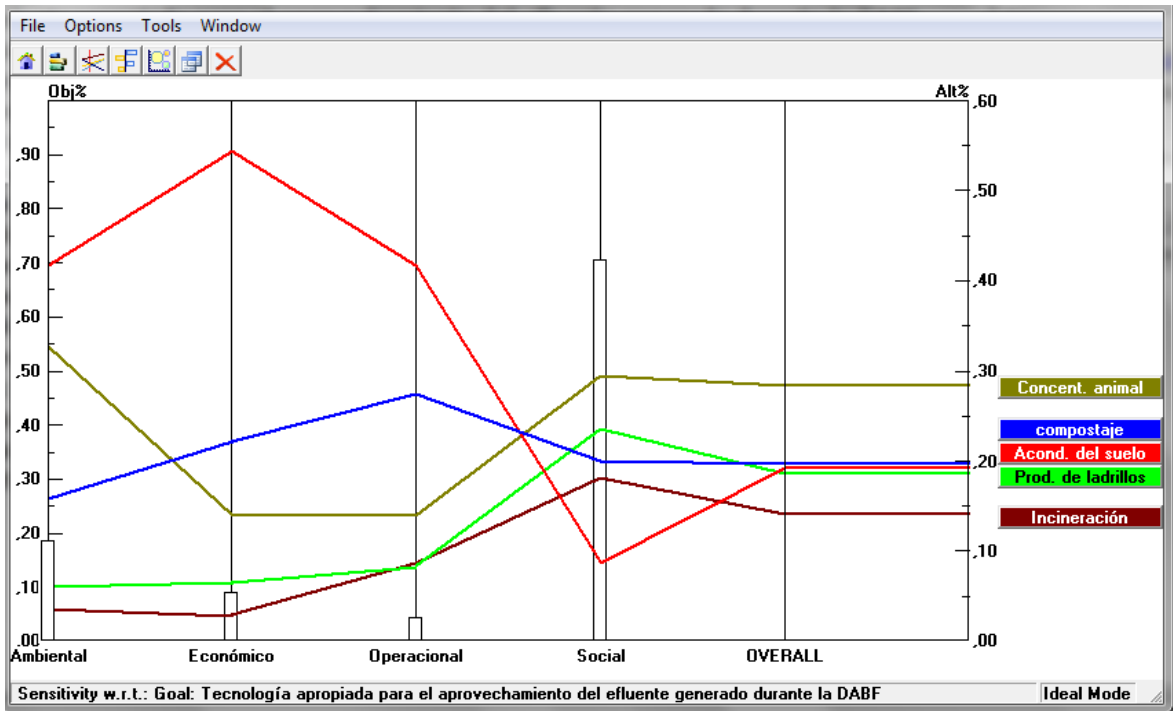
Figura 5. Análisis de sensibilidad empleando Expert Choice V 11.5



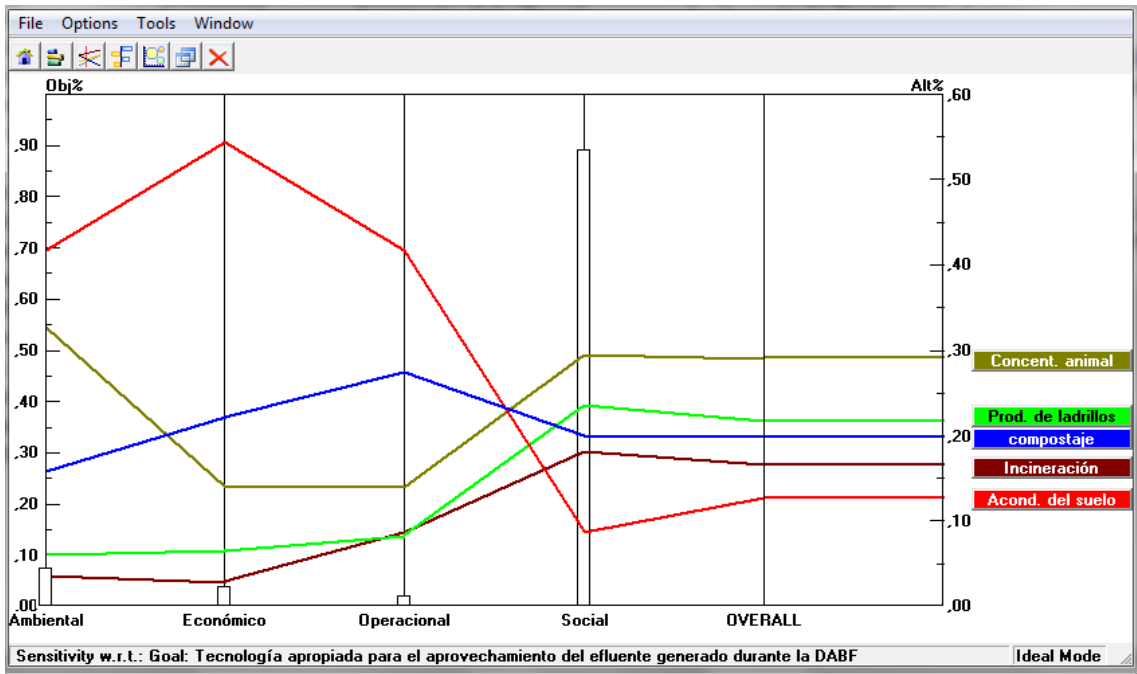
a.



b.



c.



d.

Fuente: autores

4.4 Ensayo experimental de las tecnologías seleccionadas

4.4.1 Acondicionamiento de suelos

Bioensayo de germinación en Lactuca Sativa L.

El bioensayo de germinación con semillas de lechuga mostró un porcentaje de inhibición del 25 %, factores como la elevada relación C/N, concentraciones de amonio y compuestos orgánicos influyeron en la germinación de las semillas y el crecimiento de la radícula [52,53]. Sin embargo, se puede establecer que una vez el biol es aplicado al suelo pueden presentarse disminuciones significativas en su fitotoxicidad; resultado de los efectos de dilución y las características de los suelos donde es agregado.

Evaluación del acondicionador de suelos

El nacimiento y supervivencia de las plántulas de pasto alpiste fue observado a lo largo de la prueba. Las variables de respuesta para cada tratamiento de aplicación del biol se reportan en la Tabla 9.

Tabla 9. Variables respuesta para cada tratamiento según la dosis de biol aplicada.

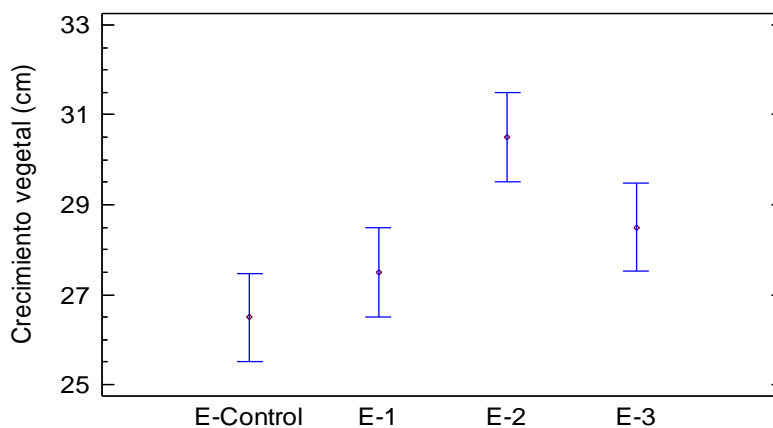
Variables	Tiempo (semanas)	E-Control	E-1 (9,1kg/m ²)	E-2 (18,2 kg/m ²)	E-3 (36,5 kg/m ²)
Crecimiento vegetal (cm)	1	8	10	12	13
	2	17	20	22	20
	3	25	28	31	29
Necrosis de las hojas	1				
	2	Detectada	No detectada	No detectada	No detectada
	3				
Agregación del suelo	Previo a la etapa de germinación	Sin formación de agregados	Con formación de agregados		

Fuente: *autores*

Ninguno de los tratamientos presentó necrosis en las hojas, excepto el terreno control. La necrosis foliar apreciada fue debida probablemente a la deficiencia de potasio en el terreno sin biol [64].

La media total para el crecimiento del pasto alpiste fue de $19,58 \pm 2,5$ cm durante el ensayo, en todos los experimentos se evidenciaron diferencias significativas entre si, a un nivel de confianza de 95% respecto al crecimiento vegetal (Figura 6), observándose que el E-2 fue el tratamiento que presento el mayor crecimiento.

Figura 6. Distribución de medias para el crecimiento vegetal durante el ensayo.



Fuente: *autores*

La Tabla 10 muestra la comparación entre la caracterización fisicoquímica del suelo control y de E-2, experimento en el que se observo los mejores resultados.

Como se observa en la Tabla 10 la textura del suelo en cada uno de los tratamientos presento una tendencia franco-arenoso, evidenciándose un aumento

proporcional del contenido de sólidos finos de acuerdo a la dosis de biol aplicado (formación de agregados) [65].

Tabla 10. Resultados de los cambios fisicoquímicos del suelo después de la aplicación del biol.

Parámetro	E-Control (sin biol)	E-2 (18.2 kg biol/m ²)	Método Analítico
Textura	Franco -arenoso	Franco -arenoso	Bouyoucous
pH	5,3	6,2	Electrométrico
Carbono orgánico (%)	3,25	3,19	Colorimétrico
Fosforo (ppm)	110	245	Colorimétrico
Calcio (meq/100 g)	5,58	6,88	Absorción Atómica
Magnesio (meq/100 g)	0,75	2,12	Absorción Atómica
Sodio (meq/100 g)	0,15	0,35	Absorción Atómica
Potasio (meq/100 g)	ND*	0,35	Absorción Atómica
Aluminio (meq/100 g)	ND	ND	Valoración extracción KCL
Azufre	7,05	34,5	Turbidimétero
Boro	0,21	0,55	Colorimétrico
Hierro	133	93,6	Absorción Atómica
Manganeso	3,44	3,32	Absorción Atómica
Cobre	1,64	4,52	Absorción Atómica
Zinc	9,0	22,4	Absorción Atómica
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (meq/100 g)	13,4	18,0	Extracción acetato de amonio
Conductividad Eléctrica (CE) (mmhos/cm)	0,16		Electrométrico

*ND: No Detectado, Fuente: autores

La adición de cal en el proceso de estabilización permitió una corrección en el pH del suelo al adicionarse el biol. Algunos cultivos, como el fique, producen liberación de iones amonio causante de acidez en el suelo [2], por lo cual, el acondicionador se hace idóneo para corregir el pH en estos terrenos.

La CIC se vio favorecida con la aplicación del biol, permitiendo el incremento de materia orgánica en el suelo, la retención de minerales para las plantas, y la posible disminución del potencial lavado de cationes a aguas subterráneas [65]. Este ensayo permitió evidenciar, que la adición del biol favorece el aumento de micronutrientes (B, Mn, Cu, Zn) del terreno permitiendo la recuperación del suelo degradado a causa del cultivo de fique, el cual demanda gran cantidad de nutrientes [2].

4.4.2 Producción de concentrados para animales

Ensayo de citotoxicidad en células VERO

La citotoxicidad en células *VERO* permitió establecer una concentración inhibitoria (IC_{50}) de 23.600 $\mu\text{g/ml}$ para el CAB. Al comparar este valor con datos reportados para la actividad citotóxica de aceites esenciales de *Achyrocline alata* y *Baccharis latifoli* con IC_{50} de 73,8 y 52,6 $\mu\text{g/ml}$ respectivamente, se pudo establecer que el CAB al igual que los aceites esenciales no mostró efectos tóxicos sobre la línea celular (Vero ATCC CCL-81) [60].

Pruebas de aceptabilidad CAB en hámsters

En la Tabla 11 se observan la media total de las variables respuesta para las diferentes formulaciones evaluadas en el ensayo.

Tabla 11. Variables de respuesta para la evaluación del CAB.

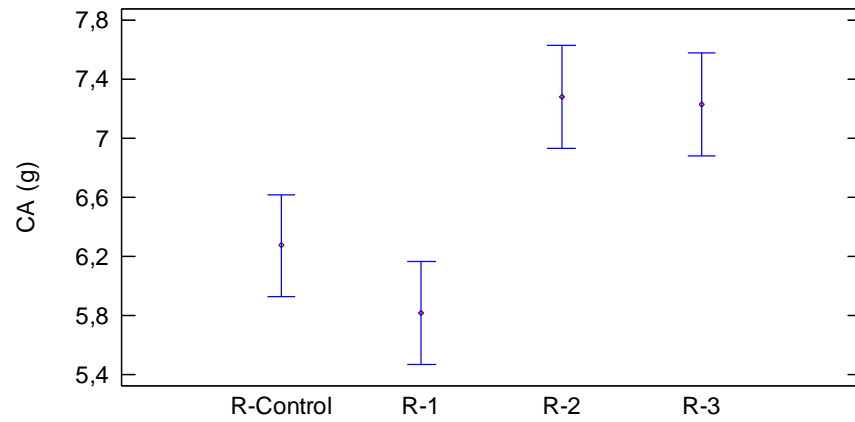
Tratamiento	Ganancia de Peso total GP (g)	Consumo de Alimento CA (g)	Conversión Alimenticia CVA	Coefficiente de Digestibilidad Aparente CDA (%)
R-Control	13,25	124,96	9,43	56,98
R-1	3,14	117,25	15,21	57,09
R-2	1,71	140,69	13,43	63,02
R-3	-4,82	145,42	-30,16	67,46

Fuente: *autores*

Se puede observar que el ensayo R-3 presento pérdida de peso durante el tratamiento. Esto se debe a que el suministro de dietas con restricción de proteínas como en R-3, provoca en los hámsters pérdida de peso proporcional a la privación [66].

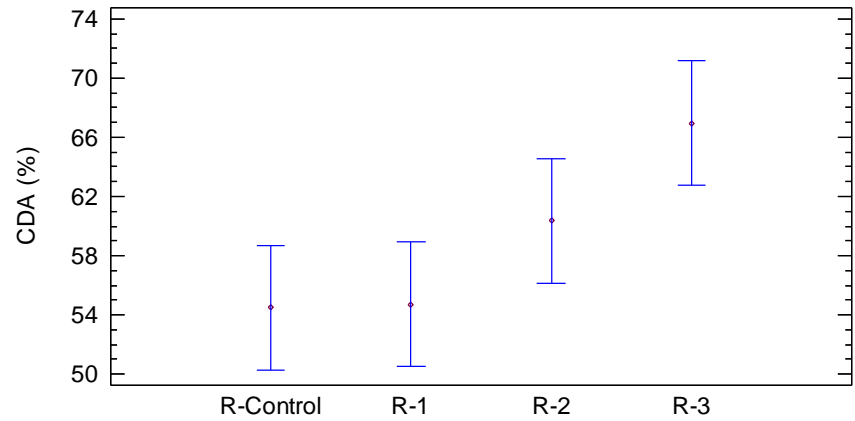
El análisis estadístico presentado en la Figura 7 mostro diferencias significativas entre R-1 y R-3 con un intervalo de confianza del 99% en los ensayos para el CA, observándose que el ensayo R-3 presento el mayor consumo de alimento con 145,42 g durante el periodo de prueba. La disminución del nivel de proteínas en la formulación R-3 causo un aumento en la ingesta de alimento, con lo que el animal busco suplir la falta del aporte nutricional (proteína), situación reportada en la literatura [66].

Figura 7. Distribución de medias para el Consumo de Alimento (CA) según las formulaciones.



Fuente: *autores*

Figura 8. Distribución de medias para el Coeficiente de Digestibilidad Aparente (CDA) según las formulaciones.



Fuente: *autores*

La media para el CDA fue de $61,14 \pm 5,24\%$ con efectos significativos ($P < 0,001$) entre los ensayos (Figura 8). Se observa que los hámsters alimentados con R-control presentan el menor valor de digestibilidad, mientras el ensayo R-3 presento el mayor CDA con 67,46%.

El mayor valor del coeficiente digestibilidad aparente se dio en el ensayo R-3, estableciéndose que el contenido de fibra presente en LE es fácilmente digerible, lo que permitiría su utilización como base en la preparación de alimentos para rumiantes. Aunque las formulaciones del concentrado se elaboraron con base en una dieta para rumiantes, los resultados obtenidos en la prueba experimental empleando hámsters son satisfactorios. Durante el experimento ningún animal presento efectos colaterales y síntomas evidentes, además durante el periodo de alimentación el estado anímico de los hámsters no se vio afectado por la dieta.

5. CONCLUSIONES

Mediante la metodología AHP y el software *Expert Choice* las alternativas: acondicionamiento del suelo y producción de concentrado para animales con 41,9% y 25,9% respectivamente fueron seleccionadas como las alternativas más apropiadas para su aprovechamiento.

El subproducto de la digestión anaerobia del bagazo de fique muestra un alto potencial de uso en la agricultura como acondicionador de suelos, debido a que el contenido de minerales en este material puede beneficiar los suelos del Municipio de Mogotes que se caracterizan por ser terrenos ácidos y presentar bajos niveles de nutrientes.

La evaluación experimental del concentrado para animales a partir de biosol permitió establecer que el alimento es inocuo, de alto potencial de ingestión y digerible por los animales en experimentación.

Las alternativas tecnológicas seleccionadas en este estudio contribuyen al tratamiento y cierre del ciclo de vida del proceso de producción biogás a partir del bagazo de fique de manera sostenible.

6. RECOMENDACIONES

Se debe realizar seguimiento prolongado a las características fisicoquímicas, microbiológicas y tasas de aplicación del LE en diferentes tipos de suelos y cultivos para precisar sus requisitos de manejo antes de la aplicación que permitan evitar su impacto negativo sobre el ambiente.

Se sugiere hacer posteriores ensayos de evaluación del concentrado animal en rumiantes, que contribuya a la valoración de este subproducto como parte importante de su alimentación.

7. REFERENCIAS

1. Finagro. Fique. *Producción y zonas de producción*. [Online] [Cited: Abril 8, 2011] www.finagro.com.co
2. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Ministerio nacional de planeación. *Guía ambiental del subsector fiquero*. 2006.
3. CASTRO L., ESCALANTE H., QUINTERO M., ORTIZ C., GUZMÁN C. *Producción de Biogás a partir del bagazo de fique generado durante el beneficio de fique*. 2009. Cuarto Simposio de química aplicada. SIQUIA. [Cuarto Simposio de química aplicada SIQUIA]. 2009. ISBN 978-958-8593-12-8.
4. BARRERA A. P., VILLAREAL S. M., CASTRO M. L., ORTIZ C., ESCALANTE H. *Estudio preliminar de la bioproducción de metano a partir de los residuos del proceso de beneficio del fique*. 2009. Ion, Vol. 22. No 1
5. CHO K., *Multicriteria Decision Methods: An attempt to Evaluate and Unify*. 2003. Mathematical and Computer Modelling. Vol. 37, pp. 1099-1119
6. ANANDA J., HERATH G., *A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning*. 2009. Ecological Economics. Vol. 68, pp. 2535–2548
7. BRUNNER N., STARKL M., *Decision aid systems for evaluating sustainability: a critical survey*. 2004. Environmental Impact Assessment Review. Vol.24, pp.441–469
8. MACHARIS C., SPRINGAEL J., DE BRUCKER K., VERBEKE A., *PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP*. 2004. European Journal of Operational Research. Vol. 153 (2), pp. 307-317
9. Expert Choice, Expert Choice Inc. Available from <http://www.expertchoice.com>.

10. MARTÍNEZ E. *Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME*. 2007. Anuario jurídico y económico Escorialense. Pp. 523-542
11. AL-HARBI K. *Application of the AHP in project management*. 2001. International Journal of Project Management. Vol. 19, pp.19 -27
12. COLOMBO S., ANGUS A., MORRIS J., PARSONS D., BRAUN M., STACEY K., HANLEY N. *A comparison of citizen and “expert” preferences using an attribute-based approach to choice*. 2009. Ecological Economics Vol. 68, pp. 2834–2841
13. ZANGENEH A., JADID S., RAHIMI-KIAN A. *A hierarchical decision making model for the prioritization of distributed generation technologies: A case study for Iran*. 2009. Energy Policy. Vol. 37, pp. 5752–5763
14. FYTILI D., ZABANIOTOU A. *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review*. 2008. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 12, pp.116-140
15. WANG L., SHAMMAS W., HUNG Y. *Biosolids Treatment Processes* .Handbook of Environmental Engineering. 2008. Vol. 7, pp.443-477
16. NIHOUL C., *Dumping at sea*. 1991. Ocean and Shoreline Management. Vol. 16, (3-4), pp. 313-326
17. VELÁSQUEZ J, FERRANDO F, SALVADO J. *Effects of kraft lignin addition in the production of binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis*. 2008. Industrial Crops and Products. Vol. 18, pp.17-23
18. MONTERO M., JORDÁN M., HERNÁNDEZ-CRESPO M., SANFELIU T. *The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies*. 2009. Applied Clay Science. Vol. 46, pp. 404–408
19. WENGA C-H., LIN D-F., CHIANG P-C. *Utilization of sludge as brick materials*. 2003. Advances in Environmental Research. Vol. 7, pp. 679–685

20. ANGERBAUER C., SIEBENHOFER M., MITTELBACH M., GUEBITZ G. *Conversion of sewage sludge into lipids by *Lipomyces starkeyi* for biodiesel production*. 2008. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 3051–3056
21. SONG U., LEE E. *Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill*. 2010. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 54, pp. 1109–1116
22. U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Land application* .2000. under 832-F-00-064 Office of Water/ Office Science and Technology Sludge/ Risk Assessment Branch. Washington
23. HWANG J., ZHANG L., SEO S., LEE Y-W., JAHNG D. *Protein recovery from excess sludge for its use as animal feed*. 2008. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 8949–8954
24. HOUILLON G., JOLLIET O. *Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge*. Energy and global warming analysis. 2005. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 13, pp. 287–299
25. WERTHERA J, OGADAB T. *Sewage sludge combustion*. 1999. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 25, pp. 55–116
26. GIUSEPPE M., SBRILLI A., GUERRIERO E., ROTATORI M. *Dioxins and furans formation in pilot incineration tests of sewage sludge spiked with organic chlorine*. 2004. *Chemosphere*. Vol. 54, pp. 1337–1350
27. TARRASÓN D., OJEDA G., ORTIZ O., ALCAÑIZ JM., *Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge*. 2008. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 252–259
28. TORRES P., PÉREZ A., ESCOBAR J.C, URIBE I. *Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales*. 2007. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, Vol. 27, pp. 267-275.

29. WARMAN P., TERMEER W. *Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: yields and N, P and K content of crops and soils*. 2005. *Bioresource Technology*, Vol. 96, pp. 955–961
30. KIDD P., DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ M., DÍEZ J., MONTERROSO C. *Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge*. 2007. *Chemosphere*. Vol. 66, pp. 1458-1467
31. FERNÁNDEZ J, PLAZA C., GARCIA-GIL J, POLO A. *Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge*. 2009. *Applied Soil Ecology*. Vol. 42, pp. 18–24
32. WANG X., CHEN T., GE Y., JIA Y. *Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors*. 2008. *Journal of Hazardous Materials*. Vol.160. pp. 554–558
33. TARRASÓN D., OJEDA G., ORTIZ O., ALCAÑIZ J. *Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge*. 2008. *Bioresource Technology* .Vol 99, pp. 252–259
34. MUN KJ. *Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete*.2007. *Construction and Building Materials*. Vol. 21, pp. 1583–1588
35. BALASUBRAMANIAN J., SABUMON P., LAZAR J., ILANGO VAN R. *Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials*. 2006. *Waste Management* .Vol. 26, pp. 22–28
36. CHIANGA K-J., CHOUA P-H., HUAA C-R., CHIENA K-L, CHEESEMANB C. *Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks*. 2009. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 171, pp. 76–82
37. ANTONY W. *Feeding Value of Cattle Manure for Cattle*. 1970. *Journal Animal Science*. Vol. 30, pp. 274-277.

38. CHOWDHURY S., *Biodigester effluent as protein supplement for indigenous (Bos indicus) growing bulls*. 1999. Animal Production, Research Division, Bangladesh Livestock Research Institute, Savar, Dhaka 1341, Bangladesh.
39. VILLAS-BOAS S., ESPOSITO E., MITCHELL D., *Microbial conversion of lignocellulosic residues for production of animal feeds Review*. 2002. Animal Feed Science and Technology. Vol. 98. pp. 1–12.
40. ÁLVAREZ G, Garcia J., PINOS J., TRISTÁN F. *Perfil bioquímico del ensilado de maguey*. Nutrición Animal [online] [cited; Abril 3 2011] <http://bibliotecas.umar.mx/publicaciones/Nutricion%20animal.pdf>.
41. CALSAMIGLIA S., *Nuevas bases para la utilización de la fibra en dietas de rumiantes*. [online] [cited; Abril 3 2011] http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Uso_de_Fibra_en_Rumiantes.pdf
42. GARCÍA Y., GUADALUPE M., R. BOCOURT R., ALVELO N., NUÑEZ O., *Agave Fourcroydes, Una planta con potencialidades para obtener prebióticos*. Revista Computadorizada de Producción Porcina 2010 [online] [cited; Abril 2 2011]: <http://www.iip.co.cu/rcpp/Rcpp%2017.1.pdf>.
43. National academy press Washington D.C. 2002. *Biosolids applied to land: Advancing standards and practices*.
44. U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503*. 2003. Washington, D.C
45. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. *Criterios de calidad y uso para el aprovechamiento y disposición final de los Biosólidos*. 2010, borrador de decreto. República de Colombia.
46. U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Biosolids Technology Fact Sheet, Alkaline Stabilization of Biosolids*, in EPA 832-F-00-052. 2000. Office of Water, Washington, D.C.

47. U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*, in EPA/625/R-92/013. 2003
48. KAHRAMAN C., KAYA J., *A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives*. 2010. Expert Systems with Applications. Vol. 37 (9), pp. 6270-6281
49. KAYA T., KAHRAMAN C. *Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul*. 2010. Energy Vol.35. pp. 2517-2527.
50. BARCO L., *Herramienta matemática para evaluar tecnología para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz*. 2008. Universidad Industrial de Santander.
51. U.S. Environmental Protection Agency. Ecological Effects Test Guidelines (OPPTS 850.4200): Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test. 1996
52. FUENTES A., LLORÉNS M., SÁENZ J., AGUILAR M., PÉREZ-MARÍN A., ORTUÑO J., MESEGUER V. *Ecotoxicity, phytotoxicity and extractability of heavy metals from different stabilised sewage sludges*. 2006. Environmental Pollution. Vol.143. pp. 355-360
53. TIQUIA S.M. *Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition*.2010. Chemosphere. Vol. 79. Pp. 506–512
54. SULLIVANA T., STROMBERGERA M., PASCHKEB M. *Parallel shifts in plant and soil microbial communities in response to biosolids in a semi-arid grassland*. 2006. Soil Biology & Biochemistry. Vol. 38. Pp. 449–459
55. CRUSH J.R., SARATHCHANDRA U., DONNISON A. *Effect of plant growth on dehydration rates and microbial populations in sewage biosolids*. 2006. Bioresource Technology. Vol. 97. Pp. 2447–2452

56. HAHM J., WESTER D. *Effects of surface-applied biosolids on grass seedling emergence in the Chihuahuan desert*. 2004. Journal of Arid Environments. Vol. 58, pp. 19–42
57. GUIHENEUF P, ALAIN R. *Manual de ganadería tropical para campesinos*. 1990. México D.F
58. EKPENYONG T., SRIDHAR M., ASIRU B., *Utilization of dried activated sludge as a feed supplement for pigs*. 1989. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 2 (4), pp. 287-296.
59. CASTILLO S., AGUILAR S., LUCERO F., MARTINEZ J., *Sustitución de alimento comercial por excretas en la alimentación de conejos en crecimiento*. 2007. Rev. AIA. Vol. 11 (1). Pp. 41-48. ISSN 0188789-0
60. ZAPATA B., DURÁN C., STASHENKO E, BETANCUR-GALVIS L., MESA-ARANGO C. *Actividad antimicótica y citotóxica de aceites esenciales de plantas de la familia Asteraceae*. 2010. Revista Iberoamericana de Micología, Vol. 27(2). Pp. 101-103.
61. GUITIERREZ PULIDO H., *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill., 2008.
62. TORRES P., MADERA C., SILVA J., *Microbiological quality improvement of biosolids from domestic wastewater treatment plants*. 2009. Revista EIA Print ISSN, pp.1794-1237
63. MARÍN A., AGUILAR H. *Evaluación de la efectividad del sistema de tratamiento de lodos sépticos de la Earth*. 2005. Universidad Earth. Costa Rica, pp. 25
64. CRUSH J.R., SARATHCHANDRA U., DONNISON A. *Effect of plant growth on dehydration rates and microbial populations in sewage biosolids*. 2006. Bioresource Technology. Vol. 97. Pp. 2447–2452

65. AMÉZQUITA C., *Evaluación del uso del biosólido de la planta el salitre como sustrato en procesos de recuperación de suelos y Revegetalización (cantera la fiscalía)*. 2010. UNIVERSIDAD DE LA SALLE. Bogotá
66. DIBATTISTA D., CAMPBELL D. *Dietary protein restriction and selective preference for a protein-containing diet in the golden hamster (Mesocricetus auratus)*. 1998. *Physiology & Behavior*. Vol. 64 (4). Pp. 563-571

8. BIBLIOGRAFIA

AL-HARBI K. *Application of the AHP in project management*. 2001. International Journal of Project Management. Vol. 19, pp.19 -27

ÁLVAREZ G, Garcia J., PINOS J., TRISTÁN F. *Perfil bioquímico del ensilado de maguey*. Nutrición Animal [online] [cited; Abril 3 2011] <http://bibliotecas.umar.mx/publicaciones/Nutricion%20animal.pdf>.

AMÈZQUITA C., *Evaluación del uso del biosólido de la planta el salitre como sustrato en procesos de recuperación de suelos y Revegetalización (cantera la fiscalá)*. 2010. UNIVERSIDAD DE LA SALLE. Bogotá

ANANDA J., HERATH G., *A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning*. 2009. Ecological Economics. Vol. 68, pp. 2535–2548

ANGERBAUER C., SIEBENHOFER M., MITTELBACH M., GUEBITZ G. *Conversion of sewage sludge into lipids by *Lipomyces starkeyi* for biodiesel production*. 2008. Bioresource Technology. Vol. 99, pp. 3051–3056

ANTONY W. *Feeding Value of Cattle Manure for Cattle*. 1970. Journal Animal Science. Vol. 30, pp. 274-277.

BALASUBRAMANIAN J., SABUMON P., LAZAR J., ILANGO VAN R. *Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials*. 2006. Waste Management .Vol. 26, Pp. 22–28

BARCO L., *Herramienta matemática para evaluar tecnología para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz*. 2008. Universidad Industrial de Santander.

BARRERA A. P., VILLAREAL S. M., CASTRO M. L., ORTIZ C., ESCALANTE H. H. *Estudio preliminar de la bioproducción de metano a partir de los residuos del proceso de beneficio del fique*. 2009. Ion, Vol. 22. No 1

BRUNNER N., STARKL M., *Decision aid systems for evaluating sustainability: a critical survey*. 2004. Environmental Impact Assessment Review. Vol.24, pp.441–469

CALSAMIGLIA S., *Nuevas bases para la utilización de la fibra en dietas de rumiantes*. [online] [cited; Abril 3 2011] http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Uso_de_Fibra_en_Rumiantes.pdf

CASTILLO S., AGUILAR S., LUCERO F., MARTINEZ J., *Sustitución de alimento comercial por excretas en la alimentación de conejos en crecimiento*. 2007. Rev. AIA. Vol. 11 (1). Pp. 41-48. ISSN 0188789-0

CASTRO L., ESCALANTE H., QUINTERO M., ORTIZ C., GUZMÁN C. *Producción de Biogás a partir del bagazo de fique generado durante el beneficio de fique*. 2009. Cuarto Simposio de química aplicada. SIQUIA. [Cuarto Simposio de química aplicada SIQUIA]. 2009. ISBN 978-958-8593-12-8.

CHIANGA K-J., CHOUA P-H., HUAA C-R., CHIENA K-L, CHEESEMANB C. *Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks*. 2009. Journal of Hazardous Materials. Vol. 171, pp. 76–82

CHO K., *Multicriteria Decision Methods: An attempt to Evaluate and Unify*. 2003. Mathematical and Computer Modelling. Vol. 37, pp. 1099-1119

CHOWDHURY S., *Biodigester effluent as protein supplement for indigenous (Bos indicus) growing bulls*. 1999. Animal Production, Research Division, Bangladesh Livestock Research Institute, Savar, Dhaka 1341, Bangladesh.

COLOMBO S., ANGUS A., MORRIS J., PARSONS D., BRAUN M., STACEY K., HANLEY N. *A comparison of citizen and “expert” preferences using an attribute-based approach to choice*. 2009. Ecological Economics Vol. 68, pp. 2834–2841

CRUSH J.R., SARATHCHANDRA U., DONNISON A. *Effect of plant growth on dehydration rates and microbial populations in sewage biosolids*. 2006. Bioresource Technology. Vol. 97. Pp. 2447–2452

CRUSH J.R., SARATHCHANDRA U., DONNISON A. *Effect of plant growth on dehydration rates and microbial populations in sewage biosolids*. 2006. *Bioresource Technology*. Vol. 97. Pp. 2447–2452

DIBATTISTA D., CAMPBELL D. *Dietary protein restriction and selective preference for a protein-containing diet in the golden hamster (Mesocricetus auratus)*. 1998. *Physiology & Behavior*. Vol. 64 (4). Pp. 563-571

EKPENYONG T., SRIDHAR M., ASIRU B., *Utilization of dried activated sludge as a feed supplement for pigs*. 1989. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 2 (4), pp. 287-296.

Expert Choice, Expert Choice Inc. Available from <<http://www.expertchoice.com>>.

FERNÁNDEZ J, PLAZA C., GARCIA-GIL J, POLO A. *Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge*. 2009. *Applied Soil Ecology*. Vol. 42, pp. 18–24

Finagro. Fique. *Producción y zonas de producción*. [Online] [Cited: Abril 8, 2011] www.finagro.com.co

FUENTES A., LLORÉNS M., SÁENZ J., AGUILAR M., PÉREZ-MARÍN A., ORTUÑO J., MESEGUER V. *Ecotoxicity, phytotoxicity and extractability of heavy metals from different stabilised sewage sludges*. 2006. *Environmental Pollution*. Vol.143. pp. 355-360

FYTILI D., ZABANIOTOU A. *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review*. 2008. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 12, pp.116-140

GARCÍA Y., GUADALUPE M., R. BOCOURT R., ALVELO N., NUÑEZ O., *Agave Fourcroydes, Una planta con potencialidades para obtener prebióticos*. *Revista Computadorizada de Producción Porcina* 2010 [online] [cited; Abril 2 2011]: <http://www.iip.co.cu/rcpp/Rcpp%2017.1.pdf>.

GIUSEPPE M., SBRILLI A., GUERRIERO E., ROTATORI M. *Dioxins and furans formation in pilot incineration tests of sewage sludge spiked with organic chlorine*. 2004. Chemosphere. Vol. 54, pp. 1337–1350

GUIHENEUF P, ALAIN R. *Manual de ganadería tropical para campesinos*. 1990. México D.F

GUITIERREZ PULIDO H., *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill., 2008.

HAHM J., WESTER D. *Effects of surface-applied biosolids on grass seedling emergence in the Chihuahuan desert*. 2004. Journal of Arid Environments. Vol. 58, pp. 19–42

HOUILLON G., JOLLIET O. *Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge*. Energy and global warming analysis. 2005. Journal of Cleaner Production. Vol. 13, pp. 287–299

HWANG J., ZHANG L., SEO S., LEE Y-W., JAHNG D. *Protein recovery from excess sludge for its use as animal feed*. 2008. Bioresource Technology. Vol. 99, pp. 8949–8954

KAHRAMAN C., KAYA J., *A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives*. 2010. Expert Systems with Applications. Vol. 37 (9), pp. 6270-6281

KAYA T., KAHRAMAN C. *Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul*. 2010. Energy Vol.35. pp. 2517-2527.

KIDD P., DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ M., DÍEZ J., MONTERROSO C. *Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge*. 2007. Chemosphere. Vol. 66, pp. 1458-1467

MACHARIS C., SPRINGAEL J., DE BRUCKER K., VERBEKE A., *PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP*. 2004. European Journal of Operational Research. Vol. 153 (2), pp. 307-317

MARÍN A., AGUILAR H. *Evaluación de la efectividad del sistema de tratamiento de lodos sépticos de la Earth*. 2005. Universidad Earth. Costa Rica, pp. 25

MARTÍNEZ E. *Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME*. 2007. Anuario jurídico y económico Escorialense. Pp. 523-542

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Ministerio nacional de planeación. *Guía ambiental del subsector fiquero*. 2006.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. *Criterios de calidad y uso para el aprovechamiento y disposición final de los Biosólidos*. 2010, borrador de decreto. República de Colombia.

MONTERO M., JORDÁN M., HERNÁNDEZ-CRESPO M., SANFELIU T. *The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies*. 2009. Applied Clay Science. Vol. 46, pp. 404–408

MUN KJ. *Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete*. 2007. Construction and Building Materials. Vol. 21, pp. 1583–1588

National academy press Washington D.C. 2002. *Biosolids applied to land: Advancing standards and practices*.

NIHOUL C., *Dumping at sea*. 1991. Ocean and Shoreline Management. Vol. 16, (3-4), pp. 313-326

SONG U., LEE E. *Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill*. 2010. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 54, pp. 1109–1116

- SULLIVANA T., STROMBERGERA M., PASCHKEB M. *Parallel shifts in plant and soil microbial communities in response to biosolids in a semi-arid grassland*. 2006. *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 38. Pp. 449–459
- TARRASÓN D., OJEDA G., ORTIZ O., ALCAÑIZ J. *Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge*. 2008. *Bioresource Technology* .Vol 99, pp. 252–259
- TARRASÓN D., OJEDA G., ORTIZ O., ALCAÑIZ JM., *Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge*. 2008. *Bioresource Technology*. Vol. 99, pp. 252–259
- TIQUIA S.M. *Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition*.2010. *Chemosphere*. Vol. 79. Pp. 506–512
- TORRES P., MADERA C., SILVA J., *Microbiological quality improvement of biosolids from domestic wastewater treatment plants*. 2009. *Revista EIA Print ISSN*, pp.1794-1237
- TORRES P.,PÉREZ A., ESCOBAR J.C, URIBE I. *Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales*. 2007. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, Vol. 27, pp. 267-275.
- U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Biosolids Technology Fact Sheet, Alkaline Stabilization of Biosolids*, in *EPA 832-F-00-052*. 2000. Office of Water, Washington, D.C.
- U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*, in *EPA/625/R-92/013*. 2003
- U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Land application* .2000. under 832-F-00-064 Office of Water/ Office Science and Technology Sludge/ Risk Assessment Branch. Washington

U.S Environmental Protection Agency (EPA). *Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503*. 2003. Washington, D.C

U.S. Environmental Protection Agency. Ecological Effects Test Guidelines (OPPTS 850.4200): Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test. 1996

VELÁSQUEZ J, FERRANDO F, SALVADO J. *Effects of kraft lignin addition in the production of binderless fiberboard from steam exploded Miscanthus sinensis*. 2008. Industrial Crops and Products. Vol. 18, pp.17-23

VILLAS-BOAS S., ESPOSITO E., MITCHELL D., *Microbial conversion of lignocellulosic residues for production of animal feeds Review*. 2002. Animal Feed Science and Technology. Vol. 98. pp. 1–12.

WANG L., SHAMMAS W., HUNG Y. *Biosolids Treatment Processes* .Handbook of Environmental Engineering. 2008. Vol. 7, pp.443-477

WANG X., CHEN T., GE Y., JIA Y .*Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors*. 2008. Journal of Hazardous Materials. Vol.160. pp. 554–558

WARMAN P., TERMEER W. *Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: yields and N, P and K content of crops and soils*. 2005. Bioresource Technology, Vol. 96, pp. 955–961

WENGA C-H., LIN D-F., CHIANG P-C. *Utilization of sludge as brick materials*. 2003. Advances in Environmental Research. Vol. 7, pp. 679–685

WERTHERA J, OGADAB T. *Sewage sludge combustion*. 1999. Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 25, pp. 55–116

ZANGENEH A., JADID S., RAHIMI-KIAN A. *A hierarchical decision making model for the prioritization of distributed generation technologies: A case study for Iran*. 2009. Energy Policy. Vol. 37, pp. 5752–5763

ZAPATA B., DURÁN C., STASHENKO E, BETANCUR-GALVIS L., MESA-ARANGO C. *Actividad antimicótica y citotóxica de aceites esenciales de plantas de la familia Asteraceae*. 2010. Revista Iberoamericana de Micología, Vol. 27(2). Pp. 101-103.

9. ANEXO

Evaluación de las alternativas según los criterios

Criterio ambiental

Descargas (líquidos, sólidos y gaseosas)

Mediante balances de masa se evaluó las cantidades emitidas de sustancias controladas por la Ley usando la misma base de cálculo [Decreto 02 de 1982, Decreto 154 de 1984, resolución 601 de 2006, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. A menor proporción de emisiones mejor se pondero la alternativa.

Efectos de contaminación

Se clasificarón las tecnologías según el grado de impacto ambiental. Según la clasificación establecida por el Decreto, se asigno un valor a cada tipo de impacto con el cual se pudo valorar cada alternativa. [Decreto 12 de 1994, Alcaldia mayor de SantaFe de Bogotá].

Económico

Costos de inversión

Para determinar los costos de inversión se utilizo la base de índices del Chemical Engineering Plant cots Index, [Chemical Engineering 2010]. Los valores de costos se determinaron con la misma base de cálculo para todas las tecnología (Ton en base seca de LE). La tecnología con menores costos de producción fue la mejor valorada.

Costos de operación

Fueron evaluados con la metodología descrita anteriormente.

Servicios industriales

Se evaluaron los principales elementos que intervienen en los costos anuales de producción: requerimiento de agua, energía, transporte y personal. La información se obtuvo de tecnologías con materias primas similares al LE. La alternativa con menor costo anual de operación fue la mejor ponderada.

Operacional

Proceso

Se evaluó respecto a cantidad de equipos y etapas del proceso necesarios para la ejecución de la tecnología. La tecnología con menor número de equipos fue ponderada con la mayor valoración.

Madurez de la tecnología

Se evaluó el avance de cada tecnología respecto a la investigación, montaje piloto y plantas instaladas. Se determinó una escala para la valoración:

0: Tecnología en desarrollo, laboratorio y pequeñas plantas piloto.

1: Planta industrial con otro tipo de residuos

2: En operación comercial con alguna experiencia

3: Varias plantas en operación sin muchos problemas

4: Tecnología madura con muchas experiencias y con residuos muy variados

Se asignó en la matriz de valoración el mayor valor a la tecnología con cantidad numérica mayor.

Social

Generación de empleo

Se tomaron los valores generados de estudios anteriores para residuos similares al LE. Se le dio prioridad a la alternativa que genera el mayor número de empleos.

Aceptación social

Se realizó una encuesta a miembros de la cadena productiva del fique del municipio de Mogotes, Santander. Se asignó la valoración a las tecnologías según la respuesta por parte de la comunidad. La alternativa con mayor puntaje se valoró como la mejor socialmente aceptada.

EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS RESPECTO A LOS SUBCRITERIOS

Subcriterios	Alternativas				
	INCINERACIÓN	COMPOSTAJE	FABRICACIÓN DE LADRILLOS	ACONDICIONAMIENTO DE SUELOS	PRODUCCIÓN DE CONCENTRADO ANIMAL
Descargas	Contaminantes inorgánicos (Cd, Pb, Hg) y contaminantes adicionales HCl, CO, NO _x , SO ₂ , PCDD/PCDF (dioxinas y furanos), cenizas. ^{1,2}	Lixiviados, gases: nitrógeno (NH ₃ , NO _x , NO ₂ , N ₂), Carbono (CO ₂ , CH ₄) ⁴	Gases de combustión: CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas sólidas, Metales pesados: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn. Compuestos inorgánicos: Cl y sus compuestos, F y sus compuestos. ⁶	Lixiviados, exceso de compuestos orgánicos. ⁹	Material particulado
Efectos de contaminación	Lanzamiento de una amplia gama de contaminantes al aire. ³	Malos olores y contaminación de aguas subterráneas ⁴	Lanzamiento de una amplia gama de contaminantes al aire. ³	Efectos negativos en agua, suelo y aire si no se practica correctamente. ⁹	Aire
Costos de inversión	Incinerador de lecho fluidizado : US\$ 278 millones Incinerador de Hogar múltiple: US\$ 313 millones ¹	Biorreactor de flujo por gravedad: US\$ 836 mil ⁵ Biorreactor operado en modo de recirculación: US\$ 864 mil ⁵	US\$ 296 millones	Los valores de costos son estimados dependiente de la forma de aplicación.	Los valores de costos son estimados tomando como base la industria de alimentación para bovinos. ¹²
Costos de operación	US\$ 7.4 millones/año ¹	US\$ 100-280/ton seca-año ⁴	El proceso de secado resulta un obstáculo para la viabilidad del proceso, pues el lodo añade más agua a la materia prima que la arcilla.	US\$ 15- 25 ¹⁰	Los valores de costos son estimados tomando como base la industria de alimentación para bovinos. ¹²
Servicios industriales	Electricidad ¹ combustible	Electricidad, agua, diesel. ^{4,5}	Electricidad ¹ Combustible Agua	Electricidad	Agua, energía eléctrica, diesel. ¹²
Proceso	Deshidratación	Reducción de tamaño	Secado	Estabilización	Molienda, tamizado,

	Secado Limpieza gases de combustión . ²	Fermentación homogenización filtración de gases . ^{4,5}	Molienda y tamizado Mezcla Moldeado Compactación Sinterización . ⁸	Inyección o aplicación en la superficie Almacenamiento . ¹¹	mezclado, secado y empaqué . ¹²
Transferencia Tecnológica	La limitación principal es su alto costo, equipos sofisticados para llevar a cabo el proceso. ²	Proceso convencional de fácil transferencia, con biorreactores requiere requerimientos de seguridad ^{4,5}	La limitación principal es su alto costo, equipos sofisticados para llevar a cabo el proceso. ²	Sin limitación generalmente se incorporan al terreno utilizando equipos agrícolas convencionales . ¹¹	Requiere de equipos para llevar a cabo el proceso. ¹²
Madurez de la tecnología	Tecnología madura con varias plantas industriales en operación . ³	Tecnología madura con varias plantas industriales en operación ^{4,5}	Tecnología en desarrollo con pequeñas plantas pilotos e industriales . ³	Además del uso agrícola, esta práctica se está convirtiendo en uno de las más prometedoras formas para la recuperación de suelos degradados . ¹¹	Tecnología en desarrollo con pequeñas plantas pilotos.
Generación de empleo	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los incineradores . ^{2,3}	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los biorreactores ^{4,5}	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los procesos . ³	Mano de obra poco calificada para su ejecución . ¹¹	Exige mano de obra calificada para la supervisión y operación de los procesos.
Aceptación social	Preocupación pública acerca de posibles emisiones nocivas. ³	El abono no presenta riesgo público, riesgo por sustancias químicas durante el transporte a la planta ⁵ .	Opción atractiva para el reciclaje de lodos y ciertos tipos de residuos inorgánicos . ⁸	Creciente interés por el uso de los lodos como acondicionador de suelos y fertilizantes en la agricultura . ¹¹	Creciente interés por la disminución de costos en la alimentación animal.
Impacto sobre la cadena productiva del fique	Solución no integral, reconocida como una de las alternativas de disposición para lodos más costosas. ²	Solución integral como alternativa de disposición, requiere de espacio e inversión.	Solución parcial, los lodos representa solo el 30% de las materias primas empleadas en el proceso. ⁷	Excelente manera de reciclaje, tanto los nutrientes y la materia orgánica contenida en los lodos . ¹¹	Solución integral, los lodos se convierten en materia prima para el proceso.

REFERENCIAS

1. Environmental Protection Agency. *Standards of Performance for New Stationary Sources and Emission Guidelines for Existing Sources: Sewage Sludge Incineration Units; Final Rule*. 2011. Vol. 76. Part II. 40 CFR Part 60
2. WERLE S., WILKA R. *review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective*. 2010. *Renewable Energy* . Vol. 35, pp. 1914–1919
3. FYTILI D., ZABANIOTOU A. *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review*. 2008. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 12, pp. 116–140
4. Environmental Protection Agency. *Fact sheet in-vessel composting of biosolids*.2000. Biosolids technology.EPA 832-F-00-061
5. Environmental Protection Agency. *Compos-Free Bioreactor, treatment of acid rock drainage leviathan mine, California*.2006. Innovative technology evaluation report. EPA/540/R-06/009
6. HARA K., MINO T. *Environmental assessment of sewage sludge recycling options and treatment processes in Tokyo*. 2008. *Waste Management*. Vol. 28, pp. 2645–2652
7. BALASUBRAMANIAN J., SABUMON P.C., LAZAR J., ILANGOVAN R. *Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials*. 2006. *Waste Management*. Vol. 26, pp. 22–28.
8. CHIANG K-Y., CHOU P-H., HUA C-R, CHIEN K-L., CHEESEMAN C .*Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks* .2009. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 171, pp. 76–82
9. Environmental Protection Agency. *Land Application of Biosolids*.2000. EPA 832-F-00-064
10. Environmental Protection Agency *Biosolids .Generation, Use, and Disposal in The United States*. 1999. EPA530-R-99-009

11. SANCHEZ-MONEDEROA M.A., MONDINIB C., DE NOBILIC M., LEITAB .L, ROIG A. *Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter.* 2004. Waste Management. Vol. 24, pp. 325–332
12. ECKLER D.W ., HARPER J. M. *Process and apparatus for recovering feed products from animal manure.* 1975. Patente de Estados Unidos 3875319