

BIOGÁS EN EL SECTOR LECHERO EN CHILE



Guía para el monitoreo de parámetros técnicos de producción de biogás en plantas de digestión anaeróbica de predios lecheros en el Sur de Chile



ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	5
Contenido de la guía de monitoreo	5
¿Por qué monitorear una planta de biogás?	5
CAPÍTULO 1	7
ETAPAS Y FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS EN UN PREDIO LECHERO	7
1. Lechería	7
2. Separador de sólidos	8
3. Biodigestor	9
4. Estanque de digestato y su aplicación	10
5. Equipos que utilizan biogás	10
CAPÍTULO 2	11
DETERMINACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO	11
2.1. Muestras recolectadas desde pozo purinero	11
2.2. Muestras recolectadas desde el canal de afluente y efluente del biodigestor	12
2.3. Muestras recolectadas entre el biodigestor y equipos que utilizan biogás	12
2.4. Muestras de efluente recolectadas desde el estanque de digestato	13
CAPÍTULO 3	14
PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	14
3.1. Muestreo de afluente desde canal de entrada al reactor	14
3.2. Muestreo de afluente desde un pozo purinero o estanque acumulador	16
3.3. Muestreo de digestato desde canal de salida del reactor	17
3.4. Muestreo de digestato desde estanque de digestato	18
3.5. Muestreo de biogás	19
CAPÍTULO 4	24
¿QUÉ PARÁMETROS SE ANALIZAN EN CADA MUESTRA RECOLECTADA?	25
Sólidos Totales (ST) o Materia Seca (MS)	25
Sólidos Volátiles (SV) o Materia Orgánica seca (MoS)	25
pH	26
Alcalinidad	27
Temperatura	27
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	28
Macronutrientes (nitrógeno total y amoniacal, fósforo y potasio)	28

Composición Biogás.....	29
Metano (CH ₄).....	30
Dióxido de carbono (CO ₂)	30
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	30
Vapor de agua	30
Otros gases traza	30
Dónde enviar las muestras y qué analizar de cada muestra	31
POSIBLES PROBLEMAS Y MEDIDAS CORRECTIVAS ASOCIADAS A LA TOMA DE MUESTRAS COLECTADAS DURANTE EL MONITOREO DEL BIODIGESTOR (CHECK LIST)	33
CAPÍTULO 5.....	37
RESULTADOS ESPERADOS.....	37
Glosario	37
Referencias bibliográficas.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores promedio de N, P y K en purines de lecherías del Sur de Chile.....	29
Tabla 2. Frecuencias de muestreo y registros sugeridos para plantas de biogás a partir de purines lecheros.	32
Tabla 3. Posibles problemas asociados a la toma de muestras colectadas durante el monitoreo de una planta de biogás a partir de purines bovinos lecheros.....	33
Tabla 4. Resumen de valores referenciales para parámetros de producción de biogás desde muestras de afluente	37
Tabla 5. Resumen de valores referenciales para parámetros de producción de biogás desde muestras de efluente	38
Tabla 6. Resumen de valores referenciales para parámetros de producción de biogás	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de los componentes principales de una planta de biogás a partir de purines bovinos de lechería.....	7
Figura 2. Puntos de muestreo sugeridos para una planta de biogás en predio lechero.....	11
Figura 3. Muestreador de purines (tubo de PVC) con envase plástico abierto.....	15
Figura 4. Ejemplo de muestra rotulada en envase plástico.....	16
Figura 5. Válvula de salida de biogás (marcado en color rojo).....	19
Figura 6. Tapas para tubos de PVC (con y sin hilo) con adaptador para manguera.....	20
Figura 7. Tapa para tubo de PVC conectado a manguera y jeringa mediante llave de tres pasos... ..	20
Figura 8. Tapa para tubo PVC con adaptador espiga habilitada para la toma de muestra desde línea de biogás.....	21
Figura 9. Muestra de biogás almacenada en vial de vidrio.....	22
Figura 10. Muestra de biogás almacenada en bolsa para biogás.....	23
Figura 11. Tipos de analizadores de gas o medidores multigas portátiles.....	24
Figura 12. Medición de pH y temperatura con equipo portátil.....	26

INTRODUCCIÓN

Contenido de la guía de monitoreo

Esta guía tiene como objetivo describir las actividades básicas que se deben llevar a cabo para elaborar un plan de monitoreo de la producción de biogás en biodigestores a partir de purines bovinos lecheros.

El documento se estructura en cinco capítulos, describiendo en forma didáctica las actividades a realizar en cada una de las etapas de la digestión anaeróbica enfocada hacia biodigestores en predios lecheros: identificación de variables a monitorear y su importancia, metodología de monitoreo, periodicidad de medición, rangos esperados, orientación en el registro de los parámetros obtenidos, recomendaciones y, medidas correctivas ante posibles problemas asociados al monitoreo de una planta de biogás.

¿Por qué monitorear una planta de biogás?

Una planta de biogás se monitorea con el fin de mantener un control estable del estado del biodigestor, ayudando a la producción de biogás y evitando posibles problemas en el proceso de digestión anaeróbica. Muchas veces la poca o nula información que se maneja con respecto a la necesidad de un monitoreo continuo en biodigestores puede provocar la toma de decisiones que afectan negativamente el funcionamiento de la planta y la seguridad de esta misma. La desestabilización del biodigestor causada por una identificación tardía de exceso de carga orgánica, acidificación del reactor, saturación de sólidos, fuga de biogás, entre otros, puede significar tomar medidas correctivas complejas, costosas y a veces hasta irreversibles. Además, fallos de este tipo pueden implicar varias semanas sin producción de biogás, ya que el proceso de estabilización del reactor es lento y se adecúa al nivel de actividad de los microorganismos presentes.

Como un ejemplo frecuente de inconvenientes que surgen por no realizar un monitoreo rutinario del biodigestor se encuentra la baja remoción de sólidos totales y/o sólidos volátiles que puede haber en el sustrato al interior del reactor, el cual es un indicativo de que la degradación de materia orgánica no ocurre de forma eficiente. Esto ocurre por un exceso en el volumen de purines (sustrato) que entra al reactor, existiendo un tiempo de retención hidráulica bajo lo recomendado para el tipo de biodigestor y por lo tanto la

materia orgánica no alcanza a ser digerida. Este problema se podría prever realizando un monitoreo desde muestras de sustrato y digestato, evaluando periódicamente la remoción de sólidos totales y sólidos volátiles adecuados para el tipo de biodigestor y tecnología utilizada en la planta de biogás.

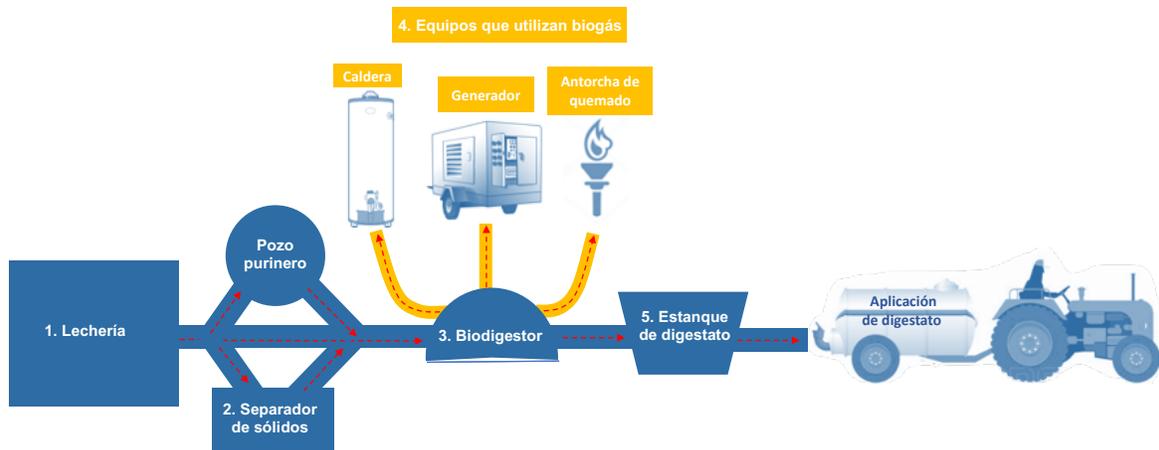
Por lo tanto, el monitoreo de una planta de biogás a partir de purines lecheros busca evaluar el desempeño del biodigestor con el fin de mantener estable el proceso de digestión anaeróbica y aumentar la eficiencia en la producción de biogás, teniendo en cuenta la variabilidad que pueda existir en el manejo del predio durante distintos meses del año. A través de la presente guía, se sugiere un monitoreo periódico para distintos parámetros en la producción de biogás (Tabla 2) en base a experiencias en terreno para biodigestores de la Zona Sur de Chile, además de entregar valores referenciales para estos mismos (Tablas 4, 5 y 6).

CAPÍTULO 1

ETAPAS Y FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS EN UN PREDIO LECHERO

Una planta de biogás implementada en un predio lechero consta de varias etapas, no necesariamente sucesivas (Figura 1). Cada una de éstas genera un sustrato o subproducto que es utilizado en la etapa siguiente. Es fundamental identificar la secuencia en la que se encuentra cada una de estas etapas en nuestra planta de biogás con el fin de poder generar un Plan de Monitoreo acorde a nuestras necesidades.

Figura 1. Esquema general de los componentes principales de una planta de biogás a partir de purines bovinos de lechería.



Fuente: Elaboración propia

1. Lechería

Aquí ocurre la generación de purines que servirán como sustrato (afluente) del biodigestor. Los purines son colectados sobre las distintas superficies de la lechería (sala de ordeña, patios de espera, patios de alimentación, patios de estabulación y pasillos), los cuales son conducidos generalmente en forma gravitacional hacia un desarenador, un separador de sólidos, un pozo purinero o directamente hacia el biodigestor. En el caso de existir un pozo purinero, éstos generalmente ingresan por rebalse y de forma gravitacional hacia el biodigestor.

Importancia del manejo de lechería en la producción de biogás

El manejo en lechería será fundamental para determinar la composición de los purines que serán materia prima del biodigestor. Se deberá mantener un control en el uso de aguas, tanto para el lavado de equipos como de pisos, además de considerar el desvío de aguas lluvia de manera que no contribuyan a la dilución de los purines. Una dilución excesiva en los purines de lechería, puede significar una reducción considerable en el potencial de generación de biogás y un incremento en el tamaño de biodigestor requerido.

2. Separador de sólidos

A veces conocido como decantador, corresponde a un estanque donde se dejan sedimentar sólidos, fibras presentes en los purines, arena y/o piedras, previo al ingreso al biodigestor. También se pueden utilizar otros tipos de separadores con mallas o extrusores, que mecánicamente permiten la separación de las fases sólida y líquida del afluente. El separador de sólidos recibe los purines de la lechería y remueve los sólidos de mayor tamaño (principalmente fibras), evitando que éstos entren al biodigestor y generen un posible colapso o saturación, además de remover volumen efectivo al biodigestor. Generalmente, este tipo de separadores se encuentran en biodigestores que no cuentan con agitador en su interior. En la figura 1 se destaca este componente con líneas punteadas, puesto que su implementación es opcional. En digestores de mezcla completa o de flujo pistón, los purines pasan directamente a su interior, sin separación de sólidos.

Importancia del separador de sólidos en la producción de biogás

Los separadores son muy importantes en los digestores anaeróbicos sin agitación. Al retener sólidos de gran tamaño, el separador se encarga de filtrar gran parte del material de difícil digestión por el digestor, junto con ello también retiene arena, piedras y otros materiales que no contribuyen al proceso y que pueden causar problemas (Ej. pérdida de capacidad operativa) al ser acumulados dentro del reactor. Esta retención de material sólido implica la retención tanto de sólidos totales (materia seca) como de sólidos volátiles (materia orgánica) presentes en el purín, pero que es necesaria con el fin de no saturar con sólidos fibrosos el sistema interno del reactor.

Un buen manejo de los decantadores está condicionado en gran parte por su diseño, ya que esto determina la frecuencia y modalidad a utilizar en su limpieza. Es fundamental que el diseño y tamaño de los decantadores esté adecuado al tipo y volumen de purines que se reciben diariamente desde la lechería. Además, idealmente éstos deben ser de fácil acceso y estar a una profundidad adecuada para la maquinaria que se utiliza en su limpieza.

3. Biodigestor

Reactor encargado de recibir y/o utilizar los purines y otros residuos orgánicos provenientes de lechería para degradarlos a través de la digestión anaeróbica. La degradación de la materia orgánica en el reactor ocurre en ausencia de oxígeno y da origen a 2 subproductos: el biogás y el digestato o efluente, producto principalmente líquido utilizado como biofertilizante. El biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), seguido por cantidades traza de vapor de agua, sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N), entre otros gases.

Importancia del biodigestor en la producción de biogás

El reactor es el pilar de una planta de biogás. Contiene la mezcla de purines que deberá estar en un estado balanceado de pH, temperatura, nutrientes, materia orgánica e inhibidores, para lograr una producción de biogás estable. Por otro lado, además de recibir los purines de lechería, el biodigestor almacena el biogás generado en el gasómetro. Es importante que el gasómetro sea un sistema hermético evitando la entrada de aire atmosférico.

4. Estanque de digestato y su aplicación

Corresponde a un pozo ubicado a la salida del biodigestor, que permite contener el digestato (efluente) producido tras la digestión anaeróbica. El digestato corresponde a un producto líquido y sin olor (si el proceso de digestión anaeróbica ha ocurrido adecuadamente), que puede ser utilizado como biofertilizante en el predio. El pozo normalmente está recubierto por impermeabilizantes como polietileno de alta densidad o PVC, pudiendo también ser de hormigón u otros materiales.

Importancia del estanque o pozo de digestato

La presencia de un estanque o pozo de digestato impermeabilizado es fundamental puesto que permite almacenar la totalidad del material generado y cumplir con la normativa nacional vigente.

5. Equipos que utilizan biogás

En la mayoría de los predios lecheros, el biogás producido es utilizado térmicamente, por ejemplo, en una caldera a biogás para calentar agua para los distintos procesos de limpieza en la lechería. Para estos fines, el biogás generalmente se desplaza por la línea de biogás a condiciones atmosféricas de presión y temperatura.

Otra opción en estos biodigestores es utilizar el biogás en un motor y generador, con el fin de producir energía eléctrica. Existen además sistemas de cogeneración, donde se combina la producción de energía eléctrica y calórica. En el caso de la energía eléctrica, ésta puede ser utilizada para autoconsumo en la lechería, o ser inyectada a la red del Sistema Eléctrico Nacional para la venta de excedentes.

Importancia de los equipos que utilizan biogás

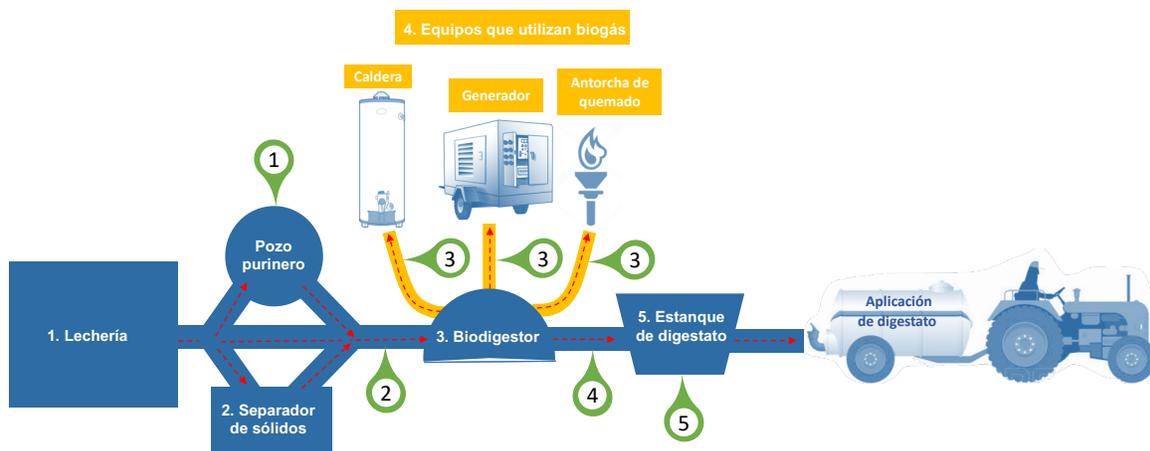
En la etapa de consumo del biogás, la calidad de éste es fundamental para poder ser utilizado por los equipos. Se espera que el contenido de metano presente el biogás sea superior al 45% (% v/v) con el fin que pueda combustionar y hacer funcionar los equipos de forma correcta. Generalmente, para las plantas de biodigestión implementadas en predios lecheros del Sur de Chile, se encuentran motores y calderas que han sido adaptados para biogás. Sin embargo, se sugiere utilizar equipos que sean originalmente destinados al uso de biogás, puesto que incluyen las modificaciones correspondientes para prolongar su vida útil (e.g. filtros de aire, sellos de seguridad, etc.) y cumplen con las medidas de seguridad exigidas por las normativas vigentes.

CAPÍTULO 2

DETERMINACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO

Para realizar un monitoreo básico de producción de biogás se recomienda realizar un muestreo de los siguientes sustratos: muestras de afluente, efluente y biogás (Figura 2). En cada uno de ellos se deberá analizar distintos parámetros físico-químicos, los que se pueden revisar detalladamente en el Capítulo 4.

Figura 2. Puntos de muestreo sugeridos para una planta de biogás en predio lechero.



Puntos de monitoreo sugeridos para la colecta de muestras

- 1 Muestra de afluente desde pozo purinero
- 2 Muestra de afluente post separador de sólidos o pozo purinero
- 3 Muestras entre el biodigestor y equipos que utilizan biogás
- 4 Muestra de efluente
- 5 Muestra de efluente desde estanque de digestato

Fuente: Elaboración propia

2.1. Muestras recolectadas desde pozo purinero

En algunos predios es posible encontrar pozos purineros implementados para recibir los purines de lechería previo a su entrada al biodigestor. Estos pozos pueden utilizarse como un punto de muestreo del afluente sólo en el caso de no ser posible la toma de muestra en un punto más cercano al canal de entrada al reactor, ya que, si éste no es agitado, su contenido puede formar estratos. Sumado a esto, los pozos no recubiertos son capaces de recibir grandes cantidades de aguas lluvia, propias de las condiciones meteorológicas de la

Zona Sur de Chile. Por lo tanto, para que la muestra de purines recolectada desde el pozo purinero sea representativa y homogénea, éste debe haber sido previamente bien mezclado.

2.2. Muestras recolectadas desde el canal de afluente y efluente del biodigestor



Para generar un plan de monitoreo de muestras del afluente, se deberá tener conocimiento de los horarios de ordeña y de limpieza de equipos y pisos, con el fin de estimar el momento ideal para la recolección de una muestra representativa del material que ingresa al biodigestor. En predios lecheros generalmente no existe un flujo continuo de purines o afluentes, existiendo flujos temporales dados por el manejo del predio, relacionados principalmente a las horas de ordeña y post ordeña.

En el caso de que la planta de biogás tenga un separador de sólidos, se sugiere tomar una muestra a la salida de éste. En el caso que se tenga un pozo purinero y la carga del biodigestor ocurra de forma gravitacional, se sugiere tomar la muestra a la salida del pozo.

En el caso de la recolección de muestras de efluente, se deberá contemplar el tiempo que demora éste en salir del digestor, después de ingresado el afluente, ya que existe un desfase en ello. El material de salida corresponde a un reflejo del estado interno del biodigestor, por lo que se puede considerar como otro punto de muestreo del líquido al interior del reactor. El muestreo desde el interior del reactor involucra mayor complejidad, puesto que considera implementar un método de extracción del material desde el interior (e.g. bomba de succión) o la habilitación de puntos de muestreo durante su diseño y construcción.

El muestreo de afluente y efluente del biodigestor permitirá evaluar el estado del sistema de digestión anaeróbica, comparando el material de ingreso con el material de salida del reactor. Los puntos de muestreo recién mencionados se indican en la Figura 2.

2.3. Muestras recolectadas entre el biodigestor y equipos que utilizan biogás



La muestra de biogás se deberá coleccionar desde la línea de biogás, con el fin de analizar su composición. Tener conocimiento de la composición del biogás, principalmente de la concentración de metano, permitirá tener seguridad que el proceso de digestión anaeróbica se está llevando a cabo correctamente y a la vez, evaluar la presencia de posibles contaminantes y/o inhibidores (Ej. sulfuro de hidrógeno, oxígeno). Además, una muestra de gas coleccionada previo a un punto de tratamiento del biogás y otra coleccionada posterior a

éste, permitirá evaluar si los sistemas de filtrado (depuración) están funcionando correctamente (e.g. filtro de óxido de hierro para la remoción de sulfuro de hidrógeno, microaireación en el biodigestor, etc.)

2.4. Muestras de efluente recolectadas desde el estanque de digestato



En el caso de no poder muestrear desde el canal del efluente (salida del reactor), se puede considerar tomar una muestra desde el estanque de digestato. Sin embargo, el digestato del estanque o pozo normalmente corresponderá a una mezcla acumulada de varios días. Por lo tanto, para coleccionar una muestra desde este punto, se deberá agitar y mezclar bien el contenido del estanque, teniendo en consideración que la muestra representará una composición de digestato acumulado y no de un digestato fresco. Junto con ello condiciones climáticas, como por ejemplo de alta pluviometría, pueden diluir el digestato.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

Dado el efecto de las variables antes mencionadas en cada etapa del proceso de digestión, el propietario de la planta de biogás debe intentar mantener un manejo estándar del predio. La hora de muestreo se definirá en base al momento en que exista un caudal estable de afluente hacia el biodigestor, dado por la entrada fluida de purines, ya sea desde un separador de sólidos, un pozo purinero o directamente desde la lechería. Una vez establecido el plan de trabajo, se deberán recolectar materiales y herramientas necesarias para dar inicio al monitoreo.

3.1. Muestreo de afluente desde canal de entrada al reactor

Materiales	Cantidad
Muestreador (tubo de PVC) con envase plástico abierto	1
Frasco plástico de 1 L	1
Marcador permanente	1
“Cooler” o hielera	1
Gel packs	A lo menos 1

Pasos a seguir:

- a. Colectar una muestra de afluente desde el canal de entrada al reactor. Colectar la muestra al haber un caudal estable, de manera que la muestra sea lo más homogénea posible. Se deberán tomar por lo menos 4 sub-muestras de 200 mL cada una (equivalente a una taza de té), a distintos momentos durante el escurrimiento, y colocarlas en un mismo recipiente. Para colectar la muestra, utilizar un tubo de PVC, el que en su punta deberá llevar sujeto un envase plástico abierto para colectar los purines (Figura 3).

Figura 3. Muestreador de purines (tubo de PVC) con envase plástico abierto.



Fuente: Elaboración propia

- b. Una vez terminada la colecta de la muestra, homogenizar la muestra de afluente de biodigestor (purín de lechería) en el recipiente y enviarla a laboratorio. El envase donde se colecte la muestra (idealmente plástico) debe estar limpio y sin residuos químicos ni orgánicos. Además, debe tener una tapa hermética que permita cerrarlo evitando derrames durante su traslado. Se recomienda no llenar completamente el envase con afluente, dejando un espacio libre (e.g. 800 mL de muestra en envase de 1L) Esto con el fin de evitar que la formación de gas en el envase derrame su contenido durante el transporte y su almacenaje.
- c. La muestra debe ser rotulada con un marcador previo al muestreo, identificando el nombre del productor, nombre del predio, fecha de colecta y contenido de la muestra (e.g. Carlos Rodríguez, Fundo El Avellano, 01 mayo 2018, afluente biodigestor) (Figura 4).

Figura 4. Ejemplo de muestra rotulada en envase plástico.



Fuente: Elaboración propia

- d. Refrigerar la muestra ($< 4^{\circ}\text{C}$) o guardarla en un lugar fresco hasta ser trasladada al laboratorio de análisis lo antes posible (idealmente dentro 24h). Para su refrigeración durante el transporte puede utilizarse una hielera y gel packs.

3.2. Muestreo de afluente desde un pozo purinero o estanque acumulador

Materiales	Cantidad
Muestreador (tubo de PVC) con envase plástico abierto	1
Frasco plástico de 1 l	1
Marcador permanente	1
"Cooler" o hielera	1
Gel packs	A lo menos 1

Pasos a seguir:

- a. Existen plantas de biogás que contienen un estanque acumulador de purines o pozo purinero previo a su ingreso al reactor, desde donde se puede obtener una muestra de afluente.
- b. Con la finalidad de obtener una muestra representativa del purín que ingresa al reactor, es importante realizar el muestreo de la forma más homogénea posible.
- c. En primer lugar y como medida de seguridad, se deberá realizar el muestreo acompañado de otra persona y/o notificar que se realizará esta actividad a un tercero.
- d. Se deberá recorrer el borde del pozo a muestrear, con la finalidad de detectar a lo menos cuatro puntos de muestreo (Norte, Sur, Este y Oeste). Además, este recorrido permitirá identificar si existen problemas asociados al lugar tales como desprendimiento de bordes en el caso de pozos de tierra u otros sectores inseguros.
- e. Mezclar el purín del pozo con la ayuda de un agitador mecánico, o en su defecto con un agitador manual o un mismo muestreador (tubo de PVC) de a lo menos 3 m de largo, mezclando de forma enérgica a distintas profundidades del pozo para cada uno de los puntos de muestreo.
- f. Colectar una muestra de aprox. 200 mL desde cada punto con el muestreador y proceder a mezclar y almacenar según lo descrito previamente para “Muestreo de afluente desde canal de entrada al reactor” (ver sección 3.1.b).

3.3. Muestreo de digestato desde canal de salida del reactor

Materiales	Cantidad
Muestreador (tubo de PVC) con envase plástico abierto	1
Frasco plástico de 1 l	1
Marcador permanente	1
“Cooler” o hielera	1
Gel packs	A lo menos 1

Pasos a seguir:

- a. Cuando un biodigestor se encuentra funcionando, se asume que su interior se encuentra lleno de sustrato (purines) hasta el máximo de su capacidad líquida. Por lo

tanto, al haber un caudal de entrada de purines habrá un caudal de salida, producto del rebalse. Este rebalse puede ocurrir de forma simultánea a la entrada de purines, o retrasarse unos minutos después.

- b. Para el muestreo de digestato (efluente) desde el canal de salida del digestor seguir los pasos descritos previamente en “Muestreo de afluente desde canal de entrada al reactor” (ver sección 3.1.b).

3.4. Muestreo de digestato desde estanque de digestato

Materiales	Cantidad
Muestreador (tubo de PVC) con envase plástico abierto	1
Frasco plástico de 1 l	1
Marcador permanente	1
“Cooler” o hielera	1
Gel packs	A lo menos 1

Pasos a seguir:

- a. En el caso que se dificulte la colecta de muestra de efluente desde el canal de salida o se quiera muestrear en momentos cuando no haya un caudal estable de salida, se recomienda muestrear desde el pozo o estanque de digestato. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este pozo/estanque almacena el digestato producido de forma continua por días, por lo que para tomar una muestra lo más representativa posible, se deberá homogenizar bien el digestato en el pozo. Para la colecta de la muestra se deberán seguir los pasos descritos para “Muestreo de afluente desde pozo purinero o estanque acumulador” (punto 3.2.a a 3.2.f).

3.5. Muestreo de biogás

Materiales	Cantidad
Tapa o adaptador con espiga para la toma de muestra de biogás desde válvula de salida	1
Jeringa de 60 mL	1
Llave de tres pasos para jeringa	1
Aguja para jeringa de 60 mL	1
Manguera del diámetro de adaptador espiga	A lo menos 10 cm
Vial de vidrio de 32 mL con septo o similar (dependiendo del laboratorio de análisis). También puede usarse bolsas para colecta de biogás.	A lo menos 3
Marcador permanente	1

Pasos a seguir:

- a. Se deberá seleccionar el punto de colecta de muestra. Para que la muestra represente la composición natural de biogás, el punto de muestreo deberá ser previo a cualquier punto de tratamiento del biogás (e.g. filtros de H_2S , condensador, etc.). Por otro lado, si se requiere conocer la composición del gas que utilizarán los equipos, el punto de muestreo debiera ser post filtros de H_2S .
- b. Idealmente utilizar como punto de muestreo una válvula de salida de biogás al ambiente, habilitada por el mismo fabricante de la planta. De lo contrario, se deberá habilitar un punto de salida de biogás con previa autorización del fabricante y propietario de la planta. La salida de biogás deberá estar regulada por una válvula que permita cortar el paso de gas una vez tomada la muestra (Figura 5).

Figura 5. Válvula de salida de biogás (marcado en color rojo).



Fuente: Elaboración propia

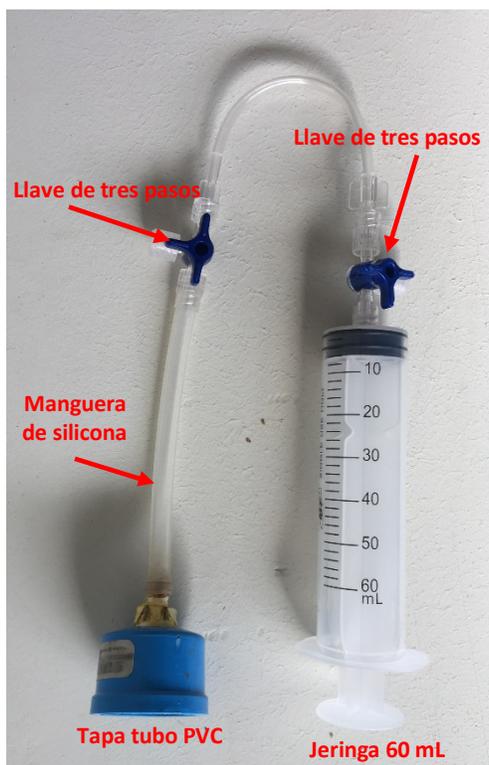
- c. De existir una válvula de salida de biogás, se deberá habilitar una tapa al tamaño de la tubería. En la parte superior de la tapa deberá tener un adaptador para manguera, idealmente tipo espiga u otro similar (Figura 6). A este adaptador irá conectada una manguera (acorde al tamaño del adaptador espiga) la que además estará conectada a una jeringa de 60 mL para la toma de muestras (Figura 7 y 8).

Figura 6. Tapas para tubos de PVC (con y sin hilo) con adaptador para manguera.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Tapa para tubo de PVC conectado a manguera y jeringa mediante llave de tres pasos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Tapa para tubo PVC con adaptador espiga habilitada para la toma de muestra desde línea de biogás.



Fuente: Elaboración propia

- d. Antes de tomar la muestra, se deberá dejar purgar la línea de gas al menos 3-5 minutos (liberando biogás al ambiente), con el fin de liberar cualquier residuo de aire que haya quedado al interior de las tuberías. Se deberá considerar un mayor tiempo si la tubería es de mayor diámetro o largo. Lo importante es asegurarse de no contaminar la muestra con aire ambiental residual.
- e. Luego se deberá cebar la jeringa (purgar con biogás previo a la toma de muestras), tomando a lo menos tres muestras de 60 mL de gas utilizando el émbolo. Cerrar el paso de biogás con una llave de tres pasos y botar la muestra al ambiente en cada colecta de gas durante el cebado.
- f. Una vez cebada la jeringa, tomar una muestra de 60 mL de biogás y cerrar llave de tres pasos.
- g. La muestra puede ser almacenada en recipientes especiales para gas (viales de vidrio o en bolsas plásticas para biogás). Si se tienen viales, éstos deberán estar al vacío previo al almacenaje de las muestras. En el caso de las bolsas, éstas deberán estar previamente vacías y limpias.

Si se tienen viales, botar un poco de muestra de la jeringa al ambiente y luego introducir la aguja de la jeringa al vial. Introducir la muestra a sobrepresión con ayuda del émbolo. Siempre introducir un excedente de muestra por sobre el límite del vial, dentro de lo posible. (e.g. Si el vial es de 32 mL, introducir 50 mL de muestra a sobrepresión) (Figura 9).

Figura 9. Muestra de biogás almacenada en vial de vidrio.



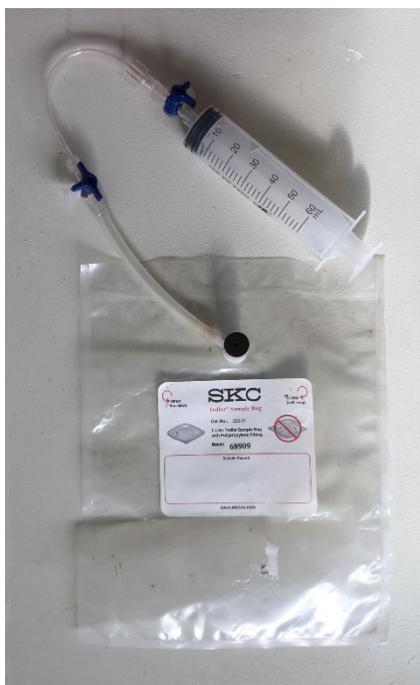
Fuente: Elaboración propia

- h. Si se tienen bolsas de biogás, conectar la manguera a la válvula de la bolsa de gas (Figura

10). Introducir la muestra. Repetir este paso hasta llenar la bolsa con biogás a un tercio del volumen máximo de la bolsa, sin que quede con sobrepresión. Cerrar la válvula de la bolsa de gas entre cada llenado y al finalizar el muestreo. Asegurar de purgar siempre la tubería antes de llenar las bolsas.

i.

Figura 10. Muestra de biogás almacenada en bolsa para biogás.



Fuente: Elaboración propia

- j. Una vez tomada la muestra, cerrar la válvula desde la línea de biogás de la planta.
- k. La muestra colectada en vial de vidrio o en bolsa deberá ser almacenada en un lugar fresco hasta ser enviada para análisis de composición al laboratorio.
- l. Se recomienda realizar un muestreo a lo menos mensual de la composición de biogás con el fin de estudiar el comportamiento de la composición durante las diferentes estaciones del año. Sin embargo, la frecuencia del muestreo dependerá del uso que se le quiera dar a la información y el presupuesto disponible para este fin.

USO DE ANALIZADORES DE GAS PORTÁTILES

Una alternativa al análisis tradicional de laboratorio es el uso de equipos portátiles de análisis de biogás (Figura 11). Estos permiten a través de una calibración previa poder determinar la composición de distintos gases provenientes de plantas de biogás, teniendo la ventaja además de poder contar con los resultados en tiempo real. La desventaja es que estos equipos son de alto costo, y requieren mantención y calibración.

Cabe mencionar que hay laboratorios que manejan procedimientos propios de muestreo, recepción y conservación de muestras, con el fin de garantizar que la muestra obtenida sea la adecuada para cumplir con estándares de calidad y certificaciones en el caso de haberlas. Sin embargo, esto dependerá de cada laboratorio o institución en particular.

Figura 11. Tipos de analizadores de gas o medidores multigas portátiles.



Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por MRU Instruments Inc. y Sewerin Iberia S.L.

CAPÍTULO 4

¿QUÉ PARÁMETROS SE ANALIZAN EN CADA MUESTRA RECOLECTADA?

El análisis de las muestras en el laboratorio permite conocer cómo está operando el biodigestor, si es que hay degradación de residuos y estudiar la producción de biogás. A continuación, se describen los parámetros recomendados a analizar en las distintas muestras recolectadas.

CANAL DE AFLUENTE/EFLUENTE DEL BIODIGESTOR

Sólidos Totales (ST) o Materia Seca (MS)

Los ST dan cuenta de la materia, tanto orgánica como inorgánica, presente en la muestra (Jing et al., 2014). Idealmente, los ST de un biodigestor semicontinuo no deben exceder el 8-12% (Manual Biogás-FAO, 2011), sin embargo, este porcentaje podrá ser variable a medida que el biodigestor contenga sistemas de calefacción, agitación y/o separación de sólidos. La cantidad de ST presentes en la muestra se calcula en laboratorio a través de la siguiente fórmula:

$$ST (\%) = \frac{\text{peso seco a } 105^\circ\text{C}}{\text{peso húmedo}} \times 100$$

Sólidos Volátiles (SV) o Materia Orgánica seca (MoS)

Representan la materia orgánica presente en los sólidos totales de la muestra (excluyendo sales inorgánicas y cenizas) y por lo tanto, es el sustrato que puede potencialmente convertirse en metano. La cantidad de SV presentes en la muestra se calcula en laboratorio a través de la siguiente fórmula:

$$SV (\% \text{ de } ST) = \frac{\text{peso seco a } 105^\circ\text{C} - \text{peso seco a } 550^\circ\text{C}}{\text{peso seco a } 105^\circ\text{C}} \times 100$$

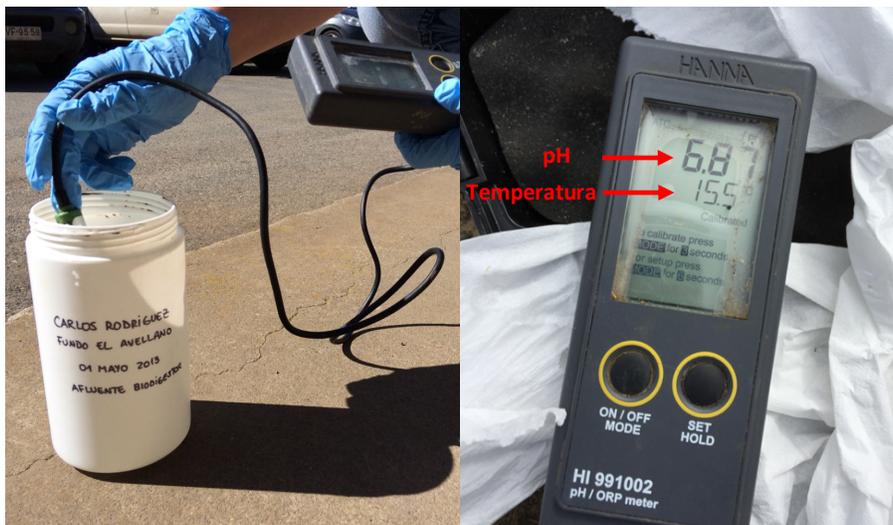
pH

Indica el grado de acidez o alcalinidad de la muestra y tiene gran influencia en la producción y composición del biogás. El pH óptimo para la mezcla de sustrato al interior del reactor se encuentra en el rango entre 6.6 y 7.6 (Alam et al., 2017), ya que los organismos metanogénicos (encargados de sintetizar metano), son afectados a pH bajos (acidez) o pH básicos (alcalinidad). Un valor de pH < 6.0 dará origen, no solamente a poca cantidad de biogás, sino que también a un bajo contenido de metano (menor poder energético).

El pH controla el equilibrio químico de importantes productos metabólicos como amoníaco, ácidos orgánicos y sulfuro de hidrógeno (H₂S) (GIZ Guide to biogás, 2010). La estabilidad de estos y otros productos se mantiene gracias a la capacidad buffer del medio, la que se relaciona directamente con la alcalinidad. En general, cuando el sustrato es sólo purín de lechería el pH del digestor se mantiene estable cercano a un valor neutro.

El nivel de pH se puede monitorear con un peachímetro portátil en terreno y de forma inmediata (Figura 12). En su defecto, la muestra podría ser llevada de forma refrigerada para la medición de pH en laboratorio lo antes posible una vez recolectada.

Figura 12. Medición de pH y temperatura con equipo portátil.



Fuente: Elaboración propia

Alcalinidad

Es la capacidad del medio para neutralizar ácidos por la presencia de bicarbonato, carbonatos e iones hidróxido. Dado que los organismos metanogénicos son susceptibles a los cambios bruscos de pH, fuera de su rango óptimo de actividad, el sistema anaeróbico requiere de una capacidad buffer (alcalinidad) suficiente para mitigar cualquier cambio en el pH (Manual Biogás-FAO, 2011). El purín de bovino naturalmente contiene una alta alcalinidad, lo que significa que hay una elevada capacidad tamponante para amortiguar variaciones bruscas de pH dadas por las diferentes etapas de digestión anaeróbica. Para revisar los rangos esperados en muestras de afluente y efluente de biodigestores a partir de purines bovinos revisar tablas 4 y 5 en capítulo 5. La alcalinidad debe ser analizada en laboratorio, solicitando análisis de alcalinidad total. Los valores obtenidos se expresan en mg CaCO₃/L.

Temperatura

Como regla general, el rendimiento de la digestión anaeróbica incrementa a mayor temperatura, sin embargo, es un proceso que tiene temperaturas óptimas de trabajo dado la mezcla de microorganismos presentes. Los biodigestores pueden clasificarse en 3 rangos según su temperatura de funcionamiento:

- Psicrófilos: rango <25°C
- Mesófilos: rango entre >25- <45°C.
- Termófilos: rango entre >45-60°C

Dentro de cada rango hay un intervalo donde el rendimiento es máximo. La mayoría de los biodigestores en la Zona Sur de Chile no poseen sistemas de calefacción al interior del digestor, por lo que, debido a la baja temperatura ambiental, éstos trabajan a rangos psicrófilos, cuyo rango óptimo de temperatura oscila entre los 15-18°C. El registro de la temperatura puede realizarse a través del uso de una sonda de temperatura al interior del digestor, lo que requiere haberla considerado en la etapa de construcción del biodigestor. Otra alternativa es hacer seguimiento de las temperaturas mediante la medición con un termómetro portátil en un punto previamente habilitado para ello (Figura 8). También puede colectarse muestra desde el interior del biodigestor y realizar inmediatamente la medición de temperatura. Se recomienda además medir temperatura de afluente, para tener un registro de la temperatura del sustrato del biodigestor.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Al igual que los SV, el valor de DQO es un indicador de la presencia de materia orgánica presente en la muestra. Según el análisis de laboratorio, el valor de DQO se informa en mgO₂/l e indica la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la muestra en base a su contenido de materia orgánica (Nwaigwe y Enweremadu, 2015). A mayor contenido de materia orgánica en la muestra, mayor será el valor de DQO. La medición de DQO debe realizarse en laboratorios habilitados para este análisis, ojalá sobre muestras de afluente y efluente con el fin de poder calcular el porcentaje de remoción de DQO. Una metodología estandarizada y rápida para la determinación de DQO desde una muestra corresponde al uso kits de análisis que vienen con viales, los que contienen un agente oxidante (dicromato de potasio) capaz de reducirse en presencia de materia orgánica. Una alícuota de muestra bien homogenizada es depositada dentro del tubo, el que luego se calienta en una termoplaca a 150°C por 2 horas. Finalmente, la lectura de DQO se realiza en un equipo colorímetro adecuado para la marca de viales utilizados. Determinando la DQO de entrada y salida del biodigestor se puede calcular la eficiencia en base a la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de remoción de DQO (\%)} = \frac{DQO_E - DQO_S}{DQO_E} \times 100$$

DQO_E : DQO de entrada al biodigestor

DQO_S : DQO de salida del biodigestor

La medición de DQO corresponde a un método alternativo al utilizado en la determinación de sólidos volátiles, para la medición de materia orgánica en una muestra. Éste puede ser rápido y fácil en el caso de utilizar kits comerciales, pudiendo obtener resultados el mismo día de análisis a diferencia de los SV, sin embargo, su costo puede ser mayor.

Macronutrientes (nitrógeno total y amoniacal, fósforo y potasio)

Las bacterias presentes en el digestor requieren de nutrientes que sean fuentes de carbono y nitrógeno, además de otras sales minerales como fósforo, y potasio. Dado que el sustrato a estos biodigestores corresponde a purines de predios lecheros, se espera que el afluente tenga valores de nutrientes en los rangos reportados para purines de lecherías de la Zona Sur por Salazar et al. (2012) (tabla 1). Luego de la digestión anaeróbica, donde parte de la materia prima ha sido degradada, se espera una disminución en el porcentaje de materia seca y materia orgánica seca, y un incremento o mayor disponibilidad de nutrientes en base

seca. En el caso del nitrógeno orgánico, éste es hidrolizado aumentando las concentraciones de nitrógeno amoniacal (Manual biogás- FAO, 2011).

Tabla 1. Valores promedio de N, P y K en purines de lecherías del Sur de Chile.

Parámetro	Promedio	Mínimo	Máximo
	(kg/m ³ de purín)	(kg/m ³ de purín)	(kg/m ³ de purín)
Nitrógeno total*	1,28	0,16	5,25
Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)*	0,50	0,02	2,11
Fósforo (P₂O₅)*	0,47	0,03	2,29
Potasio (K₂O)*	1,06	0,07	4,86

*Valores reportados en base peso húmedo (BPH)

Fuente: Salazar et al., 2012

Se recomienda realizar análisis de nutrientes en el digestato (ver tabla 2) con la finalidad de poder determinar las dosis a aplicar en praderas y/o cultivos. Existen otros macro y micronutrientes que pueden ser caracterizados desde las muestras del biodigestor (e.g. Ca, Mg, Na, Zn, Fe, Mn y Cu), lo que dependerá de los objetivos del monitoreo, por ejemplo, para determinar concentraciones de elementos limitantes de la biodigestión (Ej. alto contenido de calcio). Para valores referenciales de parámetros en muestras de afluente, efluente consultar tablas 3 y 4 en Capítulo 5.

LÍNEA DE BIOGÁS

Composición Biogás

La composición del biogás depende del material digerido. El biogás producido desde residuos de lechería está compuesto principalmente por metano (50-70%) y dióxido de carbono (35-45%), seguido por otros gases traza como sulfuro de hidrógeno (<4.500 ppmv), amoniacal, hidrógeno, vapor de agua, nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono, entre otros (Burke, 2001; Manual Biogás-FAO, 2011; Pelletin et al., 1988). Para valores referenciales para parámetros de producción de biogás desde muestras de afluente, consultar Tabla 5.

Metano (CH₄)

El metano es producido por organismos metanogénicos en un proceso denominado metanogénesis. Si la producción de metano es baja, se puede asumir que la actividad metanogénica está inhibida. Además, es importante que el contenido de metano en el biogás no caiga por debajo del 45% (%v/v) pues de lo contrario no será inflamable (Deublein y Steinhäuser, 2008).

Dióxido de carbono (CO₂)

Es formado durante los procesos de hidrólisis y acidogénesis, y durante la formación de metano. Es capaz de disolverse en agua, formando bicarbonato, lo que aporta a la capacidad tamponante de sustrato. No es inflamable.

Sulfuro de hidrógeno (H₂S)

Es el gas responsable de dar olor al biogás. Se encuentra como ácido sulfhídrico en disolución acuosa y tiene un olor característico a huevo podrido. Una vez oxidado, tiene propiedades altamente corrosivas. El principal objetivo de medir este gas es para evitar el daño y corrosión de equipos que utilicen biogás y, velar por la seguridad del personal que opera la planta de biogás, ya que este gas es tóxico. El límite de corrosión estará dado por las características de cada equipo.

Vapor de agua

La humedad del biogás durante a su formación es alta. En el caso que el biogás sea transformado a energía eléctrica o térmica, es importante remover la presencia de agua, la que afecta negativamente al funcionamiento y viabilidad de equipos provocando su corrosión, además de interferir el paso de biogás en el sistema. La purga de vapor de agua se puede realizar a través de condensadores o colectando el agua condensada en la línea de gas en el punto más bajo posible.

Otros gases traza

Todos los gases antes señalados y otros gases traza pueden ser determinados desde una muestra de biogás mediante cromatografía de gases con detector de conductividad térmica (TCD) o mediante equipos portátiles. Sin embargo, se sugiere analizar de forma periódica por lo menos las concentraciones de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno en el biogás, con el objetivo de conocer la estabilidad del biodigestor.

Los parámetros obtenidos desde cada planta de biogás pueden ser muy variables. En las tablas 4, 5 y 6 se reportan valores obtenidos desde muestras colectadas en digestores anaeróbicos a partir de purines lecheros en el Sur de Chile y otros biodigestores de características similares descritos en literatura.

Dónde enviar las muestras y qué analizar de cada muestra

Las muestras de afluente, efluente y líquido del reactor deben ser enviadas a un laboratorio con experiencia en análisis de estas matrices orgánicas (Ej. purines). Laboratorios para este tipo de análisis, algunos de ellos acreditados (Ej. ISO 9.000 o ISO 17.500) se pueden encontrar generalmente en universidades, instituciones o empresas privadas dedicadas al manejo de residuos industriales líquidos (RILES). Las muestras de biogás podrán ser analizadas mediante cromatografía o a través del uso de equipos infrarrojos portátiles, calibrados debidamente para la determinación de los distintos gases que componen el biogás. Cualquiera sea el caso, será importante asegurarse que el laboratorio donde finalmente sea enviada la muestra cuente con las certificaciones correspondientes para el análisis de este tipo de sustratos (matriz) en la medición de los distintos parámetros.

Tabla 2. Frecuencias de muestreo y registros sugeridos para plantas de biogás a partir de purines lecheros.

Muestra	Parámetro a analizar	Tipo de análisis	Periodicidad mínima sugerida
Afluente	ST	Laboratorio	Semanal
	SV	Laboratorio	Semanal
	pH	En terreno mediante equipo portátil o en laboratorio	Diaria
	DQO	Laboratorio	Mensual
Efluente	ST	Laboratorio	Semanal
	SV	Laboratorio	Semanal
	pH	En terreno mediante equipo portátil o en laboratorio	Diaria
	DQO	Laboratorio	Mensual
	Macronutrientes: N, P, K, N- NH ₃	Laboratorio	Previo a cada aplicación de digestato o en su defecto, utilizar análisis previos realizados en el mismo predio o tabla de valores estándar referenciales para efluentes de biodigestores de la misma geográfica.
	Alcalinidad	Laboratorio	Semanal
	Registro de aplicación de digestato	Registro en planilla	Diario
Líquido del digestor	pH	En terreno con equipo portátil o en laboratorio	Diaria
	Temperatura	En terreno con termómetro o equipo portátil	Diaria
	Alcalinidad	Laboratorio	Semanal
Biogás	Metano	Equipo analizador de gases portátil o laboratorio	Mensual
	Dióxido de carbono	Equipo analizador de gases portátil o laboratorio	Mensual
	Sulfuro de hidrógeno	Equipo analizador de gases portátil o laboratorio	Mensual
	Vapor de agua	Equipo analizador de gases portátil o laboratorio	Semestral
	Producción de biogás	Equipo medidor	Diario

Fuente: Elaboración propia

POSIBLES PROBLEMAS Y MEDIDAS CORRECTIVAS ASOCIADAS A LA TOMA DE MUESTRAS COLECTADAS DURANTE EL MONITOREO DEL BIODIGESTOR (CHECK LIST)

En tabla 3 se describen posibles problemas asociados al monitoreo de una planta de biogás a partir de purines bovinos de lechería. Para estos mismos se describen posibles causas y medidas de mitigación.

Tabla 3. Posibles problemas asociados a la toma de muestras colectadas durante el monitoreo de una planta de biogás a partir de purines bovinos lecheros.

Parámetro	Problema asociado	Posible causa	Posible solución
pH	Acidificación	Acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV)	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir la velocidad de carga orgánica al digester hasta estabilizar el sistema. - Agregar químico para ajuste de pH (Ej. cal, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio) - Oxigenar el digester de forma controlada y limitada ayuda a la eliminación del exceso de AGV. - Re inocular el biodigestor con lodo anaeróbico estable (efluente de otro biodigestor).
Biogás	Bloqueo de la salida de biogás. No es posible realizar la toma de muestra de biogás desde válvula de salida ni monitorear la producción de éste.	Bloqueo de la línea de gas al interior del digester, provocado por sobreacumulación de sustrato al interior del reactor.	<ul style="list-style-type: none"> - La sobreacumulación de sustrato al interior del reactor puede ocurrir por el bloqueo de la línea de salida de digestato o rebalse del acopio de éste. Se debe mantener el canal de salida de digestato libre de cualquier obstáculo que impida tener un caudal estable de efluente. De igual manera, el estanque de acopio debe mantenerse a un nivel que permita seguir acumulando digestato. En el caso que llegue a nivel máximo, debe vaciarse el estanque, idealmente aplicando el digestato en pradera como biofertilizante.

<p>Fuga de gas. Fuga de biogás impide que éste pueda ser acumulado por la membrana y medido de forma correcta por el medidor. No se puede cuantificar el biogás consumido.</p>	<p>Las fugas pueden originarse desde distintos puntos por desgaste de material, fallo del material o accidente. Estos puntos se originan generalmente en:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La misma línea de gas (Ej. tubería de PVC) - La membrana del Digestor - En equipos que utilizan biogás 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar el punto de fuga, utilizando equipos de medición de gases. Existen equipos portátiles capaces de determinar concentraciones de metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, cuando éstos se encuentran por sobre el Límite Explosivo Inferior (LEL). Otra forma de detectar un punto de fuga es realizar pruebas con detergente, aplicando una mezcla de detergente diluido en agua (generando bastante espuma). Donde haya escape de gas, y si es que existe un mínimo de presión, se formarán burbujas de mayor tamaño. - Una vez identificado el punto de fuga, se deberá sellar utilizando el material y procedimiento apropiado. Si es en la línea de gas, considerar cambiar el tramo de tubería afectado. Si la fuga proviene de la membrana del digestor, utilizar un sellante sugerido. - Finalmente corroborar que el sello haya sido efectivo con equipo medidor de gas o pruebas de fuga con detergente. - Otra forma de detectar fugas de biogás es observar las piezas metálicas de su estructura, si presentan corrosión es posible que exista una fuga de biogás cercana.
--	--	---

Canal de afluente del biodigestor	No hay entrada de afluente al biodigestor.	Bloqueo en algún punto del canal de purines o decantadores previo al ingreso al biodigestor, por acumulación de sólidos.	<ul style="list-style-type: none"> - Revisar que el canal que conduce los purines desde lechería hasta el biodigestor esté despejado de sólidos que puedan bloquear el paso de purines al biodigestor. - Revisar que los decantadores estén limpios y funcionando adecuadamente, sin bloquear la entrada de purines hacia el biodigestor. - Realizar mantención periódica de los decantadores.
		No es la hora de escurrimiento de purines o limpieza de pisos.	<ul style="list-style-type: none"> - Coordinar con el productor o persona encargada del predio los horarios en que se realiza la limpieza de pisos en lechería y empieza el escurrimiento de purines al digestor. Si la planta de biogás posee separador de sólidos o pozo purinero antes del biodigestor, se debe tener en cuenta el tiempo que demoran los purines en rebalsar y entrar al reactor.
Canal de efluente del biodigestor	Sobreacumulación de líquido al interior del reactor por rebalse de digestato en estanque de acumulación.	Saturación del pozo de almacenamiento. No se ha aplicado el digestato.	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicar de forma periódica el digestato acumulado en el pozo de almacenamiento.

No hay salida de efluente desde el biodigestor.	Acumulación de sólidos en el canal de salida del biodigestor.	- Con un listón de madera o plástico revolver el líquido al interior desde el canal de salida del biodigestor, hasta lograr destapar el canal de salida de digestato. De persistir el
	No hay rebalse del líquido del reactor suficiente para generar digestato.	- Se debe calcular previamente el tiempo que demora en rebalsar el líquido del reactor después de que haya ingresado todo el afluente. De esta forma, sabiendo el horario en que se genera el caudal de afluente del biodigestor se podrá estimar la hora en que se genera el digestato.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS ESPERADOS

En las tablas 4, 5 y 6 se presentan valores referenciales para distintos parámetros de producción de biogás desde muestras de afluente, efluente y biogás.

Tabla 4. Resumen de valores referenciales para parámetros de producción de biogás desde muestras de afluente

Parámetro	Unidad	Rango para muestras de afluente desde biodigestores tipo laguna cubierta en el sector lechero del Sur de Chile, principalmente bajo sistemas pastoriles ⁱ	Valor referencial bibliográfico	Referencia bibliográfica
ST	(%)	0,3 – 8,7	0,2 – 13,7	b, c, d
SV	(%)	69,6 – 96,8	35,5 – 89,0	a, c
pH	-	6,5 – 8,0	6,8 – 8,5	a, c, e
*N total	(kg/t)	0,2 – 4,2	0,2 – 5,3	d
*P total (P ₂ O ₅)	(kg/t)	0,1 – 1,1	0,03 - 2,3	d
*K total (K ₂ O)	(kg/t)	0,2 – 2,9	0,1 – 4,9	d
*N amoniacal (N-NH ₃)	(kg/t)	0,1 – 1,8	0,02 – 2,1	d
DQO	(mgO ₂ /L)	3.425 – 69.622	8.627 - 120.320	c, f, g
Alcalinidad	(mgCaCO ₃ /L)	1.192 – 11.697	8.000 - 9.000	h

Fuente: Elaboración propia

*BPH: Base peso húmedo NR: No reportado

^a Pettygrove et al., 2009; ^b Liebrand et al., (2009); ^c Burke, (2001); ^d Salazar et al., (2012); ^e Alam et al., (2017); ^f Nwaigwe et al., (2015); ^g Sunil & Shinkar., (2017); ^h Bergland et al., (2014); ⁱ Estudios en línea base efectuados por INIA en el marco del Proyecto Biogás Lechero, 2016.

Tabla 5. Resumen de valores referenciales para parámetros de producción de biogás desde muestras de efluente

Parámetro	Unidad	Rango para muestras de efluente desde biodigestores tipo laguna cubierta en el sector lechero del Sur de Chile principalmente bajo sistemas pastoriles ^f	Valor referencial bibliográfico	Referencia bibliográfica
ST	(%)	0,2 – 0,6	0,5 – 3,0	b
SV	(%)	52,1 – 63,0	65,0	c
pH	-	7,0 – 7,2	6,8 – 8,5	a
*N total	(kg/t)	0,3 – 0,6	0,16 – 5,25	d
*P total (P ₂ O ₅)	(kg/t)	0,1 – 0,2	0,03 - 2,29	d
*K total (K ₂ O)	(kg/t)	0,3 – 0,6	0,07 – 4,86	d
*N amoniacal (N-NH ₃)	(kg/t)	0,1 – 0,4	0,02 – 2,11	d
DQO	(mgO ₂ /L)	1.821 – 6.024	Variable según sustrato y tecnología del biodigestor	-
Alcalinidad	(mgCaCO ₃ /L)	1.016 – 3.239	500-900	e

Fuente: Elaboración propia

*BPH: Base peso húmedo

^a Guide to biogas from production to use – giz; ^b Liebrand et al., (2009); ^c Burke, (2001); ^d Salazar et al., (2012); ^e Sunil & Shinkar., (2017); ^f Estudios en línea base efectuados por INIA en marco del Proyecto Biogás Lechero, 2016.

Tabla 6. Resumen de valores referenciales para parámetros de producción de biogás

Parámetro	Unidad	Rango para muestras de biogás recolectadas desde biodigestores tipo laguna cubierta en el sector lechero del Sur de Chile principalmente bajo sistemas pastoriles ^g	Valor referencial bibliográfico	Referencia bibliográfica
Metano, CH ₄	(% v/v)	55,6 – 69,2	45,0 – 75,0	a, b, c, d
Dióxido de carbono, CO ₂	(% v/v)	NR	25,0 – 45,0	a, e
Sulfuro de hidrógeno, H ₂ S	(% v/v)	NR	Cantidades traza	a
Vapor de agua	(% v/v)	NR	<1,5	a, b
Producción de biogás	(m ³ /vaca/día)	0,3 – 0,7	0,1 - 1,3	a, f
Potencial térmico	(kWh/predio/día)	24,2 – 37,3	Variable según equipo y tamaño del predio. (6,0 kWh/m ³ biogás ^h)	-
Potencial eléctrico	(kWh/predio/día)	7,3 – 28,1	Variable según equipo y tamaño del predio. (6,0 kWh/m ³ biogás ^h)	-

Fuente: Elaboración propia

NR: No reportado

^a Liebrand et al., (2009); ^b Burke, (2001); ^c Sunil & Shinkar., (2017); ^d Alam et al., (2017); ^e Sunil & Shinkar., (2017); ^f NIWA – Dairy Australia; ^g Estudios en línea base efectuados por INIA en marco del Proyecto Biogás Lechero, 2016; ^h Vögeli et al., 2014.

Glosario

Ácidos grasos volátiles (AGV): ácidos grasos de cadena corta que contienen entre 2 a 5 átomos de carbono. Son un sub-producto de la fermentación llevada a cabo en la digestión anaeróbica. Un aumento en la concentración de éstos en el sistema implica una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás.

Afluente: Material de entrada. En este contexto hace referencia a los purines que ingresan al biodigestor como sustrato.

Biogás: Gas combustible que proviene de la digestión de materia orgánica por bacterias anaeróbicas. Corresponde a una mezcla de gases, cuyos componentes principales son metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Además, puede haber presencia de nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno (H₂S), vapor de agua y otros gases traza.

Condensador: Se hace referencia a un condensador de humedad, cuya función es impedir el paso de agua a las bombas y equipos ubicadas en la línea de biogás de la planta.

Digestato: sub-producto líquido de la digestión anaeróbica. También se conoce como efluente del biodigestor. Se puede utilizar como biofertilizante.

DQO: Demanda química de oxígeno, corresponde a una medida de oxígeno consumido por actividad microbiana tras la oxidación de materia orgánica inerte en agua.

Efluente: material de salida. En este contexto hace referencia al sub-producto líquido de la digestión anaeróbica. También se conoce como digestato.

Filtro de H₂S: Corresponde a un filtro para biogás que impide el paso de partículas de sulfuro de hidrógeno. Estos filtros pueden ser de viruta metálica, biofiltros, liberación de iones de hierro, o alternativamente a través de la micro inyección de aire dentro del biodigestor (Biogás en el sector lechero, guía GEF ONUDI 2018).

Materia Seca: El residuo remanente tras calentar una muestra a condiciones estándar (usualmente a 105°C) con el fin de remover el agua presente en ella. Generalmente se expresa como porcentaje del peso de la muestra original.

Materia orgánica: Residuos derivados de plantas, animales y microorganismos en diferentes estados de descomposición.

Membrana: referencia a la bolsa gasómetro del biodigestor. Está compuesta de un material flexible que se estira según el grado de producción de biogás.

Nitrógeno amoniacal: Concentración total de amonio y amoniaco contenido en purines y estiércol.

Nitrógeno total kjeldahl (Ntk): Concentración total de nitrógeno orgánico y forma reducida de nitrógeno contenido en estiércol de ganado, excluyendo nitrato.

Sustrato: materia prima del digestor anaeróbico. Hace referencia a la materia prima disponible para la degradación de materia orgánica. En este caso el sustrato del biodigestor corresponde a purines bovinos lecheros.

Referencias bibliográficas

Alam M., O. Antilla, I. Demir, E. Yuksel y O. Gunaydin O. 2017. Anaerobic digestion of dairy manure – A review. Digital proceeding of ICOCEE, Nevsehir, TURKEY, May 8-10, 2017.

Bergland W., C. Dinamarca, R. Bakker. 2014. Efficient biogas production from the liquid fraction of dairy manure. International conference of renewable energies and power quality, España, 8-10 abril.

Burke, Dennis A. 2001. Dairy Waste Anaerobic digestion handbook. Environmental Energy Company.

Deublein D., A. Steinhauser. 2008. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 443p.

FAO. 2011. Manual de biogás. MINENERGIA/PNUD/FAO/GEF. Santiago de Chile.

GIZ. 2010. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH & BMZ – Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. Guide to biogas from production to use. FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.

Jing Y., B. Don, J. Jin, X. Dai. 2014. Effect of increasing total solids contents on anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions performance and microbial characteristics analysis. PLOS one 9(7): e102548.

INIA. 2016. Estudio actualizado de línea base del proyecto GEF de fomento del biogás en el sector lechero (productores, potencial energético, generación de CO₂, cabezas animales por predio, justificación territorial, etc. <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/629?show=full> (consultado en junio, 2018).

Liebrand, C., C.K. Ling. 2009. Cooperative approaches for implementation of dairy manure digesters. USDA rural development.

Nwaigwe K. y C. Enweremadu. 2015. Analysis of chemical oxygen demand (COD) removal rate using upflow bioreactor with central substrate dispenser (UBCSD). 4th Int'l Conference of advances in Engineering Sciences & Applied Mathematics. Kuala Lumpur (Malaysia). Dec. 8-9, 2015.

Pellerin R.A, L.P. Walker, M.G. Heisler y G.S. Farmer. 1988. Operation and performance of Biogas-Fueled Cogeneration systems. Energy in Agriculture, 6: 295-310.

Pettygrove G. 2009. Dairy manure nutrient content forms. University of California Cooperative Extension Manure Technical Bulletin Series. <http://manuremanagement.ucdavis.edu> (consultado en junio, 2018).

NIWA - Phelps C., Heubeck S., Craggs R. SF. Is biogas technology right for Australian dairy farms?

Salazar, F. 2012. Manual de manejo y utilización de purines de lechería. Consorcio Lechero (Chile). p116.

Sunil B. y N. Shinkar. 2017. Anaerobic digestion of dairy industry waste water – biogas evolution – a review. International Journal of applied environmental sciences, 6:1117-1130.

Vögeli Y., C.R. Lohri, A. Gallardo, S. Diener, C. Zurbrügg. 2014. Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Suiza.

BIOGÁS EN EL SECTOR LECHERO EN CHILE

