

Biodigestores como complemento de la cadena productiva de la soja, maíz y trigo en Paraguay, estudio de pre-factibilidad técnica y económica

Biodigesters as a complement to the soybean, corn and wheat production chain in Paraguay, technical and economic pre-feasibility study

Juan Pablo Dos Santos Miranda^{1*} , Stijn Van der Krogt¹  y Ayrton Portillo¹ 

¹ Universidad Paraguayo Alemana (UPA). San Lorenzo, Paraguay.

RESUMEN

El productor agropecuario paraguayo se ve en constante riesgo debido a las variaciones de precios y amenazas climáticas. En ese sentido, los biodigestores podrían apoyar para generar ganancias adicionales con la utilización del biogás y el digestato producido a partir de fuentes encontradas en el medio agropecuario. Para dicho fin, se realiza un estudio de pre-factibilidad técnica y económica que se logró a partir de las experiencias obtenidas en el "Proyecto Concordia-SC" - Brasil y la KTBL de Alemania. De esa manera se plantearon 3 escenarios de complementación del estiércol de cerdo con el maíz y el trigo para la digestión anaeróbica en biodigestores industriales en proyectos agropecuarios de gran escala. Los resultados arrojaron que en el escenario 1 (estiércol de cerdo) se obtuvo TIR 25,8%; el escenario 2 (estiércol de cerdo y ensilaje de maíz) TIR 31,7% y el escenario 3 (estiércol de cerdo y granos de trigo) TIR 27,2%. Al mismo tiempo en el escenario 2 se obtuvo un costo de oportunidad de US\$ 33.197 y en el escenario 3 US\$ 5.455 respectivamente a favor de la utilización de biodigestores. Por último, el posible ahorro en fertilización a partir del digestato dio como resultado US\$ 114.093, 148.502 y 132.565 en N, P₂O₅ y K₂O respectivamente. Los resultados hablan de que la inclusión de biodigestores en la cadena productiva del complejo soja, trigo y maíz puede apoyar a la obtención de mayor rentabilidad para el productor, al tiempo de disminuir el riesgo al que se expone.

Palabras clave: Biogás, Paraguay, Estiércol de Cerdo, Biometano, Viabilidad.

ABSTRACT

The Paraguayan agricultural producer is in constant risk, due to price variations and climatic threats. In this context, biodigesters could help to generate additional profits with the use of biogas and digestate produced from sources found in the agricultural environment. For this purpose, a technical and economic pre-feasibility study is carried out, which was achieved from the experiences obtained in the "Concordia-SC Project" - Brazil and the KTBL of Germany. In this way, 3 scenarios of complementation of pig manure with corn and wheat were proposed for anaerobic digestion in industrial biodigesters in large-scale agricultural projects. The results showed that in scenario 1 (pig manure) 25.8% IRR was obtained; scenario 2 (pig manure and corn silage) IRR 31.7%; and scenario 3 (pig manure and wheat grains) IRR 27.2%. At the same time, in scenario 2, an opportunity cost of US \$ 33,197 was obtained and in scenario 3, US \$ 5,455, respectively, in favor of the use of biodigesters. Finally, the possible savings in fertilization from the digestate resulted in US \$ 114,093, 148,502 and 132,565 in N, P₂O₅ and K₂O respectively. The results show that the inclusion of biodigesters in the productive chain of the soy, wheat and corn complex can support the obtaining of greater profitability for the producer, while reducing the risk to which it is exposed.

Keywords: Biogas, Paraguay, Pig Manure, Biomethane, Viability.

INTRODUCCIÓN

El sector primario en el Paraguay es el principal motor de la economía paraguaya, destacándose principalmente, la producción agrícola con la soja, y la producción pecuaria, con la carne bovina. Este

sector ha tenido una contribución al PIB que en los últimos años ha estado en torno al 25% (Cresta, 2014). En cuanto a la producción agrícola, desde 1993 a 2016, hubo un incremento de 5, 11 y 3 veces más en la producción de soja, maíz y trigo

*Autor para correspondencia:

juanpablodossantos@gmail.com

Conflicto de interés:

El autor declara no tener conflicto de interés.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto con una licencia Creative Commons CC-BY

Historial:

Recibido: 26/02/2019;

Aceptado: 26/10/2020

Periodo de Publicación:

Julio-Diciembre de 2020

respectivamente (CAPECO, 2020). El crecimiento del Producto Interno Bruto está altamente correlacionado con el volumen de producción de soja, lo cual da una pauta de la importancia económica del mismo: cuando se presentan condiciones climáticas adversas a la producción agrícola, generalmente una sequía, el Producto Interno Bruto del país desciende (años 2009 y 2012, -4% y -1,2% respectivamente), generándose incrementos muy importantes cuando se recupera la capacidad instalada de una buena cosecha (año 2010 y 2013, 13,1% y 14% respectivamente) (Investor, 2015). Por su parte, la industria de la carne bovina es el segundo sector más importante en ingresos por exportaciones del país, representando el 12,1% del PIB (Asociación Rural del Paraguay, 2017). Al mismo tiempo, la producción de carne porcina ha registrado un crecimiento sostenido, registrando una faena de 587.108 cabezas en el año 2018 (SENACSA, 2018).

El principal ingreso del productor agrícola del modelo agroexportador dedicado a la soja, maíz y trigo consiste en la venta del grano en bruto, sometiéndose a las reglas del mercado internacional con precios volátiles y costos operativos altamente sensibles. En esto último influye mucho el precio del petróleo, el cual mantiene una relación directa con el diesel y los fertilizantes minerales. Paralelamente con las consecuencias del cambio climático el productor se ve en constante riesgo de perder cosechas, sin olvidar los peligros inherentes a las plagas y enfermedades.

Un rubro estrechamente asociado a este modelo de negocio es justamente el de la producción porcina, la cual aprovecha los insumos derivados de la zona de impacto para la elaboración de balanceados alimenticios, sacando ventaja de las cortas distancias de transporte para ahorrar costos, teniendo en cuenta la sensibilidad a los mismos y los riesgos que representa este tipo de producción.

Todo lo mencionado significa una oportunidad para la generación ingresos económicos adicionales con el aprovechamiento de los productos y sub-productos agropecuarios en complemento con biodigestores para la producción de biogás. Este último se produce a partir de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, que ocurre durante la digestión de los sustratos en contenedores cerrados, herméticos e impermeables. Existe una vasta experiencia de la utilización de estiércol animal en co-generación con sustratos vegetales como el ensilaje de maíz y granos de trigo. Esto puede representar una ventaja para el sector agropecuario ya que la producción de biogás a escala industrial presenta como resultado, además del biogás, la posibilidad de utilizar el digestato (fertilizante orgánico de alta calidad) y la energía térmica. Esto significa, en la práctica, reducción de costos de producción, al ser insumos obtenidos a un costo prácticamente de cero. El biogás puede complementar la producción

agropecuaria al ser utilizado como combustible para las labores de mecanización de los tractores agrícolas en sustitución del diesel, y el digestato como sustituto del fertilizante mineral, costos que son determinantes en el análisis de rentabilidad.

La producción de biogás no es habitual en Paraguay y se carece de información para su implementación (GIZ, 2011), sin embargo, existen algunos proyectos de producción de biogás, como el caso de la Granja Bertín S.A. (Producción de 640 m³ de biogás por día) y la Granja San Bernardo (1.000 m³ de biogás por día). Paralelamente en Brasil, sobre todo en la región Sur (Paraná, Santa Catarina y Rio Grande do Sul) se desarrollan con éxito proyectos de producción de biogás en complementación con el sector agropecuario y, siendo esta zona de características agrológicas similares a varias regiones del Paraguay en donde se desarrolla el modelo agro exportador, sería factible partir de las experiencias adquiridas para realizar cálculos de viabilidad, especialmente en materia de costos, materiales de construcción y en el funcionamiento del modelo de negocio. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo determinar las ventajas de la digestión anaeróbica del estiércol de cerdo, el maíz y el trigo en biodigestores industriales, a fin de demostrar la pre-factibilidad técnica y económica de la utilización del biogás y el digestato en proyectos agropecuarios de gran escala.

MATERIALES Y MÉTODOS

El territorio geográfico del estudio fue Paraguay, enfocándose en los departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Canindeyú y Caaguazú, ya que estos son los sitios donde se desarrolla principalmente el modelo de negocio que se quiere analizar. El universo estudiado ha sido la cadena de producción de soja, trigo, maíz, como también la del sector porcino.

La viabilidad técnica y económica fue obtenida a partir del planteamiento de 3 escenarios distintos del modelo de negocio, a fin de poder comparar y analizar las diferencias. Estos escenarios fueron:

Escenario 1: producción de biogás con estiércol de cerdo y ahorro de combustible con la utilización del biometano.

Escenario 2: estiércol de cerdo en combinación con el ensilaje de maíz: viabilidad económica y costo de oportunidad.

Escenario 3: estiércol de cerdo en combinación con granos de trigo: viabilidad económica y costo de oportunidad.

Escenario 4: se realizó un estudio adicional para determinar el ahorro de fertilizante en la producción de soja, trigo y maíz, a partir de los datos del

escenario 1.

Para la determinación de la viabilidad técnica se analizaron

Las tecnologías para la purificación del biogás (Upgrading a biometano) y sus costos.

La tecnología de preparación de fertilizantes a partir del digestato.

Cálculos de sustitución del diesel de las labores de mecanización con el biometano. Para lo cual se hallaron los datos técnicos de un tractor a biometano y sus costos y una estación de carga de combustible para vehículos.

Además se llevó a cabo un benchmarking del modelo de producción de biogás de la región Sur del Brasil, por medio de las experiencias contenidas en el Proyecto Concordia SC (Probiogás, 2015) a fin de revisar los materiales de construcción utilizados, la tecnología y los costos de inversión y operacionales para la planta de biogás y datos del KTBL de Alemania (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft [KTBL], 2019).

La viabilidad económica se determinó a partir de los indicadores financieros:

Valor actual neto (VPN): es el valor que actualiza mediante una tasa de descuento o actualización prefijada, el flujo de beneficios netos (beneficios totales-costos totales) generados para un proyecto de inversión. La expresión del VAN es:

$$VAN = - I_0 + \frac{FF_1}{(1+r)} + \frac{FF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{FF_n}{(1+r)^n}$$

Donde: I_0 : Inversión inicial; r : Tasa de descuento. Tasa de interés a la que se hubiera invertido ese dinero; FF : flujo de fondos netos; n : cantidad total de períodos. Un proyecto será rentable siempre y cuando el $VAN > 0$.

Tasa interna de retorno (TIR): se evalúa en función a una única tasa de rendimiento por periodo, con el cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos, expresados en moneda actual. La expresión matemática de la TIR es la siguiente:

$$0 = - I_0 + \sum^n \frac{FF_n}{(1+TIR)^n}$$

La TIR debe ser comparada con una tasa mínima que representa el costo de oportunidad de la inversión: es decir que rendimiento hubiera tenido si invierto el dinero en otro instrumento

De manera tal entonces: Si $TIR > r$ entonces se rechazará el proyecto. Si $TIR < r$ entonces se

aprobará el proyecto.

Payback del proyecto: es un criterio para evaluar inversiones que se define como el periodo de tiempo requerido para recuperar el capital inicial de una inversión. Es un método estático para la evaluación de inversiones.

A fin de realizar estos cálculos fue necesario establecer los costos totales del proyecto, que es la suma de los costos fijos más los variables.

Para la viabilidad económica, en todos los escenarios se contempló un plazo de 20 años de vida del proyecto, 5% de tasa de descuento y un préstamo de US\$ 2 millones.

La determinación del potencial de producción de biogás de cada sustrato se realizó a partir de cálculos teóricos basados en la literatura proveída por Deublein & Steinhauser (2009). Según el rendimiento de cada producto y la generación de residuos, se multiplicó el factor (A) por el factor de generación de residuo (B), según las siguientes fórmulas:

$$PB = REB \times CO \times \eta$$

Donde: PB = Potencial de biogás (Nm^3 biogás al 60% CH_4 /día o jornada producción), REB = Rendimiento específico de biogás del sustrato = $0,53 Nm^3$ biogás al 60% CH_4 /kg DQO removido,

CO = carga orgánica del sustrato (kg DQO/día o jornada de producción), η = eficiencia de conversión (asumida o documentada) para el sustrato

Para el cálculo del ahorro generado por la utilización del digestato de estiércol de cerdo, igualmente se utilizó como fuente la literatura utilizada en (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Análisis técnico

1.1. Funcionamiento y aplicación

El objetivo de los modelos planteados en este estudio es que puedan sustituir hasta cierto grado la utilización del diésel de las labores culturales agrícolas con el biometano, por lo cual es necesario que el Biodigestor se encuentre en una zona cercana a centros de producción de cerdo y de cultivos agrícolas del complejo soja, trigo y maíz, asociados a la producción de balanceados para la alimentación de cerdos. Asimismo, la cercanía a los cultivos agrícolas será necesaria para el transporte y aplicación del digestato a los campos, a través de tractores movidos a biometano, los cuales deberán ser adquiridos a fin de que esta propuesta

pueda funcionar. Para dicho fin, en el cálculo de viabilidad se tiene en cuenta el costo de instalación de una estación de carga de combustible. También debería contemplarse una eventual adaptación de equipamientos para la aplicación del digestato en forma líquida, aunque esta tecnología se encuentra disponible en el mercado paraguayo y la mayoría de los equipos son de común utilización.

1.2. Tecnología para la producción de biogás

La tecnología utilizada es la del Proyecto Concordia (SC) (Figura 1). El sistema de digestión estándar

fue el sistema continuo (CSTR, *Continuously Stirrer Tank Reactor*) trabajando con sistema mesofílico, donde la temperatura interna del reactor puede variar entre 35-40°C. La opción del digestor fue el tanque cilíndrico, con cuerpo metálico y acabado esmaltado interno, aislamiento térmico externo, sistema de calefacción interna vía serpentinas y cubierta metálica y rígida. Para mejorar la calidad del gas y también contribuir al buen funcionamiento y durabilidad de los equipos y del motor generador de energía, se considera un proceso de desulfurización para eliminar el H₂S del biogás.

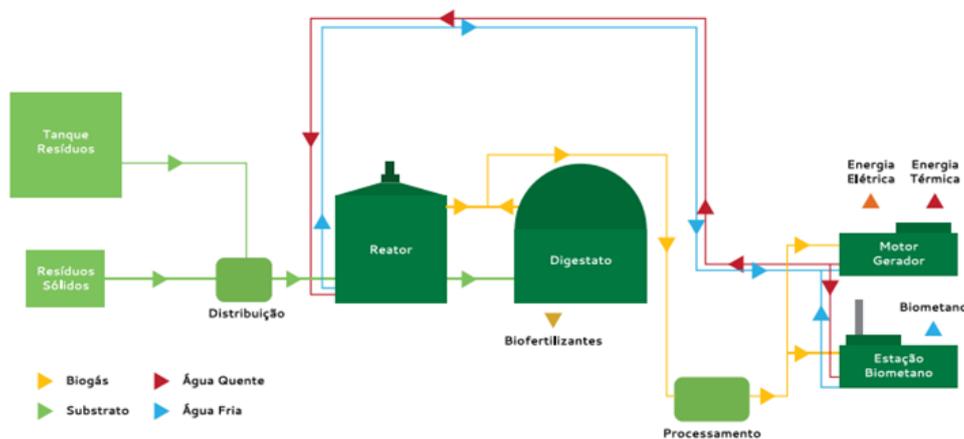


Figura 1. Diagrama básico de la Planta de Biogás del Proyecto Concordia/SC. Fuente: (Probiogás, 2015).

1.3. Tecnología del upgrading

Es necesario adicionar un costo de “upgrading” o purificación del biogás para producir biometano. En el proceso de valorización del biogás para obtener el biometano el objetivo principal es eliminar el CO₂ que transporta el biogás.

Existen distintos métodos empleados industrialmente para la purificación. Las técnicas más extendidas en Europa son la absorción física, la adsorción mediante sistemas PSA (*Pressure Swing Adsorption*), la absorción química y la separación con membranas (García Sánchez, 2016).

Para una Planta de biometanización con capacidad de 250 Nm³ h⁻¹, y asumiendo un contenido de biometano de 65 Vol % en el biogás crudo y un 5% de pérdidas en la absorción con agua menos 2% de pérdidas para el lavado amino. Datos presentados en la Tabla 1.

En este estudio se prefirió utilizar la tecnología de Absorción con Agua, por presentar los costos operativos más bajos, además de ser de simple aplicación y mantenimiento.

Tabla 1. Costos de upgrading según distintas tecnologías.

Tecnología	Inversión total	Costos operativos
Absorción con Agua	US\$ 1.316.750	de 0,011 US\$ kWh
Absorción química	US\$ 974.510	0,013 US\$ kWh
Membranas	5.635 US\$ por Nm ³ h ⁻¹ biometano	0,008 - 0,013 US\$ kWh

Fuente: Mitschke, Linnenberg, Nau, Pinasco & Ramoska (2016).

1.4. Escenario 1: producción de biogás con estiércol de cerdo y ahorro de combustible con la utilización del biometano.

En este escenario la producción del biogás se calculó a partir del estiércol producido de 25.000 cerdos de engorde por año, de uno o varios establecimientos.

El cálculo del precio de venta del fertilizante arrojó un precio de venta considerado en US\$ 3,6 por tonelada

Tabla 2. Resultados económicos Escenario 1.

Sustrato (toneladas base húmeda)	75.000	Tractor a Biometano (US\$)	150.000	Ganancia neta anual (US\$)	760.541
Costos civiles y equipo electromecánico (US\$)	1.541.762	Costos variables anuales (US\$)	280.623	TIR	25,8%
Tecnología de Absorción con Agua 250 Nm ³ h ⁻¹ (US\$)	1.316.750	Gas m ³	2.145.000	VPN (US\$)	7.650.685
Estación de carga para vehículos (US\$)	285.938	Biometano m ³	1.231.230	Payback	9 años

Fuente: elaboración propia

en base húmeda, y es necesario para establecer el ahorro por la sustitución del fertilizante mineral. El precio fue obtenido teniendo en cuenta los nutrientes contenidos y el precio de mercado del Nitrógeno, Fósforo y Potasio.

Es posible estimar una reducción de hasta 30% de los costos según cada caso, ya que cada proyecto es único y pueden existir materiales e infraestructura que abaraten mucho la inversión inicial. La tecnología debe ser mayormente importada de países con reconocida experiencia en la producción industrial del biogás. De cualquier forma, según los cálculos el proyecto demuestra ser rentable, aunque con un tiempo de recuperación del capital (Payback) relativamente alto (Tabla 2). Esta Planta de Biogás tiene un potencial de generación de energía 500 kW.

Cálculo de sustitución del diésel con biometano

A fin de determinar el ahorro en diésel, se calculó primeramente el costo por hectárea de mecanización por rubro considerado a partir de datos de (Enciso, 2019). Seguidamente, las horas de tractor necesarias se determinaron sumando las labores de mecanización.

	Soja	Maíz	Trigo
Costo total de diésel por ha en US\$	461	427	418
Total de horas necesarias de tractor por ha	2,5	5,75	5,8

Datos técnicos del tractor a biometano

A modo de ejemplo se presenta el caso de los tractores Valtra Dual Fuel (Valtra, 2019). Los mismos pueden funcionar con gas natural, con biogás adaptado a vehículos o con gasoil. En los tractores Valtra Dual Fuel el motor diésel normal AGCO POWER se transforma para usar dos tipos de combustible. La mayor parte de la potencia -hasta el 83%- se genera por medio de metano procedente de gas natural o de biogás refinado y el resto por medio de combustible diésel para provocar la ignición de la mezcla gas-aire según el ciclo diésel.

El contenido en metano del gas natural vehicular

debería ser de un 95% (+/- 2%). Para cumplir los requisitos de la homologación de tipo se requieren combustibles con calidades estandarizadas.

Capacidad volumen depósito de combustible: 192 litros a una presión de hasta 200 bar (equivalente a 35 litros de combustible diesel).

Rendimiento: 4 horas de uso.

Consumo por hora: 48 m³ biometano por hora

Con estos datos se calculó el ahorro probable de diésel por rubro.

El mayor ahorro se produce en el cultivo de soja -debido a la mayor necesidad de mecanización- (Tabla 3), por lo tanto, se justifica la utilización del biometano en este rubro por sobre los demás, además de que la soja presenta mejores precios de mercado y por lo tanto aporta mayor renta al producto

Tabla 3. Ahorro estimado de combustible para tractor, sustituyendo con Biometano.

	Soja	Maíz	Trigo
Hectáreas por año y rubro	2.565	1.115	1.106
Ahorro por año (US\$)	264.201	197.398	184.640

Fuente: elaboración propia.

1.5. Escenario 2: estiércol de cerdo + ensilaje de maíz

En este escenario se mantiene la misma estructura de costos y tecnología, combinando el ensilaje de maíz con estiércol producido a partir de 5.000 cerdos. Se completa la carga energética (para producir biogás) con la adición del rendimiento de 32 hectáreas de ensilaje de maíz para la digestión, con lo cual se alcanzaría una potencia del 1.000 kW. El rendimiento promedio de la masa verde del maíz se estimó en 45 toneladas por hectárea. El cálculo del precio de venta del fertilizante arrojó un precio de venta considerado en US\$ 4,2 por tonelada en base húmeda.

Debido a la mayor capacidad de generación energética también se reduce el plazo de recuperación del capital y aumenta la rentabilidad (Tabla 4). Este modelo resulta interesante porque representa una alternativa al productor agrícola, ya que, como se verá en el siguiente análisis, difícilmente el maíz

genera una rentabilidad satisfactoria al productor debido a los precios y los bajos rendimientos promedio nacionales.

Costo de oportunidad de la venta de grano de maíz versus producción de biogás

Tabla 4. Resultados económicos Escenario 2.

Sustrato (toneladas base húmeda)	29.324	Tractor a Biometano (US\$)	150.000	Ganancia neta anual (US\$)	1.202.408
Costos civiles y equipo electromecánico (US\$)	2.640.896	Costos variables anuales (US\$)	398.944	TIR	31,7%
Tecnología de Absorción con Agua 250 Nm ³ h ⁻¹ (US\$)	1.316.750	Gas m ³	3.999.083	VPN (US\$)	13.717.654
Estación de carga para vehículos (US\$)	285.938	Biometano m ³	2.295.474	Payback	6,6 años

Fuente: elaboración propia

Se utilizó la ganancia neta anual para calcular la ganancia total de la producción de biogás, manteniendo los datos anteriores de costos, precio y hectáreas producidas. Rendimiento del grano 4.500 kg por ha con un costo de US\$552 ha⁻¹; precio del maíz en Mercado de Chicago pronosticado para marzo de 2019 (US\$ 146,16 por tonelada) (Tabla 5).

La diferencia a favor de la cogeneración del maíz en una Planta de Biogás es debido principalmente al potencial energético del maíz y su alto rendimiento. En caso de una eventual necesidad de alquilar la tierra no habría ganancia para el productor en este rubro. Se evidencia a través de este cálculo la delicada situación del productor de maíz, ya que obtiene la mayor parte de sus ganancias a través de la soja, quedando el maíz como cultivo

complementario que no ofrece mucha renta, salvo en los casos de rendimientos cercanos a los 10.000 kg.ha⁻¹, obteniendo así rentas de alrededor de US\$ 1.000 ha⁻¹.

La renta de este modelo se materializa al subsidiar al cultivo de la soja con la incorporación del biometano y el digestato. Al no haber la posibilidad legal de comercializar el biometano y al no haber un mercado para el digestato, conviene aplicarlo en los campos agrícolas de la región de impacto del proyecto.

Según este escenario, el biometano producido alcanzaría para subsidiar la labor de mecanización de 4.782 hectáreas de soja, solamente destinando el 0,67% de esa superficie (32 ha de maíz) para la generación de energía y fertilizante.

Tabla 5. Comparación de la rentabilidad de la producción de 32 ha de maíz con la producción de biogás con ensilaje de maíz.

Venta del grano (a)		Digestión en Planta de Biogás (b)	
Ingreso total	US\$ 20.936	Ganancia neta anual	US\$1.060.080
Ganancia o pérdida	US\$ 3.365	Ganancia o pérdida por ha	US\$ 33.303
Ganancia o pérdida por ha	US\$ 106	Diferencia (a versus b)	US\$ 33.197

Fuente: elaboración propia

1.6. Escenario 3: estiércol de cerdo + granos de trigo

En este escenario se combinan los granos de trigo con estiércol producido a partir de 5.000 cerdos. Los granos de trigo deberán provenir del rendimiento de 185 hectáreas, estimándose un rendimiento promedio de 3.000 kg por hectárea (555 toneladas en total), superior al promedio nacional (2.000 kg). De esta forma se alcanzaría una potencia de 1.000 kW. El cálculo del precio de venta del fertilizante arrojó un precio de venta considerado en US\$ 4,6

por tonelada en base húmeda.

El costo total de este modelo es de US\$ 5.794.486 (Tabla 6). Se observa el plazo de recuperación ligeramente superior al escenario anterior, esto se debe a la menor cantidad de sustrato utilizado, lo cual resulta en una menor cantidad final de digestato disponible. En combinación, ambos sustratos -maíz y trigo- sumados a otro sustrato co-generador hacen una buena mezcla y pueden generar resultados igualmente dignos de considerar.

Tabla 6. Resultados económicos Escenario 3.

Sustrato (Toneladas base húmeda)	20.564	Tractor a Biometano (US\$)	150.000	Ganancia neta anual (US\$)	1.027.149
Costos civiles y equipo electromecánico (US\$)	2.640.896	Costos variables anuales (US\$)	475.561	TIR	27,2%
Tecnología de Absorción con Agua 250 Nm ³ h ⁻¹ (US\$)	1.316.750	Gas m ³	3.931.723	VPN (US\$)	10.169.903
Estación de carga para vehículos (US\$)	285.938	Biometano m ³	2.256.809	Payback	7,6 años

Fuente: elaboración propia

Costo de oportunidad de la venta de grano de trigo versus producción de biogás

Se utilizó la ganancia neta anual para calcular la ganancia total de la producción de biogás, manteniendo los datos anteriores de costos, precio y hectáreas producidas. Rendimiento del grano 3.000 kg ha⁻¹ con un costo de US\$ 540 ha⁻¹; precio del trigo en Mercado de Chicago pronosticado para marzo de 2019 (US\$ 185,74 por tonelada). (Tabla 7).

El productor de trigo se beneficiaría más con la co-generación del grano de trigo en un Planta de Biogás. El trigo no ofrece muchas ventajas actualmente al productor, debido al precio volátil pero también a los bajos rendimientos promedio nacionales. En caso de llegar a los 3.000 kg.ha⁻¹ se obtendría una renta de US\$ 84 ha⁻¹, pero es difícil predecir que las condiciones climáticas se mantengan óptimas. Al tener Paraguay un clima sub-tropical, las variedades de trigo no logran los rendimientos que se obtienen en climas fríos, por lo cual la venta del grano de trigo en bruto no representa mucho atractivo, sino sólo en caso de lograr transformaciones sucesivas en sus subproductos (Tabla 7).

Según este escenario, el biometano producido alcanzaría para subsidiar la labor de mecanización de 4.702 hectáreas de soja, destinando el 3,94% de esa superficie (185 ha de trigo) para la generación de energía y fertilizante.

Al hacer la comparación de los resultados obtenidos en maíz y trigo, el maíz logra una diferencia de US\$ 27.742 a favor. Lógicamente dichos rubros son producidos en épocas diferentes (el maíz es cultivo de verano) y por lo tanto no compiten entre sí, sino que se complementan y pueden lograr en conjunto

un efecto multiplicador más que interesante para apoyar la gestión de Cooperativas o Asociaciones de Productores, por ejemplo. Normalmente estos granos son directamente comercializados en bruto o se encuentran almacenados en silos de granos aguardando mejores precios de los mercados internacionales, siendo que estos mismos granos, utilizados a conciencia pueden generar ganancias mayores, desarrollar tecnología, industrialización, investigación y desarrollo.

Los planteamientos realizados en ambos escenarios no dejan de observar la necesidad de producción de alimentos para el mundo, de hecho, viene a aportar, en el sentido de que la agricultura hoy necesita ser más eficiente y rentable, debe serlo debido a la fluctuación de los precios y los costos competitivos, además no se puede confiar por siempre al Estado la labor de subsidiar los riesgos de la labor productiva.

Ante un eventual desacuerdo sobre la utilización del maíz y el trigo, se podría considerar lo siguiente: si se dejara de utilizar 1 ha de maíz para cultivar 1 ha de sorgo (También interesante para producir biogás), tranquilizaríamos la consciencia del que no quiere que se cargue el maíz en el biodigestor, sin embargo, dejamos de producir 1 ha de maíz, y aún necesitaríamos más hectáreas de sorgo para completar la necesidad energética, porque el maíz tiene más potencial energético que el sorgo. Además, el ensilaje de maíz también se utiliza normalmente como forraje en la alimentación animal; de la misma forma el trigo es utilizado en raciones de balanceados para animales. Así se ve que finalmente es una cuestión de eficiencia y transformación energética: el maíz y el trigo procesados en el biodigestor finalmente son transformados en energía para la producción de alimentos para el consumo humano.

Tabla 7. Comparación de la rentabilidad de la producción de 185 ha de trigo con la producción de biogás con ensilaje de maíz.

Venta del grano (a)		Digestión en Planta de Biogás (b)	
Ingreso total	US\$ 103.343	Ganancia neta anual	US\$ 1.027.227
Ganancia o pérdida	US\$ 15.542	Ganancia o pérdida por ha	US\$ 5.539
Ganancia o pérdida por ha	US\$ 84	Diferencia (a versus b)	US\$ 5.455

Fuente: elaboración propia

Otro punto a considerar es que en los escenarios considerados solamente se utilizaron 32 ha de maíz (1.440 toneladas de masa húmeda) y 185 ha de trigo (555 toneladas). Para el desarrollo del escenario 2 (Maíz) se calculó una baja densidad de superficie cultivada (Gracias al buen rendimiento de masa verde del maíz), teniendo en cuenta que para el buen desempeño de una finca agrícola del complejo soja es preferible partir de una superficie de 100 ha para alcanzar economía de escala. En cuanto al escenario 3, los rendimientos relativamente bajos del trigo hacen que la necesidad de superficie sea mayor, por lo cual es preferible tener en cuenta esta opción para grandes productores o en su defecto generar asociaciones.

En este caso se podría haber tenido en cuenta la utilización del trigo en masa húmeda, pero se decidió así a fin de demostrar la complementación positiva de los granos para la producción de biogás y dejar entrever opciones de utilización de los granos que hoy son almacenados en los Silos de granos esparcidos a lo largo del país. Estos Silos consumen gran cantidad de energía, lo cual se traduce en costos que deben ser cubiertos: con el uso de los granos y un biodigestor podrían reemplazar el uso de la leña, electricidad y otros carburantes con el biogás para generar ahorros.

Para ambos escenarios no es necesario destinar todo el cultivo para la producción de biogás y digestato, sino solamente conforme a la necesidad energética. Esto se determina según la envergadura del proyecto, la meta de producción, la disponibilidad del sustrato co-generador que aporta la humedad -en este caso el estiércol de cerdo que también aporta carga orgánica o en su defecto de la disponibilidad de agua, entre otros factores. Este estudio consideró escenarios de gran escala y por lo tanto de alta inversión de capital, de manera tal que la mejor opción para posibilitar

la implementación de proyectos de este tipo sería la asociación entre productores agropecuarios, cooperativas o inversionistas privados (Joint Ventures).

En el análisis de los modelos brasileños resultó fundamental la asociación con institutos de investigación y de capacitación para obtener mejores resultados. Cabe señalar que el apoyo del Gobierno es un elemento influyente para el éxito del modelo, siendo de interés del mismo apoyar la gestión privada para elevar la oferta energética nacional.

1.7. Escenario 4: ahorro de fertilizante en la producción de soja, trigo y maíz (según escenario 1)

A fin de exponer las posibilidades y ampliar las perspectivas acerca de la capacidad de los modelos presentados para generar aportes al sector agropecuario, en este sub-capítulo se desglosan los resultados obtenidos en el Escenario 1 en cuanto al aporte del digestato a la rentabilidad de la producción. Además, se presentan opciones de tecnologías para la fertilización con este material.

En cada proyecto, las formulaciones para la fertilización varían de acuerdo con el cultivo, el tipo y el origen del suelo, las condiciones físico-químicas de la tierra, la región geográfica y la productividad deseada. En estos cálculos se tuvo en cuenta sólo la dosis recomendada para cada rubro, el sustrato considerado fue el digestato de estiércol de cerdo.

Preparación del fertilizante.

El estiércol de cerdo, después de la fermentación, pasa por un proceso de separación estándar, como se puede observar en la Figura 2. La parte líquida, puede ser utilizada como biofertilizante o encaminada

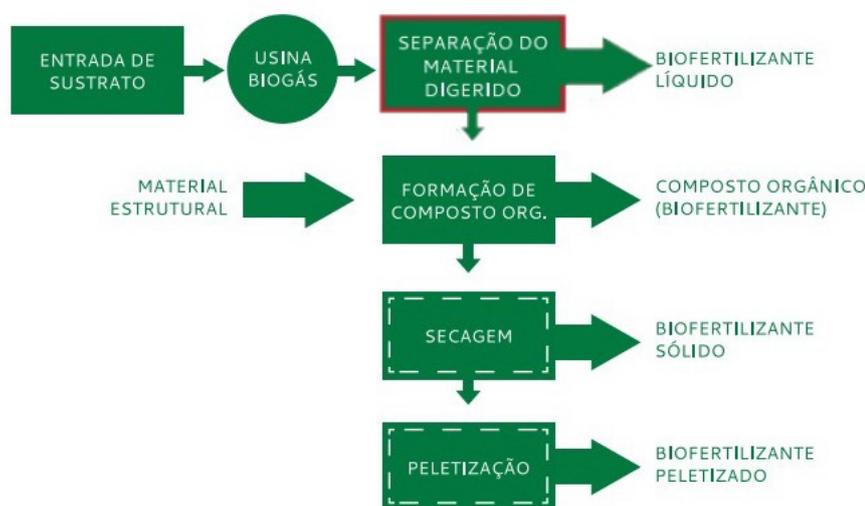


Figura 2. Diagrama del proceso de obtención del biofertilizante sólido.

Fuente: Probiogás, 2015.



a un proceso de tratamiento y la parte sólida puede ser destinada a la comercialización como fertilizante sólido.

La separación de los biofertilizantes líquido y sólido puede ser realizada en equipos, tales como centrífuga, centrífuga decanter, criba estática y screw press. Se considera una separación eficiente cuando la fracción sólida representa del 5 al 10% del peso con un contenido de masa seca entre el 20 y 22% y la fracción neta representa del 90 al 95% del peso con un contenido de masa seca entre el 2 y 3%. La parte sólida todavía podrá pasar por un sistema de secado abierto o por un secador rotatorio hasta alcanzar el contenido del 15% de humedad, posibilitando la peletización.

Durante la peletización, la temperatura del proceso es superior a 70°C, con lo que es posible garantizar también la higienización del material, cuando sea necesario. Sin embargo, el proceso de peletización acarrea en costes adicionales para el producto final, el cual debe ser suplido por la venta del producto. (Probiogás, 2015).

Producción de fertilizante y ahorro generado

Se observa en la Tabla 8, que el Fósforo es el principal componente disponible en el digestato y el que puede

generar mayor ahorro, ya que partes del Nitrógeno se volatilizan en el proceso. El ahorro total es de US\$ 395.160 anuales. La rentabilidad es variable conforme los precios del mercado de los fertilizantes minerales y -al igual que en todos escenarios- la misma se materializa al ahorrar costos, en este caso de fertilización. Partiendo del Escenario 1, siendo éste alimentado puramente con estiércol de cerdo, bien podría servir para subsidiar varios rubros agrícolas indistintamente, a diferencia de los Escenarios 2 y 3, en los que la producción energética y el digestato sirven para subsidiar al cultivo de soja.

En la Tabla 9 se destaca que la soja no se incluye debido a su capacidad de auto-generación de Nitrógeno a partir de las bacterias del género *Rhizobium*. En lo que respecta a la disponibilidad de los elementos individualmente, es necesario separarlos a través de tecnologías especiales. En cuanto al estiércol de cerdo, no se consideraron medidas de mitigación de la carga eléctrica presente en el mismo. Con todo, al calcular la cantidad de fertilizante aplicado por hectárea con el digestato, es posible determinar la necesidad de complementación o no con fertilización mineral y el ahorro final. Se destaca que en trigo se puede alcanzar mayor superficie de fertilización en los tres macro elementos -con respecto a los demás rubros- debido a su menor exigencia de fertilización.

Tabla 8. Ahorro total anual de Nitrógeno, Fósforo y Potasio.

	N	P ₂ O ₅	k ₂ O
Compuesto NPK digestato	3,6%	2,5%	2,4%
Concentración de nutrientes base seca kg t ⁻¹	27,2	18,9	18,1
Eficiencia agronómica	50%	80%	100%
Nutrientes disponibles base seca kg t ⁻¹	163	181	217
Precio US\$ por kilogramo	0,7	0,82	0,61
Ahorro US\$	114.093	148.502	132.565

Fuente: elaboración propia con datos de Probiogás (2015) y Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe [FNR], (2010).

Tabla 9. Hectáreas posibles de fertilización por año por cultivo según necesidad y elemento (FNR, 2010).

	N	P ₂ O ₅	k ₂ O
Soja	-	4.022	3.103
Maíz	1.123	1.508	2.715
Trigo	1.810	4.022	7.240

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que el trigo y el maíz, dos rubros ampliamente cultivados en Paraguay, logran producir mayor rentabilidad a través de la sustitución del diesel y los fertilizantes minerales que se utilizan en el cultivo de la soja, utilizando el mismo material genético, tecnología productiva y know-how del productor tradicional del complejo soja, trigo, maíz.

La fertilización con digestato demuestra ser una opción rentable, pudiendo utilizarse en forma líquida o sólida. La peletización presenta una alternativa de ganancia adicional como producto de venta al mercado.

Siguientes estudios complementarios podrían concentrarse en rubros como el sorgo y pasto elefante en combinación con estiércol bovino (Proveniente de tambos lecheros o feedlots).

AGRADECIMIENTOS

La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo del CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), dentro del marco del proyecto de investigación PINV15-949 "Viabilidad técnica y económica de la utilización de biodigestores como complemento de sector agroindustrial paraguayo". El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso se debe considerar que refleja la opinión del CONACYT

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación Rural del Paraguay. (2017). *Introducción a Paraguay y su Sector Cárnico*. Asociación Rural del Paraguay (ARP). 12 p
- CAPECO (Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas). (2020). Area de Siembra, Producción y Rendimiento (en línea). Consultado 1 set. 2020. Disponible en <http://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento>
- Cresta, J. (2014). *Sector agroindustrial: ¿El turbo o un solo cambio más de la economía paraguaya?* Asunción : Observatorio de Economía Internacional (OBEI). 11 p.
- Deublein, D. & Steinhauser, A. (2009). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Weinheim, Alemania : WILEY-VCH, Vch Verlagsgesellschaft Mbh. 450 p.

- Enciso, V. (2019). *Soja, datos, estadísticas y comentarios*. San Lorenzo, Paraguay : Facultad de Ciencias Agrarias, UNA. Departamento de Economía Rural. 16 p.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. (2010). *Guía sobre el Biogás, desde la producción hasta el uso*. Asunción : FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit. 249 p.
- García Sánchez, F. J. (2016). *Producción de biometano a partir de biogás de vertedero*. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla Sevilla. 113 p.
- GIZ (Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit D. G.). (2011). *Situación actual de las Energías Renovables en Paraguay*. Asunción, Paraguay. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 83 p.
- Investor. (2015). *Agricultura y desarrollo en Paraguay. Unión de Gremios de la Producción - UGP*. Asunción : AGR Servicios Gráficos. 114 p.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2019). *Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas* (en línea). Darmstadt, Alemania. Consultado 1 set. 2020. Disponible en: <https://daten.ktbl.de/biogaso/?zustandReq=1&selectedAction=showMona#st-art>
- Mitschke, T., Linnenberg, C., Nau, D., Pinasco, H. y Ramoska, J. (2016). *Reporte II: Análisis de tecnologías de purificación del biometano y aspectos principales para pequeñas y medianas plantas de biogás*. AD Solutions UG (haftungsbeschränkt). p. 14-46.
- Probiogás (Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil). (2015). *Anteprojeto de uma usina de pesquisa e capacitação em biogás*. Brasil : Ministério das Cidades. 160 p.
- Probiogás (Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil). (2015). *Caderno 3: Oportunidades de negócio para a comercialização do fertilizante sólido procedente do tratamento de material digerido de uma planta de biogás*. Brasil : Ministério das Cidades. 25 p.
- SENACSA (Servicio Nacional de Calidad y Salud Animal). (2018). *Estadística Pecuaria* (en línea). San Lorenzo, Paraguay : SENACSA. Consultado el 1 ene. 2019. Disponible en <http://www.senacsa.gov.py/index.php/informaciones/estadisticas/estadistica-pecuaria-2018>.
- Valtra. (2019). *Productos* (en línea). Valtra Inc. Consultado 1 ene. 2019. Disponible en <http://africa.valtra.com/en/dual-fuel>