

María Elisa Indiveri

DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ORUJO DE UVA  
DE BODEGAS DE LA PROVINCIA DE  
MENDOZA

---

Trabajo Final de Maestría en Ingeniería  
Ambiental.

Para optar por el título de:  
Magíster en Ingeniería Ambiental.  
Facultad de Ingeniería.  
Universidad Nacional de Cuyo.

Directora: Susana Llamas  
Codirector: Jorge Fuentes Berazategui  
2022

*Dedicado a mi hermosa familia.*

## Resumen

La digestión anaerobia (DA) es un medio para tratamiento de residuos tanto como para generación de energía. Una nueva legislación en Argentina sobre energías renovables y elevadas tarifas sobre el consumo energético de fuentes fósiles, impulsan el uso de fuentes renovables.

La actividad vitivinícola en la provincia de Mendoza, en los últimos 11 años, ha procesado un promedio de 1 638 883 072.81 kg de uva anuales, esto define a la vitivinicultura como la principal agroindustria mendocina. Casi el 10% del peso de esta uva elaborada corresponde a orujo de uva, residuo sólido generado en bodegas, compuesto por epicarpio y semilla de uva.

El objetivo de este trabajo de tesis fue investigar la posibilidad de generación de biogás a partir de orujo de uva como sustrato en bodegas y destilerías de la provincia, que concentran este residuo. Para lograrlo fue estudiada la cantidad de uva ingresada a bodegas, como la cantidad de orujo generada por las mismas, luego se calculó la cantidad de energía posible de generar en base a biogás. Finalmente fueron cuantificados poderes caloríficos de orujo, como también su potencial de generación de metano, mediante el desarrollo de la metodología de ensayos de potencial bioquímico de metano (PBM) y su adaptación a los recursos del lugar.

Se obtuvo como resultado la factibilidad de degradación anaerobia de orujo agotado de uva mediante ensayos PBM. Se controlaron las siguientes variables: temperatura, volumen y anaerobiosis, mediante reactores de juntas bridadas, provistos de válvulas y manómetros para la cuantificación de la generación de gas, dispuestos en un baño termostatzado. La duración del ensayo fue de 63 días y mediante el mismo se constató la generación de metano por cromatografía gaseosa. Fueron generados 37.52 L CH<sub>4</sub>/kg SV de orujo agotado y su energía específica fue de 7.04 kWh/Nm<sup>3</sup>.

Fue estimado un promedio anual de 148 419 476.09 kg de orujo generados en la provincia en la serie temporal 2008 a 2018. El rendimiento en metano, calculado para la cantidad de orujo generada anualmente en la provincia, fue de 51 598 030 863.00 L, que equivalen a las necesidades de gas de 4 623 casas o de 219 bodegas.

Teniendo en cuenta una eficiencia en la conversión energética del 25% para la generación de energía eléctrica por medio de aprovechamiento de biogás, podrían ser generados 9 001 121.76 kWh que cubrirían casi el 4% de los requerimientos energéticos calculados para una bodega de mediana capacidad (330 000 hL anuales). Los valores expuestos comprueban que el aprovechamiento del gas metano, a partir de la digestión anaerobia de orujo de uva, puede contribuir, en parte, con los requerimientos energéticos de establecimientos vitivinícolas.

## Summary

Anaerobic digestion (AD) is a mean for waste treatment as well as power generation. New regulations in Argentina on renewable energy and high prices of energy consumption from fossil sources, promote the use of renewable sources.

Vitiviniculture in Mendoza, in the last 11 years, has processed an average of 1 638 883 072.81 kg of grapes per year, this defines this activity as the main agribusiness in Mendoza. Almost 10% of the weight of this elaborated grape corresponds to grape pomace, a solid waste generated in wineries, made up of peel and grape seed.

The aim of this work was to study the possibility for biogas generation through grape pomace, used as substrate in wineries and distilleries in the province that concentrate this waste. To achieve this, the amount of grapes that entered wineries was studied, as well as the amount of pomace produced by them, then the amount of energy possible to generate through biogas was calculated. Finally, the caloric power of pomace was quantified, as well as its methane generation potential, through the development of the biochemical methane potential (BMP) assay methodology and its adaptation to local resources.

The feasibility of anaerobic degradation of spent grape pomace was obtained as a result by BMP tests. The following variables were controlled: temperature, volume and anaerobiosis, using flanged joint reactors, provided with valves and manometers for gas quantification, all arranged in a thermostatted bath. The test lasted 63 days and methane generation was verified by gas chromatography. 37.52 L CH<sub>4</sub>/kg VS of spent pomace were generated, and its specific energy was 7.04 kWh/Nm<sup>3</sup>.

An annual average of 148 419 476.09 kg of pomace generated in the province of Mendoza in 2008 to 2018 time series was estimated. Methane yield, calculated for annual average production of pomace, was 51 598 030 863.00 L, which is equivalent to gas needs of 4 623 houses or 219 wineries.

Considering a 25% energy conversion for electrical energy generation through biogas, medium generators could be 9 001 121.76 kWh, which would cover almost 4% of the energy requirements calculated for a winery of a medium annual capacity (330,000 hL).

Those exposed, verify that the use of methane gas, from anaerobic digestion of grape pomace, can contribute, in part, with energy requirements of wine establishments.

## Prefacio

Este trabajo de tesis es la síntesis de un camino transitado los últimos diez años dentro de la UNCuyo. Abarca solo una pequeña parte de estudios y proyectos desarrollados en ese lapso, en relación a digestión anaerobia, tratamiento de residuos orgánicos y generación de energías renovables.

Agradezco a las personas e instituciones que inspiraron este camino. En una primera instancia, a los Institutos Multidisciplinarios de la UNCuyo (IMD), donde fue posible coordinar el programa de Biogás. Luego fue la Dra. Ing. Susana Llamas, desde el Instituto de Medio Ambiente (IMA), quien brindó el espacio para desarrollar proyectos de investigación y extensión. Así se comenzaron a estudiar residuos agroindustriales y construcción de diferentes prototipos de reactores. Luego gracias a la Dra. Ing. Irma Mercante fue el Centro de Estudios de Ingeniería de Residuos Sólidos (CEIRS), del IMA, donde se continuaron investigaciones en residuos de bodegas y mataderos para generación de energía y donde finalmente fue desarrollado un proyecto para generar energía con residuos del área metropolitana de la provincia mediante microturbinas. Se trabajó con redes de expertos en residuos sólidos, que permitió intercambiar con especialistas en residuos de toda Iberoamérica. Dentro del CEIRS se buscó la mejor forma de que un residuo pueda ser transformado en un recurso tan necesario como la energía. Fue creado un laboratorio de residuos sólidos, un grupo interdisciplinario, redes de expertos y conexión con otros países. En el ámbito del CEIRS fue posible la oportunidad de formular y coordinar proyectos de investigación y extensión en la temática de residuos y generación de energía. Realizar ensayos de digestión anaerobia, generación de biogás y estudios en parámetros para el diseño, dimensionamiento y construcción de biodigestores. Estos trabajos también permitieron publicar en revistas, congresos, simposios y jornadas nacionales e internacionales. Fue ganada una beca para la realización de una Escuela de Bioenergía en la Universidad de Campinas, San Pablo. También se realizó una estancia de formación científica en Alemania, en el marco de un programa de intercambio académico y capacitación en energía renovable y ordenamiento territorial.

Agradezco a la maestría en ingeniería ambiental, que fue el lugar que permitió comprender el mundo del medioambiente no solo a nivel local, ya que fue posible cursar una parte en la Universidad Federal de Pernambuco. Doy gracias al ingeniero Jorge Fuentes Berazategui por hacerme parte de la cátedra de Biotecnología y por hacernos lugar, en su laboratorio y brindarnos lo necesario para llevar a cabo ensayos de digestión anaerobia.

No se puede dejar de mencionar la suerte de encontrar en este camino a los ingenieros Alexis Atem y Sebastián Perez, que actualmente llevan su empresa ENERGE y mediante su desarrollo local, brindan la posibilidad de tener energía renovable a todo el país. Agradezco también el entusiasmo y conocimiento

de los ingenieros químicos Carina Maroto y Nehuén Angileri, quienes aportaron mucho a esta investigación y a todos los pasantes de diferentes países que nos dejaron nuevos puntos de vista para la resolución de problemas y el desarrollo de estos proyectos.

También quiero expresar gratitud hacia el Departamento General de Irrigación por haber brindado el espacio y la posibilidad de ver otra realidad que también inspiró el desarrollo de esta tesis.

Agradezco a mi amor, a mi familia y amigos por su entendimiento, aliento, contención y por prestarme el tiempo para poder desarrollarme en esto. Agradezco nuevamente a mi directora, jefa y maestra, Susana Llamas quien me enseñó a buscar la excelencia. Finalmente agradezco a Andrea Barrera Mathus y a Milagros Rodriguez, por demostrarme que es posible llevar a cabo una tesis con el corazón.

De a poco se van concretando proyectos. Ojalá estos conocimientos adquiridos sean útiles a mi comunidad y a mi país.

## Contenido

Resumen.....	3
Summary .....	4
Prefacio .....	5
Índice de figuras y tablas.....	9
Tablas .....	9
Figuras .....	11
Listado de abreviaturas.....	13
Glosario .....	15
1. Introducción. ....	19
1.1. Marco Teórico. ....	25
1.1.1. Digestión anaerobia. ....	25
1.1.2. Generación de energía eléctrica mediante biogás.....	27
1.1.3. Valoración energética de residuos de agroindustria .....	29
1.1.4. Residuos Sólidos en Bodegas .....	31
1.1.5. Orujo de uva.....	32
1.1.6. Necesidades energéticas en bodegas. ....	38
1.2. Motivación .....	43
1.3. Problema de investigación y objetivo. ....	51
1.4. Justificación de la investigación. ....	52
1.5. Metodología.....	54
1.6. Delimitación del alcance. ....	54
1.7. Esquema general de la tesis.....	55
2. Estado del arte en ensayos para medición del potencial bioquímico para producción de metano.....	57
2.1. Potencial Bioquímico de Metano (PBM) y normas estándares. ....	57
2.2. Parámetros fundamentales en ensayos de PBM. ....	61
2.2.1. Sustratos.....	62

2.2.2. Inóculo.....	67
2.2.3. Condiciones físicas de Operación.....	69
2.2.4. Condiciones químicas de operación.....	70
2.2.5. Condiciones experimentales.....	72
2.3. PBM de sustratos para la DA.....	74
2.3.1. Valores de PBM en residuos agroindustriales.....	75
2.4. Critica a los Métodos de ensayos de PBM.....	79
3. Metodología para estudio de potencial energético de orujo en la provincia de Mendoza mediante degradación anaerobia.....	81
3.1. Introducción.....	81
3.2. Presentación de la metodología.....	82
3.2.1. Cuantificación de Orujo de bodegas en Mendoza.....	82
3.2.2. Valoración energética de orujo.....	82
3.2.3 Ensayos PBM.....	83
4. Análisis de datos.....	95
4.1 Introducción.....	95
4.2 Resultados de investigación y discusión.....	95
4.2.1. Orujo en bodegas de Mendoza.....	96
4.2.2. Valoración energética de orujo.....	98
4.2.3. Ensayos PBM.....	99
4.3 Conclusión.....	113
5. Conclusiones.....	115
5.1. Introducción.....	115
5.2. Conclusiones acerca de las preguntas de investigación.....	116
5.3 Conclusiones sobre el problema de investigación e implicaciones para la teoría.....	118
5.4 Implicaciones para políticas y prácticas.....	124
5.5 Limitaciones.....	127

5.6 Implicaciones para investigaciones posteriores.....	129
Bibliografía .....	133
6. Anexos .....	143
6.1. Desarrollo de cálculos de resultados. ....	143
6.2. Desarrollo de cálculos de conclusivos.....	151

## Índice de figuras y tablas

### Tablas

Tabla 1: Índices de generación de residuos en bodegas.....	32
Tabla 2: Propiedades fisicoquímicas del orujo de uva.....	33
Tabla 3: Componentes de hollejo y semilla de vid.....	34
Tabla 4: Análisis último y próximo de los residuos de uva.....	36
Tabla 5: Análisis comparativo de características energéticas de orujo de uva de diferentes regiones vitivinícolas.....	36
Tabla 6: Composición de cenizas obtenidas por gasificación de orujo de uva (% peso húmedo).....	37
Tabla 7: Índice de consumo de energía eléctrica en kWh/L vino según capacidad de empresa.....	39
Tabla 8: Revisión de consumo en bodega por diferentes autores.....	39
Tabla 9: Distribución del consumo energético en función del proceso para bodega mediana que elabora 30.000 hL.....	41
Tabla 10: Parámetros óptimos para el proceso anaerobio.....	64
Tabla 11: Concentraciones inhibitoras de crecimiento biológico. ....	66
Tabla 12: Revisión de valores de PBM para residuos agroindustriales.....	77
Tabla 13: Especificación de carga másica, volumétrica y pH .....	86
Tabla 14: Constantes de los compuestos.....	90

Tabla 15: Promedio serie 2008 al 2018 de ingreso de uvas para elaboración en bodegas de la provincia de Mendoza. Promedio de generación de orujo fiscalizada por INV. Datos en kilogramos por departamento. ....	96
Tabla 16: Porcentaje de generación anual de orujo total y remitido a destilería en Mendoza por uva ingresada a bodega. ....	97
Tabla 17: Características energéticas de residuos vitivinícolas de Mendoza. ....	98
Tabla 18: Kilocalorías calculadas por departamento generadas a partir de orujo fresco y agotado mediante combustión directa. ....	99
Tabla 19: Caracterización analítica de sustrato e inóculo.....	99
Tabla 20: Especificación de ST y SV por componente y por reactor. Concentración porcentual por reactor y relación g SV/L de inóculo.....	101
Tabla 21: Presiones Acumuladas en $\text{kg/cm}^2$ . ....	101
Tabla 22: Volúmenes de gas en $\text{Nm}^3$ acumulado.....	102
Tabla 23: Caracterización del biogás obtenida en promedio en % molar y ppm y valores de referencia .....	103
Tabla 24: Comparación de volumen ideal y volumen real.....	103
Tabla 25: Porcentajes molares de $\text{H}_2$ , N, $\text{CH}_4$ y, $\text{CO}_2$ y $\text{SH}_2$ en ppm por tratamiento y por etapa ....	105
Tabla 26: Cálculo de volumen de $\text{CH}_4$ generado en $\text{Nm}^3$ .....	106
Tabla 27: Volúmenes de gas expresados en L/kg.....	106
Tabla 28: Calculo de L de $\text{CH}_4$ por kg de materia fresca por componente .....	107
Tabla 29: Cálculo energético total y por etapas en kcal. ....	108
Tabla 30: Energía específica obtenida.....	109
Tabla 31: Energía en kcal por componente.....	109
Tabla 32: Energía en kcal y kWh por kg de orujo agotado, kg de uva ingresada a bodega y volumen de vino elaborado. ....	110

Tabla 33: Energía aprovechable mediante generación de biogás por departamento.....	110
Tabla 34: Energía producida en kcal por digerido.....	112
Tabla 35: Detalles analíticos para determinación de ST, SV y cenizas.....	144
Tabla 36: Detalles analíticos para cálculo de ST, SV y componentes por reactor.....	144
Tabla 37: Detalles analíticos para determinación de ST, SV y cenizas.....	144
Tabla 38: Presiones acumuladas por día en kg/cm <sup>2</sup> .....	145
Tabla 39: Cálculo de volúmenes acumulados en Nm <sup>3</sup> .....	147
Tabla 40: valores utilizados para el cálculo final de L CH <sub>4</sub> /kg SV.....	148
Tabla 41: Cálculo Energético Etapa 1.....	149
Tabla 42: Cálculo Energético Etapa 2.....	149
Tabla 43: Cálculo Energético Etapa 3.....	150
Tabla 44: Cálculo de consumo eléctrico en bodegas.....	151
Tabla 45 Cálculo de relación entre potencial de biogás de orujo y orujo mediante combustión directa. .....	152
Tabla 46: Cálculo de bodegas promedio abastecidas con energía generada mediante biogás por departamento.....	157
Tabla 47: Cálculo de viviendas promedio abastecidas mediante biogás.....	158
Tabla 48: Cálculo de bodegas por departamento abastecidas mediante biogás.....	159

## Figuras

Figura 1: Porcentaje de consumo de energía en bodegas.....	40
Figura 2: Consumo eléctrico mensual de energía activa en kWh.....	42
Figura 3: Disposición de reactores de PET en baño termostatzado.....	43
Figura 4: Caracterización de residuos de cultivos energéticos. Reactor anaeróbico de 200L provisto de sensores para control de temperatura presión y pH.....	44
Figura 5: Orujo agotado (izquierda). Orujo fresco (derecha).....	44

Figura 6: Reactores de 4L de acero inoxidable.....	45
Figura 7: reactores en baño termostatzado (izquierda) y toma de muestra de gas en jeringa (derecha) .....	45
Figura 8: Generación de la biomasa microalgal, cultivos de interior y exterior. Presiones acumuladas por tratamiento.....	46
Figura 9: Reactores en baño termostatzado reformado.....	46
Figura 10: Espacio de separación de residuos y toma de muestras .....	47
Figura 11: Separación y pesado de residuos.....	47
Figura 12: Construcción de celda y relleno .....	48
Figura 13: Relleno de Celda.....	48
Figura 14: Esquema general del equipo .....	49
Figura 15: Biodigestor Construido en escuela Julia Silva de Cejas.....	49
Figura 16: Biodigestor construido en escuela Moses J. Chade. Acumulador de gas, cámara de carga y descarga de Biodigestor.....	49
Figura 17: Anafe con conexión a biogás en comedor de escuela Moises J. Chade.....	50
Figura 18: Manuales de construcción, uso y mantenimiento de biodigestores.....	50
Figura 19: Esquema de carga de reactores.....	87
Figura 20: Curvas de generación de metano (Tchobanoglous et al., 1994).....	91
Figura 21: Porcentaje de promedio serie 2008 al 2018 de ingreso de uvas para elaboración en departamentos de la provincia de Mendoza.....	97
Figura 22: Cromatografía en muestra 1A.....	102
Figura 23: Porcentaje Molar de Gases por etapa y tratamiento.....	104
Figura 24: Energía de Combustión (Q) en kcal por tratamiento por etapa .....	108
Figura 25: Energía aprovechable mediante generación de biogás por departamento .....	111

## Listado de abreviaturas

AGV: ácidos grasos volátiles

C/N: relación carbono nitrógeno

C: carbono.

CAMMESA: compañía administradora del mercado mayorista eléctrico sociedad anónima.

CH<sub>4</sub>: metano.

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono.

CV: coeficiente de variación.

DBO: demanda biológica de oxígeno

DQO: demanda química de oxígeno

ETA: ensayo de toxicidad anaerobia

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization)

FODER: Fondo para el Desarrollo de Energías Renovables, creado por la Ley N° 27.191.

FORSU: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos

GRS: gas de relleno sanitario

H: hidrógeno

INTA: Instituto Nacional de tecnología agropecuaria

INV: Instituto Nacional de Vitivinicultura.

IWA: International Water Association

MF: materia fresca

MO: materia orgánica

MW: mega watt o megavatio.

N: nitrógeno

O: oxígeno

OIV: Organización Internacional de la Viña y el Vino.

P: fósforo

PBM: Potencial bioquímico de metano

Probiomasa: Proyecto para la promoción de la energía derivada de la biomasa

RenovAr: Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Ministerio de Economía de la república Argentina.

RIS: relación inóculo sustrato

RSU: residuos sólidos urbanos

S: azufre

SH<sub>2</sub>: ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno.

SIG: sistema de información geográfica

SSV: sólidos suspendidos volátiles

ST: solidos totales.

SV: sólidos volátiles

TG ABAI: grupo específico de tareas sobre biodegradabilidad anaerobia, actividad e inhibición

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket (reactor anaerobio de flujo ascendente).

UBET: Biomass Unified Terminology (terminología unificada de la bioenergía)

WISDOM: "Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles" (Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping).

## Glosario

**Biodiesel:** biocombustible líquido obtenido a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación.

**Bioetanol:** compuesto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que puede utilizarse como combustible, solo, o bien mezclado en cantidades variadas con nafta.

**Biogás:** gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, en ausencia de oxígeno.

**Biomasa:** cantidad de materia acumulada en un individuo, un nivel trófico, una población o un ecosistema.

**Biorrefinería:** estructura que integra procesos de conversión de biomasa y equipamiento para producir combustibles, energía y productos químicos a partir de la biomasa.

**Cogeneración:** procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria).

**Cultivos energéticos:** cultivos de plantas de rápido crecimiento destinadas únicamente a la obtención de energía o como materia prima para la obtención de otras sustancias combustibles.

**Demanda biológica de oxígeno (DBO):** parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida. Normalmente se mide transcurridos 5 días (DBO<sub>5</sub>) y se expresa en mg O<sub>2</sub>/L.

**Demanda química de oxígeno (DQO):** parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se expresa en mg O<sub>2</sub>/L.

**Digerido:** subproducto que resulta de la digestión anaerobia de biomasa en los procesos de obtención de biogás y es rico en algunos nutrientes tales como N, P y K.

**Digestión anaerobia:** también llamada degradación anaerobia. Proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. Genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes (dependiendo del material degradado).

**Energía Renovable:** Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

**Ensayo en Batch:** ensayo discontinuo o ensayo por lotes.

**Escobajo:** también denominado raspón, es elemento del racimo de uva que sirve de soporte de las bayas, así como también para alimentación de las mismas, mediante vasos conductores situados en su interior.

**Generación distribuida:** también conocida como generación in-situ, generación embebida, generación descentralizada, generación dispersa o energía distribuida. Consiste en la generación de energía eléctrica por medio de muchas pequeñas fuentes de energía en lugares lo más próximos posibles a las cargas.

**Inóculo:** o semilla. Microorganismos o sus partes (esporas, fragmentos miceliales, etc.) capaces de provocar infección o simbiosis cuando se transfieren a un huésped.

**Líquido ruminal:** contenido ruminal del ganado bovino, que es alimento (generalmente pasto) que el animal ingirió antes de su faena y permaneció en el estómago al momento del sacrificio. Este residuo se obtiene en grandes cantidades en los frigoríficos y es considerado un residuo de la industria.

**Mosto:** jugo exprimido de la uva destinado a la elaboración de vino o a endulzar alimentos y/o bebidas.

**Orujo:** hollejo o bagazo. Materia sólida que queda después del prensado de uvas, aceitunas u otras frutas para extraer los líquidos resultantes (mosto, aceite, sidra, entre otros). Se trata del conjunto de pieles, pulpas, semillas y a veces tallos de la fruta.

**Potencial Bioquímico de Metano (PBM):** técnica para determinación de potencial de metano y biodegradabilidad de aguas residuales y biomasa residual.

**Pilas de combustible:** también llamada célula de combustible o celda de combustible, (comúnmente nombrado fuel cell en inglés) es un dispositivo electroquímico en el cual un flujo continuo de combustible y oxidante sufren una reacción química controlada que da lugar a los productos y suministra directamente corriente eléctrica a un circuito externo.

**Purines:** sustancia líquida que exuda el estiércol y que se forma por la orina de los animales, las aguas de lluvia y el sobrante de los líquidos de los estercoleros.

**Relación carbono-nitrógeno (C/N):** valor numérico que determina la proporción de Carbono y Nitrógeno posible de encontrar en distintas materias orgánicas.

**Sólidos totales (ST):** materia que permanece después de evaporación y secado en estufa a 105 °C. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto.

**Sólidos volátiles (SV):** cantidad de sólidos totales capaz de volatilizarse por efecto de la calcinación a 550°C.



# Capítulo I

---

## 1. Introducción.

La digestión anaerobia (DA) es un proceso bioquímico en el cual la materia orgánica compleja es descompuesta en ausencia de oxígeno, por diversos tipos de microorganismos anaerobios. Este proceso se produce naturalmente en el fondo de pantanos, en el estómago de rumiantes o en turberas. Históricamente la DA fue utilizada con fines higiénicos, para confinar residuos y evitar malos olores o con fines energéticos para obtener biogás y abono orgánico.

Es de suma importancia tener en cuenta nuevas formas de generación de energía, menos contaminantes para diversificar la matriz energética actual. El ejemplo del biogás tiene amplias ventajas ya que por un lado se pueden tratar residuos orgánicos, evitar su descomposición, malos olores y producción de gases de efecto invernadero. Por otro lado, se puede generar energía y obtener un efluente, denominado digerido, rico en nutrientes que puede ser usado como mejorador de suelos (Deublein y Steinhauser, 2008).

La producción integrada de biocombustibles (biogás, bioetanol y biodiesel) junto con alimentos y materias primas para la industria, conocido como el concepto de biorrefinerías, es un área de investigación importante en la actualidad, donde el biogás proporciona energía de proceso para la producción de biocombustibles líquidos y utiliza los efluentes de otros procesos como materia prima para la DA (FAO, 2004).

Países como Alemania desarrollaron un marco tarifario que permitió a esta tecnología desarrollarse principalmente a nivel de agricultores, destinando así su producción a la generación de energía. Desde los cambios de política energética de 2014, se observa que la mayoría de las nuevas plantas que se construyen, se alimentan de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), estiércol y purines en lugar de cultivos energéticos, marcando la tendencia de los incentivos al uso de residuos. En el año 2017 Alemania contaba con 9 346 plantas de biogás, con una potencia instalada de 4 497 MW. Los sustratos utilizados para la generación corresponden en un 48% a cultivos energéticos, un 44% a estiércol líquido sólido un 6% a residuos industriales y agrícolas y un 2% a FORSU (Maciejczyk, 2017).

En China, se estima que 41 millones de digestores domésticos operaban a fines del 2014, y que el potencial total de biogás chino es de 13 billones de metros cúbicos por año. También existían 16 480 plantas de biogás a fines del 2014 que producían 1.51 billones de metros cúbicos de biogás por año (Liu, 2017).

En India, aproximadamente 5 millones de plantas de biogás de pequeña escala están actualmente en funcionamiento. Otros países como Nepal y Vietnam también tienen un número considerable de instalaciones de biogás de propiedad familiar, a muy pequeña escala (Al Seadi, et al., 2008).

En Asia la mayoría de los biodigestores utilizan tecnologías simples y, por lo tanto, son fáciles de diseñar y reproducir. Estados Unidos y Canadá y muchos países latinoamericanos van desarrollando ciertos sectores y se implementan marcos políticos favorables para apoyar este desarrollo (Al Seadi, et al., 2008).

La utilización de biogás para la cogeneración es una aplicación estándar para la principal parte de las plantas de biogás en Europa. El biogás se acondiciona y utiliza como biocombustible renovable para el transporte en países como Suecia, Suiza y Alemania, donde se establecen y operan redes de gasificación y estaciones de servicio. La alimentación con biogás en la red de gas natural es una aplicación relativamente nueva, pero las primeras instalaciones, en Alemania y Austria lo están haciendo. También, una utilización relativamente nueva de biogás, en pilas de combustible, está cerca de la madurez comercial en Europa y Estados Unidos (Maciejczyk, 2017).

El Relevamiento Nacional de Biodigestores (FAO, 2019), fue realizado mediante un acuerdo entre la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) para el proyecto UTF/ARG/020/ARG para la promoción de la energía derivada de la biomasa (PROBIOMASA). El objetivo de este relevamiento fue la construcción de un diagnóstico Nacional del estado del arte de la DA, como herramienta para la planificación estratégica y el desarrollo sostenido de esta tecnología renovable para la generación de energía.

Se conocía la existencia de 80 plantas de DA en el país. En la provincia de Santa Fe fue identificada la zona con mayor desarrollo en plantas de biogás. La escala de estas plantas fue de: 27% pequeña (menor a 100m<sup>3</sup>), 8% mediana (mayor a 100 m<sup>3</sup> y menor a 1 000 m<sup>3</sup>), 43% grande (mayor a 1 000 m<sup>3</sup>) y 22% sin datos.

El INTI, luego del relevamiento informó que en la Argentina existen 105 plantas de biogás distribuidas en 16 provincias, de las cuales fueron relevadas 62. Un 27% de ellas se encuentra emplazado en la provincia de Santa Fé. La mayor parte corresponde al sector privado (53%). Un 85.3% de estos digestores son utilizados para tratar efluentes, no se utilizan para producción de biogás. Un 33.3% tienen fines educativos o de investigación. En cuanto al tipo de tecnología empleada un 46% son de mezcla completa, un 19% de laguna cubierta, un 15.9% UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: reactor anaerobio de flujo ascendente) y otros 19.9%. Se informó que estos digestores fueron construidos con diversos materiales. Muy pocas instalaciones cuentan con aislación térmica. El 90% son de flujo continuo y solo el 10% en batch (discontinuos).

Existen casos exitosos en la construcción de biodigestores y aprovechamiento de biogás en distintas escalas y mediante el aprovechamiento de diferentes sustratos, como la planta de biogás Yanquetruz, una central de generación de energía eléctrica, ubicada en la provincia de San Luis, posee una potencia eléctrica de 1 500 kW. Utiliza como combustible el biogás generado a partir del efluente de cerdos de un criadero de 1 300 madres y forraje de maíz/sorgo. Es la primera planta de producción de biogás construida en Argentina con tecnología alemana, lo que implica funcionamiento de los digestores con calefacción y agitación, las 24 horas del día durante 365 días al año y un sistema de operación totalmente automatizado.

La planta cuenta con cuatro biodigestores, dos primarios y dos secundarios. Son cilíndricos, con un volumen total de 3 800 m<sup>3</sup> y volumen efectivo de 3 500 m<sup>3</sup>. Son de hormigón armado.

La planta se encuentra preparada para generar energía térmica para calefaccionar el criadero y los digestores, y eléctrica para autoabastecerse y entregar a la red. Mediante calderas acuotubulares se genera la energía térmica. Para la generación eléctrica se utilizan generadores de combustión interna de 775 kW de potencia, luego la energía es transformada en transformadores y capacitores antes de encontrarse en condiciones de ser subida a la red.

En Santa Fé fue construido un biodigestor, que opera a base de estiércol vacuno, genera 1.4 MW de potencia y ya se encuentra inyectando desde principios de noviembre energía renovable a la red nacional bajo el Plan RenovAR 1. Además, produce biofertilizantes que la propia empresa reutiliza para sus cultivos. El biodigestor funciona las 24 horas del día con un flujo continuo, reduce un 80% la contaminación por olor y se alimenta 100% de residuos: 95% de estiércol y 5% de residuos de alimentación de las vacas. Está compuesto por dos fermentadores primarios que producen el 80% del biogás y un post fermentador que produce el 20% restante.

Existen también casos exitosos en lo que se refiere a la recuperación de gas metano mediante residuos sólidos urbanos (RSU) que caben destacar, en este caso se trata de la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE), una empresa creada por los estados de la Provincia de Buenos Aires y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires para realizar la gestión integral de los RSU del área metropolitana. En la actualidad, procesa 17 000 toneladas de residuos diarios provenientes de la Ciudad de Buenos Aires y el Conurbano Bonaerense. Genera energía eléctrica para 25 mil hogares a partir del biogás de los residuos depositados en vertederos.

Posee dos centrales de generación de energía eléctrica, ambas emplazadas en el Complejo Ambiental Norte III, utilizan como insumo para la producción el biogás generado en dos de los módulos de relleno sanitario.

La Central San Miguel, tiene una capacidad instalada de 11 MW. El equipamiento de generación de energía eléctrica está constituido por 6 unidades impulsadas por motores alternativos de combustión

interna alimentados con biogás proveniente del Relleno Sanitario Los generadores están vinculados eléctricamente a la red de la empresa distribuidora EDENOR.

La Central San Martín, tiene una capacidad instalada de 7.1 MW. En este caso el equipamiento de generación de energía eléctrica está constituido por 5 unidades impulsadas por motores alternativos de combustión interna alimentados con biogás proveniente del Relleno Sanitario y al igual que en el caso anterior están vinculados eléctricamente a la red.

Los proyectos mencionados son relativamente recientes ya que Argentina desde hace pocos años cuenta actualmente con un importante marco regulatorio para la generación de energías renovables, la generación distribuida y la producción de biocombustibles. Estas leyes son: Ley N° 27 424: Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable integrada a la Red Eléctrica Pública (2017). Ley N° 27 191: Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica (2015). Modificación Ley N° 26 190: Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica (2006). Ley N° 26 093: Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles (2006). Ley N° 25 019: Régimen nacional de energía eólica y solar (1998).

La ley N° 26 190, “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica”(2006), modificada y ampliada por la Ley N° 27 191 (2015), prevé el incremento en la participación de las fuentes renovables de energía en la matriz eléctrica hasta alcanzar un ocho por ciento (8%) de los consumos anuales totales al 31 de diciembre del año 2017, aumentando dicha participación porcentual de forma progresiva hasta alcanzar un veinte por ciento (20%) al 31 de diciembre del año 2025.

La ley N° 27 424 “Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública” (2017), tiene por objeto fijar las políticas y establecer las condiciones jurídicas y contractuales para la generación de energía eléctrica de origen renovable por parte de usuarios de la red de distribución, para su autoconsumo, con eventual inyección de excedentes a la red, y establecer la obligación de los prestadores del servicio público de distribución, de facilitar dicha inyección, asegurando el libre acceso a la red, sin perjuicio de las facultades propias de las provincias. El proyecto fue aprobado en diciembre de 2017.

Dicha ley junto con el Decreto N° 986/2018 y la Resolución N° 314/2018 conforman el marco normativo que propende el uso de energías renovables y su generación distribuida. Esto hace al uso de fuentes de energía renovable, como el sol, el viento, el agua en cauces de río, la biomasa, y otros, para generar electricidad a ser consumida en el mismo punto, y a su vez inyectar el excedente de energía a la red de distribución. Los equipos de generación distribuida, como son los paneles solares, pequeños aerogeneradores y otras tecnologías, pueden instalarse en Industrias, PyMEs y hogares, generando un

ahorro económico en la factura del servicio eléctrico y contribuyendo a la mitigación del cambio climático. (Secretaría de Gobierno de Energía, 2018)

Otro tema de suma importancia para este trabajo de tesis, es la industria vitivinícola en el país. Cabe destacar que, según el informe productivo provincial del Ministerio de hacienda (2016), Argentina se posicionó como quinto productor mundial de vinos con 13.4 millones de hectolitros producidos en 2015. Mendoza es la principal provincia productora, con 10.3 millones de hectolitros producidos en 2015, que representó el 77% del total del país.

En la provincia de Mendoza las principales cadenas productivas son: vitivinícola, frutícola de carozo, olivícola, petróleo, gas, y turismo, entre otras. En 2015, la provincia concentró el 77% de la producción nacional de vinos y el 59.5% de mostos (siendo la principal productora nacional de esta cadena); 14.6% de la producción de petróleo y el 20,3% de la refinería a nivel nacional; con el 10% de la producción total de frutas de carozo del país y, por último, concentra el 3.9% de la ocupación hotelera nacional. (Ministerio de hacienda y finanzas públicas, 2016)

La cosecha de uvas en Argentina en el año 2018 alcanzó las 2 573 311 toneladas, manifestando un crecimiento del 31% respecto al año anterior, con lo cual se recupera la vendimia luego de una cosecha 2016 históricamente baja. (Instituto Nacional de Vitivinicultura, 2018)

En el año 2018, se elaboraron 14 521 510 hectolitros de vino, 4 772 867 hectolitros de mosto y 1 631 hectólitos de jugo de uva. Estos valores indican un aumento del 23% en la elaboración de vinos y 73% en la elaboración de mostos y jugo de uva respecto al año 2017. Independientemente del destino de las uvas, se registra una cosecha de 24 327 629 quintales (94,5%) de uvas aptas para elaboración, 1 031 897 quintales (4%) de variedades para consumo en fresco, 249 728 quintales (1%) de uvas para pasas y 123.860 quintales (0,5%) de uvas de variedades no identificadas. (Instituto Nacional de Vitivinicultura, 2018).

Argentina cuenta según las estadísticas del INV, para el año 2017, con 220 848 hectáreas cultivadas con viñedos. El 71% de los viñedos del país se encuentran en la provincia de Mendoza, el 21% en San Juan y el 3% en La Rioja.

En Mendoza fueron producidos 17 151 351 quintales, esto presentó una variación de 35.9% en comparación con los 12 621 820 quintales elaborados en el 2017. Fueron elaborados 17 147 256 quintales, 2 375 quintales en fresco y para pasas 1 720 quintales. Mendoza produjo en el año 2018 el 66.8 % de la uva elaborada en el país. (Instituto Nacional de Vitivinicultura, 2018)

La uva es una de las frutas más cultivadas en todo el mundo, con un tercio de la producción total utilizada en vinificación. Los procesos de vinificación tanto rojos como blancos dan como resultado cantidades sustanciales de desechos orgánicos sólidos, como el orujo de uva y los tallos, que requieren una eliminación adecuada. El orujo de uva representa aproximadamente el 10-30% de la masa de uvas

trituras y contiene azúcares no fermentados, alcohol, polifenoles, taninos, pigmentos y otros productos valiosos. Al ser un producto vegetal natural rico en compuestos lignocelulósicos, el orujo de uva también es una materia prima prometedora para la producción de energía renovable. Sin embargo, a pesar de que el orujo de uva tiene ese potencial, las tecnologías avanzadas para explotarlo no se han adoptado ampliamente en las bodegas y las industrias aliadas. (Muhlack, et al., 2018).

Las uvas se ubican sistemáticamente entre las cinco principales frutas en términos de producción global total (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018). Según los datos de la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV), en 2012 esto equivalía a alrededor de 70 millones de toneladas de uvas, y casi el 60% se utilizaba para "uvas prensadas", es decir, principalmente vino y jugo de uva, a su vez, casi 26 mil millones de litros de vino fueron producidos a nivel mundial. Durante el proceso de vinificación, los residuos sólidos conocidos como orujo de uva se generan después de extraer el jugo para fermentar el vino blanco, y después de la fermentación y el prensado para obtener vino tinto.

El orujo de la uva consiste típicamente en pieles, semillas y humedad, así como otros componentes: entre los constituyentes primarios, como los ácidos orgánicos y los polifenoles, el orujo blanco no fermentado contiene azúcares residuales, mientras que el orujo rojo tiene azúcares residuales y algunas cantidades de alcohol (etanol). (Devesa-Rey et al., 2011; Hixson et al., 2014).

Los subproductos o residuos obtenidos en bodegas pueden ser destilados para la recuperación del etanol, junto con lías o borras, a las que con una solución ácida les es extraído el ácido tartárico. Este proceso es llevado a cabo en destilerías (Braga, et al., 2002).

En cuanto a sus posibles destinos, Muhlack et al., (2018) indican oportunidades más allá del compostaje tradicional y la alimentación animal, y examinan los usos de valor agregado mediante la extracción de componentes útiles de orujo de uva, así como los tratamientos termoquímicos y biológicos para la recuperación de energía, la producción de alcohol en bebidas o combustibles, y productos y aplicaciones especializadas, tales como biosurfactantes y remediación ambiental.

La provincia de Mendoza cuenta con una gran destilería, denominada Derivados Vínicos S.A, ubicada en la localidad de Palmira. Es la destilería más grande de América en su tipo con un perfil sustentable y ecológico. El principal servicio que realiza la empresa es ambiental y consiste en la gestión integral de los residuos sólidos y líquidos del proceso de vinificación de las bodegas (retiro de residuos en bodega). A partir de estos residuos se produce una variada gama de productos como son: ácido tartárico, ácido metatartárico, aceite de pepita de uva crudo, aceite de pepita de uva refinado, alcohol etílico estándar, alcohol etílico neutro, destilado de vino, aguardiente de vino, grapa, crémor tártaro y compost.

En la producción de los derivados naturales de la uva se generan residuos líquidos y sólidos. Para el tratamiento de los líquidos, la empresa ha desarrollado un bosque, que riega con estos efluentes.

Una parte de los desechos sólidos es empleada como mejorador de suelo en viñedos y fincas. La parte restante, junto con la madera obtenida del cultivo del Eucalipto, se usa en la generación del 75% del vapor utilizado en procesos por intermedio de dos calderas destinadas a tal efecto.

Derivados Vínicos recicla por año 190 000 toneladas de residuos de la industria vitivinícola argentina evitando 650 puntos de vuelcos en todo el país. (Peral, 2018).

### 1.1. Marco Teórico.

Este apartado presenta una introducción a la Digestión Anaeróbica (DA), sus etapas y a la producción de biogás. Un panorama en valoración energética mediante DA, valoración energética de residuos de agroindustria, residuos sólidos en bodegas, orujo de uva y finalmente describe las necesidades energéticas en bodegas.

#### 1.1.1. Digestión anaerobia.

La DA es una fermentación en la que la materia orgánica presente es descompuesta en ausencia de oxígeno para producir biogás y digerido. Para que esta tenga lugar, deben desarrollarse bacterias anaerobias y sobre todo bacterias metanogénicas que producen biogás. Estas bacterias se pueden encontrar en líquidos ruminales (contenidos en el estómago de vacas, ovejas, cabras.), en estiércol de cerdos y rumiantes, en pantanos, en lodos generados en el tratamiento anaeróbico de efluentes y de otros biodigestores.

La DA se da en tres etapas, una etapa inicial de hidrólisis, seguida de una fase de acidogénesis y por último la metanogénesis. Estas etapas son llevadas a cabo por diferentes bacterias que forman un consorcio, entre ellas las metanogénicas:

1. Hidrólisis y transformación de la materia orgánica en moléculas de peso molecular más bajo.
2. Acidogénesis, donde ocurre la degradación de las moléculas orgánicas pequeñas hacia ácidos grasos volátiles.
3. Metanogénesis, con producción de metano a partir de los ácidos orgánicos volátiles (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, 2009).

El metano obtenido a través de DA se considera energía renovable. Además del biogás, la DA también resulta en la producción de un efluente, que generalmente tiene una composición rica en nutrientes y, dependiendo de sus características, puede ser compostado, utilizado como fertilizante o como acondicionador del suelo (Biosantech et al., 2013; Gould, 2015; Zhang et al., 2016).

La descomposición anaerobia (en ausencia total de oxígeno o nitratos) de la materia orgánica produce un gas combustible. Este gas contiene una alta proporción en metano ( $\text{CH}_4$  en concentración superior al 60% en el gas), con un poder calorífico de  $5.500 \text{ Kcal/m}^3$  y se designa usualmente como

biogás. Todo proceso de DA va acompañado de una depuración de la carga orgánica mediante la producción de este gas (Castells, 2005).

El rendimiento eficiente de los sistemas de DA depende de parámetros tales como temperatura, pH, contenido de nutrientes, relación carbono-nitrógeno (C/N) y presencia de compuestos inhibidores. A menudo, durante la digestión de ciertos sustratos, algunos de estos parámetros pueden encontrarse lejos de las condiciones óptimas. En esos casos, el rendimiento de todo el proceso puede verse comprometido, eventualmente llevándolo al fracaso (Esposito et al., 2012). Tales fenómenos dependen de la composición de los sustratos y están relacionados principalmente al balance de nutrientes y problemas de carga orgánica (Mata-Alvarez et al., 2014). Por lo tanto, se debe tener cuidado, a fin de obtener sistemas de DA con materias primas de composición adecuada. A este propósito, la codigestión se implementa con frecuencia (Fitamo et al., 2016).

El biogás puede ser capturado, quemado y así transformada cada molécula de metano en una de CO<sub>2</sub> y 2 moléculas de H<sub>2</sub>O, reduciendo el potencial de contribuir al efecto invernadero que posee y aprovechar la energía contenida en el mismo. El biogás con un contenido de metano mayor al 45% es inflamable (Deublein y Steinhauser, 2008).

El biogás puede ser utilizado con fines energéticos, dependiendo de la naturaleza de la fuente de biogás y la demanda local. En general, puede utilizarse para la producción de calor mediante combustión directa, producción de electricidad mediante motores, turbinas o microturbinas, cogeneración o como combustible para vehículos (Al Seadi, et al., 2008)

El contenido de energía del biogás obtenido a través de la DA está químicamente limitado en metano. La composición y propiedades del biogás varían hasta cierto punto según los tipos de materia prima, los sistemas de digestión, la temperatura y el tiempo de retención entre otros. Los valores promedio de composición de biogás, que se encuentran en la mayoría de la literatura, puede contener entre 55 - 70% de metano, 30 - 45% de dióxido de carbono y < 5% trazas de otros gases (considerados impurezas). Poder calorífico de 6 – 6.5 kWh/Nm<sup>3</sup>, densidad de 1.22 kg / Nm<sup>3</sup> y masa es similar al aire (1.29 kg / Nm<sup>3</sup>). (Deublein y Steinhauser, 2008).

A nivel de laboratorio, la generación de biogás es estudiada mediante ensayos de DA para el estudio del potencial de distintas materias primas. Uno de los ensayos más utilizados es el ensayo de potencial bioquímico de metano (PBM).

Chynoweth (1993) define al ensayo PBM como un método estandarizado para determinar la biodegradabilidad y asociar la producción de metano durante la fermentación anaerobia de sustratos. La presenta como análoga al ensayo de demanda bioquímica de oxígeno (DBO). También describe alguna de las condiciones para la realización de los ensayos como: inóculo de amplio espectro, inóculo

en exceso, nutrientes en exceso y sustrato en concentraciones menores al nivel inhibitorio, capacidad buffer en exceso, temperatura moderada y condiciones de anaerobiosis estricta.

Raposo et al. (2012) afirman que la DA se considera una fuente competitiva para la producción de energía renovable en cuanto a eficiencia y costos. Para evaluar la biodegradabilidad anaerobia de un sustrato orgánico, a lo largo de la historia, se ha utilizado comúnmente, la prueba conocida como potencial bioquímico de metano (PBM). El interés actual en todo el mundo en el uso de diferentes sustratos orgánicos para la DA está creciendo, pero hay una falta de referencias claras para la comparabilidad dados los múltiples factores que afectan la determinación del PBM.

El ensayo de PBM se puede utilizar como un índice del potencial de biodegradación anaeróbica ya que es el valor experimental de la cantidad máxima de metano producido por gramo de sólidos volátiles. El PBM se mide con el test de PBM, que consiste en la medición del biogás producido por una cantidad conocida de residuos en condiciones anaerobias y en batch (I. Angelidaki et al., 2006).

Existen varios métodos en batch para medir el potencial de metano de los residuos. El enfoque básico es incubar una pequeña cantidad de los residuos con un inóculo anaeróbico y medir la generación de metano, usualmente mediante mediciones simultáneas de volumen y composición de gas (Biosantech et al., 2013; Drosig et al., 2013b).

Sin embargo, los enfoques técnicos en cuanto al pretratamiento de la muestra, el inóculo, la técnica de medición de gases y la incubación varían significativamente entre los métodos publicados (Owen et al. 1979; Chynoweth et al. 1993; Hansen et al. 2004; Esposito et al. 2012; Lesteur et al. 2010; Raposo et al. 2012; Cabbai et al. 2013; Strömberg, Nistor, and Liu 2014;).

### 1.1.2. Generación de energía eléctrica mediante biogás

La mayoría de los proyectos de generación de energía eléctrica a partir de biogás en operación utilizan motores de combustión interna (reciprocantes), turbinas y microturbinas. Estas últimas se aplican en rellenos sanitarios pequeños o aplicaciones en nicho. Ciertas tecnologías como motores Stirling o motores de Ciclo Orgánico Rankine y celdas de combustible están aún en una fase de desarrollo y demostración (Goldstein, 2006).

Las aplicaciones de cogeneración están aumentando a nivel global, ya que proveen mayor eficiencia energética pues además de generar electricidad utilizan el calor recuperado; para esta tecnología se utilizan generalmente motores de combustión interna, turbinas de gas, o microturbinas, mientras que es menos común la generación de electricidad a través de sistemas caldera-turbina de vapor ya que resultan más eficientes en proyectos de producción de electricidad de mayor escala (USEPA, 2006).

Los *motores reciprocantes de combustión interna* son los más utilizados ya que presentan alta eficiencia en comparación con las turbinas de gas y microturbinas (Landfill Methane Outreach Program,

2015). Son de bajo costo por kW en comparación con las turbinas de gas y microturbinas, y existen en varios tamaños adecuados a los flujos de gas de rellenos sanitarios (GRS). La eficiencia de estos motores varía entre 25 y 35%, aunque se pueden alcanzar mayores rendimientos en aplicaciones de cogeneración, cuando se recupera el calor residual que puede ser utilizado para otras aplicaciones. También presentan la ventaja de permitir añadir o quitar los motores según las tendencias de recuperación de gas. Como desventajas se encuentran sus costos de mantenimiento que son relativamente altos y la generación de emisiones a la atmósfera. Si los costos de electricidad del mercado son bajos, la rentabilidad de estos equipos resulta marginal. El rango de tamaño para proyectos típicos asumiendo 50% de metano en el GRS es entre 8 y 30 m<sup>3</sup>/min de GRS, y capacidades entre 800 kW y 3 MW; para proyectos de mayor escala se pueden combinar varios motores.

Numerosos proyectos a nivel mundial utilizan este tipo de motores para la generación de electricidad a diferentes escalas, tales como el proyecto de Ox Mountain (EEUU) de 11 MW, el proyecto Dairyland (EEUU) de 4 MW, el proyecto del relleno sanitario de Monterrey (México) de 12 MW, Belo Horizonte (Brasil) de 4.3 MW, entre otros (EPA, 2019).

Las *turbinas de gas* se utilizan en proyectos de gran escala donde existe un flujo de GRS suficiente como para generar un mínimo de 3 MW y típicamente más de 5 MW (flujos de GRS superiores a 40 m<sup>3</sup>/min). El costo del kW disminuye con el aumento del tamaño de las turbinas, mejorando a su vez la generación de electricidad. La eficiencia de estos equipos ronda entre 20 y 28% a escala completa pudiendo alcanzar el 40% para casos de cogeneración, donde se recupere el calor residual (LMOP, 2015). Una desventaja de las turbinas es que requieren la eliminación de siloxanos y otras impurezas que pueda traer el GRS. Entre las ventajas se encuentran mayor resistencia a la corrosión y menor nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno, son más compactas y tienen menores costos de operación y mantenimiento que los motores de combustión interna. La planta de tratamiento de aguas residuales de Arlington (EEUU) genera biogás que es transportado más de 6 km para generar electricidad en una turbina de 5.2 MW (LMOP, 2015).

Las *microturbinas* se utilizan cuando se tiene una recuperación de GRS menor a 8 m<sup>3</sup>/min con contenidos mínimos de metano de hasta 35%; resultan más costosas por kW generado, aunque tienen la ventaja de que se pueden añadir o quitar en función del flujo de GRS (LMOP, 2015). Como tienen baja capacidad de generación son fáciles de interconectar y generan menos emisiones de óxidos de nitrógeno. Requieren de un tratamiento primario del GRS que incluya remoción de siloxanos, humedad, y material particulado. Las microturbinas se comercializan en tamaños de 30, 70, y 250 kW, y presentan las ventajas de tener un costo de capital reducido, bajo costo de mantenimiento y de las instalaciones, y una eficiencia que aumenta con el tamaño. Con la finalidad de incrementar la eficiencia de las

microturbinas, generalmente se incorpora un recuperador que precaliente el aire de combustión. En EEUU se está trabajando para desarrollar microturbinas de mayor eficiencia (mínimo 40%), que alcancen las 45 000 horas de servicio y mantenimiento cada 11 000 hs a un costo inferior a los U\$S 500 por kW. (Blanco et al., 2017)

La generación de electricidad utilizando biogás en motores de combustión interna requiere de la purificación del combustible con la finalidad de reducir aquellos constituyentes que resultan agresivos para los motores o producen niveles de emisión de contaminantes por encima de los niveles permitidos. Las tecnologías más desarrolladas están relacionadas con la remoción de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, y otros componentes que causan deterioro en los componentes de los motores como los siloxanos, que son compuestos siliconados fermentados que durante la combustión se convierten en silicatos y cuarzo disminuyendo el volumen de la cámara de combustión y aumentando la relación de compresión y la abrasión del motor. Dependiendo del nivel de siloxanos, se requiere un tratamiento previo de remoción, sobre todo si el GRS será utilizado para la generación de electricidad (LMOP, 2015). El método más común es la absorción con carbón activado, aunque también se utilizan otros absorbentes como gel de sílica y otros tratamientos como enfriamiento bajo cero en conjunto con absorción líquida, absorción con aminas, o separación con membranas. (Blanco et al., 2017)

### 1.1.3. Valoración energética de residuos de agroindustria

Muchos materiales orgánicos disponibles en cantidades significativas pueden usarse como materia prima para la DA, como fracciones de desechos, subproductos industriales y cultivos energéticos. Las fracciones de desechos incluyen la fracción orgánica de los desechos sólidos municipales, los desechos orgánicos separados de la fuente, los alimentos y las sobras de los alimentos, los desechos de cocina y recortes de hierba. En los procesos industriales, se acumulan cantidades significativas de subproductos orgánicos, incluidos subproductos agroindustriales (estiércol, residuos de cosecha, etc.) y subproductos de procesamiento de alimentos (por ejemplo, desechos de mataderos, suero de leche, granos agotados de cervecería, restos de destilería, residuos de frutas y hortalizas, residuos de remolacha azucarera). Las aguas residuales industriales de alta conductividad también pueden ser de interés como materia prima en las plantas de biogás. Finalmente, los cultivos producidos para la DA incluyen maíz, hierba y remolacha (Drosg et al., 2013).

Drosg (2013) expresa que no todos los productos de desecho y cultivos son igualmente adecuados para la producción de biogás y, en algunos casos, la producción podría no ser rentable. Para evaluar la idoneidad y la rentabilidad de las materias primas para obtener biogás, se necesita una forma confiable de caracterizar y analizar las materias primas. Se puede llevar a cabo una evaluación preliminar de una

materia prima utilizando los datos disponibles en la literatura y datos de producción. También se deben considerar cuestiones legales, como las leyes ambientales y de seguridad que regulan el uso de productos de desecho. Si la evaluación preliminar indica que la materia prima puede ser adecuada, debe realizarse un análisis de laboratorio detallado. Información concisa sobre los diferentes métodos de análisis (tales como sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), contenido de nitrógeno, demanda química de oxígeno (DQO) y sus limitaciones. Además, también se debe evaluar la disponibilidad de macro y micronutrientes, así como la posibilidad de acumulación de sustancias inhibitorias (antibióticos, metales pesados, desinfectantes, amoníaco, hidrógeno, sulfuro, etc.). Una prueba importante para la degradabilidad anaerobia y la aceptabilidad de una materia prima, es un ensayo en batch para medir el potencial bioquímico de metano (PBM). La mejor información sobre el comportamiento de una materia prima en una planta de biogás puede obtenerse en ensayos de fermentación continua. Sin embargo, una gran desventaja de estas pruebas continuas es su complejidad y costo.

La FAO en el año 2004 presenta un documento con terminología unificada de la bioenergía (Biomass Unified Terminology, UBET). Allí define que a partir de la biomasa son generados los biocombustibles y en base a estos la bioenergía. Explica los diferentes tipos de biomasa y biocombustibles. A excepción de los materiales biológicos contenidos en formaciones fósiles, la biomasa es todo material de origen biológico, tales como los cultivos energéticos, los residuos agrícolas y forestales, el estiércol o la biomasa microbiana.

Los residuos agroindustriales son un tipo de biomasa generada en las labores de campo de cultivos (cosecha, poda) y en procesos industriales a partir de materiales orgánicos. Generalmente, este tipo de biomasa proviene de plantas y su uso más frecuente y antiguo es la generación de energía por combustión directa. Sin embargo, el valor energético que se obtiene de este proceso no es competitivo comercialmente debido a que la biomasa presenta altos contenidos de humedad y baja densidad. En los últimos años se ha involucrado el concepto de biomasa moderna para describirla como una fuente sostenible de suministro, utilizada en tecnologías eficientes y amigables con el ambiente. Como consecuencia de la nueva visión del término biomasa se han desarrollado otros procesos como la conversión bioquímica, extracción física y conversión termoquímica, que buscan incrementar el valor de la biomasa produciendo compuestos químicos, energía, biocombustibles, carbón activado, adhesivos, entre otros productos (Demirbas, 2010).

La principal ventaja de utilizar residuos agroindustriales como materia prima biológica es que se alcanza un doble objetivo: la gestión de residuos y la producción de valiosos productos químicos a partir de precursores económicos y fácilmente disponibles. Desde una perspectiva ambiental, la producción de productos comercialmente valiosos a partir de desechos agroindustriales actúa como un incentivo para

que la industria participe en programas de gestión de residuos estructurados y eficientes. La preponderancia del uso de desechos agroindustriales para la producción de energía se debe a la fácil disponibilidad de tecnologías que permiten el uso de desechos y combustibles agroindustriales y a una mayor conciencia entre el público en general y la comunidad científica (Gopinath, et al., 2016).

El procesamiento de productos agrícolas para la producción de diversos productos alimenticios conduce a la generación de grandes cantidades de materiales de desecho. El principal residuo sólido generado durante la producción de vino es el orujo de uva, que se produce durante las etapas de trituración, prensado y escurrido. Es un material lignocelulósico rico en polifenoles y está compuesto principalmente de tallos, pieles y semillas. Los residuos agroindustriales requieren una gestión adecuada a fin de evitar posibles problemas medioambientales relacionados con su eliminación. El uso de estos materiales para la producción de energía presenta una solución adecuada (Aboudi, et al., 2016; Anjum et al., 2016).

En la Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) con la asistencia de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha cuantificado geográficamente la potencialidad de producción de bioenergía mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar la oferta, demanda y distribución de biomasa vegetal disponible en el país, empleando para esto la metodología WISDOM: "Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles" (WISDOM: Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping). Estos y otros estudios complementarios del INTA sobre una extensa variedad de cultivos permiten tener una base importante de información georreferenciada que cubre la totalidad del país. Estos estudios se están profundizando a nivel de varias provincias que han mostrado un particular interés en desarrollar la bioenergía en sus territorios (Menéndez, 2013).

#### 1.1.4. Residuos Sólidos en Bodegas

Existen tres tipos de biomasa residual del sector vitivinícola que se destacan: residuos provenientes de la poda de la vid, de bodega y de destilería de residuos de bodegas. En el caso de los residuos de bodega se contemplan los obtenidos luego del proceso de vinificación en blanco, tinto o espumante tanto como en la elaboración de mosto de uva (Antoniolli et al., 2018).

Tanto el proceso vitícola como vitivinícola genera una serie de residuos sólidos, los cuales pueden ser clasificados como: residuos orgánicos provenientes del cultivo y provenientes de la materia prima (orujo, escobajos, borras) y lodos de tratamiento de aguas; residuos inorgánicos: residuos generados en el control y manejo de viñedos, de insumos enológicos utilizados y de insumos para el proceso de

envasado y embalaje; residuos asimilables a domésticos: residuos provenientes principalmente de baños, cocina y oficinas.

Paralelamente a los residuos propios de la operación, también se producen residuos peligrosos en menor volumen. En el proceso vitícola, este tipo de residuos se relaciona con las etapas de aplicación de plaguicidas, y de operaciones de mantenimiento de vehículos y maquinaria. En tanto, en el proceso vitivinícola se generan en procesos auxiliares como mantenimiento de maquinaria y transporte, incluyendo también restos de algunos materiales de limpieza, y ciertos reactivos de laboratorio. También clasifican como residuos peligrosos algunos cartuchos y toners de tinta, y tubos fluorescentes.

La mayoría de los residuos generados en el sector presentan distintas alternativas de manejo, ya que estos pueden ser reutilizados o reciclados dentro de la misma empresa, o bien se utiliza servicio externo para su retiro hacia reciclaje o disposición final. (Corporación Chilena del Vino; Consejo Nacional de Producción Limpia, 2011).

**Tabla 1: Índices de generación de residuos en bodegas.**

Residuo	Índice de Generación (1)	Índice de Generación (3)	Índice de Generación (2)	Índice de Generación (4)
	[kg/L vino]	[kg/kg uva]	[kg/L vino]	[kg/kg uva]
<b>Orujo</b>	0.13	0.0975	0.15	0.1125
<b>Escobajo</b>	0.04	0.03	0.07	0.0525
<b>Borras</b>	0.01	0.0075	0.01	0.0075
<b>Lodos del Proceso</b>	0.001	0.00075	0.0019	0.00143
<b>Asimilables a domésticos</b>	0.002	0.0015		
<b>Residuos Peligrosos</b>	0.0002	0.00015		

Fuente: (1) Corporación Chilena del Vino; Consejo Nacional de Producción Limpia (2011) (2) Diagnóstico empresas region del Maule 2010. (3) Elaboración propia en base a (1). (4) Elaboración propia en base a (2) .

#### 1.1.5. Orujo de uva.

El orujo de uva se obtiene del proceso de elaboración del vino como el residuo remanente después de la vinificación, y está constituido principalmente por los hollejos y semillas de las uvas. Según registros del Instituto Nacional de Vitivinicultura, en el año 2015 en Argentina se destinaron a la vinificación aproximadamente 2.3 millones de toneladas de uva, de las cuales en la provincia de Mendoza se vinificaron alrededor de 1.7 millones. Debido a que aproximadamente el 20% del peso de la uva procesada constituye luego el orujo, es que por año en Argentina se producen aproximadamente 500.000 toneladas de este tipo de residuo. El destino habitual que tienen los orujos es la destilación

para recuperar alcohol etílico, la obtención de bebidas espirituosas (grapa), como así también la recuperación de ácido tartárico. (Antoniolli et al., 2018)

Las uvas contienen una gran cantidad de diferentes componentes que se extraen (al menos parcialmente) durante la vinificación. El orujo de uva restante sirve como una buena fuente de fitoquímicos, incluyendo una variedad de compuestos fenólicos, pigmentos y antioxidantes. Muhlack et al. (2018) afirman que no es sorprendente que la extracción y caracterización de tales compuestos sea uno de los aspectos más estudiados de este residuo de producción de vino. El orujo también contiene otros componentes útiles, como ácidos grasos, azúcares y material lignocelulósico. Estos diferentes componentes se extraen utilizando una variedad de técnicas y los extractos tienen una gama de aplicaciones. Se observan algunas características del orujo en tabla 1.

**Tabla 2: Propiedades fisicoquímicas del orujo de uva.**

Parámetro	Valor	Referencia
pH	3.6 ± 0.2	1
Humedad	73.6 ± 2.6% p/p	
Azúcares reductores	1.5 ± 0.3% p/p	
Cenizas	4.6 ± 0.5% p/p	
Celulosa	20.8% p/p	2
Hemicelulosa	12.5% p/p	
Taninos	13.8% p/p	
Proteínas	18.8% p/p	
Cenizas	7.8% p/p	

Fuente: (1) Mendes, et al., (2013); (2) Lafka, Sinanoglou y Lazos (2007)

Las cifras para la producción de orujo varían un poco, debido a la variabilidad en la frescura y los contenidos de humedad, entre las diversas fuentes de orujo. Se observan valores tan bajos como un 13% estimado (Torres, et al., 2002) y tan altos como un promedio del 27% (Toscano et al., 2013).

En la entrevista mantenida en el año 2018 con el Director del departamento de Estadísticas del Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV), fue revelado un factor importante que determina el porcentaje de orujo en relación al peso fresco es la variedad de uva. En Mendoza, uvas de la variedad Malbec generan poco orujo (aproximadamente 7%) debido a que la piel de esta variedad es muy fina, otras variedades como el Syrah de piel más gruesa generan más orujo por peso fresco. En la provincia no existe un control riguroso sobre este residuo. Las bodegas declaran, los productos obtenidos en una elaboración, mediante el formulario CEC05, que funciona como declaración jurada para el INV. El peso del orujo en relación a la cantidad de uva elaborada depende de la prensa. Los vinos son más o menos prensados según la calidad que se desee obtener. En promedio, en el país, 1.22 kg de uva generan 1 L de

vino. Esta cantidad es exigida por el INV, valores menores pueden indicar adulteración en el vino. Bodegas de alta gama pueden utilizar hasta 1.5 kg de uva para la elaboración de 1 L. Según las estadísticas del INV del total del peso de la uva ingresada a bodega el 7% se destina a la destilería y el 3% a otros usos.

Hidalgo Togores, (2003) simplifica el cálculo estableciendo que para obtener una botella de 750 cm<sup>3</sup>, en un vino tinto de buena calidad, se necesita en promedio 1 kilogramo de uva. Por lo tanto, un kilogramo de uva genera 0.75 L de vino. La relación expresada en el párrafo anterior por el INV, se traduciría a que 1 kg de uva genera 0.82 L de vino.

La calidad y cantidad de orujo de uva producido también variará, en gran medida en función del tamaño de la bodega y los métodos utilizados durante la vinificación. Las bodegas pequeñas solo pueden triturar varias toneladas de fruta, mientras que las grandes operaciones pueden procesar decenas de miles de toneladas. Entre estas diferentes escalas de operación, la naturaleza variable de las uvas y el equipo utilizado para el prensado contribuyen a diversos datos sobre la generación de orujo de uva por tonelada de fruta triturada. (Muhlack, et al., 2018).

La composición de la biomasa proveniente de las plantas es una mezcla compleja de materiales que pueden clasificarse en compuestos estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina) y sustancias de bajo peso molecular (materia orgánica y cenizas). Por lo general, los compuestos principales de la biomasa botánica son celulosa, hemicelulosa, lignina, extractivos y cenizas, dependiendo de la parte de la planta que se analice, estos compuestos se encuentran en mayor o menor cantidad. Por ejemplo, los tallos, ramas y hojas, están constituidos primordialmente por material lignocelulósico (celulosa, hemicelulosa y lignina) mientras que las frutas, cereales y vegetales son una fuente de carbohidratos, almidón y azúcar (Demirbas, 2010).

En el caso del orujo se presenta la composición en la tabla a continuación:

**Tabla 3: Componentes de hollejo y semilla de vid**

Residuo	Cenizas	Proteína	Lípidos	Celulosa	Holocelulosa (Cel+Hemicel)	Hemicelulosa	Lignina
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Hollejo	0.86 (2)	0.85 (2)	0.31 (2)	20.80(1)	46.5 (1)	12.50 (1)	0.00 (1)
Semilla	1.48 (2)	6.87 (2)	10.84 (2)	-	36.8 (1)	-	43.8 (1)

Fuente: elaboración propia a partir de (1) Mendes *et al.*, 2013; (2) Santos *et al.*, 2011;

El diseño de un sistema térmico para la obtención de energía a partir de biomasa requiere del conocimiento de propiedades físicas como la densidad y porosidad, y propiedades termodinámicas

como la conductividad térmica, calor específico y calor de formación. Otras propiedades que se deben conocer de la biomasa que va a ser utilizada como combustible es la composición y el contenido de energía. Estas propiedades pueden conocerse por medio del análisis último, análisis próximo y análisis térmico.

El análisis último o también denominado elemental, es una técnica de laboratorio que permite determinar el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y en algunas oportunidades cloro (Cl), presente en la biomasa. El porcentaje de oxígeno (O) puede ser calculado por diferencia, teniendo en cuenta que es posible expresar la biomasa como la suma de compuestos orgánicos (C, H, O, N, S), humedad (HM) y cenizas (CZ) (Basu, 2010).

El análisis último también es reportado frecuentemente en una base libre de cenizas y humedad, donde la sumatoria de los compuestos orgánicos debe ser 100%.

La cuantificación del porcentaje de N, S y Cl en la biomasa es importante debido a que proporciona información sobre los posibles contaminantes ambientales que se pueden generar (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, ácido clorhídrico) en un proceso de combustión (Vargas-Moreno *et al.*, 2012). Por otra parte, las concentraciones de C, H y O permiten determinar el poder calorífico de la biomasa mediante regresiones (Basu, 2010).

En la literatura (Muhlack, *et al.*, 2018; Toscano *et al.*, 2013) se encuentran referencia sobre el análisis último de diferentes partes de la uva, especialmente de las semillas y hollejos que son generadas como residuo en la producción de vino en Europa. La tabla 4 presenta el análisis último, próximo y poder calorífico de diferentes partes de la vid. En la tabla se observa que las semillas son el residuo con el mayor contenido de C y menor contenido de O, indicando que este residuo puede ser el que entregue más energía en procesos de combustión. Sin embargo, el alto contenido de N respecto a las otras partes, muestra que en una combustión podría generar mayor cantidad de gases tipo NO<sub>x</sub>.

El análisis próximo es empleado para determinar la composición de la biomasa en términos de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo. Este análisis es más sencillo y económico en comparación con el último debido a que no requiere equipos muy especializados.

**Tabla 4: Análisis último y próximo de los residuos de uva**

Parte	C	H	N	S	O	Materia Volátil	Cenizas	Carbono Fijo	Poder Calorífico Superior
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/kg]
Hollejos	55.7	6.8	2.3	0.1	35.0	68.3	6.8	24.9	19.7
Semillas	59.2	7.4	2.6	0.1	30.6	70.5	7.5	22.0	22.7

Fuente: elaboración propia a partir de Muhlack, et al., (2018).

**Tabla 5: Análisis comparativo de características energéticas de orujo de uva de diferentes regiones vitivinícolas.**

Procedencia del Orujo	Poder Calorífico MJ/kg [% p/p]		Análisis último [% p/p]		
	Superior	Inferior	Carbono fijo	Sólidos Volátiles	Cenizas
Australia Meridional			25.9	69.0	5.1
Australia Meridional			25.8	67.7	6.5
Australia Meridional			25.3	67.9	6.8
Australia Meridional			28.2	63.6	8.2
España		19.5	26.4	65.8	7.8
Rumania	20.1	19.7	24.5	72.0	3.5
España	19.5		24.7	67.8	7.5
España		20.2	27.3	65.7	7.0
Trento, Italia	21.8				4.2
Italia Central	21.3	20.1			8.1

Procedencia del Orujo	Análisis próximo [% peso húmedo]						
	C	H	N	S	Cl	Na	K
Australia Meridional	53.7	6.20	1.76	0.11	0.02	0.01	1.48
Australia Meridional	54.1	6.10	2.59	0.16	0.05	0.03	1.78
Australia Meridional	54.8	6.30	2.43	0.14	0.05	0.02	2.00
Australia Meridional	53.9	5.70	2.39	0.16	0.03	0.02	2.08
España	49.7	5.56	2.23	0.14			
Rumania	43.2	5.94	0.65	1.24			
España	43.0	9.28	2.05	0.17			
España	51.2	5.52	2.48	0.17			
Trento, Italia	54.9	5.83	2.09	0.21			
Italia Central	48.6	5.73	2.48	0.12	0.03		

Fuente: Muhlack et al.; (2018).

**Tabla 6: Composición de cenizas obtenidas por gasificación de orujo de uva (% peso húmedo).**

Composición de cenizas de orujo de uva [% p/p]											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PbO	ZnO
4.7–	0.8	0.6	0.10–	29.1–	3.4	0.4	15.3–	2.6 –	7.0–	4.7–	0.8
12.5	-2.1	-1.4	0.14	34.6	-4.4	-0.9	22.5	5.0	10.8	12.5	-2.1

Fuente: Muhlack et al.; (2018).

Varios estudios (Guo, et al., 2017, Marculescu y Ciuta, 2013; Muhlack et al., 2009), muestran que las propiedades como combustible del orujo de uva son adecuadas para su conversión termoquímica: los poderes caloríficos son similares, no solo a otros residuos agroindustriales como las podas de aceitunas y el aserrín, sino también a los combustibles fósiles sólidos como las mezclas de carbón y coque (Lapuerta, et al., 2008). El contenido de humedad de la biomasa también es relevante debido a la alta humedad. Las materias primas requieren la eliminación de agua para no afectar negativamente el balance energético y la eficiencia económica de la conversión térmica de biomasa a energía (Brammer y Bridgwater, 2002). El contenido de humedad del orujo antes del secado depende de la variedad de uva, la técnica de prensado en bodega y la presión aplicada, y cualquier procesamiento posterior, como la destilación con vapor o la extracción con solvente, pero son comunes valores de alrededor del 50-60% p / p (Fiori y Florio, 2010; Marculescu y Ciuta, 2013; Toscano et al., 2013). El alto contenido de humedad y la naturaleza higroscópica del orujo de la uva, por lo tanto, requieren un proceso de mejora térmica como la torrefacción o la carbonización hidrotérmica (Guo, et al., 2017),

En general orujos y borras obtenidas luego del proceso de vinificación son enviados a destilería para su posterior extracción de alcohol remanente y ácido tartárico. También es extraído aceite de pepita (semilla) de uva. Por lo tanto, en la destilería se obtienen residuos adicionales del procesamiento de estos subproductos de bodega. Por lo general el costo del transporte de estos residuos de la bodega, es asumido por la destilería, a cambio del residuo que en este caso se convierte en materia prima para diferentes procesos de extracción. Este costo ronda en la actualidad los 650 pesos por m<sup>3</sup>+IVA (Peral, 2018).

Se registran, según INV (2018), 12 destilerías en la provincia de Mendoza: Alambic International S.A., Caesar de Rosa Ana Olivi, Derivados Vínicos S.A., Destilería Malvinas S.A., Jorge Rubio, La Agrícola S.A., Lisandro Castro Sagic Argentina S.A., Sol de los Andes S.A., Tarcot S.A., Tecnotar S.A. y Urs Wolf. Pero la destilería que concentra la principal actividad es Derivados Vínicos S.A.

El orujo de uva es una forma de biomasa que, junto con otros residuos orgánicos de la producción de vino, como las podas de viñedos y los tallos de uva (escobajos), normalmente se considera un producto de desecho. En algunos casos, estos residuos pueden ser reciclados para ser transformados en compost

o suplementos alimenticios (Arvanitoyannis et al., 2006), o pueden ser procesadas para la recuperación de etanol, pigmento y tartrato (Braga et al., 2002). La conversión térmica de este recurso de biomasa en productos de alto valor, como energía (en forma de calor y electricidad), carbón vegetal (biochar) o materia prima química y combustibles para el transporte (líquidos) son alternativas de tratamiento de procesos que pueden generar beneficios ambientales y económicos. (Digman y Kim, 2008).

Los denominados compuestos bioactivos o fitonutrientes son sustancias que forman parte de las plantas y se encuentran en el orujo de uva. Los tipos comunes de fitonutrientes incluyen compuestos fenólicos (flavonoles, antocianinas, flavanoles, etc.), terpenos (carotenoides, fitosteroles), alcaloides y otros compuestos como ligninas, saponinas y tioles. La ingesta de estas sustancias se ha relacionado con importantes beneficios nutricionales para la salud. Por lo tanto, existe un creciente interés de investigación científica y desarrollo industrial para encontrar nuevas fuentes de estos compuestos bioactivos que podrían ser utilizados como ingredientes funcionales en la industria de procesamiento de alimentos. En las últimas décadas, por razones tanto económicas como ambientales, ha habido una presión continua y creciente para recuperar y aprovechar los desechos de la industria alimentaria. Una de las principales razones de esta tendencia, es la presencia de compuestos bioactivos o fitonutrientes que podrían ser de gran valor en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria. La recuperación de compuestos con propiedades bioactivas del orujo representa una estrategia para agregar valor y a la vez permitir un manejo sostenible de los residuos de las bodegas. La importancia de este tipo de compuestos radica en que las antocianinas, además de contribuir a la actividad antioxidante de los extractos, son responsables del color en los vinos tintos y en los extractos, posibilitando entonces su aplicación como colorantes naturales. Asimismo, como parte de la caracterización de los extractos obtenidos se determinó su actividad antioxidante (Antoniolli, et al., 2018).

#### 1.1.6. Necesidades energéticas en bodegas.

Romito (2015) en sus tesis de maestría “Eficiencia energética y su aplicación en la industria vitivinícola”, revisa las necesidades energéticas en bodegas de la provincia. Afirma que en el proceso vinícola las etapas que generan una mayor demanda energética de tipo eléctrica son la estabilización, fermentación y el proceso de guarda, dado los requerimientos de refrigeración o control de temperatura, los que en conjunto consumen casi el 60% del total de la energía.

Cooperativas agroalimentarias del gobierno de España en 2010 publicaron un informe basado en 20 bodegas auditadas que son clasificadas, en función de su producción final, de la siguiente manera: bodega grande, con producción final superior a 50 000 hectolitros de vino; mediana, con producción

final entre 25 000 y 50 000 hectolitros de vino y pequeña: producción final inferior a 25 000 hectolitros de vino.

El índice de consumo de energía eléctrica establecido, en el trabajo de Romito (2015), corresponde al de una empresa pequeña y su valor es cercano a 0.35 kWh/L de vino producido. El índice de consumo de energía eléctrica para las bodegas, en el diagnóstico de las empresas de la Región del Maule varía en función de su tamaño, con una media de 0.2 kWh/L vino para las medianas, reduciéndose a, aproximadamente, 0.08 kWh/L para las de mayor tamaño. Los índices para cada tamaño de empresa se indican en la presente tabla:

**Tabla 7: Índice de consumo de energía eléctrica en kWh/L vino según capacidad de empresa.**

Índice	Consumo energía eléctrica (1) [kWh/L vino]	Consumo energía eléctrica (2) [kWh/kg uva]	Capacidad (1) [hL]
<b>Empresa Pequeña</b>	0.35	0.2625	producción final inferior a 25.000 hectolitros de vino
<b>Empresa Mediana</b>	0.2	0.15	producción final entre 25.000 y 50.000 hectolitros de vino
<b>Empresa Grande</b>	0.08	0.06	producción final superior a 50.000 hectolitros de vino

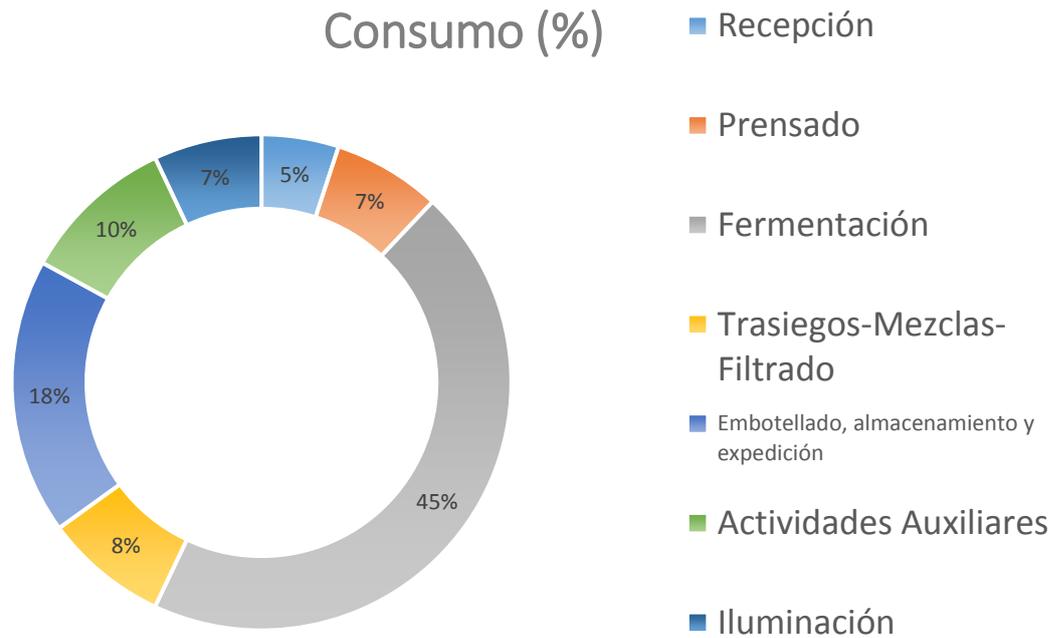
Fuente: (1) Corporación Chilena del Vino; Consejo Nacional de Producción Limpia (2011), (2) Elaboración propia en base a Romito (2015).

Se resumen en la tabla a continuación los valores revisados, publicados en relación a necesidades energéticas en bodegas.

**Tabla 8: Revisión de consumo en bodega por diferentes autores**

Tamaño Indust [hL]	Consum electric anual [kWh/año]	Consumo electrico/produccion [kWh/hL]	Consumo de gas/produccion [L/hL]	Consumo de gasoleo anual [kWh/año]	Fuente
30 000	330 000	11			Fuentes-Pila y García (2014)
promedio		15	1 500		Romito (2015)
25 000 a		20			Corporación Chilena del Vino; Consejo Nacional de Producción Limpia (2011),
50 000 promedio			0.0047		Romito (2015)
25 000 a	490 536	16.35		40 992	Cooperativas Agroalimentarias (2010)
50 000					

Fuente: elaboración propia a partir de datos de: Fuentes-Pila y García (2014), Romito (2015) Corporación Chilena del Vino; Consejo Nacional de Producción Limpia (2011), Cooperativas Agroalimentarias (2010).



**Figura 1: Porcentaje de consumo de energía en bodegas. Fuente: Cooperativas Agroalimentarias (2010)**

Del gráfico anterior casi la mitad del consumo eléctrico total (45%) se destina a la fermentación, la cual es un proceso exotérmico, por lo que la necesidad de mantener la temperatura controlada siguiendo una de las indicaciones del enólogo que supone un gran esfuerzo energético. Por este motivo es el proceso al que se le presta más atención en las medidas de ahorro y eficiencia energética.

Le sigue con un 18% del consumo eléctrico total la parte de almacenamiento y envasado, después están todos los trasiegos y procesos de depuración y limpieza de los caldos con un 8% del total. Y en siguiente lugar de importancia se sitúa la fase de prensado (7%), a la que le sigue la iluminación (7%), para finalizar con la fase de recepción que supone el 5% del consumo energético.

Por último, los consumos derivados de la actividad de las oficinas, la climatización y el uso de las instalaciones de servicio a los socios, se encuentran englobadas en las denominadas “actividades auxiliares” y suponen un 10% del consumo en su conjunto, siendo el consumo de cada una de estas actividades inferior al 2% (Cooperativas Agroalimentarias, 2010).

El método utilizado para el cálculo del balance energético se basa en la fórmula para el cálculo del consumo:

$$\text{Consumo energético (kWh)} = \text{Potencia (kW)} \times \text{Tiempo (h)}$$

**Ecuación 1**

Por lo tanto, para calcular el consumo que se produce en cada una de las fases estudiadas, es necesario conocer la potencia de los equipos y el hábito de uso, es decir las horas en las que está funcionando cada uno de los equipos consumidores de energía. (Cooperativas Agroalimentarias, 2010)

La distribución de consumo se encuentra en las principales fases que componen el proceso de elaboración del vino: recepción, prensado, fermentación (alcohólica y maloláctica), trasiegos-mezclas-filtración, y embotellado-almacenamiento-expedición. También se incluyen en la fase “actividades auxiliares” los otros focos de consumo eléctrico como son las oficinas, servicio a socios, la climatización y los laboratorios. En otra fase se incluye el consumo debido a la iluminación. Los promedios de electricidad consumida en cada fase de las 8 bodegas auditadas por Cooperativas Agroalimentarias (2010) y su porcentaje respecto del total, son los siguientes:

**Tabla 9: Distribución del consumo energético en función del proceso para bodega mediana que elabora 30.000 hL.**

Fases de Producción	Consumo Eléctrico [kWh]	Consumo [%]
Recepción	24.524	5
Prensado	34.388	7
Fermentación	220.743	45
Trasiegos-Mezclas-Filtrado	39.243	8
Embotellado, almacenamiento y expedición	88.297	18
Actividades Auxiliares	49.054	10
Iluminación	34.287	7
<b>Total</b>	<b>490.536</b>	<b>100</b>

Fuente: Cooperativas Agroalimentarias (2010)

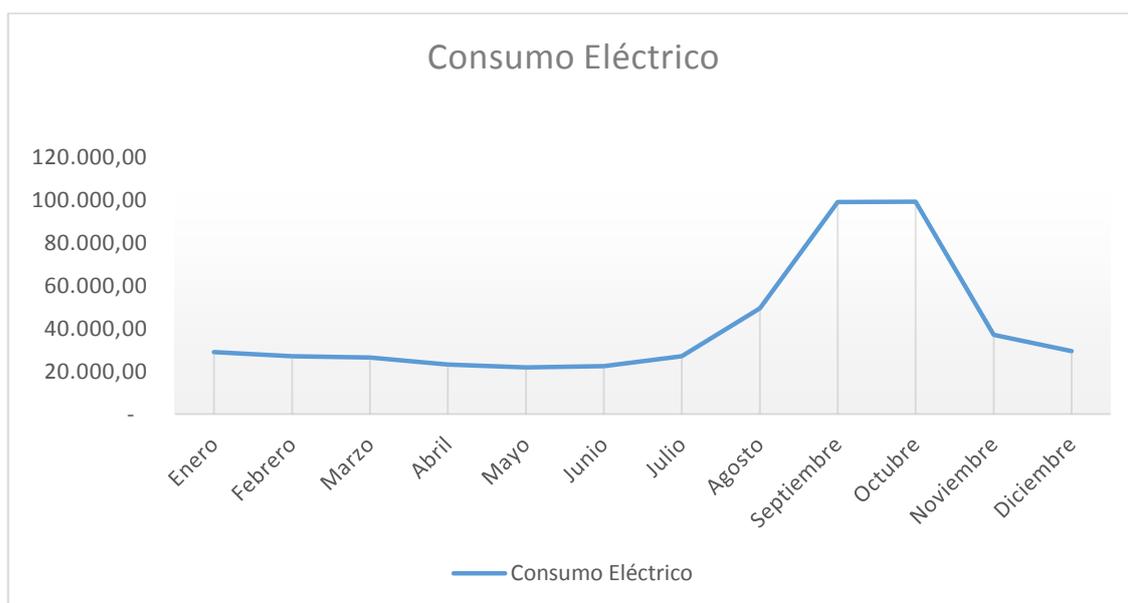
Otras fuentes energéticas de menor consumo en las bodegas, incluyen el uso de gas, principalmente en calderas para calentamiento de agua, y petróleo para equipos electrógenos o climatización. Los índices de consumo promedio establecidos en este estudio son del orden de 0.0047 L gas/L vino y 0.0046 L petróleo/L vino (Romito, 2015).

Romito (2015), en su trabajo hace referencia al consumo de energía local Según estimación aportada por el Ingeniero Guillermo Nadal, una empresa mendocina especializada en eficiencia energética en bodegas y energías alternativas. Expresa que, el consumo energético en bodegas está integrado por: energía eléctrica 80-90 %, donde el consumo eléctrico por litro de vino elaborado es de 0.15 KW. Gas (de red o GLP) 10-20 % y el consumo promedio por litro de vino elaborado es de 0.015 m<sup>3</sup>.

El Manual de Eficiencia energética en bodegas (Fuentes-Pila y García, 2014) considera para un tamaño de industria considerado representativo: 30 000 hectolitros de vino /año, un consumo eléctrico

medio de 330 000 kWh/año, una relación de consumo eléctrico/producción de 11 kWh/ hL vino, una relación de consumo térmico (combustible) por producción de 1 kWh/ hL vino, una potencia instalada de un centro de transformación de 800 kW, una potencia instalada para generación de energía térmica de 20 kW de caldera, 50 kW de vehículos, un costo de la energía eléctrica de 0.12 €/kWh, un costo de la energía térmica de 0.07 €/kWh, relación del coste de la energía de 95% en electricidad por 5% de energía térmica. Estacionalidad del consumo de energía eléctrica de agosto a septiembre y de a octubre a noviembre. Estacionalidad del consumo de energía térmica: de octubre a febrero (en bodegas con consumo de combustible en calefacción del hemisferio norte).

El consumo de electricidad en una bodega tiene una marcada estacionalidad. La figura 3 muestra la estacionalidad de consumo eléctrico en una bodega con fraccionamiento, según Fuentes-Pila y García (2014). Cabe aclarar que estos datos refieren a estudios realizados en España. Por lo tanto, las fechas corresponde al hemisferio norte.



**Figura 2: Consumo eléctrico mensual de energía activa en kWh en bodega de capacidad media (30.000 hectolitros de vino /año). Fuente: Fuentes-Pila y García (2014)**

Romito (2015) observa que la curva de consumo presenta sus valores máximos entre los meses de marzo y abril, que coinciden con la temporada de cosecha y elaboración. El resto del año el consumo corresponde a envasado y almacenamiento, y a las actividades oficinas, tienda, etc. En el caso de una bodega trasladista, que no fracciona, la estacionalidad es aún más marcada.

## 1.2. Motivación

La principal motivación para el desarrollo de este trabajo de tesis fue la experiencia realizada en proyectos de investigación en ensayos de DA y proyectos de extensión en construcción de biodigestores. Las primeras experiencias fueron realizadas en el año 2008 en el Centro de Estudios de Ingeniería de Residuos Sólidos (CEIRS) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO), el cual se dedica a la enseñanza, investigación, extensión y a la formación de recursos humanos en el área de los residuos sólidos.

El primer proyecto de investigación realizado en el CEIRS en relación a la DA se orientó a la utilización de residuos agroindustriales para su digestión en reactores discontinuos anaeróbicos. Se utilizaron residuos de tomate de industria local como sustrato. Como resultado se obtuvieron  $0.10 \text{ m}^3$  de biogás por kilogramo de SV, con 50% de contenido de metano.



**Figura 3: Disposición de reactores de PET en baño termostático.**

Se trabajó también un proyecto para el Programa de Bioenergía de la UNCUYO denominado: “Aprovechamiento de la biomasa residual producida por los cultivos energéticos para la obtención de biogás”. Debido a que la biomasa residual que producen estos cultivos constituye un sustrato potencial para la generación de biogás por degradación anaerobia, se buscó aprovechar el contenido energético del biogás producido y disminuir las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Se caracterizaron los cultivos de topinambur y girasol para evaluar su potencial para la producción de metano. También se realizaron ensayos para la producción de biogás usando glicerina como aditivo, obtenida de la planta de biodiesel del programa.



**Figura 4: Caracterización de residuos de cultivos energéticos. Reactor anaeróbico de 200L provisto de sensores para control de temperatura presión y pH.**

Entre los residuos agroindustriales se estudió también la degradación anaerobia de orujo fresco y agotado, para la producción de biogás, en condiciones mesófilas, utilizando fluido ruminal bovino como inóculo.



**Figura 5: Orujo agotado (izquierda). Orujo fresco (derecha)**

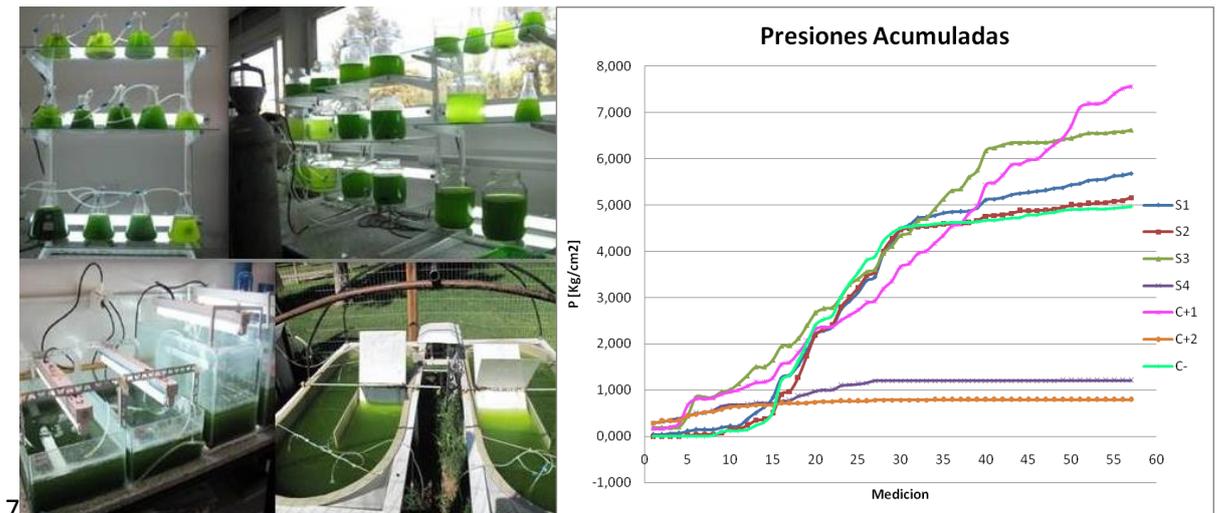


**Figura 6: Reactores de 4L de acero inoxidable.**



**Figura 7: reactores en baño termostatzado (izquierda) y toma de muestra de gas en jeringa (derecha)**

También en laboratorio, se estudió la viabilidad de la producción cuantitativa y cualitativa de biogás a partir de biomasa de microalgas mediante la DA de *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp., ambas especies nativas, aisladas en Mendoza y en cultivo de interior y en exterior, sin control de la esterilización, con la inyección de CO<sub>2</sub> industrial. Fue utilizada también glicerina obtenida de la planta de biodiesel de la Facultad de Ingeniería de la UNCUYO como cosustrato.



**Figura 8: Generación de la biomasa microalgal, cultivos de interior y exterior. Presiones acumuladas por tratamiento.**

A partir de los resultados obtenidos, se observó que es factible la degradación anaerobia de la biomasa microalgal, y que el mejor tratamiento para la generación de energía, a través del biogás, es el de algas con un aditivo con un 1% de glicerina. También se observó que la presencia de metanol dificulta los procesos para la obtención de metano.



**Figura 9: Reactores en baño termostatzado reformado.**

También fueron investigados los residuos de mataderos mendocinos para la producción de biogás. Se distinguieron las distintas corrientes de residuos, tratamientos y volúmenes de gas posibles de generar.

El último proyecto a través del CEIRS trató la generación de electricidad y su incorporación a la red mediante la valorización de los RSU. La incorporación de una nueva tecnología en el país mediante el uso de microturbinas para la generación de energía a través de la captura del biogás generado en un relleno sanitario en Mendoza. Además, como innovación, se propuso potenciar la actividad biológica del relleno sanitario con el fin de aumentar la producción y el rendimiento del biogás utilizando efluentes cloacales tratados en lagunas del tratamiento cercanas de la zona del proyecto. Para este proyecto la Universidad Nacional de Cuyo, organismos públicos y empresas privadas trabajan en conjunto.

El proyecto fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, mediante un proyecto para el Fondo de Integración Tecnológica Nacional (FIT-R, Energía). Para este fin se formó un Consorcio Asociativo Público Privado (CAPP) integrado por la Empresa Mendocina de Energía S.A. (EMESA), la empresa Tecnologías y Servicios Ambientales S.A. (TYSA), la Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO) y la Municipalidad de Las Heras. Se espera como resultado la mejora en la tasa de producción de biogás en el relleno sanitario mediante la construcción del módulo experimental de RSU con sistema de inyección de efluentes.



**Figura 10: Espacio de separación de residuos y toma de muestras**



**Figura 11: Separación y pesado de residuos.**



**Figura 12: Construcción de celda y relleno**



**Figura 13: Relleno de Celda**

Con el estudio de los parámetros más relevantes que gobiernan la degradación anaerobia se buscó realizar experiencias en escala piloto. Para este fin mediante el CEIRS y el Programa de Biogás del Instituto de Energía (IDE) de los Institutos Multidisciplinarios (IMD) de la UNCUIYO, se coordinó la construcción de dos biodigestores en escuelas técnico agrarias. Estos proyectos se basaron en la construcción de un biodigestor para el tratamiento de los residuos orgánicos, la obtención de biogás y biofertilizante en escuelas técnico agrarias.

Mediante ambos proyectos se buscó valorizar el residuo como materia prima para la generación de energía, capacitar a alumnos de las escuelas en energías renovables, cambio climático y gases de efecto invernadero. También se capacitó mediante talleres prácticos en los temas de diseño, dimensionamiento y construcción de biodigestores logrando así la construcción de los equipos. Se logró construir dos biodigestores de 2 750 litros de capacidad, su puesta en marcha, operación, mantenimiento y capacitación tanto de alumnos como de personal docente y no docente para el mantenimiento y la operación de los mismos.

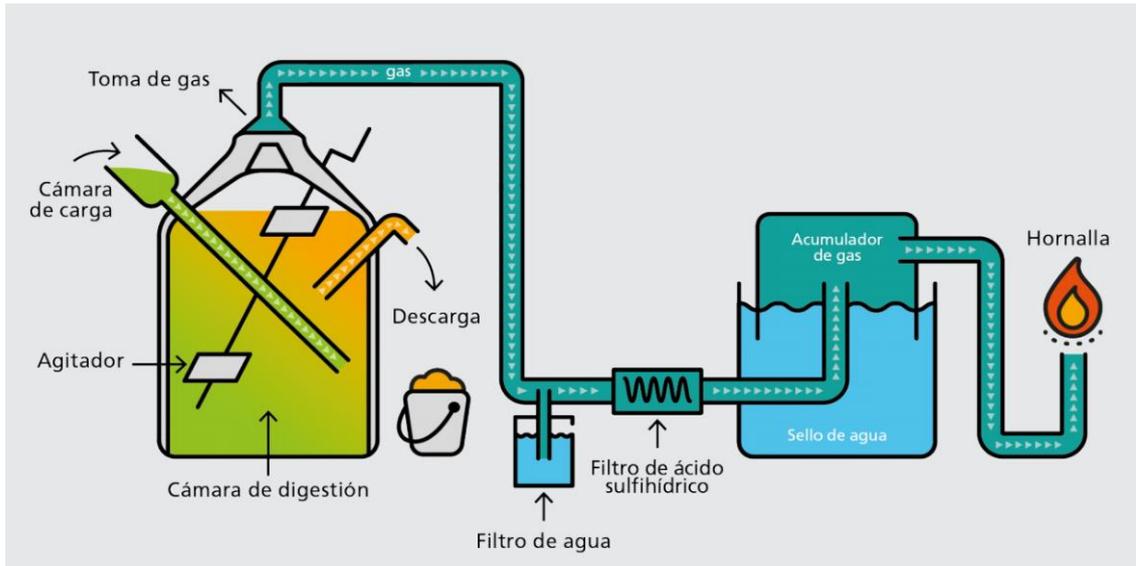


Figura 14: Esquema general del equipo (Fuente: elaboración propia. Diseño Victoria Balducci. IMD).



Figura 15: Biodigestor Construido en escuela Julia Silva de Cejas.



Figura 16: Biodigestor construido en escuela Moses J. Chade. Acumulador de gas, cámara de carga y descarga de Biodigestor.



Figura 17: Anafe con conexión a biogás en comedor de escuela Moises J. Chade.

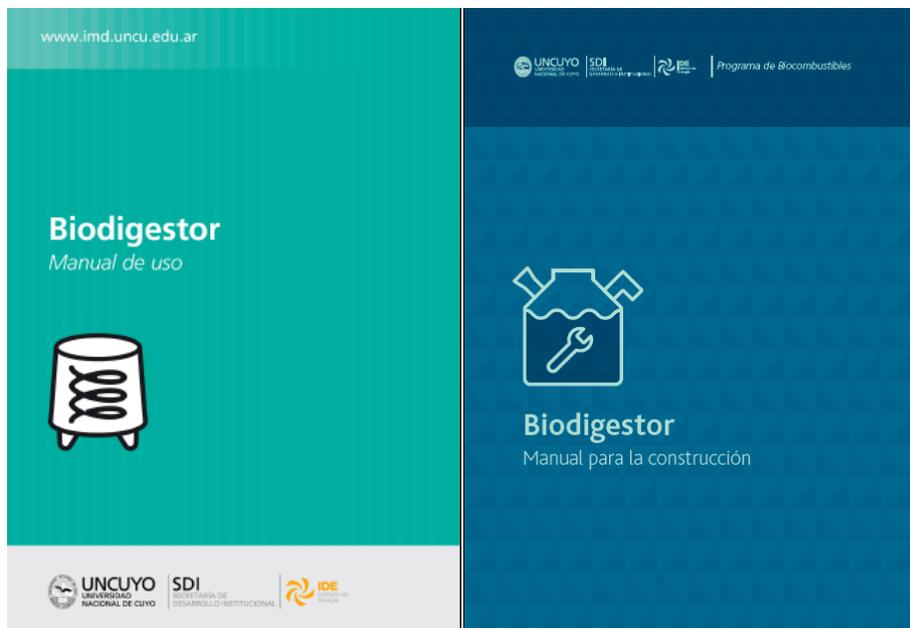


Figura 18: Manual de construcción y manual de uso y mantenimiento de biodigestores.

En Mendoza, existen gran cantidad de residuos biomásicos, originados en actividades urbanas y agroindustriales cuyo potencial energético no se ha tenido en cuenta, debido a que al degradarse regresan como nutrientes al suelo. Dado que actualmente existe gran interés a nivel nacional en incrementar la participación de la energía de la biomasa en la matriz energética del país, este recurso ha cobrado importancia desde hace unos años (Indiveri, Mercante, y Llamas, 2019).

En la actualidad no ha sido evaluado el aporte energético teórico a partir de producción de biogás con orujo de uva de la industria mendocina. Tampoco se ha cuantificado energéticamente el biogás producido a partir de la degradación del este residuo. Estas razones motivaron el desarrollo de esta investigación.

### 1.3. Problema de investigación y objetivo.

La degradación anaerobia de orujo de uva de las bodegas de la provincia de Mendoza podría contribuir a cubrir, en parte, los requerimientos energéticos de establecimientos vitivinícolas, a partir del aprovechamiento del gas metano mediante su digestión en reactores anaeróbicos que permitan optimizar el control de las variables que gobiernan el proceso.

El presente trabajo de tesis busca evaluar la posibilidad de degradar anaeróticamente el orujo de uva, generado en bodegas y destilerías de la provincia de Mendoza, en forma anaerobia para la obtención de biogás. También valorar calidad y potencial energético del gas obtenido.

El objetivo general de esta tesis es estudiar el potencial del orujo de uva para su valorización energética por medio de la degradación anaerobia.

Los objetivos específicos son:

- Cuantificar la cantidad de orujo fresco y agotado generado en la provincia de Mendoza
- Evaluar la factibilidad de degradación anaerobia de orujo agotado de uva.
- Estimar la generación de biogás de orujo agotado de uva mediante ensayos de DA y cuantificar energéticamente el biogás producido a partir de la degradación del residuo estudiado.
- Evaluar el aporte energético a partir de producción de biogás con orujo de uva de las bodegas de Mendoza. Comparar el potencial energético a partir de combustión de biogás generado a partir de orujo y combustión directa de orujo.

#### 1.4. Justificación de la investigación.

Existen numerosos estudios que ponen en evidencia la importancia de la degradación anaerobia para aprovechar el contenido energético de diferentes sustratos biomásicos, reducir los costos de disposición final de los residuos producidos y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (Deublein y Steinhauser; Drosig et al. 2013; 2008; Fountoulakis, et al 2008, González Sanchez y Pérez Fabiela 2015; Gopinath et al 2016; Singhania et al. 2016).

En lo que respecta a la DA, la falta de procedimientos normalizados para la realización de ensayos de generación de biogás a partir de residuos sólidos urbanos (RSU), dificulta tanto la repetitividad de las experiencias, como la comparación de resultados, e imposibilita la obtención de datos reales, confiables y fundados. (Indiveri et al., 2016)

Argentina tiene el potencial para generar energía en grandes escalas, aprovechando residuos agropecuarios, agroindustriales y urbanos. Un relevamiento realizado en el año 2012 por el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) identificó más de ochenta proyectos bioenergéticos en operación, en construcción y en cartera en las provincias de Argentina. Según este informe los proyectos son desarrollados por sectores industriales con alta disponibilidad de biomasa. De acuerdo a la región, están vinculados con la industria forestal (en el Litoral), azucarera y cítrica (en el Noroeste Argentino) y con la actividad pecuaria (sistemas de producción en confinamiento) en la región Pampeana. Los sectores que mostraron un mayor desarrollo bioenergético fueron el forestal y azucarero (Grassi, 2012).

En el caso específico del orujo de la uva, incluso si inicialmente se emplean procesos de tratamiento como la extracción de tartrato o etanol, las corrientes de desechos sólidos aún permanecen y deben ser tratadas y eliminadas de manera segura para evitar peligros ambientales como la contaminación del agua subterránea y los malos olores. (Muhlack, et al., 2018). Esto también define la necesidad del tratamiento de orujo agotado en destilerías. Este orujo residual posterior a la extracción de ácido tartárico y alcohol remanente es acumulado en destilerías, generalmente donde se concentra el orujo de bodegas locales, por esto en esta tesis se propuso evaluar su potencial, ya que es un residuo previamente tratado y acumulado en grandes cantidades en destilerías.

El potencial para producir productos valiosos, como alcohol, combustibles, y bioenergía, pone de manifiesto la necesidad de desarrollar procesos tecnológicamente viables y económicamente factibles que utilicen el orujo como materia prima. A medida que las bodegas y las regiones productoras de vino generan cantidades crecientes de residuos sólidos, especialmente de orujo, aumenta el interés dentro

del sector para implementar planes para la eliminación adecuada y sostenible de estos residuos. Históricamente, se han desarrollado varias tecnologías y métodos para explotar el orujo como materia prima para productos de valor agregado. Como una alternativa a la fermentación de azúcares por levadura para la producción de biocombustibles, la tecnología de DA se puede utilizar para producir biogás a partir de residuos orgánicos como el orujo. (Muhlack, et al., 2018)

En enero de 2019 La Secretaría de Ambiente regularizó el uso de biofertilizantes (digerido) provenientes de la generación de biogás, mediante la “norma técnica para la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de DA”. La misma busca principalmente: asesorar en la adopción progresiva de esta regulación como también, acerca de los avances en el conocimiento de la materia y en la normativa que haga recomendable su revisión, así como en las controversias que puedan plantearse durante su aplicación, coordinar acciones conducentes al desarrollo de los aspectos científicos, tecnológicos, normativos y organizativos vinculados a la materia objeto de la norma. Finalmente, en la resolución se invita a participar a las jurisdicciones mediante su adopción. (Secretaría de Ambiente de la Nación, 2019)

Desde la creación del Programa RenovAr, se han adjudicado 40 plantas de biogás, por 74 MW, de entre las cuales cuatro de ellas ya están generando energía eléctrica. Actualmente el precio establecido para la ronda 3 del programa RenovAr para proyectos de biomasa es de 2 500 000 USD/MWh y para proyectos de Biogás es de 4 500 000 USD/MWh. (Secretaría de Gobierno de Energía, 2018)

El Gobierno de Mendoza promulgó en julio del 2018 la adhesión a la Ley Nacional N° 27.424: “Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública” (2017). Por lo tanto, pequeños productores de energía renovable tendrán la posibilidad de inyectar la electricidad excedente a la red de distribución y así obtener un reintegro en la facturación final.

La nueva ley de energías renovables y el incremento en los costos de la energía marcan una tendencia importante para la ejecución de proyectos en relación a la generación de energías renovables.

La ley 26.190 estipula una serie de medidas para incentivar proyectos que desarrollen el uso de fuentes renovables de energía, entre ellos, beneficios fiscales y acceso a créditos tanto del sector público como privado, brindando garantías que faciliten la inversión y el crecimiento de este sector. La ley obliga a usuarios que tengan demandas de potencia de 300 KW o más a abastecer sus consumos eléctricos con fuentes de energía renovable (1% a partir de la entrada en vigencia de la ley, incrementándolo en 1% cada 6 meses hasta alcanzar el 8%).

## 1.5. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo de tesis fue realizada una revisión bibliográfica sobre estado del arte en ensayos para medición del potencial bioquímico para producción de metano y generación de energía a partir de orujo de uva. Se estudiaron residuos sólidos generados en bodegas, características del orujo y posibles destinos, necesidades energéticas en bodegas y destilerías. También se revisaron métodos de valoración energética de orujo, ensayos PBM y su metodología, parámetros fundamentales en ensayos PBM, normas y estándares, valores de PBM en orujo de uva y residuos agroindustriales.

Se consultaron las bases de datos de la dirección de estadísticas del INV que es el área que releva anualmente todos los ingresos de uva a bodegas.

Se recolectaron muestras de orujo de una destilería local para realizar determinaciones analíticas y a partir de estos residuos fueron realizados ensayos PBM, en escala de laboratorio, en condiciones mesofílicas. Durante estos ensayos se midió el volumen de biogás obtenido y su composición mediante cromatografías gaseosas.

Estos resultados fueron contrastados con los resultados de la bibliografía consultada. Se calculó el potencial energético del biogás obtenido a partir de los volúmenes de orujo generados anualmente en la provincia. Finalmente se expresaron los resultados en términos de energía, para lograr comparaciones y calcular el potencial en relación al consumo de bodegas. Se analizaron los resultados y se elaborarán conclusiones en relación a los valores obtenidos.

Como herramienta para el cálculo y análisis de datos será utilizado Microsoft Excel. Esta herramienta permitió la carga de datos relevados en los ensayos, su posterior análisis y cálculo de producción de gas y posteriormente calculo energético como también el cálculo en relación a la actividad en bodegas y generación de orujo. Esto proporcionó una fácil visualización de la información y su posterior análisis mediante gráficos, tablas y tablas dinámicas.

Los capítulos de esta tesis se desarrollaron mediante Microsoft Word, permitiendo la correcta escritura y edición del trabajo, la carga de índices, tablas y referencias que facilitaron y ordenaron el proceso de escritura de este trabajo.

## 1.6. Delimitación del alcance.

Fue estudiado el orujo fresco generado en bodegas mediante la cuantificación de la uva ingresada a bodegas, tanto como la cantidad de orujo fresco y agotado que es obtenida. Se seleccionó como unidad de análisis el orujo agotado generado por una destilería mendocina para la realización de ensayos ya que éste, es el residuo final de toda la cadena de producción. Por lo tanto, mediante este trabajo de

tesis se verán beneficiadas bodegas y destilerías locales que estén interesadas en la generación de energía renovable a partir de sus residuos.

### 1.7. Esquema general de la tesis.

Este trabajo de Tesis se encuentra dividido en 5 capítulos:

#### **Capítulo I: Introducción y Marco Teórico**

Introducción. Marco Teórico. DA. Generación de energía eléctrica mediante biogás. Valoración energética de residuos de agroindustria. Residuos sólidos en Bodegas. Orujo de uva. Necesidades energéticas en bodegas. Motivación. Problema de investigación y objetivo. Justificación de la investigación. Metodología. Delimitaciones de los alcances. Esquema general de la tesis.

#### **Capítulo II: Estado del Arte en ensayos para medición del potencial bioquímico para producción de metano.**

Potencial Bioquímico de Metano (PBM) y normas estándares. Parámetros fundamentales en ensayos de PBM. Sustratos. Inóculo. Condiciones físicas de Operación. Condiciones químicas de operación. Condiciones experimentales. PBM de sustratos para la DA. Valores de PBM en residuos agroindustriales. Crítica a los Métodos de ensayo.

#### **Capítulo III: Metodología para estudio de potencial energético de orujo en la provincia Mendoza mediante degradación anaerobia.**

Introducción. Presentación de la metodología. Cuantificación de orujo de bodegas de Mendoza. Valoración energética de orujo. Ensayos PBM.

#### **Capítulo IV: Análisis de datos**

Introducción. Resultados de investigación y discusión. Orujo en bodegas de Mendoza. Valoración energética de orujo. Ensayos PBM. Conclusión.

#### **Capítulo V: Conclusiones**

Introducción. Conclusiones acerca de las preguntas de investigación. Conclusiones sobre el problema de investigación e implicaciones para la teoría. Implicaciones para políticas y prácticas. Limitaciones. Implicaciones para investigaciones posteriores.

#### **Bibliografía**

**Anexos:** Desarrollo de cálculos de resultados. Desarrollo de cálculos conclusivos.



## Capítulo II

---

### 2. Estado del arte en ensayos para medición del potencial bioquímico para producción de metano.

Este capítulo presenta los principales asuntos de investigación mediante revisión de literatura pertinente. El marco teórico fue delimitado en capítulo I, el cual fue comprendido por DA, generación de energía eléctrica mediante biogás, valoración energética de residuos agroindustriales, orujo, generación de residuos sólidos en bodegas de Mendoza y sus necesidades energéticas.

Este apartado comprende el estado del arte de la DA en relación a ensayos de laboratorio y pruebas empleadas para determinación del potencial de producción de metano y específicamente sobre ensayos PBM en orujo de uva. Mediante este estudio fue definida la metodología para los ensayos realizados en orujo para este trabajo de tesis.

#### 2.1. Potencial Bioquímico de Metano (PBM) y normas estándares.

La DA se considera una fuente competitiva para la producción de energía renovable en lo que respecta a la eficiencia y el costo. Para evaluar la biodegradabilidad anaerobia de un sustrato orgánico, como las materias primas, se ha utilizado comúnmente una prueba conocida como potencial bioquímico de metano (PBM). (Raposo et al., 2012).

Las pruebas de PBM son ampliamente utilizadas en estudios relacionados con la DA de sólidos orgánicos. Se utilizan principalmente para determinar el posible rendimiento de metano de diferentes sustratos. Estas pruebas también proporcionan información sobre la degradabilidad anaerobia de una materia prima, incluida la tasa de degradación. Además, se puede realizar una primera evaluación aproximada de la presencia de componentes inhibidores. También, las pruebas PBM proporcionan información significativa sobre la DA de sustratos específicos y proporcionan resultados experimentales esenciales para calibrar y validar modelos matemáticos (Drosg et al., 2013).

Las pruebas de PBM son extremadamente útiles para determinar la cantidad de biometano obtenible de diferentes sólidos orgánicos, bajo diferentes condiciones operacionales, así como la biodegradabilidad del sustrato investigado, la tasa específica relativa de biometanización y el efecto sinérgico de múltiples sustratos codigeridos. Por otra parte, las pruebas PBM representan una interesante herramienta para la optimización técnica y económica de las plantas productoras de biogás (Esposito et al., 2012).

Raposo (2012) describe ensayos PBM. Explica que el principio general de todas las pruebas en batch es la incubación de un inóculo que contiene una variedad de microorganismos anaeróbicos en un medio adecuado (agua y minerales) a pH neutro y en rango de temperatura específico (normalmente mesófilo o termófilo). El sustrato se agrega al medio y sirve como fuente de carbono y energía para los microorganismos. Después de la incubación, el grado de degradación del sustrato se evalúa a intervalos de tiempo preestablecidos para determinar su extensión y velocidad de conversión. Se incluyen controles en blanco (con inóculo aislado) para que pueda contabilizarse el gas producido a partir de la materia orgánica contenida en el inóculo. Agrega que teniendo en cuenta que la configuración continua es más laboriosa y lleva más tiempo que las pruebas en batch, estas últimas se han utilizado más ampliamente.

En 1979 Owen publica "Bioensayo para el seguimiento potencial bioquímico de metano y la toxicidad anaerobia". Donde se presentan las bases para la realización de un ensayo para medir la biodegradabilidad "potencial bioquímico de metano" (PBM) y "ensayo de toxicidad anaerobia" (ETA) del material sometido a tratamiento anaeróbico.

Owen afirma que estos bioensayos son relativamente simples, se pueden realizar en la mayoría de los laboratorios de investigación sin la necesidad de equipos sofisticados. Explica que PBM es una medida de la biodegradabilidad del sustrato determinada mediante el control de la producción acumulativa de metano a partir de una muestra que se incuba anaeróbicamente en un medio químicamente definido. El ETA mide el efecto adverso de un compuesto sobre la tasa de la producción total de gas a partir de un sustrato metanogénico. Estas técnicas fueron demostradas demuestran mediante un análisis de PBM y ETA de muestras procesadas de turba.

Plantea que muchos residuos potenciales para la bioconversión son relativamente no biodegradables y algunos pueden contener materiales que son tóxicos para los organismos metanogénicos. Explica que puede ser útil para el estudio de mezclas complejas y también para estudiar potenciales inhibidores, e interacciones entre sustancias. Manifiesta que los ensayos en batch pueden ser muy útiles, pero no simulan lo que ocurre en un reactor continuo.

Para estos ensayos utiliza botellas de 250 ml de suero con tapón, nutrientes, vitaminas y sustancias reductoras. Los ensayos son conducidos a 35°C por 30 días utilizando como inóculo lodo de un reactor anaeróbico en un 20% del volumen total de sustrato.

Chynoweth et al. (1993), utiliza la metodología PBM desarrollada por Owen para evaluar tipos de inóculo a utilizar (rumen vs lodos de digester primario), tasa de alimentación de inóculo/sustrato, análisis de tamaño de partícula, tasa de conversión a metano de biomasa, distintos sustratos para la

conversión en metano. Explica que ambos inóculos demostraron similar solubilización del material particulado. Una tasa de alimentación de inóculo/sustrato de 2:1 proveyó la máxima tasa de conversión. El tamaño de la partícula en un rango de 1 a 8 mm no presentó diferencias en las tasas de producción. Presenta también una extensa base de datos de PBM de diferentes tipos de sustratos (biomasa y residuos). También explica la influencia de varios parámetros en la DA.

Chynoweth define al PBM como un ensayo análogo al DBO. Explica que este test descrito en por Owen et al. (1979) involucra inóculo de amplio espectro, inóculo en exceso, nutrientes en exceso, concentración de sustrato por debajo de niveles inhibitorios, capacidad buffer en exceso, temperatura moderada y condiciones anaerobias estrictas.

Utiliza inóculo de un biodigestor primario activo de aguas residuales domésticas, con concentración de 2g/L en SV. Observa en diferentes biomásas que a menor contenido de humedad menor es la producción de CH<sub>4</sub> en relación a los sólidos volátiles. También observa que no hay diferencias significativas en la cinética o la producción de metano entre biomasa ensilada a fresca. La generación de metano no pudo ser correlacionada a alguna característica en la composición de los sustratos incluida celulosa, hemicelulosa, contenido celular, pared celular total, fibra cruda, fibra detergente ácido, digestibilidad in vitro de materia seca.

Hansen et al. En el año 2004 describe un procedimiento de laboratorio para medir los potenciales de metano de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU). Reactores triplicados con 10 gramos de sólidos volátiles fueron incubados a 55°C con 400 ml de inóculo de una planta de biogás termófila y la producción de metano fue seguida durante un período de 50 días mediante mediciones regulares de metano en un cromatógrafo de gases. El procedimiento implicó tratamientos control “en blanco” así como controles de celulosa. Fueron medidos los potenciales de metano para los desechos orgánicos del hogar y para materiales de desecho individuales. El procedimiento fue evaluado con respecto a la practicidad, la carga de trabajo, el límite de detección, la repetitividad y la reproducibilidad, así como los procedimientos de control de calidad. Destaca que la determinación de los potenciales de metano es un método biológico sujeto a una variación relativamente grande debido al uso de inóculo no estandarizado y heterogeneidad de desechos. Por lo tanto, se sugieren procedimientos para abordar la repetitividad y reproducibilidad.

Angelidaki en el año 2004 publica: “Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia de los macrocontaminantes”. Donde informa una variedad de procedimientos de prueba para determinar la biodegradabilidad anaerobia. El artículo revisa los métodos desarrollados para determinar la biodegradabilidad anaerobia de macrocontaminantes. El enfoque principal se centra en la

mineralización final de los compuestos orgánicos y el potencial de metano de los compuestos. Se discute también la hidrólisis de sustratos complejos. Además, se discuten brevemente los factores importantes para la biodegradación anaerobia.

Desde el año 2002 un grupo específico de tareas de la IWA (International Water Association), liderado por Angelidaki, trabajó sobre biodegradabilidad anaerobia, actividad e inhibición el mismo se denomina TG-ABAI. Trabajaron en la estandarización de ensayos de DA. En el año 2006 publican un informe sobre ensayos anaeróbicos para la determinación de biodegradabilidad, actividad, inhibición y bioestabilidad de matrices (Angelidaki et al., 2006). Este documento presentó algunas pautas y consejos para los investigadores involucrados en tales experimentos para tratar de unificar el uso de unidades y técnicas en futuros estudios.

En 2009 Angelidaki y otros proponen un protocolo para ensayos PBM en batch en un artículo titulado “Definición del potencial de biometano de residuos orgánicos sólidos y cultivos energéticos: un protocolo propuesto para ensayos en batch”. En el mismo afirman que es de particular importancia definir un protocolo para la determinación del potencial de metano final para un sustrato sólido, dado que, este parámetro determina, en cierta medida, tanto el diseño como los detalles económicos de una planta de biogás. Enuncian que, además, la comunidad científica y de ingeniería solicita cada vez más la definición de unidades comunes para su uso en ensayos anaeróbicos. Este documento presentó algunas pautas para los ensayos de potencial de biometano preparados por el TG-ABAI de la IWA.

En 2011 Raposo y otros presentan una revisión sobre la influencia de diferentes parámetros de determinación de PBM. Además, compilan y resumen la extensa literatura previamente publicada sobre ensayos PBM, centrándose en dos temas principales: los rendimientos de metano de los sustratos y, en segundo lugar, la descripción de los diversos procedimientos experimentales utilizados.

En 2012 Esposito et al. publica: “Pruebas de potencial de bio-metano para medir la producción de biogás a partir de la digestión y codigestión de sustratos orgánicos complejos”. Allí describen que las pruebas de PBM brindan información significativa sobre la biometanización de sustratos específicos y proporcionan resultados experimentales esenciales para calibrar y validar los modelos matemáticos.

El Biogas handbook (2013) en su capítulo 3 titulado: “Análisis y caracterización de materias primas para biogás” (Drosg et al., 2013) detalla que la prueba PBM presentada en el mismo se basa principalmente en la norma Alemana DIN 38414 (S8) y está ligeramente simplificada según Braun (1982, 2007). Explica que para que la prueba sea más práctica, se reemplazan los costosos instrumentos de medición de gases eudiométricos por simples botellas de desplazamiento de agua. Además, se coloca

una botella con una solución alcalina después del recipiente del digestor para absorber el dióxido de carbono producido y permitir la medición directa de metano.

Un número de diferentes ensayos descritos como normas ISO se han formulado en los últimos 20 años. Al principio, estos métodos pueden ser divididos en dos grupos principales: uno se ocupa de la definición de biodegradabilidad anaerobia de compuestos químicos o el plástico (ISO 14853 -1999; ASTM D 5511-1994; ASTM 5210 -1992; ASTM E 2170- 2001; ISO 15473-2002, etc.) mientras que otro grupo trata a biodegradabilidad final de los sustratos orgánicos complejos y producción de biogás. (ISO 11734-1995; ISO/DIS 14853-1999; UK Environment Agency 2005, y otras). Las normas previamente mencionadas, difieren en el diseño experimental. Esto genera diferentes resultados y en general, no ofrecen posibilidad de ser comparados

Drosg et al. (2013) señalan las siguientes normativas para ensayos: la EN 11734. "Calidad del agua, evaluación de la degradabilidad anaerobia final de los compuestos orgánicos en el lodo digerido, método por medición de la producción de biogás". La DIN 38414 (S8). "Método estándar alemán para el análisis de agua, aguas residuales y lodos; lodos y sedimentos (grupo S); determinación de la susceptibilidad a la DA (S8)". La VDI 4630 "Fermentación de materiales orgánicos. Caracterización del sustrato, muestreo, recolección de datos de sustrato, pruebas de fermentación". Explican que la VDI 4630 establece normas para la evaluación de la capacidad de fermentación de materia orgánica y los equipos y aparatos necesarios requeridos para la prueba y sus correspondientes configuraciones. También proporcionan definiciones de términos fundamentales. Mencionan que, además, esta directriz proporciona información sobre la caracterización, y por lo tanto en la descripción, de los sustratos. Especifican los requisitos en cuanto a la forma de medir ciertas variables que caracterizan los sustratos, de acuerdo con el estado actual del conocimiento y de la ciencia, para garantizar la comparación. Por otra parte, también proporciona instrucciones sobre cómo debe ser tomada una muestra representativa de los diversos flujos de materiales disponibles.

## 2.2. Parámetros fundamentales en ensayos de PBM.

En el ensayo de PBM influyen diferentes factores que pueden agruparse en cuatro grandes grupos: los relacionados con el sustrato, con el inóculo, con las condiciones operacionales y con las experimentales, los cuales es recomendable reportar en cada ensayo con el fin de verificar la posibilidad de comparación con otros estudios y para, al mismo tiempo, aportar a la unificación de protocolos y procedimientos del ensayo. (Raposo et al., 2011)

### 2.2.1. Sustratos.

Las materias primas para la DA pueden ser obtenidas de diversas fuentes. Los diferentes grupos potenciales de sustratos para la producción de metano fueron considerados por Gunaseelan (2004), donde estudió la fracción orgánica de desechos sólidos municipales, residuos de frutas y verduras, pastos, biomasa forestal, malezas terrestres y acuáticas (marinas y de agua dulce) biomasa.

Doublein y Steinhouser (2008), calculan el potencial teórico para diferentes cultivos por hectárea. También publican rendimientos en metano para diferentes residuos agroindustriales y de cultivos bioenergéticos, también los expresan en kWh/Nm<sup>3</sup>, este valor lo denomina energía específica.

El manual Alemán del Instituto de Energía y Medioambiente (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, 2009), publica valores de rendimiento en biogás, contenidos de metano, materia seca, materia seca orgánica, N, P y NH<sub>4</sub> en porcentaje de materia seca, para la DA de sustratos como distintas variedades de estiércoles, residuos de mataderos, de cocinas, de jardinería, y de residuos agroindustriales.

Al Seadi et al. (2013), en el capítulo 2 del Biogas Handbook, listan diferentes sustratos para la generación de biogás, principalmente residuos (Urbanos y Agroindustriales), aguas residuales, cultivos energéticos y algunos sustratos estimulantes o cosustratos.

En Argentina Groppelli y Giampaolli publican en 2007 valores de PBM para estiércoles, desechos de huerta, residuos de comida, residuos azucarados o amiláceos y sorgo.

La biodegradabilidad anaerobia de la materia orgánica está relacionada con su composición (Amon et al., 2004), (Amon et al., 2006), (Gunaseelan, 2004), (Bird et al., 1990). Es importante conocer la composición del sustrato, por ejemplo, en restos vegetales indicar que parte del sustrato es utilizado. También el contenido en sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO), y compuestos orgánicos (CHONS).

Aunque no se menciona, a menudo, el primer problema en relación a la realización de una prueba del potencial de metano, es en relación a la obtención de una muestra representativa heterogénea compleja. Este problema surge en cada ensayo que involucra este tipo de sustratos. De hecho, suelen darse situaciones complejas en el muestreo de una fracción sólida de algunos gramos para el estudio de varias toneladas de material. No obstante, los métodos de muestreo son eficientes y permiten obtener una muestra representativa (André et al., 2008).

El análisis esencial incluye la determinación de pH, ST / materia seca, SV / materia seca orgánica, DQO, nitrógeno total de Kjeldahl, nitrógeno amoniacal y PBM. En muchos casos, será suficiente determinar SV o DQO para la estimación del contenido energético de una materia prima.

Para evaluar la limitación por macroelementos, se puede determinar la presencia de nitrógeno, azufre y fósforo. En la práctica, la mayoría de las materias primas utilizadas para la producción de biogás proporcionan suficientes macroelementos debido a la baja demanda de microbios anaerobios (en comparación con los microbios aerobios). Sin embargo, puede producirse una falta de microelementos (oligoelementos), especialmente en la monodigestión. El análisis de nitrógeno y azufre proporcionará información sobre la posible inhibición del amoníaco y el sulfuro de hidrógeno. (Drosg et al., 2013)

El tamaño de partícula y el procedimiento de reducción de tamaño pueden influir en los resultados de biodegradación. En general, se acepta que la hidrólisis es el paso limitante de la velocidad en la DA cuando se hace foco en el tamaño de partícula. El área de la superficie y el tamaño de partícula son características importantes para determinar la tasa de degradación inicial. El tamaño de las materias primas debe ser limitado, de lo contrario el digester puede ser obstruido y también sería difícil para los microorganismos llevar a cabo su digestión. En el caso de sustratos con baja biodegradabilidad, normalmente se acepta que una reducción del tamaño de las partículas y la ampliación resultante de la superficie específica disponible pueden mejorar el proceso biológico (Raposo et al., 2012).

Pocas investigaciones han sido realizadas para determinar el efecto del tamaño de partícula de los sustratos sólidos en el rendimiento de metano. (Chynoweth et al., 1993), (Raposo et al., 2012) . La mayoría de los resultados informaron que el rendimiento de metano fue inversamente proporcional al tamaño de partícula, pero también algunos resultados informaron que no hubo un efecto observable en la cinética de la producción de metano. Dado que la relación entre el tamaño de partícula y la biodegradabilidad aún no se ha aclarado, para permitir la comparación de los resultados, el tamaño de partícula debe ser comparable. Owen (1993) sugiere un tamaño de partícula  $\leq 10$  mm. Si el material utilizado es difícil de reducir de tamaño, debe cortarse, romperse o procesarse de otro modo hasta alcanzar el tamaño deseado.

Los carbohidratos de bajo peso molecular, los ácidos grasos volátiles y los alcoholes se digieren en horas; proteínas, hemicelulosa y lípidos en días, mientras que la celulosa necesita varias semanas para descomponerse en condiciones anaerobias. Los sustratos de materia prima que constan de grasas y aceites, conocidos por sus muy altos rendimientos de metano, requieren tiempos de retención más largos y mayores volúmenes de digester en comparación con sustratos ricos en carbohidratos y proteínas. En la práctica, por razones económicas, los digestores son operados con los tiempos de

retención más cortos y los rendimientos de metano más altos posibles (Biosantech et al., 2013), (Al Seadi et al., 2013). Se presentan a continuación parámetros para condiciones anaerobias óptimas.

**Tabla 10: Parámetros óptimos para el proceso anaerobio.**

Parámetros	Condición
Bacterias	Equilibrio dinámico entre no metanogénicas y metanogénicas
Temperatura	Mesofílico = 29 - 38°C, Termofílico = 49 - 57°C
Medio	Anaerobio, oxígeno disuelto = 0
Nutrientes	N, P y trazas de Ca, Mg, Fe, K, Ni Co
DBO/N/P/S = 800/7/1/1	Para residuos con DQO > 2500 mg/L
DBO/N/P/S = 300/7/1/1	Para residuos con DQO < 2500 mg/L
pH	6.6 - 7.6 (preferente > 6.2)
Composición del gas	65 - 70 % de metano
Producción de gas	2 - 1.25 m <sup>3</sup> /Kg SV destruidos
Alcalinidad	1000 - 5000 mg/L
Ácidos volátiles	< 500 mg/L - ácido acético

Fuente: Romero Rojas (2008)

La relación C/N del sustrato debe estar en el rango de 16: 1 a 25: 1. Pero esto es solo una indicación, porque el nitrógeno también puede unirse en las estructuras de lignina. La necesidad de nutrientes es muy baja debido al hecho de que con el proceso anaeróbico no se desarrolla mucha biomasa, por lo que para la formación de metano incluso una proporción de nutrientes C: N: P: S de 500 - 1000: 15 - 20: 5: 3 y / o una relación de materia orgánica de DQO: N: P: S = 800: 5: 1: 0.5 es suficiente. Los sustratos con una relación C/N demasiado baja conducen a una mayor producción de amoníaco e inhibición de la producción de metano. Una relación C/N demasiado alta significa falta de nitrógeno, de la que resultan consecuencias negativas para la formación de proteínas y, por lo tanto, el metabolismo energético y material estructural de los microorganismos. Una composición equilibrada es absolutamente necesaria; p.ej. la mezcla de paja de arroz y desechos de letrinas, como es habitual en China, de la cofermentación de excremento de elefante con desechos humanos como se hizo en Nepal (Deublein y Steinhäuser, 2008).

Algunos compuestos en los sustratos pueden tener un efecto negativo sobre la microbiología dentro del digestor, causando desequilibrio o cese completo de la actividad microbiológica en el peor de los casos. Estos se denominan inhibidores y su efecto inhibitor depende en gran medida de su concentración en la mezcla de materia prima, pero también en otras condiciones locales dentro del digestor (Steffen et al., 1998). Por ejemplo, una mayor cantidad de ácidos grasos volátiles (AGV) puede causar un desequilibrio del proceso si su concentración dentro del digestor excede la capacidad buffer del proceso de DA, alcanzando los llamados niveles de choque (Steffen et al., 1998). Se pueden

presentar niveles aumentados de AGV como consecuencia de la rápida degradación de grandes cantidades de materia macromolecular orgánica (lípidos, carbohidratos o proteínas). En “digestores sanos”, la adaptación microbiana al aumento de las concentraciones de AGV ocurre con el tiempo. Las altas concentraciones de productos finales, como el amoníaco libre, también pueden tener efectos inhibidores a través de la acumulación dentro del digestor. Las cantidades residuales de antibióticos, desinfectantes, pesticidas y compuestos tóxicos como los metales pesados se pueden suministrar con la materia prima agrícola o desechos orgánicos, pero Steffen et al. (1998) informaron que su efecto inhibitorio tiende a ser menor. Su presencia en el digerido puede, sin embargo, comprometer su susceptibilidad como fertilizante para cultivos (Biosantech et al., 2013).

El amoníaco y el amonio resultan de la DA de los compuestos nitrogenados. El amoníaco forma iones de amonio en el sustrato, esto depende del pH. El amoníaco tiene un efecto inhibitor, y con concentraciones mayores puede incluso ser tóxico, mientras que el amonio es inocuo. Solo puede tener un efecto inhibitor en concentraciones  $\text{NH}_4^+/\text{N} > 1\ 500\ \text{mg}/\text{Mg}$ , donde su efecto inhibitor se debe principalmente a las especies cuya concentración depende del valor de pH. El amonio conduce a la pérdida de potasio de microorganismos metanogénicos y puede mostrar efectos recíprocos con  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Na}^+$ . La inhibición por amonio aumenta con el aumento del valor del pH a concentración constante: por ejemplo, la relación de amonio a amoníaco es 99: 1 a  $\text{pH} = 7$ , y 70: 30 a  $\text{pH} = 9$ . A menudo, incluso pequeñas variaciones de valores de pH son Suficiente para afectar el efecto inhibitor.

El equilibrio entre el amonio y el inhibitor del amoníaco depende de la temperatura: con el aumento de la temperatura, el equilibrio entre el  $\text{NH}_4$  y el  $\text{NH}_3$  se desplaza a favor del  $\text{NH}_3$ , de modo que la inhibición aumenta con el aumento de la temperatura.

En las plantas comunales, las aguas residuales de la planta anaerobia se reciclan al tanque de desnitrificación de la planta de tratamiento de aguas residuales. Debe tenerse en cuenta que la proporción de materia orgánica (como DQO) con respecto al contenido de nitrógeno debe ser de 5 a 6: 1 y, con frecuencia, debe ajustarse agregando agua residual sin tratar a las aguas residuales de la planta anaerobia (Deublein y Steinhauser, 2008).

En tabla 11 se presentan las concentraciones inhibitoras de crecimiento biológico según Romero Rojas (2008).

**Tabla 11: Concentraciones inhibitorias de crecimiento biológico.**

Parámetros	Unidades	Concentración	Valor Hallado
Amoníaco - N	mg/L	1 500	
Cadmio	mg/L	0.02	
Calcio	mg/L	2 500	0.31
Cianuros	mg/L	1	
Cloroformo	mg/L	0.1	
Cobre	mg/L	10	
Cromo hexavalente	mg/L	50	
Cromo trivalente	mg/L	500	
Hidrocarburos	mg/L	50	
Hierro	mg/L	5	0.07
Magnesio	mg/L	1 000	0.06
Mercurio	mg/L	1	
Niquel	mg/L	2	
Potasio	mg/L	2500	0.06
Sodio	mg/L	3 500	0.02
Sulfatos	mg/L	500	0.07
Sulfuros	mg/L	100	
Tetracloruro de C	mg/L	10	
Zinc	mg/L	20	

Fuente: Romero Rojas (2008)

Los reforzadores de metano utilizados con frecuencia son materiales grasos como el aceite de pescado de las industrias de procesamiento de pescado, el aceite de soja y la margarina de la industria alimentaria y varios residuos de alcohol de las industrias cerveceras. Junto con estos, los residuos de la industria azucarera y de bebidas también se utilizan para mejorar los rendimientos de metano de la mezcla de sustrato. Más recientemente, la glicerina de la producción de biodiesel se introdujo como una materia prima de biogás y un refuerzo de metano para el grupo de los denominados productos oleoquímicos. El uso de glicerina como materia prima para biogás es parte del concepto de biorrefinería integrada en la que los subproductos de la producción de biocombustibles (como la glicerina y la torta de prensa de la producción de biodiesel) se procesan mediante DA con la extracción de metano. Las tortas de prensa que quedan después de presionar el jugo o el aceite de uvas, aceitunas, manzanas y otras frutas también son una buena y homogénea materia prima de biogás. Estas tortas de prensa contienen las pieles, pulpa, semillas y tallos de las frutas prensadas. En comparación con otros tipos de materia prima, los desechos industriales utilizados como reforzadores de metano son materiales altamente homogéneos. Se pueden agregar al digestor en pequeñas cantidades precisas y su efecto sobre la microbiología dentro del digestor y sobre el rendimiento de metano es fácilmente predecible. En general cantidades excesivas influyen negativamente en el proceso de DA. (Biosantech et al., 2013)

### 2.2.2. Inóculo

Blok et al., (1985), señalaron que incluso cuando las condiciones experimentales de los procedimientos de ensayos en batch se pueden armonizar, siempre habrá cierta variabilidad en los resultados debido a la naturaleza biológica de los sistemas de prueba. Las características de los microorganismos recolectados para usar como inóculo pueden variar para la misma planta de tratamiento (variaciones diarias o estacionales de la tasa de flujo y la composición del sustrato) y pueden ser diferentes de una planta de tratamiento a otra (condiciones de funcionamiento: tasa de carga orgánica, tiempo de retención, etc.) El inóculo utilizado para los ensayos de PBM debe estar completamente caracterizado.

Aunque está sujeto a limitaciones, la forma más fácil de definir la concentración de inóculo es a partir de la cantidad de sólidos suspendidos volátiles (SSV). Sin embargo, debido a la inexactitud de esta determinación en dichas muestras, para la mayoría de los lodos anaerobios la determinación de Sólidos Volátiles (SV), se utilizan como una medida del contenido de microorganismos. En cualquier caso, la información disponible para estos parámetros analíticos es inadecuada porque no distingue entre la biomasa microbiana y cualquier otro material orgánico particulado presente en el reactor. Esto es especialmente evidente en los abonos, donde el contenido de inóculo SV está representado principalmente por residuos lignocelulósicos recalcitrantes y biomasa microbiana no activa, mientras que en un lodo granular la mayoría de los SV constan de células microbianas (Angelidaki et al., 2009).

La influencia del inóculo en los ensayos en batch depende principalmente de seis factores: origen o fuente, concentración, actividad, preincubación, aclimatación/adaptación y almacenamiento.

La experiencia práctica ha demostrado que el nivel de concentración del inóculo afecta la tasa de biodegradación. Normalmente, cuanto mayor sea la concentración de inóculo, más rápida será la conversión anaerobia del sustrato, y más rápido se completará la prueba. Además, la concentración afecta la duración del período de retraso y la susceptibilidad de la degradación debido a los efectos inhibidores (Birch et al., 1989).

Para las pruebas de biodegradabilidad reforzada para microcontaminantes y el procedimiento inicial de PBM, la cantidad de inóculo utilizada generalmente se expresa como un porcentaje del volumen (10-80%). Utilizando este sistema unitario, el contenido inicial de biomasa es proporcional al contenido de SV del inóculo, cuyo valor puede variar en abonos y lodos granulares de 2-3% a 10% de SV, respectivamente (Angelidaki et al., 2009). Por lo tanto, este criterio debe evitarse debido a su ambigüedad. A menudo es más significativo expresar la concentración de inóculo en un ensayo en batch en términos de SV. Para estudiar la biodegradabilidad anaerobia de microcontaminantes, se sugirió una

baja concentración de inóculo (1 a 3 g ST/l) porque el inóculo también contribuye a la formación de gas, lo que puede difuminar los resultados si es relativamente alto en comparación con el compuesto probado (Battersby y Wilson, 1988).

Por otro lado, en el caso de sustratos orgánicos sólidos complejos, una pequeña cantidad de inóculo puede conducir a una sobrecarga en el proceso con la acidificación y la inhibición de la producción de metano (Irimi Angelidaki y Sanders, 2004). La guía VDI 4630 sugiere usar un rango de entre 15 y 20 g SV/l de lodos de siembra.

Tradicionalmente, la actividad se ha limitado a evaluar la actividad metanogénica específica, pero para una mejor identificación de la calidad del inóculo utilizado, debe determinarse la actividad de los diferentes grupos de microorganismos implicados en el proceso anaeróbico. (Angelidaki, et al, 2009).

El uso de diferentes sustratos de control positivo se puede utilizar para medir la actividad y también para verificar si los ensayos de biodegradación anaerobia tienen un buen rendimiento, con fines de control de calidad. Estos sustratos de referencia no deben fermentar demasiado rápido y deben ser completamente biodegradables.

En lo que respecta a la biodegradabilidad, los valores experimentales deberían ser cercanos a los teóricos, ya que, como se informó anteriormente, solo un porcentaje limitado de sustrato no se convierte en biogás y se utiliza para el crecimiento y mantenimiento celular. Se observa que, en ocasiones, una biodegradación parcial cuando se han probado sustratos de control positivos. Esto podría deberse a un equipo experimental defectuoso o a un lodo inactivo. Si se demuestra que el equipo experimental no es defectuoso, el curso de acción más seguro es repetir el ensayo con lodo nuevo (Hansen et al., 2004). La celulosa es el sustrato más utilizado para medir el nivel adecuado de rendimiento potencial. Sin embargo, el número de trabajos de investigación PBM donde se ha utilizado este sustrato es muy bajo en comparación con la gran cantidad de artículos sobre ensayos PBM.

Esta práctica reduce el volumen de gas en los tratamientos testigo, se postula como una mejora para la precisión de los ensayos. También se utiliza inóculo "desgaseado". La preincubación no trae aparejados efectos significantes en la estimación de la producción de gas y también se recomienda para ensayos con baja carga de sustrato. (Birch et al., 1989), (Battersby y Wilson, 1988).

### 2.2.3. Condiciones físicas de Operación

A continuación, se detallan las variables físicas controladas en un ensayo PBM: volumen, temperatura, agitación y tiempo de incubación del ensayo.

El volumen total del reactor utilizado para las pruebas en batch está inversamente relacionado con el número de muestras replicadas que podrían analizarse al mismo tiempo utilizando una cantidad prefijada de lodo y sustrato (Raposo et al., 2012).

La naturaleza del sustrato también puede influir en la selección del volumen ideal, ya que cuanto más homogéneo sea el material, menor será el volumen de reactor requerido para determinar el potencial de metano con mayor precisión. Los resultados de la revisión de Raposo et al. (2012) mostraron que se utilizó una amplia gama de volúmenes totales diferentes para ensayos de biodegradabilidad anaerobia en batch, que van de 0.1 a 120 L. Sin embargo, los volúmenes más comunes y útiles utilizados para los ensayos de PBM son inferiores a 1 L.

Aunque la biodegradación anaerobia puede tener lugar dentro de un amplio rango de temperaturas, los procesos de DA dependen fuertemente de la temperatura. Dependiendo de la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso, se pueden diferenciar tres rangos de temperatura: termófilo (45-60 °C), mesófilo (20-45 °C) y psicrófilo (<20 °C) (Raposo et al., 2011). El principal problema a baja temperatura es la disminución en la actividad de consorcios microbianos. La mayoría de los datos en la literatura se refiere a experimentos realizados a temperatura mesófila, con solo algunos a temperatura termófila. La razón podría ser que el proceso de DA es lo suficientemente eficiente a 35 °C y hay poco que ganar al aumentar la temperatura operativa cuando se trata de un aumento de los costos (Safley y Westerman, 1992).

La agitación de los digestores puede llevarse a cabo de varias maneras: agitación manual, agitadores magnéticos, agitador orbital, etc. Los principales factores que afectan el método de mezcla son la intensidad y la duración. El efecto de mezclar en el rendimiento general de la DA es contradictorio. La mezcla continua del contenido del biorreactor favorece el contacto entre el sustrato y los microorganismos, así como la liberación de biogás en el espacio de cabeza, pero también puede dañar la estructura de los flóculos o gránulos, empeorando así la estrecha interacción entre las diferentes poblaciones microbianas dentro del aglomerado. (Rozzi y Remigi, 2004)

Por otro lado, nunca se ha informado de la influencia de la mezcla en los ensayos de biodegradabilidad anaerobia de sustratos orgánicos en detalle, aunque un dispositivo opcional para mezclar los reactores completamente puede ser útil en la mayoría de los casos. (Raposo et al., 2012)

El tiempo de ejecución de un ensayo en batch se puede relacionar con la cinética del proceso. El principal inconveniente de las pruebas de PBM es que consume mucho tiempo. (Lesteur et al., 2010)

Se informa un amplio rango de tiempo de incubación en la literatura. Owen et al. (1979) aconsejan el uso de un tiempo de incubación de 30 días, que permite la degradación completa de los sustratos orgánicos en la mayoría de los casos. Hansen et al. (2004) aumentaron el tiempo de incubación a 50 días para garantizar la máxima degradación de la materia orgánica que tiene una menor tasa de biodegradabilidad anaerobia, aunque informaron que típicamente el 80-90% del potencial de metano puede producirse durante los primeros 8-10 días.

#### 2.2.4. Condiciones químicas de operación.

Se detallan las variables químicas controladas como: espacio en cabecera del reactor para acumulación de biogás, ajuste de pH y alcalinidad, medio mineral, concentración y relación inóculo sustrato.

Se han reportado diferentes gases en la literatura para barrer el espacio superior del reactor:  $N_2$ , una mezcla de  $N_2$  y  $CO_2$ , He y aire. La mezcla de  $N_2$  y  $CO_2$  ha sido reportada como el gas más comúnmente usado dentro del espacio en cabecera. Se pueden encontrar diferentes relaciones de ambos componentes (70-80% de  $N_2$  y 20-30% de  $CO_2$ ). El contenido de  $CO_2$  está relacionado con el poder de amortiguación del sistema. No se han llevado a cabo investigaciones exhaustivas para estudiar la influencia del  $CO_2$  en la biodegradación anaerobia en modo batch, pero los resultados experimentales con solo  $N_2$  fueron similares cuando se seleccionaron diferentes sustratos (Raposo et al., 2011)

Más digno de comentario es el uso de aire como gas dentro del espacio de cabeza. La oxigenación de la muestra por exposición al aire o burbujeo con oxígeno reduce la producción de biogás o metano en proporción al grado de oxigenación. Sin embargo, sorprendentemente los resultados no fueron diferentes cuando el aire se usó como gas de espacio de cabeza (Raposo et al., 2011).

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del contenido líquido del reactor. La mayoría de los microorganismos metanogénicos tienen un pH óptimo de entre 7 y 8, mientras que las bacterias que forman ácido a menudo tienen un pH óptimo inferior (Angelidaki, y otros, 2009). Si el pH del residuo a analizar se encuentra fuera del rango óptimo, y si no hay suficiente capacidad buffer, se inhibirá el proceso anaeróbico. Por lo tanto, para evitar subestimar el potencial de metano, la mayoría de los ensayos en batch se llevan a cabo a valores de pH que van de 7.0 a 7.8. Si es necesario ajustar el pH, se puede usar una solución diluida básica como NaOH, o una solución ácida como HCl.

La alcalinidad, que es la capacidad de neutralizar ácidos y que proporciona resistencia a los cambios rápidos y significativos en el pH, se conoce como "capacidad buffer". Es el resultado de la presencia de varios compuestos (principalmente bicarbonato, carbonato e hidróxidos). Un valor de 2500 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  se considera normal para los lodos de aguas residuales. Un rango más deseable de 2.500-5.000 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  proporciona una mayor capacidad de amortiguación, por lo que puede adaptarse un aumento mucho mayor de AGV con una caída mínima del pH. El procedimiento de prueba inicial de PBM sugirió usar una alcalinidad de 2500 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ . Más tarde, la mayoría de los procedimientos informados para las pruebas de biodegradación de microcontaminantes utilizaron las especies de fosfato/bifosfato como la única fuente de alcalinidad. (Raposo et al., 2012)

Está bien documentado que todos los procesos mediados por microbios requieren nutrientes y oligoelementos (metales y vitaminas) durante la biodegradación orgánica. De hecho, ocho nutrientes inorgánicos: nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, magnesio, sodio, calcio y hierro se informaron como macronutrientes necesarios en medios sintéticos. (Angelidaki y Sanders, 2004). Además, algunos metales (cromo, cobalto, cobre, manganeso, molibdeno, níquel, selenio, vanadio y zinc), conocidos como oligoelementos, se consideran micronutrientes, la mayoría de los cuales son necesarios como parte del sitio activo de las enzimas. Los metales traza deben dosificarse cuando se agregan a los reactores para mantener el metabolismo y el crecimiento microbiano. La dosis añadida debe equilibrar los requisitos para mantener una actividad alta, teniendo en cuenta que, por encima de esta concentración, los metales traza se vuelven inhibidores o tóxicos. (Demirel y Scherer, 2011).

Uno de los parámetros más importantes para un diseño de ensayo en batch es la carga del sustrato sólido introducido en el digester. Si la carga es demasiado baja, aunque limita la posibilidad de efectos inhibitorios, los microorganismos exhibirán una baja actividad metabólica y se producirán cantidades muy bajas de gas. Si la carga es demasiado alta, la medición de biogás puede ser más confiable, pero una situación de sobrecarga en la que los ácidos grasos volátiles intermedios (AGV) pueden acumularse, lo que resulta en la inhibición de la producción de gas. (Raposo et al., 2012)

Hansen et al. (2004), describieron un procedimiento de laboratorio para la determinación de PBM usando 2% de ST a más de 100 muestras de desechos sólidos. Por otro lado, la guía VDI 4 630 especifica que el contenido de sólidos no debería exceder el 10% si se desea garantizar una transferencia de masa adecuada (VDI 4630, 2006).

Teóricamente, el rendimiento de metano debe ser independiente del RIS y solo afectará la cinética del proceso. Sin embargo, los datos experimentales demostraron que el RIS puede influir tanto en la extensión como en la velocidad del proceso de biodegradación anaerobia. Desafortunadamente,

muchos trabajos de investigación no incluyen el RIS utilizado en el diseño experimental. A veces es posible calcular el RIS con la información proporcionada, pero no cuando se omiten los datos de contenido de SV del sustrato y/o de inóculo. Owen et al.(1979) no dieron detalles del RIS en su procedimiento, simplemente recomendaron un volumen de inóculo del 20% y una concentración de sustrato inferior a 2 g de DQO /l . Al hacer cálculos, se puede considerar que el RIS del procedimiento PBM inicial es aproximadamente 1 (en base a SV). El primer informe sobre la influencia del RIS fue publicado por Hashimoto (1989). Mostró que el rendimiento de metano se redujo drásticamente a un RIS por debajo de 0,25 (en base a SV) usando paja de trigo como sustrato. También se encontró que la tasa de producción de metano aumentaba a medida que el RIS subía gradualmente a 2, después de lo cual permanecía relativamente constante.

Más tarde, Chynoweth et al. (1993) determinaron el efecto de RIS sobre la biodegradación de la celulosa. Los valores de extensión fueron similares, pero la tasa de producción de metano fue ligeramente mayor para el RIS más alto. Además, el desequilibrio se explicó por la presencia de concentraciones más altas de AGV en los ensayos con el RIS más bajo. En consecuencia, modificaron el RIS de la prueba en batch a 2 (en base a SV).

Finalmente, teniendo en cuenta la cantidad potencial de AGV producido y el posible amonio generado, si la materia proteínica está presente, cada sustrato probablemente tenga el mejor RIS para realizar el ensayo. Sin embargo, para la armonización de los ensayos de biodegradación anaerobia es necesario trabajar a un alto valor de RIS.

Teniendo en cuenta que un  $RIS \geq 2$  nunca se ha informado como inhibidor, podría utilizarse como índice obligatorio para futuras pruebas estandarizadas, como lo sugiere la guía VDI 4630.

#### 2.2.5. Condiciones experimentales

Las condiciones experimentales más trabajadas y detalladas en ensayos PBM por diferentes autores son los sistemas de medición de gas, detallando métodos volumétricos, manométricos y por cromatografía.

Los métodos gasométricos son los más utilizados para determinar la biodegradabilidad anaerobia. En dichos métodos, la producción de biogás o de metano puede cuantificarse manométricamente manteniendo constante el volumen y midiendo el aumento de la presión, o volumétricamente proporcionando condiciones de presión constante que permiten la medición del volumen de gas. Las técnicas para medir la tasa y el volumen de gas producido a partir de ensayos de biodegradabilidad anaerobia incluyen diferentes sistemas tales como jeringas lubricadas, dispositivos de desplazamiento de volumen, manómetros o transductores de presión, jeringas asistidas por manómetro o medidores de

flujo de baja presión. Además, algunos medidores de flujo de gas automáticos pueden considerarse sistemas mixtos volumétricos-manométricos. (Raposo et al., 2012)

La primera descripción de un sistema de medición volumétrica para la producción de biogás consistió en el desplazamiento del pistón de una jeringa de vidrio con su aguja insertada en el reactor (Owen et al., 1979). Alternativamente, se propusieron sistemas de desplazamiento de líquidos. En estos casos, el biogás producido dentro del reactor fue contenido en un recipiente externo adecuado con una solución de barrera y desplazó un volumen equivalente de líquido.

Es importante mencionar que se debe tomar precaución con la solución de barrera utilizada para evitar la pérdida de ciertos componentes de biogás. Para la mejora de este sistema de medición, es mejor usar una solución alcalina para lavar el biogás, lo que significa que la única fracción de metano se puede medir directamente (Rozzi y Remigi, 2004).

En un respirómetro manométrico, el biogás producido está confinado dentro del biorreactor y, por lo tanto, genera una sobrepresión proporcional. Un primer método manométrico fue el respirómetro Warburg. Más tarde, el método fue mejorado al introducir el uso de un transductor de presión para medir la producción de gas. (Raposo et al., 2012)

Para este método, se necesitan análisis complementarios de biogás para calcular la producción de metano. La principal dificultad para cuantificar con precisión la producción global de gas proviene de la solubilidad del dióxido de carbono en el licor de digestión, ya que se ve afectada por la presión, el pH, la relación entre espacio en cabecera y volumen líquido, temperatura y el complejo equilibrio termodinámico establecido entre el dióxido de carbono y el carbonatos- bicarbonatos de calcio y magnesio (Birch et al., 1989).

Dolfing y Bloemen (1985) determinaron la actividad metanogénica específica de un lodo basado en el análisis de cromatografía gaseosa del espacio de cabeza en ensayos anaeróbicos en batch. Se tomaron muestras con una jeringa de bloqueo de presión, que permite la cuantificación independiente de la presión que prevalece en el reactor. El volumen de metano puede estimarse basándose en la fracción molar de este gas en el espacio de cabeza. Hansen et al. (2004) muestrearon solo 10 ml de gas de espacio de cabeza durante la prueba de PBM completa (0,2 ml cada vez), lo que representa menos del 0.7% del volumen del espacio de cabeza, y los resultados no se vieron significativamente afectados por el cambio de la presión del espacio de cabeza.

### 2.3. PBM de sustratos para la DA.

Una caracterización de residuos permite conocer la cantidad de residuos que potencialmente pueden generar biogás y a partir de esto poder estimar teóricamente el volumen a generar. Aunque es posible estimar el PBM basado en la literatura disponible, las evaluaciones más precisas se obtienen cuando se analiza PBM a partir de muestras frescas de residuos. Esto se debe a que una serie de factores (por ejemplo, el tipo de alimento utilizado para el ganado, el uso de antibióticos, la calidad del agua) determinan la calidad y cantidad de los desechos susceptibles a utilizar y, por lo tanto, su potencial para la generación de metano (Drosg et al., 2013).

Utilizando datos básicos como el contenido de agua y el contenido de materia inorgánica o, material voluminoso-fibroso, se puede realizar una estimación aproximada de la factibilidad de un material específico como materia prima para la producción de biogás. Las materias primas con un contenido de agua considerable y una baja cantidad de materia inorgánica o materiales fibrosos o voluminosos son ideales para la DA. Por el contrario, si aumenta la cantidad de materia inorgánica o material y el contenido de agua es bastante bajo, generalmente se prefiere el compostaje aeróbico. Si la materia inorgánica o el material voluminoso o fibroso es incluso mayor, es preferible la combustión (para la recuperación de energía) o la disposición final (para residuos inorgánicos). Además, para las materias primas con un contenido de agua muy alto, generalmente se aplica el tratamiento aeróbico de aguas residuales (Drosg et al., 2013).

Como se describió anteriormente en el apartado referido a sustratos, diferentes autores que serán detallados a continuación, publicaron el PBM para una gran variedad de sustratos.

Según Drosg et al. (2013) los datos de proceso de una posible materia prima deben estar disponibles si la DA debe integrarse en un proceso existente, como el tratamiento de aguas residuales de alta resistencia o si se va a digerir un subproducto industrial. Estos datos pueden incluir cantidad, contenido de agua, composición y temperatura. Sin embargo, la información disponible puede ser muy limitada en muchos casos dado que las materias primas disponibles a menudo tienen poco valor (por ejemplo, productos de desecho).

En general, una planta de biogás funciona durante todo el año. Si las materias primas solo están disponibles estacionalmente, deben poder almacenarse. Algunas materias primas, como los cultivos, pueden ensilarse para su almacenamiento. Sin embargo, en los procesos que funcionan normalmente en una industria (por ejemplo, las fábricas de remolacha azucarera), la energía también será necesaria durante la temporada. La composición de otras fracciones de residuos (residuos orgánicos municipales, por ejemplo) también puede variar debido a los cambios estacionales. (Drosg et al., 2013)

Drosg et al. (2013) aclara que, en Alemania, antes de usar una determinada sustancia como materia prima en una planta de biogás, es importante evaluar las consecuencias legales del uso de esta materia prima. Explica que hay dos cuestiones legales principales que deben ser enfatizadas en este punto: control de la contaminación y subsidios al biogás. Se refiere a la contaminación, ya que la utilización de materias primas consideradas como material de desecho o aguas residuales está estrictamente regulada debido a las medidas de control de contaminación. En particular, se regula la utilización del subproducto de biogás, el digerido. Se puede suponer que los contaminantes químicos (por ejemplo, metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y dioxinas) si entran en una planta de biogás a través de la materia prima, la mayoría permanece en el digerido. La razón de esto es que solo una cantidad limitada de contaminantes químicos es degradable anaerobiamente. Además, la concentración de contaminantes basada en ST incluso aumentará, ya que los SV se degradan en la planta de biogás. Por lo tanto, para aumentar la calidad del digerido, los materiales de entrada de los digestores de biogás deben estar estrictamente regulados. En muchos países, hay un problema legislativo adicional.

Si las sustancias que legalmente se consideran residuos ingresan a una planta de biogás, todo el digerido debe tratarse de acuerdo a la legislación de residuos. En países como Dinamarca, el digerido producido a partir de mezclas de materias primas que comprenden hasta 25% de desechos orgánicos (a excepción del contenido estomacal e intestinal de los mataderos, que son equivalentes a estiércol animal) se considera estiércol animal y su uso está controlado como estiércol y regulaciones de lodo. Si las cantidades de residuos codigeridos están por encima de este límite, el digerido se considera residuo y su uso (como fertilizante, por ejemplo) se rige por las regulaciones de lodos de aguas residuales (Drosg et al., 2013).

En Argentina se cuenta desde el corriente año con la “norma técnica para la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de DA”. (Secretaría de Ambiente de la Nación, 2019)

### 2.3.1. Valores de PBM en residuos agroindustriales

Históricamente, la DA se ha asociado con el tratamiento de estiércol animal y lodos y con el tratamiento de estabilización de los lodos de depuración de las plantas de aguas residuales. Durante la década de 1970, los desechos orgánicos de la industria y los desechos municipales se introdujeron como materias primas de biogás. Esto se debió a la creciente conciencia ambiental y la demanda de estrategias adecuadas de manejo de desechos y fue posible debido al desarrollo de configuraciones de reactores de alta velocidad y sofisticadas técnicas de control de procesos (Steffen et al., 1998). Cultivos como el maíz, las gramíneas, los cereales, la remolacha, las papas y los girasoles, especialmente dedicados a ser utilizados como materia prima para el biogás, fueron desarrollados en la década de

1990 en países como Alemania y Austria, aunque la idea del potencial de metano es mucho más antigua, ya que Buswell investigó diversos cultivos en la década del 30' (Al Seadi et al., 2013).

Los recursos de biomasa susceptibles de producción de biogás pueden agruparse en categorías según diversos criterios. Según el rango taxonómico de su origen, pueden ser vegetales (plantae) y animales (animalia). Según el sector que los genera, pueden ser agrícolas (estiércol, lodos, subproductos vegetales, residuos y cultivos energéticos), industriales (residuos orgánicos, subproductos y residuos de agroindustrias, industrias alimentarias, industrias de forrajes y cervecerías, orgánicos: aguas residuales y lodos cargados de procesos industriales, subproductos orgánicos de la producción de biocombustibles y biorrefinerías, etc.), municipales (residuos domésticos separados por fuentes, residuos de aguas residuales, residuos sólidos municipales y residuos de alimentos). En estos sectores, los desechos, residuos y subproductos de diferentes cadenas de valor de biomasa son los materiales más sostenibles que se utilizan actualmente como materias primas para la DA. Durante la última década, el potencial de la biomasa acuática como materia prima para el biogás ha recibido una atención cada vez mayor y se ha convertido en el foco de los esfuerzos de investigación en todo el mundo en un intento por desarrollar aplicaciones a gran escala rentables y técnicamente viables para el cultivo, la recolección y la utilización de materias primas de biogás. Si bien su utilización como materia prima de biogás aún se encuentra en la fase de investigación, la biomasa acuática es uno de los tipos de biomasa con mayor potencial para la producción de energía renovable, así como varias aplicaciones industriales y una posible alternativa futura a los cultivos energéticos. (Al Seadi, y otros, 2013)

En un estudio de Dinuccio, (2010), fue utilizado orujo fresco y escobajos de uva como materia prima para la producción de metano a través de DA en modo discontinuo, lo que resultó en 98 y 116 L de  $\text{CH}_4$ /kg de sólidos volátiles (VS), respectivamente. Este fue el más bajo entre las materias primas orgánicas analizadas, debido a la presencia de lignina en la materia prima, que no pudo degradarse en condiciones anaerobias.

En otro estudio realizado por Gunaseelan (2004), se pudo lograr un rendimiento final de metano a partir de orujo de 283 L  $\text{CH}_4$  / kg VS alimentado con un tiempo de retención de 20 días a 35°C en un reactor con agitación continua.

Un estudio más reciente, Martínez et al. (2016), utilizó el orujo agotado para la producción de biogás después de la extracción con polifenol, dio como resultado 113 L  $\text{CH}_4$  / kg VS durante 30 días de operación en batch.

Se presentan a continuación los valores de PBM recopilados para diferentes residuos agroindustriales, fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), algunos cultivos bioenergéticos y orujo de uva. Los valores se expresan en mL de CH<sub>4</sub> por gramo de SV agregado.

**Tabla 12: Revisión de valores de PBM para residuos agroindustriales.**

Nombre	Parte	Prod de CH <sub>4</sub> [mL CH <sub>4</sub> /g SV]	Referencia
<b>Alfalfa</b>		210	Plöchl M, Zacharias H, Herrmann M, Heiermann M, Prochnow A. 2009
<b>Alfalfa</b>	Silaje	226	Plöchl M, Zacharias H, Herrmann M, Heiermann M, Prochnow A. 2009
<b>Manzana</b>	Residuos frescos	317	Buffière P, Loisel D, Bernet N, Delgenes JP. 2006
<b>Banana</b>	Cascara	289	Buffière P, Loisel D, Bernet N, Delgenes JP. 2006
<b>Banana</b>		400	Chanakya HN, Sharma I, Ramachandra TV. 2009
<b>Cebada</b>	Residuos	271	Nzila C, Dewulf J, Spanjers H, Kiriamiti H, van Langenhove H. 2010
<b>Colza</b>	Aceite de semilla	800	Hansen TL, Schmidt JE, Angelidaki I, Marca E, Jansen JLC, Mosbæk H. 2004
<b>Colza</b>		290	Pabón Pereira CP. 2009
<b>Colza</b>	Paja	420	Petersson A, Thomsen MH, Hauggaard-Nielsen H, Thomsen AB. 2007
<b>Colza</b>	Parte aerea	334	Zubr J. 1986
<b>Colza</b>	Paja	240	Lehtomäki A, Viinikainen TA, Rintala JA. 2008
<b>Arroz</b>	Paja	347	Sharma SK, Mishra IM, Sharma MP, Saini JS. 1988
<b>Sorgo</b>	Silaje	260	Chynoweth DP, Turick CE, Owens JM, Jerger DE, Peck MW. 1993
<b>Sorgo</b>	Planta entera	362	Bauer A, Leonhartsberger C, Bösch P, Amon B, Friedl A, Amon T. 2010
<b>Sorgo</b>	Inflorescencia y flores	480	Gunaseelan VN. 2004
<b>Sorgo</b>	Inflorescencia y granos	538	Gunaseelan VN. 2004
<b>Remolacha Azucarera</b>	340	Lehtomäki A, Viinikainen TA, Rintala JA. 2008	
<b>Remolacha Azucarera</b>	Hojas	231	Gunaseelan VN. 2004
<b>Caña de azúcar</b>		230	Chynoweth DP, Turick CE, Owens JM, Jerger DE, Peck MW. 1993
<b>Caña de azúcar</b>	residuos	177	Nzila C, Dewulf J, Spanjers H, Kiriamiti H, van Langenhove H. 2010
<b>Girasol</b>		428	Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, Machmüller A, Hopfner-Sixt K, Bodiroza V. 2007
<b>Girasol</b>	torta sin aceite	107	Raposo F, Borja R, Rincón B, Jiménez AM. 2008
<b>Girasol</b>	silaje	345	Bauer A, Leonhartsberger C, Bösch P, Amon B, Friedl A, Amon T. 2010
<b>Tomate</b>	piel y semillas	218	Dinuccio E, Balsari P, Gioelli F, Menardo S. 2010
<b>Tomate</b>	podridos	211	Gunaseelan VN. 2004
<b>Trigo</b>	paja	227	Sharma SK, Mishra IM, Sharma MP, Saini JS. 1988
<b>Trigo</b>	paja	299	Hashimoto AG. 1989
<b>Trigo</b>	silaje de paja	396	Bauer A, Leonhartsberger C, Bösch P, Amon B, Friedl A, Amon T. 2010
<b>Residuos de Faena de Pollo</b>		550	Salminen E, Rintala J, Lokshina LY, Vavilin VA. 2000
<b>Papa</b>	Piel	267	Gunaseelan VN. 2004
<b>Papa</b>	Residuos	320	Parawira W, Murto M, Zvauya R, Mattiasson B. 2004

Nombre	Parte	Prod de CH <sub>4</sub> [mL CH <sub>4</sub> /g SV]	Referencia
<b>Residuos de cervecería</b>		385	Mahamat AY, Gourdon R, Leger P, Vermande P. 1989
<b>Cartón</b>		227	Jokela JPY, Vavilin VA, Rintala JA. 2005
<b>Zanahoria</b>		310	Pabón Pereira CP. 2009
<b>Zanahoria</b>	Piel	388	Buffière P, Loisel D, Bernet N, Delgenes JP. 2006
<b>Zanahoria</b>	Hojas	241	Gunaseelan VN. 2004
<b>Celulosa</b>		404	Gunaseelan VN. 2009
<b>Residuos de Comida</b>		425	Zhang R, El-Mashad HM, Hartman K, Wang F, Liu G, Choate C. 2007
<b>Residuos de Comida</b>		472	Cho JK, Park SC, Chang HN. 1995
<b>Glucosa</b>		351	Hansen TL, Schmidt JE, Angelidaki I, Marca E, Jansen JLC, Mosbæk H. 2004
<b>Glucosa</b>		335	Tong X, Smith LH, McCarty PL. 1990
<b>Orujo de Uva</b>		113	Martinez, et al. 2016
<b>Escobajo de Uva</b>		116	Dinuccio E, Balsari P, Gioelli F, Menardo S. 2010
<b>Orujo de Uva</b>		98	Dinuccio E, Balsari P, Gioelli F, Menardo S. 2010
<b>Uva Prensada</b>		283	Gunaseelan VN. 2004
<b>Escobajo de Uva</b>		180	Gunaseelan VN. 2004
<b>Pasto</b>		267	Plöchl M, Zacharias H, Herrmann M, Heiermann M, Prochnow A. 2009
<b>Topinambur</b>		360	Lehtomäki A, Viinikainen TA, Rintala JA. 2008
<b>Topinambur</b>	Parte aerea	309	Zubr J. 1986
<b>Topinambur</b>	Silaje de parte aerea	301	Blok J, De Morsier A, Gerike P. 1985
<b>Prensado de limón</b>		473	Gunaseelan VN. 2004
<b>Residuos de Lechuga</b>		294	Buffière P, Loisel D, Bernet N, Delgenes JP. 2006
<b>Maiz</b>		315	Plöchl M, Zacharias H, Herrmann M, Heiermann M, Prochnow A. 2009
<b>Maiz</b>	Silaje	364	Plöchl M, Zacharias H, Herrmann M, Heiermann M, Prochnow A. 2009
<b>Maiz</b>	Residuos	363	Nzila C, Dewulf J, Spanjers H, Kiriamiti H, van Langenhove H. 2010
<b>FORSU</b>		298	Davidsson A, Gruvberger C, Christensen TH, Hansen TL, Jansen JLC. 2007
<b>FORSU</b>		200	Chynoweth DP, Turick CE, Owens JM, Jerger DE, Peck MW. 1993
<b>FORSU</b>		160	Nopharatana A, Pullammanappallil PC, Clarke WP. 2007
<b>FORSU</b>		495	Hansen TL, Schmidt JE, Angelidaki I, Marca E, Jansen JLC, Mosbæk H. 2004
<b>FORSU</b>		353	El-Mashad HM, Zhang R. 2010
<b>FORSU</b>	triturados	450	Hansen TL, Svärd Å, Angelidaki I, Schmidt JE, Jansen J, Christensen TH. 2003
<b>Cebolla</b>	Cáscara	400	Gunaseelan VN. 2004
<b>Naranja</b>	Cáscara	297	Buffière P, Loisel D, Bernet N, Delgenes JP. 2006
<b>Papel</b>		300	Chanakya HN, Sharma I, Ramachandra TV. 2009
<b>Papel y cartón</b>		109	Pommier S, Llamas AM, Lefebvre X. 2010
<b>Desechos de cerdos</b>		230	Hejnfelt A, Angelidaki I. 2009
<b>Álamo</b>		230	Chynoweth DP, Turick CE, Owens JM, Jerger DE, Peck MW. 1993

Fuente: elaboración propia a partir de los autores citados.

## 2.4. Critica a los Métodos de ensayos de PBM

El interés mundial actual en el uso de diferentes sustratos orgánicos para la bioconversión anaerobia está creciendo, pero hay una falta de referencias claras y comparabilidad como resultado de múltiples factores que afectan la determinación de PBM. A lo largo de los años se han reportado varios métodos en batch para determinar el potencial de metano, sin embargo, estos enfoques técnicos varían significativamente de un método informado a otro (Raposo et al., 2011).

Los resultados de PBM compilados en la revisión de Raposo et al. (2012) demuestran falta de uniformidad en los datos informados, probablemente debido a diferentes inóculos y condiciones experimentales utilizadas. Las pruebas de PBM hechas en un laboratorio deben ser consistentes con las hechas en otro lugar. Es deseable que la comparabilidad no sea muy diferente con otros que realizan mediciones similares.

En cuanto a las normas previamente señaladas, difieren en el diseño experimental. Esto genera diferentes resultados, que, en general, no ofrecen posibilidad de ser comparados. Además, todos estos métodos previamente reportados en los documentos oficiales siguen conteniendo algunas inconsistencias o errores importantes. Sin embargo, estos métodos se utilizan de manera diferente y, a menudo, son modificados por los investigadores para definir la biodegradabilidad anaerobia de compuestos orgánicos. Angelidaki et al. (2007) afirman que es necesario un protocolo estándar para unificar y estandarizar los ensayos con el fin de obtener resultados comparables.

André et al. (2017) explican que, en el caso de la determinación del potencial de metano, la falla se relaciona en lo que respecta a la armonización de los protocolos de estos ensayos, que afectan el nivel de producción de metano obtenido. Los valores obtenidos por diferentes procedimientos de laboratorio representan el potencial de metano en la literatura utilizada para dimensionar las unidades, lo que a veces resulta en una sobre o subestimación.

En un ensayo (Strömberg et al., 2014), demostraron que en once laboratorios la reproducibilidad interlaboratorio tenía un coeficiente de variación del 20% y una repetitividad interlaboratorio con un coeficiente de variación de aproximadamente 10% para un sustrato determinado, aunque se usaron diferentes protocolos dependiendo del laboratorio. Para cualquier protocolo dado y sustratos idénticos, la reproducibilidad interlaboratorio mostró un CV de 17% CV y un CV de 5% para la reproducibilidad intralaboratorio. El método utilizado para medir el gas según Angelidaki et al., (2009) resultó en una sobreestimación en un 15% para los métodos manométricos en relación con los métodos volumétricos.

Se investigaron otros factores intrínsecos al protocolo, como el inóculo, mediante la verificación de su actividad mediante las denominadas muestras de control "cálido". El sustrato de la muestra de

control elegido para probar la actividad del inóculo fue acetato de sodio. Este uso no permitió establecer los criterios de evaluación para esta muestra de control caliente, y los valores obtenidos para el potencial de metano variaron de 150 a 400 NL CH<sub>4</sub>/g SV. Por lo tanto, el inóculo debe considerarse un parámetro clave. No puede haber un sustrato único y estandarizado para representar la muestra de control caliente para todos los inóculos utilizados. Hasta la fecha no hay pautas a este respecto. Raposo et al. (2011) también realizó un ensayo interlaboratorio que reveló los mismos problemas que el estudio de Strömberg. Esto indica que todos los parámetros influyen en el valor del potencial de metano obtenido, particularmente el inóculo debido a su origen, su concentración, la duración de almacenamiento, entre otros. (Foster-Carniero T., 2008)

El paso más importante en la caracterización de materia prima es combinar la información de los diferentes análisis con el fin de obtener una imagen general de la idoneidad de una cierta materia prima (o mezcla de materia prima) para una planta de biogás. En total, se deben evaluar los problemas de estabilidad del proceso (inhibición, toxicidad), el valor como fertilizante del digerido y la economía general de un proyecto de biogás. En resumen, el análisis y la caracterización fiables de las materias primas siempre tendrán un papel muy importante en el negocio del biogás. (Biosantech et al., 2013)

Varios autores indicados expresan que la fermentación continua brinda mejor información sobre el rendimiento de una materia prima en biogás en una planta de DA. (Biosantech et al., 2013; Drosig et al., 2013; Owen et al., 1979). Una gran desventaja, sin embargo, es que son bastante caros debido a la gran cantidad de análisis requeridos y la duración del experimento (Biosantech et al., 2013).

Para concluir, se puede afirmar, que fueron detectados como problemas de investigación la falta de uniformidad no solo en ensayos PBM sino también en la expresión de las unidades, por ejemplo, en algunos casos los volúmenes de gas fueron expresados en condiciones normales y en otros no. En algunas experiencias se expresó el volumen de biogás generado y se desconoce el porcentaje de metano. También algunos estudios presentan la generación de gas metano por peso de DQO agregado y en la mayoría de los casos por SV agregado. Otros autores publican el PBM por kg de materia fresca y a veces se desconoce el contenido de SV o de DQO de la materia fresca para poder realizar comparaciones. Otra inconsistencia es la baja carga de sustrato o la baja capacidad de los reactores empleados en los ensayos, lo cual en algunos casos produce desviaciones en los valores de PBM, obteniendo así valores que no reproducen lo que ocurriría en una planta de biogás a gran escala.

## Capítulo III

---

### 3. Metodología para estudio de potencial energético de orujo en la provincia de Mendoza mediante degradación anaerobia.

El capítulo II desarrolló el estado del arte en ensayos para medición del potencial bioquímico para producción de metano (metodología PBM) a través del tiempo, mediante su revisión y estudio de parámetros fundamentales según diferentes autores. Se observó un alto nivel de heterogeneidad en la metodología y discrepancia en las unidades de expresión, haciendo, en algunos casos, difíciles de comparar los resultados. Para concluir se detallaron los potenciales bioquímicos de metano para diferentes sustratos con énfasis en el orujo de uva y se presentaron valores obtenidos por otros autores en diferentes ensayos.

#### 3.1. Introducción

Mediante este trabajo se estudió el potencial de orujo de uva generado en bodegas de Mendoza para su valorización energética por medio de la degradación anaerobia. Para esto se evaluó la factibilidad de degradación anaerobia de orujo de uva, se estimó la generación de biogás de orujo de uva mediante ensayos de DA y se cuantificó energéticamente el biogás producido a partir de la degradación del residuo estudiado.

Para este trabajo de tesis fue cuantificado el volumen de orujo generado anualmente por la actividad vitivinícola mediante la consulta a bases de datos del departamento de estadísticas del Instituto Nacional de la Vitivinicultura (INV).

Fueron realizados ensayos de PBM, que, a partir de la exhaustiva revisión bibliográfica realizada en el capítulo II, fueron ajustados para la obtención de un protocolo, para su aplicación en los residuos estudiados, para expresar el potencial de metano de los mismos. Se utiliza la metodología PBM, ya que la misma es la más utilizada a nivel mundial para evaluar la biodegradabilidad anaerobia de un sustrato orgánico. Es ampliamente utilizada en estudios relacionados con la DA de sólidos orgánicos y se utiliza principalmente para determinar el posible rendimiento de metano de diferentes sustratos.

### 3.2. Presentación de la metodología.

En esta sección se detalla completamente la metodología presentada en el capítulo I, utilizada para estudiar el potencial bioquímico de metano del orujo de uva y la cuantificación del mismo en términos energéticos para la provincia de Mendoza. Cada paso del método se encuentra detallado bajo los siguientes títulos:

#### 3.2.1. Cuantificación de Orujo de bodegas en Mendoza.

Se estudió la actividad vitivinícola en la provincia, con énfasis en la generación de residuos en bodega. Se estudiaron las localidades que concentran bodegas, las capacidades de las mismas valorando la cantidad de uva ingresada y su destino. Mediante las estadísticas relevadas por el INV y visitas a bodegas, se recopilaron datos sobre uva ingresada a bodegas. Cabe destacar que se tuvo en cuenta tanto uva para elaboración de mosto como para vinificar.

Fueron investigados los principales residuos generados, para esto se consultó a la dirección de estadísticas del INV, sobre los volúmenes anuales de uva procesada en las distintas bodegas de las localidades de la provincia de Mendoza y particularmente sobre los volúmenes de orujo generado. También se estimó el porcentaje de orujo generado en relación a la uva ingresada a la bodega.

Se calculó masa total de orujo generado en bodegas utilizando los valores relevados por el Departamento de Estadística y Estudios de Mercado del INV, donde se detalló, el promedio anual para a serie de los años 2008 a 2018, de la cantidad de uva ingresada a los establecimientos vitivinícolas, por departamento y localidad, en quintales métricos y también se detalló promedio anual en quintales métricos, para a serie de los años 2008 a 2018 de orujo declarados al INV por las bodegas de la provincia, mediante el formulario CEC05. Se distingue entre los valores de orujo, cantidad de orujo que es transportado a destilería de orujo que es declarado para otros usos.

#### 3.2.2. Valoración energética de orujo.

En el capítulo I apartado 1.2.5. fueron descriptos algunos de los posibles tratamientos del orujo de uva para su valorización energética o económica, sus características fisicoquímicas y finalmente se recopiló un análisis comparativo de características energéticas de orujo de uva de diferentes regiones vitivinícolas.

En cuanto a la valorización energética, fueron medidos algunos valores en laboratorio, otros recopilados de bibliografía. Se tuvieron en cuenta valores analíticos obtenidos en orujo fresco y agotado y sus potenciales energéticos en poder calorífico superior e inferior. Fue determinado el poder calorífico

mediante balanza analítica A & D HR 200. Calorímetro manual marca PARR modelo 1341 EE con bomba calorimétrica.

El potencial energético del orujo generado en bodegas se definió mediante dos maneras. Por un lado, el cálculo teórico de las kilocalorías posibles de generar mediante la combustión de todo el biogás calculado a partir de los valores PBM proporcionados por los autores. Para esto se tomó como referencia el valor promedio calculado a partir de los autores estudiados, Gunaseelan (2004), Dinuccio et al (2010) y Martínez et al. (2016) del valor obtenido a través de los ensayos PBM de este trabajo de tesis. Se tuvo en cuenta el poder calorífico inferior del metano de  $7\,854\text{ kcal/m}^3$  (IDAE, 2019) y donde una kilocaloría equivale a  $0.0011\text{ kWh}$ .

Por otro lado, se calcularon las kilocalorías posibles de generar mediante la combustión directa del orujo generado por departamento, tomando como referencia el valor de poder calorífico inferior del orujo fresco de  $2\,715.40\text{ kcal/kg}$ .

Luego estos valores fueron transformados y expresados en kWh, para esto también fue aplicado un coeficiente de 0.25 ya que se considera una eficiencia de conversión del 25% para la generación de energía eléctrica.

### 3.2.3 Ensayos PBM

Los ensayos fueron llevados a cabo en el laboratorio del Centro de Estudios de Ingeniería en Residuos Sólidos (CEIRS) de la Facultad de Ingeniería de la UNCUYO. El experimento fue conducido en condiciones mesofílicas con una temperatura promedio de  $37^\circ\text{C}$ . Para lograr dicha temperatura se utilizó un baño de agua termostatzado.

Dentro del baño fueron dispuestos 6 reactores anaeróbicos cilíndricos de acero inoxidable, de tal manera que el agua fuera capaz de transferir la energía necesaria para que, en el interior de los mismos, la temperatura fuera adecuada para el proceso.

No se utilizó dispositivo de agitación. Los reactores fueron agitados, manualmente, cada vez que se midió presión de gas.

Las mediciones de volumen de gas generado se realizaron indirectamente mediante la lectura de la presión en cada reactor. Luego el biogás fue quemado en un mechero para evaluar presencia de metano y para evitar malos olores. La presión de gas fue registrada periódicamente.

Conforme al avance del ensayo, fueron realizadas extracciones de muestras de biogás para su análisis cromatográfico, a fin de determinar los componentes del mismo en cada tratamiento. Este proceso fue

realizado en tres momentos del ensayo. Para este fin se trasladaron las muestras en jeringas. Se midió en el biogás obtenido el contenido de N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.

Como sustrato se utilizó orujo agotado de uva obtenido de la empresa Derivados Vínicos S.A., una destilería local. Fue utilizado orujo agotado debido a que este es el residuo final luego de la extracción de productos como alcohol remanente, ácido tartárico, y aceite de la semilla o pepita de uva. Como inóculo fue utilizado líquido ruminal vacuno.

Se realizaron determinaciones analíticas previas al ensayo tanto en orujo como en líquido ruminal. Para conocer la carga con la cual se trabajó durante la experiencia, se determinó la cantidad de ST, SV y cenizas presentes en el sustrato y en el inóculo utilizado, y sus respectivas densidades. Se midió la densidad del orujo mediante método picnométrico. La determinación de sólidos totales y volátiles se realizó según métodos normalizados (APHA-AWWA-WPCF 1992). Los tamaños de partícula fueron medidos con reglas graduadas de una muestra representativa.

Se estudió la digestibilidad o velocidad de degradación según los componentes analizados en el orujo agotado según datos bibliográficos en relación a la composición del orujo. La composición de carbohidratos de bajo peso molecular, ácidos grasos volátiles, alcoholes, proteínas, hemicelulosa, lípidos, celulosa, grasas y aceites se detalla en resultados, obtenida a partir de determinaciones analíticas de los autores estudiados fue utilizada para analizar la velocidad de degradación en relación a composición del orujo. A partir de análisis próximos y últimos de los autores presentados en el capítulo I, se calculó la relación carbono nitrógeno.

Se estudiaron, de acuerdo a la composición elemental del orujo, sustancias que podrían inhibir el proceso de DA en grandes concentraciones. Se compararon estos valores con los presentados en el apartado de inhibidores presentado en el capítulo II. No fueron utilizados potenciadores del rendimiento de metano.

Se trabajó en la obtención de un inóculo adecuado para el ensayo. Para este fin se analizaron distintas muestras de líquidos ruminales de vacunos. El líquido ruminal vacuno fue donado por un matadero local, la empresa Vildoza S.A. Fue transportado y almacenado en bidones plásticos. Fue medido el contenido en sólidos totales y volátiles según métodos normalizados (APHA-AWWA-WPCF 1992).

La actividad del inóculo fue evaluada en primera instancia antes del ensayo, para determinar su actividad, mediante una simple prueba anaerobia donde se comprobó la generación de metano. Luego

durante el ensayo, la actividad fue medida con tratamientos controles de inóculo puro. El inóculo fue incubado en bidones a 37°C en baño termostatzado previo al ensayo.

Fueron caracterizados 4 inóculos diferentes, a los cuales se les estudio su alcalinidad parcial, total y acidez volátil. Fue seleccionado el de mejores características.

Las condiciones físicas de operación fueron ajustadas en base a los valores detallados en bibliografía, ensayos previos y a la capacidad del laboratorio. La degradación anaerobia fue realizada en reactores cilíndricos de acero inoxidable AISI 316L de 4 L de capacidad con cierre bridado con junta intermedia de EPDM, con 1 válvula de venteo de tipo esférica.

Si bien los ensayos reportados describen volúmenes inferiores a 1 L, en general, frascos de volumen igual o inferior a 250 mL, en este caso debido a la disponibilidad del equipamiento y a la heterogeneidad y al tamaño de partícula fueron utilizados dichos reactores utilizando 2 L de su capacidad. Este volumen asegura condiciones y valores de PBM más reproducibles a mayor escala.

Para controlar la temperatura durante el ensayo se utilizó un baño termostatzado marca Dalvo, con modificaciones para aumentar su capacidad. El mismo está compuesto por un recipiente de acero inoxidable 304L, 3 resistencias blindadas de inmersión de acero inoxidable de 1 500 W, una válvula flotante, un termostato, aislación envolvente de lana de vidrio y soportes mecánicos conformados de acero inoxidable 304L. La temperatura regulada por el baño termostatzado en el ensayo fue en promedio de 37°C. El baño contuvo agua mantenida a esta temperatura que logró conducir la temperatura en forma homogénea a todos los reactores ubicados en él.

Los reactores no fueron provistos de sistema de agitación. Tampoco fue utilizado ningún dispositivo para este fin. Los reactores fueron agitados con movimientos circulares cada vez que fue medida la presión de gas y en el comienzo del ensayo, luego de su carga y posterior sellado.

El diseño experimental del experimento fue conformado por dos tratamientos, el primero, testigo o blanco de inóculo, denominado serie 1, conformado por 3 repeticiones (1A, 1B y 1C). En este tratamiento los reactores fueron cargados exclusivamente con líquido ruminal para diferenciar biogás producido exclusivamente por el inóculo. El segundo tratamiento corresponde a la serie 2, con sus tres repeticiones (2A, 2B y 2C), denominado orujo, compuesto por tres reactores cargados con orujo e inóculo.

Con el diseño experimental se definió la carga en relación a los valores determinados analíticamente. Los reactores fueron cargados con un volumen total de dos litros.

**Tabla 13: Especificación de carga másica, volumétrica y pH**

Tratamiento	Componente	Masa en reactor [kg]	Volumen en reactor [L]	Volumen total en reactor [L]	Masa total en reactor [kg]	pH en reactor
<b>Inoculo (1A-1B-1C)</b>	Inóculo	1.60	1.60	2	2	6.56
<b>Orujo (2A-2B-2C)</b>	Inoculo	1.60	1.60	2	2.05	6.45
	Orujo	0.45	0.4			

Fuente: elaboración propia.

En esta tabla se observa el tratamiento 1 (inóculo) con sus tres repeticiones, compuesto solamente por inóculo (líquido ruminal). Fue utilizado un volumen de 1.6 L de inóculo en ambos tratamientos y en el caso del tratamiento 1 se agregó agua de red para completar los 2 L para poder tener el mismo espacio en cabecera en todos los tratamientos y repeticiones y facilitar la medición de volumen de gas en los mismos. También fue controlado el valor del pH en ambos casos que oscila en un valor de 6.5.

El tratamiento 2 (orujo) compuesto por un 80% de inóculo y un 20% de orujo. En este caso mediante la adición de 1.6L de inóculo y 0.4L de orujo se obtuvo un volumen de 2L sin el agregado de ningún otro componente. Por lo tanto, se obtuvo una relación Inóculo-Sustrato (RIS) de 4.

El período de incubación fue de 63 días. La definición del período de incubación se basó en la producción de metano del ensayo y fue estimado en un principio en base a experiencias previas. Se buscó un período de incubación extendido para garantizar la mayor degradación de la materia orgánica.

Las condiciones químicas de operación también fueron ajustadas en base a valores detallados en bibliografía, ensayos previos y a la capacidad del laboratorio. Un 50% del volumen total del reactor quedó disponible para acumulación de biogás y el otro 50% para la digestión de la fase semilíquida. Por lo tanto, un volumen de 2 L en cada reactor fue dejado como cámara de gas. El aire no fue removido, dado que, en experiencias previas y publicaciones de ciertos autores como Raposo et al., (2011), donde no se aprecian diferencias utilizando aire como gas de espacio de cabecera de reactor. Fue aplicado aire a presión para revisar las pérdidas de gas, principalmente en bridas, válvulas y tapones, mediante pruebas hidráulicas. El pH no fue ajustado, pero se aseguró que el del inóculo fuera superior a 6 y que estuviera activo, dado que en experiencias previas varios ensayos tendieron a acidificarse por razones como la baja carga de inóculo o por la utilización de inóculos ácidos e inactivos. No fue utilizado ningún medio de cultivo ya que se buscó verificar la posibilidad de degradación anaerobia en las condiciones más simples y directas.

En el tratamiento del orujo se buscó mantener la concentración de sólidos totales en un rango de 10-15% aproximadamente. En el caso del inóculo se utilizó agua de red para completar el volumen a 2 L. Se esquematiza la carga de los reactores en la siguiente imagen:

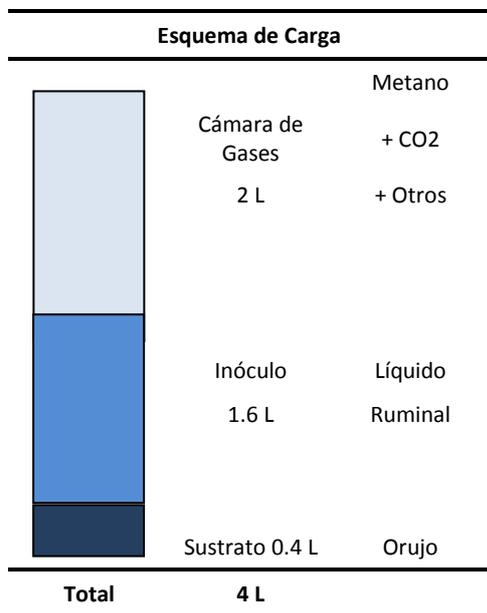


Figura 19: Esquema de carga de reactores.

En relación a las condiciones experimentales, como fue comentado el capítulo II, fue definido el sistema de medición de gases mediante métodos manométricos. También fueron realizadas cromatografías en tres etapas del ensayo para estimar la concentración de los diferentes gases generados.

El volumen de gas fue medido indirectamente registrando la presión diaria en cada reactor. Luego el biogás fue quemado en un mechero para evaluar presencia de metano y para evitar malos olores. Durante los ensayos realizados, fueron constatadas diariamente las presiones, en el manómetro de cada reactor. Cada lectura de presión fue registrada diariamente en una planilla. Se constató cada día la temperatura del agua del baño y se consignó la necesidad o no de venteo del gas contenido en los reactores en función de evitar presiones superiores a 1.5kg. Pero, a la vez reduciendo al máximo las operaciones de venteo debido a que esta es una posible instancia donde podría llegar a ingresar oxígeno al reactor. El gas obtenido fue venteado o quemado en un mechero para evaluar presencia de metano y evitar malos olores. Se debe tener en cuenta que las 2 primeras producciones de metano fueron venteadas, para evitar la combustión de la mezcla biogás/oxígeno que puede resultar explosiva. Las mediciones de presión de gas se realizaron todos los días, durante las 2 primeras semanas luego, se reajustó de acuerdo al nivel de producción de biogás.

Posteriormente se calculó el volumen total acumulado. La acumulación de gas se llevó a cabo en el espacio que quedó libre en cada reactor. Esta cámara tiene un volumen de 2 litros el cual se venteó periódicamente. Luego de cada venteo se alojan otros 2 litros nuevamente, este gas se alojó en condiciones particulares por lo cual el volumen total en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT) es la suma de los volúmenes producidos, en condiciones particulares y expresados en CNPT.

Para el cálculo de volumen de gas a partir de la presión se consideró el gas como un gas ideal y se lo comparó con el gas en condiciones reales. Para ello se determinó el volumen del gas obtenido por la ecuación de estado de los gases ideales y fue verificado con la ecuación de Peng Robinson.

Mediante la ecuación de estado de los gases ideales se calculó el volumen de gas obtenido.

$$PV = nRT$$

**Ecuación 2**

Dónde:

$P$  es la presión medida en cada reactor en  $\text{kg/cm}^2$ .

$V$  es el volumen libre en el reactor que ocupa el gas en litros.

$n$  es la cantidad de moles del gas presente.

$T$  es la temperatura absoluta del gas, en este caso la tempera se mantuvo constante en el baño termostatzado a 309.15 K, o sea, 37°C.

$R$  es la constante universal de los gases, cuyo valor es  $0,082 \frac{\text{atm l}}{\text{K mol}}$

El volumen de gas fue medido indirectamente mediante la presión en cada reactor. Mediante esta medición se calculó la presión acumulada, cantidad de moles de gas, volumen de gas en CNPT.

A continuación, se detalla el cálculo de presión acumulada sin venteo:

$$Pa_n = Pa_{n-1} + (P_n - P_{(n-1)})$$

**Ecuación 3**

$Pa_n$ : Presión acumulada día "n"

$Pa_{n-1}$ : Presión acumulada día "n-1"

$P_n$ : Presión día "n"

$P_{n-1}$ : Presión día "n-1"

Si existió venteo la presión acumulada se calcula:

$$Pa_n = Pa_{n-1} + P_n$$

**Ecuación 4**

De la ecuación de estado se despeja el número de moles de gas de la siguiente manera:

$$n = \frac{\left[ \frac{P \left( \frac{kg}{cm^2} \right)}{1,033 \frac{kg}{cm^2}} + 1 atm \right] \times V}{R \times T}$$

**Ecuación 5**

Donde:

n: número de moles

P: Presión acumulada kg/cm<sup>2</sup>

V: volumen libre en el reactor litros (en este caso varía en cada tratamiento)

R: Constante universal de los gases (0.082 atm\*l/molK)

T: Temperatura promedio de los ensayos (Kelvin)

El volumen de gas (V) en CNPT (condiciones normales de presión y temperatura) 1atm y 273°K

$$V = \frac{n \times R \times T}{P}$$

**Ecuación 6**

A partir de la ecuación 1 se despejó n, el número de moles producidos. Luego este valor se convirtió a litros producidos en CNPT resultando el volumen de gas producido en litros normalizados, a 1atm y 273 K.

Según Cengel y Boles (2004), un gas ideal es un gas teórico compuesto de un conjunto de partículas puntuales con desplazamiento aleatorio que no interactúan entre sí. El concepto de gas ideal es útil porque el mismo se comporta según la ley de los gases ideales, una ecuación de estado simplificada. En este caso, simplifica el cálculo del gas obtenido.

En condiciones normales de presión y temperatura, la mayoría de los gases reales se comporta en forma cualitativa como un gas ideal. Muchos gases tales como el nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, gases nobles, y algunos gases pesados tales como el dióxido de carbono pueden ser tratados como gases ideales dentro de una tolerancia razonable.

Para determinar el error, que se genera al considerar el biogás como gas ideal se utilizó la ecuación de estado versus el modelo de Peng Robinson. Se utilizó una presión de cálculo de 2 atm a los fines de

comparar su comportamiento. Mediante la ecuación de Peng Robinson se iteró con distintos volúmenes, partiendo del volumen obtenido como gas ideal, hasta lograr la presión parcial de cada componente obtenida mediante la ecuación de Dalton:

$$p_i = P * y \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

$p_i$  es la presión parcial del gas.

$P$  es la presión total medida.

$y$  es la fracción molar de cada componente gaseoso.

La ecuación de Peng Robinson, entonces, se expresa como:

$$p_i = \frac{R*T}{(V-b)} - \frac{a}{(V+b)V+b(V-b)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Cuyos parámetros se calculan

$$a = 0.45724 \frac{R^2 * T_c^2 * \alpha^2(T)}{P_c}$$

$$b = 0.0778 \frac{R T_c}{P_c}$$

$$\alpha = 1 + m(1 - \sqrt{T_r})$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

$$T = 310 K$$

**Tabla 14: Constantes de los compuestos**

Componentes	w	Pc	Tc
CH4	0.0114984	46.4068	-82.451
CO2	0.2389400	73.7000	30.950
H2S	0.0810000	90.0779	100.450
N2	0.0399900	33.9437	-146.956
H2	-0.1200900	13.1550	-239.710

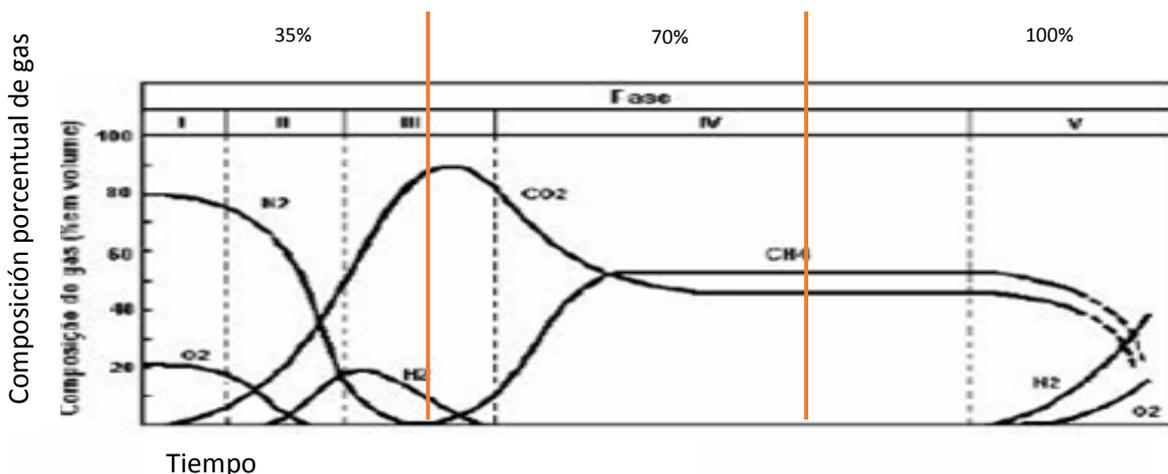
Fuente: elaboración propia en base a valores de Cengel y Boles (2004).

Se realizaron mediciones de todas las repeticiones de ambos tratamientos mediante cromatografía gaseosa. El muestreo se realizó en 3 etapas del ensayo. Para este fin se trasladaron las muestras en

jeringas. Se midió en el biogás obtenido el contenido de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$ . Las determinaciones cromatográficas arrojaron los resultados en % molar.

Los ensayos se realizaron bajo el método UOP 539/87 (UOP 2002) en cromatógrafo (LB417) HP 5890 Serie II. Este cuenta con detector FID y 2 columnas cromatográficas. Columna N°1 – Sebaconitrili ON PAW 80/100 Mesh 1 Molecular Sieve 13x45/60 mesh. Se determinó  $\text{H}_2$  con  $\text{N}_2$  como gas carrier. Columna N°2 – Porapak Q 80/100 Mesh. Se determinaron hidrocarburos con He como carrier. El equipo fue calibrado con un patrón CIL 124351-1. La determinación de  $\text{H}_2\text{S}$  se llevó a cabo con un kit Dräger Röhrchen con límite de detección de 100-2000ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  para 100 ml de muestra.

Como referencia al muestreo de gas en relación al período de incubación se adoptó la curva de generación biogás de (Tchobanoglous et al., 1994), de manera que la toma de muestras de gas se realizó en tres etapas correspondientes a las fases III, IV y V representadas en la figura 4 que se encuentran al 35, 70 y 100% del tiempo estimado para la duración de cada ensayo.



**Figura 20: Curvas de generación de metano (Tchobanoglous et al., 1994)**

La gráfica superior indica en el eje de ordenadas la composición del gas (% en volumen) y en el eje de abscisas se indica el tiempo y los porcentajes de tiempo transcurrido.

A partir de la gráfica anterior, y con tabla de registros, se destaca el incremento exponencial de  $\text{CO}_2$  y el consumo de aire en las primeras 2 fases (inicial y de transición), con lo cual se estima que el gas producido es producto principalmente del  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  en menor proporción. La fase I muestra condiciones aerobias mientras que la fase II refleja el comienzo de las condiciones anaerobias.

El ensayo consistió en un periodo de 63 días debido al calendario de trabajos del laboratorio. Este se dividió en 3 etapas, como se representan en la figura 20, al término de cada una de ellas se determinaron los gases cromatográficamente. Con la cantidad molar de cada uno de los gases

determinados y su correspondiente poder calorífico se calculó el contenido calórico total de cada etapa. La suma de las tres etapas arrojó el contenido calórico total del biogás generado en esas tres etapas, como se presenta en la ecuación 5.

El cálculo energético se realizó conociendo la presión de cada reactor. Aplicando la ecuación 3 se calculó la cantidad de moles de gas producido. Posteriormente conociendo la composición y los calores de combustión correspondientes se determinó el calor de combustión del biogás que contenía cada uno de los reactores.

$$Q_{total} = Q_{et1} + Q_{et2} + Q_{et3} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Q_{et1} = n_{CH_4} * Q_{CH_4 (molar)} + n_{H_2} * Q_{H_2 (molar)} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$Q_{et1} = \frac{P_{ac1} * V}{R * T} * \%molar_{et1 CH_4} * Q_{CH_4 (molar)} * 100 + \frac{P_{ac1} * V}{R * T} * \%molar_{et1 H_2} * Q_{H_2 (molar)} * 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

$P_{ac1}$  = Presión acumulada durante la etapa 1 (en atm)

V = Volumen que ocupa el biogás (2 L)

R = Constante Universal de los gases (0.082 atm L /k mol)

$\%molar_{et1 CH_4}$  = Cantidad molar de Metano registrado cromatográficamente al final de la etapa 1

$Q_{CH_4 (molar)}$  = Calor de combustión del metano (210.8 Kcal/mol)

$\%molar_{et1 H_2}$  = cantidad molar de Hidrógeno registrado cromatograficamente al final de la etapa 1.

$Q_{H_2(molar)}$  = Calor de combustión del hidrógeno (29.15 Kcal/mol)

Para las demás etapas (2 y 3) el cálculo se desarrolló de la misma manera y posteriormente se calculó la energía total generada.

La energía media obtenida fue transformada a kWh y se la relacionó con el volumen producido a para poder realizar comparaciones. Finalmente se calculó la razón de la energía obtenida en kWh por la cantidad de gas generado en cada tratamiento obteniendo kWh/N m<sup>3</sup>, este valor, denominado energía específica, fue comparado con los valores indicados por (Deublein y Steinhäuser, 2008).

También fue calculada la energía generada por kilogramo de orujo agotado, en peso húmedo (MF) y la energía que podría ser generada por cada kg de uva que ingresa a bodega y por litro de vino que se elabora. Para esto fueron tenidos en cuenta los coeficientes adoptados de 9.18 kg de orujo por kg de uva elaborada y de 0.75 L de vino por kg de uva elaborada.

Luego de las 3 fases del experimento los reactores fueron abiertos y extraídos los líquidos residuales de las 2 series ensayadas a fin de determinar sus poderes caloríficos. La determinación fue realizada

mediante el método ASTM D 240 (ASTM, 2009). Los instrumentos utilizados fueron: balanza analítica AyD HR 20 y calorímetro manual marca PARR modelo 1341 EE con su bomba calorimétrica.

Se calcularon las kilocalorías, que potencialmente serían generadas por el efluente si fuera digerido el orujo relevado y se calcula la cantidad de calderas posibles de alimentar con este efluente.

Se toma como referencia una caldera industrial, que puede ser utilizada en invernaderos, secaderos de frutas, avícolas y otras industrias de la región. La caldera seleccionada marca “ecobiotermica” modelo TRMH-1000, la cual tiene una capacidad de 1 000 000 kcal/h y un volumen de 5500 L. (Ecobiotermica, 2013).



# Capítulo IV

---

## 4. Análisis de datos.

El capítulo III presentó todos los procedimientos de investigación incluyendo: estudios de orujo generado en bodegas en Mendoza, valoración energética del orujo y metodología de ensayos PBM, adoptados para medir el rendimiento en biogás y potencial energético del orujo de uva. Finalmente se detalló la metodología para la realización de los cálculos energéticos de biogás generado y biomasa residual.

La metodología desarrollada en el capítulo III fue confeccionada para la realización de los ensayos. También fue adquirido el equipamiento para la realización de este y sucesivos ensayos que ayudaron a perfeccionar la técnica en ensayos PBM e incrementar el conocimiento en DA. A partir de esto se logró estandarizar un sistema que permitió la degradación anaerobia y por ende la realización de ensayos PBM.

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante la investigación realizada a partir de la metodología descripta. Se presentan resultados, de volúmenes de orujo de uva generados en bodegas y de ensayos PBM sobre estos residuos, para evaluar su potencialidad para la generación de biogás y energía.

### 4.1 Introducción

A través de relevamientos y ensayos de DA se obtuvieron como resultado, valores del potencial de orujo de uva generado en bodegas de Mendoza para su valorización energética por medio de la degradación anaerobia. Se obtuvieron valores del aporte energético teórico a partir de producción de biogás con orujo de uva de todas las bodegas, relevadas por el Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV), ubicadas en la provincia de Mendoza. Se constató que es posible la degradación anaerobia de orujo de uva agotado, obtenido de una destilería local. Fue cuantificada, la generación de biogás y la cantidad de energía posible de generar, mediante ensayos de DA del residuo estudiado.

### 4.2 Resultados de investigación y discusión.

Se detallan en esta sección los resultados obtenidos a partir de la metodología planteada para estudiar el potencial bioquímico de metano del orujo de uva y la cuantificación del mismo en términos energéticos para la provincia de Mendoza.

#### 4.2.1. Orujo en bodegas de Mendoza

En la siguiente tabla se detalla el promedio de cantidad de uva en kilogramos ingresada a bodega por departamento entre los años 2008 a 2018. También se presenta la cantidad de orujo destinado a destilería, a otros usos y valor total de orujo generado por departamento en kilogramos.

**Tabla 15: Promedio serie 2008 al 2018 de ingreso de uvas para elaboración en bodegas de la provincia de Mendoza. Promedio de generación de orujo fiscalizada por INV. Datos en kilogramos por departamento.**

Departamento	Promedio anual uva ingresada a bodega (2008-2018)	Promedio anual de total de orujo (2008-2018)	Promedio anual de orujo remitido a destilería (2008-2018)
	[kg]	[kg]	[kg]
SAN MARTIN	457 999 194.05	37 394 462.91	31 308 410.27
MAIPU	208 348 659.20	21 398 832.09	18 103 526.27
RIVADAVIA	203 678 993.41	17 771 502.18	14 654 635.18
JUNIN	158 960 892.29	12 395 648.45	9 514 973.73
LUJAN DE CUYO	155 362 777.04	17 031 004.00	13 973 313.91
LAVALLE	105 910 405.04	8 469 154.27	7 370 781.09
SAN RAFAEL	91 862 402.87	9 703 136.09	5 515 998.00
SANTA ROSA	51 284 066.62	4 009 413.00	3 160 103.91
TUPUNGATO	45 173 855.27	4 638 457.64	4 054 917.91
GUAYMALLEN	41 802 155.45	3 340 117.00	2 807 368.73
GENERAL ALVEAR	41 036 189.74	4 088 372.91	2 285 590.00
TUNUYAN	36 347 092.13	3 850 440.91	3 331 523.00
SAN CARLOS	20 274 407.64	2 043 897.82	1 421 667.00
GODOY CRUZ	12 886 059.51	1 576 082.82	1 472 699.73
LAS HERAS	7 761 690.69	691 813.09	585 925.45
LA PAZ	191 063.58	15 727.27	-
CAPITAL	3 168.28	1 413.64	1 413.64
<b>Total</b>	<b>1 638 883 072.81</b>	<b>148 419 476.09</b>	<b>119 562 847.82</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Departamento de Estadísticas INV, 2019.

Los datos presentados revelan que el Oasis Este de la provincia, es la zona que más elabora. Se remarca fuertemente la capacidad del departamento de San Martín que supera ampliamente a la mayoría de los departamentos. Esto también se ve reflejado en el gráfico presentado a continuación donde se observan los porcentajes del promedio de uva anual elaborada por departamento.

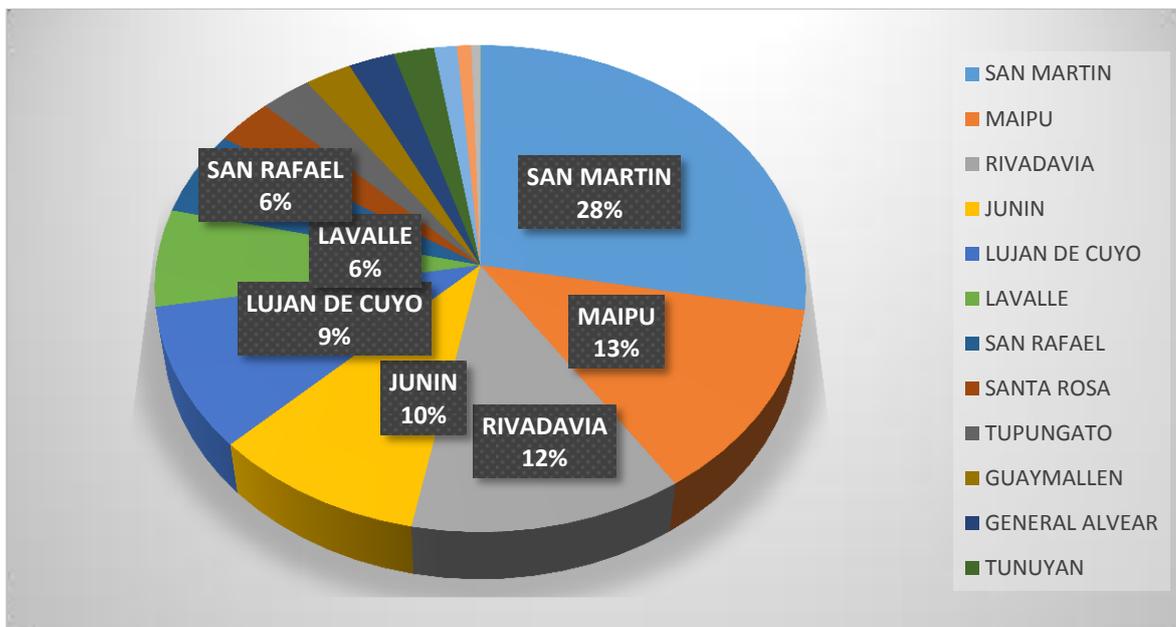


Figura 21: Porcentaje de promedio serie 2008 al 2018 de ingreso de uvas para elaboración en departamentos de la provincia de Mendoza. Fuente: elaboración propia a partir de datos de dirección de estadística del INV (Terrero, 2019)

Tabla 16: Porcentaje de generación anual de orujo total y remitido a destilería en Mendoza por uva ingresada a bodega.

Departamento	orujo fresco/uva ingresada	orujo destilería/uva ingresada
	[%]	[%]
SAN MARTIN	8.16%	6.84%
MAIPU	10.27%	8.69%
RIVADAVIA	8.73%	7.19%
JUNIN	7.80%	5.99%
LUJAN DE CUYO	10.96%	8.99%
LAVALLE	8.00%	6.96%
SAN RAFAEL	10.56%	6.00%
SANTA ROSA	7.82%	6.16%
TUPUNGATO	10.27%	8.98%
GUAYMALLEN	7.99%	6.72%
GENERAL ALVEAR	9.96%	5.57%
TUNUYAN	10.59%	9.17%
SAN CARLOS	10.08%	7.01%
GODOY CRUZ	12.23%	11.43%
LAS HERAS	8.91%	7.55%
LA PAZ	8.23%	0.00%
CAPITAL	44.62%	44.62%
<b>Total</b>	<b>9.41%</b>	<b>7.08%</b>

Fuente: elaboración propia a partir de datos de dirección de estadística del INV (Terrero, 2019)

Se desestimó para el cálculo de este promedio y en los cálculos de este capítulo, el valor anómalo que corresponde a capital, ya que se observa en la serie de 11 años, sólo un año de elaboración con una fuerte generación de residuos, muy superior a los valores promedio.

Estos valores revelan que para el promedio de los años 2008 a 2018 del peso ingresado a bodegas un 9.41 % se convirtió en orujo y el 7.15 % corresponde a orujo remitido a destilería. Estos valores se aproximan a los reportados por los trabajos estudiados. El valor calculado a partir de los datos publicados por la Corporación Chilena del Vino y el Consejo Nacional de Producción Limpia (2011) fue de 9.75 % y de 11.25 % según los valores proporcionados por el Diagnóstico de empresas de la Región del Maule (2010).

#### 4.2.2. Valoración energética de orujo.

En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores analíticos obtenidos en distintos tipos de orujo y sus potenciales energéticos en poder calorífico superior e inferior.

**Tabla 17: Características energéticas de residuos vitivinícolas de Mendoza.**

Residuo	Poder Calorífico Superior (Base Seca) [kcal/kg]	Densidad Aparente [kg/L]	Humedad [%p/p]	Poder Caloríf. Superior (Ajust. a Humedad) [kcal/kg]	Poder Caloríf. Inferior (Ajust. a Humedad) [kcal/kg]
<b>Orujo Fresco (2)</b>	4 529.00	0.64	35.8	2908.00	<b>2715.40</b>
	4 434.00	1.23	70.4	1 312.00	
<b>Orujo Agotado (1) (2) (A)</b>	4 616.00	1.3	66.3	1 556.00	<b>1243.10</b>
	4 956.00	1.07	64.3	1 769.00	
<b>Orujo Agotado (Salida Banda) (1)</b>	4 574.00	1.22	62.8	1 702.00	

Fuente: (1) Derivados Vínicos S.A. – UNCUYO (2010), (2) UNCUYO (2012) (A) Valor de humedad para Orujo agotado con un año de acopio al aire libre en pilas.

Se observa en relación a los valores publicados por Muhlack et al., (2018) y presentados en el capítulo II que los valores expresados como poder calorífico superior para orujo (base seca) presentan valores de 4 800.80 kcal/kg, 4 657.50 kcal/kg, 5 206.84 kcal/kg y 5 087.42 kcal/kg, los cuales son coherentes con los valores obtenidos en estos estudios.

A partir de los valores analíticos obtenidos en poder calorífico inferior (ajustado a humedad) en orujo fresco y orujo agotado de 2 715.40 kcal/kg y 1 243.10 kcal/kg respectivamente, se calcula la cantidad de

energía a obtener en base a orujo fresco y agotado en kilocalorías, como se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 18: Kilocalorías calculadas por departamento generadas a partir de orujo fresco y agotado mediante combustión directa.**

Departamento	Energía Orujo Total (2.715,40 kcal/kg)	Energía Orujo Agotado (1.243,1 kcal/kg)
	[kcal]	[kcal]
SAN MARTIN	101 540 924 583.35	85 014 857 254.56
MAIPU	58 106 388 659.65	49 158 315 240.96
RIVADAVIA	48 256 737 024.51	39 793 196 372.71
JUNIN	33 659 143 813.47	25 836 959 659.04
LUJAN DE CUYO	46 245 988 261.60	37 943 136 588.75
LAVALLE	22 997 141 512.16	20 014 618 974.25
SAN RAFAEL	26 347 895 741.25	14 978 140 969.20
SANTA ROSA	10 887 160 060.20	8 580 946 154.75
TUPUNGATO	12 595 267 865.78	11 010 724 090.35
GUAYMALLEN	9 069 753 701.80	7 623 129 042.04
GENERAL ALVEAR	11 101 567 797.35	6 206 291 086.00
TUNUYAN	10 455 487 244.55	9 046 417 554.20
SAN CARLOS	5 550 000 135.49	3 860 394 571.80
GODOY CRUZ	4 279 695 284.49	3 998 968 839.44
LAS HERAS	1 878 549 267.05	1 591 021 979.27
LA PAZ	42 705 836.36	-
CAPITAL	3 838 588.18	3 838 588.18
<b>Total</b>	<b>403 018 245 377.26</b>	<b>324 660 956 965.49</b>

Fuente: elaboración propia a partir de datos de dirección de estadística del INV (Terrero, 2019)

#### 4.2.3. Ensayos PBM

Fueron caracterizados analíticamente tanto sustrato (orujo agotado), como el inóculo a utilizar, mediante las determinaciones previamente explicadas en capítulo III, se logró cuantificar la densidad y la cantidad de sólidos totales y volátiles en el orujo.

**Tabla 19: Caracterización analítica de sustrato e inóculo**

Componente	Densidad [g/mL]	%ST	%SV	Cenizas %
Inóculo	1.0012	1.43	48.11	51.99
Orujo	1.2206	58.64	91.43	8.57

Fuente: elaboración propia en base a análisis de laboratorio realizados.

Esta información se encuentra ampliada en el anexo, en la sección 6.1 donde se presenta el desarrollo completo del cálculo.

En relación a los valores publicados para orujo fresco, detallados en el capítulo I, podemos analizar que se presentan con un contenido de 26.4 % de ST y 95.4 % de SV. Se observa que el contenido en ST difiere mucho debido al menor contenido en humedad del orujo agotado.

El poder calorífico determinado para este sustrato se presentó en tabla 17 de este capítulo, y la metodología se encuentra detallada en el capítulo 3. Los tamaños de partícula medidos en orujo agotado fueron menores o iguales a 5mm.

Como se expresa en el capítulo I carbohidratos de bajo peso molecular, ácidos grasos volátiles y alcoholes se digieren en horas; proteínas, hemicelulosa y lípidos en días, mientras que la celulosa necesita varias semanas para descomponerse en condiciones anaerobias. Grasas y aceites, conocidos por sus muy altos rendimientos de metano, requieren tiempos de retención más largos.

En relación a los valores presentados en el capítulo I se observó que el hollejo presenta un contenido de proteínas de 0.85 %, un 0.31 % de lípidos y un 12.5 % de hemicelulosa que pueden ser digeridos en días. Posee un 20.8 % de celulosa que, según los autores estudiados, necesita varias semanas para degradarse en condiciones anaerobias, también se observa que no posee lignina. En contraposición las semillas poseen un 43.8 % de lignina que no se degrada en las condiciones establecidas, posee además un 10 % de lípidos, y un 36.8% de holocelulosa (celulosa + hemicelulosa) y 6.87 % de proteínas.

La relación C/N calculada para hollejos fue de 24.22 y de 22.77 para semillas. La C/N definida por Deublein y Steinhauser (2008) para una buena degradabilidad, debe estar en el rango de 16 a 25. Esto es solo una indicación, ya que el nitrógeno también puede unirse en las estructuras de lignina. La necesidad de nutrientes es muy baja debido al hecho de que con el proceso anaeróbico no se desarrolla mucha biomasa, por lo que para la formación de metano incluso una proporción de nutrientes C: N: P: S de 500 - 1000: 15 - 20: 5: 3 y / o una relación de materia orgánica de DQO: N: P: S = 800: 5: 1: 0.5 es suficiente. (Deublein y Steinhauser, 2008)

No fueron encontrados potenciales inhibidores en relación a los principales componentes del orujo presentados en el capítulo II.

**Tabla 20: Especificación de ST y SV por componente y por reactor. Concentración porcentual por reactor y relación g SV/L de inóculo.**

Tratamiento	ST por componente [kg]	ST en reactor [kg]	SV por comp [kg]	SV en reactor [kg]	g SV /L inóculo	kg ST/L	%ST en reactor	%SV en reactor
Inoculo (1A-1B-1C)	0.02	0.02	0.01	0.01	6.73	0.01	1.12	0.67
Orujo (2A-2B-2C)	0.02	0.28	0.01	0.25	156.79	0.14	14.25	12.54
	0.26		0.24					

Fuente: elaboración propia.

Tras 63 días de incubación fueron medidas periódicamente las presiones acumuladas en cada reactor. Las presiones acumuladas por tratamiento se detallan en la tabla siguiente:

**Tabla 21: Presiones Acumuladas en kg/cm<sup>2</sup>.**

Tratamiento	Repetición	Presiones acumuladas
		[ kg/cm <sup>2</sup> ]
1	A	6.00
	B	5.65
	C	6.70
	<b>Media</b>	<b>6.12</b>
2	A	15.25
	B	12.95
	C	14.75
	<b>Media</b>	<b>14.32</b>

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 22 se aprecia la presión total acumulada por cada repetición de tratamiento y el valor promedio por tratamiento. El desarrollo de esta tabla se encuentra sección 6.1 del anexo. Se observa que la media de presión total de biogás, producido por la serie que contiene orujo como sustrato, es 2.33 veces mayor que la de inóculo puro.

Según la temperatura y las presiones registradas en cada venteo y manteniendo el volumen constante en la cámara de gas, se obtuvieron los volúmenes detallados en tabla 23.

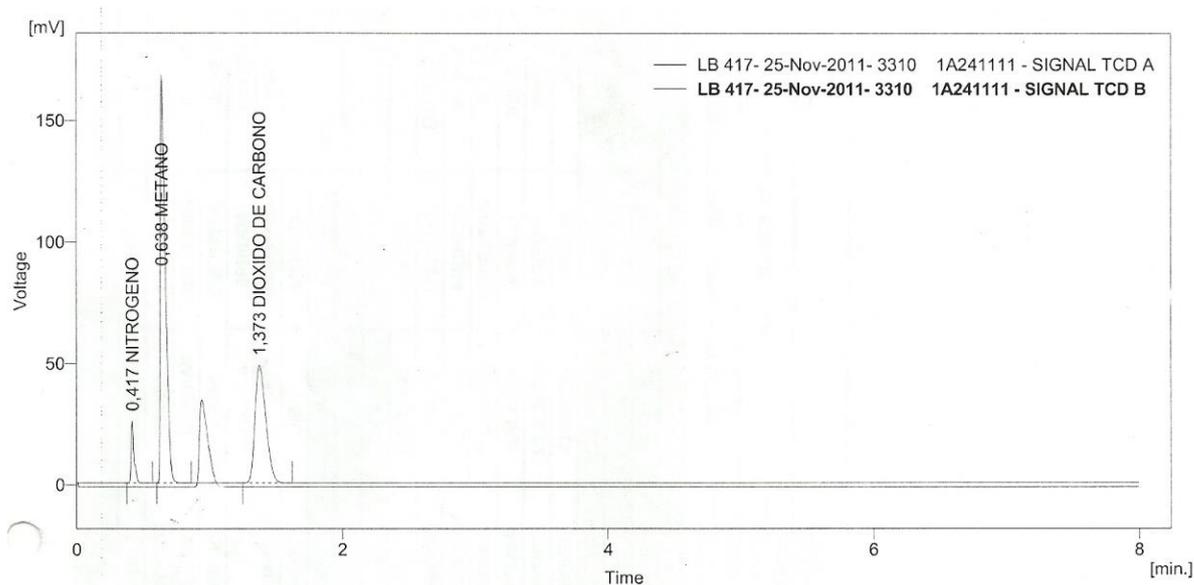
**Tabla 22: Volúmenes de gas en Nm<sup>3</sup> acumulado.**

Tratamiento	Repetición	Volumen acumulado
		[ Nm3]
1	A	0.011
	B	0.011
	C	0.013
	<b>Media</b>	<b>0.011</b>
2	A	0.029
	B	0.024
	C	0.028
	<b>Media</b>	<b>0.027</b>

Fuente: elaboración propia.

Se observa que, en este caso, el tratamiento 2 de orujo con líquido ruminal, produjo 0.027 Nm<sup>3</sup> de biogás, en promedio en los 63 días de ensayo. Al igual que en el caso de las presiones, la media de volumen total de biogás producido por la serie que contiene orujo como sustrato es 2.33 veces mayor que la de inóculo puro. Los cálculos de volumen se encuentran ampliados en el anexo I.

Las cromatografías realizadas durante las tres etapas o fases (1, 2 y 3) del experimento, determinaron las composiciones molares de cada uno de los gases generados según se especifica en el capítulo III.



**Figura 22: Ejemplo de cromatografía en muestra 1A**

En la figura 5 se observan los picos de voltaje (mV), en relación al tiempo, en minutos, correspondientes a cada tipo de gas, el área bajo la curva representa la concentración del gas.

Se presentan a continuación el porcentaje molar promedio de los gases obtenidos por serie y se los compara valores publicados por Deublein y Steinhauser (2008), obtenidos mediante la DA, de un sustrato de efluentes agroindustriales.

**Tabla 23: Caracterización del biogás obtenida en promedio en % molar y ppm y valores de referencia**

Compuesto	Unidades	Gas Inóculo (Serie 1)	Gas Orujo (Serie 2)	Valores de Referencia
H <sub>2</sub>	%molar	0	0	0.5
N <sub>2</sub>	%molar	9.88	1.24	0.01-5
CH <sub>4</sub>	%molar	54.75	54.52	45-75
CO <sub>2</sub>	%molar	33.37	41.82	25-55
SH <sub>2</sub>	ppm	333	0	10-30 000

Fuente: elaboración propia. Valores de Referencia: Deublein y Steinhauser (2008)

A partir de estos valores, fue calculado el error que se genera al considerar el biogás como gas ideal, utilizando la ecuación de estado versus el modelo de Peng Robinson. Como resultado se obtuvo un error menor al 0,05%. Este gas posee una composición promedio en los reactores 2 A, 2 B y 2 C, de acuerdo a las 3 cromatografías realizadas a lo largo del ensayo, durante los 63 días de acumulación. El promedio de la composición de los gases de las repeticiones de cada tratamiento arrojó una composición molar presentada en tabla 11.

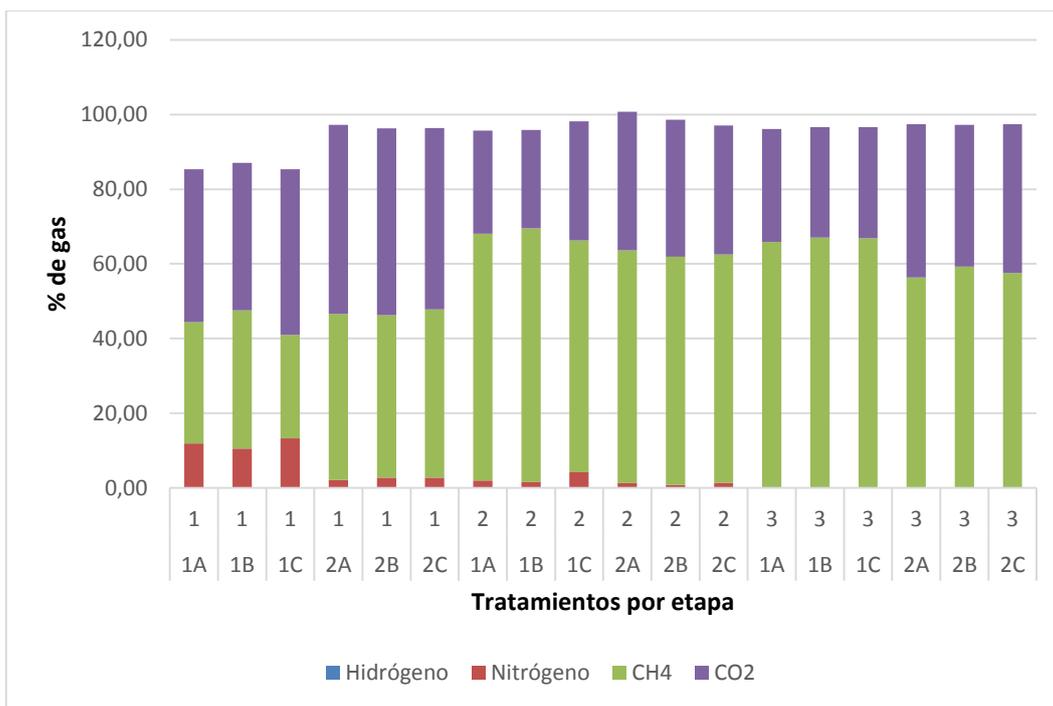
**Tabla 24: Comparación de volumen ideal y volumen real.**

Gas	%molar	V(ideal)	V(real)	Error
CH <sub>4</sub>	54.53%	23.31	23.26	<b>0.22%</b>
CO <sub>2</sub>	41.82%	30.39	30.27	<b>0.41%</b>
H <sub>2</sub> S	0.00%	0.00	0.00	<b>0.00%</b>
N <sub>2</sub>	1.24%	1025.00	1025.00	<b>0.00%</b>
H <sub>2</sub>	0.00%	0.00	0.00	<b>0.00%</b>

Fuente: elaboración propia.

Según esta comparación el error despreciable, por lo cual, fue considerado el biogás como gas ideal, con el fin de facilitar los cálculos.

La figura 6 revela el porcentaje los gases estudiados (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H y SH<sub>2</sub>), para cada tratamiento y en cada etapa del ensayo.



**Figura 23: Porcentaje Molar de Gases por etapa y tratamiento**

A partir de la observación de la figura 6 se puede apreciar que la sumatoria de los porcentajes en etapa 1 no alcanza el 100%. Esto se debe a que en la mezcla de gases obtenidos como biogás existen otros gases, en un porcentaje menor, que no fueron detectados. Esto ocurrió principalmente en la primera etapa, donde los reactores contienen la mezcla gaseosa del aire y algunos compuestos volátiles.

Se advierten las fluctuaciones de los diferentes gases estudiados, por un lado, no se detecta hidrógeno, por otro, el nitrógeno detectado en etapas tempranas decae con el progreso del tiempo. Este último puede ser efecto del aire inicial contenido en los reactores y a medida que incrementa la anaerobiosis este decae, por otro lado, el metano va incrementando alcanzando su máximo en la segunda etapa y luego presentando un leve decaimiento. La dinámica del CO<sub>2</sub> se observa opuesta a la del CH<sub>4</sub>, concentrándose en forma mayor en las primeras etapas, donde predominan procesos fermentativos.

La tabla 25 expresa los porcentajes de cada gas por etapa para una mejor comprensión:

**Tabla 25: Porcentajes molares de H<sub>2</sub>, N, CH<sub>4</sub> y, CO<sub>2</sub> y SH<sub>2</sub> en ppm por tratamiento y por etapa**

Tratamiento	Etapas	Hidrógeno	Nitrógeno	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	SH <sub>2</sub>
1A	1	0.00	11.88	32.49	40.96	0.350
1B	1	0.00	10.56	36.95	39.58	0.050
1C	1	0.00	13.25	27.73	44.35	0.500
2A	1	0.00	2.16	44.43	50.69	0.000
2B	1	0.00	2.71	43.53	50.01	0.000
2C	1	0.00	2.72	45.13	48.51	0.000
1A	2	0.00	1.96	66.12	27.65	0.035
1B	2	0.00	1.58	67.90	26.34	0.050
1C	2	0.00	4.21	62.10	31.84	0.005
2A	2	0.00	1.29	62.30	37.11	0.000
2B	2	0.00	0.78	61.10	36.71	0.000
2C	2	0.00	1.37	61.16	34.51	0.000
1A	3	0.00	0.11	65.76	30.27	0.000
1B	3	0.00	0.09	66.94	29.64	0.100
1C	3	0.00	0.08	66.77	29.75	0.000
2A	3	0.00	0.05	56.33	41.04	0.000
2B	3	0.00	0.05	59.22	37.98	0.000
2C	3	0.00	0.05	57.53	39.86	0.000

Fuente: elaboración propia.

Los valores de producción de metano, en la primera etapa, rondaron cerca del 30% para el tratamiento testigo (1A, 1B y 1C) y alrededor del 44% para el tratamiento con orujo (2A, 2B y 2C). En la segunda etapa estos valores se incrementaron a alrededor de un 65% para el tratamiento testigo y un 61% para el tratamiento con orujo. Finalmente, en la última etapa el tratamiento testigo presenta un 66% molar de metano y el tratamiento orujo alrededor de un 57%. Por lo tanto, se puede observar que existe un mayor porcentaje de metano en el tratamiento testigo. En relación al SH<sub>2</sub>, se advierte que su generación solo se produce en el tratamiento testigo.

Se presenta a continuación el desarrollo de cálculo de volumen de CH<sub>4</sub>.

**Tabla 26: Cálculo de volumen de CH<sub>4</sub> generado en Nm<sup>3</sup>**

Ensayo		P Acum. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Nº moles	Volumen acumulado [ Nm <sup>3</sup> ]	CH <sub>4</sub> [% molar]	Volumen CH <sub>4</sub> acumulado [ Nm <sup>3</sup> ]
1	A	2.9	0.221	0.011	66.12	0.0073
	B	3	0.228	0.011	67.90	0.0075
	C	3.4	0.259	0.013	62.09	0.0081
<b>Media</b>		<b>3.10</b>	<b>0.24</b>	<b>0.011</b>	<b>65.37</b>	<b>0.0075</b>
2	A	9.1	0.693	0.029	62.30	0.0181
	B	7.95	0.605	0.024	61.10	0.0147
	C	8.75	0.666	0.028	61.16	0.0171
<b>Media</b>		<b>8.60</b>	<b>0.65</b>	<b>0.027</b>	<b>61.52</b>	<b>0.0165</b>

Fuente: elaboración propia.

La tabla que se desarrolla a continuación expresa volúmenes de biogás y metano obtenidos para la masa digerida de orujo por peso de materia fresca (MF), sólidos totales y sólidos volátiles en L/kg.

**Tabla 27: Volúmenes de gas expresados en L/kg**

Componente	Biogás/ MF [L/kg]	CH <sub>4</sub> / MF [L/kg]	Biogás/ST [L/kg]	CH <sub>4</sub> / ST [L/kg]	Biogás/ SV [L/kg]	CH <sub>4</sub> / SV [L/kg]
Orujo Agotado	58.51	34.32	58.51	62.85	63.98	<b>37.52</b>

Fuente: elaboración propia.

Los estudios citados en el capítulo II presentan valores para orujo de 98 L de CH<sub>4</sub>/kg de sólidos volátiles a través de DA en modo discontinuo con orujo fresco (Dinuccio et al., 2010). Otro estudio realizado por Gunaseelan (2004), obtuvo 283 L CH<sub>4</sub> / kg SV con un tiempo de retención de 20 días a 35°C en un reactor con agitación continua. Martinez et al., (2016) obtiene 133 L CH<sub>4</sub>/ SV. Se calculan a continuación distintos parámetros en base a la caracterización de los sustratos publicados y de los resultados obtenidos en laboratorio.

**Tabla 28: Calculo de L de CH<sub>4</sub> por kg de materia fresca por componente**

Componente	SV	% ST	CH <sub>4</sub> /SV Orujo	SV/ MF Orujo	CH <sub>4</sub> /MF Orujo	CH <sub>4</sub> /MF Uva	CH <sub>4</sub> / Vol Vino
	[% ]	[% ]	[L/kg]	[kg/kg]	[L/kg]	[L/kg]	[L/L]
Orujo Fresco (1)	95.40	26.40	283.00	0.25	71.25	6.70	8.94
Orujo Fresco (2)	95.40	26.40	98.00	0.25	24.670	2.32	3.10
Orujo Agotado (3)	90.00	60.00	113.00	0.54	61.020	5.74	7.66
Orujo Agotado (4)	91.43	58.64	37.52	0.54	20.11	1.89	2.52
<b>Promedio</b>	<b>93.06</b>	<b>42.86</b>	<b>132.88</b>	<b>0.39</b>	<b>44.26</b>	<b>4.17</b>	<b>5.55</b>

Fuente: elaboración propia. (1) Gunaseelan (2004), (2) Dinuccio (2010), (3) Martínez et al. 2016. (4) Ensayos PBM de este trabajo de tesis.

Esta última tabla expone algunas diferencias entre autores ya que dos autores expresan valores para orujo agotado muy extremos. Si se aprecian los valores de CH<sub>4</sub>/SV Orujo, observamos que Gunaseelan (2004) obtuvo 283 L CH<sub>4</sub>/kg SV con orujo fresco, pero Dinuccio, (2010) presentó un valor muy bajo con orujo fresco, 98 L CH<sub>4</sub>/kg SV. A su vez Martínez et al., (2016) generó 113 L CH<sub>4</sub>/kg SV con orujo agotado, valor muy distante del obtenido en este trabajo de tesis con orujo agotado de 37.52 L CH<sub>4</sub>/kg SV. Este valor tan bajo podría ser explicado como pequeñas fugas de gas en el sistema durante la experiencia.

En parte, también se explica, el bajo rendimiento en metano del orujo agotado, dado su menor contenido en sólidos volátiles y humedad que el orujo fresco estudiado. Por lo tanto, en la tabla anterior se tradujo el volumen posible de generar en L de CH<sub>4</sub> para todos los casos, ya sea materia fresca o SV de orujo, kg de uva elaborado o litro de vino elaborado. Se calculó teniendo en cuenta que se producen 9.41 kg de orujo a partir de un 1kg de uva que genera 0.75L de vino. Se presentó en la tabla anterior, el promedio de estos valores, que será utilizado para cálculos energéticos posteriores.

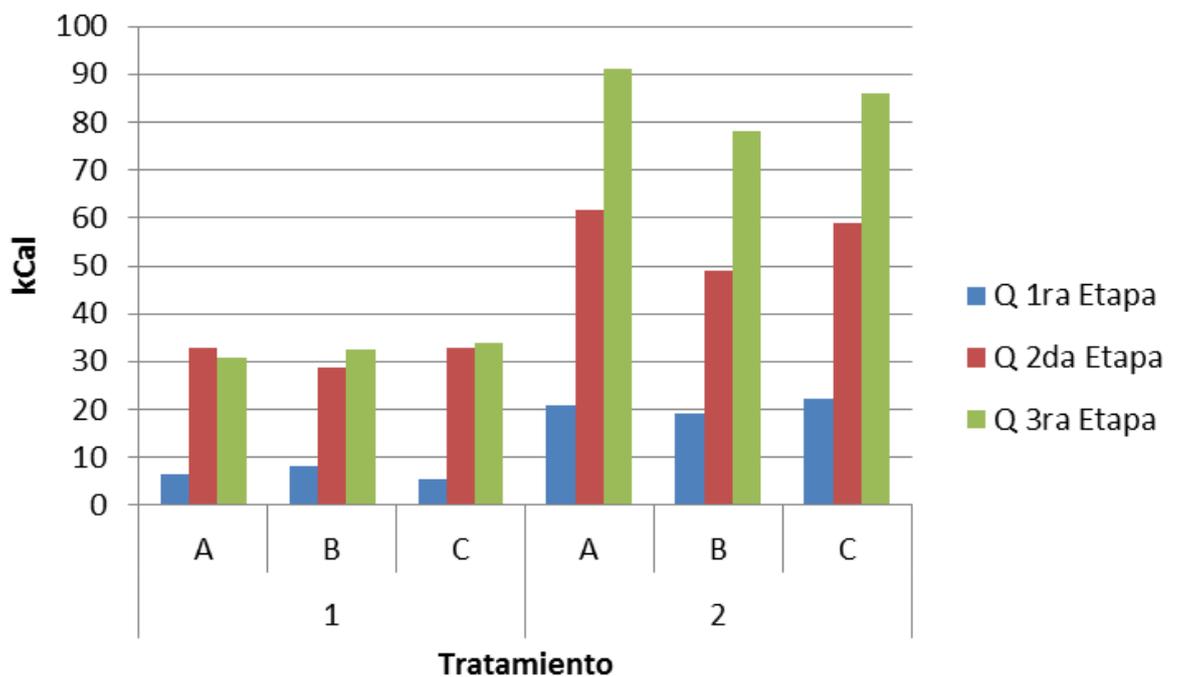
Se realizó el cálculo energético del gas obtenido según metodología. Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 29: Cálculo energético total y por etapas en kcal.**

Ensayo		Q 1ra Etapa	Q 2da Etapa	Q 3ra Etapa	Q Total
		[kcal]	[kcal]	[kcal]	[kcal]
1	A	6.52	32.91	30.78	70.21
	B	8.30	28.89	32.70	69.89
	C	5.34	32.89	33.89	72.13
<b>Media 1</b>		6,72	31.56	32.46	<b>70.74</b>
2	A	21.04	61.51	91.01	173.56
	B	19.22	49.04	77.98	146.24
	C	22.10	58.91	85.91	166.91
<b>Media 2</b>		20.79	56.49	84.97	<b>162.24</b>

Fuente: elaboración propia.

El valor Q expresa el potencial energético en kcal por etapa. Según se observa en los resultados de las tablas, la producción media de biogás en la serie que contuvo orujo produjo una cantidad de energía mucho mayor que la serie 1 de inóculo puro.



**Figura 24: Energía de Combustión (Q) en kcal por tratamiento por etapa**

La energía media obtenida transformada a kWh y relacionada con el volumen producido se expresa en la siguiente tabla:

**Tabla 30: Energía específica obtenida**

Tratamiento	Repetición	Volumen acumulado	Q Total	Q /Nm <sup>3</sup>	Energía Específica
		[ Nm <sup>3</sup> ]	[kcal]	[kcal/Nm <sup>3</sup> ]	[kWh/Nm <sup>3</sup> ]
1	A	0.011	70.21	6382.73	7.42
	B	0.011	69.89	6353.64	7.39
	C	0.013	72.13	5548.46	6.45
	<b>Media</b>	<b>0.011</b>	<b>70.74</b>	<b>6173.84</b>	7.18
2	A	0.029	173.56	5984.83	6.96
	B	0.024	146.24	6093.33	7.09
	C	0.028	166.91	5961.07	6.93
	<b>Media</b>	<b>0.027</b>	<b>162.24</b>	<b>6049.52</b>	7.04

Fuente: elaboración propia.

En esta tabla se presentan los volúmenes de gas generado, donde se advierte el doble de gas generado por el tratamiento con orujo por lo tanto se obtiene un potencial energético mayor al del testigo, pero al calcular la energía específica (kWh/Nm<sup>3</sup>), dado el mayor contenido en porcentaje molar de metano del tratamiento testigo, es que se aprecia su valor levemente mayor en relación a este último parámetro.

Deublein y Steinhauser (2008) presenta valores de energía específica que van de 5.5 a 8.2 kWh/Nm<sup>3</sup> en biogás obtenido a partir de la DA de un sustrato de efluentes agroindustriales. Por lo tanto, los valores obtenidos que superan los 7 kWh/Nm<sup>3</sup> se encuentran dentro del rango publicado por los autores estudiados.

**Tabla 31: Energía en kcal por componente.**

Tratamiento	Componente	Masa en reactor (MF)	Q Total	Q por componente en reactor	Q / kg MF
		[kg]	[kcal]	[kcal]	[kcal/kg]
Orujo	Inóculo	1.60	162.24	70.74	44.21
	Orujo	0.45		91.50	204.24

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a estos valores, la cantidad de energía (promedio) producida por el inóculo es de 70.74 kcal y la de inóculo junto con orujo como sustrato es de 162.24 kcal. Se observa que el aporte de 0.45 kg de orujo incrementa la energía obtenida en 91.5 kcal. Entonces la energía másica del orujo agotado se calcula como 204.24 kcal /kg.

Se presentan a continuación los valores de energía producida por kg de orujo agotado, por kg de uva ingresada a bodega y por volumen de vino, calculados a partir el promedio los valores obtenidos en laboratorio y antecedentes estudiados.

**Tabla 32: Energía en kcal y kWh por kg de orujo agotado, kg de uva ingresada a bodega y volumen de vino elaborado.**

Energía por kg MF orujo	Energía por kg orujo	Energía por kg de uva ingresada a bodega	Energía por L de vino
[kCal/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]	[kWh/L]
<b>347.65</b>	<b>0.40431</b>	<b>0.03805</b>	<b>0.05073</b>

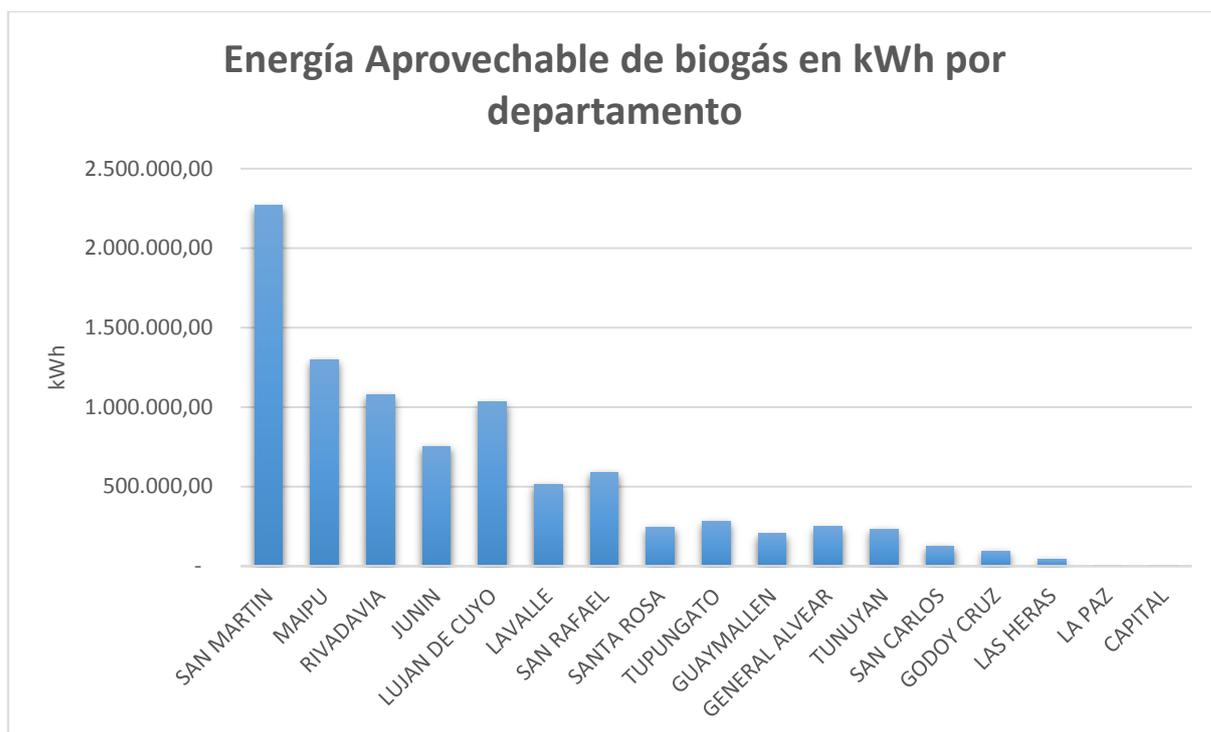
Fuente: elaboración propia.

Mediante estos valores se calcula, a partir de los kg de uva ingresado a bodegas, teniendo en cuenta que un 9.41% corresponde a orujo, se calcula la energía posible de generar a partir del biogás producido a partir de DA de orujo, teniendo en cuenta los valores expresados en la tabla anterior.

**Tabla 33: Energía aprovechable mediante generación de biogás por departamento**

Departamento	Promedio anual de total de orujo (2008- 2018)	Energía Biogás generada con MF orujo (347,64 kCal/kg MF orujo)	Energía Biogás generada con MF de orujo (0.40431 kWh/kg MF orujo)	Energía eléctrica a generar con Biogás (25% eficiencia)
	[kg]	[kCal]	[kWh]	[kWh]
SAN MARTIN	37 394 462.91	13 000 185 030.35	15 118 955.30	2 267 843.29
MAIPU	21 398 832.09	7 439 303 976.40	8 651 761.80	1 297 764.27
RIVADAVIA	17 771 502.18	6 178 262 733.51	7 185 196.05	1 077 779.41
JUNIN	12 395 648.45	4 309 347 185.22	5 011 684.63	751 752.69
LUJAN DE CUYO	17 031 004.00	5 920 828 540.60	6 885 805.23	1 032 870.78
LAVALLE	8 469 154.27	2 944 301 482.91	3 424 163.76	513 624.56
SAN RAFAEL	9 703 136.09	3 373 295 262.00	3 923 074.95	588 461.24
SANTA ROSA	4 009 413.00	1 393 872 429.45	1 621 045.77	243 156.87
TUPUNGATO	4 638 457.64	1 612 559 797.28	1 875 374.81	281 306.22
GUAYMALLEN	3 340 117.00	1 161 191 675.05	1 350 442.70	202 566.41
GENERAL ALVEAR	4 088 372.91	1 421 322 841.85	1 652 970.05	247 945.51
TUNUYAN	3 850 440.91	1 338 605 782.05	1 556 771.76	233 515.76
SAN CARLOS	2 043 897.82	710 561 076.49	826 368.33	123 955.25
GODOY CRUZ	1 576 082.82	547 925 191.74	637 226.04	95 583.91
LAS HERAS	691 813.09	240 508 821.05	279 706.95	41 956.04
LA PAZ	15 727.27	5 467 586.36	6 358.69	953.80
CAPITAL	1 413.64	491 450.68	571.55	85.73
<b>Total</b>	<b>148 419 476.09</b>	<b>51 598 030 863.00</b>	<b>60 007 478.38</b>	<b>9 001 121.76</b>

Fuente: elaboración propia en base a datos INV (2019).



**Figura 25: Energía aprovechable mediante generación de biogás por departamento**

Finalmente se compararon los valores de energía posible de generar a través de combustión de biogás con los valores de energía posible de generar a través de la combustión directa de orujo, calculado a partir del poder calorífico del orujo y del poder calorífico del biogás generado a partir del orujo. Se observó que solo un 13% del total de la energía posible de obtener en base a la combustión directa del orujo en calderas podría ser obtenida en base a la combustión de biogás de la DA de este mismo orujo. Estos cálculos se amplían en el anexo

Finalizado el ensayo, mediante la determinación del poder calorífico de los residuos digeridos se obtuvieron los valores representados en la tabla presentada a continuación:

**Tabla 34: Energía producida en kcal por digerido.**

Tratamiento	Repetición	Poder calorífico	Masa residual	Energía Obtenida	Energía Específica Efluente
		[kcal/kg]	[kg ST]	[kcal]	[kcal/kg]
<b>1</b>	A	0	0.022	0	0
	B	0	0.022	0	0
	C	0	0.022	0	0
	<b>Media</b>	<b>0</b>	<b>0.022</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	A	4 729	0.285	1 347.77	4 729.00
	B	4 754	0.285	1 354.89	4 754.00
	C	4 871	0.285	1 388.24	4 871.00
	<b>Media</b>	<b>4 784.67</b>	<b>0.285</b>	<b>1 363.63</b>	<b>4 784.67</b>

Fuente: elaboración propia.

La serie 1 no posee contenido calórico significativo, ya que los sólidos totales contenidos en el reactor son despreciables. La serie 2 presentó un poder calorífico significativo, con el cual se determinó la energía específica y la energía total generada por la cantidad de masa contenida en el reactor y su media.

Se observa que fueron obtenidas 1 363.63 kcal en promedio en la serie 2, por lo tanto, puede decirse que se obtienen en promedio 4 784.67 kcal/kg de orujo digerido.

En cuanto al aporte energético de la masa residual, si consideramos el poder calorífico de la misma es de 4 784.67 kcal/kg y una disponibilidad de orujo fresco de 154 823 241 kg, por lo cual, pueden obtenerse 704 168 347 088.30 kcal/año que podrían alimentar a 80 calderas especificadas en la metodología.

### 4.3 Conclusión.

A partir de la metodología aplicada fue posible calcular la cantidad de orujo generada en la provincia de Mendoza y a partir de esta fue calculado su potencial teórico para la generación de energía a partir de biogás generado a través de la DA del mismo. También fue calculada la energía posible de generar mediante la combustión de todo el Orujo. Estos valores demuestran la capacidad que posee el biogás para la generación de energía renovable en establecimientos vitivinícolas y a su vez se revela que la combustión de orujo podría ser mucho más eficiente en relación a su rendimiento energético.

Mediante ensayos PBM realizados fue posible obtener biogás a partir de orujo agotado, el mismo. A partir de la digestión a de inóculo y orujo agotado como sustrato se obtuvieron 0.0246 m<sup>3</sup> de biogás, con una composición en: CH<sub>4</sub> de 54.526 % molar, CO<sub>2</sub> de 41.824 % molar, N<sub>2</sub> de 1.24 %molar, no fue generado H<sub>2</sub>S y el resto fueron componentes no detectados por la cromatografía gaseosa. En la digestión de inóculo como testigo se obtuvieron 0.0113 m<sup>3</sup> de biogás, con una composición en: CH<sub>4</sub> de 4.751 % molar; CO<sub>2</sub> de 33.374 % molar; N<sub>2</sub> de 4.859 % molar, SH<sub>2</sub> de 0.311 %molar y el resto fueron componentes no detectados en la cromatografía gaseosa.

Es decir, con orujo como sustrato fue obtenido más del doble de volumen, con composiciones semejantes y además no generó H<sub>2</sub>S. Las características energéticas son semejantes, ya que la energía volumétrica obtenida en el gas producido con inóculo más orujo fue levemente mayor.

La energía específica medida para la generación de biogás a partir de orujo fue de 7.04 kWh/Nm<sup>3</sup>. Fueron obtenidos valores de generación de energía a partir de la DA de orujo de 347.65 kCal/kg y 0.4043 kWh por kg de orujo, 0.038 kWh por kg de uva ingresada a bodega y 0.05 kWh por litro de vino elaborado.

También fue calculado que a partir de la combustión del biogás generado con orujo solo se obtiene un 13% de la energía posible de generar mediante la combustión directa del orujo.

Estos valores demuestran que es posible tanto la degradación anaerobia de este residuo, como la generación de energía a partir de la combustión del biogás generado.



# Capítulo V

---

## 5. Conclusiones

Mediante este capítulo se desarrollan las conclusiones del presente trabajo. El mismo está conformado por una introducción, donde se revisan los aportes de cada capítulo, luego se exponen las conclusiones acerca de las preguntas de investigación, para esto, se retomó el objetivo general y los específicos y fueron respondidos mediante conclusiones elaboradas en base a los resultados obtenidos y su discusión. Luego, la sección, conclusiones sobre el problema de investigación, fue más allá de los resultados numéricos obtenidos y se incorporaron hallazgos cualitativos, acerca del problema de investigación, desarrollados durante la investigación, luego se describen las implicaciones para políticas y prácticas, las limitaciones y finalmente las implicaciones para investigaciones posteriores.

### 5.1. Introducción

Mediante el cada capítulo de este trabajo de tesis titulado: “Degradación anaerobia de orujo de uva de bodegas de la provincia de Mendoza”, fueron presentados los distintos aspectos del presente estudio que comprueba que el aprovechamiento del gas metano, a partir de la DA de orujo de uva, puede contribuir, en parte, con los requerimientos energéticos de establecimientos vitivinícolas mediante su digestión en reactores anaeróbicos, que permitan optimizar el control de las variables que gobiernan el proceso.

El capítulo uno detalló el propósito de este estudio y generalidades en relación a la bioenergía, el panorama vitivinícola de Mendoza y residuos generados en esta actividad. El segundo capítulo presentó el estado del arte en ensayos para medición del potencial bioquímico para producción de metano que abarcó el estudio de la metodología utilizada en ensayos de PBM a lo largo de la historia para la medición de potencial energético de residuos. El capítulo tres detalló la metodología empleada, tanto para los ensayos, como para la recopilación de datos en relación a la generación de residuos en bodegas. El cuarto capítulo presentó los resultados y discusión en relación a estos dos ejes temáticos y este capítulo busca entrelazarlos y arrojar conclusiones, recomendaciones y visiones a futuro.

En este capítulo se analizará, la contribución de esta energía en bodegas de la provincia a partir de la generación hipotética del orujo residual obtenido en la actividad vitivinícola mendocina. Esta visión ampliada sobre la energía que podría aportar el orujo en las bodegas mendocinas, otorgará un punto de partida para su posterior evaluación en diversos casos.

## 5.2. Conclusiones acerca de las preguntas de investigación.

A partir de la metodología aplicada mediante ensayos y como se comprueba en el capítulo IV, la degradación anaerobia de orujo de uva es posible, mediante el control de variables como: anaerobiosis, temperatura, disolución e inoculación con bacterias anaerobias bajo la forma de ensayos PBM.

También se comprueba que mediante el biogás obtenido se puede obtener energía por combustión directa, la cual puede ser aprovechada en calderas, motores, motogeneradores y calefactores, entre otros.

Con respecto al problema de investigación y objetivo, luego de realizados ensayos y estudios de investigación, se comprueba que la generación de energía a partir de la DA del orujo, en lugares donde se concentra el mismo, sean bodegas, cooperativas o destilerías sería, aparte de factible, una manera útil de gestionar residuos y por otro lado una oportunidad para empresas de recibir beneficios en relación a la ley 27 191 de energías renovables.

Bajo el objetivo general de estudiar el potencial del orujo de uva para su valorización energética por medio de la degradación anaerobia fueron recopilados y calculados los valores de orujo generados en la provincia y su potencial para la generación de energía, mediante la generación de gas metano a partir de DA.

Este objetivo general fue conformado bajo cuatro objetivos específicos, el primero, cuantificar la generación de orujo en bodegas de la provincia de Mendoza. Para responder este objetivo, fue estimado, mediante las bases de datos de INV (2019), que para el promedio de los años 2008 a 2018 un 9.41 % del peso de la uva ingresada a bodegas fue convertida en orujo y 7.15% fue remitido a destilería, o sea, convertido en orujo agotado. Por lo tanto, fueron generados, para el promedio de esta serie de diez años, 318 743 652.45 kg de orujo fresco y 259 457 393.25 kg de orujo agotado en la provincia de Mendoza.

Otro objetivo específico fue el de evaluar la factibilidad de degradación anaerobia de orujo agotado de uva. El cual fue satisfactoriamente logrado a través de ensayos PBM, logrando desarrollar la metodología y adaptarla a los recursos del lugar. Fueron controladas las variables de temperatura, volumen en reactor y anaerobiosis, mediante reactores de juntas bridadas provistos de válvulas y manómetros para la cuantificación de la generación de gas, dispuestos en un baño termostatzado. La duración del ensayo fue de 63 días y mediante el mismo se constató la generación de metano por cromatografía gaseosa.

Fue estudiada la composición del orujo, que permitió dilucidar que los principales componentes del hollejo pueden ser digeridos en semanas. Por otro lado, la semilla presenta un alto contenido de lignina, la cual, no se degrada en las condiciones establecidas, posee además un alto contenido en lípidos. Dado que el orujo agotado está desprovisto de semilla, ya que la misma es utilizada para la extracción de su aceite, posee menor rendimiento, pero una velocidad de degradación mayor.

La C/N calculada para hollejos fue de 24.22 y de 22.77 para semillas las cuales se encuentran en rango para una buena degradabilidad (16 a 25) según (Deublein y Steinhauser, 2008). Tampoco fueron encontrados potenciales inhibidores en relación a los principales componentes del orujo presentados en el capítulo II.

Fue estimada también la generación de biogás de orujo agotado de uva mediante ensayos PBM, esta estimación responde al tercer objetivo específico propuesto. Mediante estos ensayos 1kg de orujo agotado generó 0.215 Nm<sup>3</sup> de biogás y 0.129 Nm<sup>3</sup> de gas metano. Estos valores pueden ser expresados como 37.52 L CH<sub>4</sub>/ kg SV. Los mismos difieren de los valores hallados por los autores citados. Duncchio (2010) obtuvo 98 L de CH<sub>4</sub>/kg de sólidos de orujo fresco, Gunaseelan (2004), 283 L CH<sub>4</sub> / kg VS en orujo fresco y Martínez et al., (2016) 113 L CH<sub>4</sub>/kg SV en orujo agotado, valor muy distante del obtenido en el ensayo realizado. La diferencia en estos valores se debe, principalmente a la diferencia en la composición del orujo fresco y agotado relacionado al menor contenido en sólidos volátiles y humedad del orujo agotado. También explicado anteriormente por la ausencia de ciertos componentes previamente extraídos, como ácido málico, tartárico y semillas, y, por otro lado, a la falta de agitación continua. Estos valores obtenidos traducidos a materia fresca no difieren en cantidad con los publicados por Dinuccio (2010) que resultaría en 24.67 L CH<sub>4</sub>/ kg de materia fresca y 20.11 L CH<sub>4</sub>/ kg de materia fresca para el orujo agotado ensayado en este trabajo de tesis.

Un detalle importante es que mediante el empleo de orujo como sustrato se obtuvo más del doble de volumen de biogás en relación al tratamiento testigo, con composiciones semejantes y además no generó H<sub>2</sub>S.

Otra parte del tercer objetivo propuesto, enuncia cuantificar energéticamente el biogás producido a partir de la degradación del residuo estudiado. Se obtuvo como resultado, que el gas generado por DA, a partir de orujo agotado, posee un potencial energético de 7.04 kWh/Nm<sup>3</sup>. Deublein y Steinhauser (2008) obtuvo valores de referencia que van de 5.5 a 8.2 kWh/Nm<sup>3</sup> para efluentes agroindustriales.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos y al promedio de los resultados publicados por los autores anteriormente citados, se obtienen valores para los cálculos energéticos que implican que 1 kg

de orujo puede generar 0,40 kWh mediante DA y por lo tanto 0.038 kWh por kg de uva ingresada a bodega y 0.05 kWh por L de vino elaborado.

Como cuarto y último objetivo fue planteado evaluar el aporte energético a partir de producción de biogás con orujo de uva de las bodegas de Mendoza. Teniendo en cuenta una eficiencia en la conversión energética del 25% para la generación de energía eléctrica para el aprovechamiento del biogás, podrían ser generados 9 001 121.76 kWh que cubrirían el 3.8 % de los requerimientos energéticos calculados para una bodega mediana según los requerimientos publicados por Fuentes-Pila y García (2014). Estos cálculos son detallados en la sección 6.2 del anexo. Esto equivaldría a la demanda energética eléctrica anual de 27 bodegas de mediana capacidad (330.000hL anuales).

En cuanto a la producción de biogás a partir de orujo agotado podemos mencionar que se pueden obtener 347,65 kilocalorías mediante la combustión del biogás generado por un kilogramo de orujo. La energía eléctrica posible de generar, se calculó en base a un 25% de eficiencia que pueden obtenerse 0.7875 kWh/ kg orujo quemado y 0.101 kWh/ kg orujo digerido anaerobiamente.

En respuesta al último objetivo planteado y en base a los resultados obtenidos podemos concluir que pueden generarse 2 715.40 kilocalorías mediante la combustión de 1 kg de orujo fresco y 1 243.10 kilocalorías mediante la combustión de 1 kg de orujo agotado. Se calculó que mediante la combustión del biogás generado con orujo solo se obtiene un 13% de la energía posible de generar mediante la combustión directa del orujo.

Con respecto a la disponibilidad de orujo en la provincia de Mendoza, se concluye que si se digiriera anaerobiamente todo el orujo agotado en las condiciones estudiadas se podría generar energía como para abastecer de gas a 4 623 casas mediante el biogás producido (en relación a la demanda energética de gas natural anual de una casa de familia tipo. Esta energía también equivale al requerimiento energético en gas de 219 bodegas de mediano tamaño (necesidad energética en gas de 40992 kWh/año) indicado por Cooperativas Agroalimentarias (2010).

### 5.3 Conclusiones sobre el problema de investigación e implicaciones para la teoría

En esta sección se presentan las conclusiones obtenidas, se exploran las implicaciones de la investigación para la comprensión de futuros problemas de investigación.

Este trabajo de tesis estudió la generación de biogás a partir de orujo de uva, aunque no descarta otras alternativas para el tratamiento de este residuo. Teniendo en cuenta que, como residuos de bodega, se contemplaron los obtenidos luego del proceso de vinificación en blanco, tinto o espumante tanto como en la elaboración de mosto de uva y los de la destilería.

El capítulo II establece que residuos como orujo agotado, orujo fresco y escobajos tienen alto potencial como mejoradores de suelo. Se hace hincapié en que este es uno de los principales destinos para estos residuos debido a que Mendoza es una provincia de suelos muy jóvenes y pobres en materia orgánica.

Actualmente también se estudia la materia antioxidante contenida en la uva como el resveratrol, uno de los antioxidantes más estudiados en los últimos años por la industria farmacéutica, y el uso de la harina de orujo como ingrediente alimentario novedoso.

Se compararon dos alternativas, una es la planteada por este trabajo de tesis, la generación de biogás a partir de la DA del orujo y la otra alternativa es la obtención de energía a partir de la combustión directa de estos residuos sólidos con bajo contenido de humedad en calderas donde sería posible generar, aparte de calor, energía eléctrica mediante vapor.

Mediante los resultados obtenidos se refleja que el oasis Este de la provincia, es la zona con mayor capacidad y donde se elabora el mayor volumen de vino y mostos. Se remarca la capacidad del departamento de San Martín quien a partir de los valores de ingreso de uvas para elaboración en bodegas en el capítulo resultados, por cada kilo de orujo, pueden ser generados 0.62 kWh de energía eléctrica, mediante el aprovechamiento del biogás producido. Dado que en el departamento de San Martín se procesan en promedio 457 999 194.05 kg de uva en la cosecha podrían generarse 2 267843.29 kWh de energía eléctrica a partir del aprovechamiento del orujo de todo el municipio. Por lo tanto, se observa la posibilidad de la determinación de la ubicación de una planta de biogás en un radio cercano a la localización que concentra a la mayoría de estas bodegas.

Otro punto clave es que la destilería concentra el orujo de varias bodegas lo cual hace a la misma un punto clave para la construcción de una planta para la generación de energía en base a orujo agotado.

Concentrando todo el orujo agotado de San Martín, Rivadavia y Junín, departamentos que se encuentran a corta distancia y que concentran una gran producción, podrían generarse 31 221 682.37 kWh por año.

Se calculó a partir de todo el orujo obtenido en el promedio de la serie de años estudiados, mediante combustión directa pueden generarse 403 018 245 377.26 kilocalorías de energía térmica y mediante DA pueden generarse 51 598 030 863.00 kilocalorías de energía térmica mediante la combustión del biogás. Estos valores son imposibles de alcanzar, debido a la imposibilidad de concentrar todo el orujo producido en la provincia, pero nos dan varias pautas a la hora del análisis. La relación obtenida entre la combustión del orujo y la generación de biogás es de 13% esto significa que mediante la generación de

biogás solo se obtendría el 13% de la energía que se obtendría por combustión directa del orujo. Esto puede ser un factor determinante a la hora de la elección de una alternativa para la generación de energía renovable. Igualmente, los beneficios económicos en relación a la generación de energía son mejores a la hora de comparar un proyecto de biomasa y de biogás. Actualmente el precio establecido para la actual ronda 3 del programa RENOVAR para proyectos de biomasa es de 2 500 000 USD/MWh y para proyectos de Biogás es de 4 500 000 USD/MWh. Al ser mayor el fomento para la producción de biogás la diferencia en el beneficio económico obtenido a partir de la generación de energía con Biogás se vuelve menor en relación a la biomasa.

Con respecto a los estudios de DA y Potencial Bioquímico de Metano (PBM), se puede concluir que mediante diferentes trabajos desarrollados por el Centro de Estudios de Ingeniería en Residuos (CEIRS) de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO), fueron desarrollados diversos dispositivos experimentales para lograr la degradación anaerobia de residuos y para la correcta medición del volumen de biogás. Estos fueron adaptándose a los recursos disponibles, como a las exigencias o desarrollos a nivel internacional en relación a los antecedentes que fueron estudiados Este factor fue fundamental para lograr una metodología que permita ensayos susceptibles de ser medidos y comparados. Se logró así obtener no solo el equipamiento para un laboratorio de valorización energética de residuos, sino también reactores de alta precisión ya que la estanqueidad en los mismos es el detalle más complejo y donde se producen las principales fallas. Esto fue acompañado de la elaboración de protocolos de trabajo donde pudieron establecerse los diseños experimentales, los esquemas de carga, diluciones, materias primas como sustratos e inóculos, condiciones experimentales, mediciones, sus frecuencias y cálculos, tanto como seguridad e higiene en el laboratorio. El éxito de la metodología también se basa en un diseño experimental que se ajusta a las variables a controlar, la previsión de tratamientos con repeticiones para facilitar el análisis y comparación.

Fueron revisados diferentes factores que influyen en los ensayos PBM y fueron agrupados en cuatro grandes grupos: los relacionados con el sustrato, con el inóculo, con las condiciones operacionales y con las experimentales.

Se observa la importancia en la composición del sustrato ya que debe tenerse en cuenta concentración de sustancias inhibitoras, una de las principales causas en la inhibición, en plantas a gran escala, es debido a altas concentraciones de nitrógeno, en el caso de ensayos al trabajar con alto contenido de inoculantes y buenas diluciones generalmente estos inconvenientes desaparecen. En el caso del orujo de uva, al tener una alta concentración de carbono, no existen inconvenientes con nitrógeno, de hecho, este puede ser utilizado para mejorar o mezclar sustratos con alto contenido en nitrógeno.

Un punto fundamental que concluye esta tesis es la necesidad de dilución de sustratos, que por un lado, en los ensayos, es facilitada por el alto grado de dilución que brindan las sustancias inoculantes, por poseer bajo contenido de sólidos totales, pero, a gran escala para la alimentación periódica de un biorreactor se torna crucial la necesidad de trabajar con efluentes con alto contenido de humedad, o sea concentraciones de sólidos totales que oscilan de 10 a 20% según la tecnología empleada, (siempre hablando de biodigestores húmedos). Esto hace que para residuos como el orujo (tanto fresco como agotado) sea necesaria una sustancia diluyente para lograr un bajo porcentaje de sólidos totales. Se vuelve digno de estudiar el uso de agua para dilución en una región árida como es la provincia de Mendoza, donde el agua es un recurso muy limitado, ya que se habla que los últimos 10 años han sido secos según los pronósticos de escurrimiento del DGI (2018). Por lo tanto, vuelve interesante el uso de efluentes líquidos para la codigestión de este sustrato. Podemos hablar de: efluentes líquidos cloacales, de industrias y producción animal, como líquidos ruminales obtenidos en mataderos, los cuales son una buena alternativa ya que estos también poseen sustancias inoculantes. El factor limitante con todos estos efluentes líquidos será la presencia de sustancias inhibidoras de la digestión como sales y principalmente sustancias desinfectantes y antibióticos ya que muchos efluentes vienen acompañados de aguas de lavado y también es muy común el uso de antibióticos en producción animal.

Respecto al inóculo podemos concluir que el mismo luego de lograda la estanqueidad en un reactor y una carga liviana (diluida) en el mismo, es el factor que comandará el inicio de la degradación anaerobia. Si este se encuentra de manera escasa puede que la DA nunca comience. Durante este trabajo de tesis se observaron ensayos donde nunca se obtuvo biogás ya que el proceso quedó estancado en la etapa de fermentación, específicamente en la acidificación lo cual lleva a un descenso de pH que conlleva a un efecto de conservación del sustrato en lugar de su degradación ya que nunca se alcanzó la etapa de metanogénesis. Por lo tanto, es fundamental asegurar una cantidad de bacterias suficientes para que esto suceda. Este factor también está muy relacionado con el pH, que como se describe en el capítulo II no debe ser menor a 6.2. En el caso de ensayos es importante disponer de una buena cantidad de sustancias inoculantes, en el caso del arranque de una planta de biogás por lo general se recomienda que esta sea llenada con una gran proporción de inóculo, aproximadamente  $\frac{3}{4}$  partes del volumen total del biodigestor, para lograr un arranque satisfactorio. Deberá asegurarse previamente la calidad del inóculo. También debe tenerse en cuenta que el tratamiento testigo compuesto por líquido ruminal resultó poseer un potencial por sí solo de 7.18 kWh/Nm<sup>3</sup> de biogás. Esto demuestra el potencial de este inóculo para los sistemas de DA y a su vez el gran potencial para la generación de energía a partir de este efluente de la industria cárnica.

En cuanto las condiciones operacionales y experimentales, los parámetros más influyentes y donde se registran más fallas o alto riesgo de fracaso de los ensayos, va en relación a la estanqueidad del sistema, por eso se hace imprescindible una buena puesta a punto de los reactores tanto para ensayos de laboratorio como en gran escala. En este trabajo de tesis se realizaron pruebas hidráulicas en los reactores, previas a los ensayos donde se constató la estanqueidad de cada biodigestor. Esto es fundamental ya que a la hora de comenzar ensayos con varios tratamientos todos deben ser llevados simultáneamente.

Con respecto al volumen de reactor en ensayos, se obtuvieron buenos resultados siempre trabajando con volúmenes superiores o iguales a un litro, esto permite disminuir el error en la lectura de generación de biogás, ya que, con volúmenes bajos, se vuelve despreciable y por lo tanto se deberá contar con un equipo de medición de gas sensible a estos volúmenes. Es muy común el uso de desplazamiento de líquidos y muy recomendado por los autores estudiados.

La temperatura no deja de ser un parámetro a despreciar, en el caso de este estudio de tesis fue un parámetro simple de controlar ya que se dispuso de un baño termostatzado con un control automático, y donde fue registrada la temperatura periódicamente. Se comprobó en otros ensayos realizados que la alternancia de temperaturas inhibe el proceso de digestión, dada la sensibilidad de estas bacterias. Por otro lado, cabe destacar que este factor a la hora de la construcción de una planta a gran escala, define la velocidad de degradación que se relaciona con los tiempos de residencia y que finalmente, afectará en el tamaño del biodigestor, lo cual pasa a ser un factor a que hace a la rentabilidad del proyecto.

La agitación al igual que el control de temperatura es un parámetro que ayuda a mejorar la velocidad de reacción lo cual también permite que se puedan tratar sustratos con un contenido de sólidos de hasta un 20%.

En cuanto al tiempo de incubación del ensayo esto está relacionado a los parámetros anteriores que definen la velocidad de reacción tanto como la calidad del sustrato y su composición y las sustancias inoculantes. Existen sustratos más fáciles de degradar que otros. En las experiencias realizadas se trabajó en algunas oportunidades con glicerina, sustrato que se encuentra más cercano a la metanogénesis, por lo tanto, produce biogás en un corto período de tiempo, pero requiere ciertos cuidados ya que no puede ser agregado en concentraciones superiores al 5% y puede contener metanol que inhibe a las bacterias metanogénicas. Es muy importante la observación las curvas de la generación de gas que dan una idea de la etapa en la que se encuentra el ensayo y definen los momentos oportunos para realizar análisis de gases.

En relación a las condiciones químicas, las variables controladas fueron: espacio en cabecera para acumulación de biogás, ajuste de pH y alcalinidad, concentración y relación inóculo sustrato. Se concluye que es fundamental poseer espacio en cabecera para la acumulación de biogás o algún dispositivo que actúe como acumulador de gas o para el desplazamiento de líquidos. Se ha observado que este es uno de los lugares donde se genera gran corrosión debido a la acumulación de gases como  $\text{SH}_2$ , la parte de reactor que queda sumergida en la mezcla a degradar no presenta corrosión, por lo tanto, debe hacerse hincapié en proteger el área expuesta a los gases trabajando a gran escala con resinas epoxi o acero inoxidable.

Como se menciona anteriormente el ajuste de pH y alcalinidad se vuelve uno de los parámetros principales para que la metanogénesis ocurra. Como se menciona anteriormente, la mayoría de los ensayos en batch se llevan a cabo a valores de pH que van de 7.0 a 7.8.

Como condiciones experimentales, los sistemas de medición de gas fueron estudiados para este trabajo de tesis. Luego de la utilización de sistemas de desplazamiento de líquido se optó por el uso de manómetros para el posterior cálculo del volumen de gas generado. Esto en conjunto con cromatografías gaseosas permitió definir los volúmenes de metano generados lo cual facilita las operaciones de medición a partir de una lectura directa, se recomienda este tipo de sistema tanto como los que logran una buena estanqueidad, los sistemas de desplazamiento y medición de volúmenes de líquidos, también resultan muy sencillos y exactos a la hora de cuantificación a escala laboratorio.

Sobre el potencial del orujo para la DA se concluye que es imprescindible el análisis de los sustratos a utilizar muestreadas in situ. A pesar que se dispone de datos bibliográfico en relación a la generación de biogás y el potencial energético de distintos sustratos, se vuelve muy importante sobre todo a la hora de la construcción de una planta de biogás a gran escala, la realización de ensayos, ya que la materia prima o sustrato o residuo utilizado puede variar de acuerdo a la región al proceso o tecnología a la que es sometida, por lo tanto, es fundamental para poder cuantificar las tasas de generación de residuos, sustratos o subproductos de biogás tanto como de sustancias corrosivas, presencia de inhibidores, tamaños de partícula y posibilidades para su aprovechamiento.

En el caso del orujo de uva podemos observar que su generación se concentra en la época de vendimia que comprende los meses de marzo, abril y mayo puede extenderse en algunos casos según los procesos de maceración, pero esta generación concentrada, plantea en algunos casos la necesidad de almacenamiento o de un esquema a gran escala donde pueda encontrarse una sucesión de posibles materias prima o sustratos a degradar a lo largo de todo el año. Por otro lado, al ser necesaria la energía durante los mismos procesos de vinificación se puede plantear el esquema de uso para esas mismas

fechas, dimensionando la planta de biogás para todo el volumen generado periódicamente. El problema radica que esta planta solo operaría en esas fechas. Por lo tanto, se debería estudiar bien su ubicación o la forma de poder recibir o tratar otros residuos generados en distintas épocas.

Al tratarse de un residuo de una humedad moderada a baja es posible el acopio del orujo en pilas, aunque hay que tener en cuenta que podrían ocurrir procesos de compostaje que incrementarían la temperatura y en algunos casos se deben tener precauciones ya que este incremento podría incendiar la pila. En cuanto a la granulometría del orujo, al ser partículas que son en general menores a un cm y aún más pequeñas, lo hacen un buen sustrato y soporte de bacterias.

Podemos observar que no existen muchas restricciones en cuanto a estos residuos sólidos en bodegas. El generador debe hacerse cargo y las cantidades pueden llegar a ser registradas en el formulario CEC05, pero no son controladas.

A partir de lo anteriormente expuesto se revela que un paso fundamental es, previo a cualquier proyecto para la generación de biogás y energías renovables en general, es la realización de un estudio de factibilidad o prefactibilidad donde prima la caracterización de la materia prima con el fin de obtener una imagen general de la idoneidad de esta materia (o mezclas) para una planta de biogás. Deben ser evaluados los problemas de estabilidad del proceso (inhibición, toxicidad), el valor del fertilizante del digerido y la economía general de un proyecto de biogás. Luego deben ser estudiadas todas las variables en relación al establecimiento o, en este caso, bodega o destilería

Mediante el resultado del estudio de prefactibilidad se definirá de la posibilidad de la implementación de un proyecto de biodigestión en el establecimiento, y su justificación técnica, económica y/o logística. Luego el estudio de factibilidad definirá el tipo de aprovechamiento energético del proyecto (térmico o eléctrico). La definición y descripción de la tecnología de biodigestión, tipo de reactores y materiales, la estimación preliminar del orden de inversión, de costos operativos, de mantenimiento y de ingresos y finalmente la ingeniería básica del proyecto.

#### 5.4 Implicaciones para políticas y prácticas

A partir de estos estudios se suceden algunas consideraciones para la definición de políticas de valorización energética en relación a la biomasa. Estos criterios pueden ser aplicados tanto en la práctica de la administración del sector privado como público.

Este trabajo deja algunas pautas sobre como analizar un residuo biomásico para su aprovechamiento energético en relación a la generación de biogás o a su potencial para el aprovechamiento térmico. Esto beneficiaría a nivel privado a bodegas, productores vitivinícolas y principalmente a cooperativas o

destilerías que son los establecimientos que concentran la mayor parte de la producción. También estos datos recopilados permiten valorar las zonas donde es más factible el aprovechamiento del recurso biomásico.

También se vuelve a remarcar que el éxito de un proyecto de generación de energía a partir de biomasa o biogás debe adaptarse muy bien a los residuos y efluentes generados, teniendo en cuenta en muchos casos la estacionalidad de la generación de los mismos, el esquema de producción, el sistema de aprovechamiento, debe vincularse a un sistema de producción donde se obtengan efluentes líquidos que sean susceptibles de ser digeridos, (principalmente líquidos tratados ya que aguas de lavado contienen detergentes tanto como sustancias antisépticas usadas en el proceso, esto con un tratamiento previo puede desactivarse)

El aporte a la matriz energética provincial podría ser de gran valor si se lograra el acopio y posterior digestión de una buena proporción del orujo producido en la provincia. Teniendo en cuenta la normativa actual donde cada empresa que consume 300 KW o más se ve obligada a abastecer el 8% de sus consumos eléctricos a partir de fuentes de energía renovable. Este aporte también hace a la diversificación de la matriz y habilita a nuevos actores, como pequeños productores que se contraponen a ciertos monopolios energéticos o grandes productores.

Otro punto clave es la soberanía energética, la posibilidad para distintos establecimientos de generar su propia energía y de convertirse en pequeños productores de energía, con el beneficio de la liberación de la disposición final de sus residuos y sus costos.

A nivel del sector público provincial, debido a que esta actividad es la más fuerte en la provincia en relación al resto del país, podría ser un medio para que la provincia pueda distribuir su energía renovable en relación a la biomasa. Otras posibles fuentes son lugares que concentran biomasa como la industria conservera, feed lots, granjas avícolas, establecimientos de producción porcina o sistemas de tratamientos de aguas residuales.

En cuanto a sistemas de tratamiento de aguas residuales la provincia cuenta con una buena experiencia y posee un sistema ejemplar de tratamiento conocido como lagunas de estabilización, como son Campo espejo y Paramillo. Las mismas están conformadas por un simple sistema de lagunas de polietileno de alto espesor, lo cual hace que el sistema sea simple y económico. El diseño de estos sistemas y su dimensionamiento asegura que los tiempos de residencia sean los óptimos para que los microorganismos puedan descomponer y eliminar los contaminantes. El agua residual va atravesando por gravedad una serie de piletas donde experimenta tratamiento biológico. Las primeras piletas donde es recibida son de mayor profundidad para lograr un tratamiento anaeróbico, luego esta agua avanza

hacia otra serie de piletas de menor profundidad donde el tratamiento es facultativo, por lo tanto, existe anaerobiosis en el fondo y la parte superficial es aerobia, finalmente piletas muy poca profundidad, aproximadamente 50cm donde se desarrollan microorganismos aerobios. Algo importante de este esquema de tratamiento, aparte de su bajo costo, es la posibilidad del riego en áreas de cultivo restringidos (ACRES). Debe tenerse en cuenta que en un primer momento campo espejó contó con una serie de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales. Los mismos no tuvieron éxito debido al alto mantenimiento que precisaban. En comparación con las lagunas que precisan un mantenimiento mínimo, su único requerimiento son grandes superficies donde el agua pueda ser tratada, lo cual en la provincia no es un impedimento.

Otro tema ambiental que no debe despreciarse es, en base a la generación de efluente o digerido. El día 24 de enero, mediante la resolución 19/2019 se formalizó un marco para el uso de digeridos, destinados al sector agropecuario. La medida queda a disposición de cada jurisdicción para su adopción de manera total o parcial. Se trata de una norma técnica para la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de DA.

Un detalle muy importante a tener en cuenta es que se observa a nivel internacional, principalmente tomado el caso de Alemania, quien en un principio otorgó beneficios con tarifas diferenciales para la generación de energía a partir de cultivos energéticos como maíz sorgo y silajes en general, lo cual en la actualidad no es rentable y por lo tanto las políticas actuales buscan beneficiar a proyectos que utilicen residuos y efluentes líquidos o aguas residuales. Este ejemplo deber ser considerado en el sector público, para el desarrollo de políticas futuras, sobre todo en relación al marco tarifario para biogás o biomasa, haciendo hincapié en el tipo de sustrato a utilizar para la generación de energía.

De igual manera para el sector privado se debe disponer de herramientas como el estudio de factibilidad, para sistemas que generen biomasa como residuo y la posibilidad de proveer energía a la red, dada la adhesión de la provincia de Mendoza a la ley de generación distribuida o de la simple obtención de energía para procesos internos. Un detalle no menor es que desde la creación del Programa RenovAr, fueron adjudicadas 40 plantas de biogás, por 74 MW, de entre las cuales cuatro de ellas ya están generando energía eléctrica.

En el caso particular del orujo de uva se recalca la necesidad de trabajar a nivel de destilerías o cooperativas como FECOVITA en evaluación de proyectos para de generación de energía en base a biomasa, mediante la realización de estudios de factibilidad y prefactibilidad para asegurar la rentabilidad de estos proyectos.

## 5.5 Limitaciones.

La provincia de Mendoza, por pertenecer a una región desértica modificada por el hombre, posee un recurso hídrico y biomásico limitado.

La tecnología para DA precisa en la mayoría de los diseños, para un óptimo funcionamiento, la dilución de los sustratos para lograr un contenido de 10% de sólidos totales. Esto implica en algunos casos altos requerimientos de agua para dilución. Este esquema podría ser insostenible en una provincia que dispone de un recurso hídrico limitado. Pero, si se observa desde la óptica de la necesidad de tratamiento de aguas residuales de distintos procesos, por ejemplo: industriales y cloacales, entonces, el esquema de generación de biogás se vuelve interesante. No debe descartarse el hecho que Mendoza posee una gran red de cloacas y que estas son tratadas en grandes superficies.

Existe en varios ámbitos la creencia que la solución a los problemas energéticos radica en la construcción de un biodigestor, y realmente no existe conciencia de las necesidades de este tipo de instalación como dilución o la gran cantidad de biomasa residual que se obtiene como efluente luego del tratamiento anaeróbico, la cual precisa una disposición final. Para ejemplificar, el orujo precisa de una dilución para lograr un 10 a un 20% de sólidos totales, por lo tanto, si se trabaja con sustratos con baja humedad, deberá tenerse en cuenta la necesidad de elevados volúmenes de agua o efluente líquido para lograr la concentración requerida. Se plantea que el éxito de estos sistemas reside en encontrar una fuente de agua residual susceptible de tratar por DA. También debe pensarse cuidadosamente el aprovechamiento del efluente generado, ya que en algunos casos luego de la dilución, el volumen de digerido puede ser mayor que el de sustrato. Por ejemplo, mediante conducción por sistemas de riego superficiales por simple desplazamiento por gravedad.

Por otro lado, el uso de biodigestores ha sido muy difundido en países de climas tropicales y cálidos, donde el proceso de DA se vuelve continuo. En la provincia, las bajas temperaturas invernales, dificultan la actividad de biodigestores y la degradación anaerobia en general. Se ha observado, luego de varios años de estudio, que los biodigestores construidos, sin sistema de control de temperatura, experimentan paradas invernales, con 15 grados Celsius en promedio, el biodigestor no produce cantidades significativas de gas.

Se remarca que parámetros como la dilución, temperatura y accesibilidad al agua y biomasa requieren de cierto estudio para la adaptación de esta tecnología a las características del clima y factores ambientales del lugar a instalar el biodigestor.

Otro factor importante a tener en cuenta es el bajo contenido de materia orgánica en los suelos de Mendoza. Esto ejerce presión sobre la agricultura para la incorporación de guanos, compost, orujo,

restos de poda, hojas, fertilizantes químicos, entre otros productos que hagan que el suelo pueda sostener la producción mendocina a través del tiempo. El efluente obtenido luego de la DA es un producto interesante para trabajar en este tipo de suelos, aunque también debe tenerse en cuenta que este mismo producto compite con los sustratos utilizados para degradar anaerobiamente. Es el ejemplo de orujos y guanos. Los cuales pueden ser utilizados directamente como enmiendas orgánicas o atravesar un proceso de compostaje y luego ser aplicados al suelo. También en la utilización del efluente como mejorador de debe tenerse en cuenta que la mayoría de los casos esto implicará un costo energético en su transporte, acopio y aplicación.

Otras limitaciones que se hicieron aparentes durante el progreso de la investigación fueron por ejemplo en una primera aproximación a la investigación, la recopilación de datos en relación a la generación de residuos agroindustriales, la cual se tornó complicada debido a que ninguna industria pretende exponerse como generador de residuos, en el caso del orujo se vuelve más simple ya que el INV fiscaliza toda la actividad vitivinícola de país.

Luego a nivel de ensayo de laboratorio, es complicado conseguir estándares básicos, la norma DIN no se encuentra accesible y en las primeras etapas de la investigación la misma no existía, en la actualidad la misma es costosa y en la provincia no se dispone de la misma. Para este trabajo de tesis llevó años lograr un protocolo estándar que abarcara las exigencias y las medidas publicadas para que los resultados obtenidos fueran comparables. Por lo tanto, se expone que se debe ser cuidadoso al desarrollar un ensayo para medir el potencial de residuos, no solo en relación a la posibilidad de obtener resultados comparables sino también en relación a la estanqueidad del sistema y a la posibilidad de medición o cuantificación del biogás obtenido.

Una limitante a nivel experimental es la necesidad de infraestructura de laboratorio, ya que los ensayos de degradación requieren reactores anaeróbicos y control de temperatura, junto con una serie de análisis que hacen muy costosa su ejecución.

La obtención de inóculos activos es complicada. En algunos casos los líquidos ruminales se encuentran mezclados con aguas de lavado que poseen detergentes lo cual se opone a la actividad de las bacterias metanogénicas. Se recomienda que la fuente de inóculo sea obtenida directamente del estómago de la vaca o de lugares donde se constata actividad metanogénica. También pueden contener otras sustancias antibióticas que impiden el desarrollo normal de los consorcios bacterianos que se encargan de la degradación.

Otro factor limitante es el hecho de trabajar con organismos vivos, deben cuidarse siempre las fluctuaciones de temperatura. Es conveniente que los sistemas, tanto a escala como industriales,

cuenten con aislación y sistema de calefacción. En el caso a escala de laboratorio es común el uso de baños termostatzados, estufas, y es común ver de heladeras operando como estufas. A escala piloto o industrial, se utilizan sistemas de calefacción con caldera y serpentines o sistemas donde se calienta la mezcla a incorporar. Por lo general se aprovecha la cogeneración para obtener calor para la calefacción de la planta de biogás.

A escala industrial se prevé, como ya fue expuesto en un principio, que los sistemas deberán adaptarse a las necesidades de tratamiento de los residuos, ya que el factor limitante puede ser por un lado el sustrato, debido a su oferta estacional, el medio líquido. La ubicación de la planta de biogás puede ser un factor limitante por lo que deberá emplazarse en un punto cercano a varias bodegas generadoras de residuos, en una planta de tratamiento de aguas residuales o en una destilería.

Un tema no menor a la hora del planteo de un proyecto de generación distribuida, si se considera la construcción de una planta para generar energía eléctrica, son los costos de la incorporación de la energía a la red, lo cual implica centrales transformadoras de alto costo. En estos casos la mejor alternativa es que la planta se localice cercana a una central transformadora.

Se debe ser consciente de todas estas limitaciones para elaborar proyectos o políticas rentables y sustentables en el tiempo. A pesar de estas limitaciones un biodigestor presenta la solución combinada a problemas ambientales, energéticos y de residuos.

Muchos de estos factores limitantes a la hora de un proyecto a gran escala son resueltos mediante un estudio de prefactibilidad quien marcaría los obstáculos a superar y las posibles alternativas para asegurar la sustentabilidad del proyecto.

## 5.6 Implicaciones para investigaciones posteriores

Esta sección final busca proveer algunas bases para futuras investigaciones. Por un lado, se tendrán en cuenta las oportunidades observadas a lo largo de este estudio de tesis y por otro los factores limitantes, para dirigir nuevas investigaciones.

Se observa la necesidad de desarrollo de una metodología más simple para los estudios de la valorización energética tanto como ensayos PBM y una estandarización de los mismos a nivel Nacional.

Por otro lado, surge el tema de la codigestión como la manera de mejorar el rendimiento en la digestión mediante la mezcla de sustratos que se complementen, por ejemplo, sustratos que juntos mejoren su relación C/N o para lograr la dilución del sustrato mediante la utilización de efluentes líquidos, esto se vuelve interesante a la hora de obtener buenos rendimientos. A nivel industrial se encuentran ciertas limitaciones ya que por lo general las aguas de lavado poseen detergentes. Los

líquidos obtenidos en procesos industriales poseen alta conductividad como es el caso de la producción de aceite de oliva. Esto también hace a una línea de investigación, el tratamiento de efluentes con alta conductividad, detergentes o antibióticos, para su posterior utilización.

Desde la óptica planteada en esta tesis, aparece la oportunidad del líquido ruminal como efluente líquido, ya que aporta gran cantidad de bacterias metanogénicas, que, en su estado puro, no posee sustancias inhibitoras de la digestión anaerobia. A su vez es un efluente que no es aprovechado, en comparación con otros residuos de la industria cárnica. Otro campo interesante para su estudio son los feed lots, que, en los últimos años tras la presión del cultivo de soja, que desplazó en gran parte a la ganadería que se vio confinada en estos sistemas de producción cerrada, donde el tratamiento de todos los residuos y efluentes generados se vuelve una prioridad en materia de higiene. Caso similar se presenta en la producción porcina.

Luego de estos años de estudios se observa claramente la tendencia de la valoración energética sobre residuos que en los comienzos de estos estudios apuntaba a cultivos energéticos. Como se vio en Alemania y varios países europeos donde sus normativas favorecieron a un esquema de generación de energía renovable en base a cultivos como maíz y diversos silajes y actualmente nos son rentables. Es por eso que otro tema importante para investigaciones futuras es el tratamiento de residuos en general, no solo industriales sino también residuos sólidos urbanos (RSU) y no solo tratamiento anaeróbico sino también su incineración para la generación de energía térmica y eléctrica.

En relación a este tema se abre la posibilidad del trabajo a nivel municipios, también en relación a mezclas con aguas residuales ya que los RSU, en general, poseen bajo contenido de humedad

Existen en la provincia varias instituciones que realizan pronósticos de cosecha (IDR, INV) y que cuantifican superficie cultivada y producción en relación a la localización geográfica, también en relación a la producción industrial (DEIE, INTI). Por lo tanto, se observa que a partir de los estudios realizados en esta tesis es factible vincular estos valores a los potenciales energéticos y elaborar predicciones sobre la generación de energía, preferentemente a nivel agroindustrial. Se remarca que en trabajos previos se estudió el potencial energético de residuos generados a nivel de cultivo, como restos de poda en vid, frutales y rastrojos obtenidos en cultivos anuales como topinambur y girasol, pero se observó que la energía necesaria para la recolección de los mismos no compensaba el aporte energético que podían proveer estos residuos y más aún en Mendoza, conociendo el bajo tenor de materia orgánica que poseen los suelos, no se recomienda eliminar estos rastrojos del suelo sino la incorporación de los mismos.

Dado que los distintos Oasis de la provincia concentran una gran cantidad de bodegas se plantea la posibilidad de la determinación de la ubicación de una planta de biogás en un radio cercano a la localización de la mayoría de estas bodegas.

En el marco del proyecto Probiomasa, el INTA y la FAO trabajan en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar la oferta, demanda y distribución de biomasa vegetal disponible en el país. La iniciativa busca poner en valor los recursos aprovechables para producir energías alternativas. Esto es realizado mediante el uso de la metodología WISDOM (Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles) desarrollada por el Programa de Dendroenergías de la FAO, en cooperación con el Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)". WISDOM es una herramienta que permite identificar, cuantificar y localizar la producción y el consumo de biocombustibles y otros eventuales recursos dendroenergéticos dentro de un área geográfica específica, y estimar su potencial. Para la representación y visualización de los datos e informaciones disponibles se utilizan SIG. Mediante el uso de este SIG se podría determinar la ubicación ideal para una planta de generación de energía renovable en base a orujo o en base a cualquier tipo de residuo.

Otro tema que debería ser estudiado son las capacidades o nivel escala de un biodigestor para lograr la rentabilidad mediante la construcción de equipos tecnificados provistos de calefacción agitación y sistemas automatizados para su alimentación y aprovechamiento de gases.

También el estudio de las diferentes corrientes residuales, industriales, agroindustriales, RSU y la mejor tecnología a emplear para la generación de energía, más limpia y con mejores rendimientos.

Otra herramienta que se dispone en estos momentos es el análisis de ciclo de vida (ACV). Es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación o disposición de los residuos). Esta puede ser aplicada para estudiar en el caso estudiado.



## Bibliografía

Aboudi, K., Álvarez-Gallego, C. J., y Romero-García, L. I. (2016). Biomethanization of sugar beet byproduct by semi-continuous single digestion and co-digestion with cow manure. *Bioresource Technology*, 200(Supplement C), 311–319.

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, & S. & Janssen, R. (2008). *Biogas handbook*. Esbjerg.: University of Southern Denmark.

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, & S. & Janssen, R. (2013). Biomass resources for biogas production. In A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The Biogas handbook* (p. 463). Oxford: Woodhead Publishing.

Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., & Bodiroza, V. (2006). Optimising methane yield from anaerobic digestion. *International Congress Series 1293*, 217-220.

Amon, T., Kryvoruchko, V., & Schereiner, M. (2004). *Untersuchungen zur Wirkung von Rohglycerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle*. Wien: Department für Nachhaltige Agrarsysteme - Institut für Landtechnik.

Angelidaki, I. A. (2007). *Anaerobic Biodegradation, Activity and Inhibition (ABAI) Task Group Meeting 9th to 10th October 2006, in Prague*. Dinamarca: Lyngby: Institute of Environment & Resources, Technical University of Denmark.

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, L., Guwy, A. J., . . . van Lier, J. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, IWA Publishing, 927-934.

Antoniolli, A., Fontana, A., & Bottini, R. (2018). Revelando el potencial de los residuos vitivinícolas. *Experticia*.

Arvanitoyannis, I., Ladas, D., & Mavromatis, A. (2006). Potential uses and applications of treated wine waste: a review. . *International Journal of Food Science & Technology* 41, 475-487.

ASTM. (2009). *ASTM D240 - Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter*. ASTM.

Ballesteros Perdrüices, M. (2004). La biomasa como fuente de energía: biocombustibles. *La biomasa como fuente de energía: biocombustibles*. Mercedes Ballesteros PerIX Jornadas Ambientales (p. 293).

Salamanca: La biomasa como fuente de energía: biocombustibles. Mercedes Ballesteros Perdruiques. Energías y medio ambiente: IX Jornadas Ambientales. Francisco Javier Calvo Pedro Ramos Castellanos. Universidad de Salamanca.

Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Elsevier.

Bird, K., Chynoweth, D., & Jerger, D. (1990). Effects of marine algal proximate composition on methane yields. *Journal of Applied Phycology*, 207-213.

Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás apturado de Residuos Sólidos Urbanos*. Buenos Aires: Nota Técnica BID.

Blok, J., De Morsier, A., & Gerike, P. (1985). Harmonisation of ready biodegradability tests. *Chemosphere*, 1805–1820.

Braga, F., L. e., & Alves, A. (2002). Recovery of winery by-products in the Douro Demarcated Region: Production of calcium tartrate and grape pigments. *American Journal of Enology and Viticulture*, 41–45.

Brammer, J., & Bridgwater, A. (2002). The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier–engine CHP system. *Biomass Bioenergy* 22, 271-281.

Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2004). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. Nueva York: McGraw-Hill.

Chynoweth, D., Turick, C., Owens, J., Jerger, D., & Peck, M. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, Vol 5, N°1, 95-111.

Compañía administradora del mercado mayorista eléctrico. (2011, 01 01). CAMMESA. Retrieved 11 01, 2016, from RenovAr Ronda 1. Plan de Energías Renovables Argentina 2016-2025: <http://portalweb.cammesa.com/Pages/RenovAr.aspx>

Consejo Nacional de Producción Limpia. (2010). *Manual de mejoras técnicas disponibles sector vitivinícola región del Maule*. Santiago: TECNOLIMPIA.

Cooperativas Agroalimentarias. (2010). *Manual de ahorro y eficiencia energética de sector. Bodegas*. Madrid: Ministerio de Ambiente. Gobierno de España.

Corporación Chilena del Vino; Consejo Nacional de Producción Limpia. (2011). *Manejo de Herramientas en Producción Limpia*. Santiago: Consejo Nacional de Producción Limpia.

de Groot, L., & Bogdanski, A. (2013). *BIOSLURRY = BROWN GOLD? A review of scientific literature on the co-product of biogas production*. Roma: FAO.

Demirbas, A. (2010). Fuels from biomass. In A. Demirbas, *Biorefineries for biomass upgrading* (pp. 33-74). Londres: Springer.

Departamento de Estadísticas INV. (2018, 05 26). *Instituto Nacional Vitivinícola*. Retrieved from INV: [http://www.inv.gov.ar/inv\\_contenidos/pdf/estadisticas/tespeciales/2015/BODEGAS\\_INSCRIPTAS\\_Y\\_ELABORADORAS\\_\\_2006\\_AL\\_2015.pdf](http://www.inv.gov.ar/inv_contenidos/pdf/estadisticas/tespeciales/2015/BODEGAS_INSCRIPTAS_Y_ELABORADORAS__2006_AL_2015.pdf)

Departamento General de Irrigación. (2018). *Departamento General de Irrigación*. Retrieved from Pronóstico de Escurrimiento de Caudales año 2017/2018: [http://www.irrigacion.gov.ar/dgi/sites/default/files/pronostico\\_2017\\_2018.pdf](http://www.irrigacion.gov.ar/dgi/sites/default/files/pronostico_2017_2018.pdf)

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources*. Strauss, Alemania: Wiley-VCH.

Devesa-Rey, R., Vecino, X., Varela-Alende, J., Barral, M., Cruz, J., & Moldes, A. (2011). Valorization of winery waste vs. the costs of not recycling. *Waste Manage*(31), 2327–2335.

Dhussa, A. (2016). *Biogas in India*. Bombay: Ministry of New and Renewable Energy, India.

Digman, B., & Kim, D. (2008). Review: alternative energy from food processing wastes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 27, 524–537.

Dinuccio, E., Balsari, P., Gioelli, F., & Menardo, S. (2010). Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology* 101, 3780–3783.

Ecobiotermica. (2013). *Ecobiotermica*. Retrieved from Calderas Industriales: Ecobiotermica

ENARGAS. (2018, 9 19). *Enargas.gob.ar*. Retrieved from Calculador de consumos de gas en el hogar: <https://www.enargas.gob.ar/secciones/eficiencia-energetica/estimador-factura/estimador-consumo.php>

EPA. (2019). *Landfill Methane Outreach Program*. Retrieved from Energy Projects Profiles : <http://www.epa.gov/lmop/projects-candidates/profiles.html>.

Ermeninto, S. (2016). *Resultados del Relevamiento Nacional de Biodigestores*. Bueno Aires: FAO-INTI-PROBIOMASA.

Esposito, G., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). The Open Environmental Engineering Journal, Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates. *The Open Environmental Engineering Journal*, 1-8.

FAO. (2004). *Unified Bioenergy Terminology*. Roma: Wood energy Program. FAO.

FAO. (2019). *Relevamiento Nacional de Biodigestores. Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico. Colección Documentos Técnicos N° 6*. Buenos Aires.

Fiori, L., & Florio, L. (2010). Gasification and combustion of grape marc: comparison among different scenarios. *Waste Biomass Valorization* 1, 191–200.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *FAOSTAT Data: Crops*. Retrieved 01 31, 2019, from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

Foster-Carniero T., P. M. (2008). Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste. *Bioresource Technology*, 6994-7002.

Fountoulakis, M., S., D., Terzakis, S., Georgaki, S., & Manios, T. (2008). Potential for methane production from typical Mediterranean agro-industrial by-products. *BIOMASS AND BIOENERGY*, 155–161.

Fuentes-Pila, J., & García, J. L. (2014). *Manual de eficiencia energética en bodegas*. Madrid: Tesla.

Goldstein, R. (2006). *Update: The state of US landfill gas utilization projects*. Retrieved from <http://www.energyvortex.com/files/landfillgasupdate11-06.pdf>.

González Sanchez, M., & Pérez Fabiela, S. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 229-235.

Gopinath, K., Sankaranarayanan, A., & Nivedhitha, L. (2016). Chapter 20 – Platform Chemical Biorefinery and Agroindustrial Waste Management. In S. K. Brar, S. J. Sarma, & K. Pakshirajan, *Platform Chemical Biorrefinery* (p. 528). Amsterdam: Elsevier.

Grassi, L. (2012). *Relevamiento de proyectos bioenergéticos en Argentina*. Buenos Aires: PROBIOMASA – UTF/ARG/020/ARG.

Groppeli, E., & Giampaolli, O. (2007). *El Camino de la Biodigestión*. Santa Fé: UNL- Proteger.

Gunaseelan, N. V. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetables. *Biomass and Bioenergy*, 389-399.

Guo, P., Saw, W., van Eyk, P., Stechel, E., de Nys, R., Ashman, P., & Nathan, G. (2017). Gasification reactivity and physicochemical properties of the chars from raw and torrefied wood, grape marc, and macroalgae. *Energy Fuels* 31, 2246–2259.

Hansen TL, S. J. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Manage*, 24:393–400.

Hansen, T., Schmidt, J., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J., & Mosbaek, H. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Manage*, 24:393–400.

Hashimoto, A. (1989). Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and production rate from straw. *Biological Wastes* , 247–55.

Hernández, J., Aranda-Almansa, G., & Bula, A. (2010). Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: effect of the particle size and the residence time. *Fuel Processing Technology* 91, 681–692.

Hidalgo Togados, J. (2003). *Tratado de Enología*. Madrid: Mundi Prensa.

Hillbert, J. A. (2000). *Manual para la Producción de Biogás*. CASTELAR: Instituto de Ingeniería Rural INTA CASTELAR.

Hixson, J., Wilkes, E., Smith, P., & Forsyth, K. (2017). Understanding the composition of grape marc and its potential as a livestock feed supplement. *AWRI Tech*, 11–15.

Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., & Angelidaki, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science & Technology*. 74, 2515-2522.

IDAE. (2019, 07 27). IDAE. Retrieved from BASES DE DATOS/HERRAMIENTAS: [https://www.idae.es/.../documentos\\_PCI\\_Combustibles\\_Carburantes\\_final\\_valores\\_Update\\_2](https://www.idae.es/.../documentos_PCI_Combustibles_Carburantes_final_valores_Update_2)

Indiveri, M. E., Llamas, S., Maroto, C., & Angileri, N. (2015). Utilización de orujo agotado para la producción de biogás. *VI Simposio Iberoamericano de Residuos Sólidos*. (pp. 591-595). Cartago, Costa Rica: TEC.

Indiveri, M. E., Mercante, I., & Llamas, S. (2019). Generación y aprovechamiento de biogás a partir de residuos sólidos urbanos y agroindustriales en la provincia de Mendoza, Argentina. In A. Gallardo Izquierdo, F. J. Colomer Mendoza, R. Campos Rodriguez, & D. Arias Aguilar, *Aprovechamiento energético de residuos sólidos* (p. 265). Castelló de la Plana: Publicaciones de la Universitat Jaume I.

Indiveri, M., Maroto, C., & Llamas, S. (2016). Metodología para realización de ensayos de generación de biogás a partir de residuos sólidos urbanos. *Pre Jornadas AUGM*.

Indiveri, M., Perez, P., N., A., & Maroto, C. (2012). Utilizacion de orujo agotado para la produccion de biogás.

Institut für Energetik und Umwelt gGmbH. (2009). *Handreichung. Biogasgewinnung und-nutzung*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.

Instituto Nacional de Vitivinicultura. (2018). *Informe anual de cosecha y elaboración*. Mendoza: INV.

Instituto Nacional de Vitivinicultura. (2019, 01 01). *Argentina.gob.ar*. Retrieved 01 29, 2019, from <https://www.argentina.gob.ar/inv/principales-datos-vitivinicolos>

INV. (2018, 05 13). *Instituto Nacional de Vitivinicultura*. Retrieved from [http://www.inv.gov.ar/inv\\_contenidos/pdf/fiscalizacion/DESTILERIASSETILICO.pdf](http://www.inv.gov.ar/inv_contenidos/pdf/fiscalizacion/DESTILERIASSETILICO.pdf)

KPMG. (2014). *Survey on renewable energies*. Buenos Aires: KPMG International.

Lafka, T.-I., Sinanoglou, V., & Lazos, E. (2007). On the extraction and antioxidant activity of phenolic compounds from winery wastes. *Food Chemistry* 104, 1206–1214.

Landfill Methane Outreach Program. (2015). *LFG Energy Project Development Handbook. Landfill Methane Outreach Program. USEPA*. Retrieved from USEPA: <http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>

Lapuerta, M., Hernández, J., Pazo, A., & López, J. (2008). Gasification and cogasification of biomass wastes: effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. *Fuel Processing Technology*. 89, 828–837.

Liu, Y. (2017, Noviembre 7). Biogás en China. Buenos Aires, Argentina: Biogas Institute of Ministry of Agriculture (BIOMA) P.R.China.

Maciejczyk, M. (2017). *Situación del biogás en Alemania*. Freising: Fachverband Biogas.

Marculescu, C., & Ciuta, S. (2013). Wine industry waste thermal processing for derived fuel properties improvement. *Renew. Energy* 57, 645–652.

Martinez, G., Rebecchi, S., Decorti, D., Domingos, J., Natolino, A., Del Rio, D., . . . Fava, F. (2016). Towards multi-purpose biorefinery platforms for the valorisation of red grape pomace: production of polyphenols, volatile fatty acids, polyhydroxyalkanoates and biogas. *Green Chemistry*, 261-270.

Mendes, J., Xavier, A., Evtuguin, D., & Lopes, L. (2013). Integrated utilization of grape skins from white grape pomaces. *Ind. Crops Prod.* 49, 286–291. *Industrial Crops and Products*, 286–291.

Menéndez, J. E. (2013). *Cuantificación y uso de Biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía*. Buenos Aires: INTA.

Ministerio de hacienda y finanzas públicas. (2016). *Informes productivos provinciales. Mendoza*. Buenos Aires. Retrieved 06 16, 2019, from [https://www.economia.gob.ar/peconomica/dnper/fichas\\_provinciales/SSPE\\_Informe\\_Productivo\\_Pcial-Mendoza.pdf](https://www.economia.gob.ar/peconomica/dnper/fichas_provinciales/SSPE_Informe_Productivo_Pcial-Mendoza.pdf)

Miranda, M., Arranz, J., Román, S., Rojas, S., Montero, I., López, M., & Cruz, J. (2011). Characterization of grape pomace and pyrenean oak pellets. *Fuel Processing Technology* 92, 278-283.

Muhlack, R. A., Potumarthi, R., & Jeffery, D. W. (2018). Sustainable wineries through waste valorisation: A review of grape marc utilisation for value-added products. *Waste Management*, 99–118.

Organización Internacional de la Viña y el Vino. (2012). *Vine and Wine Outlook*. Paris: OIV. Retrieved from <http://www.oiv.int/public/medias/4524/oiv-vine-and-wine-outlook-2012-completfinal.pdf>

Owens, J., & Chynoweth, D. (1993). Biochemical Methane Potential of Municipal Solid Waste components. *Water Science & Technology*, 1-14.

Peral, R. (2018, Marzo 18). Ingeniero . (M. E. Indiveri, Interviewer)

Programa GENREN. (2010). *Licitación de Generación Eléctrica a partir de Fuentes Renovables*. Buenos Aires: Secretaría de Energía.

Raposo, F., De la Rubia, M., Fernández-Cegrí, V., & R., B. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 861–877.

Romero Rojas, J. A. (2008). *Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romito, L. (2015). *Eficiencia energética y su aplicación en la industria vitivinícola*. Mendoza: Tesis de maestría en Energía. UNCUYO.

Secretaría de Ambiente de la Nación. (2019, 01 25). *Energía Estratégica*. Retrieved 02 05, 2019, from <http://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2019/01/5669678A01.pdf>

Secretaría de Energía. (2009). *Licitación de Generación Eléctrica a partir de Fuentes Renovables, Programa "GENREN"*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Secretaría de Gobierno de Energía. (2018, 14 11). *Argentina.gob.ar*. Retrieved 02 04, 2019, from <https://www.argentina.gob.ar/energia/generacion-distribuida>

Secretaría de Gobierno de Energía. (2018). *Resolución 100/2018*. Buenos Aires: Ministerio de Hacienda.

Singhania, R., Patel, A., & Pandey, A. (2016). Biotechnology for Agricultural Waste Reciclyng. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Solid Waste Managment* (pp. 223-240). Mohali.

Subsecretaría de Energías Renovables. (2018, 08 01). *Argentina.gob.ar*. Retrieved 02 04, 2019, from [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/20180906\\_miniren\\_sk\\_2.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/20180906_miniren_sk_2.pdf)

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Madrid: McGraw-Hill.

Terrero, R. (2019, 3 1). Director Estadísticas INV. (E. Indiveri, Interviewer)

Terrero, R. (2019, 03 05). Promedio serie 2008 al 2018 de ingreso de uvas para elaboración en bodegas de la provincia de Mendoza. Datos en quintales. (E. Indiveri, Interviewer) Mendoza, Mendoza, Argentina: INV.

Torres, J., Varela, B., García, M., Carilla, J., Matito, C., Centelles, J., . . . Bobet, R. (2002). Valorization of grape (*Vitis vinifera*) byproducts Antioxidant and biological properties of polyphenolic fractions differing in procyanidin composition and flavonol content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 7548-7555.

Toscano, G., Riva, G., Duca, D., Pedretti, E., Corinaldesi, F., & Rossini, G. (2013). Analysis of the characteristics of the residues of the wine production chain finalized to their industrial and energy recovery. *Biomass Bioenergy* 55, 260-267.

USEPA. (2006). *LFG Energy Project Developmet Hadbook*. Retrieved from <http://www.epa.gov/lmop/publications-tool/handbook.html>.

UTN. (2004). *Estudio del SGIRSU del Área Metropolitana de Mendoza*. Mendoza.

van Eyk, P., Muhlack, R., & Ashman, P. (2009). Gasification of grape marc in a circulating fluidised bed. *Australian Combustion Symposium. University of Queensland*, 175-178.

VDI 4630. (2006). Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrates, sampling, collection of material data, fermentation tests. . *VDI Handbuch* . Energietechnik.

Zhang, Q., Hu, J., y Lee, D. J. (2016). Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. *Renewable Energy*, 98, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>



# Anexos

---

## 6. Anexos

En este apartado se desarrollan cálculos detallados y tablas extensas que se encuentran sintetizados en el cuerpo del trabajo.

### 6.1. Desarrollo de cálculos de resultados.

Se presentan a continuación tablas basadas en las planillas de cálculos realizados y presentados en el capítulo IV, resultados.

**Tabla 35: Detalles analíticos para determinación de ST, SV y cenizas.**

Cápsula N°	Peso Cápsula (g)	Contenido	Peso Muestra + Cápsula (g)	Peso Muestra (g)	Peso Seco + Cápsula (g)	Peso Seco (g)	Cenizas + Cápsula (g)	Cenizas (g)	% ST	% ST Promedio	%SV	%SV Promedio	% Cenizas	% Cenizas Promedio
125mL	59.718	Rumen 1	129.185	69.467	60.6776	0.9596	60.2217	0.5037	1.38%	1.43%	47.51%	48.11%	52.49%	51.89%
136-140	66.604	Rumen 2	148.718	82.114	67.815	1.211	67.2251	0.6211	1.47%	1.43%	48.71%	48.11%	51.29%	51.89%
137-225	70.686	Orujo 1	125.84	55.154	103.697	33.011	73.468	2.782	59.85%	58.64%	91.57%	91.43%	8.43%	8.57%
137-270	97.249	Orujo 2	170.51	73.261	139.316	42.067	100.915	3.666	57.42%	58.64%	91.29%	91.43%	8.71%	8.57%

Fuente: elaboración propia

**Tabla 36: Detalles analíticos para cálculo de ST, SV y componentes por reactor**

Tratamiento	Componente	Masa en reactor (kg)	Densidad (g/mL)	Volumen en reactor (L)	Volumen total en reactor (L)	Masa total en reactor (kg)	%ST	%SV	Cenizas %	ST por componente (kg)	ST en reactor (kg)	SV por comp (kg)	SV en reactor(kg)	g SV/L inoculo	kgST/L	%ST en reactor	%SV en reactor
Inoculo (1A-1B)	Inoculo	1.60	1.00	1.60	2	2	0.01	48.10	51.90	0.02	0.02	0.01	0.01	6.73	0.01	1.12	0.67
Orujo (2A-2B-2)	Inoculo	1.60	1.00	1.60	2	2.05	0.01	48.10	51.90	0.02	0.28	0.01	0.25	156.79	0.14	14.25	12.54
	Orujo	0.45	1.22	0.4	2	2.05	0.59	91.45	8.55	0.26	0.24	0.24	0.25	156.79	0.14	14.25	12.54

Fuente: elaboración propia

Se detalla en tabla 36 los resultados analíticos de sustrato e inóculo utilizados y en tabla 37 el cálculo para la carga de reactores.

**Tabla 38: Presiones acumuladas por día en kg/cm<sup>2</sup>**

		Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		Fecha	22-oct	23-oct	24-oct	25-oct	26-oct	27-oct	28-oct	29-oct	30-oct	31-oct	
		Venteo	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	no	no	SI	
Tratamiento	1	A	0.10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
		B	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.55
		C	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.5
		Media	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.52
	2	A	0.40	0.4	0.71	0.78	1	1	1	1	1	1	1.7
		B	0.35	0.35	0.60	0.73	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1.5
		C	0.40	0.4	0.65	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.55
		Media	0.38	0.38	0.65	0.80	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	1.58

		Día	11	12	13	14	15	17	18	19	20	21
		Fecha	01-nov	02-nov	03-nov	04-nov	05-nov	07-nov	08-nov	09-nov	10-nov	11-nov
		Venteo	NO	NO	SI	SI	no	SI	No	No	No	SI
Tratamiento	1	A	0.7	1	<b>1.25</b>	1.6	1.75	2.4	2.4	2.53	2.8	2.95
		B	0.85	1.15	<b>1.4</b>	1.75	1.88	2.15	2.15	2.28	2.55	2.65
		C	0.7	1	<b>1.2</b>	1.7	2	2.55	2.55	2.85	2.95	3.15
		Media	0.75	1.05	<b>Ane</b>	1.68	1.88	2.37	2.37	2.55	2.77	2.92
	2	A	2.1	2.55	<b>2.95</b>	3.55	3.68	4.15	4.45	4.65	4.95	5.4
		B	1.95	2.35	<b>2.75</b>	3.25	3.375	3.75	3.95	4.1	4.35	4.65
		C	2.05	2.55	<b>3.05</b>	3.55	3.68	4.4	4.75	4.87	5.1	5.35
		Media	2.03	2.48	<b>2.92</b>	3.45	3.58	4.10	4.38	4.54	4.80	5.13

		Día	22	25	26	27	28	29	31	32	33	34
		Fecha	12-nov	15-nov	16-nov	17-nov	18-nov	19-nov	21-nov	22-nov	23-nov	24-nov
		Venteo	no	no	SI	no	no	no	no	no	no	SI
Tratamiento	1	A	3	3.3	3.45	3.45	3.5	3.65	3.95	4.05	4.25	<b>4.35</b>
		B	2.7	3	3.15	3.15	3.35	3.35	3.6	3.75	3.95	<b>4.05</b>
		C	3.275	3.65	3.7	3.75	3.9	3.95	4.2	4.3	4.4	<b>4.5</b>
		Media	2.99	3.32	3.43	3.45	3.58	3.65	3.92	4.03	4.20	<b>4.30</b>
	2	A	6	7.1	7.3	7.6	7.8	8	8.5	8.65	8.9	<b>9.1</b>
		B	4.9	5.65	5.95	6.2	6.45	6.65	7.15	7.35	7.55	<b>7.75</b>
		C	5.7	6.5	6.75	7.2	7.5	7.8	8.3	8.55	8.85	<b>9.05</b>
		Media	5.53	6.42	6.67	7.00	7.25	7.48	7.98	8.18	8.43	<b>8.63</b>

		Día	35	40	41	45	46	47	52	53	54	55
		Fecha	25-nov	30-nov	01-dic	05-dic	06-dic	07-dic	12-dic	13-dic	14-dic	15-dic
		Venteo	NO	NO	no	no	no	SI	no	no	no	no
Tratamiento	1	A	4.55	4.95	5.1	5.35	5.45	5.45	5.6	5.65	5.7	5.73
		B	4.25	4.65	4.75	4.95	4.95	4.95	5.1	5.2	5.25	5.3
		C	4.8	5.35	5.55	5.8	5.85	5.9	6.15	6.3	6.35	6.35
		Media	4.53	4.98	5.13	5.37	5.42	5.43	5.62	5.72	5.77	5.79
	2	A	9.5	10.6	11.05	12.3	12.55	12.75	13.65	13.85	14.05	14.1
		B	8.15	9.35	9.65	10.65	10.85	11.05	11.8	11.95	12.15	12.25
		C	9.55	10.85	11.55	12.45	12.65	12.8	13.55	13.7	13.85	13.95
		Media	9.07	10.27	10.75	11.80	12.02	12.20	13.00	13.17	13.35	13.43

		Día	56	61	63
		Fecha	16-dic	21-dic	23-dic
		Venteo	no	SI	SI
Tratamiento	1	A	5.75	6	6
		B	5.35	5.55	5.65
		C	6.4	6.6	6.7
		Media	5.83	6.05	6.12
	2	A	14.35	14.95	15.25
		B	12.35	12.75	12.95
		C	14.1	14.55	14.75
		Media	13.60	14.08	14.32

Fuente: Elaboración propia

En la tabla presentada se presentan las presiones acumuladas, registradas periódicamente a lo largo del ensayo. Se pueden apreciar, fechas, número de día y realización de operación de venteo.

A partir de las presiones presentadas en tabla 38 y mediante la ecuación 1 se calculan los volúmenes de gas generados, presentados como acumulados en tabla 39. También se presentan las temperaturas registradas en cada medición.

$$V = \frac{n [\text{moles}] \times 0.082 \left[ \frac{\text{ATM} \times \text{L}}{\text{mol} \times \text{K}} \right] \times (273 + t[^\circ\text{C}]) [\text{K}]}{\frac{P \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]}{1,033} + 1\text{ATM}}$$

Ecuación 12

**Tabla 39: Cálculo de volúmenes acumulados en Nm<sup>3</sup>**

		<b>1</b>		<b>5</b>		<b>6</b>		<b>7</b>		<b>10</b>		
<b>Día</b>												
<b>Fecha</b>		22-oct		26-oct		27-oct		28-oct		31-oct		
<b>Temperatura</b>		35		39		38		38		35.5		
<b>Venteo</b>		SI		SI		SI		SI		SI		
<b>Parámetro</b>		Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	
<b>Tratamiento</b>	<b>1</b>	<b>A</b>	0.1	0.19	0.1	0.19	0.1	0.19	0.1	0.19	0.5	0.94
		<b>B</b>	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.55	1.03
		<b>C</b>	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.5	0.94
		<b>Media</b>	0.07	0.13	0.07	0.13	0.07	0.13	0.07	0.13	0.52	0.97
	<b>2</b>	<b>A</b>	0.4	0.75	1	1.87	1	1.87	1	1.87	1.7	3.18
		<b>B</b>	0.35	0.66	0.85	1.59	0.85	1.59	0.85	1.59	1.5	2.81
		<b>C</b>	0.4	0.75	0.9	1.69	0.9	1.69	0.9	1.69	1.55	2.90
		<b>Media</b>	0.38	0.71	0.92	1.72	0.92	1.72	0.92	1.72	1.58	2.96

		<b>13</b>		<b>14</b>		<b>17</b>		<b>21</b>		<b>26</b>		
<b>Día</b>												
<b>Fecha</b>		03-nov		04-nov		07-nov		11-nov		16-nov		
<b>Temperatura</b>		37		38.5		36.5		37		37		
<b>Venteo</b>		SI		SI		SI		SI		SI		
<b>Parámetro</b>		Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	
<b>Tratamiento</b>	<b>1</b>	<b>A</b>	<b>1.25</b>	<b>2.34</b>	1.6	3.00	2.4	4.50	2.95	5.53	3.45	6.46
		<b>B</b>	<b>1.4</b>	<b>2.62</b>	1.75	3.28	2.15	4.03	2.65	4.96	3.15	5.90
		<b>C</b>	<b>1.2</b>	<b>2.25</b>	1.7	3.18	2.55	4.78	3.15	5.90	3.7	6.93
		<b>Media</b>	<b>1.28</b>	<b>2.40</b>	1.68	3.15	2.37	4.44	2.92	5.47	3.43	6.43
	<b>2</b>	<b>A</b>	<b>2.95</b>	<b>5.53</b>	3.55	6.65	4.15	7.77	5.4	10.12	7.3	13.67
		<b>B</b>	<b>2.75</b>	<b>5.15</b>	3.25	6.09	3.75	7.02	4.65	8.71	5.95	11.15
		<b>C</b>	<b>3.05</b>	<b>5.71</b>	3.55	6.65	4.4	8.24	5.35	10.02	6.75	12.64
		<b>Media</b>	<b>2.92</b>	<b>5.47</b>	3.45	6.46	4.1	7.68	5.13	9.61	6.67	12.49

Día		34		47		61		63		
Fecha		24-nov		07-dic		21-dic		23-dic		
Temperatura		36.5		36.5		36.5		36.5		
Venteo		SI		SI		SI		SI		
Parámetro		Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	Volum (Ncm <sup>3</sup> )	
Tratamiento	1	A	4.35	8.15	5.45	10.21	6	11.24	6	11.24
		B	4.05	7.59	4.95	9.27	5.55	10.40	5.65	10.58
		C	4.5	8.43	5.9	11.05	6.6	12.36	6.7	12.55
		Media	4.3	8.05	5.43	10.17	6.05	11.33	6.12	11.46
	2	A	9.1	17.05	12.75	23.88	14.95	28.01	15.25	28.57
		B	7.75	14.52	11.05	20.70	12.75	23.88	12.95	24.26
		C	9.05	16.95	12.8	23.98	14.55	27.26	14.75	27.63
		Media	8.63	16.17	12.2	22.85	14.08	26.38	14.32	26.82

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla relaciona los volúmenes obtenidos en Nm<sup>3</sup> con los componentes por reactor mediante estos se obtiene el cálculo final de L CH<sub>4</sub>/kg SV.

Tabla 40: valores utilizados para el cálculo final de L CH<sub>4</sub>/kg SV

Tratamiento	Componente	Masa en reactor (MF) [kg]	ST por componente (kg) [kg]	ST en reactor [kg]	SV por comp [kg]	SV en reactor [kg]	Biogás/ Reactr [Nm <sup>3</sup> ]	CH <sub>4</sub> / Reactr [Nm <sup>3</sup> ]
1	Inóculo	1.6	0.0224	0.0224	0.011	0.01	0.011	0.0075
	Inóculo	1.6	0.0224	0.0224	0.011	0.01	0.011	0.0075
2	Orujo	0.45	0.26253	0.28	0.240	0.25	0.027	0.0165

Tratam	Comp	Biogás/ Comp [Nm <sup>3</sup> ]	CH <sub>4</sub> / Comp [Nm <sup>3</sup> ]	Biogás/ MF [Nm <sup>3</sup> /kg]	CH <sub>4</sub> / MF [Nm <sup>3</sup> /kg]	Biogás/ST [Nm <sup>3</sup> /kg]	CH <sub>4</sub> / ST [Nm <sup>3</sup> /kg]	Biogás/ SV [Nm <sup>3</sup> /kg]
1	Inóculo	0.011	0.0075	0.512	0.3344	0.5115	0.334	1.063
	Inóculo	0.011	0.0075	0.512	0.3344	0.5115	0.334	1.063
2	Orujo	0.015	0.0090	0.0585	0.0343	0.0585	0.063	0.064

Fuente: Elaboración propia.

Se aclara que se observan altos valores en generación de gas por kg de sólidos en el inóculo ya que estos se encuentran muy diluidos. Por lo tanto, para generar estos volúmenes de gas se precisaría un gran volumen de inóculo.

En base a las cromatografías realizadas y a la determinación de los porcentajes molares de CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> se calcula la energía generada por etapa.

**Tabla 41: Cálculo Energético Etapa 1.**

Ensayo	P Acum. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Nº moles	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	Q CH4	Q H2	Q 1 <sup>ra</sup> fase	
			[% molar]	[% molar]	[kCal]	[kCal]	[kCal]	
<b>1</b>	<b>A</b>	1.25	0.095	32.49	0	6.52	0	6.52
	<b>B</b>	1.4	0.107	36.95	0	8.30	0	8.30
	<b>C</b>	1.2	0.091	27.73	0	5.34	0	5.34
<b>Media</b>	<b>1,28</b>	<b>0.10</b>	<b>32.39</b>	<b>0</b>	<b>6.67</b>	<b>0</b>	<b>6.72</b>	
<b>2</b>	<b>A</b>	2.95	0.225	44.43	0	21.04	0	21.04
	<b>B</b>	2.75	0.209	43.53	0	19.22	0	19.22
	<b>C</b>	3.05	0.232	45.13	0	22.10	0	22.10
<b>Media</b>	<b>2,92</b>	<b>0.22</b>	<b>44.36</b>	<b>0</b>	<b>20.77</b>	<b>0</b>	<b>20.79</b>	

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 42: Cálculo Energético Etapa 2.**

Ensayo	P Acum. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Nº moles	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	Q CH4	Q H2	Q 2 <sup>da</sup> fase	
			[% molar]	[% molar]	[kCal]	[kCal]	[kCal]	
<b>1</b>	<b>A</b>	3.1	0.236	66.12	0	32.91	0	32.91
	<b>B</b>	2.65	0.202	67.90	0	28.89	0	28.89
	<b>C</b>	3.3	0.251	62.09	0	32.89	0	32.89
<b>Media</b>	<b>3.02</b>	<b>0.23</b>	<b>65.37</b>	<b>0</b>	<b>31.66</b>	<b>0</b>	<b>31.56</b>	
<b>2</b>	<b>A</b>	6.15	0.468	62.30	0	61.51	0	61,51
	<b>B</b>	5	0.381	61.10	0	49.04	0	49,04
	<b>C</b>	6	0.457	61.16	0	58.91	0	58,91
<b>Media</b>	<b>5.72</b>	<b>0.44</b>	<b>61.52</b>	<b>0</b>	<b>56.46</b>	<b>0</b>	<b>56.49</b>	

Fuente: elaboración propia

**Tabla 43: Cálculo Energético Etapa 3.**

Ensayo	P Acum. [kg/cm <sup>2</sup> ]	Nº moles	CH <sub>4</sub> [% molar]	H <sub>2</sub> [% molar]	Q CH <sub>4</sub> [kCal]	Q H <sub>2</sub> [kCal]	Q 3 <sup>ra</sup> fase [kCal]	
<b>1</b>	<b>A</b>	2.9	0.221	66.12	0	30.78	0	<b>30.78</b>
	<b>B</b>	3	0.228	67.90	0	32.70	0	<b>32.70</b>
	<b>C</b>	3.4	0.259	62.09	0	33.89	0	<b>33.89</b>
<b>Media</b>	<b>3,10</b>	<b>0.24</b>	<b>65.37</b>	<b>0</b>	<b>32.53</b>	<b>0</b>	<b>32.46</b>	
<b>2</b>	<b>A</b>	9.1	0.693	62.30	0	91.01	0	<b>91.01</b>
	<b>B</b>	7.95	0.605	61.10	0	77.98	0	<b>77.98</b>
	<b>C</b>	8.75	0.666	61.16	0	85.91	0	<b>85.91</b>
<b>Media</b>	<b>8,60</b>	<b>0.65</b>	<b>61.52</b>	<b>0</b>	<b>84.93</b>	<b>0</b>	<b>84.97</b>	

Fuente: elaboración propia

## 6.2. Desarrollo de cálculos de conclusivos.

El siguiente apartado desarrolla algunos de los valores calculados a partir de los resultados que son comentados en las conclusiones del capítulo V.

Se detalla a continuación el cálculo del consumo eléctrico en bodegas por kg de uva ingresada según los valores publicados por Fuentes-Pila y García (2014) para un tamaño de industria de 30 000 hL, consumo eléctrico anual de 330 000 kWh/año y un consumo eléctrico/producción 11 kWh/hL.

**Tabla 44: Cálculo de consumo eléctrico en bodegas.**

	Promedio anual de total de orujo (2008-2018)	Energía eléctrica a generar con Biogás (25% eficiencia) 0.04 kWh/kg uva ingresado a bodega		Promedio anual uva ingresada a bodega (2008-2018)	Consumo eléctrico (0.15 kWh/kg uva ingresada)	Abastecim Energético kWhgenerados/kWh necesarios x100.
		[kg]	[kWh]			
SAN MARTIN	37 394 462.91	2 267 843.29	457 999 194.05	68 699 879.11	3.30	
MAIPU	21 398 832.09	1 297 764.27	208 348 659.20	31 252 298.88	4.15	
RIVADAVIA	17 771 502.18	1 077 779.41	203 678 993.41	30 551 849.01	3.53	
JUNIN	12 395 648.45	751 752.69	158 960 892.29	23 844 133.84	3.15	
LUJAN DE CUYO	17 031 004.00	1 032 870.78	155 362 777.04	23 304 416.56	4.43	
LAVALLE	8 469 154.27	513 624.56	105 910 405.04	15 886 560.76	3.23	
SAN RAFAEL	9 703 136.09	588 461.24	91 862 402.87	13 779 360.43	4.27	
SANTA ROSA	4 009 413.00	243 156.87	51 284 066.62	7 692 609.99	3.16	
TUPUNGATO	4 638 457.64	281 306.22	45 173 855.27	6 776 078.29	4.15	
GUAYMALLEN	3 340 117.00	202 566.41	41 802 155.45	6 270 323.32	3.23	
GENERAL ALVEAR	4 088 372.91	247 945.51	41 036 189.74	6 155 428.46	4.03	
TUNUYAN	3 850 440.91	233 515.76	36 347 092.13	5 452 063.82	4.28	
SAN CARLOS	2 043 897.82	123 955.25	20 274 407.64	3 041 161.15	4.08	
GODOY CRUZ	1 576 082.82	95 583.91	12 886 059.51	1 932 908.93	4.95	
LAS HERAS	691 813.09	41 956.04	7 761 690.69	1 164 253.60	3.60	
LA PAZ	15 727.27	953.80	191 063.58	28 659.54	3.33	
<b>Total</b>	<b>148 419 476.09</b>	<b>9 001 121.76</b>	<b>1 638 883 072.81</b>	<b>245 832 460.92</b>	<b>3.80</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta una eficiencia en la conversión energética del 25% para la generación de energía eléctrica para el aprovechamiento del biogás podrían ser generados 9 001 121.76 kWh que cubrirían casi el 4% de los requerimientos energéticos calculados para una bodega mediana.

Se compara a continuación el potencial que posee el biogás y el orujo al ser quemados para cada departamento que es igual a la relación entre el potencial del biogás en kcal/ por kg de orujo fresco y el poder calorífico inferior del orujo en kcal.

**Tabla 45 Cálculo de relación entre potencial de biogás de orujo y orujo mediante combustión directa.**

Departamento	Promedio anual de total de orujo (2008-2018)	Energía Biogás generada con MF orujo (347,64 kCal/kg MF orujo)	Energía combustión directa MF Orujo (PCI orujo 2.715,40 kcal/kg )	Relación energía aprovechable
	[kg]	[kCal]	[kcal]	[%]
SAN MARTIN	37 394 462.91	13 000 185 030.35	101 540 924 583.35	13%
MAIPU	21 398 832.09	7 439 303 976.40	58 106 388 659.65	13%
RIVADAVIA	17 771 502.18	6 178 262 733.51	48 256 737 024.51	13%
JUNIN	12 395 648.45	4 309 347 185.22	33 659 143 813.47	13%
LUJAN DE CUYO	17 031 004.00	5 920 828 540.60	46 245 988 261.60	13%
LAVALLE	8 469 154.27	2 944 301 482.91	22 997 141 512.16	13%
SAN RAFAEL	9 703 136.09	3 373 295 262.00	26 347 895 741.25	13%
SANTA ROSA	4 009 413.00	1 393 872 429.45	10 887 160 060.20	13%
TUPUNGATO	4 638 457.64	1 612 559 797.28	12 595 267 865.78	13%
GUAYMALLEN	3 340 117.00	1 161 191 675.05	9 069 753 701.80	13%
GENERAL ALVEAR	4 088 372.91	1 421 322 841.85	11 101 567 797.35	13%
TUNUYAN	3 850 440.91	1 338 605 782.05	10 455 487 244.55	13%
SAN CARLOS	2 043 897.82	710 561 076.49	5 550 000 135.49	13%
GODOY CRUZ	1 576 082.82	547 925 191.74	4 279 695 284.49	13%
LAS HERAS	691 813.09	240 508 821.05	1 878 549 267.05	13%
LA PAZ	15 727.27	5 467 586.36	42 705 836.36	13%
CAPITAL	1 413.64	491 450.68	3 838 588.18	13%
<b>Total</b>	<b>148 419 476.09</b>	<b>51 598 030 863.00</b>	<b>403 018 245 377.26</b>	<b>13%</b>

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la relación es del 13%, por lo tanto mediante la transformación del orujo en biogás y su posterior combustión, solo se obtendría el 13% de la energía térmica que podría proveer el orujo.

Se desarrolla a continuación el cálculo de abastecimiento de energía a partir del biogás generado con el orujo por departamento. Se utiliza un consumo base de bodegas de consumo 330 000 kWh/año, detallado anteriormente.

**Tabla 46: Cálculo de bodegas promedio abastecidas con energía generada mediante biogás por departamento**

Departamento	Promedio anual de total de orujo (2008-2018)	Energía Biogás generada con MF orujo (347,64 kCal/kg MF orujo)	Energía Biogás generada con MF de orujo ( 0.40431 kWh/kg MF orujo)	Energía eléctrica a generar con Biogás (25% eficiencia)	Bodegas abastecidas (consumo 330000 kWh/año (1))
	[kg]	[kCal]	[kWh]	[kWh]	[bodegas de 30.000L capacidad]
SAN MARTIN	37 394 462.91	13 000 185 030.35	15 118 955.30	2 267 843.29	7
MAIPU	21 398 832.09	7 439 303 976.40	8 651 761.80	1 297 764.27	4
RIVADAVIA	17 771 502.18	6 178 262 733.51	7 185 196.05	1 077 779.41	3
JUNIN	12 395 648.45	4 309 347 185.22	5 011 684.63	751 752.69	2
LUJAN DE CUYO	17 031 004.00	5 920 828 540.60	6 885 805.23	1 032 870.78	3
LAVALLE	8 469 154.27	2 944 301 482.91	3 424 163.76	513 624.56	2
SAN RAFAEL	9 703 136.09	3 373 295 262.00	3 923 074.95	588 461.24	2
SANTA ROSA	4 009 413.00	1 393 872 429.45	1 621 045.77	243 156.87	1
TUPUNGATO	4 638 457.64	1 612 559 797.28	1 875 374.81	281 306.22	1
GUAYMALLEN	3 340 117.00	1 161 191 675.05	1 350 442.70	202 566.41	1
GENERAL ALVEAR	4 088 372.91	1 421 322 841.85	1 652 970.05	247 945.51	1
TUNUYAN	3 850 440.91	1 338 605 782.05	1 556 771.76	233 515.76	1
SAN CARLOS	2 043 897.82	710 561 076.49	826 368.33	123 955.25	0
GODOY CRUZ	1 576 082.82	547 925 191.74	637 226.04	95 583.91	0
LAS HERAS	691 813.09	240 508 821.05	279 706.95	41 956.04	0
LA PAZ	15 727.27	5 467 586.36	6 358.69	953.80	0
CAPITAL	1 413.64	491 450.68	571.55	85.73	0
<b>Total</b>	<b>148 419 476.09</b>	<b>51 598 030 863.00</b>	<b>60 007 478.38</b>	<b>9 001 121.76</b>	<b>27</b>

Fuente: Elaboración propia

Se observa que, si todo el orujo de la provincia fuera aprovechado mediante digestión anaerobia y el biogás generado fuera utilizado para generar energía eléctrica, podrían ser abastecidas 27 bodegas.

Mediante los calores mencionados por (ENARGAS, 2018), quien publica que una vivienda promedio precisa 100 m<sup>3</sup> de gas natural por mes, se calcula, a partir de las 9300 kcal/ m<sup>3</sup> que posee el gas natural que una vivienda precisa 11160000 kcal/año. Mediante estos valores la tabla a continuación calcula la cantidad de casas que podrían ser abastecidas con gas mediante la biodigestión de los residuos generados en bodegas por departamento.

**Tabla 47: Cálculo de viviendas promedio abastecidas mediante biogás.**

Departamento	Promedio anual de total de orujo (2008-2018)	Energía Biogás generada con MF orujo (347,64 kCal/kg MF orujo)	Casas abastecidas (Nec 11160000 kcal/año (1))
	[kg]	[kCal]	[cant viviendas promedio]
SAN MARTIN	37 394 462.91	13 000 185 030.35	1 165
MAIPU	21 398 832.09	7 439 303 976.40	667
RIVADAVIA	17 771 502.18	6 178 262 733.51	554
JUNIN	12 395 648.45	4 309 347 185.22	386
LUJAN DE CUYO	17 031 004.00	5 920 828 540.60	531
LAVALLE	8 469 154.27	2 944 301 482.91	264
SAN RAFAEL	9 703 136.09	3 373 295 262.00	302
SANTA ROSA	4 009 413.00	1 393 872 429.45	125
TUPUNGATO	4 638 457.64	1 612 559 797.28	144
GUAYMALLEN	3 340 117.00	1 161 191 675.05	104
GENERAL ALVEAR	4 088 372.91	1 421 322 841.85	127
TUNUYAN	3 850 440.91	1 338 605 782.05	120
SAN CARLOS	2 043 897.82	710 561 076.49	64
GODOY CRUZ	1 576 082.82	547 925 191.74	49
LAS HERAS	691 813.09	240 508 821.05	22
LA PAZ	15 727.27	5 467 586.36	0
CAPITAL	1 413.64	491 450.68	0
<b>Total</b>	<b>148 419 476.09</b>	<b>51 598 030 863.00</b>	<b>4 623.48</b>

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos publicados por Cooperativas Agroalimentarias (2010) se calculó una necesidad de gas en bodega equivalente a Nec 40.992 kWh/año. Mediante este valor se calculó la cantidad de bodegas que podrían ser abastecidas mediante la energía generada por el biogás.

**Tabla 48: Cálculo de bodegas por departamento abastecidas mediante biogás.**

Departamento	Promedio anual de total de orujo (2008-2018)	Energía Biogás generada con MF orujo (347,64 kCal/kg MF orujo)	Energía Biogás generada con MF de orujo ( 0.40431 kWh/kg MF orujo)	Energía eléctrica a generar con Biogás (25% eficiencia)	Bodegas abastecidas (Nec 40992 kWh/año (1))
	[kg]	[kCal]	[kWh]	[kWh]	[n° de bodegas medianas]
SAN MARTIN	37 394 462.91	13 000 185 030.35	15 118 955.30	2 267 843.29	55
MAIPU	21 398 832.09	7 439 303 976.40	8 651 761.80	1 297 764.27	32
RIVADAVIA	17 771 502.18	6 178 262 733.51	7 185 196.05	1 077 779.41	26
JUNIN	12 395 648.45	4 309 347 185.22	5 011 684.63	751 752.69	18
LUJAN DE CUYO	17 031 004.00	5 920 828 540.60	6 885 805.23	1 032 870.78	25
LAVALLE	8 469 154.27	2 944 301 482.91	3 424 163.76	513 624.56	13
SAN RAFAEL	9 703 136.09	3 373 295 262.00	3 923 074.95	588 461.24	14
SANTA ROSA	4 009 413.00	1 393 872 429.45	1 621 045.77	243 156.87	6
TUPUNGATO	4 638 457.64	1 612 559 797.28	1 875 374.81	281 306.22	7
GUAYMALLEN	3 340 117.00	1 161 191 675.05	1 350 442.70	202 566.41	5
GENERAL ALVEAR	4 088 372.91	1 421 322 841.85	1 652 970.05	247 945.51	6
TUNUYAN	3 850 440.91	1 338 605 782.05	1 556 771.76	233 515.76	6
SAN CARLOS	2 043 897.82	710 561 076.49	826 368.33	123 955.25	3
GODOY CRUZ	1 576 082.82	547 925 191.74	637 226.04	95 583.91	2
LAS HERAS	691 813.09	240 508 821.05	279 706.95	41 956.04	1
LA PAZ	15 727.27	5 467 586.36	6 358.69	953.80	0
CAPITAL	1 413.64	491 450.68	571.55	85.73	0
<b>Total</b>	<b>148 419 476.09</b>	<b>51 598 030 863.00</b>	<b>60 007 478.38</b>	<b>9 001 121.76</b>	<b>219.58</b>

Fuente: Elaboración propia

Se calculó que podrían proveerse 219 bodegas en relación a los requerimientos de gas publicados para bodegas de mediana capacidad.

