

TRABAJO DE TESIS
MAESTRÍA EN ENERGÍA Y AMBIENTE ITBA
Escuela de Postgrado del ITBA

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE VINAZA EN TUCUMÁN:
ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS

Joaquín Mario Ortiz
Ingeniero Agrónomo
Universidad Nacional de Tucumán

Tutores

Ing. Agr. Martín Fraguío
Ing. Agr. Juan Carlos Mirande

Jurado

Ing. Jorge Hilbert
Ing. Marcelo Rosso
Dra. Ing. Cecilia Smoglie

Ciudad Autónoma de Buenos Aires
13/08/2018

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo implica el final de una etapa que tuvo sus inicios en 2015 cuando concursé por una beca de formación en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Por lo que en primer lugar quisiera agradecer a dicha institución y por ende al Estado Nacional por permitirme adquirir conocimiento y desarrollar aptitudes que me permiten desempeñar en la grata tarea de trabajar con energías renovables y el cuidado del medio ambiente.

A continuación quiero agradecer al Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA) por la sólida formación brindada así como su excelente programa académico.

También quisiera agradecer a empresas que me permitieron visitar sus instalaciones y compartieron datos sin los cuales no podría haber escrito esta tesis: Cía. Azucarera Los Balcanes S.A., Citrusvil S.A y BIOTEC. Dentro de estas empresas quisiera destacar el aporte del Dr. José Coronel, Gerente General del Ingenio La Florida, Lic. Germán Eugenio Roig Babot, Responsable Del Laboratorio De Planta De Tratamiento De Efluentes de Citrusvil S.A. y por último al Ing. Philippe Conil, Presidente Ejecutivo de BIOTEC.

A nivel personal no puedo dejar de agradecer a mi director de Beca INTA Ing. Agr. Carlos A. Aragón, como así también todo el personal de la Estación Experimental Agropecuaria Famaillá y a su director el Ing. Roberto A. Sopena.

A la profesora y directora de maestría Dra. Cecilia Smoglie por confiar en mí, como así también a mis compañeros de cursado: Belén Gagliardi Reolon, Emmanuel Contreras Ordoñez, Patricio Costantini, Sebastián Oettinger, Zeno Farina cuyo nivel humano y profesional superaron toda expectativa. A mis profesores. Y por último a mis tutores de Tesis: Ing. Agr. Martín Fraguío e Ing. Agr. Juan Carlos Mirande quienes desinteresadamente me ayudaron a escribir el presente trabajo.

A MI FAMILIA.

A MIS COLEGAS.

A MI ESPOSA BELÉN.

DECLARACIÓN

Declaro que el contenido de la presente tesis de maestría es fruto de mi trabajo y que este material no ha sido presentado en forma parcial o total en otra institución académica ni publicado en ningún medio de divulgación. Toda contribución, reflexión, cuadro, gráfico o documento anexo y/o utilizado que no corresponda a mi autoría ha sido debidamente citado e identificado.

Joaquín Mario Ortiz

Ing. Agrónomo

El uso apropiado de la ciencia no es conquistar la naturaleza, sino vivir en ella.

-Barry Commoner

Biólogo, Profesor y activista estadounidense fundador del movimiento ecologista mundial.

Tabla de contenido

1	ÍNDICE DE TABLAS	2
2	ÍNDICE DE FIGURAS	3
3	LISTADO DE ABREVIATURAS.....	4
4	GLOSARIO.....	5
5	PALABRAS CLAVES.....	7
6	RESUMEN EJECUTIVO.....	8
7	ABSTRACT.....	9
8	Introducción.....	10
8.1	Industria Azucarera: Ingenios de Azúcar y destilerías	12
8.1.1	Cosecha a campo:	13
8.1.2	Fabricación del azúcar:	13
8.1.3	Elaboración del etanol, destilerías:.....	16
8.2	Vinaza.....	20
8.3	Estado del Arte	22
8.4	Balance Energético y Contexto Local.....	25
8.4.1	<i>Plan de Biocombustibles</i>	25
8.4.2	<i>Situación Energética</i>	26
8.5	Vinaza: Emisiones.....	28
9	Materiales y Métodos	30
9.1	Generación de Biogás:.....	31
9.2	Concentración y Combustión de Vinazas	34
10	Análisis y discusión:.....	37
10.1	Generación de biogás:.....	38
10.2	Concentración y combustión de vinaza:.....	41
11	Conclusiones:	43
12	Anexo I	43
12.1	Cálculo para la obtención de las emisiones de GEI medidas en CO ₂ -eq producidas por la ferti-irrigación de la vinaza en los suelos tucumanos:	44
12.2	Cálculo de la producción potencial de metano para la provincia de Tucumán:	44
12.3	Estimación de MWh/año y US\$/año provenientes del CH ₄ generado:	45
12.4	Cálculo de la producción de biofertilizante seco a partir de vinaza:	45
12.5	Emisiones de CO ₂ durante el aprovechamiento del biogás:.....	46
12.6	MWh e ingreso potencial por concentración y combustión de vinaza:.....	46
12.7	Ingreso por cenizas volantes en concentración y combustión de vinaza:	47
12.8	CO ₂ producido durante la concentración y combustión de vinaza:.....	48
13	Bibliografía	49

1 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros Físicos-Químicos y contenidos minerales de las vinazas en Tucumán. Comisión Provincial de Vinazas, 2009.....	20
Tabla 2. Zafra 2017/2018. Totales hasta la 1ra quincena Abril 2018. (Centro Azucarero Argentino, 2018). ...	21
Tabla 3. Concentración y combustión de vinazas. Perera, J. G. (2009).....	35
Tabla 4. Biometanización de la Vinaza: diferentes parámetros.	40
Tabla 5. Concentración y Combustión de Vinazas: Diferentes parámetros.....	42
Tabla 6. Potencia Instalada Distribución por Tecnología/Región [MW]. Informe MEM: Diciembre 2017	44

2 ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Transporte y Molienda. (Tabacal, 2008).....	14
Ilustración 2. Clarificación. (Tabacal, 2008).....	14
Ilustración 3. Cocimiento y separación. (Tabacal, 2008).....	15
Ilustración 4. Refinado y Secado. (Tabacal, 2008).....	15
Ilustración 5. Envasado. (Tabacal, 2008).....	16
Ilustración 6. Esquema del proceso de fabricación de azúcar y bioetanol. (Elaborado a partir de bibliografía de la Cátedra de Agroindustrias y la Cátedra de Caña de Azúcar de la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de Tucumán).....	18
Ilustración 7. Diferencias entre los procesos según la materia prima de origen. (Elaborado a partir de bibliografía de la Cátedra de Agroindustrias y la Cátedra de Caña de Azúcar de la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de Tucumán).....	19

3 LISTADO DE ABREVIATURAS

CAA: Centro Azucarero Argentino

CAMMESA: Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico

CC: Ciclo combinado

DI: Motor Diésel

GEI: Gases de Efecto Invernadero

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*).

MA: Ministerio de Agroindustrias

MEM: Mercado Eléctrico Mayorista

MINEM: Ministerio de Energía y Minería

NOA: Noroeste Argentino. Incluye las provincias de Jujuy, Catamarca, Salta, Tucumán, La Rioja y Santiago del Estero.

RAC: Residuo Agrícola Cosechable

RVP: Reid Vapor Pressure o Presión de Vapor Reid.

TEP: Toneladas Equivalentes de Petróleo

TG: Turbinas a gas

TV: Turbinas a vapor

4 GLOSARIO

Azúcar Equivalente: incluye la producción de azúcar físico más lo que se destina a alcohol.

Azúcar Físico Total: Es el total de toneladas de azúcar producidas a partir de la molienda de caña de azúcar.

Bagacillo: fibra muy fina de la caña de azúcar.

Bordo: es el tapado con tierra de la línea de siembra, dejando una suficiente capa de tierra más elevada que la línea del suelo. Muy usado para la siembra de caña semilla en el cultivo de caña de azúcar.

Compostaje: Proceso físico químico y microbiológico de transformación de materias primas orgánicas en condiciones controladas y aeróbicas obteniéndose un producto orgánico estable, maduro, de olor agradable, color oscuro, alto valor nutricional, libre de patógenos y de semillas viables de malezas.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno: Es la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación; normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO5) y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/l).

DQO: Demanda Química de Oxígeno: es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/l).

Estator: es la parte fija de una máquina rotativa y uno de los dos elementos fundamentales para la transmisión de corriente eléctrica siendo su contraparte móvil el rotor.

Melaza o miel: sustancia dulce, espesa y de color oscuro también conocida como “miel de caña”. Se utiliza para alimentación animal, elaboración de ron o de bioetanol. La denominación melaza se aplica al efluente en la preparación del azúcar mediante la cristalización repetida. El proceso de evaporación y la cristalización es usualmente repetido tres veces hasta el punto en el cual el Azúcar invertido y la alta viscosidad de las melazas ya no permitirán una cristalización adicional de la sacarosa. (Swan y Karalazos, 1990).

Octanaje: El octanaje es la escala que permite calificar el poder antidetonante de los carburantes (combinación de distintos hidrocarburos que se utiliza para lograr el buen funcionamiento de un motor), cuando éstos son comprimidos en el cilindro que forma parte de un motor. Cuando el índice de octano de un combustible no es suficiente y el motor tiene una elevada relación de compresión (el número que sirve para calcular la proporción en que se comprime el aire o la mezcla de aire y combustible que hay en la cámara de combustión de un cilindro), la mezcla se auto enciende, o sea que la combustión tiene lugar en un lapso de

tiempo demasiado corto y se produce una detonación prematura, lo cual deriva en que el pistón sea golpeado con brusquedad y el rendimiento del motor se reduzca de manera drástica, con la posibilidad de que tengan lugar averías considerables.

Oxigenador: mejora la combustión al evitar gases no quemados y restos de carbonilla.

Presión de Vapor Reid: procedimiento de prueba para determinar la presión de vapor del aceite crudo, condensados, gasolinas y otros productos del petróleo que se almacenan en tanques atmosféricos cuando su temperatura alcanza 100°F (~37.78°C). Puesto que la pérdida de los componentes volátiles se ve reflejada en una disminución del volumen del combustible un peligro latente debido a que se forma una atmósfera explosiva por la liberación del gas.

Rodete: es el elemento móvil encargado de impulsar el fluido dentro de la turbina.

Rotor: El rotor está formado por un eje que soporta un juego de bobinas arrolladas sobre un núcleo magnético que gira dentro de un campo magnético creado bien por un imán o por el paso por otro juego de bobinas, arrolladas sobre unas piezas polares, que permanecen estáticas y que constituyen lo que se denomina estator de una corriente continua o alterna, dependiendo del tipo de máquina de que se trate.

Trocha: Espacio desprovisto de cultivo o plantación que permite transitar por él.

Zafra: Cosecha de la caña de Azúcar.

5 PALABRAS CLAVES

Bagazo, Biofertilizante, Biogás, Biomasa, Biometanización, Caña de Azúcar, Cenizas Potásicas, Concentración y Combustión de Vinaza, Energía, Energías Renovables, Potasio, RENOVAR, Tucumán, Vinaza.

6 RESUMEN

Tucumán es el mayor productor de Argentina de bioetanol a partir de caña de azúcar. El principal efluente del proceso es la Vinaza, un residuo líquido cuya concentración supera cientos de veces el máximo establecido por la autoridad de aplicación provincial. Debido a su enorme volumen de producción, un manejo adecuado implica un costo significativo para las destilerías. Actualmente la vinaza se aplica sobre los suelos en forma de riego o se utiliza para compostaje.

El objetivo de este trabajo es estudiar el potencial de producción de energía, mediante aprovechamiento de las vinazas generadas por la industria sucro-alcoholera en la provincia de Tucumán. Se analizaron dos alternativas: generar Biogás y concentrar Vinazas, en ambos casos como combustibles para generación eléctrica. – Del estudio realizado surge que podrían producirse 69.000.000 m³ CH₄/año, para proveer 282 GWh a través de motores de combustión interna generando un ingreso bruto de 43.000.000 US\$/año o se podría concentrar Vinazas para proveer 342 GWh mediante turbinas y obtener cenizas ricas en Potasio, con un ingreso bruto mixto de 49.000.000 US\$/año. - Debido a la elevada inversión necesaria para la concentración y combustión de Vinazas, esta tecnología se sugiere para destilerías que produzcan más de 70.000 m³ etanol/año.

7 ABSTRACT

Tucumán is Argentina's largest producer of Bioethanol from sugarcane. The main effluent of the process is vinasse, a liquid with a concentration hundreds of times higher than the limit set by the enforcement authority. Due to its huge volume of production, proper handling implies a significant cost for the distilleries. The vinasse is currently irrigated to the soil or used for composting.

The objective of this work is to study the potential of energy production, by taking advantage of the vinasse generated by the sugar and ethanol industry in the province of Tucumán. Two alternatives were analyzed: to generate Biogas and to concentrate vinasse, in both cases as fuel for electricity generation. - The study shows that 69,000,000 m³ CH₄/year could be produced to provide 282 GWh using internal combustion engines with a gross income of 43,000,000 US \$/year or vinasses could be concentrated to provide 342 GWh using turbines and also obtain ashes rich in Potassium, with a mixed gross income of 49,000,000 US \$/year. - Due to the high investment required for the concentration and combustion of vinasses, this technology is suggested for distilleries with a production superior to 70,000 m³ ethanol/year.

8 Introducción

Tucumán es la provincia con menor superficie y mayor densidad poblacional de Argentina. Con un marcado perfil agro-industrial produce el 64,5% del total de azúcar del país (Centro Azucarero Argentino, 2014) y el 22% de la producción mundial de limones, siendo el principal productor mundial (Tucumán I.D.E.P., 2016).

Para el año 2014, la principal producción agrícola fue la caña de azúcar, cultivada en una superficie de 265.250 ha. (Madkur & Gomez Soria, 2017). En términos productivos, la Provincia de Tucumán representa el 2,5 % del Producto Bruto Interno (PBI) de la República Argentina y el 35 % del PBI del NOA (Escartín et al., 2016)

Durante la zafra 2016 en la provincia de Tucumán se molieron 16.793.976 Toneladas de Caña Bruta, se produjeron 1.363.970 Toneladas de Azúcar Físico Total, 1.611.060 Toneladas de Azúcar Equivalente según Declaraciones Juradas de los Ingenios y Rendimientos de Azúcar Equivalente de 9,593 % y se elaboraron 279.963 m³ de Etanol (Instituto de Promoción del Azúcar y Alcohol en Tucumán, 2018). La actividad cañera en Tucumán aporta el 10% del Producto Bruto Provincial mientras que la participación en Jujuy es del 6%. (Centro Azucarero Argentino, 2014)

Durante la producción de alcohol a partir de la caña de azúcar, se genera un residuo líquido con alta concentración orgánica llamado vinaza. Por cada litro de alcohol fabricado, se obtienen entre 10 y 15 litros de vinaza. (Ferreira y Monteiro, 1987). Lo que implica que se genera anualmente entre 2.800.000 y 4.200.000 m³ de vinaza.

La vinaza posee elevadas concentraciones de materia orgánica con valores de DQO (Demanda Química de Oxígeno) de hasta 120 e incluso 150 g.l⁻¹ (casi quinientas veces la cantidad presente en aguas residuales domésticas) por lo que no posee aptitud de vuelco a cuerpos de agua. Sumado al enorme volumen de producción, significó históricamente un problema para los industriales siendo su disposición final onerosa y logísticamente complicada.

A su vez, Argentina es el mayor consumidor de gas natural de la región. Su matriz energética en 2009 está constituida en un 51.62% por Gas Natural, mientras que el promedio de Latinoamérica es 26.2%, en Brasil y Chile apenas llega al 11.1%. (Invenomica.com.ar, 2017)

En el año 2016 se importó un 20% del total de gas consumido, la distribución fue la siguiente: Gas Natural 11% (de Bolivia y Chile) y Gas Natural Licuado 9% (Trinidad y Tobago, Qatar, Nigeria, USA, Noruega, principalmente) por aproximadamente 1.800 millones de US\$, la mitad de lo pagado en 2015 por un volumen similar. (MINEM, 2017).

Actualmente la vinaza se considera como un subproducto indeseado de la industria sucro-alcoholera con el que hay lidiar. Es necesario plantear un cambio de este paradigma comenzar a analizar la vinaza como materia prima capaz de generar energía eléctrica y otros subproductos de valor comercial como fertilizantes potásicos.

Entre las alternativas de usos de la vinaza se encuentra el posible aprovechamiento para generar biogás: considerando un DQO de 120 kg/m³, una eficiencia de transformación de biogás de 70% y por cada kg de DQO se obtiene 0.5 m³ de metano al 65% (Morandini y Quaia, 2013): podría obtenerse solo con los desechos de los ingenios de azúcar casi 45 millones de m³/año de metano.

Otra opción consiste en realizar una concentración térmica de la vinaza para aumentar sus grados brix de ~11° a ~60° con posterior quema en caldera, producción de cenizas potásicas y generación de energía eléctrica.

El objetivo principal fue estimar el potencial energético a partir del aprovechamiento de vinaza de la industria sucro-alcoholera en la Provincia de Tucumán.

Como objetivos secundarios se plantearon:

- Calcular cuántos MWh/año podrían producirse a partir de biometanización y de concentración y combustión de vinaza.
- Estimar los m³ que podrían ahorrarse en importaciones de gas natural
- Determinar las emisiones de CO₂, la contaminación de suelos y cuerpos de agua
- Evaluar los ingresos brutos generados por cada tecnología
- Caracterizar los subproductos de valor comercial como fertilizantes potásicos

8.1 Industria Azucarera: Ingenios de Azúcar y destilerías

El azúcar común, de mesa o sacarosa es un disacárido formado por una combinación de moléculas de glucosa y fructosa (alfa-glucopiranososa y beta-fructofuranosa), su fórmula molecular es $C_{12}H_{22}O_{11}$. (Centro Azucarero Argentino, 2014).

El cristal de sacarosa posee un color blanco transparente, es muy soluble en agua y se usa en los alimentos por su poder endulzante. Su valor energético es de 1,619 kJ o 387 Kcal / 100 gramos. (Departamento de Agricultura de Estados Unidos, 2016).

Se extrae principalmente de caña de azúcar y remolacha azucarera.

Argentina es un mediano productor en la industria sucro-alcoholera que concentra la actividad principalmente en dos regiones del Noroeste de su territorio (NOA), al sur del Trópico de Capricornio: por un lado la provincia de Tucumán con 15 ingenios y por otro las provincias de Salta con 2 ingenios y Jujuy con 3 ingenios, a las que genéricamente se las denomina Norte. (Centro Azucarero Argentino, 2014)

La actividad industrial en el NOA posee una producción equivalente de 2,2 a 2,5 millones de toneladas de azúcar, 690 millones de litros de etanol de caña destinados al Plan Nacional de Biocombustibles y 100 MW/h por Cogeneración Eléctrica de Biomasa, a la vez que genera 54.000 puestos de trabajo directos y 140.000 indirectos. (Centro Azucarero Argentino, 2014)

Para el año 2014, la principal producción agrícola tucumana fue la caña de azúcar, cultivada en una superficie de 265.250 ha. (Madkur & Gomez Soria, 2017). En términos productivos, la Provincia de Tucumán representa el 2,5 % del Producto Bruto Interno (PBI) de la República Argentina y el 35 % del PBI del NOA (Escartín et al., 2016)

En Tucumán aporta el 10% del Producto Bruto Provincial mientras que la participación en Jujuy es del 6 por ciento.

El consumo interno de azúcar ronda las 1,7 a 1,6 millones de toneladas, quedando un excedente destinado a exportación de 0,5 a 0,9 millones de toneladas. El mercado interno puede considerarse maduro, sin expectativas de un aumento significativo, en tanto que la exportación no presenta mayores atractivos al ser su precio en años normales inferior al pagado en el mercado interno. Es por ello que la introducción del bioetanol para ser mezclado con nafta (gasolina) en automóviles ha otorgado a la industria y a los productores más rentabilidad, estabilidad y previsibilidad por el re-direccionamiento de excedentes y el incremento del área sembrada. (Centro Azucarero Argentino, 2014)

8.1.1 Cosecha a campo

Durante la zafra se cosechan los tallos molibles de la caña de azúcar. Este período se comprende entre los meses de Abril-Mayo hasta principios de Octubre, pudiendo variar entre años según las condiciones climáticas.

La cosecha puede realizarse de diferentes maneras

Manual: es un tipo de cosecha que prácticamente se encuentra en desuso. La misma consistía en cortar las cañas de azúcar al ras del suelo con una macheta (machete modificado con una hoja más corta y más ancha, que rompe la resistencia del tallo en un corte neto sin desgarre) y volcarlas ordenadamente en el surco, de 100 m, trocha de por medio, con un rendimiento promedio de 3 Ton/día por operario. A continuación, se procede al pelado y despunte con un cuchillo cañero, de a una caña por vez, aproximadamente 1200 por operario. Posteriormente se agrupaba en paquetes de 50 kg y, a hombro, eran cargados por los operarios en los carros cañeros. (Jaldo Alvaro y Ortiz, 2016).

Semi-mecánica: Introduce la quema de la plantación para evitar el pelado manual y se realiza la carga por medio de una cargadora que consiste en una grúa con una pluma montada arriba de un tractor. Solo el corte y despunte se realizan manualmente. Es una metodología que está en retroceso debido a la prohibición de la quema de la caña de azúcar. Existe una excepción para pequeños productores de menos de 50 Has en los que los ingenios pueden recibirles caña larga quemada.

Mecanizada o Integral: Permite todas las operaciones de cosecha en un solo paso: corte, despunte, troceado y carga de la misma prescindiendo de la quema, lo que se conoce como “cosecha en verde”.

En la campaña 2016-2017, en Tucumán, el rendimiento cultural fue de 62,3 Ton/Ha. En la actualidad casi la totalidad de superficie se cosecha de manera integral.

8.1.2 Fabricación del azúcar

La caña de azúcar se descarga en las mesas alimentadoras donde será preparada antes de ingresar a los trapiches (juegos de molinos): pasando por un enrasador, eje transversal al conductor cuya función es nivelar y uniformar la cantidad de caña transportada por el sistema de alimentación. A continuación electroimanes retiran restos metálicos que puedan causar daños, luego pasa por unos juegos de cuchillas que trocean la caña y por último unos peines desfibradores que desmenuzan la caña de azúcar, aumentando su superficie específica para finalmente ingresar a la zona de molienda.

La zona de extracción de los jugos de la caña consiste generalmente en 2 o 3 trapiches, cada uno integrado por 2 cilindros inferiores y 1 cilindro superior entre ambos, donde por compresión se extrae el jugo de la caña de azúcar de los tallos a medida que estos pasan por los diferentes trapiches.

Con este proceso se extrae poco más de un 95% del jugo contenido en los tallos y un 32% de bagazo (fibra de la caña de azúcar) con aproximadamente un 50% de humedad, biomasa que sirve de combustible para alimentar las calderas del ingenio logrando el autoconsumo y en instalaciones modernas cogenerar energía eléctrica para inyectarla a la red. Por lo general existe un excedente de bagazo que suele utilizarse para fabricar papel, tableros, cartón, realizar briquetas o como complemento combustible para plantas de quemado de vinaza.

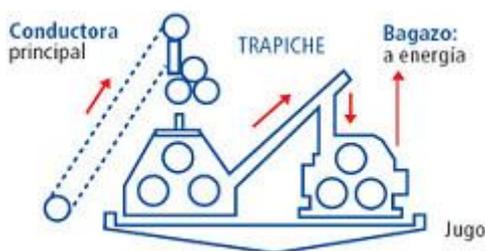


Ilustración 1. Transporte y Molienda. (Tabacal, 2008)

El jugo, de color verde oscuro es ácido, turbio y posee impurezas (barros, bagacillo, sales, coloides y material en suspensión) por lo que debe atravesar diferentes etapas:



Ilustración 2. Clarificación. (Tabacal, 2008)

Clarificación: El jugo cae verticalmente en forma de lluvia y reacciona con gases de SO_2 provenientes de la sublimación de azufre mineral en forma de roca (300 ppm/Ton de caña molida) ubicado en la parte inferior de las columnas de destilación. Se realiza para reducir el pH, coloración, precipitar coloides y proteínas del jugo y se disminuir su viscosidad. Luego se agrega una lechada de cal ($\sim 2 \text{ Kg Ca (OH)}_2/\text{Ton caña molida}$, con un 68% de Ca activo). Esto aumenta el pH y forma sales insolubles de Ca. Dichos flóculos e impurezas precipitan en los tanques decantadores en forma de un barro con elevado contenido de materia orgánica llamado “cachaza” el cual es enviado al campo como fertilizante de los cañaverales, o procesado para producir compost.

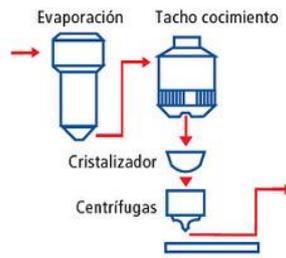


Ilustración 3. Cocimiento y separación. (Tabacal, 2008)

Cocimiento y Separación: el jugo limpio o clarificado se evapora en hasta un 80% de su volumen y luego se cocina en tachos de cocimiento, utilizando el vapor proveniente de la etapa de evaporación. Los tachos de cocimiento son tanques que trabajan en vacío (para evaporar agua por debajo de la temperatura de evaporación del agua pura) formando cristales de azúcar y miel mezclados en lo que se conoce como “masa cocida”. Normalmente se utilizan tres tachos de cocimiento.

En el primer tacho de cocimiento se genera la masa cocida de primera que mediante una centrífuga es separada en cristales de sacarosa (azúcar crudo) y miel de primera.

La miel de primera se envía al segundo tacho de cocimiento donde luego se separa su masa cocida en azúcar de segunda (cuyos cristales se introducen en el primer tacho de cocimiento, facilitando la formación y crecimiento de más cristales de sacarosa, lo que se conoce como “semilla”) y en miel de segunda.

La miel de segunda aún posee azúcar recuperable por lo que se envía al tercer tacho de cocimiento. Allí se obtiene una masa cocida que al centrifugarse da azúcar de tercera (que se envía a modo de “Semilla” al segundo tacho de cocimiento) y una miel de tercera, con menor contenido de azúcares y cuya extracción es costosa, esta miel de tercera se conoce como “melaza”.

La “melaza” se envía como materia prima a la destilería para convertir sus azúcares en alcohol.

El azúcar obtenido se refina mientras la melaza puede utilizarse para producir alcohol.



Ilustración 4. Refinado y Secado. (Tabacal, 2008)

Refinado y Secado: el azúcar obtenido en el primer tacho de cocimiento se diluye con agua para convertirse en jarabe que luego se filtra y envía a tachos de cocimientos de refino. Allí se produce la masa cocida refinada que por centrifugación entrega azúcar refinado húmedo de alta calidad (BREF) y la miel refinada que va a otros tachos de cocción y centrifugadores rotativos para obtener azúcar común de tipo A (CTA).

El contenido de humedad se elimina por medio de secadores rotativos (de ~ 0,8% a 0,035%) y se clasifica de acuerdo al tamaño de cristal, utilizando zarandas.

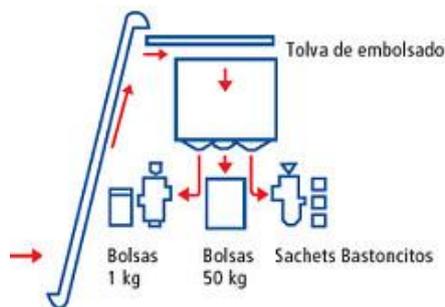


Ilustración 5. Envasado. (Tabacal, 2008)

Envasado: se realiza en silos con capacidad de hasta 500 Toneladas:

- Bolsones de 500 y 1000 Kg, en envases de Polipropileno.
- Bolsa de azúcar 50 Kg.
- Bolsa de Polietileno de 1 Kg.
- Bolsas de Papel de 1 Kg.
- Sobrecitos (6,25 gr).

8.1.3 Elaboración del etanol, destilerías

El etanol es un combustible utilizado en los motores de explosión como aditivo o sustituto de la gasolina o nafta. Se produce mayormente a partir de la fermentación alcohólica de materia prima rica en azúcares como la remolacha, caña de azúcar o vinos, o bien de cultivos ricos en almidón o celulosa, los cuales son previamente hidrolizados para obtener glucosa. Puede obtenerse etanol mediante la modificación química del etileno, por hidratación, aunque esta producción es despreciable, por lo que en el presente trabajo referirse al etanol como bioetanol es indistinto.

Para producir alcohol puede usarse el jugo separado de la fibra durante la molienda, como así también la melaza residual del proceso de elaboración de azúcar y a partir de la refundición de azúcar crudo.

Para iniciar la elaboración de etanol se requiere diluir en agua la concentración de azúcares hasta niveles compatibles con las levaduras usadas durante el proceso de fermentación alcohólica (anaeróbica). En las

primeras etapas de la fermentación cada molécula de glucosa se transforma en dos moléculas de ácido pirúvico. A partir de dicho ácido, diferentes rutas metabólicas conducen a la formación etanol y, en menor proporción otro alcohol, butanodiol.

En el caso de cultivos con elevado contenido de almidón como el maíz, o de celulosa como los cultivos forestales, debe hacerse una conversión del almidón/celulosa en azúcares mediante una hidrólisis ácida o utilizando extractos de enzimas contenida en malta, como paso previo a la fermentación anaeróbica de los azúcares. ALCONOA (n.d.).

Luego se procede a realizar una destilación empleando calor para separar mediante diferentes puntos de ebullición los diferentes líquidos que componen la mezcla, principalmente etanol separado en la parte superior de la columna (punto de ebullición $\sim 78.6^{\circ}\text{C}$), y el agua en la parte inferior de la columna recuperadora a la temperatura de ebullición de la misma (100°C)

El bioetanol se mezcla con nafta en concentraciones del 5, 10, 12% hasta un 25% sin necesidad de modificar los motores convencionales: E5, E10, E12 respectivamente. Actualmente se están difundiendo motores diésel que funcionan con etanol puro más un aditivo elevador de cetanos y también vehículos eléctricos a celda de combustible que toman el hidrógeno del etanol.

Durante el transporte y almacenamiento se debe evitar la presencia de agua la cual separa las fases de etanol y nafta, reduciendo el desempeño del motor.

Aunque el etanol tiene una relativamente baja presión de vapor, cuando se utiliza como aditivo de la gasolina su presión de vapor efectiva es muy alta, llegando a un valor RVP (Reid Vapor Pressure) de 18 psi (124 KPa), lo cual representa una desventaja para su uso. Cuando el etanol se añade a una gasolina formulada adecuadamente, los hidrocarburos con bajo punto de ebullición, como butanos o incluso pentanos, deben ser reducidos para cumplir con las especificaciones de presión de vapor. Valores bajos de presión de vapor reducen las emisiones debidas a la evaporación, en los procesos de llenado de los tanques y almacenamiento del combustible. ALCONOA (n.d.).

También se utiliza como aditivo de naftas, como mejorador de octanaje (reduciendo las emisiones nocivas) y oxigenador en reemplazo del éter tert-butílico (MTBE), antidetonante cuyo uso se está restringiendo por su contaminación de suelo y aguas subterráneas por recomendación de la US EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América). ALCONOA (n.d.).

Existen motores adaptados para funcionar con nafta o exclusivamente bioetanol, llamados motores Flex (FFV). Estos vehículos utilizan etanol E85, donde el 15% de nafta permite paliar el problema de la baja presión y garantizar así el encendido.

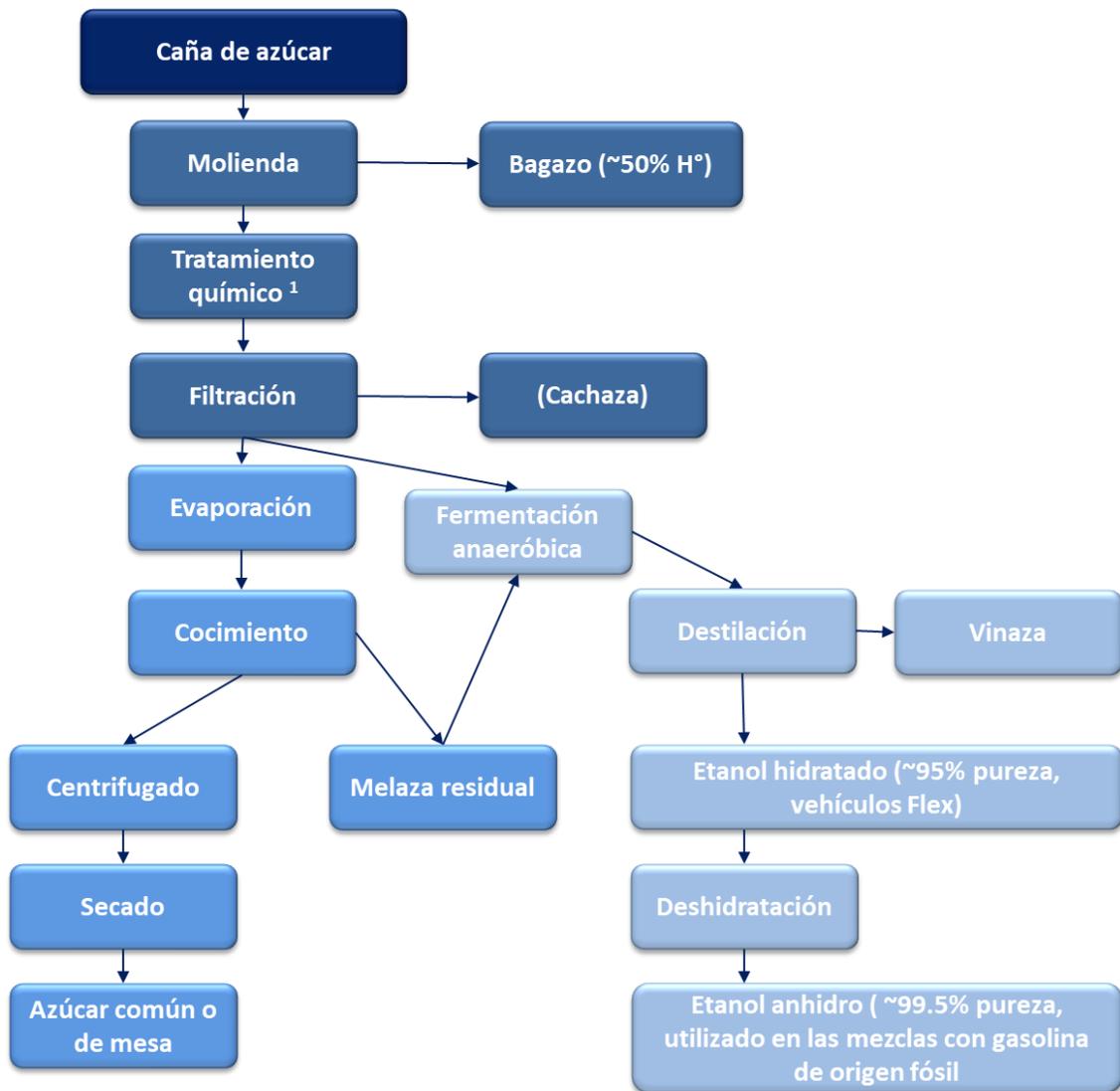


Ilustración 6. Esquema del proceso de fabricación de azúcar y bioetanol. (Elaborado a partir de bibliografía de la Cátedra de Agroindustrias y la Cátedra de Caña de Azúcar de la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de Tucumán)

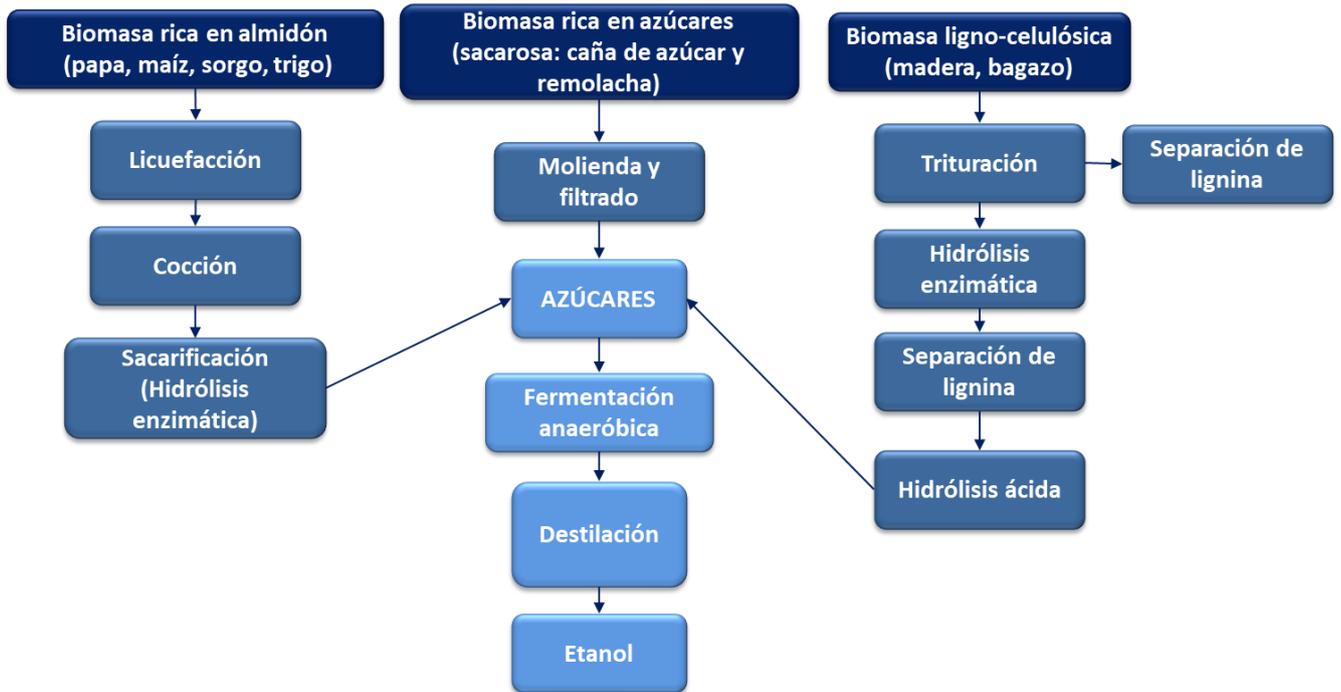


Ilustración 7. Diferencias entre los procesos según la materia prima de origen. (Elaborado a partir de bibliografía de la Cátedra de Agroindustrias y la Cátedra de Caña de Azúcar de la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de Tucumán)

8.2 Vinaza

La vinaza es un residuo líquido rico en materia orgánica, potasio, calcio, magnesio, azufre y nitrógeno que se obtiene durante la producción de etanol a partir de la caña de azúcar. Posee un color marrón oscuro y su pH varía entre 3,5 y 5 (España-Gamboa et al., 2011).

En la producción de bioetanol se fermenta el mosto, a través de levaduras específicas y por centrifugación se obtiene un líquido llamado vino que se destila para obtener por un lado alcohol hidratado (alcohol 96°, con 4 o 5 % de agua) y por otro lado vinaza y CO₂.

Por cada litro de alcohol °96 se generan entre 10 y 15 litros de vinaza (Ferreira y Monteiro, 1987)., la cual abandona la columna de destilación, con una temperatura próxima a la de ebullición y con una concentración de sólidos disueltos de aproximadamente 11 - 13 ° Brix (Perera, 2009).

La composición de la vinaza varía de acuerdo a la tecnología utilizada en la destilación y principalmente si la misma se produjo a partir de jugo de caña de azúcar y/o de melaza.

Tabla 1. Parámetros Físicos-Químicos y contenidos minerales de las vinazas en Tucumán. Comisión Provincial de Vinazas, 2009.

Composición / parámetros físicos-químicos	Promedio	Rango
pH (25°C)	5,10	4,8-5,4
Conductividad (25°C) (mS/cm)	26,54	24,1-28,7
DQO (mg O/l)	98.753	90.000-110.000
DBO (mg O/l)	42.940	32.000-54.000
Relación DBO/DQO	0,43	0,29-0,60
Humedad (%)	90,20	89-92
Calcio (%)	0,22	0,16-0,25
Magnesio (ppm)	636,00	532-880
Sodio (ppm)	1.048,00	554-1800
Potasio (%)	1,49	1,21-1,82
Zinc (ppm)	2,90	1,00-3,00
Cobre (ppm)	4,10	3,5-6,7
Manganeso (ppm)	10,20	7,8-12,7

En la provincia de Tucumán existen 15 ingenios de azúcar de los cuales 11 produjeron alcohol en 2016: Bella Vista, Concepción, Famailá, La Corona, La Florida, La Trinidad, Leales, Marapa, San Juan, Santa Bárbara y Santa Rosa. La producción total de la provincia fue de 273.963 m³. Lo que implica que en dicho año se generó entre 2.800.000 y 4.200.000 m³ de vinaza.

Tabla 2. Zafra 2017/2018. Totales hasta la 1ra quincena Abril 2018. (Centro Azucarero Argentino, 2018).

	Caña Bruta Molida Total [Tn]	Azúcar Físico Total [Tn]	Azúcar Equivalente [Tn] según DDJJ	Rendimiento Azúcar Equivalente [%]	Alcohol Total Elaborado [L]
Aguilares	415.262,000	30.931,000	30.934,319	7,449	0,000
Bella vista	671.748,000	40.858,000	59.471,751	8,853	16.747.951,000
Concepción	2.522.560,000	237.914,000	245.344,988	9,726	28.981.800,000
Cruz Alta	684.374,000	46.677,000	46.674,107	6,820	0,000
Famaillá	872.344,000	84.714,000	84.715,247	9,711	6.462.974,835
La Corona	774.940,000	36.859,000	63.293,760	8,168	26.413.135,000
La Florida	1.931.803,000	65.104,000	156.300,597	8,091	93.923.680,000
La Providencia	1.264.607,000	124.312,000	124.310,835	9,830	0,000
La Trinidad	1.822.010,000	113.092,000	148.672,111	8,160	38.118.742,000
Leales	1.034.464,000	87.185,000	88.319,441	8,538	12.754.257,000
Marapa	558.290,000	41.381,000	48.591,541	8,704	25.475.190,000
Ñuñorco	586.782,000	54.748,000	59.398,233	10,123	0,000
San Juan	292.453,000	16.031,000	25.558,856	8,739	4.386.232,000
Santa Bárbara	676.245,000	53.253,000	65.225,247	9,645	17.979.119,000
Santa Rosa	1.078.667,000	66.821,000	91.392,857	8,473	27.843.126,000
Total	15.186.549,000	1.099.880,000	1.338.203,890	8,812	299.086.206,835

8.3 Estado del Arte

Históricamente el efluente de la vinaza se consideró un subproducto no deseado de la industria sucro-alcoholera.

A partir de la sanción de la Ley Nacional 26.093 de Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles en 2006 y la Ley Nacional 26.334 de Régimen de Promoción de la Producción de Bioetanol en 2007 se estableció un corte obligatorio en las naftas de un 5% de bioetanol inicialmente y actualmente de un 12%, dicho porcentaje debe distribuirse en partes iguales entre bioetanol procedente de caña de azúcar y de maíz.

Según la Secretaría de Energía de la Nación en la Argentina en el año 2016 se produjeron 889.945 m³ de etanol. El 55,04% (489.837 m³) fue etanol proveniente de maíz y el 44,46% (400.109 m³) en base a caña de azúcar.

Actualmente la vinaza se considera como un subproducto indeseado de la industria sucro-alcoholera con el que hay lidiar. Es necesario plantear un cambio de este paradigma comenzar a analizar la vinaza como materia prima capaz de generar energía eléctrica y otros subproductos de valor comercial como fertilizantes potásicos.

Alternativas para el tratamiento de la vinaza:

1. Utilización de la vinaza como fertilizante:

Teniendo en cuenta que la vinaza concentra una gran parte de los nutrientes exportados por el cultivo de caña (en particular más del 70% del potasio) la necesaria sostenibilidad ambiental y económica del sistema cañero a largo plazo, debería conducir a estrategias de devolución de esta materia orgánica y sus nutrientes sobre los suelos que la produjeron (Conil, 2006).

Ferti-irrigación: la aplicación de vinaza al suelo es la práctica más difundida a nivel global. En Tucumán la vinaza como fuente de fertilización potásica tiene una aplicabilidad muy limitada, debido a la elevada concentración de K en los suelos.

La dosis de vinaza a aplicar en los suelos depende del tipo de vinaza (contenido de K₂O), características de los suelos: capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo o conductividad eléctrica CE [dS m⁻¹] de la vinaza, el contenido de K, P y N del suelo, la profundidad de las napas freáticas y % de materia orgánica. (Fadda y Morandini, 2007).

La Resolución 040/2011 de la Secretaría de Medio Ambiente (SEMA) de la provincia de Tucumán considera una aplicación máxima de 150 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (o 15 mm/año) de vinaza cruda, proveniente de melaza, en campos productivos de caña de azúcar. Si la misma proviene de mezcla de jugos y

melaza o jugos el límite es mayor.

La vinaza puede aplicarse diluida 1:10 a 1:30 partes con agua, algo que se viene haciendo hace más de 15 años en la provincia. Por aspersión de vinaza pura (sin diluir) o por “chorreo” de vinaza cruda o previamente concentrada mediante algún otro proceso, con camiones cisterna (Morandini y Quaia, 2013)

Compostaje: En Tucumán lo realiza la Compañía Azucarera Los Balcanes S.A. y en menor medida el Ingenio Leales. La vinaza proveniente de la destilería es sometida a un proceso de evaporación en el cual la concentración de la misma aumenta de $\sim 11,5^\circ$ Brix a $\sim 30^\circ$ Brix. Luego es transportada por un vinazoducto a unos piletones ubicados en una finca de 100 Has destinada exclusivamente al tratamiento de vinaza y generación de compost. En la misma son descargados 700 Ton. diarias de cachaza, cenizas, médula de bagazo y otros residuos orgánicos provenientes de los Ingenios La Florida y Cruz Alta. Se apilan los residuos sólidos y son regados con la vinaza concentrada mediante aspersores. La duración del proceso es variable de acuerdo al volumen de vinaza a disponer y las condiciones meteorológicas.

2. Reactores Biológicos: la vinaza se reduce por acción microbiológica mediante una reacción anaeróbica. La vinaza cruda, con elevado DBO y DQO ingresa a un biorreactor donde se obtiene vinaza tratada, CO_2 y biogás. Permite neutralizar el pH de la vinaza de valores cercanos a 4.5 a 7, equilibrar la relación Carbono/Nitrógeno y reducir la carga orgánica del efluente. En Tucumán el ingenio La Trinidad es el único que posee instalaciones para tratar vinaza. Los biodigestores fueron construidos para tratar un 5% de la vinaza y generar biogás, aunque actualmente solo reciben el 1,5% de la vinaza y el biogás no es almacenado, (Comunicación personal, Ing. Accorroni, La Trinidad)

La EEA INTA Famaillá instaló un biodigestor en el marco del convenio *INTA-BIOTEC* para realizar ensayos de ferti-irrigación con el efluente de la vinaza tratada. A su vez, BIOTEC instaló el primer biodigestor de efluentes citrícolas en el mundo, en el predio de la empresa citrícola CITRUSVIL S.A. Como desventaja el volumen del efluente a la salida el biodigestor es similar al de ingreso y si bien hay reducciones de hasta un 75% de la DQO, la carga orgánica del efluente tratado aún es elevada para ser volcada en cursos fluviales.

Los biodigestores en sí no resuelven el problema de disposición de las vinazas, pero posibilitan su aplicación agrícola y minimizan los riesgos ambientales: si un operario o algún equipo falla en la cadena de suministro de la vinaza (tubería, carro-tanque, operario), el daño ambiental de una vinaza tratada es diez veces menor que el de una sin tratar (Valeiro et al., 2017).

Actualmente existen modelos de biodigestores que permiten evaporar y secar el efluente generando un fertilizante en polvo comercializable (con valores de hasta 30-35% de K_2O , 0-15% de otros nutrientes como P y S, y ~50% de materia orgánica estabilizada). En el caso de estos digestores se emplea casi la totalidad del biogás en el proceso de evaporación y secado.

3. Concentración y combustión: se concentra la vinaza hasta 60° Brix la vinaza concentrada para quemarla en calderas junto con bagazo y generar energía eléctrica. Hay “efluente cero”, obteniéndose cenizas con una elevada concentración de potasio y valor comercial como fertilizante, y gases de combustión.

GENNEIA resultó adjudicada en la ronda RENOVAR 2.0, para instalar una planta de concentración y combustión de vinaza, con la cual produciría 22MW e inyectaría 19 a MW al Sistema Interconectado Nacional. Para ello firmó un convenio con el grupo Los Balcanes, para instalar la planta en un predio de la Destilería La Florida, de la cual recibiría vinaza pre-concentrada a 25° y bagazo. La inversión rondaría los US\$60.000.000. (infocampo.com.ar , 2017)

4. Otros destinos de la vinaza:

Producción de levadura forrajera: para alimentación animal

Disposición en los cursos fluviales: prohibido en la mayoría de los países.

Tierras de sacrificio: se descargan grandes volúmenes de efluente en suelos con escasa aptitud agrícola con el consecuente riesgo de salinizarlo o afectar su fertilidad.

Riego y evaporación solar de vinaza en repetidas series: metodología empleada por el Ingenio Tabacal, en Salta. El producto es un compost.

8.4 Balance Energético y Contexto Local

Un ciclo de vida del etanol producido a partir de vinaza, realizado en Suiza demuestra un balance de 5-6:1, considerando incluso el transporte del etanol desde San Pablo, Brasil hasta dicho país, lo cual es significativamente superior a otros cultivos. (Rodrigues y Ortiz, 2006).

En San Pablo, Brasil, el balance energético resultante de la producción de etanol es de 9,35: 1, lo que significa que para cada 1,0 MJ de energía fósil consumida se produce 9,35 MJ de energía total, u 8,35 MJ de energía renovable, en forma de etanol de la caña. (Soares et al., 2009). En el caso de Uruguay, el balance energético de la producción de etanol de caña de azúcar estimado por ALUR (Alcoholes del Uruguay) y el MIEM (Ministerio de Industria, Energía y Minería) es de 7,03 : 1, para cada 1,0 MJ de energía fósil consumida se produce 9,35 MJ de energía total.

El balance energético varía de acuerdo a la tecnología empleada, si se utilizan mieles o jugos de caña de azúcar, las labores de cultivos, condiciones ambientales, etc. Pero podría decirse que en Argentina, para un ingenio que consume gas natural y que destina 95% de su producción para azúcar y 5% para etanol el balance energético sería ~ 3,42: 1 y para una instalación moderna que reemplaza el consumo de gas natural por bagazo la relación podría incluso superar los 8,30: 1. (Global Bioenergy, 2015)

Parte de este excedente se debe al elevado volumen de bagazo y su capacidad calorífica que permite cogenerar energía eléctrica e incluso producir papel, briquetas, fertilizante, alimento animal, etc.

8.4.1 Plan de Biocombustibles

A partir de la Ley 26.093 del Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles promulgada en Mayo de 2006, se estableció un corte inicial de las naftas con un 5% de bioetanol (E5). Dicho corte fue aumentando progresivamente: E8, E10 en 2014 hasta E12 en 2016.

Actualmente el 50% de la producción de bioetanol se origina de etanol de caña de azúcar y el resto de maíz. El gobierno junto con el sector sucroalcoholero, la industria petrolera y automotriz están trabajando actualmente para elevar el corte al 25%, según declaraciones del Secretario de Agregado de Valor de la Nación: Néstor Roulet. (Biodiesel Argentina noticias sobre biodiesel y energías renovables, 2018).

En Julio de 2017 el subsecretario de Bioindustria de la Nación, Mariano Lechardoy aseguró que se está trabajando para incorporar modelos de vehículos Flex que permitirían surtidores 100% Bioetanol. (Biodiesel Argentina noticias sobre biodiesel y energías renovables, 2018).

8.4.2 Situación Energética

Argentina es el mayor consumidor de gas natural de la región. Su matriz energética en 2009 estuvo constituida en un 51.62% por Gas Natural, mientras que el promedio de Latinoamérica es 26.2%, en Brasil y Chile apenas llega al 11.1%. (Invenomica.com.ar, 2017)

En el año 2016 se importó un 20% del total de gas consumido, la distribución fue la siguiente: Gas Natural 11% (de Bolivia y Chile) y Gas Natural Licuado 9% por aproximadamente 1.800 millones de US\$, la mitad de lo pagado en 2015 por un volumen similar. (MINEM, 2017).

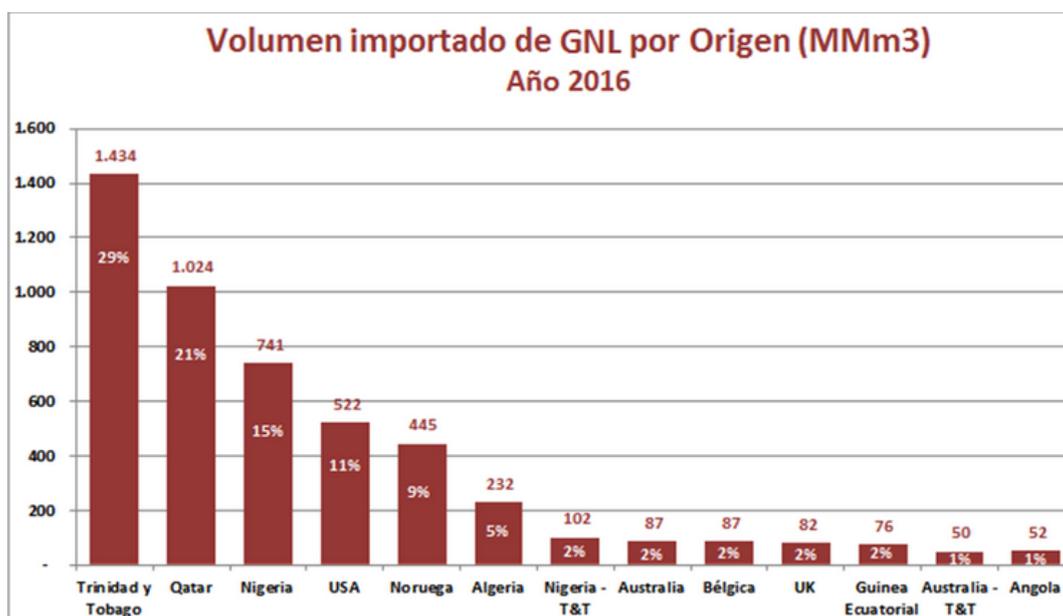


Ilustración 9. Volumen Importado de Gas Natural Licuado por Origen (MMm3). Año 2016. (MINEM ,2017).

Las siguientes figuras corresponden a datos del año 2017 del Mercado Eléctrico Mayorista donde se observa que de 36.505 MW aproximadamente un 63% corresponden a fuentes de origen térmico, lo cual explica el mayor consumo de gas.

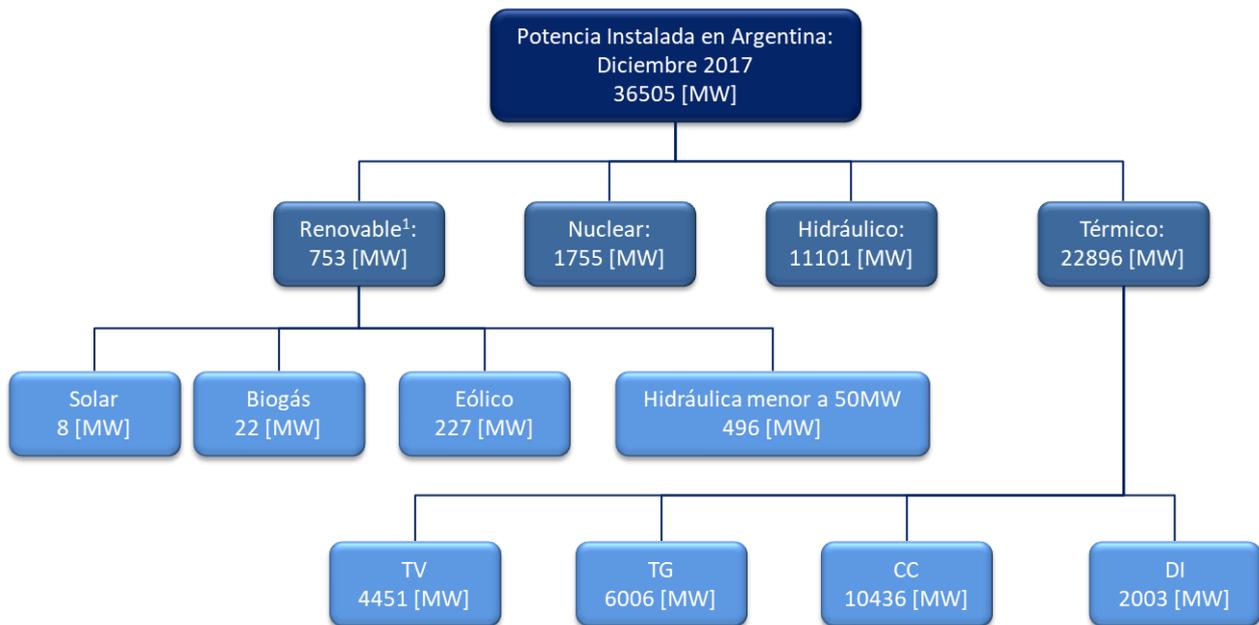


Ilustración 10. Potencia Instalada, Distribución por Tecnología [MW]. Informe MEM: Diciembre 2017

En la provincia de Tucumán se presentaron tres proyectos para la ronda 2 de RENOVAR:

- La empresa Citrusvil S.A. fue adjudicada para producir 3 MW de potencia eléctrica a partir de biogás de efluentes cítricos de su planta a un precio de 153 US\$/MWh
- El segundo proyecto corresponde a cogeneración de 2MW de energía eléctrica a partir de combustión de biomasa en el Ingenio Leales, a un precio de 145,86 US\$/MWh. El proyecto fue adjudicado a la Compañía Inversora Industrial S.A.
- Y por último el proyecto perteneciente a GENNEIA S.A., donde fueron adjudicados 19 MW a partir de combustión de vinaza concentrada proveniente de la destilería La Florida, a un precio de 106,76 US\$/MWh.

¹ La ley de Energías Renovables N°27.191 de 2015 clasifica únicamente a las hidráulicas menores a 50 MW como *renovables*.

8.5 Vinaza: Emisiones

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido por el acrónimo en inglés IPCC en el último siglo hubo un aumento de la temperatura del sistema climático de la tierra cuya causa concluyen que es “extremadamente probable” a la emisión de origen antrópica de Gases de Efecto Invernadero (GEI): CO₂ (dióxido de Carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), HFC (compuestos hidrofluorocarbonados), PFC (perfluorocarbono) y SF₆ (hexafluoruro de azufre) absorben y emiten radiación dentro del rango infrarrojo producen una mayor absorción de energía que la emitida y elevando la temperatura del planeta.

Las emisiones de gases de efecto invernadero se miden en unidades equivalentes de CO₂. Una molécula del gas metano (CH₄) en la atmósfera tiene un potencial de efecto invernadero 21 veces mayor que la de CO₂, mientras que una molécula de óxido nitroso (N₂O) presenta un potencial 310 veces mayor según datos del IPCC.

En Brasil, Soares et al. (2009) determinó que la temperatura de la vinaza recién producida se aproxima a los 100°C y se enfriará en el canal de distribución. La producción de metano puede ocurrir en la fase termofílica (~ 60°C) y en la mesofílica (~ 40°C). Aún no existen estudios que permitan estimar posibles emisiones de CH₄ de los canales de distribución, y se consideró que un valor arbitrario del 0,2% del carbono contenido en la vinaza se emite como CH₄. En ese caso, la emisión de CH₄ se estima en 2,56 kg ha⁻¹, o 197,1 kg ha⁻¹ de CO₂ equivalentes. Las emisiones de N₂O fueron estimadas con base en la metodología del IPCC (2006), ya que no existen datos disponibles sobre el proceso en Brasil. De acuerdo con la metodología, el 1% del N aplicado se emite como N₂O. Considerando que se aplican 80 m³ de vinaza en el campo, conteniendo 20 kg N ha⁻¹, se pierden anualmente 314 g ha⁻¹ de N₂O, o 97,3 kg ha⁻¹ de CO₂ equivalentes.

A su vez, Resende et al. (2006) calculó para 80 m³ de vinaza: un contenido de 93 kg de K, 35 kg de S, 23 kg de N, y 8 kg de P, alrededor de 1 a 2% de carbono soluble, y cómo el agua del lavado de la caña también tiene algo de azúcares, esto podría resultar en emisiones de CH₄ y N₂O.

Oliveira et al. (2017) midió una intensidad media de emisiones de 1,36 kg CO₂-eq/m³ vinaza transportada en canales no recubiertos (correspondiente al 80% de las emisiones de CH₄), esto se debe al depósito de materia orgánica en la base de los canales, donde las condiciones de anaerobiosis y la temperatura permiten la fermentación de la misma. Y en el caso de la vinaza transportada mediante tanques y tuberías cerradas las emisiones de CH₄ fueron 620 veces menos.

No se encontraron publicaciones de las mediciones directas de GEI, expresadas en CO₂-eq provenientes de la vinaza ferti-irrigada en los campos tucumanos. Para ello fue necesario estimar un valor calculado en base a la metodología empleada en Brasil.

Se consideró una situación hipotética de un 100% de fertirriego de vinaza, trasladando la misma mediante camiones-carros o tuberías cerradas a presión. Es decir se estimaron solo las emisiones de CO₂-eq debidas al N₂O, despreciando las producidas por CH₄ durante el transporte y distribución.

En Tucumán, actualmente un pequeño porcentaje de la vinaza producida se biometaniza y un porcentaje nada despreciable se destina a compostaje lo cual implica procesos y emisiones diferentes. Además habría que considerar que la composición de la vinaza, los suelos y las condiciones climáticas tucumanas son diferentes a las analizadas en el caso brasilero.

En el caso de los combustibles para transporte, la simple adición de alcohol en las naftas reduce el contenido de plomo e hidrocarburos aromáticos como el benceno, componentes cancerígenos como así también reduce las emisiones de azufre, monóxido de carbono (CO) y NOx. A la vez que se utiliza como potenciador del octanaje en reemplazo del tetraetilo de plomo y tetrametilo de plomo prohibidos en EEUU en 1996 por considerarse dañinos para salud y potencialmente cancerígenos. (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Gobierno de Estados Unidos, 2018). En Argentina se prohibió la adición de plomo a través del tetraetilo de plomo y se está elevando el corte de etanol en las naftas para reducir el uso de MTBE (Metil Terciario Butil Eter) como oxigenante, hasta lograr reemplazarlo en su totalidad. (Proyecto de Ley S-0032/16)

9 Materiales y Métodos

Se realizó un exhaustivo análisis de bibliografía: informes de diferentes cámaras, organizaciones, instituciones y organismos gubernamentales, así como publicaciones científicas, tesis, libros académicos e información relacionada al sector.

Visitas a Ingenios de Azúcar, destilerías, plantas de tratamiento y generación de biogás a partir de efluentes orgánicos tanto de la industria azucarera como citrícola. Visita a metalúrgicas y centros de investigación agrícola e industrial radicados en la provincia de Tucumán.

Entrevistas y consultas a técnicos de diferentes instituciones y empresas privadas relacionadas a la actividad como así también visitas al Ministerio de Minería y Energía de la Nación y a la Secretaría de PROBIOMASA.

A partir de las diferentes alternativas de tratamientos descriptas se decidió trabajar sobre dos modelos: Biometanización y Concentración y combustión de vinaza.

Fue necesario conocer la composición de la vinaza y como varía la misma según el tipo de suelo donde se ubica el cultivo, el tipo de destilería y tecnología utilizada por la misma. Se consideró el costo del MWh adjudicado en la ronda RENOVAR 2.0 para energía proveniente de biogás y de combustión de biomasa respectivamente.

Se estimó un valor de emisiones de CO₂-eq de la vinaza aplicada en láminas de riego a los suelos tucumanos, utilizando la metodología empleada en Brasil. Despreciando las emisiones provenientes del CH₄, al considerar un transporte y distribución con tanques y tuberías a presión, el valor de las emisiones provenientes del N volatilizado en forma de N₂O fue de 4.370,11 Ton CO₂-eq. (Anexo 12.1)

9.1 Generación de Biogás

Se estimó la producción potencial de energía a partir de vinaza utilizando una metodología empleada por la FAO, la cual fue ajustada de acuerdo a sugerencias y criterios profesionales que se detallan a continuación.

De acuerdo a un documento de la FAO de Escartín et Al. 2016: *Análisis Espacial del Balance Energético Derivado de Biomasa Metodología Wisdom*, Provincia de Tucumán: durante la producción de azúcar se obtienen 45 kg de melaza residuales/tonelada de caña de azúcar molida. Esto permite generar 12 litros de etanol y 0,13 m³ de vinaza. Para una producción de 12.675.458 Toneladas de caña de azúcar en 2014 se calculó la producción potencial de Metano en 44.985.200 m³ de CH₄/año. Tomando un poder calorífico de 9.000 kcal /m³ CH₄ y una TEP de 10.000.000 kcal, esto equivaldría a unas 40.486,7 TEP/año

Cabe destacar que el análisis de la metodología empleada por la FAO considera la producción de alcohol a partir de la melaza residual del proceso de elaboración de azúcar.

En el siguiente cálculo, el valor promedio de DQO se ajustó a 98,753 kg/m³ y la DBO a 42.94 Kg/m³ de acuerdo a lo publicado por la Comisión Provincial de Vinazas en 2009.

En el período comprendido entre 2017 y la 1er quincena de Abril del 2018, en Tucumán se produjo 299.086 m³ de etanol, con un promedio de 12 L vinaza/L etanol siendo el volumen total de 3.589.034 m³ de vinaza 11.1°Brix.

La producción potencial anual de CH₄ a partir de vinaza de caña de azúcar en Tucumán sería de aproximadamente 69 millones de m³ CH₄/año. (Anexo 12.2)

Los valores obtenidos superan notablemente los estimados por la metodología empleada por la FAO, a pesar de haber tomado promedios de DQO y DBO menores y considerado 12 litros de vinaza/litro de etanol. Esto se debe a que en la metodología usada por la FAO se calcula producción de etanol a partir de melaza residual del proceso de elaboración de azúcar (45 kg melaza/tonelada caña molida = 12 litros etanol y 0,13 m³ de vinaza) a diferencia de la producción actual donde se emplea además de melaza, jugo directo de la caña de azúcar molida (85 litros de etanol/tonelada de caña molida), (Anschau et al., 2011).

Considerando la producción de metano calculada y un poder calorífico inferior de 9000 kcal/m³ de CH₄ podría abastecerse una planta de 47 MW durante 250 días, con una eficiencia de los motores del 39% y un factor de capacidad de planta del 100%. El monto bruto que se podría facturarse a partir de vinaza, utilizando el precio del MW adjudicado en RENOVAR 2.0 para un proyecto de generación, en Tucumán, a partir de CH₄ proveniente de efluentes cítricos sería de ~ 43,1 millones de US\$/año. (Anexo 12.3)

En la biometanización o metanogénesis, el volumen del efluente permanece inmodificado, con menores valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Sin embargo, la reducción de la DQO es 65 % y del 80 % en la DBO. Con valores de DQO del orden de 99 100 ppm y de DBO de 40 800 ppm, en el mejor de los casos, la DQO remanente es de 34 685 ppm y la DBO, de 8 160 ppm. Ambos valores, significativamente superiores a los requerimientos ambientales para el vuelco de descargas líquidas sobre cauces naturales. (Perera, 2009).

Entre los inconvenientes de la biometanización destacan el enorme volumen de vinaza tratada a disponer, el cual implica un gasto de logística variable en función de las condiciones geográficas, infraestructura, legislación, estado del tiempo, Etc.

Existen diferentes alternativas para mermar el impacto de la elevada carga orgánica del efluente tratado. Entre ellas destacan la aplicación de 100 ml O₃/Litro durante un período de 3 horas para reducir ~29,1% la DQO remanente del efluente a la vez que reduce el color en ~93,7% la turbidez en ~99,2%, (Cabrera-Díaz et al., 2016).

Otra opción consiste en utilizar el biogás obtenido para generar energía térmica con el objetivo de evaporar y secar la totalidad de la vinaza tratada (efluente cero) y convertirla en un biofertilizante (potásico-húmico) estabilizado con un elevado porcentaje de K₂O. Dicho proceso consta de dos etapas: la primera consiste en una evaporación utilizando evaporadores de múltiples etapas (normalmente 5 etapas) y luego se procede a un secado, el cual se puede realizar mediante diferentes tecnologías, siendo la más utilizada el secado por atomización (spray dryer). Una alternativa interesante sería un modelo mixto que permita generar electricidad (en menor porcentaje) y utilizar el biogás restante como fuente de energía térmica, aprovechando los gases de escape de los motores para la evaporación y secado del efluente.

Si se utilizara el biogás obtenido para desecar la vinaza se podrían generar ~ 146.000 Ton de Biofertilizante con un 5% de Humedad y un valor teórico de mercado de unos 29,2 millones de US\$/año. (Anexo 12.4). Cabe destacar que su valor real de mercado podría ser diferente al calculado. Según el INDEC: Argentina importó en 2011 desde Canadá 38.849 Ton de Cloruro de Potasio (K₂O<60%) y de acuerdo a la Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos el consumo en 2017 de fertilizantes potásicos fue 66.535 Ton de las cuales 28.067 Ton correspondieron a Cloruro de Potasio. Por lo que la producción de este fertilizante potásico (cuya concentración es de ~ 20% de K₂O) podría sustituir las importaciones y exportar el excedente a grandes consumidores de potasio como el caso de Brasil.

El monto de la inversión es similar en ambos modelos y aunque, de acuerdo a lo calculado anteriormente, producir energía eléctrica implica mayores ingresos el manejo y disposición final de las vinazas resulta oneroso y complicado logísticamente. Además la vinaza tratada genera fuertes olores debidos a la presencia

de azufre utilizada durante la sulfitación del jugo de la caña de azúcar y en la acidificación durante la elaboración del etanol, lo cual genera malestar en las poblaciones cercanas (a menos que se realice un proceso de oxidación de los sulfuros presentes en la vinaza).

En cuanto a las emisiones provenientes de la biometanización habría que diferenciar el destino del CH₄ generado.

- 1) Si el objetivo es generar energía eléctrica a partir de la combustión del biogás:

Emisiones de CO₂ = Combustión total de CH₄ + emisiones provenientes la vinaza residual ferti-irrigada

Emisiones de CO₂/año ~ 150.000 Ton CO₂/año

En la biometanización el porcentaje de Nitrógeno en la vinaza tratada es similar al inicial por lo que se considerará el mismo valor de emisiones de N₂O que el calculado en el Anexo 12.1.

- 2) Si el objetivo es evaporar y secar la vinaza:

Emisiones de CO₂ = Combustión total de CH₄ ~ 146.000 Ton CO₂/año (Anexo 12.5).

Es importante destacar que estas emisiones no corresponden a las emisiones netas del sistema. En el caso de la vinaza, el cultivo de la caña de azúcar absorbe una importante cantidad de CO₂ de la atmósfera (el rendimiento cultural promedio para la provincia de Tucumán en 2017 fue de 59,8 Ton/Has y la superficie actual plantada es de 273.737 hectáreas). En el caso de abastecer una planta que genere 47 MW con energías fósiles habría a las emisiones generadas habría que sumarles las que corresponden a la extracción, transporte y adecuación de los hidrocarburos utilizados como extracciones netas. En el caso del secado y evaporación de vinaza habría que comparar las emisiones que surgen de generar igual volumen de fertilizante potásico y sumar las emisiones generadas por la ferti-irrigación de la vinaza y las emisiones de los vehículos y energía consumidas durante la disposición de la misma en los suelos.

9.2 Concentración y Combustión de Vinazas

Para realizar los cálculos correspondientes a este modelo utilizo información relacionada con tecnología existente en India y datos proporcionados por diferentes empresas del sector.

En la Provincia de Tucumán se instalará una planta de concentración y combustión de vinaza, con una capacidad 22 MW brutos, en el predio de la destilería La Florida.

Entradas del sistema: la planta recibe vinaza pre-concentrada desde 11,1° a 25° Brix, por la destilería La Florida. Por medio de evaporadores del tipo *Falling Film* evaporan 1.120 toneladas de agua, de las 1.920 Ton/día de vinaza 25° Brix recibidas, quedando ~ 800 Ton/día de vinaza 60° Brix. Para ello utiliza 252 Ton/día de vapor de agua.

La planta cuenta con dos calderas, cada una consume ~ 16,67 Ton/h de vinaza °60 Brix y ~ 7 Ton/h de bagazo 52% Humedad, siendo el consumo diario de ~ 800 Ton vinaza 60° y ~ 336 Ton de bagazo 52% Humedad.

Salidas: cada caldera entrega 55 Ton/h de vapor de agua a 45 bares y una T° de 400 ± 5°C. Una turbina de vapor y condensación es accionada por estas 110 Ton/h de vapor de agua obteniéndose 22 M, 12 Ton vapor de agua 1,5 bar y agua condensada. Del total de energía generada 3 MW se utilizan para autoabastecer el proceso y 19 MW son inyectados a la red eléctrica nacional.

La planta genera cenizas de bagazo y de vinaza, las cenizas de vinaza poseen mayor contenido de potasio y son más volátiles, por ser de menor tamaño, conocidas también como *Fly Ash*, se descargan por diferentes tolvas. La producción de cenizas de vinaza es de 2,97 Ton/h con una concentración de ~ 42,7% de K₂O y ~ 9% de P. La densidad de las mismas es de 250 kg/m³. Las cenizas de bagazo, conocidas también como *Bottom Ash*, se descargan por la parte inferior de la caldera, su densidad ronda los 650 kg/m³.

Es recomendable peletizar la ceniza de vinaza para facilitar el transporte y evitar el humedecimiento de la misma ya que el K₂O es muy higroscópico. Cabe aclarar que su contenido de ion K⁺ se expresa en K₂O % para facilitar su comercialización, aunque su composición exacta es una mezcla de ion K⁺, sulfato de potasio, óxido de potasio y cloruro de potasio en proporciones variables.

Consumo anual de la planta: Los Balcanes S.A., propietaria de la destilería La Florida, se compromete a proveer a GENNEIA con 360.000 m³/año de vinaza 25°Brix y 95.000 toneladas/año de bagazo 52% Humedad para un período de 250 días de operación. Además se contemplan 50.000 toneladas/año de bagazo para 50 días adicionales. El convenio debe ponerse en marcha antes del año 2020 y su duración sería de 20 años. Aunque se prevé un aumento del suministro de vinaza en un porcentaje a determinar, pero cercano a un 20%. Comunicación personal con el ingeniero Juan Carlos Mirande, Gerente de Producción Sustentable del Grupo Empresario Los Balcanes.

Entre 2017 y la primer quincena de Abril de 2018 se molieron en Tucumán: 15.186.549 Ton de caña de azúcar y se produjo 299.086 m³ de etanol. Con una relación de 12 litros de vinaza/litro de etanol se generó ~ 3.589.034 m³ de vinaza 11.1°Brix. De acuerdo a la siguiente tabla concentrar toda esta vinaza a 60° Brix implica evaporar 81,50 g de agua cada 100 g de solución por lo tanto el volumen final de vinaza sería de ~ 663.971 m³ de vinaza 60° Brix.

Tabla 3. Concentración y combustión de vinazas. Perera, J. G. (2009).

Etapas:	Concentración [° Bx]:	Masa de Solutos [g]:	Masa de Agua [g]:	Δ Masa Total [g]:	Masa de Agua [g]:	Masa Total de Agua Evaporada [g]:
Inicio	11,1	11,1	88,90	100,00		
	12	11,1	81,40	92,50	7,50	7,50
	15	11,1	62,90	74,00	18,50	26,00
	18	11,1	50,57	61,67	12,33	38,33
	21	11,1	41,76	52,86	8,81	47,14
	24	11,1	35,15	46,25	6,61	53,75
	27	11,1	30,01	41,11	5,14	58,89
	30	11,1	25,90	37,00	4,11	63,00
	33	11,1	22,54	33,64	3,36	66,36
	36	11,1	19,73	30,83	2,80	69,17
	39	11,1	17,36	28,46	2,37	71,54
	42	11,1	15,33	26,43	2,03	73,57
	45	11,1	13,57	24,67	1,76	75,33
	48	11,1	12,03	23,13	1,54	76,88
	51	11,1	10,66	21,76	1,36	78,24
	54	11,1	9,46	20,56	1,21	79,44
	57	11,1	8,37	19,47	1,08	80,53
Final	60	11,1	7,40	18,50	0,97	81,50
	63	11,1	6,52	17,62	0,88	82,38

El sistema de concentración y combustión de vinaza requiere como porcentaje máximo de vinaza concentrada 60° Brix: 70% y un 30% de bagazo con una humedad de entre 48 y 52% de acuerdo a ISGEC.

A partir de 663.971 m³ de vinaza 60° Brix y 199.191 Ton de bagazo, con sus respectivos poderes caloríficos: 1.650 kcal/kg y 1.850 kcal/kg se podría abastecer una planta de 56,75 MW durante 250 días, considerando una turbina con una eficiencia del 20% y un factor de capacidad del 100%.

Tomando el precio adjudicado en RENOVAR 2.0 para la planta de GENNEIA (106,73 U\$/MW), el ingreso bruto anual proveniente de la venta de dicha energía sería de unos 36,3 millones de US\$/ año. (Anexo 12.6)

A este monto se agrega el valor de las cenizas provenientes de la combustión de la vinaza concentrada: aproximadamente 59.000 Ton/año. Las mismas poseen una concentración de 42,3% de óxido de potasio (K₂O) y 9,0% de fosfatos (PO₄). De acuerdo a los valores vigentes en Mayo de 2018: para cloruro de potasio (KCl) y fosforita Ca₅(PO₄)₃ en EEUU, el ingreso bruto proveniente de la venta de estas cenizas potásicas sería de unos 12,8 millones de US\$/año. (Anexo 12.7)

Siendo el ingreso bruto anual potencial de un sistema de concentración y combustión de vinaza entre energía producida y cenizas vendidas de unos 49,1 millones de US\$/año.

Las emisiones de CO₂ correspondientes a la combustión y concentración de la totalidad de la vinaza generada, incluyendo el bagazo utilizado como suplemento rondarían las 715.000 Ton CO₂/año. (Anexo 12.8).

Cabe destacar que al igual que las emisiones calculadas en el caso de la generación de biogás este valor no corresponde a las emisiones netas del sistema por los mismos motivos explicados anteriormente.

10 Análisis y discusión

Se plantearan a continuación dos modelos de aprovechamiento energético de la vinaza de caña de azúcar para la provincia de Tucumán.

El primero de ellos consiste en la generación de biogás a partir del efluente mencionado. En este caso hay que considerar la tecnología utilizada, si es un bioreactor anaerobio de flujo ascendente o si es un reactor anaerobio de flujo horizontal. En caso de generarse metano (CH_4), el mismo puede utilizarse para producir energía eléctrica o para desecar el efluente y generar un fertilizante orgánico estabilizado con un valor de mercado teórico elevado.

En el segundo caso se analizó la concentración de la vinaza de unos $11,1^\circ$ Brix, valor promedio según la Comisión Provincial de Vinazas para el año 2009, hasta unos 60° Brix, concentración en la cual puede quemarse directamente en caldera luego de ser aspergida. Para este modelo es necesario contar con un porcentaje de bagazo, mínimo un 30%, como suplemento calorífico.

El objetivo del siguiente análisis fue comparar los modelos y contrastarlos con el riego de vinazas en campos abiertos, al que llamaremos *tratamiento testigo* de aquí en más.

10.1 Generación de biogás.

A continuación se describen los modelos más utilizados para generar biogás a partir de materia orgánica.

i. Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente (RAFA):

Más conocido por sus siglas en inglés: UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Los reactores tipo UASB fueron desarrollados en la Universidad de Wageningen, Holanda en la década del '70 y se aplicó a escala industrial por primera vez en una industria azucarera alemana. Corresponden al modelo más utilizado en el tratamiento de efluentes a nivel mundial. En Argentina, con excepción de la destilería del Ingenio La Trinidad que actualmente trata el 1,5% de su vinaza, aunque actualmente no genera biogás, no existen instalaciones de reactores UASB a escala industrial que utilicen vinaza de caña de azúcar como materia prima. Se instalaron digestores pilotos de flujo ascendente en INTA Famaillá y en el Ingenio Ledesma de Jujuy. La EEAOC (Estación Agroexperimental Obispo Colombres) de Tucumán posee un pequeño biodigestor de 15 L utilizado para generar biogás a partir de vinaza en un laboratorio. Existen otros biodigestores piloto que en el pasado generaron biogás a partir de vinaza, en PROIMI (Planta Piloto de Procesos Industriales Microbiológicos) y en la EEAOC de Tucumán, pero actualmente dichos biodigestores no se utilizan para generar biogás o se encuentran desmantelados.

ii. Digestor Anaeróbico de Flujo Horizontal:

Conocido también como Horizontal Flow Anaerobic Digester. No hay en Argentina instalaciones para tratar vinaza de caña de azúcar con este tipo de biodigestor. CITRUSVIL S.A. instaló el primer biodigestor de efluentes cítricos del mundo en un predio cercano a su planta citrícola, el mismo fue desarrollado por la empresa belga BIOTEC. Consiste en una cámara que recibe los efluentes de los tres procesos que se realizan en la planta: secado de cáscara, jugo concentrado y aceite esencial. Los mismos son transportados por un ducto a una cámara en la que a través de tamices rotativos se separa la fracción sólida de la líquida.

La fracción sólida se traslada a campo y se deposita en forma de bordos controlando que la temperatura no supere los 70°C. Para ello se la mezcla con un implemento de arrastre en forma de tornillo sinfín durante 5 a 6 meses hasta que las bacterias descomponen y mineralizan la materia orgánica, proceso conocido como compostaje. Luego se permite el aumento de la temperatura para que mueran las bacterias, semillas, patógenos y otras plagas y se distribuye el producto entre las trochas de la plantación.

La fracción líquida, cuya DOQ promedia los 11,7 Kg/m³ se mezcla en un tanque con una lechada de cal y luego ingresa en alguno de los 3 biodigestores que funcionan en paralelo. La capacidad del sistema es de 90.000 m³: distribuidos en dos biodigestores de 40.000 m³ y uno de 10.000 m³, cada uno cubierto por una campana de Polietileno de Alta Densidad (PEAD). El líquido se desplaza horizontalmente con un caudal de

10.000 m³/día. A su paso reacciona con los lodos y fermenta anaerómicamente obteniéndose: biogás (con un 60% de CH₄, 0,6% de H₂S y ~38,5% de CO₂) y un efluente con una DQO de ~ 2,0 Kg/m³. La remoción alcanza valores cercanos al 75%. (Migliavaca, 2011) y comunicación personal con German Eugenio Roig Babot, responsable del laboratorio de la planta de tratamiento de efluentes de Citrusvil SA.

A la salida del biodigestor el efluente es derivado a piletones abiertos donde sufre una fermentación aeróbica. Circula de un piletón al siguiente y tras llegar al noveno es bombeado a alguna de 3 fincas cítricas aledañas en las que se realiza un riego mediante mangas de lona móviles sobre la trocha de plantación.

La producción nominal de biogás corresponde a un 20% del consumo total de Gas Natural por parte de la industria en cuestión, un 95 % de dicho biogás se utiliza en las plantas A y B en los procesos de secado de cáscara y en las calderas, y el 5 % restante se quema con una antorcha descubierta. El Biodigestor trabaja a temperatura ambiente y de manera continua entre los meses de Marzo a Septiembre, siendo la temperatura promedio dentro de los tanques de fermentación anaeróbica de aproximadamente 25°C. El gas antes de quemarse en la industria debe ser filtrado para eliminar el H₂S, utilizando un filtro con óxido de hierro. Previamente se introduce 0,6 % de O₂ en las campanas que cubren los tanques y acumulan el biogás para lograr un ambiente propicio para bacterias que descomponen el H₂S. CITRUSVIL S.A. se presentó a la licitación de RENOVAR 2.0, con la intención de utilizar el 100% de su producción de biogás para generar energía eléctrica y fue adjudicada para producir 3 MW a un precio de 153 U\$/MW. *Los motores a utilizar tendrían una eficiencia eléctrica y térmica ~42%, se descartaron turbinas ya que su eficiencia eléctrica para este volumen de gas es menor al 30%*, German Eugenio Roig Babot, responsable del laboratorio de la planta de tratamiento de efluentes de Citrusvil SA, comunicación personal.

Tabla 4. Biometanización de la Vinaza: diferentes parámetros.

	Biometanización de la vinaza	
Destino del CH ₄	Energía Eléctrica	Evaporar el efluente y generar un fertilizante
Efluente: DQO [mgO/L]	Vinaza tratada: 34,563	CERO
Producción Energía Eléctrica para Tucumán (04/2017-04/2018)	47 MW 43 M US\$/año	NO
Fertilizante:	NO	SI
Ton Fertilizante (5%Humedad)/año		146.000
US\$ Fertilizante/año		29.2 M US\$
Emisiones [Ton CO ₂ /año]	150.000	146.000
Ingreso Bruto Anual	43 M US\$/Año	29 M US\$/Año

Las ventajas de la biometanización para producir energía eléctrica respecto a la concentración y combustión de vinazas es que representa una menor inversión, su manejo es menos complejo, emplea menos mano de obra, no insume un suplemento calórico como lo es el bagazo y el precio adjudicado en RENOVAR 2.0 en US\$/MWh es mayor para generación proveniente de biogás. Es apta para medianas a pequeñas destilerías

Como contrapartida no evita el problema del manejo y disposición de las vinazas. Si bien disminuye aproximadamente 2/3 de la carga orgánica, el enorme volumen de efluente aún no posee aptitud de vuelco en cuerpos de agua y debe disponerse en suelos evitando superar el límite anual de 150 m³/Ha recomendado para la mayoría de los suelos tucumanos por la resolución N° 40 de la Secretaria de Estado de Medio Ambiente de Tucumán. A su vez la disposición de la vinaza ferti-irrigada implica el uso de mano de obra, la construcción de vinazoductos y/o utilización de vehículos y consumo de combustible en caso de transportarla con camiones-carros. Esto implica no solo un costo de tiempo y dinero sino emisiones de CO₂ a la atmósfera. Además aún persisten olores nauseabundos en la vinaza tratada debido a la presencia de azufre en la misma, por lo que se debería realizar una oxidación para transformar los sulfuros en sulfatos.

En el caso de utilizar el biogás para evaporar y desecar la vinaza tratada se eliminan las desventajas mencionadas anteriormente. La principal ventaja radica en la ausencia de efluente resolviendo una problemática ambiental muy importante en Tucumán. En ingreso del sistema se estima en base al valor de comercialización de dicho bio-fertilizante en otros países y a la semejanza con los precios internacionales de las commodities para cloruro de potasio y fosforita (Anexo 12.7).

10.2 Concentración y combustión de vinaza

La vinaza concentrada a 60° Brix posee un poder calorífico inferior cercano a las 1650 kcal/kg lo que permite la combustión directa de la misma si se inyecta a alta presión en una caldera. Para llevar la concentración de la vinaza de 11,1° Brix a 60° Brix es necesario utilizar evaporadores de múltiple efecto. En la caldera se asperge la vinaza concentrada combinada con bagazo ~50% de humedad, el cual posee ~ 1850 kcal/kg.

Con el calor obtenido en la caldera se genera suficiente vapor de agua para accionar una turbo máquina (normalmente turbinas térmicas de vapor de agua) que permiten generar energía eléctrica e inyectarla a la red nacional de tendido eléctrico. El calor residual se reutiliza para concentrar la vinaza con los evaporadores mencionados en el apartado 9.2.

Los gases de combustión pasan por unos ciclones secos electromagnéticos que separan la fracción sólida por unos filtros y por unas chimeneas el CO₂.

Las cenizas del bagazo y de la vinaza concentrada-quemada son descargadas por diferentes lugares. La ceniza de vinaza posee una concentración de K₂O ~ 42-43% y hasta un 9-10% de P lo que permitiría su comercialización como fertilizante. Para ello debería formularse el producto de manera que facilite su comercialización. En el caso de la planta a instalarse en Tucumán se estudia la posibilidad de realizar un peleteado de las cenizas en gránulos de un tamaño que permita aplicarse conjuntamente con otros fertilizantes.

Las entradas de este modelo son: vinaza concentrada a 60° Brix y bagazo 50-52% H. Y las salidas: energía eléctrica, vapor de agua, CO₂ y cenizas.

El vapor de agua de salida, con menor presión recircula por un intercambiador de calor y reingresa a la caldera como agua condensada, para pasar nuevamente a la fase de vapor y reiniciar el ciclo.

En la provincia de Tucumán, durante la ronda de RENOVAR 2.0 la empresa GENNEIA S.A. fue adjudicataria de 19 MW de potencia a un precio de 106 U\$/MW. El proyecto: *C.T. BIOMASA LA FLORIDA* consiste en la instalación de una planta de concentración y combustión de vinaza en un predio de 2.6 Hectáreas cedido a comodato por un lapso de 50 años por la *Cía. Azucarera Los Balcanes SA* (propietaria de una de las mayores destilerías de etanol del país). Comunicación Personal con el Ing. Agr. Juan Carlos Mirande, Gerente de Producción Sustentable del Grupo Empresario Los Balcanes.

La destilería *La Florida* posee un vinazoducto que lleva la vinaza hasta un evaporador y la concentra a unos 25 ° Brix para producir luego compostaje en un predio de 100 Has llamado *Finca Ferro* ubicado a 8,5 Km.

La planta de combustión de vinaza será construida por una empresa India llamada *ISGEC S.A.* El diseño del proyecto estuvo a cargo de la compañía *Energy33*. Comunicación Personal con el Ing. Ind. Gerardo Andriani propietario de *METALAR S.A.*

Tabla 5. Concentración y Combustión de Vinazas: Diferentes parámetros.

	Concentración y Combustión de Vinazas	Testigo (ferti-irrigación)
Efluente: DQO [mgO/L]	CERO	98.753
Producción Energía Eléctrica para Tucumán (04/2017-04/2018)	57 MW 36,3M US\$/año	NO
Cenizas:		NO
Ton Cenizas/año	59.000	
US\$ Cenizas/año	12,8 M	
Emisiones [Ton CO2]	715.000	4.370
Ingreso Bruto Anual	49,M	IMPLICA UN GASTO

Entre las ventajas de la concentración y combustión de vinazas se menciona la posibilidad de obtener ganancias mixtas provenientes tanto de la producción de energía eléctrica como de venta de las cenizas ricas en potasio, maximizando el ingreso bruto anual. A su vez la ausencia de efluente evita gastos de logísticas significativos y malestar en la población.

Debido a que el costo de la misma es mayor al de una planta de biogás, por los concentradores de vinaza, calderas, turbinas y costos de operación y mantenimiento esta tecnología se adapta mejor para grandes destilerías o en su defecto para ubicarse en una región donde reciba el efluente de más de una destilería a través de vinazoductos.

11 Conclusiones

El manejo actual de la Vinaza en la provincia de Tucumán presenta elevados riesgos de contaminación e implica una erogación significativa en las arcas de cualquier destilería

Se estudió el potencial de producción de energía, mediante la aplicación de dos tecnologías para aprovechar las Vinazas que resultan de la industria sucro-alcoholera en la provincia de Tucumán: generar Biogás o Concentrar Vinazas, en ambos casos para obtener combustible para generación eléctrica.

Podrían producirse 69.000.000 m³ CH₄/año, para proveer 282 GWh a través de motores de combustión interna, generando un ingreso bruto de 43.000.000 US\$/año, o se podría concentrar Vinazas, para proveer 342 GWh mediante una turbina y obtener cenizas ricas en Potasio, con un ingreso bruto mixto de 49.000.000 US\$/año.

Las Ton CO₂-eq/año emitidas por cada proceso serían 4.370 si se opta por Vinaza ferti-irrigada, 146.000 si se utiliza biogás para obtención de fertilizante, 150.000 si se obtiene CH₄ para generar electricidad y 715.000 si se concentra y quema Vinaza. Estos valores no corresponden a emisiones netas del sistema, no incluyen el ciclo de vida desde el cultivo de la caña de azúcar. Habría que descontar las emisiones generadas por producción y uso de hidrocarburos sustitutos.

Mediante producción de Biogás para evaporar y secar el efluente o concentración y combustión de Vinazas, se produce fertilizante con valor agregado y se reducen significativamente los riesgos de salinización de suelos, la contaminación de cuerpos de agua y los olores generados por la actual disposición de vinazas.

La concentración y combustión de Vinazas requiere una alta inversión, por lo que no se sugiere en pequeñas y medianas destilerías. GENNEIA anunció una inversión de 60.000.000 US\$ para instalar esta tecnología en la destilería de La Florida (más de 90.000 m³ etanol/año).

12 Anexo I

Tabla 6. Potencia Instalada Distribución por Tecnología/Región [MW]. Informe MEM: Diciembre 2017

REGION	TV	TG	CC	DI	Térmico Total	Hidráulica	Nuclear	Solar	Eólica	Hidro <= 50 MW	Biogas	Renovable Total	TOTAL
CUYO	120	90	374	40	624	957	0	8	0	172	0	180	1.761
COM	0	631	1.282	92	2.005	4.725	0	0	0	44	0	44	6.773
NOA	261	676	1.472	372	2.780	101	0	0	58	118	0	176	3.057
CENTRO	200	671	534	101	1.505	802	648	0	0	116	4	120	3.075
GBA-LIT-BAS	3.870	3.559	6.587	895	14.911	945	1.107	0	0	0	18	18	16.981
NEA	0	33	0	303	336	3.100	0	0	0	0	0	0	3.436
PATA	0	347	188	0	535	472	0	0	168	47	0	215	1.222
U. Móviles	0	0	0	200	200	0	0	0	0	0	0	0	200
TOTAL	4.451	6.006	10.436	2.003	22.896	11.101	1.755	8	227	496	22	753	36.505
% TERMICO	19%	26%	46%	9%	100%								
% TOTAL					63%	30%	5%					2%	100%

12.1 Cálculo para la obtención de las emisiones de GEI medidas en CO₂-eq producidas por la ferti-irrigación de la vinaza en los suelos tucumanos:

1m³ de vinaza contiene entre 0,12 y 0,25 kg de Nitrógeno, con tendencia hacia el valor más alto, de acuerdo a los análisis de vinaza aportados por el Dr. W. Daniel Machado, Responsable de Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Por lo que se considerará 0,25 kg de N/ m³ vinaza.

El N₂O posee un 63,6483% de Nitrógeno y un 36,3515% de Oxígeno

1 % del N de la vinaza aplicada al suelo se emite como N₂O, Soares et al. (2009):

$$(0,25 \text{ kg de N} * 0,01) / 0,636483 = 0,00392783 \text{ kg N}_2\text{O} / \text{m}^3 \text{ vinaza}$$

$$3.589.034 \text{ m}^3 \text{ de vinaza} * 0,00392783 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{ vinaza} = 14.097,1322 \text{ kg N}_2\text{O}$$

1 mol N₂O ~ 310 moles CO₂-eq, de acuerdo al IPPC.

$$\text{Emisiones CO}_2\text{-eq/ año vinaza ferti-irrigada} = 4.370.110,98 \text{ kg CO}_2\text{-eq} = 4.370,11 \text{ Ton CO}_2\text{-eq}$$

12.2 Cálculo de la producción potencial de metano para la provincia de Tucumán:

$$\text{DQO Año} = \text{m}^3 \text{ vinaza/año} * \text{DQO promedio} = 3.589.034 \text{ m}^3 \text{ vinaza/año} * 98,753 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ vinaza}$$

$$\text{DQO Año} = 354.427.874,6 \text{ Kg DQO/año}$$

La eficiencia de aprovechamiento de la DQO es del 70%, Lorenzo-Acosta et Al. 2014. En el siguiente cálculo se considera un 65% de aprovechamiento de la DQO para ser conservador.

$$\text{DQO convertible (aprovechable)} = \text{kg DQO Año} * 0,65 = 230.378.118,49 \text{ kg DQO/año}$$

Por cada kilo de DQO transformado se obtienen 0,5 m³ de biogás con un contenido de 65 % de metano, Morandini y Quiaia 2013. En la práctica usualmente el porcentaje de CH₄ en el biogás proveniente de vinaza es menor al 65%, cercano a un 60%, comunicación personal con Philippe Conil, presidente ejecutivo de BIOTEC.

Potencial de Metano/año en Tucumán = 230.378.118,49 kg DQO/año * 0,5 m³ biogás/kg DQO * 0,60 m³ CH₄/m³ de Biogás = 69.113.435,547 m³ CH₄/año

Tomando un poder calorífico de 9.000 kcal /m³ CH₄ y una TEP de 10.000.000 kcal:

Potencial Energético = (69.113.435,547 m³ CH₄/año * 9.000 kcal /m³ CH₄)/10.000.000 kcal/TEP
= 62.202,1 TEP

12.3 Estimación de MWh/año y US\$/año provenientes del CH₄ generado:

Considerando un poder calorífico inferior del CH₄ de 9000 Kcal/m³:

622.020.924.000 kcal equivalen a 723.410,3 MWh. (Considerando 1 MWh = 859.845,2 Kcal).

723.410,3 MWh producidos durante 250 días (250 * 24 h = 6000 h) = 120, 5683 MW.

Para una eficiencia de un motor de combustión interna de un 39%, la energía que podría producirse a partir de vinaza para el período comprendido sería de 120,5683 MW * 0,39 = 47,0216 MW.

La empresa CITRUSVIL S.A., fue adjudicada con 3 MW de energía proveniente de biogás de efluentes cítricos a un valor de 153 US\$/MW. El monto bruto que se podría facturarse a partir de vinaza durante dicho período (250 días), considerando una capacidad de planta del 100%, y con ese monto sería de:

723.410,3 MWh/año * 0.39 * 153,0 US\$/ MWh = 43.165.892,6 US\$/año.

12.4 Cálculo de la producción de biofertilizante seco a partir de vinaza:

3.589.034 m³ de vinaza 11,1° Brix = 398.382,774 Ton Materia Seca

Remoción del biodigestor 65% = 398.382,774 Ton Materia Seca * 0,35 = 139.443,97 Ton MS

Toneladas de Biofertilizante con un 5% Humedad= 146.405,67 Ton

Valor de mercado del biofertilizante rondaría los 200 US\$/Ton, comunicación personal con Philippe Conil, presidente ejecutivo de BIOTEC.

Por lo que el beneficio bruto anual rondaría los 29.281.133,89 US\$/año.

12.5 Emisiones de CO₂ durante el aprovechamiento del biogas:

69.113.435,547 m³ CH₄/año poseen ~ 622.020.924.000 kcal = 2.604,2772046032 TJ

El factor de emisión para un motor de combustión interna a gas natural de acuerdo a la *Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático* (página 255, Anexo II del documento citado) es de 56,1 Ton CO₂/TJ generado.

Emisiones de CO₂/año en aprovechamientos que secan el efluente a partir de la utilización de ~ 100% del biogás generado = 56,1 Ton CO₂/TJ * 2.604,2772046032 TJ/año = 146.099,98 Ton CO₂/año

Emisiones de CO₂/año en aprovechamientos que generan energía eléctrica a partir del CH₄ generado = 146.099,98 Ton CO₂/año + 4.370,11 Ton CO₂ = 150.470,09 Ton CO₂/año. Este valor se debe a la presencia de nitrógeno en el efluente de la vinaza tratada, cuyo contenido genera emisiones similares a la vinaza ferti-irrigada calculadas en el Anexo 12.1.

12.6 MWh e ingreso potencial por concentración y combustión de vinaza:

Con un 70% de vinaza concentrada 60° Brix y 30% de bagazo 52% Humedad las kcal aportadas serían:

Vinaza = 1.650 Kcal/kg * 663.971 Ton vinaza 60° Brix * 1.000 kg/Ton = 1.095.552.150.000 kcal.

La cantidad de bagazo que se obtiene por cada unidad de caña de azúcar depende del contenido de fibra de la materia prima, que es función a su vez de la variedad de caña de azúcar, del estado fisiológico de las plantas y del sistema de cosecha empleado. En general se considera que alrededor de 30% de cada tonelada de caña molida se transforma en bagazo. (Valeiro et al., 2017).

En Tucumán de acuerdo al Centro Azucarero Argentino entre 2017 y 15-04-2018 se molieron 15.186.549 toneladas de caña de azúcar lo que implica ~ 4.555.964 Ton de bagazo. El bagazo posee un poder calorífico inferior de ~1850 Kcal/kg:

En el caso del modelo analizado se utilizaría un 30% de bagazo por lo que son necesarias unas 199.191 Ton de bagazo (~368.503.350.000 kcal).

Kcal/año potenciales de un sistema de concentración y combustión de vinaza = 1.095.552.150.000.000 kcal + 368.503.350.000 kcal = 1.464.055.500.000 Kcal ~ 146.405,55 TEP.

1 MWh = 859.845,2 Kcal:

1.464.055.500.000 Kcal = 1.702.697MWh

[1.702.697 MWh * 0,20 (eficiencia de la turbina)] / 6000 h = 56,75 MW

El proyecto de Concentración y Combustión de vinazas fue adjudicado en la ronda de RENOVAR 2.0 con 19 MW a un precio de 106,73 US\$/MWh lo que significa un ingreso anual (para una planta que funcione 250 días con un factor de capacidad de 100):

$$1.702.697 \text{ MWh} * 0,2 * 106,73 \text{ US\$/MWh} = 36.345.770,162 \text{ US\$/ año}$$

12.7 Ingreso por cenizas volantes en concentración y combustión de vinaza:

Se producen aproximadamente 2,97 Ton/h de *fly ashes* por la combustión de 33,333 Ton/h de vinaza 60° Brix.

Para 663.971 Ton vinaza 60° Brix:

$$(663.971 * 2,97) / 33,333 = 59.159,816 \text{ Ton/año de ceniza de vinaza 60° Brix}$$

Esta ceniza de acuerdo a análisis realizados por GENNEIA, posee una concentración de 42,3% de óxido de potasio (K_2O) y 9,0% de fosfatos (PO_4).

El valor mundial de referencia del principal fertilizante potásico, cloruro de potasio (KCl) fue de 216 US\$/Ton en EEUU y de la fosforita $Ca_5(PO_4)_3$ 103 US\$/Ton en EEUU (precios de Commodities para el mes de Mayo de 2018, proporcionados por el Banco Mundial)

De acuerdo al International Plant Nutrition Institute, 1 Ton de KCl contiene ~ 52-53% de K^+ , 60-63 % de K_2O y 1 Ton de $Ca_5(PO_4)_3$ ~ 15-20 % de fosfato.

Por lo tanto la ceniza proveniente de vinaza 60° Brix tendría un valor que puede calcularse de la siguiente manera:

$$1 \text{ Ton KCl} \sim 60\% \text{ de } K_2O = 216 \text{ US\$}$$

$$1 \text{ Ton de } K_2O \text{ al } 42,3\% = (216 \text{ US\$} * 0,43) / 0,6 = 154,8 \text{ US\$}$$

$$1 \text{ Ton de } Ca_5(PO_4)_3 \sim 15\% \text{ de } PO_4 = 103 \text{ US\$}$$

$$1 \text{ Ton } PO_4 \text{ al } 9,0\% = (103 \text{ US\$} * 0,09) / 0,15 = 61,8 \text{ US\$}$$

Por lo tanto el precio de la ceniza proveniente de vinaza 60° Brix =

$$= 154,8 \text{ US\$/Ton} + 61,8 \text{ US\$/Ton} = 216,6 \text{ US\$/Ton}$$

Ingreso bruto proveniente de cenizas potásicas:

$$59.159,816 \text{ Ton/año} * 216,6 \text{ US\$/Ton} = 12.814.016,14 \text{ US\$/año}$$

Ingreso bruto anual de un sistema de concentración y combustión de vinaza entre energía producida y cenizas vendidas:

$36.345.770,162 \text{ US\$/año} + 12.814.016,14 \text{ US\$/año} = 49.159.786,30 \text{ US\$/año}$

12.8 CO₂ producido durante la concentración y combustión de vinaza:

El bagazo emite 0.83 kg CO₂/kg bagazo 52% Humedad, (Alderetes, 2016).

$199.191 \text{ Ton bagazo } 52\% \text{ Humedad} * 0.83 \text{ Ton CO}_2/\text{Ton bagazo } 52\% \text{ Humedad} = 165.328,53 \text{ Ton CO}_2$

La vinaza concentrada emite 0,829 kg CO₂/kg Vinaza 60° Brix, (Comunicación personal, Ing. M. Golato, EEAOC).

$663.971 \text{ m}^3 \text{ vinaza } 60^\circ \text{ Brix} * 0,829 \text{ Ton CO}_2/\text{Ton Vinaza } 60^\circ \text{ Brix} = 550.431,959 \text{ Ton CO}_2$

Emisiones potenciales anuales de CO₂ en concentración y combustión de vinaza 60° para Tucumán =
 $= 165.328,53 \text{ Ton CO}_2/\text{año} + 550.431,959 \text{ Ton CO}_2/\text{año} = 715.760,489 \text{ Ton CO}_2/\text{año}$

13 Bibliografía

Centro Azucarero Argentino, 2014. *Proceso Productivo | Centro Azucarero Argentino*. [online] Disponible en: <http://centroazucarero.com.ar/azucar/> [Visitado 19 Feb. 2018].

Tucumán, I. D. E. P. (2016). Instituto de Desarrollo Productivo de Tucumán (2013). El limón en Tucumán, Argentina y el mundo. Informe Especial.

Escartín, C., Denaday, F., Parodi, G., Paracca, J. I., Bonino, M. F., Di Leo, N., & Barasch, Y. (2016). Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa Metodología WISDOM Provincia de Tucumán. Buenos Aires.

Madkur, A., & Gomez Soria, C. (2017). Tucumán Polo de Inversión Productivo 2016-2017. Tucumán.

Ipaat.gov.ar. (2018). Zafra 2017/2018 totales hasta la 2da quincena noviembre 2017. [online] Disponible en: <http://www.ipaat.gov.ar/wp-content/uploads/2017/07/TOTALES-HASTA-2DA-QUINCENA-NOVIEMBRE.pdf> [Visitado 19 Feb. 2018].

Ferreira, E. S., & Monteiro, A. O. (1987). Efeitos da aplicação da vinhaça nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Boletín Técnico COPERSUCAR, 36, 1-7.

Jaldo Alvaro M. D., & Ortiz J. M. (2016). La trayectoria socio-técnica de la mecanización de cosecha de caña de azúcar en Tucumán. IX Jornadas de Sociología de la UNLP 5, 6 y 7 de Diciembre de 2016.

Invenomica.com.ar. (2017). Argentina: líder en consumo de gas en América Latina, pero muy floja aún en producción | Invenomica. [online] Disponible en <https://www.invenomica.com.ar/argentina-lider-en-consumo-de-gas-en-america-latina-pero-muy-floja-aun-en-produccion/> [Visitado 19 Feb. 2018].

MINEM. (2017). *Ministerio de Energía y Minería*. [online] Minem.gob.ar. Disponible en: <https://www.minem.gob.ar/prensa/25943/resumen-de-la-importacion-de-gas-2016> [Visitado 19 Feb. 2018].

Morandini, M., & Quaia, E. (2013). Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. *Estación experimental agroindustrial obispo colombes*, 34(2), 1-12.

United States Department of Agriculture (2016). *Food Composition Databases Show Foods -- Sugars, granulated*. [online] Disponible en: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/6319> [Visitado 19 Feb. 2018].

Blog.tabacal.com.ar. (2008). *Tabacal – El Blog de Tabacal Agroindustria » Blog Archive Proceso de elaboración del Azúcar | Tabacal - El Blog de Tabacal Agroindustria*. [online] Disponible en: <https://blog.tabacal.com.ar/index.php/proceso-de-elaboracion-del-azucar/> [Visitado 19 Feb. 2018].

ALCONOA (n.d.). *Elaboración de Alcohol Etilico*. [online] Disponible en: <http://www.alconoa.com.ar/documentos/Elaboracion%20Alcohol%20Etilico.pdf> [Visitado 19 Feb. 2018].

Anschau, R., Flores Marco, N., Carballo, S. and Hilbert, J. (2011). *Evaluación del potencial de producción de biocombustibles en Argentina, con criterios de sustentabilidad social, ecológica y económica, y gestión ordenada del territorio. El caso de la caña de azúcar y el bioetanol*. Disponible en: <https://inta.gob.ar/documentos/evaluacion-del-potencial-de-produccion-de-biocombustibles-en-argentina-con-criterios-de-sustentabilidad-social-ecologica-y-economica-y-gestion-ordenada-del-territorio.-el-caso-de-la-cana-de-azucar-y-el-bioetanol-1> [Visitado 20 Mar. 2018].

Swan, H., & Karalazos, A. (1990). Las melazas y sus derivados. *Revista Tecnología. Geplacea*, (19).

ALCONOA (n.d.). *Producción de bioetanol*. [online] Disponible en: <http://www.alconoa.com.ar/Proceso.html> [Visitado 20 Feb. 2018].

España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J., Hernández-Zarate, G., & Alzate-Gaviria, L. (2011). Vinasses: characterization and treatments. *Waste Management & Research*, 29(12), 1235-1250.

Perera, J. G. (2009). Concentración y combustión de vinazas. *Ministerio de Gobierno y Justicia de la Provincia de Tucumán, Secretaría de Estado de Gobierno y Justicia, Subsecretaria de Asuntos Técnicos*.

Conil, P. (2006). Manejo de vinazas: metanización y compostaje, aplicaciones industriales. *Revista Técnicaña* (17), 26-30.

Fadda, G., & Morandini, M. (2007). *El uso agrícola de la vinaza: revisión de antecedentes y caracterización de las condiciones del área cañara tucumana para su aplicación*. Estación Experimental Agro-Industrial" Obispo Colombres".

Infocampo.com.ar (21-12-2017). Un ingenio azucarero producirá energía eléctrica a partir de vinaza y bagazo | Infocampo. [online] Disponible en <http://www.infocampo.com.ar/un-ingenio-azucarero-producira-energia-electrica-a-partir-de-vinaza-y-bagazo/> [Visitado 24 Mar. 2018].

Valeiro, A., Portocarrero, R., Ullivarri, E., Vallejo, J., & Famaillá, I. E. (2017). Los Residuos de la Industria Sucro-Alcoholera Argentina.

Biodiesel argentina noticias sobre biodiesel y energías renovables (2018). Etanol en Argentina, planean aumentar el corte obligatorio al 25%. [online] Disponible en: <https://biodiesel.com.ar/11019/etanol-en-argentina-planean-aumentar-el-corte-obligatorio-al-25> [Visitado 20 Feb. 2018].

Rodrigues, D., & Ortiz, L. (2006). Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana de açúcar no Brasil. *Porto Alegre, Brazil: Amigos da Terra Brasil*.

SOARES, L. D. B., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., & Boddey, R. M. (2009). Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. *Embrapa Agrobiologia-Circular Técnica (INFOTECA-E)*.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2018). *ToxFAQs™: Plomo (Lead) | ATSDR*. [online] [Atsdr.cdc.gov](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.html). Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.html [Visitado 20 Feb. 2018].

Oliveira, B. G., Carvalho, J. L. N., Chagas, M. F., Cerri, C. E. P., Cerri, C. C., & Feigl, B. J. (2017). Methane emissions from sugarcane vinasse storage and transportation systems: Comparison between open channels and tanks. *Atmospheric environment*, 159, 135-146.

Cabrera-Díaz, A., Pereda-Reyes, I., Dueñas-Moreno, J., Véliz-Lorenzo, E., Díaz-Marrero, M., Menéndez-Gutiérrez, C., Oliva-Merencio, D. and Zaiat, M. (2016). Combined treatment of vinasse by an upflow anaerobic filter-reactor and ozonation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33(4), pp.753-762.

Migliavaca, J. (2011). "Tratamiento Anaeróbico de Efluentes Cítricos con Captación de Biogás para la Reducción de Gases de Efecto Invernadero". Tesis para la obtención del Título de Magister en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán.

Alderetes, C. (2016). *Calderas a Bagazo - Proyecto, operación y mantenimiento*. 1^{ra} ed. Argentina: Edición del Autor.

Global Bioenergy Partnership 2015, *Estudio Piloto Indicadores GBEP de Sustentabilidad de la Bioenergía en Argentina*.