

# **Producción de biogás a partir de la biodegradación anaeróbica de la “vinaza” generada por las destilerías de alcohol y su aprovechamiento energético como combustible de calderas bajar los gases invernadero**

---

Miguel E. López B.

## **Introducción**

El ingenio azucarero, dentro de su proceso, obtiene como residuo de la fabricación de azúcar un líquido espeso rico en azúcares llamado melaza, que es utilizado como materia prima para la fabricación de alcohol etílico en la destilería. Esta melaza es diluida con agua y fermentada por la acción de las levaduras para transformar el mayor contenido de azúcares en alcohol y CO<sub>2</sub>. Luego, este vino fermentado pasa por la columna de destilación para separar el alcohol por la parte superior de la columna y por la parte inferior sale un líquido color café llamado “vinaza”, que sería el efluente de la destilación, la cual contiene una gran variedad de componentes que en conjunto le confieren características especiales y su descarga indiscriminada puede ocasionar daños al medio ambiente.

Con la finalidad de encontrar una alternativa de solución y aprovechamiento de la vinaza, este estudio presenta el beneficio energético que la destilería puede aplicar utilizando los conceptos de ecoeficiencia, bajando los impactos de efecto invernadero causados por el metano que va a la atmósfera, el mismo que se forma por la descomposición natural de la materia orgánica en el almacenamiento de la vinaza.

## **Metodología**

La generación de vinaza en la destilería es directamente proporcional a la producción de alcohol, el volumen generado dentro de la destilería oscila entre 11 y 15 litros de vinaza por cada litro de alcohol producido. La carga orgánica de la vinaza depende de la materia prima utilizada en la producción (DQO de 50.000 a 115.000 mg/l). El contenido de potasio de la vinaza es aprovechado en las plantaciones de caña como fertirriego y para ello hay que almacenarla en piscinas que por degradación anaeróbica forma metano y es emitido a la atmósfera como un gas de efecto invernadero. Afortunadamente, la materia orgánica puede ser aprovechada en un sistema controlado con biodegradación anaeróbica y captar el metano que puede ser aprovechado por la destilería como energía alternativa.

Figura 1  
Ciclo de producción de la caña, el azúcar, el alcohol y la vinaza

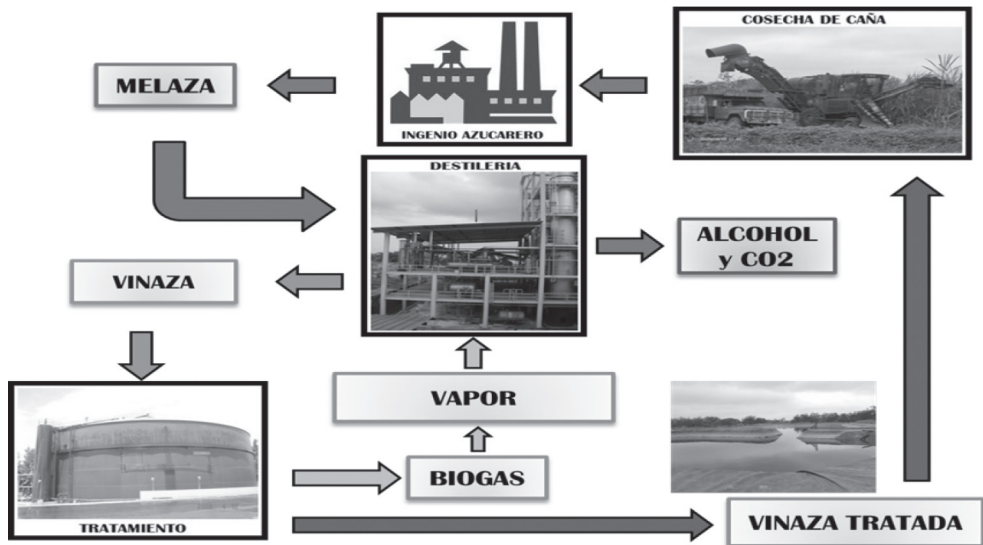


Figura 2  
Reservorios de vinaza



## **Fundamentación teórica**

### ***Vinaza de la caña de azúcar***

La vinaza es un material líquido resultante de la producción de alcohol etílico, ya sea por destilación de la melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de caña.

### ***Composición físico-química de la vinaza***

En la vinaza, se encuentra una gama amplia de compuestos orgánicos: alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos y azúcares.

### ***Impacto ambiental ocasionado por la vinaza***

Debido a su elevado contenido de materia orgánica, la vinaza se constituye en un material altamente contaminante, si se dispone directamente a un cuerpo de agua, ya que los valores de DQOs (Demanda Química de Oxígeno soluble) y DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) para un contenido aproximado de 10% de sólidos m/m son 116.000 y 41.200 mg/l respectivamente, lo cual hace necesario su tratamiento antes de ser eliminado.

### ***Fermentación anaeróbica para producir biogás***

La fermentación anaeróbica es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas.

### ***Composición y características del biogás***

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano CH<sub>4</sub> en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.

### ***Principios de la fermentación anaeróbica***

La generación de biogás, mezcla constituida fundamentalmente por metano (CH<sub>4</sub>) dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y pequeñas cantidades de hidrógeno (H<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>), constituye un proceso vital dentro del ciclo de la materia orgánica en la naturaleza.

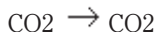
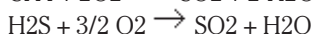
Las bacterias metanogénicas en efecto constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos encargados de digerir la materia orgánica y devolver al medio los elementos básicos para reiniciar el ciclo. Se estima que anualmente la actividad microbiológica libera a la atmósfera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano.

### ***Fases que intervienen en la biodigestión anaeróbica***

1. Fase de hidrólisis: Las bacterias toman la materia orgánica y la transforman en ácidos orgánicos liberando hidrógeno y dióxido de carbono.
2. Fase de acidificación: Las bacterias acetogénicas realizan la degradación de los ácidos orgánicos llevándolos al grupo acético (CH<sub>3</sub>-COOH) y liberando como productos Hidrógeno y Dióxido de carbono.
3. Fase metanogénicas: Estas bacterias son del grupo de las arqueobacterias, se cree que pertenecen a los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre.

### ***La combustión del biogás***

La combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro, puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas:



### ***Gases de efecto invernadero***

Los gases regulados son:

- El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- El metano (CH<sub>4</sub>)
- El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Los hidrofluorocarbonos (HFC)
- Los perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)

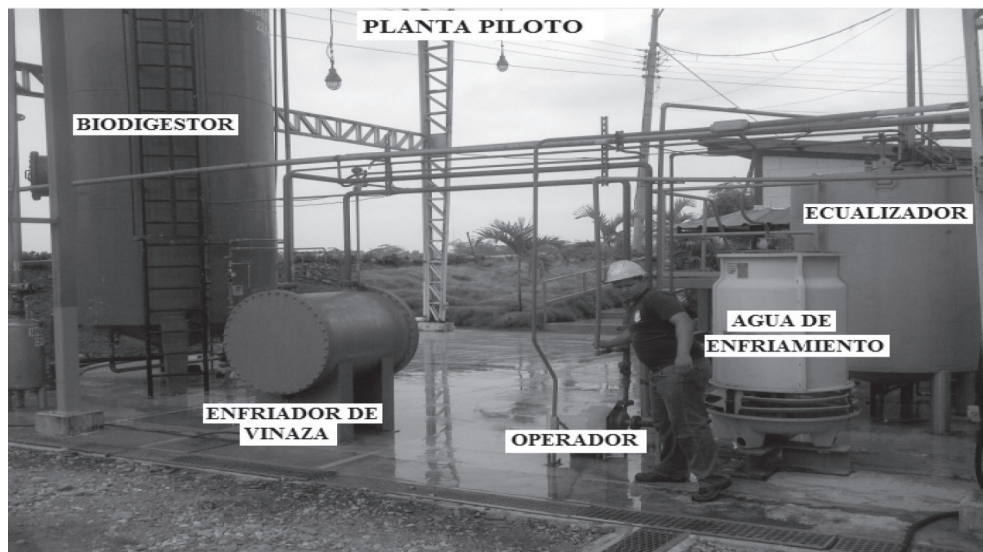
Los gases de efecto invernadero tratados en el Protocolo de Kyoto que deben ser reducidos, son 6 (ver tabla 1).

### **Investigación, métodos y cálculos**

#### ***Localización y duración del experimento***

El trabajo experimental se desarrolló utilizando la vinaza de la destilería Soderal perteneciente al grupo San Carlos, de la provincia del Guayas.

Figura 3  
Planta piloto de tratamiento de vinaza



Los indicadores de operación fueron:

- Régimen de trabajo: alimentación continua
- Carga orgánica de la vinaza aplicada
- Velocidad de la carga orgánica volumétrica
- Demanda química de oxígeno total y soluble
- Flujo de alimentación
- Tiempo de retención hidráulica
- pH de la vinaza influente (vinaza cruda)
- Remoción de la carga orgánica
- Producción de biogás
- Contenido de metano en el biogás
- Relación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad

### ***Materiales equipos e instalaciones necesarias para el estudio***

Los materiales y equipos utilizados para la experimentación fueron los siguientes:

- Tanque ecualizador (capacidad de 3000 litros)
- Tanque enfriador de vinaza
- Transmisor de temperatura en la línea de salida
- Torre piloto de enfriamiento
- Tanque biodigestor (capacidad de 22.5 m<sup>3</sup>)

## Mediciones experimentales y caracterización

Para los propósitos de la experimentación (ver anexo) se presenta la caracterización realizada a la vinaza y la frecuencia de mediciones que se realizaron para el estudio.

## Método analítico para la determinación del DQOt y DQOs

Este procedimiento establece el método para cuantificar la demanda química de oxígeno (DQO) que es el parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en mg O<sub>2</sub>/litro.

## Fórmulas utilizadas para el cálculo de rendimientos

### Remoción (%) de la DQO total y soluble

La medición del DQO es la manera más eficaz para observar la variación en el consumo de carbono por parte de los microorganismos en el sistema. La medición del DQO a la entrada y la salida del sistema determina la remoción medida en porcentaje para el DQO total y soluble y también si se desea para la DBO:

Porcentaje de remoción DQOt, DQOs y DBO (%)

$$\text{DQOt rem} = ((\text{DQOt in} - \text{DQOt out}) / \text{DQOt in}) \times 100$$

Demanda Química de oxígeno removido (kilos/día)

$$\text{Flujo tratado (litro por día, l/d)} = \text{Alimentación (l/h)} \times 24 \text{ h}$$

DQOt y DQOs removido (kilos por día, kg/d)

$$\text{DQOt remv} = (\text{DQOt in} - \text{DQOt out}) / \text{DQOt in} \times \text{Flujo tratado (l/d)}$$

Contenido de metano en el biogás

$$\text{Producción de biogás (m}^3\text{/d), por (m}^3\text{) por 3 turnos}$$

Contenido de metano en el biogás

$$\text{Contenido de metano (\%)} = 100\% - \% \text{CO}_2 - \% \text{H}_2\text{S}$$

$$\text{Producción de metano (m}^3\text{/d)} = \text{Producción de biogás (m}^3\text{/d)} \times \% \text{ de CH}_4$$

Rendimiento de metano

$$\text{Rendimiento de Metano (m}^3 \text{ de CH}_4\text{/kg DQOs rem)}$$

$$\text{Rendimiento de Metano} = \text{Producción de metano (m}^3\text{/d)} / \text{DQOs rem (kg/d)}$$

## Resumen de datos calculados del aprovechamiento del biogás

Un resumen de los datos del aprovechamiento del biogás, para producir vapor reemplazando al combustible fósil y con este vapor se puede producir energía eléctrica ha-

ciéndolo pasar por un turbogenerador. También podemos observar que para una destilería que produce 17 millones de litros de alcohol anuales, se genera alrededor de 238.000 m<sup>3</sup> de vinaza al año y, que pueden reemplazar 994.785 galones de búnker N° 6 y generar 1'740.874 kWh al año.

### **Cálculos para el aprovechamiento del biogás**

El estimado del biogás generado, es calculado en base a los datos experimentales obtenidos en el estudio. Este biogás está directamente relacionado con la vinaza generada, el índice de vinaza, la demanda química de oxígeno total, la demanda química de oxígeno soluble, el rendimiento de metano, la remoción del DQOs. Los datos calculados son:

- Volumen de vinaza generada anualmente en la destilería: 1.700 m<sup>3</sup> alcohol/año x 14 m<sup>3</sup> vinaza/m<sup>3</sup>alcohol = 238.000 m<sup>3</sup> de vinaza.
- Biogás estimado: 238.000 m<sup>3</sup> de vinaza x 85 kg/m<sup>3</sup> x 0.94 x 77.5 x 0.28/0.55 = 7'502.755 m<sup>3</sup>/año.
- Metano producido: 7'502.755 m<sup>3</sup>/año x 55 m<sup>3</sup> metano/100 m<sup>3</sup> biogás = 4'126.515 m<sup>3</sup> metano.
- Reemplazo de combustible fósil por biogás: 7'502.755 m<sup>3</sup>/año x 33.750 BTU/m<sup>3</sup> Biogás x 0.55 x 1gal Bunker/140000 BTU = 994.785 galones de bunker/año.
- Energía eléctrica en turbogenerador: 994.785 galones de bunker/año x 105 libra de vapor/gal bunker x 1 kWh/60 lb vapor = 1'740.874 kWh/año.

### **Resultados obtenidos en el estudio**

#### ***Caracterización de vinaza que ingresa al biodigestor***

Con los resultados obtenidos, se evidencia que la vinaza es un residuo que resulta agresivo por los elevados valores de carga orgánica (DQO) y su pH ácido. Sin embargo, debido a la relación DBO/DQO se puede deducir que la vinaza es fácilmente degradable por métodos biológicos y en especial por el proceso anaeróbico. Para tener las estimaciones de las características físico-químicas de la vinaza se realizó un muestreo compuesto por el laboratorio acreditado GQM.

#### ***Comportamiento de la DQO total y soluble***

La DQO fue el parámetro que nos dio la cuantificación de la remoción de la carga orgánica. La DQO de la entrada y salida del biodigestor nos permite calcular el porcentaje de remoción del sistema y, este parámetro está directamente relacionado al biogás producido.

#### ***Flujo de vinaza alimentación al biodigestor***

La vinaza fue alimentada paulatinamente al biodigestor, dependiendo de la carga orgánica y tendencia del pH del biodigestor.

### **Caracterización del biogás obtenido en el estudio**

En la tabla 6 se presenta los promedios, máximos y mínimos de las concentraciones de metano, CO<sub>2</sub> y SH<sub>2</sub> analizados en la prueba.

### **Resultados económico por aprovechamiento del biogás**

En la tabla 7 se presenta un resumen de los datos calculados para el búnker remplazado por el biogás, al igual que la energía eléctrica que podemos generar con el vapor y las emisiones reducidas en toneladas de CO<sub>2</sub>.

### **Resultados de los rendimientos obtenidos en el estudio**

La remoción de DQO se da en la etapa final metanogénica, donde se forma CH<sub>4</sub> (muy poco soluble). La materia orgánica inicial contenida en la vinaza termina siendo liberada a la atmósfera en forma de CH<sub>4</sub>, reduciendo así el contenido orgánico del efluente. La conversión teórica de la materia orgánica a metano (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQOs removido), está basada en el equivalente de oxígeno necesitado para degradar el DQOs (materia orgánica soluble en la vinaza) que se convierte a metano y está representada por la ecuación:



El DQOs de 1 mol de CH<sub>4</sub> es 64 (2x32) y la cantidad de metano en condiciones estándar producidas por el metabolismo completo en el proceso anaeróbico es:

$$\frac{22.4 \text{ L} / \text{mol de CH}_4}{64 \text{ g DQOs} / \text{mol de CH}_4} = 0.35 \text{ L CH}_4 / \text{g DQOs}$$

El valor ideal del rendimiento también puede estar dado en m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQOs.

En la tabla 8 se presentan los rendimientos calculados en base a los datos experimentales obtenidos. Es importante destacar que el rendimiento teórico es 0.35 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQOs. En nuestra prueba se ha obtenido un máximo de 0.31 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> por cada kilogramo de DQOs.

Si hacemos referencia al rendimiento teórico, nos presenta que estos, después de estabilizar el proceso, oscilaron entre 0.15 como mínimo y 0.31 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQOs como máximo.

### **Evaluación y discusión de resultados obtenidos**

#### **Evaluación y discusión de resultados experimentales**

En la tabla 9 se muestra un resumen de la caracterización de la vinaza, realizados durante la prueba. Podemos observar que los sulfatos que ingresaron al sistema estuvieron fluctuando entre 2.691 y 3.915 mg/l, medido como SO<sub>4</sub>.

La vinaza utilizada en el estudio fluctuó entre 53.500 mg/l y 78.500 mg/l de DQOt. La producción de biogás depende de los flujos alimentados al biodigestor, la temperatura



del biodigestor, la carga orgánica alimentada, el contenido de sólidos, inhibidores de las bacterias, como los antibióticos utilizados en la destilería, el tiempo de retención hidráulica (TRH).

En el estudio se logró una remoción máxima del DQOt del 81.2% y del 89.7% del DQOs. El tiempo de retención hidráulica es la razón entre el volumen del digestor y la carga diaria dosificada al biodigestor. El mínimo tiempo de retención hidráulica logrado en el estudio fue de 8 días.

### ***Comparación de resultados de la vinaza cruda y la vinaza que sale del biodigestor***

En la tabla 10 se hace una comparación de algunos análisis de la vinaza realizados en toda la prueba. Los resultados nos dan los estimados de la remoción del DQOt y DQOs, la remoción de los sulfatos, el comportamiento del pH, y, los sólidos a la entrada y salida del biodigestor.

### ***Evaluación y discusión de resultados financieros***

El aprovechamiento del biogás generado reemplaza combustible fósil que es utilizado en la destilería y equivale entre el 70 y 75% del combustible utilizado para la producción de alcohol.

Podemos ver que este reemplazo del biogás por el combustible fósil, la energía eléctrica generada en un turbogenerador que es accionada por el vapor producido por la quema del biogás y los bonos de carbono por las emisiones reducidas al ambiente en caso se quiera aplicar el proyecto como mecanismo de desarrollo limpio ante las Naciones Unidas puede ascender a valores de hasta 1'077.714 USD.

### ***Evaluación y discusión de resultados ambientales***

De toda la vinaza generada en la destilería, 238.000 m<sup>3</sup>, se puede generar biogás que puede desplazar 994.785 galones de combustible fósil, bunker N° 6 que a su vez se puede generar y bajar los impactos por consumo de energía eléctrica a razón de 1'740.874 kWh anuales.

### ***Evaluación y discusión de resultados para proyecto MDL***

Con el remplazo del combustible fósil y la captación de metano de las lagunas abiertas, se reduce a la atmósfera 26.975 toneladas de CO<sub>2</sub> y aplicar un proyecto de este tipo como MDL equivale a un aporte de CER (Certificado de Emisiones Reducidas) que depende del valor de la tonelada de CO<sub>2</sub> que cueste en el mercado.

## Conclusiones

El tratamiento de la vinaza, en el sistema anaeróbico utilizado, es viable tanto desde el punto de vista ambiental, económico y socioeconómico, porque constituye un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL).

La implementación de un proyecto de tratamiento de vinaza constituye una medida de mitigación de impactos ambientales, mejorando la calidad del aire de la zona donde se almacena la vinaza, lográndose bajar los impactos de olores ofensivos ocasionado en las lagunas abiertas.

Los rendimientos obtenidos de metano contenido en el biogás constituyen una fuente de aprovechamiento, como energía alternativa, para desplazar combustible fósil utilizado en la destilería.

Esta tecnología contribuye a la reducción del efecto invernadero, al reemplazar las actuales lagunas anaeróbicas abiertas que emiten metano por descomposición natural de la materia orgánica de la vinaza.

El estudio contribuye a minimizar el impacto que produce la vinaza al medio ambiente, lográndose en esta prueba una remoción promedio del 72% del DQO<sub>t</sub> y 77.5% del DQOs.

Con niveles de sulfato en la vinaza, de entre 2.691 y 3.915 mg/l se pudo obtener biogás con un rendimiento máximo de 0.31 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por cada kilogramo de DQOs removido.

El mayor descenso de los sulfatos en la vinaza cruda, hasta valores promedios de 55 mg/l, fue transformado a gas sulfhídrico, que salió con el biogás producido, con niveles del 2.59% de SH<sub>2</sub>.

Una vez estabilizado el sistema, el pH dentro del biodigestor se mantuvo en valores que oscilan entre 6.97 y 7.53. Obteniéndose un efluente con pH neutro después de la biodigestión, esto ayuda notablemente en el manejo de la vinaza degradada para el fertirriego de la caña.

La implementación y operación de un proyecto con esta tecnología constituye un aporte para la empresa ecuatoriana interesadas a reducir la carga orgánica de sus efluentes.

Implementar un proyecto de este tipo contribuye al empleo del sector porque se necesita operadores especializados en el manejo del proceso.

## Referencias

Angelidaki, I.

1997 "Anaerobic Digestion in Denmark past, present and future". *Aprovechamiento Energético de Residuos Orgánicos*, noviembre. Berlín, p. 214-215.

Castro, M.

1993 "Estudio de la melaza de caña como sustrato de la fermentación acetobutílica". Tesis de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Cofre, C.

2001 "Guía para la construcción y operación de una planta de biogás, alimentada con lodos residuales de la Industria Carnea". Tesis de la Universidad Austral de Chile. Valdivia.

Chinoweth, D. y Fannin, K.

2002 "Biological Gasification of Marine Algae". Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, octubre, pp. 87-112.

- Honing, P.  
1974 *Principios de tecnología azucarera*. México: Compañía Editorial.
- Molina-Quiñonez  
2012 “Biodegradación anaeróbica de vinaza y aprovechamiento energético del biogás”. Tesis de la maestría en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad, Ambiente y Seguridad.
- Sanz, J.  
1997 “The Action of antibiotic on the anaerobic digestion process”. *Biotechnology Review*. Vol. 2, p. 11-18.

### Referencias electrónicas

Modelos biogás Ecuador:  
[http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/ManualdeUsuariodelModelodeBiogasdeEcuador\\_V1.pdf](http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/ManualdeUsuariodelModelodeBiogasdeEcuador_V1.pdf)  
Notas sobre biogás:  
<http://espanol.agbioengineering.com/1/post/2010/2/notas-brevs-sobre-biogas-en-ecuador.html>  
Consultas sobre industria y producción en Ecuador:  
<http://www.mipro.gob.ec>  
Centro de investigación, laboratorio CINCAE:  
<http://www.cincae.org/laboratorios.htm>  
Ingenio San Carlos:  
<http://www.sancarlos.com.ec/cincae.php>  
Fermentación anaeróbica:  
<http://www.manuales.com/manual-de/fermentacion-anaerobica>  
Usos del biogás:  
<http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/usos>

### Tablas

Tabla 1  
Equivalencia de gases de efecto invernadero

Gases de efecto invernadero	Fórmula condensada	Equivalencia en CO <sub>2</sub> de una medida de gas (CO <sub>2</sub> e)
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	21
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	310
Hidrofluorocarbonos	HFC	740
Perfluorocarbonos	PFC	1.300
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	23.900

Fuente: Protocolo de Kyoto

**Tabla 2**  
Variables para control de la operación

<b>VARIABLES</b>
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)
Alcalinidad (ALK)
Demanda Química de Oxígeno total (DQOt)
Demanda Química de Oxígeno soluble (DQOs)
Potencial de Hidrógeno (pH)
Sólidos Suspendidos totales (SST)
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)
Niveles de Sulfatos (SO <sub>4</sub> )
Niveles de fosfatos (orto-P)
Porcentaje de metano en el biogás (%CH <sub>4</sub> )
Porcentaje de bióxido de carbono en el biogás (%CO <sub>2</sub> )
Porcentaje de gas sulfhídrico en el biogás (%H <sub>2</sub> S)
Temperatura del biodigestor

**Tabla 3**  
Datos obtenidos en la prueba: vinaza tratada

<b>Operación de la planta piloto: vinaza tratada</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>
Ácidos grasos volátiles	mg/l	2.849	1.370	737
Alcalinidad	mg/l	6.450	5.366	4.300
Ph	s.u	7.53	7.35	6.97
Demanda química total de oxígeno, DQOt	kg/m <sup>3</sup>	28.71	18.39	11.00
Demanda química soluble de oxígeno, DQOs	kg/m <sup>3</sup>	25.20	13.87	5.62
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/l	17569	5362	602
Sólidos suspendidos volátiles, SSV	mg/l	14640	3732	409
Sulfatos, SO <sub>4</sub>	mg/l	191	55	16
% de remoción DQOt	%	81.2	72.0	59.0
% de remoción DQOs	%	89.7	77.5	61.4
Tiempo de retención hidráulica, THR, días	d	29	12	8
Temperatura del digestor	°C	36.0	32.6	26.2
Alimentación de vinaza al digestor	m <sup>3</sup> /d	2801	2122	480
Relación AGV/ALK en digestor	s.u	0.47	0.25	0.15

**Tabla 4**  
**Datos calculados para el aprovechamiento del biogás**

Nomenclatura	Unidad	Zafra
Producción de alcohol	litros/año	17'000.000
Índice vinaza	lt vinaza/lt de alcohol	14
Volumen de vinaza tratada	m <sup>3</sup> /año	238.000
DQOs	kg/m <sup>3</sup>	80
DQOt	kg/m <sup>3</sup>	85
DQOs/DQOt	s.u	0.94
Remoción DQOt	%	77.50
Rendimiento metano	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Kg DQOs	0.28
Pureza metano	%	0.55
Producción de biogás/año	m <sup>3</sup> /año	7'502.755
Producción de metano/año	m <sup>3</sup> /año	4'126.515
Poder calorífico del biogás	Btu/m <sup>3</sup> biogás	18.563
Bunker reemplazo por biogás	gal/año	994.785
Energía eléctrica en turbogenerador	kWh/año	1'740.874
Toneladas de CO <sub>2</sub> reducidas	tCO <sub>2</sub>	26.975

**Tabla 5**  
**Composición físico-química de la vinaza**

Composición de la vinaza de soderal		
Parámetros físico-químicos	Unidades	Resultados
Nitrógeno total amoniacal	mg/l	6.85
Temperatura	°C	58.6
Potencial de hidrógeno		4.85
Ácidos grasos volátiles	mg/l	3.740
Demanda bioquímica de Oxígeno	mg/l	42.900
Demanda química de Oxígeno	mg/l	60.327
Alcalinidad	mg/l	2.934
Fosfatos	mg/l	86
Sulfatos	mg/l	2.540

Composición de la vinaza de soderal		
Parámetros físico-químicos	Unidades	Resultados
Potasio	mg/l	9.500
Aceites y grasas	mg/l	4
Hierro	mg/l	50.90
Bario	mg/l	< 0.10
Flúor	mg/l	< 0.02
Zinc	mg/l	< 0.059
Cobre	mg/l	< 0.03
Manganeso	mg/l	< 23.20
Aluminio	mg/l	< 0.039
Molibdeno	mg/l	No detectable
Cobalto	mg/l	4.
Níquel	mg/l	2.6
Vanadio	mg/l	< 0.1
Sólidos disueltos totales	mg/l	19200
Pesticidas organofosforados	mg/l	< 0.00002
Coliformes totales	NMP/100ml	< 1
Huevos helmintos	unid/litro	Ausencia

Tabla 6  
Resultados del biogás obtenido en la prueba

Composición del biogás				
Parámetro	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Metano, CH <sub>4</sub>	%	61.80	53.31	43.00
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	%	53.50	43.10	34.70
Gas sulfhídrico, H <sub>2</sub> S	%	3.20	2.59	1.80

**Tabla 7**  
Estimaciones económicas por aprovechamiento del biogás

Nomina	Unidad	Valor
Costo del búnker	USD/gal.	0.6722
Costo de la energía	USD/kWh	0.08
Costo actual de los CERs	USD/tCO <sub>2</sub>	10.00*
Ahorro por reemplazo de bunker	USD/año	668.694
Ahorro por aprovechamiento de energía eléctrica	USD/año	139.270
Bonos por certificados de carbono	USD/año	269.750
Total de dinero recuperable	USD/año	1'077.714

**Tabla 8**  
Rendimiento obtenido en m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg DQOs removidos

Rendimiento de metano en la prueba				
Rendimiento de metano	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Kg DQOs removido	0.31	0.25	0.15

**Tabla 9**  
Resultados de análisis a la vinaza cruda

Análisis de vinaza cruda en el periodo de prueba				
Parámetro	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Ácidos grasos volátiles	mg/l	3.291	2.281	1.563
Alcalinidad	mg/l	3.200	1.698	1.300
pH	s.u	4.89	4.44	4.11
Demanda química total de oxígeno, DQOt	kg/m <sup>3</sup>	78.50	65.28	53.55
Demanda química soluble de oxígeno, DQOs	kg/m <sup>3</sup>	75.67	61.27	50.56
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/l	19.450	5.719	1.960
Sólidos suspendidos volátiles, SSV	mg/l	14.445	4.862	1.780
Sulfatos, SO <sub>4</sub>	mg/l	3.915	3.285	2.691
Nitrógeno total Kjeldahl, TKN	mgN/l	398	231	28
Orto-fosfatos, ortho-P	mgP/l	115	46	23

**Tabla 10**  
**Comparación de resultados de análisis de vinaza que entra y sale del biodigestor**

Parámetro	Unidad	Vinaza	
		Entra	Salida
Ácidos grasos volátiles	mg/l	2.281	1.370
Alcalinidad	mg/l	1.698	5.366
pH	s.u	4.44	7.35
Demanda química total de oxígeno, DQOt	kg/m <sup>3</sup>	65.28	18.39
Demanda química soluble de oxígeno, DQOs	kg/m <sup>3</sup>	61.27	13.87
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/l	5.719	5.362
Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV	mg/l	4862	3732
Sulfatos, SO <sub>4</sub>	mg/l	3285	55