

**UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS “JOSÉ MARTÍ PÉRZ”
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARRERA INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



TRABAJO DE DIPLOMA

Producción de Biofertilizante a partir de la Degradación Anaerobia de Paja de Arroz con empleo de Pretratamiento biológico

AUTOR: José Andrés Palmas Cruz.

**TUTORES: Lic. Janet Jiménez Hernández
Lic. Edelbis López Dávila**

CURSO: (2013 - 2014)

“Un hombre es instruido, cuando puede resolver los problemas presentes en su actividad cotidiana, es decir, cuando domina su profesión. Lo primero que tiene que resolver el proceso formativo, con vistas a preparar al hombre, es dar carrera para vivir”

De la Luz y Caballero, J . (1987:82)

Dedicatoria

A todos aquellos que de una forma u otra han contribuido a desarrollar en mí
un espíritu de superación e investigación continuo.

A mi esposa que me ha ayudado incondicionalmente, a mis hijos...

Agradecimientos

A todas aquellas personas que de una forma u otra han hecho posible la realización de este trabajo.

Resumen

Teniendo en cuenta la inadecuada disposición actual de la paja de arroz en la Empresa Agroindustrial de granos "Sur del Jibaro", de Sancti Spíritus, la cual se queda en el campo o es quemada causando daños ambientales en ambos casos, el objetivo de este trabajo fue: producir biofertilizante a partir de la degradación anaerobia de la paja de arroz con empleo de pre-tratamiento biológico, en función de la mejora del aprovechamiento de esta como abono orgánico. Primeramente se realizó un diagnóstico acerca de la disposición actual de la paja de arroz en la Empresa mediante un diagrama Causa- Efecto (diagrama de Ishikawa). Se caracterizó la paja de arroz desde el punto de vista físico-químico. Se evaluó un pre-tratamiento de la paja utilizando microorganismos eficientes a diferentes concentraciones de este y 5 tiempos de incubación. Se evaluó la digestión anaerobia de paja de arroz con y sin pretratamiento en ensayos a batch, a 35°C durante 25 días y finalmente se caracterizó el digestato obtenido en esta digestión para conocer la disponibilidad de macro y micronutriente.

El diagnóstico inicial mostró el bajo aprovechamiento de los nutrientes contenidos en la paja de arroz dadas por sus características (alto contenido de lignina, necesidad de pretratamiento físico). La caracterización de la paja de arroz mostró la presencia de macro y micronutrientes (C, N, P, K) que permiten catalogarlo como un fertilizante orgánico de calidad, sin embargo su alto contenido de lignina, limita la disponibilidad de estos nutrientes. El empleo del pretratamiento biológico de la paja utilizando microorganismos eficientes al 20% por 48 horas resultó efectivo para liberar la mayor cantidad de azúcares. La digestión anaerobia de la paja de arroz con empleo de pretratamiento biológico mejoró la conversión de biomasa en metano, 3,7 veces, ya que permite mayor disponibilidad de compuestos biodegradables. Esto hace que se obtenga un efluente más estabilizado y con mayor concentración de minerales. La determinación de macroelementos en el efluente como el N, P, K, permitió definir las propiedades biofertilizante mejoradas que se logran con el empleo del pretratamiento biológico y en general con la digestión anaerobia de paja de arroz.

INDICE

	PAG.
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	
1.1. La producción arroceras y la generación de residuos	5
1.2 Practicas agroecológicas en la producción arroceras. Los residuos de cosecha como mejoradores de suelos	6
1.3 Estrategia para el tratamiento de residuos agrícolas	8
1.3.1 El uso de microorganismos en el pretratamiento de residuos	14
Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Disposición actual de la paja de arroz como abono en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro	15
2.2. La caracterización físico-química de la paja de arroz como biofertilizante	15
2.3. Pre-tratamiento de la paja de arroz utilizando microorganismos eficientes	16
2.4 Digestión anaerobia de paja de arroz con y sin pretratamiento	17
2.5. Análisis estadístico	18
Capítulo 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1. Disposición actual de la paja de arroz como abono en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro	19
3.2. La caracterización físico-química de la paja de arroz como biofertilizante	20
3.3. Pre-tratamiento de la paja de arroz utilizando microorganismos eficientes	21
3.4. Digestión anaerobia de paja de arroz con y sin pretratamiento	23
3.5. Calidad agronómica del biofertilizante obtenido en la degradación anaerobia de la paja de arroz	24
CONCLUSIONES	28
RECOMENDACIONES	29
BIBLIOGRAFÍA	

Introducción

INTRODUCCIÓN

La necesidad de manejar los desechos agroindustriales ha cobrado importancia durante los últimos años debido al crecimiento de la producción agrícola en América Latina, la apertura de mercados y mejoras en las técnicas de producción existentes (Intriago, 2000), el desarrollo de la agroecología, la reutilización de los residuos orgánicos como fuentes energéticas y las políticas ambientales y económicas (Saxena et al., 2009). Con respecto a la producción arroceras a nivel mundial, las actuales políticas ambientales y económicas han impuesto nuevas exigencias para los productores y exportadores. Esto se debe principalmente al alto uso de plaguicidas, fertilizantes químicos y la generación de desechos agrícolas.

La paja de arroz es uno de los subproductos más problemáticos de eliminar durante la cosecha del arroz. Ante la dificultad, elevado costo de su retirada y bajo aprovechamiento, la práctica más frecuente por los agricultores es quemarla en el campo en períodos de 15 a 20 días, lo que genera una gran concentración de emisiones al aire, provocando la contaminación del lugar y zonas aledañas, con partículas y gases resultantes de la combustión (Abril, 2009).

La cantidad total de nutrientes por hectárea que consumen cinco toneladas de arroz es de 100 kg de N, 16 kg de P y 128 kg de K. Los agricultores compensan esta pérdida aplicando unos 375 kg de fertilizantes inorgánicos, que contribuyen con 117 kg de N, 23 kg de P y 42 kg de K. No es difícil deducir que los rendimientos del arroz disminuyen a falta de un reemplazo adecuado de estos nutrientes. Como la paja de arroz (5000 kg/ha) contiene aproximadamente 36 kg N, 4.5 kg P y 112 kg K, reciclarla sería una buena manera de compensar el balance negativo de los nutrientes.

La aplicación de la tecnología anaerobia para tratar la paja de arroz que queda en el campo ayuda a su gestión ecológica, a la vez que se aprovecha el biogás y biofertilizante que resulta. La paja de arroz resulta una biomasa atractiva debido a su bajo costo de producción y su alto contenido de carbono y nutrientes (Wang et al., 2009; Contreras et al., 2012). A nivel mundial se

producen más de 730 millones de toneladas de paja de arroz por año (Zhao et al., 2010). En Cuba, existe una elevada producción en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jíbaro” de Sancti Spíritus que genera más de 4,72 toneladas de paja por hectárea (Contreras, Velázquez. L. M., Vera Suárez A., Romero Romero O., López González L. M., Kanabel K. (2006).

La digestión anaerobia de paja de arroz ha sido estudiada por varios autores (Yu et al., 2004; Mussatto et al., 2008; Yanfeng et al., 2008), sin embargo, muy pocos analizan las propiedades agronómicas del biofertilizante obtenido. Por otro lado, diferentes factores han limitado el aprovechamiento del potencial total contenido en estos residuos agrícolas, entre ellos su propia naturaleza (lignocelulósica) compuesta principalmente de tres tipos diferentes de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina (Fengel y Wegener, 1984), envueltos en una compleja estructura.

Una posible solución a este fenómeno sería el pre-tratamiento de los residuos agrícolas lo cual facilitaría la hidrólisis enzimática y por tanto permitiría aumentar la disponibilidad de azúcares para las siguientes etapas de la digestión anaerobia (Valášková et al., 2006). Esto se hace necesario principalmente porque la lignina en las paredes celulares de la planta forma unas barreras contra el ataque enzimático. Un pre-tratamiento ideal es reducir el contenido de lignina, disminuir la cristalinidad de la celulosa e incrementar el área superficial (Krishna et al., 2001).

Existen diferentes tipos de pre-tratamiento (físicos, químicos y biológicos), sin embargo el uso de cada tipo de pre-tratamiento depende de su costo de aplicación en relación al objetivo que se persigue (Schilling et al., 2012). En el caso que se estudia, que es el uso posterior de los residuos agrícolas como sustratos de la digestión anaerobia para obtener biofertilizante, una alternativa sería el pre-tratamiento biológico (utilizando bacterias y hongos) que puedan romper la lignina pero que no generen metabolitos secundarios que resulten inhibitorio al siguiente proceso que es la metanogénesis.

El desecho que se evalúa en este estudio es la paja de arroz proveniente de la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro”, de la Provincia de Sancti

Spíritus, la cual no cuenta con una disposición adecuada pues la mayoría se quema a campo abierto causando daños ambientales o simplemente se deja en el campo como cobertura vegetal y para reincorporar los nutrientes extraídos (Contreras et al., 2006). Sin embargo en ambos casos se ha demostrado el efecto negativo sobre el medio ambiente y sobre el rendimiento del propio cultivo (Abril, 2009).

Estos planteamientos se resumen en la necesidad de aprovechar la paja de arroz como abono orgánico mediante un pretratamiento biológico, que permita reincorporar los nutrientes extraídos durante la cosecha y evitar las emisiones de gases de efecto invernadero que ocurren con la disposición actual del residuo. La aplicación de la tecnología anaerobia y el empleo de pretratamiento directo de la paja utilizando bacterias y hongos con capacidad lignolítica resulta una alternativa atractiva. Por ello, se ha formulado el siguiente **Problema científico**: ¿Cómo producir biofertilizante a partir de la degradación anaerobia de la paja de arroz con empleo de pre-tratamiento biológico?

Hipótesis

Si se produce biofertilizante a partir de la degradación anaerobia de la paja de arroz con empleo de pre-tratamiento biológico, entonces se mejora el aprovechamiento de la paja de arroz como abono orgánico.

Objetivo general:

Producir biofertilizante a partir de la degradación anaerobia de la paja de arroz con empleo de pre-tratamiento biológico, en función de la mejora del aprovechamiento de esta como abono orgánico

Objetivos específicos:

1. Diagnosticar la disposición actual de la paja de arroz en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro, de Sancti Spíritus.

2. Caracterizar física-químicamente la paja de arroz generada en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro, de Sancti Spíritus.
3. Evaluar el pre-tratamiento biológico de paja de arroz.
4. Evaluar la degradación anaeróbica la paja de arroz pre-tratada
5. Determinar la calidad agronómica de este biofertilizante obtenido en la degradación anaerobia de la paja de arroz.

Capítulo 1

Capítulo 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 La producción arroceras y la generación de residuos

La producción arroceras se lleva a cabo en más de 100 países, pues el arroz constituye el alimento básico para más de la mitad de la población mundial (Chandra *et al.*, 2012). Se considera el tercer cultivo agrícola de importancia mundial en términos de área total cultivada y de producción. Se estima que para el año 2025, la producción de arroz será de 760 millones de toneladas (Gadde *et al.*, 2009), lo cual generaría aproximadamente 1140 millones de toneladas de residuos de cosecha.

En Cuba la producción de arroz gana cada vez más importancia, ya que es un alimento básico para la población con una producción estimada para el 2015 de 1 086 000 t. En Sancti Spíritus existe una elevada producción de arroz concentrada en la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” del municipio La Sierpe. Esta cuenta con un total de 83 875 ha de tierra, de las que 27 217 ha son dedicadas al cultivo del arroz y 23 000 ha aproximadamente a la ganadería. En el año 2011 la producción fue de 112 592 t de arroz y se estima un crecimiento prospectivo de 5 000 t anuales hasta el 2016 (Linares y Meneses, 2011).

Durante el proceso productivo se generan varios tipos de residuos por ejemplo: los restos de la cosecha (paja de arroz), la cascarilla o cáscara de arroz y las impurezas o residuos del secado, obtenidas en el procesamiento industrial de secado y limpieza del grano. Estos residuos actualmente no cuentan con una disposición final ambientalmente adecuada (García, 2010; Contreras, 2006).

En el caso de la paja de arroz aunque existen métodos disponibles para su uso como alimento animal, combustible para la cocina, fibras para pulpas de papel entre otros (He *et al.*, 2008), existen significativas cantidades inutilizadas y que son quemadas a cielo abierto, lo que provoca serios daños ambientales (Lei *et al.*, 2010). Cuando la paja de arroz se incorpora al suelo, con el tiempo puede reducir el rendimiento de la cosecha por el deterioro de las condiciones de este e influir en el incremento de las enfermedades foliares (Zhang R. y Zhang Z.,

1999), además de las emisiones de metano a la atmósfera debido a la degradación natural (Watanable et al., 1995; Diana Abril, 2009).

Por otro lado, durante muchos años en los suelos arroceros se han aplicado las recetas del Instructivo Técnico del cultivo del arroz sin tener en cuenta las particularidades de la zona. Los suelos pese a tener un estado avanzado de degradación se someten al pastoreo del ganado vacuno con altas cargas por superficie. La tecnología de preparación de suelos se realiza con grada provocando más degradación y no se da el tiempo de proceso necesario entre labores. Impera el monocultivo del arroz, generalmente con la variedad (J-104) que es altamente susceptible a la salinidad, la rotación de cultivos prácticamente no existe y no se cuenta con un plan estructurado para el mejoramiento de los suelos (Linares y Meneses, 2011).

1.2 Practicas agroecológicas en la producción arroceras. Los residuos de cosecha como mejoradores de suelos

Los mejoradores del suelo son recursos naturales de extraordinaria importancia para corregir limitantes en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos con vocación agrícola. De ahí la conveniencia que los productores conozcan los efectos benéficos de los abonos orgánicos, los abonos verdes y las enmiendas para mejorar la productividad de los suelos y restaurar los desbalances nutricionales para obtener mayores rendimientos y mejor rentabilidad. Es preciso aclarar que los abonos orgánicos y las enmiendas no reemplazan los fertilizantes químicos; su efecto se refleja en el mejoramiento del ambiente bioquímico del suelo, lo cual se traduce en un mejor aprovechamiento de los nutrientes aplicados al suelo, incrementando su eficiencia y disminuyendo las pérdidas por fijación, lixiviación y volatilización. Así mismo, reduce el efecto de las sustancias tóxicas y promueven la actividad biológica del suelo.

La utilización integral de los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) es una necesidad que se puede materializar con alto grado de rentabilidad (Obaya, 1998), por ejemplo para:

- ✓ Alimentación animal: Los RAC han demostrado ser un alimento animal de uso creciente, lo que puede ampliarse más sin competencia a su uso como combustible. La actividad porcina y la ganadería vacuna son grandes receptores de desechos de cosecha convertidos en alimento animal. Las plantas de pienso criollo procesan los residuales sólidos de la actividad agrícola como son residuos de cosechas de arroz, café, caña, frijoles, etc., junto a los más disímiles desechos de la industria alimenticia.
- ✓ Obtención de energía: La utilización de cascarillas de arroz y residuos secos de las cosechas para su quema con este fin, permite el ahorro de combustible en la agroindustria. Además, los RAC pueden ser sustratos bases para producir metano por digestión anaerobia.
- ✓ Obtención de material silicoso: La ceniza de la cascarilla de arroz usada como combustible tiene alto contenido de sílice.
- ✓ Mejoramiento de suelos, producción de compost y desarrollo de la lombricultura o vermicultura.

En este sentido, el desarrollo de la agroecología en Cuba hace hincapié en la búsqueda de nuevas alternativas de fertilización orgánica y reutilización de los RAC como mejoradores de suelo sobre todo en granjas estatales de cultivo intensivo, como es el caso de la producción arrocería. A pesar de esto, la quema de la paja del arroz es una práctica tradicional que ha sido justificada por la eliminación de algunos microorganismos y hongos del suelo malignos. En otros casos se deja la paja en el campo como cobertura vegetal y para reincorporar los nutrientes extraídos. Sin embargo en ambos casos se ha demostrado el efecto negativo sobre el medio ambiente y sobre el rendimiento del propio cultivo (Diana Abril, 2009).

1.3 Estrategia para el tratamiento de residuos agrícolas

Un tratamiento es una combinación de procesos unitarios cuyo objetivo es la modificación de las características del residuo para su adecuación a la demanda como producto de calidad. Esta adecuación puede ser para equilibrar oferta y demanda en el tiempo, para mejorar el transporte y aplicación o para mejorar la composición.

La idoneidad de un proceso de tratamiento dependerá de cada zona geográfica, de las necesidades que hayan puesto de manifiesto los estudios preliminares del plan de gestión, de la calidad del producto final obtenido y de los costes económicos asociados. En todo caso, el objetivo básico que se debe perseguir es el de aumentar la capacidad de gestión sobre el residuo.

A pesar de la gran difusión que al nivel mundial ha tenido el empleo del compostaje como alternativa de tratamiento de los residuos sólidos (dado fundamentalmente por su fácil operación y menor costo de inversión), las tecnologías de digestión anaerobia están tomando un lugar importante, enmarcándose este incremento en los últimos cinco años. Esta tendencia es atribuida a la posibilidad de recuperar metano, al hecho de que el material digerido es similar al compost producido aerobiamente y al incremento en el cuidado y la protección del medio ambiente, puesta en práctica con la valorización de los residuos. (Valentina, 2010)

Existen varias estrategias para el tratamiento de residuos agroindustriales, entre estas se destacan el compostaje, la fermentación en estado sólido y la digestión anaerobia. El **compostaje** es un método muy usado en el reciclaje de basura municipal y agrícola (Chafetz et al., 1998). Consiste en una técnica de biodegradación aerobia en estado sólido en la cual se controlan el contenido de humedad, nutrientes, y ciertos parámetros físico – químicos establecidos para obtener como producto final compost que es usado como enmienda de suelos (Eweis et al., 1999). Las condiciones ambientales han sido un factor limitante en el desarrollo del compostaje ya que los procesos de degradación son lentos y variables según la estación lo que lleva a una calidad pobre del producto final (Benitez & Gonzales, 2003). El uso exitoso del compost depende de su grado de madurez y estabilidad. La descomposición de compuestos fitotóxicos producidos en las fases tempranas del proceso de compostaje y la proporción de humus estable formado están influenciados por la naturaleza del material, su estructura y composición y la capacidad de microorganismos para degradar las macromoléculas que constituyen el residuo (Vargas et al., 2009).

La **fermentación en estado sólido** es una alternativa actualmente utilizada para la producción de enzimas y otros metabolitos secundarios a partir de residuos agroindustriales en biorreactores que resulta poco costosa y requiere mínimas actividades de laboreo. (Grijalva, 2013)

Varias investigaciones con este sistema han obtenido buenos resultados en un amplio rango de aplicaciones tanto en escala de laboratorio, piloto e industrial (Lee et al., 2010). En la investigación de Huang et al. (2010) se estudió mediante fermentación en estado sólido la degradación de residuos lignocelulósicos bajo estrés de plomo con la cepa fúngica *Phanerochaete chrysosporium* obteniéndose buenos resultados.

La **digestión anaerobia** es el proceso de fermentación de sustancias orgánicas en ausencia de aire. Se consideran 4 etapas fundamentales en este proceso de biodigestión, siendo responsables de cada una de ellas un grupo de bacterias diferentes: etapa hidrolítica, etapa acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica.

La etapa de hidrólisis es la etapa limitante para residuos sólidos complejos como la cachaza, bagazo, pajas de arroz y en general los RAC. López-Dávila, (2013) realizó estudios al nivel de laboratorio con paja de arroz, proponiendo una tecnología basada en una fase previa de pretratamiento por hidrólisis biológica en ausencia de oxígeno, lo que garantiza la reducción de los tiempos de retención y el aumento de la calidad del biogás obtenido en la etapa subsiguiente de tratamiento.

Productos del proceso de digestión anaerobia: Biogás y biofertilizante

Los principales subproductos del proceso de digestión lo constituyen el lodo digerido (*biofertilizante*), también llamado **digestato** y la mezcla de gases resultante de la descomposición anaerobia de la materia orgánica (*biogás*).

El digestato ha sido empleado como abono orgánico en la agricultura en diversos cultivos con resultados alentadores. Con la necesidad de una agricultura sostenible y ecológica, sin deterioro del medio ambiente, el empleo de este residuo ha cobrado una mayor importancia, no solo como abono sino

también, como sustrato para la germinación y crecimiento de posturas en las conocidas casas destinadas para estos fines.

Estudios de digestión anaerobia de la paja y cáscara de arroz

La paja de arroz contiene de 32 a 47 % de celulosa, de 19 a 27 % de hemicelulosa y de 5 a 24 % de lignina entre otros macro y micronutrientes (Karimi et al., 2006; Contreras, 2013). Esto hace que sea una biomasa prometedora como sustrato de la digestión anaerobia, dado por su alto contenido de carbono y nutrientes (Wang et al., 2009; Contreras et al., 2012). Su biodegradación anaerobia ha sido ensayada por varios autores, utilizándola como mono-sustrato o como co-sustrato de estiércoles, sobre todo de vacuno (Yu et al., 2004; Mussatto et al., 2008; Yanfeng et al., 2008; Contreras et al., 2012).

Estos autores obtuvieron un efecto positivo en la producción de CH₄ con valores de rendimiento de 200-250 L·kg⁻¹. No obstante, destacan la necesidad del tratamiento previo de la paja para mejorar la disponibilidad de la celulosa y la hemicelulosa, pues la lignina ha demostrado ser resistente a la digestión anaerobia (Mussatto et al., 2008; Yanfeng et al., 2008).

Los primeros estudios sobre la degradación anaerobia de la paja y la cáscara de arroz, trataron estos materiales en mezclas con excretas (Hill y Robert, 1981; Kalra *et al.*, 1986; Somayaji y Khanna, 1994) o con lodos de plantas depuradoras de aguas residuales (Komatsu *et al.*, 2010), con el fin de variar la relación C/N y aumentar el rendimiento de biogás. Estudios posteriores abordaron diferentes pre-tratamientos de estas biomásas o la adición de suplementos químicos para mejorar su biodegradabilidad (Zhang R. y Zhang Z., 1999; He *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2010 y Lei *et al.*, 2010).

Un estudio sobre la viabilidad de la co-digestión de paja de arroz (pre-tratada) con lodos de alcantarillado y lodos primarios de una planta de tratamiento de aguas residuales, fue realizado por Komatsu *et al.* (2010) en condiciones mesofílicas (36°C) y termofílicas (55°C). Se emplearon reactores de laboratorio de 2,4 L y 1,8 L de volumen efectivo, operados en semicontinuo. La relación de

mezcla lodo:paja de arroz fue de 1:0,5 sobre la base de los sólidos totales con una baja concentración de sólidos totales (5,3%) en la alimentación. En los reactores mesofílicos el TRH fue de 20 días y la carga orgánica volumétrica máxima de $2,14 \text{ g}_{\text{SV}}\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$, mientras que para los termofílicos de 15 días y $2,73 \text{ g}_{\text{SV}}\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$, respectivamente.

Adicionalmente, analizaron el efecto del pretratamiento de la paja de arroz (5mm) y humedecimiento en agua o en una solución enzimática. La adición de paja de arroz pretratada incrementó la producción de metano de 66 a 82% en los digestores en mesofílico y de un 37 a 63% en los digestores termofílico. El máximo rendimiento específico de metano se logró en los digestores mesofílico con pretratamiento enzimático de la paja para un valor de $0,311 \text{ m}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$.

El efecto de varios pretratamientos sobre la conversión de la paja de arroz a biogás fue analizado por Zhang R. y Zhang Z. en 1999. Un sistema (APS-digester system) por sus siglas en inglés, formado por uno o dos reactor hidrolíticos en fase sólida y uno para la metanogénesis, fue empleado en este estudio con un volumen de reactor de 5,2 L y 4 L, respectivamente. Pretratamientos físicos de molinado hasta un tamaño de 10-25 mm y troceado o cortado a mano para un tamaño de 25 mm, fue aplicado a la paja de arroz. Estos pretratamientos físicos se combinaron con tres variantes de pretratamiento térmico a 60 °C, a 90 °C y 110 °C, y se adicionó agua en una relación agua:paja de 6:1. También probaron un pretratamiento químico mediante la adición de NH_3 el cual sirvió además como fuente de nitrógeno para lograr una relación de C/N=25, aproximadamente. El sistema fue operado en semicontinuo o *batch* con un tiempo de retención de 24 días y cargas de pajas entre $50\text{-}100 \text{ g}_{\text{ST}}\text{L}^{-1}$. Todos los reactores se mantuvieron a una temperatura de 35 °C. Obtuvieron como resultado un rendimiento de biogás para la paja sin tratar de $0,38 \text{ m}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$ el cual incrementó a $0,47 \text{ m}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$ cuando la paja fue pretratada mediante una combinación de molinado (10 mm), calentamiento a 100 °C y adición de amoníaco al 2%. El contenido de metano se mantuvo en 50% aproximadamente a las diferentes condiciones experimentales analizadas.

He *et al.* (2008) refieren un análisis de la digestión de la paja de arroz con

pretratamiento, mediante adición de NaOH al 6%, posterior a una reducción de tamaño (5-10 mm). Luego las muestras fueron puestas en reposo a temperatura ambiente por espacio de 3 semanas. Los experimentos se condujeron a 35 °C y las cargas variaron entre de 35 y 80 gL⁻¹. Emplearon como inóculo lodos activados de un digestor mesofílico para el tratamiento de aguas residuales. Para ajustar la relación C/N a 25 emplearon NH₄Cl. Como resultado obtuvieron que el mayor rendimiento fue de 0,52 m³kg_{SV}⁻¹ para la carga de 50 gL⁻¹, mientras que este tuvo un valor de 0,36 m³kg_{SV}⁻¹ para la paja sin tratar.

También el efecto del pretratamiento químico sobre la biodegradación anaerobia de la paja de arroz, es reportado por Yang *et al.* (2009). En este caso emplearon tres álcalis Ca (OH)₂, NaOH, KOH por un tiempo de 24 horas y temperatura de pretratamiento de 20, 35 y 50 °C. Lodos anaeróbicos de una planta de tratamiento de aguas residuales fueron empleados como inóculo y mezclados con paja en una relación de 0,5 sobre la base de los sólidos volátiles, relación que se considera apropiada para evitar la inhibición del proceso o el fracaso del reactor (Linke *et al.*, 2000, VDI-4630, 2006). El mayor rendimiento de biogás se obtuvo cuando se aplicó pretratamiento con NaOH para un valor de 0,6 m³kg_{SV}⁻¹, que superó en un 50% al rendimiento logrado con paja sin tratar.

La digestión anaerobia de la paja de arroz, también fue analizada por Zhao *et al.* (2009), mediante un ensayo de fermentación en discontinuo a 35 °C. La paja de arroz fue mezclada con una solución de ácido acético y propiónico en relaciones sólido-líquido de 1:10, 1:15 y 1:20, respectivamente. Posteriormente fueron calentadas a 121 °C (con 0,1 MPa) a diferentes intervalos de tiempo desde 30 hasta 120 minutos. Se logró una productividad de metano final con la paja sin tratar de 0,25 m³_{CH₄}kg_{SV}⁻¹d⁻¹, mientras que con el pretratamiento se logró 0,28 m³_{CH₄}kg_{SV}⁻¹d⁻¹, en los doce primeros días.

Lei *et al.* (2010) evaluaron el efecto sobre la digestión de la paja de arroz del uso de un inóculo aclimatado al sustrato así como suplementación de diferentes niveles de fosfato KH₂PO₄ (0,05 M) al sistema. En este caso la paja de arroz fue troceada manualmente a un tamaño de 3-5 mm. El pH se ajustó a

7,1-7,2 y la relación C/N fue de 22, aproximadamente, en cada reactor. Para evaluar el funcionamiento de los reactores operados bajo diferentes niveles de fosfato aplicaron un modelo cinético de primer orden. Valores de la constante de velocidad de producción de biogás k de 0,027–0,031 d^{-1} demostró que en el reactor con 465 mg de fósforo/L se obtuvo una rápida producción de metano, entre un 15-18% mayor comparado con el control. Los valores de producción de biogás promedio alcanzados fueron de 0,33-0,35 $\text{m}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$.

De este análisis se puede concluir que se existen evidencias de la degradación anaerobia de la paja de arroz, pero los estudios han estado enfocados a la codigestión con el fin de optimizar la relación C/N para aumentar potencial de metano. Sin embargo los estudios acerca de la obtención de biofertilizantes a partir de la digestión de la paja de arroz son muy limitados.

A pesar de que en regiones donde existe grandes acumulaciones de este residuo y sin posibilidad de otra fuente adicional, el tratamiento de la paja como único sustrato podría ser una solución energética y ambiental adecuada, la mayor parte de las investigaciones que se llevan a cabo sobre la paja de arroz, van dirigidas al pretratamiento de la misma, que si bien mejoran la biodegradabilidad conlleva a un aumento en los costos por el uso de agentes químicos e insumos energéticos, con la consiguiente repercusión en el balance económico total del proceso a escala industrial.

1.3.1 El uso de microorganismos en el pretratamiento de residuos

Los microorganismos han sido usados a lo largo de la historia en diversas áreas como la medicina, ingeniería de alimentos, ingeniería genética y en la protección del medioambiente. Una desventaja de los mismos es su difícil reproducción de resultados. Los microorganismos requieren de condiciones adecuadas para su buen rendimiento; entre las cuales están el agua, oxígeno, sustrato, condiciones de pH, temperatura en el cual se están desarrollando (Higa y Parr, 1994).

La función de cada microorganismo es lo que determina si el microorganismo es benéfico o patógeno. Los microorganismos benéficos son aquellos que fijan

nitrógeno atmosférico en el suelo, descomponen desechos y residuos orgánicos, desintoxican pesticidas, suprimen enfermedades de plantas y patógenos en el suelo, enriquecen el ciclo de nutrientes, y producen compuestos bioactivos como vitaminas, hormonas y enzimas que ayudan en el crecimiento de las plantas (Higa y Parr, 1994).

Una nueva clasificación de microorganismos ha sido descrita donde clasifica a ciertos microorganismos como eficientes. Este concepto se ha desarrollado una vez que se logró un cóctel de microorganismos específicos, conocido hoy en día como ME, y ha dado muy buenos resultados en diversas áreas. Este consorcio contiene especies selectas de microorganismos y las poblaciones que más predominan son bacterias ácido lácticas y levaduras. Como población minoritaria están las bacterias Fototróficas, algunos actinomicetos y otro tipo de microorganismos. Lo importante es que estos microorganismos son compatibles uno con el otro y pueden coexistir juntos (Higa y Parr, 1994).

Capítulo 2

Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Disposición actual de la paja de arroz como abono en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro

Para realizar el diagnóstico acerca de la disposición actual de la paja de arroz en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jibaro” se utilizó un diagrama Causa- Efecto (diagrama de Ishikawa). Se realizó un taller en la empresa el taller estuvo dirigido por el Ing. Palma, quien expuso las ideas y el objetivo del taller en función de diagnosticar el bajo aprovechamiento de la paja de arroz como abono orgánico con las prácticas actuales de disposición y manejo. Finalmente, con la técnica de lluvia de ideas se conocieron las posibles causas y se relacionaron con el problema a resolver, aportadas por los actores fundamentales invitados al taller.

2.2 La caracterización físico-química de la paja de arroz como biofertilizante

El residuo arrocero objeto de estudio: paja de arroz, fue recolectada en julio de 2013 en la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” de la provincia de Sancti Spíritus. Estos se transportaron al Laboratorio de Biogás e Ingeniería Ambiental de la Universidad de Sancti Spíritus, donde se llevó a cabo todo el trabajo experimental, en bolsas de nylon para asegurar la conservación de las muestras. Se le realizó una pasteurización a toda la muestra para asegurar la ausencia de plagas.

La caracterización físico-química de estos materiales consintió en el análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijo (SF) o ceniza por el método gravimétrico de acuerdo a las normas establecidas por los métodos estandarizados (APHA, 1998). La determinación del pH se realizó con un pH-metro *Hanna Instruments* 209 de fabricación Rumana, y la conductividad con un conductividad-metro DDSJ-308A de fabricación China, previa preparación de la muestra por adición de agua, en una relación 20:1 y agitación de 15 min.

2.3 Pre-tratamiento de la paja de arroz utilizando microorganismos eficientes

Las muestras de pajas de arroz primeramente se sometieron a un tratamiento físico de disminución del tamaño. Se trituraron en molino de martillo y se tamizaron a 5 mm de largo. Posteriormente la paja de arroz fue sometida a un proceso de esterilización en autoclave, durante 20 min a 120°C.

Para pretratar la paja de arroz se utilizó un consorcio microbiano con capacidad celulítica, el cual se obtuvo en el laboratorio de Agronomía de la UNISS, partir de una cepa de los llamados microorganismos eficientes (ME) HIPlus, patentado por el Instituto de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey”, de Matanzas. El ensayo se llevó a cabo en discontinuo y condiciones aerobias. Se incubó concentraciones conocidas de paja de arroz con diferentes concentraciones de los microorganismos eficientes (5%, 10%, 15%, 20%)

Se determinó la concentración de azúcares reductores por el método del ácido 3,5 dinitrosalicílico y la DQO por el método del reflujo cerrado según los métodos estándares (APHA, 1998).

Diseño de experimento

El ensayo de pretratamiento fue realizado a escala de laboratorio en Erlenmeyer de 250mL, a temperatura ambiente. Las pruebas se realizaron por triplicado, donde en cada Erlenmeyer previamente esterilizados, se depositaron 5g de paja de arroz previamente tamizadas y se añadió 40mL de las soluciones de M.E al 5%, 10%, 15% y 20%, para cada lote. Además se preparó un blanco de paja de arroz con igual volumen de agua y otros blanco con el volumen de los M.E al 5%, 10%, 15% y 20% solos, para evaluar la degradación de estos por separados.

Finalmente este pretratamiento fue encubado durante 24h, 48h, 72h y 120h, para determinar que dilución y que tiempo de incubación son los más idóneos

para obtener la mayor liberación de compuestos biodegradables, basado en un diseño completamente aleatorizado.

2.4 Digestión anaerobia de paja de arroz con y sin pretratamiento

La experimentación fue realizada a escala de laboratorio, en botellas serológicas de 585 mL, (pruebas en discontinuo). Se inocularon las botellas con medio mínimo de crecimiento (K_2HPO_4 0,50 g/L; KH_2PO_4 0,33 g/L; NH_4Cl 0,20 g/L; $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0,10 g/L; $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,15 g/L; $NaCl$ 0,10 g/L; $FeSO_4 \cdot 6H_2O$ 0,01 g/L; $Na_2S \cdot 9H_2O$ 0,02 g/L; $NaHCO_3$ 3,0 g/L; disolución de vitaminas 10 mL/L; disolución de micronutrientes 10 mL/L; Resazurina 1 mL/L; Cisteína 1 g/L y Na_2S como disolución reductora), trabajando en condiciones naturales.

Con la paja pretratada con ME al 20% durante dos días, se evaluó su producción de biogás por digestión anaerobia a carga orgánica de 0.5gSTV/L. No se probaron las otras relaciones al no contar con suficiente material de trabajo y tiempo, se escogió esta condición por ser en la cual se obtuvieron mejores resultados en la DQO y azúcares liberados. Se trabajó con tres réplicas y se incubaron en condiciones mesofílicas (35 ± 2 °C) durante 28 días. El control utilizado fue: el inóculo sin paja, y la combinación inóculo-paja sin pretratar.

Técnicas analíticas

Se determinaron los sólidos totales total (STT), sólidos totales volátiles (STV) y sólidos totales fijos (STF), el pH, la alcalinidad total y el nitrógeno amoniacal ($N-NH_4^+$) según los métodos estándares (2005), para dar seguimiento a cada experimento. También se determinó α como el cociente entre la alcalinidad parcial (debida a los carbonatos) y la alcalinidad total.

Se cuantificó la concentración de ácidos grasos volátiles (AGVs) por cromatografía de gases (Cromatógrafo Focus ThermoScientific, con detector de ionización de llama FID, y columna Restek Stabilwax-DA, como gas acarreador, Hidrógeno). La producción de biogás se determinó cada 24 horas, por desplazamiento de una columna de líquido ($NaCl$, al 5%) con la

consecuente medición de la presión y la temperatura ambiental para normalizar la medición de biogás según lo planteado por Nzila et al., (2010).

2.5 Análisis estadístico:

Se comprobó la normalidad y la homogeneidad de varianza, mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Bartlett, respectivamente. En los casos en que no se cumplieron las premisas del ANOVA se realizaron las transformaciones apropiadas a la variable analizada. De verificarse las dos premisas anteriores, se empleó un análisis de varianza de clasificación simple y ANOVA bifactorial.

Para comparar las medias de tratamientos y de los rendimientos de biogás, se utilizó la prueba de rangos múltiples de Duncan utilizando el Software STATGRAPHICS Centurión XV (versión 15.1), para un 95 % de nivel de confianza.

Capítulo 3

Capítulo 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Disposición actual de la paja de arroz como abono en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro

Este efecto positivo de la paja de arroz sobre la digestión anaerobia del estiércol porcino, constituye una alternativa racional para el manejo ecológico de este residuo. Baste decir que solo un 20 % de la producción mundial de paja de arroz es reutilizada (Zhao *et al.*, 2010; Hanafi *et al.*, 2012), la mayor parte queda en el campo como cobertura vegetal para los suelos o en muchas ocasiones es incinerada a campo abierto causando serios daños ambientales. Nuestro país no escapa a esta regularidad, una situación similar se aprecia en la Empresa Arrocera “Sur del Jibaro” de Sancti Spíritus (García-Rivero, 2010; Contreras, 2013), donde se recolectó la paja de arroz para este estudio.

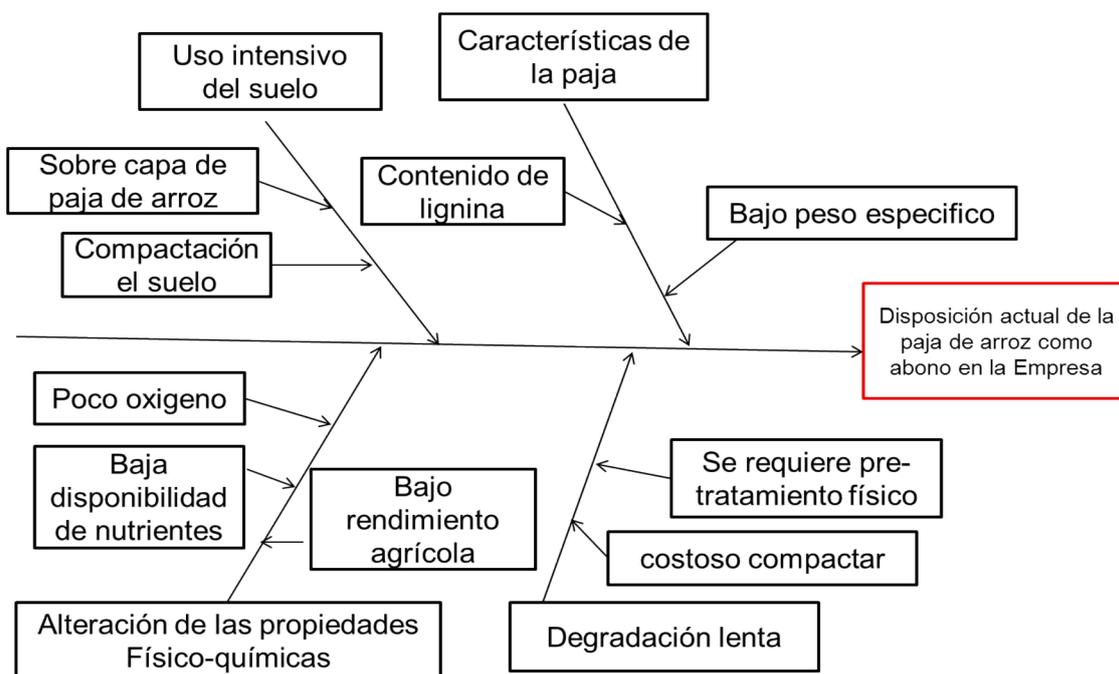


Fig. 3.1 Diagrama de causa-efecto sobre la disposición actual de la paja de arroz como abono orgánico en la Empresa Arrocera “Sur del Jibaro”.

La paja de arroz tiene muy bajo aprovechamiento como abono orgánico en la empresa que se estudia dado principalmente: al uso intensivo del suelo, las

alteraciones de las propiedades físicas-químicas del suelo que esto provoca, las propias características de la paja y su baja velocidad de degradación, según se pudo conocer en el taller efectuado para establecer las causas y efectos del manejo actual y disposición de la paja de arroz como abono en la Empresa Arrocería “Sur del Jibaro”. La fig. 3.1 detalla las causas primarias y secundarias, así como sus efectos (en forma de diagrama de Ishikawa) que inciden en la disposición actual de la paja de arroz.

3.2 La caracterización físico-química de la paja de arroz como biofertilizante

La paja de arroz presenta alto contenidos sólidos volátiles y además una pequeña fracción como contenido de minerales (cenizas) (tabla 3.1). Además se observó una desbalanceada relación Carbono/Nitrógeno (C/N) en la paja (48,3), donde prácticamente todo el Nitrógeno proviene del Nitrógeno orgánico.

Tabla 3.1 Características físico-químicas de la paja de arroz. Cada valor representa la media de tres repeticiones.

Parámetros	Paja de arroz
ST (%)	94,6
SV (% de ST)	70,4
COT ($\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$)	43,0
N-Total ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,89
N-NH ₄ ⁺ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,03
N-orgánico ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	8,68
Proteínas totales	53,8
Relación C/N	48,3
Na ⁺ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1 972
K ⁺ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	12 186
Mg ²⁺ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	18,76
Ca ²⁺ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1 309
PO ₄ ³⁻ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2,95
Al ³⁺ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	5 936
Fe ²⁺ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	4 754

Es notable también, el contenido de minerales que presenta la paja de arroz, lo cual es una ventaja para degradar este residuo vía anaerobia, ya que los

microorganismos que realizan el proceso requieren ciertos minerales para su función metabólica (Pereda *et al.*, 2006; Demirel y Scherer, 2011).

Pocos autores han considerado en sus estudios el contenido de minerales de la paja de arroz, de hecho, en la mayoría de los informes que muestran las características de la paja de arroz, se hace énfasis en el contenido de lignina, celulosa, hemicelulosa, carbono orgánico total y nitrógeno total (Karimi *et al.*, 2006; Contreras *et al.*, 2012; Contreras, 2013), pero muy poco se dice acerca del contenido de metales en estos residuos.

3.3 Pre-tratamiento de la paja de arroz utilizando microorganismos eficientes (ME)

El pre-tratamiento de la biomasa lignocelulósica constituye una etapa indispensable para complementar la hidrólisis enzimática y posibilitar la obtención de altos rendimientos en la fermentación de los azúcares liberados. Se hace necesario principalmente porque la lignina en las paredes celulares de la planta forma unas barreras contra el ataque enzimático. Un pre-tratamiento ideal es reducir el contenido de lignina, disminuir la cristalinidad de la celulosa e incrementar el área superficial (Krishna *et al.*, 2001).

La posibilidad de pre-tratar biológicamente las biomásas lignocelulósicas ha sido estudiada por varios autores (Wan y Li, 2012). Se destacan los estudios del pre-tratamiento utilizando hongos que secretan enzimas lignolíticas, sobre la paja de maíz (Keller *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2010), paja de trigo (Dias *et al.*, 2010), paja de arroz (Bak *et al.*, 2009), y biomasa forestal (Yu *et al.*, 2009). El consorcio de microorganismos eficientes contiene hongos del suelo, algunos de los cuales son secretores de estas enzimas hidrolíticas.

Con la adición de microorganismos eficientes a la paja de arroz, se observó una liberación de azúcares reductores, ya que la microbiota presente logra romper los anillos de lignina y por tanto las estructuras de celulosa y hemicelulosa quedan disponibles para ser degradadas (Laureano *et al.*, 2005; Sánchez, 2009).

Se notó que a las 24 horas se lograron liberar casi 0.6 g/L de azúcares reductores, pero esta liberación se duplicó a las 48 horas (Fig. 3.2), siendo mayor significativamente cuando se aplicó la mayor concentración de ME (20%). Sin embargo, después de este tiempo de incubación, los azúcares reductores disminuyen significativamente, dado porque los ME los utilizan como fuente de carbono y los degradan.

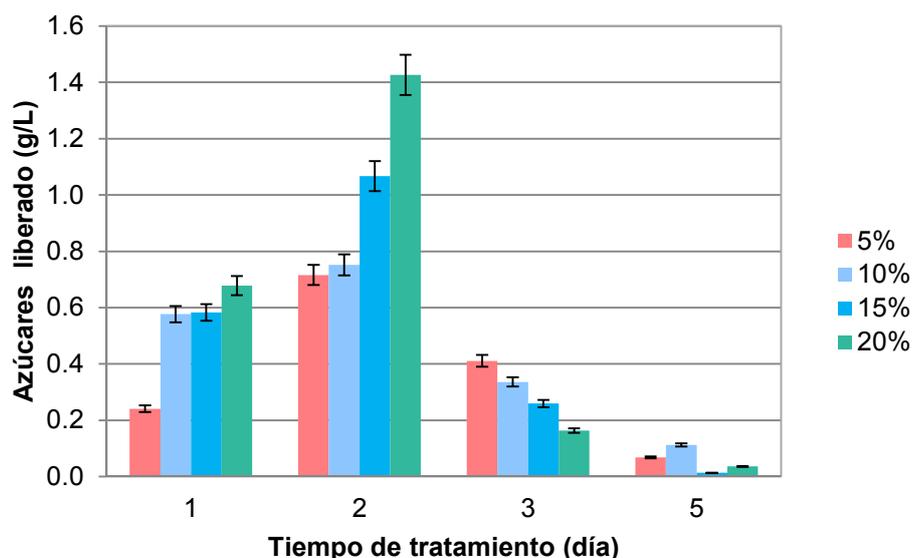


Fig. 3.2 Determinación de azúcares reductores liberados después de aplicar pre-tratamiento de la paja de arroz con diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 %) de una solución de microorganismos eficientes, a diferentes días de incubación.

Un resultado similar se obtuvo en cuanto a la liberación de materia orgánica de la paja cuando se aplica el pretratamiento con ME. La mayor liberación de materia orgánica en la solución concuerda con los resultados obtenidos con la liberación de azúcares presentes (Fig. 3.3). Donde existen dos momentos uno inicial en los dos primeros días de aumento de la materia liberada y posteriormente un descenso de la materia presente. Este fenómeno se explica por las mismas razones que la liberación de los azúcares. Donde en los dos primeros días los microorganismos comienzan a liberar sustancias biodegradables, que posteriormente ellos mismos consumen. Se puede observar que entre el segundo y el primer día existe muy poca diferencia.

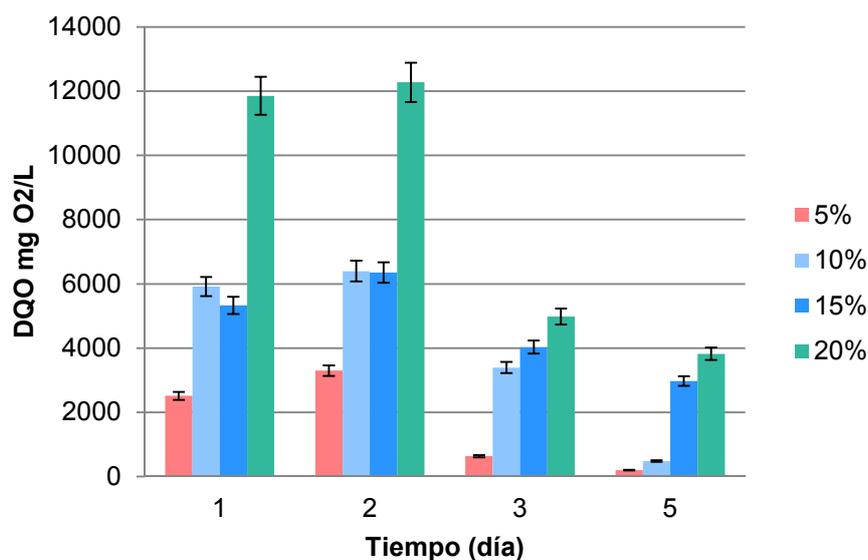


Fig. 3.3 Determinación de la demanda química de oxígeno después contenida en la paja de arroz después de aplicar un pre-tratamiento con diferentes concentraciones (5, 10, 15 y 20 %) de una solución de microorganismos eficientes, a diferentes días de incubación.

Si se aprovecha esa capacidad de liberación de sustancias biodegradables que se logra en ese corto tiempo (dos días) de pretratamiento, para posteriormente introducirlo en un digestor anaerobio, se aumenta la disponibilidad de materias convertible en metano y por ende se logra una degradación completa de la paja de arroz.

3.4 Digestión anaerobia de paja de arroz con y sin pretratamiento

La paja pre-tratada con 20% de ME y dos días de incubación fue utilizada para evaluar su degradación anaerobia en comparación con la paja sin pre-tratar con el fin de valorar si aún conserva materia orgánica que pueda transformarse en metano y por ende producir un digestato más estabilizado.

Así, los resultados mostraron que durante la digestión anaerobia de la paja de arroz pre-tratada con los ME, se produjo 4 veces más biogás que durante la digestión anaerobia de la paja de arroz sin pre-tratar. Esto se debe a una mayor liberación de azúcares y más fácil degradación. Este aumento en el

potencial de metano de biomasa lignocelulósica ha sido informado por algunos autores que han estudiado el fenómeno de pretratamiento biológico con fines bioenergéticos (Zieminski et al., 2012; Kassuwi et al., 2012)

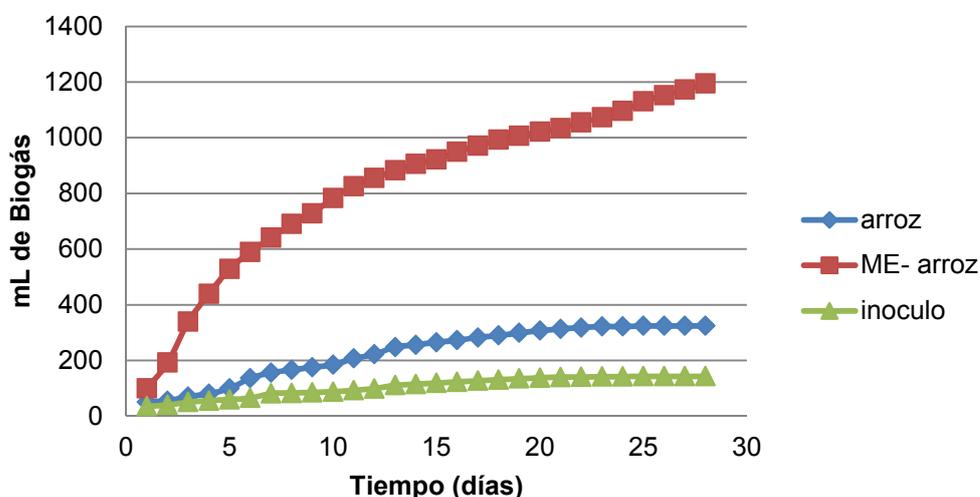


Fig. 3.4 degradación anaerobia de la paja de arroz con y sin pretratamiento con ME al 20 % y dos días de incubación.

3.5 Calidad agronómica del biofertilizante obtenido en la degradación anaerobia de la paja de arroz

Las potencialidades agronómicas del biofertilizante obtenido a partir de la digestión anaerobia de la paja arroz con y sin empleo de pre -tratamiento biológico fue determinado mediante una caracterización físico-química (tabla 3.2). Se observó el aporte de los macroelementos NPK y otros nutrientes necesarios. Se pudo notar que la Materia orgánica (M.O) contenida en el digestato de la paja pretratada es superior a la aportada por la paja de arroz sin pretratar. El nitrógeno amoniacal, fósforo y potasio también es superior en el digestato obtenido con la paja pre-tratada. A esto hay que sumarle el contenido de estos macroelementos que aportan los propios ME. Además de forma general mantiene el pH en la zona neutral y la alcalinidad en el rango adecuado.

Tabla 3.3 Caracterización físico química de los digestatos obtenido después de la digestión anaerobia de la paja de arroz con y sin pretratamiento.

Muestras	gST/L	gSTV/L	gSTF/L	pH	ALC (mgCaCO ₃ /l)	g NH ₄ - N/kg	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)
Paja arroz	7,22	3,63	3,59	7,4	3500,0	0,192	2,95	9,0	6
ME- arroz	14,36	6,70	7,65	7,1	2525,0	0,233	5,83	16	11

La mayor concentración de ácidos orgánicos volátiles al final de la digestión de la paja sin pretratamiento muestra que no ha habido una eficiente degradación de esta (tabla 3.4). Sin embargo la acumulación de estos ácidos es casi nula cuando se degrada la paja pre-tratada. Esto es evidencia de alcanzar una mayor eficiencia en la conversión de la biomasa en metano y por ende es evidencia de la obtención de un digestato más estable, con menor número de patógenos, y más mineralizado.

Tabla 3.4 Acumulación de ácidos orgánicos volátiles al final de la degradación anaerobia de la paja de arroz con y sin pretratamiento.

Muestras	Ácido acético (mg/L)	Ácido propiónico (mg/L)	Ácido isobutírico (mg/L)	Ácido butírico (mg/L)	Ácido isovalérico (mg/L)
Paja Arroz	42,3	19,96	17,44	3,23	12,03
ME- arroz	56,83	3,60	0	0	0

Estos resultados demuestran que efectivamente la paja de arroz degradada por vía anaerobia con previo pretratamiento biológico puede generar un biofertilizante de alta calidad agronómica, ahora bien la cuestión está en que cualquier alternativa de aprovechamiento de la paja de arroz, debe ser viable económicamente en especial para los agricultores. La retirada de la paja pasa inevitablemente por establecer y favorecer la presencia de industrias capaces de utilizar la paja y generar las utilidades que permitan compensar el costo de su retirada, superiores a las opciones de incorporarla, o quemarla (Abril, 2009).

La paja de arroz se retira de los campos en la India, Bangladesh y Nepal, donde se utiliza como combustible para cocinar, alimento de rumiantes, cama de animales, y otros procesos industriales. En estos casos no hay un retorno de nutrientes al suelo (Doberman & Fairhurst, 2002). En el caso de los sembrados de arroz en California, Estados Unidos, la paja de arroz se retira en pacas prensadas de 1,2 x 1,2 x 2,4 m³, siendo el proceso de retirada limitado ante la escasa demanda. Actualmente, la práctica más extendida en California es la incorporación al suelo, permitiéndose quemar una parte (25%) por motivos fitosanitarios para eliminar la proliferación de hongos y bacterias perjudiciales al cultivo (Wong, 2003).

En resumen se puede decir que las practicas actuales del manejo de la paja de arroz en la Empresa Arrocería "Sur del Jibaro", no son viables ambientalmente, pues la quema de la paja de arroz, provoca problemas de contaminación ambiental, al generar partículas que se suspenden en la atmósfera como dióxido de fosforo y azufre, monóxido de carbono y nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), compuestos policlorados, dioxinas y furanos, las cuales son altamente cancerígenas, quedándose en las cenizas y en el suelo. La práctica de enterrar la paja, aunque evita los problemas que provoca la quema, genera entre 2,5 y 4,5 veces más metano que al quemarla (gas de efecto invernadero), por lo que esta alternativa tampoco es recomendable (Abril, 2009).

Para lograr el aprovechamiento de la paja de arroz en la generación de energía de forma eficiente y la obtención de productos de alto valor agregado como los biofertilizantes, es necesario desarrollar una industria de recogida, transporte y almacenamiento, así como resolver las dificultades provocadas por su alto contenido de sílice. La producción de celulosa y papel a partir de la paja de arroz, incluyendo la restitución del potasio y sílice al suelo, es viable desde el punto de vista técnico y económico, sin embargo, aún no están solucionados todos los aspectos tecnológicos que aseguren una operación totalmente amigable con el ambiente (Abril, 2009).

El desarrollo de una industria que aproveche los componentes químicos de la paja de arroz, celulosa, hemicelulosas, lignina y silicio (Biorefinería) parece ser

la alternativa más interesante, teniendo en cuenta la gran cantidad de productos de alto valor agregado que pueden obtenerse, gracias a la flexibilidad del proceso, además de crear empleos de alta calificación. El retorno al suelo de los elementos esenciales (N, P y K) mediante la producción de biofertilizante constituye una alternativa atractiva para los productores y además una práctica agroecológica importante dentro de las formas de producción de cultivo intensivo, como es el caso de la empresa que se estudia.

Conclusiones

CONCLUSIONES

1. El diagnóstico inicial mostró el bajo aprovechamiento de los nutrientes contenidos en la paja de arroz dadas por sus características (alto contenido de lignina, necesidad de pretratamiento físico). Actualmente se deja en el campo como abono orgánico, pero realmente es incinerada o tapada con el laboreo, lo que provoca mayores daños ambientales.
2. La caracterización de la paja de arroz mostró la presencia de macro y micronutrientes (C, N, P, K) que permiten catalogarlo como un fertilizante orgánico de calidad, sin embargo su alto contenido de lignina, limita la disponibilidad de estos nutrientes.
3. El empleo del pretratamiento biológico de la paja utilizando microorganismos eficientes al 20% por 48 horas resultó efectivo para liberar la mayor cantidad de azúcares de la paja de arroz.
4. La digestión a anaerobia de la paja de arroz con empleo de pretratamiento biológico mejoró la conversión de biomasa en metano, 3,7 veces, ya que permite mayor disponibilidad de compuestos biodegradables. Esto hace que se obtenga un efluente más estabilizado y con mayor concentración de minerales.
5. La determinación de macro elementos en el efluente como el N, P, K, permitió definir las propiedades biofertilizante mejoradas que se logran con el empleo del pretratamiento biológico y en general con la digestión anaerobia de paja de arroz.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

- ✓ Continuar investigando la aplicación del pretratamiento biológico a la paja de arroz para optimizar sus propiedades como biofertilizante.
- ✓ Se recomienda aplicar la tecnología anaerobia a escala piloto en la **Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro**, para que sea demostrativo la aplicación de este fertilizante orgánico mejorado.
- ✓ Evaluar la aplicación del biofertilizante obtenido en este estudio, en campos de arroz y otros cultivos.

Bibliografía

Bibliografía

1. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20 th edition. 1998
2. Backhoff, H. P. 1976. Some chemical changes in fish silage. *Journal of Food Technology* 11: 353-363
3. Bak JS, Ko JK, Choi IG, Park YC, Seo JH, Kim KH. Fungal pretreatment of lignocellulose by *Phanerochaete chrysosporium* to produce ethanol from rice straw. *Biotechnol Bioeng* 2009;104:471–82.
4. Benítez S. & Gonzales L. (2003). Aceleración del proceso de compostaje utilizando *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Lactobacillus*, *Saccharomyces* y *Trichoderma harianum*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Microbiología.
5. Biogas technology: an information package. 1aed. Bombay (IN) : Tata Energy Research Institute, 2005. 189 p.
6. Contreras L. M., López G. L., Romero R. O. 2006. “Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico”. *Revista Futuros* No. 16, 2006 Vol. IV. en: http://www.revistafuturos.info/raw_text/raw_futuro16/produccion_biogas.pdf. ISSN 1913-6196
7. Contreras Velázquez. L. M., Vera Suárez A., Romero Romero O., López González L. M., Kanabel K. (2006) “Diagnóstico y perspectiva para la producción de biogás con fines energéticos en la provincia de Sancti Spíritus”. CD-R II Simposio Internacional, Sociedad, Turismo y Desarrollo Humano Local 2006. Sancti Spíritus, Cuba. ISBN: 959-250-298-6.
8. Chaviano Hernández, M. (2011). Valorar la eficiencia de la planta de Biogás en la UEB Complejo Guayos. Trabajo de Diploma. Ingeniero Industrial. Departamento de Ingeniería. Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, 65 p.
9. Chefetz, B., Hatcher, P.G., Hadar, Y., Chen, Y. (1996). Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 25, 776–785.

10. Chinen, N. y Higa, T. (1998). EM treatments of odor, waste water and environmental problems. Okinawa (JP): University of Ryukyus. College of Agriculture.
11. Demirel B., Scherer P. (2011). "Review: Trace elements requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane". *Biomass and Bioenergy* 35, pp. 992-998.
12. Diana Abril, Enrique Navarro, Alejandro Abril. (2009). La paja de arroz. Consecuencias de su manejo y alternativas de aprovechamiento. *Agron.* 17(2): 69 - 79, ISSN 0568-3076
13. Días AA, Freitas GS, Marques GSM, Sampaio A, Fraga IS, Rodrigues MAM, et al. Enzymatic saccharification of biologically pre-treated wheat straw with white-rot fungi. *Bioresour Technol* 2010;101:6045–50.
14. Doberman, A. & Fairhurst, T. H. (2002). "Rice straw management". En: *Better Crops International*, Vol. 12. Special Supplement.
15. Effective microorganisms and their role in kyusei nature farming and sustainable agriculture . In SHARIFUKKIN, H., ANUAR, A. y SHAHBUDDIN, M. (eds.). *Proceedings of the 2nd Conference on Effective Microorganisms (EM)*. Saraburi (TH), November 1993. Atami (JP) : INFRC, 1994. p. 1 – 6.
16. Eweis J., Ergas J., Chag D & Schoroeder E. (1999). *Principios de biorrecuperación*. España. Mac Graw Hill.
17. Franson, N. G.; Urlings, H. A. P.; Bijk er, P. G. H.; Van Logt estijn, J. G. 1998. Fermentation of aerobically activated pig s laughterhouse sludge for animal feed purposes. *Bioresource Technology* 65: 145-150 p.
18. Frazier, W. C.; Westhoff, D. C. 1978. *Food Microbiology*. 3rd ed., McGraw-Hill.539 p.
19. Gadde Butchiah, Christoph Menke, Reiner Wassmann. (2009). "Rice straw as a renewable energy source in India, Thailand, and the Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation". *Biomass and Bioenergy* 33, pp. 1532-1546.
20. García Valdivia, V. (2011), Ponderación de indicadores de sostenibilidad como apoyo a la selección de alternativas de producción de biogás con fines energéticos en Sancti Spiritus. Trabajo de Diploma. Ingeniero Industrial. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS "JOSÉ MARTÍ PÉRZ", 57 P.

21. Gómez, M. (1990). Cambios en las características fermentativas y digestibilidad IVMS del ensilaje de morera (*Morus alba*) y pejibaye (*Bactris gasipaes*) H.B.K. Tesis Ing. Agr. Zootecnista. UCR. San José. Costa Rica, 113 p.
22. Grijalva Vallejos, Nubia. (2013). Vegetal waste degradation by microbial strains inoculation. *Enfoque UTE*, V.4-N.1, Jun.2013: pp.1-13
23. He Yanfeng, Yunzhi Pang. (2008). “Physicochemical Characterization of Rice Straw Pretreated with Sodium Hydroxide in the Solid State for Enhancing Biogas Production”. *Energy & Fuels*, 22, pp. 2775–2781.
24. Higa, T.; Parr, J. 1994. Beneficial and Effective Microorganisms for a Sustainable Agricultural and Environment. INFRC (International Nature Farming Research Center). Atami, JP. 63 p.
25. Huang D., Zeng G., Feng C., Hu S., Zhao M., Lai C., Zhang Y., Jiang X., Liu H. (2010). Mycelial growth and solid-state fermentation of lignocellulosic waste by white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* under lead stress. *Chemosphere* 81: 1091 – 1097.
26. Intriago Flor, F. G; Paz Mejía, S. A. (2000) Ensilaje de cascara de plátano maduro con microorganismos eficaces como alternativa de suplemento para ganado bovino. Tesis de grado de Ingeniero Agrónomo. Universidad Earth. Costa Rica, 63p.
27. Kalra M. S & J. S. Panwar 1986. “Digestion of Rice Crop Residues”. *Agricultural Wastes* 17, pp. 263-269.
28. Karimi, K., Kheradmandinia, S., y Taherzadeh, M.J. (2006). Conversion of rice straw to sugars by dilute-acid hydrolysis. *Biomass and Bioenergy*. 30, 247–253.
29. Keller F, Hamilton J, Nguyen Q. Microbial pretreatment of biomass. *Appl Biochem Biotechnol* 2003;105:27–41.
30. Komatsu T., Kudo K., Inoue Y., Himeno S. (2010). “Anaerobic codigestion of sewage sludge and rice straw” en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/cdlodos/pdf/anaerobiccodigestion495.pdf/> (revisado en febrero 2010).
31. Krishna, S.H., T. Reddy, J., y Chowdary, G.V. (2001). Simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulosic wastes to ethanol using a thermotolerant yeast. *Bioresource Technology*. 77, 193±196.
32. Lal, R. 1995. The Role of Residues Management in Sustainable Agricultural System. *Journal of Sustainable Agriculture*. Vol. 5(4) : 51 – 78.

33. Lal, R. 2000. Soil Management in the Developing Countries. *Soil Science*. Vol. 165 No. 1: 57 – 72.
34. Laureano, P.L., Teymouri, F., Alizadeh, H., y Dale, B.E. (2005). Understanding factors that limit enzymatic hydrolysis of biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 124 (1-3): 1081–1099.
35. Lee C., Darah I., Ibrahim C. (2010). Production and Optimization of cellulase enzyme using *Aspergillus niger* USM AI 1 and comparison with *Trichoderma reesei* via solid state fermentation system. *Biotechnology Research International*.
36. Lei Zhongfang, Jiayi Chen, Zhenya Zhang, Norio Sugiura. (2010). “Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation”. *Bioresource Technology* 101, pp. 4343–4348
37. Linares Morel O., Meneses Gómez C. (2011). Comunicación personal con el Director y subdirector de Industria: Complejo Agroindustrial Arrocero CAI “Sur del Jíbaro”. Sancti Spíritus, Diciembre 2011.
38. Linke, B. and Schelle, H. (2000). Solid State Anaerobic Digestion of Organic Wastes. *AgEng Warwick. EurAgEng. Paper Number 00-AP-025*, pp. 1-10.
39. López González, L. M; Romero Romero, O. (2006). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. Publicado en *Revista Futuros* No. 16, Vol. IV.P.1-2
40. López_Dávila. E, et al. (2013) Potencial de Biogás de la Fermentación Anaerobia de Residuos Sólidos de la Agroindustria Azucarera, utilizando Lodo Anaerobio de Estiércol Porcino. *Revista Centro Azúcar*, Vol. 40, Enero-Marzo, 2013. 7 p.
41. Lugo, S. y Gitscher, H. (2005) Evaluación de los proyectos de compostaje en el Ecuador. Fundación Natura – Repamar – Cepis-GTZ. Quito.
42. Machin, DH. 1999. Uso del ensilaje en el trópico privilegiando opciones para pequeños campesinos. estudio FAO producción y protección vegetal 161 p. memorias de la conferencia electrónica de la FAO sobre el ensilaje en los trópicos. Estudio 5. El uso potencial del ensilaje para la producción animal en la zona tropical, especialmente como una opción para los pequeños campesinos. (en línea). Cambac Associates. Manor Farm Wiltshire, UK.

43. Mandujano, M. et al. Biogás: energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos, manual para el promotor de la tecnología. México (MX) : OL ADE, 1981. 41 p. Serie Publicaciones Especiales, no. 6.
44. MCDONALD, P; EDWARDS, RA; GREENHALGH; MORGAN, CA. 2006. Nutrición Animal. Guía para la alimentación de rumiantes. INIA. Serie Técnica N° 44. 82 P
45. Obaya M. C. y col. (1998) Uso de las aguas residuales de la industria azucarera y sus derivados en Cuba. Memorias del II Congreso AIDIS de Norteamérica y el Caribe y IV Congreso de la Asociación Cubana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tomo II, .530 p.
46. Palmero Bravo A. M (2006). Valoración medioambiental del uso de los residuos orgánicos de la provincia Sancti Spíritus para producir biogás con fines energéticos. Trabajo de Diploma. Ingeniero Industrial. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA. CENTRO UNIVERSITARIO DE SANCTI SPÍRITUS “JOSÉ MARTÍ PÉRZ, 76 p.
47. Pedro Fidel Fuentes Chaviano. Evaluación de sistemas de siembra con cobertura muerta del suelo en el cultivo de cebolla (*allium cepa* L.). Tesis doctoral instituto de medio ambiente. Doctorado de cooperación “gestión ambiental y desarrollo sostenible”. Matanzas, Girona 2005.
48. Preston. T. R. (2005) Los biodigestores en los sistemas agrícolas ecológicos. LEISA Revista de Agroecología. junio 2005. Volumen 21, número 1.
49. Restrepo Rivera, J. 1994. Sol, Termodinámica y Agricultura. San José, Costa Rica. 13 pp.
50. Sangakkara, R. (Ed) (1999). Revised edition. Kyusei Nature Farming and the technology of Effective Microorganisms. Guidelines for Practical Use. APNAN. Thailand. 44 p.
51. Somayaji D. and S. Khanna. (1994). “Biomethanation of rice and wheat straw”. World Journal of Microbiology & Biotechnology 10, pp. 198-212.
52. Seddon, I. 2004. El Uso de Sustancias Alimentarias Alternativas en las Dietas
53. Valentina Savran, 2010. Evaluación del potencial tecnológico de la biomasa no cañera al balance energético nacional. Informe técnico de biomasa Agosto 2010

54. Vargas-García M.C., Suárez-Estrella F., López M.J., Moreno J. (2009). Effect of inoculation in composting processes: Modifications in lignocellulosic fraction. *Waste Management* 27. 1099–1107.
55. Vélez, M. (1997); *Producción de Ganado Lechero en el Trópico* 2^a edición. Zamorano Academic Press. Zamorano Honduras. 189 p.
56. Watanabe A., Satoh Y., Kimura M. (1995). Estimation of the increase in CH₄ emission from paddy soils by rice straw application. *Plant and Soil* 173, pp. 225-231.
57. Wong, A. (2003). “Comparative Emission of methane from different rice straw management practices in California, A State wide perspective”. In: *Journal of sustainable agriculture*, No. 22. pp. 79-91.
58. Wyoming Statutes. 2004. Feeding of untreated garbage to swine, Chapter 27 (en línea). In: Title 11 - Agriculture, Livestock and Other Animals. Joint Agriculture, Public lands and Water Resources Committee Members. Wyoming State Legislature. Xu C, Ma F, Zhang X, Chen S. Biological pretreatment of corn stover by *Irpex lacteus* for enzymatic hydrolysis. *J Agric Food Chem* 2010; 58:10893–8. Yu J, Zhang J, He J, Liu Z, Yu Z. Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull. *Bioresour Technol* 2009;100:903–8.
59. Zhao Rui, Zhenya Zhang, Ruiqin Zhang, Miao Li, Zhongfang Lei, Motoo Utsumi, Norio Sugiura. (2010). “Methane production from rice straw pretreated by a mixture of acetic–propionic acid”. *Bioresource Technology* 101, pp. 990–994
60. Zhang Ruihong, Zhang Zhiqin. (1999). “Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system”. *Bioresource Technology* 68, pp. 235-245.
61. Sánchez C. Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnol Adv* 2009;27:185–94.
62. Zieminski, K., Romanowska, I., Kowalska, M. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production. *Waste Management* 32 (2012) 1131–1137.
63. Kassuwi S. A. A., Mshandete A. M. and Kivaisi A. K. Anaerobic co-digestion of biological pre-treated Nile Perch fish solid waste with vegetable fraction of

Market solid waste. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science.
VOL. 7, NO. 12, 2012

64. Mulleriyawa, R. y Wettasinha, C. (1998). Manejo de la fertilidad del suelo en campos de arroz bajo riego. LEISA revista de agroecología, 13-3.
 65. Diana Abril, Enrique Navarro, Alejandro Abril. (2009). La paja de arroz. Consecuencias de su manejo y alternativas de aprovechamiento. Agron. 17(2): 69 - 79, ISSN 0568-3076
-

Anexos

Anexos

Anexo # 1. Residuos y residuales que han sido utilizados para la alimentación animal en Cuba.

<i>Origen</i>	<i>Residuo</i>
Caña de azúcar	Caña de demolición
“	Residuos de cosecha
“	Melazas
“	Bagazo
“	Bagacillo
“	Cachaza
Destilerías	Mostos
“	Fondajes
Arroz	Paja
“	Cabecilla
“	Polvo
Cítricos	Hollejos
“	Residuos de poda
Café	Pulpa
Molinería	Afrecho
“	Salvado
Mataderos	Sangre
“	Contenido ruminal
Industria pecuaria	Pastas proteicas
“	Excretas
Pesca	Descartes
“	Fauna acompañante
“	Residuos del procesamiento
Industria alimentaria	Residuos de cervecería
“	Barquillos
Casas, comedores y restaurantes	Restos de alimentación humana
Agricultura	Residuos de raíces y tubérculos
“	Residuos de hortalizas

Anexo #2. Alimentos producidos a partir de residuos agrícolas.

<i>Cultivo</i>	<i>Alimento</i>	<i>Destino</i>
Arroz	Cabecilla	Todas
“	Polvo	Todas
“	Paja	Rumiantes
Cítricos	Hollejos frescos	Rumiantes y porcinos
“	Harina	Rumiantes
“	Hollejos ensilados	Rumiantes y porcinos
“	CITROUREA	Rumiantes
“	Residuos de poda	Ovinos
Café	Pulpa fresca	Rumiantes
“	Pulpa ensilada	Rumiantes
Raíces y tubérculos	Frescos	Porcino y conejos
“	Cocinados	Porcinos
Hortalizas	Frescas	Rumiantes y conejos

Anexo # 3. Composición de la paja de trigo, paja de arroz y pulpa de café (mg/100g de sustrato seco).

Composición	Paja de Trigo*	Paja de Arroz **	Pulpa de Café **
Proteína	7,9	9,0	10,2
Carbono	52,5	N/D	N/D
C/N	41,0	N/D	N/D
Lignina	8,6	5,7	21,0
Celulosa	35,2	33,9	36,4
Hemicelulosa	N/D	26,8	5,1

* Gaitán-Hernández y Mata 2004

** Vega y col., 2005

N/D: datos no disponibles

Anexo # 4. Paja de cereales. A: paja de trigo, B: paja de arroz.

