

TERCER SIMPOSIO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL PERÚ



05 al 07 de Setiembre

Universidad Nacional Agraria La Molina



“Aprovechamiento de aguas residuales domésticas para producción de biogás y biol mediante digestores de carga diaria ”

Ing. Amb. Lucila Pinto Cieza

Asesor: Ing. Lawrence Quipuzco Ushñahua

OBJETIVOS

Evaluar la reutilización de aguas amarillas y grises para la producción de biogás y fertilizante líquido (biol) mediante biodigestores de carga diaria.

Objetivos Específicos

- Comparar la calidad y cantidad de biogás producido utilizando aguas residuales domésticas de LIA y purín de cerdo como alimentación de biodigestores con respecto a la utilización de agua de pozo de la UNALM y purín de cerdo.
- Evaluar la calidad de fertilizante líquido (biol) obtenido de los tratamientos aplicados.
- Determinar la reducción de organismos patógenos mediante los tratamientos aplicados.

METODOLOGÍA

Diseño Experimental

- Se planteó un diseño completamente al azar (DCA) con **2 tratamientos y 3 repeticiones**, durante un periodo de evaluación de **14 semanas (Marzo – Junio 2012)**
- Se utilizaron reactores biodigestores del tipo **semi continuo** de 80 litros de capacidad.
- Los dos tratamientos tuvieron una concentración de **8% de sólidos totales** en los reactores
- Sustrato base: **Purín de cerdo**



Reactor Biodigestor

METODOLOGÍA

Tratamientos

| Tratamiento | Sustratos |
|---------------|--------------------------------|
| Tratamiento 1 | Purín de cerdo + agua de pozo |
| Tratamiento 2 | Purín de cerdo + agua residual |

- **Agua de Pozo:** Obtenida de los grifos del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNALM
- **Agua residual:** Aguas amarillas y aguas grises obtenidas de los servicios higiénicos de varones del primer piso del Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

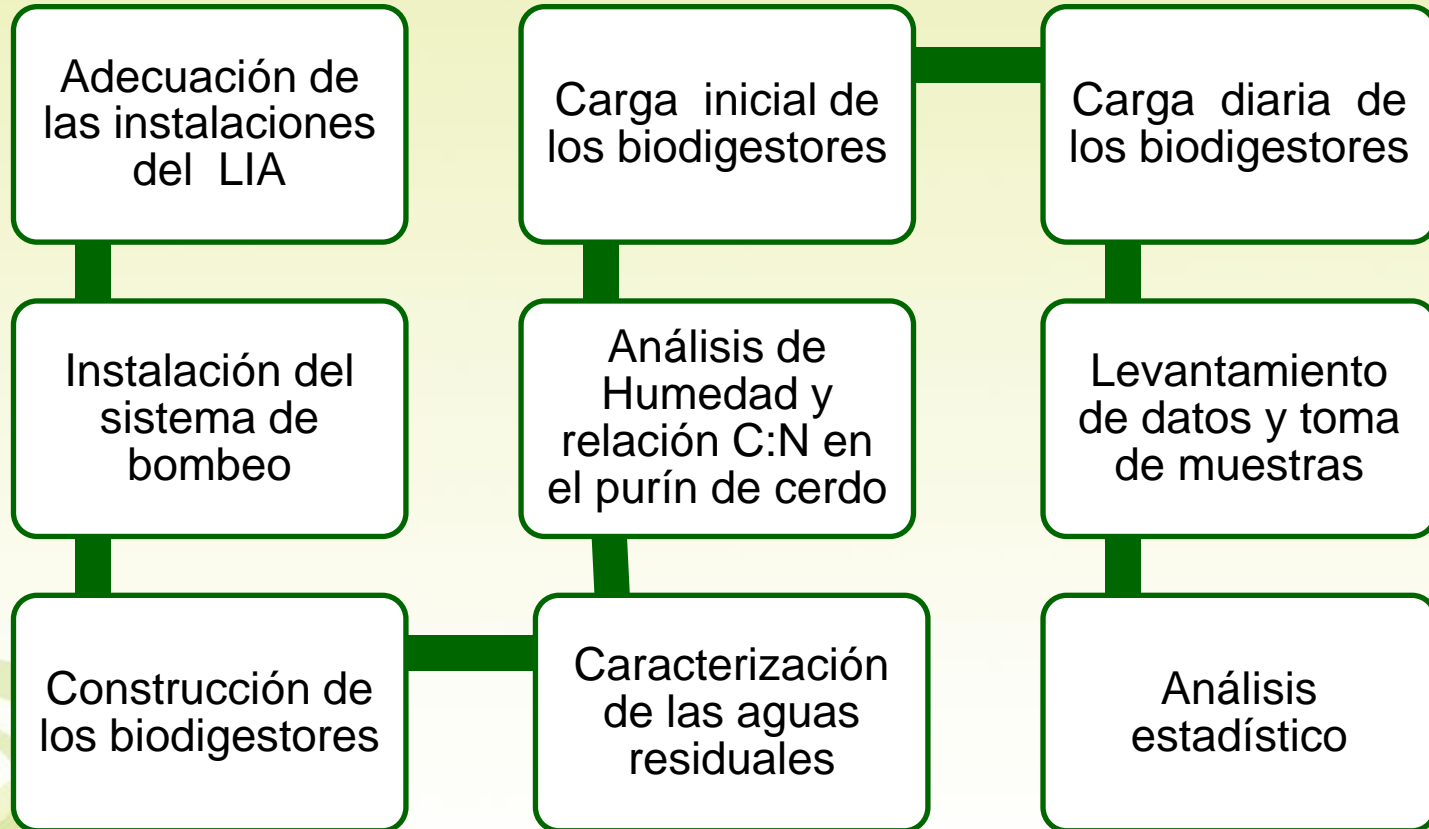
METODOLOGÍA

Etapas

| | |
|------------------------|--|
| CARGA INICIAL | Periodo de tiempo que se da para que el sistema se active y comience la producción de biogás |
| CARGA DIARIA | Alimentación diaria del biodigestor |
| PERIODO CONTROL | Verificar la evolución de biogás en el tiempo y maduración del biol |

METODOLOGÍA

Procedimiento



METODOLOGÍA : Procedimiento

1. Adecuación de las instalaciones del LIA

Se realizó una modificación del desagüe para tener acceso a las aguas residuales. Se modificaron 4 cañerías correspondientes a los desagües de 2 urinarios y de 2 lavamanos. Así mismo se realizó la instalación de un bidón de almacenamiento para las mismas.



Modificación de las cañerías de desagüe



Bidón de almacenamiento

METODOLOGÍA : Procedimiento

2. Instalación del sistema de bombeo de las aguas residuales

Para realizar la caracterización y utilización de las aguas residuales se instaló un sistema de bombeo no fijo, lo cual permitía el uso de las aguas residuales cuando era necesario. Este sistema de bombeo consistía en la instalación de una bomba periférica de 0.5 hp de potencia y accesorios de bombeo.

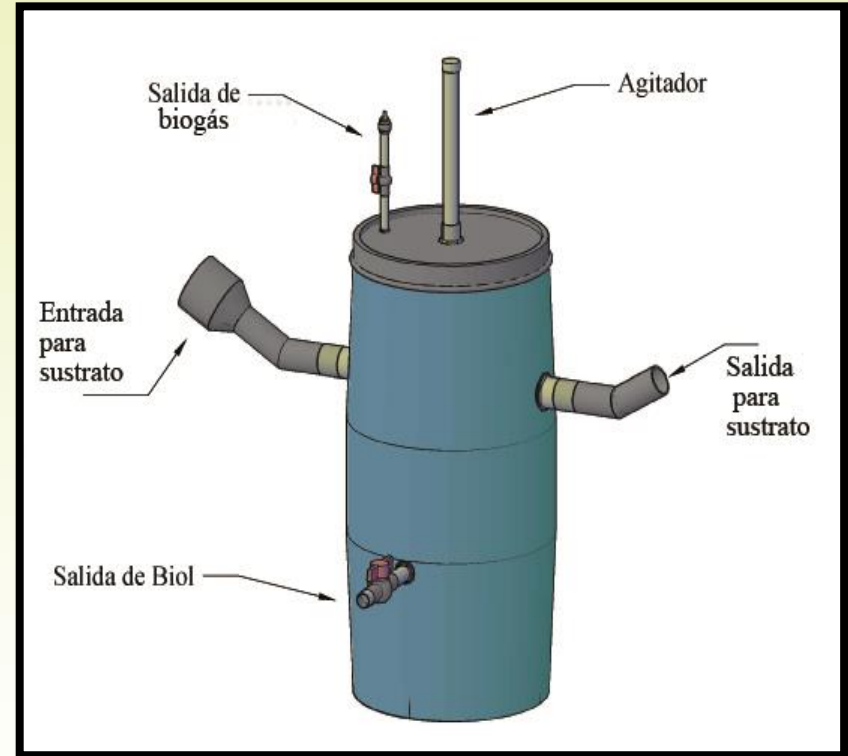


Sistema
De
Bombeo

METODOLOGÍA : Procedimiento

3. Construcción de los reactores biodigestores

- Se construyeron 6 prototipos de biodigestor de tipo semi continuo, para lo cual se utilizaron bidones de 20 galones de capacidad.
- Para la presente investigación se utilizaron los bidones de una investigación precedente donde se utilizaban prototipos de tipo batch, para lo cual estos prototipos fueron adaptados para obtener un biodigestor semi continuo.



Esquema de los reactores

METODOLOGÍA : Procedimiento

4. Caracterización de las aguas residuales

4.1. Cálculo del caudal de la aguas residuales

Se determinó la generación diaria de aguas amarillas y grises por personas durante cinco días, empezando el día 25 de enero hasta el día lunes 30 del mismo mes.

| Día | Fecha | Volumen (Litros) | Personas | Horas de uso | Caudal (litro por hora por persona) |
|------------------------|--------------|------------------|----------|--------------|--------------------------------------|
| 1 | Miércoles 25 | 150 | 17 | 4 | 2.20 |
| 2 | Jueves 26 | 127 | 17 | 4 | 2.26 |
| 3 | Viernes 27 | 145 | 17 | 4 | 2.13 |
| 4 | Sábado 28 | - | - | - | - |
| 5 | Domingo 29 | - | - | - | - |
| Caudal promedio | | | | | 2.19 |

Resultados de medición de volumen y caudal diario producido de aguas residuales en el LIA

METODOLOGÍA : Procedimiento

4. Caracterización de las aguas residuales

4.2. Caracterización física, química y biológica

Para las aguas grises y amarillas se caracterizaron los parámetros mostrados en el cuadro.

Asimismo para el **agua de pozo** se realizó el análisis de los siguientes parámetros:

- pH
- Temperatura
- Conductividad
- Nitrógeno
- Sólidos totales
- Sólidos volátiles

| Parámetro | Unidades | Tipo de parámetros |
|---|-------------|--------------------|
| Temperatura | °C | In situ |
| pH | - | In situ |
| Conductividad eléctrica | us/cm | In situ |
| Oxígeno disuelto | mg/l | In situ |
| Turbiedad | NTU | Laboratorio |
| Sólidos totales (ST) | mg/l | Laboratorio |
| Sólidos volátiles (SV) | mg/l | Laboratorio |
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) | mg/l | Laboratorio |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | mg/l | Laboratorio |
| Alcalinidad | mg/l | Laboratorio |
| Fosforo Total (P) | mg/l | Laboratorio |
| Nitrógeno (N) | % | Laboratorio |
| Sulfatos (SO ₄) | mg/l | Laboratorio |
| Detergentes | mg/l | Laboratorio |
| Coliformes totales | NMP/ 100 ml | Laboratorio |
| Coliformes fecales | NMP/ 100 ml | Laboratorio |

METODOLOGÍA : Procedimiento

4. Caracterización de las aguas residuales

4.2. Caracterización física, química y biológica



Recolección de muestras de agua residual para posterior análisis



Medición de parámetros en el laboratorio

METODOLOGÍA : Procedimiento

5. Análisis de la humedad (%) y relación Carbono: Nitrógeno del purín de cerdo

Se tomó una muestra homogenizada de un litro de purín de cerdo. La muestra se llevó al laboratorio de Análisis Químico de la Universidad Nacional Agraria La Molina para que se realice el análisis respectivo, el cual corresponde al método ASTM D 5142-90, “Método de análisis aproximado de Carbono” y al Método AOAC 955.94, “Método de microKjeldhal”.

| Muestra | Humedad (%) | Materia Volátil (%) | Ceniza (%) | Carbono orgánico volátil (%) | Nitrógeno (%) | C/N |
|----------------|-------------|---------------------|------------|------------------------------|---------------|-------|
| Purín de cerdo | 75.01 | 3.16 | 21.77 | 1.87 | 0.17 | 11.10 |

Resultados de análisis de determinación de contenido de humedad, carbono y nitrógeno en el Laboratorio de Análisis Químico de la UNALM

METODOLOGÍA : Procedimiento

6. Carga inicial de los reactores

- Se trabajó con un porcentaje de sólidos totales del 8%.
- Según Schlaefli (2010), la siguiente formula nos permite calcular la cantidad de sustrato necesario para obtener el porcentaje de sólido deseado:

$$Kg \text{ sustrato} = \frac{ST * 100}{\% MS}$$

Donde:

- ST: Representa la cantidad necesaria de sólidos totales en el biodigestor, que fue del 8% del volumen útil del reactor.
- %MS: Porcentaje de materia seca

El porcentaje de materia seca se calcula realizando un cálculo de resta entre el porcentaje de humedad y el 100%. Para el caso del purín de cerdo se tiene una humedad de 75.01 por lo que el % MS corresponde a un 24.99 %.

METODOLOGÍA : Procedimiento

6. Carga inicial de los reactores

Para realizar el cálculo del sustrato se calculó primero el volumen útil del reactor que corresponde a 64 litros considerando un 80% del volumen total para la fase líquida y el 20% para la fase gaseosa.

Como se quiere tener un 8% de sólidos contenidos en el reactor, este 8% debe estar contenido dentro del volumen de la fase líquida.

Por lo tanto,

$$\text{Kilos de materia seca} = \text{Volumen útil} * 8\%$$

$$\text{Kilos de materia seca} = 64\text{litros} * 8\%$$

$$\text{Kilos de materia seca} = 5.12 \text{ Kg.}$$

Reemplazando este valor en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$\text{Kg sustrato} = \frac{5.12 * 100}{24.99}$$

$$\text{Kg sustrato} = 20.49 \text{ kg}$$

METODOLOGÍA : Procedimiento

6. Carga inicial de los reactores

La cantidad de sustrato utilizado para la carga inicial de los reactores se muestra en el cuadro siguiente:

| Tratamiento | Sustratos | Purín de Cerdo (kg) | Agua de pozo (litros) | Agua residual (litros) |
|----------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Tratamiento 1 | Purín de cerdo + agua de pozo | 20.49 | 43.51 | - |
| Tratamiento 2 | Purín de cerdo + agua residual | 20.49 | - | 43.51 |

METODOLOGÍA : Procedimiento

7. Carga diaria de los reactores

Para el cálculo de la carga diarios de los reactores, se siguió el mismo procedimiento que para la carga inicial, obteniéndose los siguientes resultados:

| Tratamiento | Sustratos | Purín de Cerdo (kg) | Agua de pozo (litros) | Agua residual (litros) |
|---------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Tratamiento 1 | Purín de cerdo + agua de pozo | 0.680 | 1.45 | - |
| Tratamiento 2 | Purín de cerdo + agua residual | 0.680 | - | 1.45 |

Carga diaria: 2.13 kg

METODOLOGÍA : Procedimiento

7. Carga diaria de los reactores



Preparación de la carga diaria para la alimentación del reactor



Carga diaria de unos de los reactores

METODOLOGÍA : Procedimiento

8. Levantamiento de datos y toma de muestra

pH

Para realizar la medición del pH se utilizó un potenciómetro de campo del Laboratorio de Ingeniería Ambiental. La medición se realizó dos veces por semana por espacio de 14 semanas.

Composición
de biogás

Para medir la composición del biogás se utilizó el equipo Monitor de Gas por Extracción, marca LANTEC, modelo GEM500, el cual nos muestra la composición porcentual de CH_4 , CO_2 , O_2 y gases trazas en el biogás. Las mediciones se realizaron dos veces por semanas en un lapso de 14 semanas que duro la fase experimental.

METODOLOGÍA : Procedimiento

8. Levantamiento de datos y toma de muestra

Volumen

Para la medición del volumen de biogás producido se adaptó un sistema de medición basados en el desplazamiento de volúmenes. La medición se realizó una vez por semana.

Temperatura

La temperatura se midió con el equipo de Gas por Extracción, marca LANTEC, modelo GEM500, el cual tiene un sensor de temperatura el cual permite medir la temperatura. Las mediciones se realizaron dos veces por semanas durante un lapso de 14 semanas

METODOLOGÍA : Procedimiento

8. Levantamiento de datos y toma de muestra



Medición de pH en una muestra de biol



Medición de volumen de biogás

METODOLOGÍA : Procedimiento

8. Análisis estadístico

La parte experimental se planteo como un Diseño Completamente al Azar (DCA) con 2 tratamientos y 3 repeticiones cada uno.

Para la validación estadística de los datos se utilizó el programa Minitab 16, utilizándose el coeficiente de variabilidad, análisis de varianza y la prueba de Tuckey, la cual permite evaluar la significancia de todas las diferencias entre tratamientos

RESULTADOS

- Caracterización de aguas residuales y agua de pozo
- Comportamiento del pH
- Comportamiento de la temperatura interna y ambiental
- Calidad de biogás - Concentración porcentual de Metano
- Volumen de biogás producido
- Volumen de biogás acumulado
- Calidad de Biol
- Reducción de patógenos

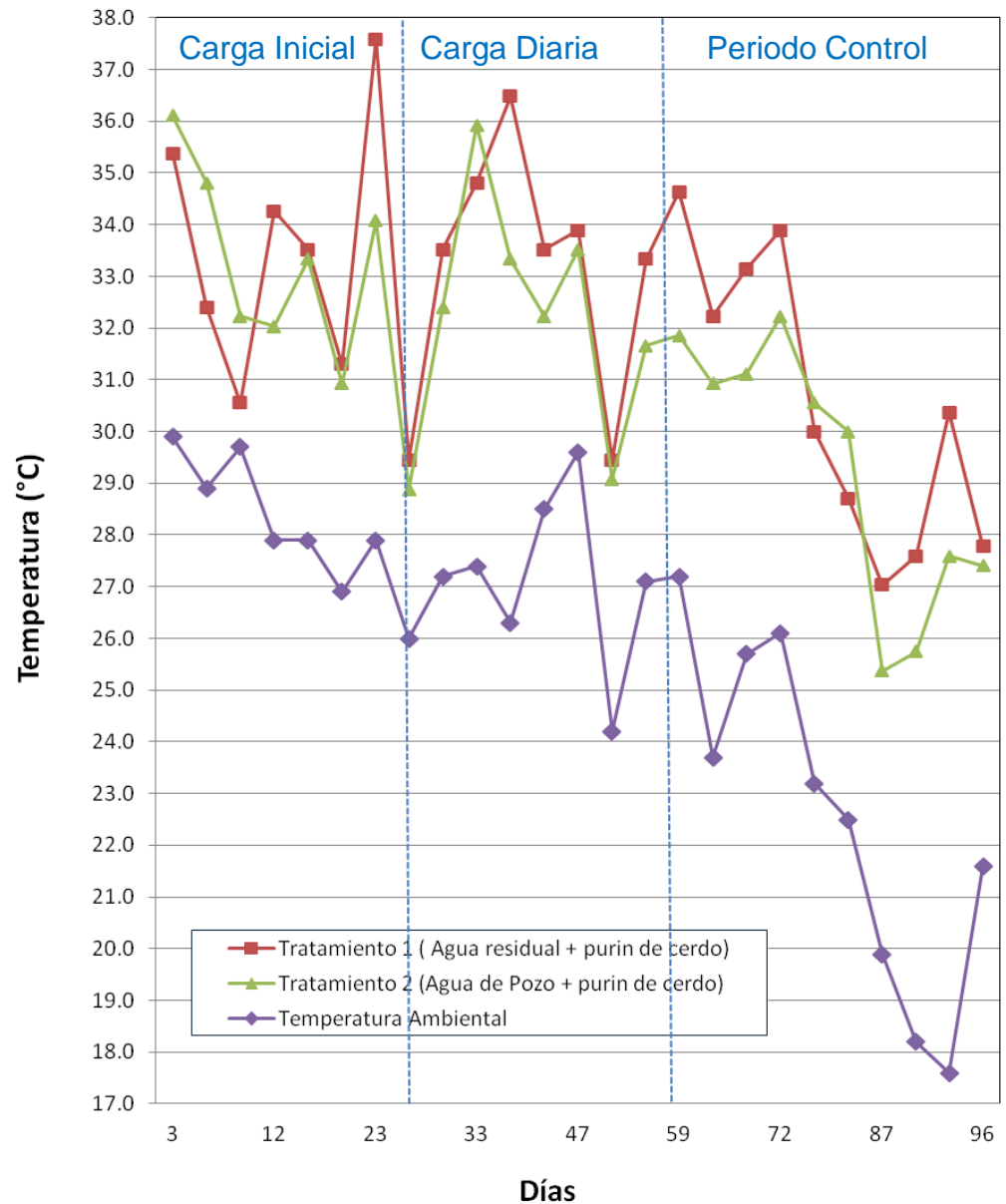
RESULTADOS

- Caracterización de las aguas residuales y agua de pozo

| Parámetro | Unidades | AGUAS RESIDUALES | | | AGUA DE POZO |
|---|-------------|-------------------|-------------------|--------|--------------|
| | | Valor 1 | Valor 2 | | |
| | | Fecha: 02/2012 | Fecha: 05/2012 | | |
| Temperatura | °C | 22.5 | 20.5 | 20.1 | |
| pH | - | 8.79 | 8.01 | 7.5 | |
| Conductividad eléctrica | us/cm | 6540 | - | 3170 | |
| Oxígeno disuelto | mg/l | 0.40 | - | | |
| Turbiedad | NTU | 162 | - | | |
| Sólidos totales (ST) | mg/l | 3128.0 | 4152.0 | 2932.0 | |
| Sólidos volátiles (SV) | mg/l | 960.0 | 1688.0 | 1100.0 | |
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) | mg/l | 390 | - | | |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | mg/l | 1200 | - | | |
| Alcalinidad | mg/l | 820.0 | - | | |
| Fosforo Total (P) | mg/l | 18.18 | - | | |
| Nitrógeno (N) | % | 0.04 | 0.08 | 0.00 | |
| Sulfatos (SO ₄) | mg/l | 1854.24 | - | | |
| Detergentes | mg/l | 0.42 | - | | |
| Coliformes totales | NMP/ 100 ml | 350 | - | | |
| Coliformes fecales | NMP/ 100 ml | < 1.8 | - | | |

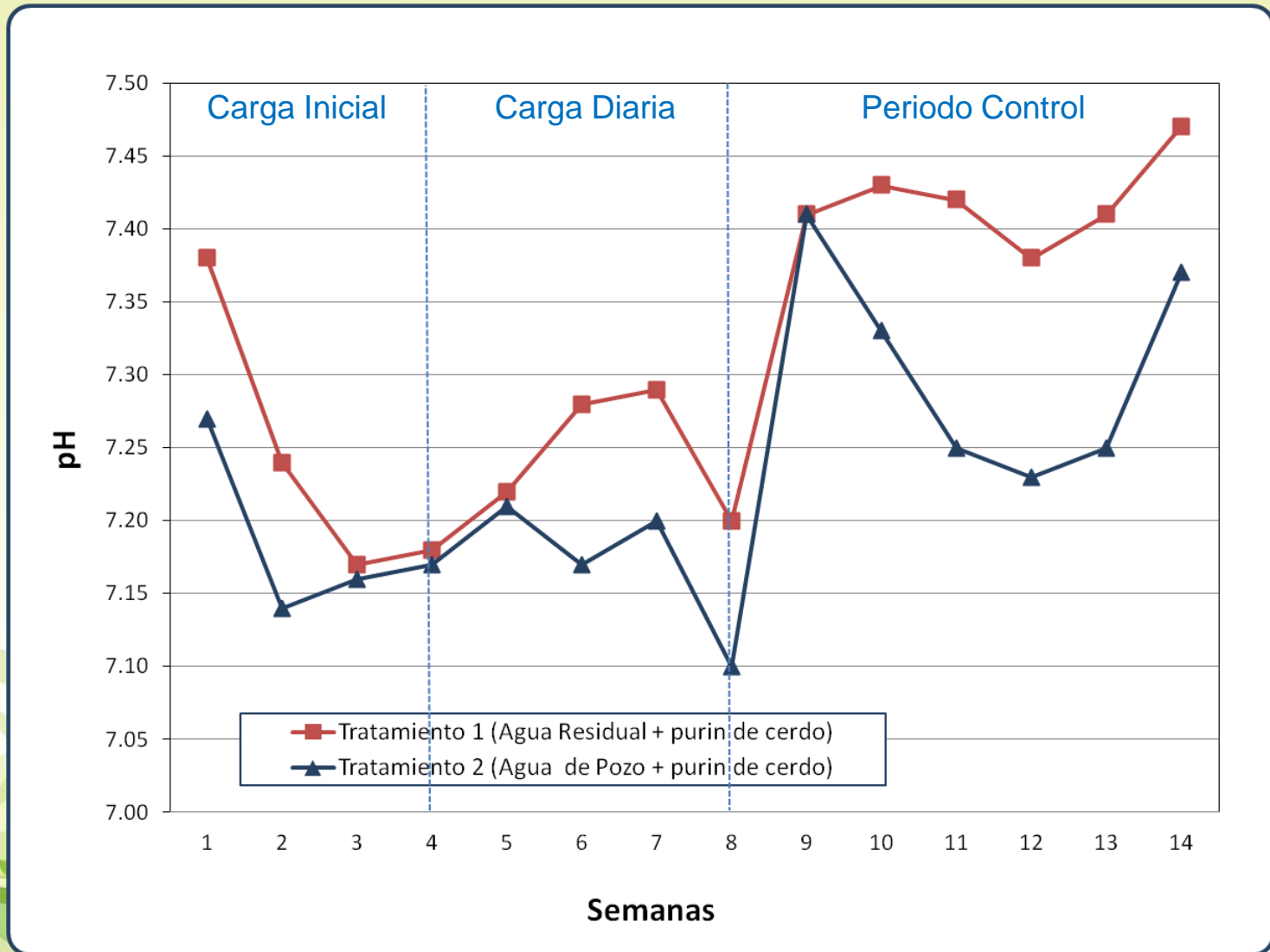
RESULTADOS

- Comportamiento de temperatura interna y ambiental



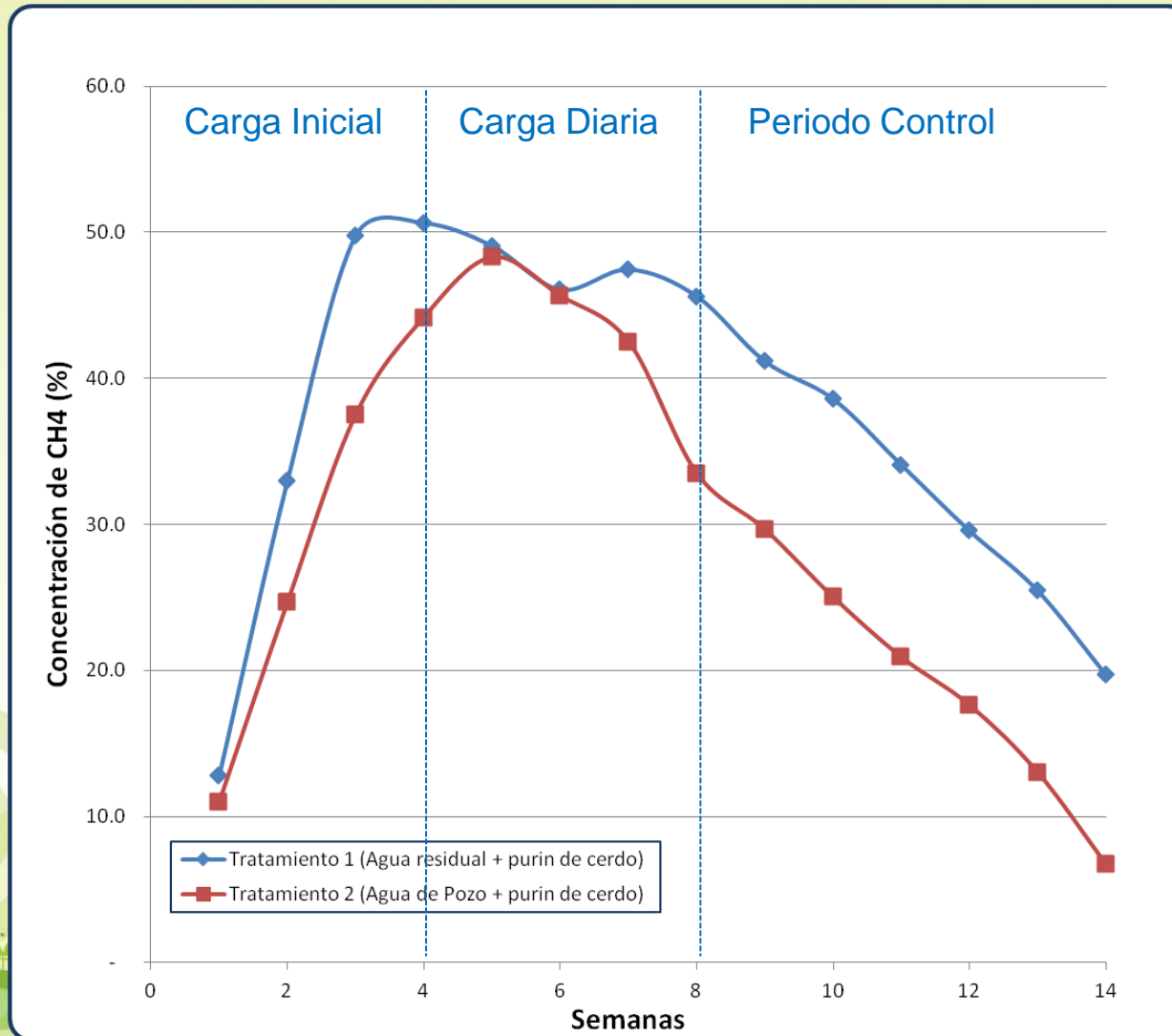
RESULTADOS

- Comportamiento de pH



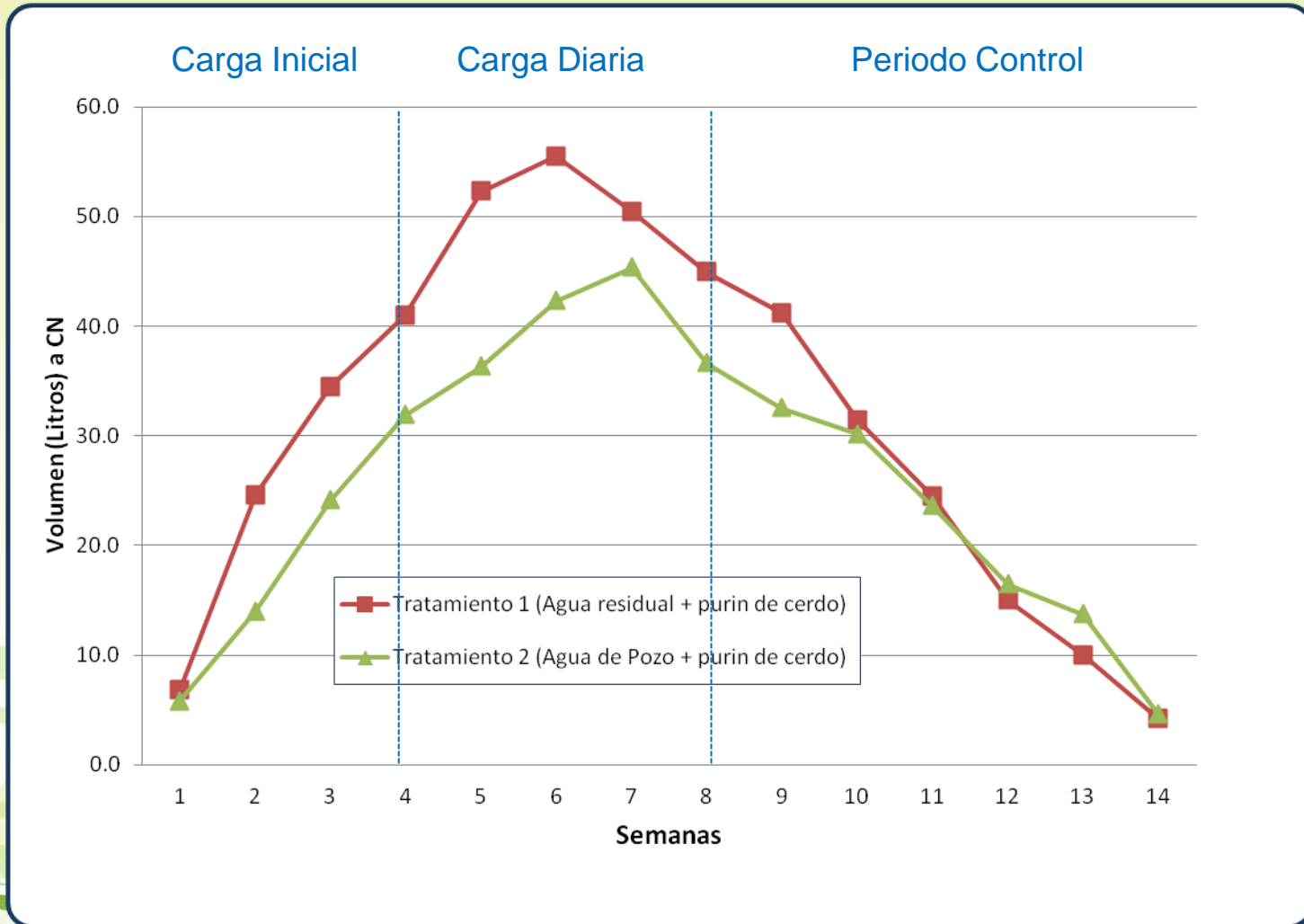
RESULTADOS

- Calidad de biogás – Concentración de metano



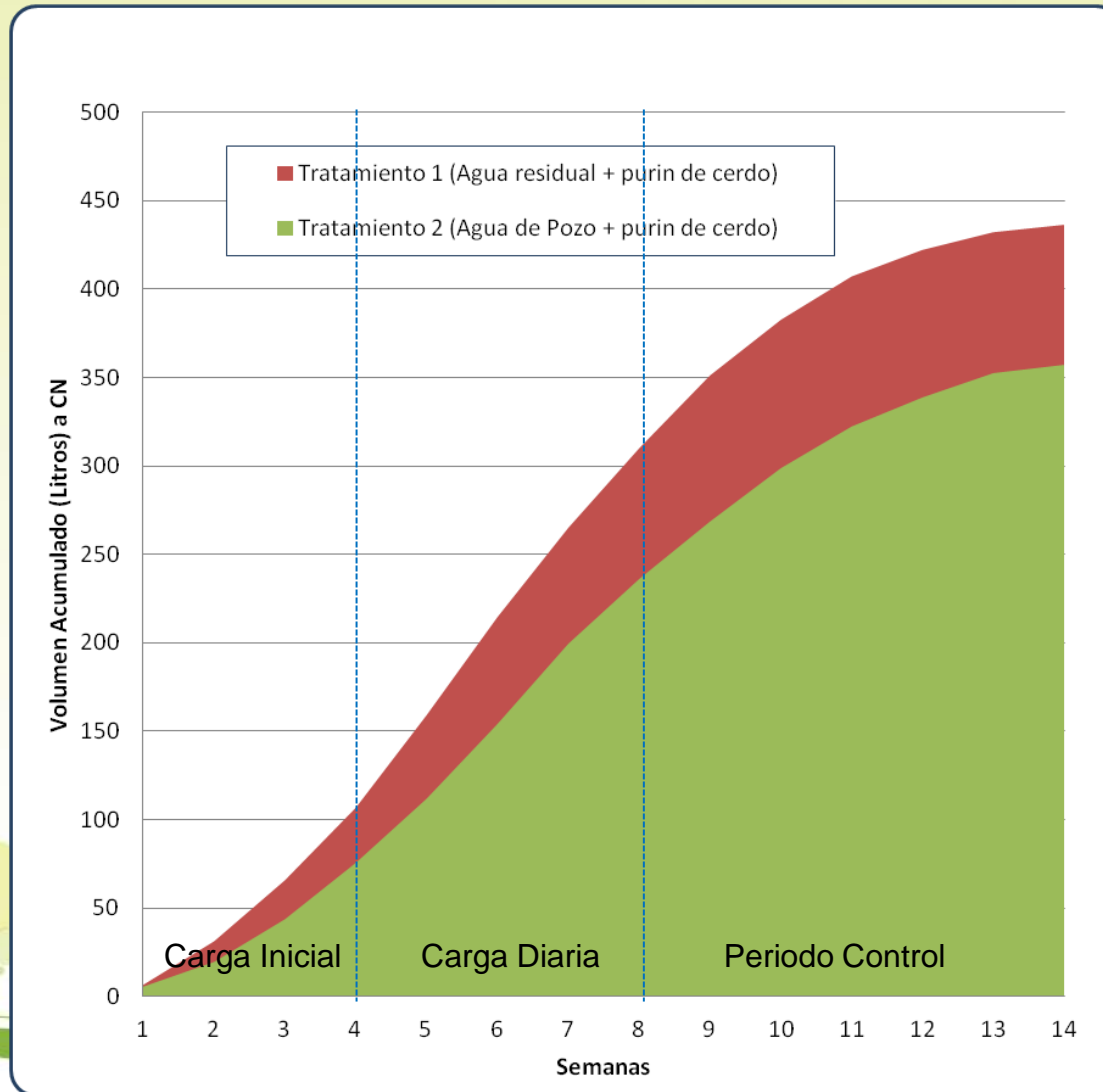
RESULTADOS

- Volumen (litros) de biogás producido a CN



RESULTADOS

- Volumen acumulado (litros) a CN



RESULTADOS

- Calidad de biol

| Parámetros | Unidad | Tratamiento 1 (Purín de cerdo + aguas residual) | Tratamiento 2 (Purín de cerdo +agua de pozo) | Biol de Agricultura Casa Blanca |
|------------------|--------|---|--|------------------------------------|
| pH | - | 7.28 | 7.11 | 7.8 |
| Sólidos totales | g/l | 12.37 | 9.83 | - |
| Materia Orgánica | g/l | 7.1 | 5.46 | 4.7 |
| N total | mg/l | 991.2 | 621.6 | 920.0 |
| P total | mg/l | 221.96 | 166.62 | 92.2 |
| K total | mg/l | 217.93 | 136.4 | 92.2 |
| Ca total | mg/l | 696 | 826.73 | 230.6 |
| Mg Total | mg/l | 95.3 | 82.7 | 151.2 |

RESULTADOS

- Reducción de patógenos

| Etapa | Coliformes Totales (NMP/ 100 ml) | | Coliformes Fecales (NMP/100 ml) | |
|--------|--|---|--|---|
| | Tratamiento 1 (Agua residual + purín de cerdo) | Tratamiento 2 (Agua de pozo + purín de cerdo) | Tratamiento 1 (Agua residual + purín de cerdo) | Tratamiento 2 (Agua de pozo + purín de cerdo) |
| Inicio | 22×10^4 | 49×10^4 | 22×10 | <1.8 |
| Final | 19.3×10^3 | 15.3×10^3 | 84 | $19,6 \times 10$ |

CONCLUSIONES

- Las aguas grises (lavado) y las aguas amarillas (orines) son residuos líquidos que pueden ser reutilizados como sustitutos del agua de pozo para la alimentación de biodigestores para la producción de biogás y fertilizante líquido.
- La calidad del biogás obtenido para los tratamientos aplicados se encuentran cerca del rango óptimo de calidad de biogás, es decir mayor al 50% de metano en su composición.
- Para el Tratamiento 1 se presenta un valor promedio máximo de 50.6% y para el Tratamiento 2 se presenta un valor promedio máximo de 48.6% de metano dentro de la composición del biogás producido.

CONCLUSIONES

- El volumen de biogás producido acumulado utilizando aguas residuales como alimentación (Tratamiento 1) para los reactores fue mayor que el volumen producido utilizando agua de pozo (Tratamiento 2). Para el Tratamiento 1 se tuvo un volumen acumulado de 436.2 litros y para el Tratamiento 2 un volumen acumulado de 357.5 litros medidas a Condiciones Normales.
- Se ha determinado la influencia de la temperatura ambiental en la temperatura interna de los reactores, siempre manteniéndose la temperatura interna en 6°C mayor que la temperatura ambiental.

CONCLUSIONES

- Se ha logrado la reducción de organismos patógenos: Coliformes Fecales y Coliformes Totales. Para los Coliformes Totales y Fecales se ha logrado una reducción del 90% de los organismos patógenos.
- El biol producido en los dos tratamientos presentan macronutrientes: Nitrógeno, Fósforo y Potasio en su composición. El biol obtenido a partir de aguas residuales presenta mayor cantidad de macronutrientes en su composición que el obtenido en base al agua de pozo.

RECOMENDACIONES

- Los resultados de la presente investigación pueden ser utilizados como línea base para profundizar en las investigaciones sobre el uso de aguas residuales domésticas como sustituto al agua para la alimentación de biodigestores.
- Plantear la utilización de otro tipo de sustrato, para llegar así al rango óptimo de concentración de metano en el biogás producido. El purín de cerdo es utilizado normalmente como inóculo debido a que activa a las bacterias metanogénicas y su uso puede ser limitado.
- Incluir en los cálculos de carga la relación Carbono: Nitrógeno (C:N) de los sustratos

RECOMENDACIONES

- Aumentar el porcentaje de sólidos con el que se trabaja el sistema durante la carga diaria si se trabaja con purín, puesto que una mayor concentración de sólidos nos permite que la concentración de metano se mantenga constante durante más tiempo, al tener mayor cantidad de materia orgánica para degradar.
- Realizar una prueba o ensayo de germinación antes de aplicar el biol directamente como fertilizante para conocer su concentración y determinar la dosis a utilizar y evitar efectos negativos sobre los cultivos.
- Para maximizar la reducción de organismos patógenos se recomienda usar un tratamiento posterior, por ejemplo transformar el biol obtenido a un biol de segunda generación.

RECOMENDACIONES

- Para el caso de sistemas semi- continuos, se recomienda dejar madurar por más tiempo el fertilizantes líquido antes de extraer las muestras bacteriológicas con el fin de que la reducción de las bacterias sea mayor.
- Es importante determinar la carga patógena de las aguas residuales a utilizar, en caso de la carga bacteriológica se considere alta, es necesario la aplicación de un pre tratamiento para su utilización.