

# ***Sinergia en el Tratamiento, Remediación y Reutilización de las Aguas Usadas Provenientes de la Operación de una Granja Porcina mediante el Uso de Biodigestores, Sedimentador y Fitorremediación***

*José Iván López López  
Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil  
Christian Villalta, Ph.D.  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y Agrimensura  
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

---

**Resumen** — *Para el tratamiento de agua de la operación de una granja de cerdos combinación de las tres tecnologías que crean un circuito cerrado en el que no hay residuos en cualquiera de sus etapas. La primera etapa es el uso de un biodigestor tipo de pistón para el procesamiento de la masa fecal donde obtenemos metano el cual es utilizado para general energía, la segunda etapa es el uso de un sedimentador para separar el agua y el lodo resultante del proceso anaeróbico biodigestor estos lodos pasan a los lechos de secado antes de ser utilizado como fertilizantes o vendidos como bioabono, en la tercera etapa es la construcción de un humedal para filtrar y extraer los nutrientes resultantes proceso y finalmente se volverán a usar el agua tratada en el humedal en la limpieza de la granja. Esto proporciona altos beneficios económicos para las granjas.*

**Términos Claves** — *Biodigestor, Fitorremediación, Humedales Artificiales, Metano.*

## **INTRODUCCIÓN**

La industria porcina en Puerto Rico ha estado en decadencia por varios factores uno de ellos es la problemática creada con los desperdicios generados mediante operación este escrito planteamos una de las soluciones más económicas con la utilización de un diseño circuito cerrado que contiene un biodigestor, sedimentador, la construcción de un humedal artificial. La propuesta consta de un tren de diseño de varios componentes antes mencionado. Esta propuesta vendrá a atender la necesidad de tener grandes cantidades de terreno para dispersar los lodos resultantes de la operación de lagunas facultativas o pozos sépticos los cuales son requeridos por el reglamento actual de la Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico. El

reglamento en cuestión es el Numero 7656; Reglamento para el Control de los Desperdicios Fecales de Animales de Empresas Pecuarias [1]. Este reglamento responde a un tipo de tecnología y el mismo no está abierto a modificaciones, por tal razón urge la modificación del mismo por parte del Gobierno. Hace aproximadamente ocho años atrás en el 2008, en el país teníamos unos cientos cuarenta y dos (142) granjas porcinas en la actualidad solo hay unas treinta y ocho (38) en operación las cuales muchas de ellas no cumplen con el reglamento o tiene problemas operaciones en el cumplimiento del reglamento, las problemáticas mayores como mencione es el cumplimiento del reglamento y el costo de la energía y recientemente el costo de los alimentos.

La primera etapa, se diseñará un Biodigestor para el tratamiento de descomposición de la materia orgánica proveniente de los residuos fecales de operación. En segundo nivel de tratamiento, el diseño contempla una cámara de sedimentación de donde se extraerán los sólidos sedimentables para ser enviado a unos lecho de secado en donde mediante evaporación natural se le extraerá el agua a estos sólidos para luego se puedan reutilizar como composta o bioabono en las plantaciones una de las posibilidades a estudiar puede ser la venta de este material para la generación de una entrada de dinero adicional ya que antes estos lodos eran lanzados en grandes áreas para usarlos como abono natural para el pasto del ganado. La tercera etapa es el diseño un humedal artificial que actuara como un filtro y la Fitorremediación con una variedades de plantas donde se extraerán el alto contenido de nutrientes disueltos en las aguas procedentes de los tratamientos o proceso en el biodigestor. Para

finalizar con la reutilización del agua nuevamente en la limpieza de la granja.

Los proyectos deben contar con una segunda fase la cual no forma parte de este escrito pero es necesario hacer mención de la misma y es el diseño de un sistema de cosecha de agua de lluvia la cual será utilizada en primer lugar para la reposición de las pérdidas del agua en el circuito cerrado de tratamiento de las aguas usadas producidas en las granjas las cuales son ocasionadas por Evapotranspiración o pérdidas mínimas en fugas del sistema, otro uso para la cosecha, el agua será utilizado para ser potabilizada para ser dirigida a los bebederos de los animales y cualquier otro uso de la Granja.

### **OBJETIVOS**

Los objetivos esperados en el diseño del sistema de tratamiento de aguas usadas son los que se describen a continuación:

- La reducción de un 100 % de las descargas ilegales a cuerpos de agua provenientes de las granjas existentes.
- Reducción de la contaminación en la superficie de suelo con la implementación de modelos de manejo y sustentabilidad de las granjas
- Generar economías en el uso de recurso de agua en un 100 % es decir ser completamente autosuficientes.
- La generación de ingresos adicionales con la venta del material resultante del secado de los sólidos depositados, los cuales se venderán como composta.
- Mediante el gas generado en el Biodigestor se Generarán ahorros en la calefacción de los Cerditos en crecimiento en un 100 %.

### **CONTRIBUCIONES**

Mediante el propuesto un diseño práctico, económico y de fácil operación, a través del uso de biodigestores para el procesamiento de los desperdicios provenientes de la operación de la granja porcina. Como sub producto de este proceso se obtiene Gas metano, entre otros, mediante el

proceso anaeróbico los líquidos y lodos resultantes del proceso anaeróbico que pasan luego a una serie de cámaras hasta el final, en donde el agua es reutilizada para el lavado de las jaulas. Otros de los sub producto que se obtiene de la clarificación del agua son lodos, los cuales son secados en lechos de secado. De esto se obtiene material de composta el cual es un abono natural que puede ser utilizado en plantaciones o puede ser mercadeado para la venta y su utilización en huertos caseros o jardinería. En adición otro de los sub productos es el Gas proveniente de Biodigestor el cual en su composición tiene un 65 % de metano. Este gas tiene un alto índice de combustión y tiene múltiples usos, tales como proveer una temperatura adecuada en las áreas donde se encuentran los recién nacidos, para la iluminación de las diferentes áreas, o la producción de energía eléctrica lo que sería otro método en el cual los granjeros pueden generar dinero. Todos estos puntos redundan en nuevas fuentes de ingreso y resultando en mayor sostenibilidad de la granja. Por lo que se promoverá una herramienta adicional para el resurgimiento de la industria porcina en el país. Esta industria, como se ha indicado anteriormente, ha estado en un decaimiento constante por los pasados años. Este resurgimiento podrá traer mayor movimiento económico y una contribución significativa en el ámbito laboral mediante la creación de empleos directos e indirectos.

### **FUNDAMENTOS SOBRE LA TECNOLOGÍA DEL BIOGÁS SEDIMENTADORES Y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES**

A continuación, se describe cada una de las etapas utilizadas en el diseño del circuito cerrado.

#### **Biodigestores**

El término Biogás o biomasa se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que tiene su origen en un proceso biológico, siendo entre mucho ejemplo de los desechos agrícolas como el estiércol animal; la biomasa puede convertirse en energía. Una forma inmediata de aprovechar el recurso

biogás, es a partir de la fermentación anaeróbica, proceso denominado digestión anaeróbica, en el cual se convierte la compleja materia orgánica en metano (CH<sub>4</sub>) y otros gases, y cuya producción depende de la cantidad y del tipo de materia adicionada al sistema; se ha podido establecer que usando materia altamente biodegradable se obtiene 0.5 m<sup>3</sup> de gas por Kg de masa, con un 70% de Metano [2]. Las bacterias fermentan el material orgánico en ausencia de aire (es decir, fermentación anaeróbica) y producen biogás; este material de fermentación está constituido por sustancias sólidas orgánicas, inorgánicas y agua (el cual incrementa la fluidez del material de fermentación, característica importante para el funcionamiento de una planta de biogás), y su componente inorgánico no sufre modificación alguna durante el proceso de fermentación [3] El biogás que generalmente se produce, es un gas incoloro, inflamable, y contiene 60% de metano y 40% de dióxido de carbono, con aportes menores de Nitrógeno, Hidrógeno, y gas sulfhídrico; su poder calorífico es aproximadamente de 4400 Kcal/m<sup>3</sup> [2].

El proceso de fermentación se compone de tres etapas principales una primera etapa, de hidrólisis, donde las bacterias fermentativas o acidogénicas hidrolizan los polímeros y las convierten a través de la fermentación en ácidos orgánicos solubles; una segunda fase, de acidificación, donde las bacterias acetogénicas causan una metabolización de los complicados ácidos orgánicos en acetatos (CH<sub>3</sub>COOH), dihidrógenos (H<sub>2</sub>) y carbodióxidos (CO<sub>2</sub>); y una tercera fase, de metanización, donde las proteínas, hidratos de carbono y grasa, los aminoácidos, alcoholes y ácidos grasos que se formaron en las fases anteriores, se convierten en metano, bióxido de carbono y amoníaco. En la última fase el material de fermentación se vuelve más líquido.

Diversos factores influyen en el funcionamiento del biodigestor, los cuales son descritos a continuación [3]:

- Temperatura y tiempo de retención: el rango de temperatura y el periodo de retención dentro el

biodigestor, clasifican la fermentación de la siguiente manera.

- Fermentación psicrófila, para un rango de temperatura entre 10 y 20°C y más de 100 días de retención.
- Fermentación mesófila, para un rango de temperatura entre 20 y 35°C y aproximadamente 30 a 40 días de retención.
- Fermentación termófila, para un rango de temperatura entre 50 y 60°C y más de 8 días de retención. Este tipo de fermentación no es apropiada para plantas sencillas.
- Relación C/N: Los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y también contienen nitrógeno (N), entonces se establece la relación entre ellos (C/N), la cual influye sobre la producción de gas [4]. Una relación de 20:1 hasta 30:1 es aceptable [4], aunque el valor ideal es de 16 [5]; mezclas de materiales de fermentación con alto contenido de nitrógeno.

Para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, se deben combinar proporciones adecuadas de materiales con bajo y alto rendimientos y diferentes velocidades de generación; la relación C/N de la combinación puede ser calculada como [3]:

$$K = \frac{\sum C_i X_i}{\sum N_i X_i} \quad (1)$$

Donde, K es la relación C/N de la combinación de materias escogidas para la carga, N es el porcentaje de nitrógeno de la materia i, C es el porcentaje de Carbono de la materia i, y X es el peso de la materia i.

- Niveles de amoníaco: Este parámetro es importante cuando se utilizan determinados materiales que contienen un alto porcentaje, como es el caso de los estiércoles.
- pH: Está en función de la concentración de CO<sub>2</sub> en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima [6]. Las bacterias responsables del mecanismo de producción de biogás son

altamente sensibles a cambios en el pH, oscilando entre 6 y 8 (es deseable un valor entre 7 y 7.2) [6]. El pH del lodo de fermentación indica si el proceso de fermentación transcurre sin problemas, y su medición indica el comportamiento de la carga de fermentación dentro del digestor, para la producción de biogás.

- Contenido de agua de la mezcla: Las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente cuando el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, y la cantidad de biogás producido será pequeña [7]. Cuando la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada [7]. Por lo que según múltiples escrito indican que la mezcla ideal es una a razón 1:1.
- Materiales orgánicos: Las actividades pecuarias y agrícolas, producen materiales orgánicos que pueden ser tratados mediante el proceso anaeróbico. Otros materiales orgánicos de origen animal también pueden emplearse como sustrato para la obtención de biogás y bioabono [8].

Los biodigestores conocidos también como plantas (productoras o de producción) de biogás, son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo para lograr su descomposición produciendo biogás y bioabonos.

Los biodigestores o plantas de biogás sencillos se clasifican en tres tipos principales, aunque es necesario indicar que las configuraciones no tienen límite, los tres principales son descritos a continuación:

- La planta con cúpula o campana flotante.
- La planta con cúpula o campana fija.

La planta balón o biodigestor tubular: La planta de balón se compone de un tubular en material plástico (polietileno, PVC, plastilina, entre otros, y una combinación de éstos) completamente sellado, la entrada y la salida están sujetas directamente a las paredes de la planta [8]. La parte inferior de la

planta, en un 75% del volumen constituye la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25% restante, se almacena el biogás. Este tipo de planta se recomienda para aquellos sitios donde predominan las temperaturas altas y constantes [9]. Sus desventajas, la baja presión de gas; una vida útil corta o larga depende del tipo de material utilizado para la construcción, lo cual puede variar entre 3 a 10 años; debe protegerse contra los rayos solares; y el material plástico está sujeto a daños, siendo necesario en lo posible encerrarse el área adyacente al biodigestor [8].

#### Componente Composición Aproximada [%] [8]

Metano CH <sub>4</sub>	60 – 70%
Gas Carbónico CO <sub>2</sub>	30 – 40%
Hidrógeno H <sub>2</sub>	1.0 %
Nitrógeno N <sub>2</sub>	0.5 %
Monóxido de carbono CO	0.1 %
Oxígeno O <sub>2</sub>	0.1 %
Ácido sulfúrico H <sub>2</sub> S	0.1 %

#### Proceso de Sedimentación

La sedimentación es un proceso muy necesario. Las partículas que se encuentran en el agua pueden ser perjudiciales en los sistemas o procesos de tratamiento ya que elevadas turbiedades inhiben los procesos biológicos y se depositan en el medio filtrante causando elevadas pérdidas de carga y deterioro de la calidad del agua efluente de los filtros. El sedimentador tiene por objeto separar del agua cruda partículas inferiores a 0.2 mm y superiores a 0.05 mm, es decir que nos encontramos en régimen laminar, la ecuación que lo gobierna es la ley de “Stokes” (2).

$$V_s = \frac{1}{8} * g * \left( \frac{\rho_s - 1}{\eta} \right) * d^2 \quad (2)$$

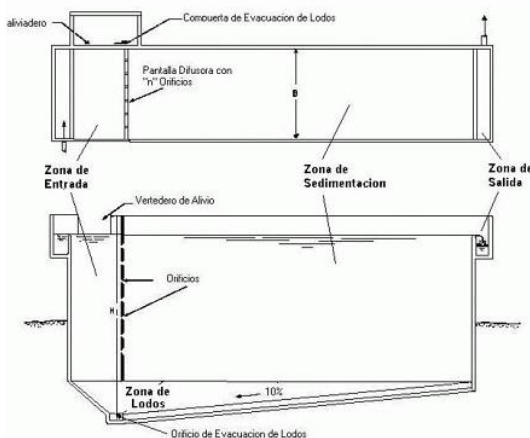
Un sedimentador consta de las siguientes partes que se pueden observar en la figura A.1. Zona de entrada. Estructura hidráulica de transición, que permite una distribución uniforme del flujo.

Zona de sedimentación. Consta de un canal rectangular con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas.

La dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos, flujo pistón.

Zona de salida. Constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones que tienen la finalidad de recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas.

Zona de recolección de lodos. Constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados, y una tubería y válvula para su evacuación periódica.



**Figura 1**  
**Planta y Alzado de un Sedimentador Convencional**

### **Construcción de Humedales Artificiales**

El agua que es descargada en un humedal construido para el tratamiento biológico de las aguas grises y sanitarias, será filtrada por ambos procesos mecánicos y biológicos por las plantas en el sistema y los microbios que viven alrededor de las raíces de la planta.

En los humedales artificiales y construidos de forma de subterráneos de flujo, las aguas grises o sanitarias fluyen por el sistema bajo la superficie de tierra o el sustrato que ha sido seleccionado para la construcción del sistema, lo cual elimina el riesgo de estancamiento y crecimiento de mosquitos. Lo cual es una alta preocupación en la isla por la presencia del Zika enfermedad transmitida por el

mosquito. El sistema consiste en una capa delgada (5 cm) de arena cubierta por una capa gruesa (45-75cm) de grava de tamaño pequeño-medio, y con una capa delgada (5 cm) tierra la cual es opcional ya que la plantas pueden ser soportadas por la grava. Las plantas que sobreviven bien en los humedales naturales y construidos (las aneas, las cañas, etc) son plantados en la capa superficial del suelo y las raíces crecen en el sustrato de grava. Las plantas del humedal transfieren oxígeno a la zona sumergida de la raíz, que permite la degradación biológica de contaminantes y materias orgánicas por microbios. La eficiencia de la eliminación varía, pero generalmente el humedal puede eliminar una buena porción de los contaminantes de las aguas grises. El tamaño de un humedal construido depende de la cantidad de efluente que va a entrar y de la cantidad de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD) que se necesita reducir. En general, 1 metro cúbico de humedal puede procesar acerca de 135 litros de las aguas grises [9]. Para determinar un tamaño más preciso para sistemas más grande, "Crites and Tchobanoglous" proponen completar una serie de cálculos para determinar el tamaño del humedal lo cual es descrito a continuación [10].

### **METODOLOGÍA DEL DISEÑO**

El diseño se ha orientado hacia el aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes de un modelo de operación de una granja porcina (porqueriza), como se discutió anteriormente se estableció un tren de diseño de varias etapas en el proceso en primer lugar está el diseño del Biodigestor, el cual se encarga del proceso de digestión de los residuos orgánicos en la que se utilizó parámetros experimentales de BOD5 y ajustes por temperatura para poder obtener uno de los parámetros más importante que es el tiempo de retención de los desperdicio en el biodigestor con los cuales Dimensionamiento del digestor, la construcción típica de un Digestor tipo pistón como se muestra en la figura número 7, el cual se muestra que fue construido con material de poliuretano.

Hay una gran variedad de material más resistente a los típicos utilizados por los campesinos en las construcciones rurales esto evita el peligro de rotura del biodigestor por cualquier simple objeto que caiga sobre el plástico lo perfora.



**Figura 7**  
Fotográfica de la Construcción de un Biodigestor de Balón Plástico [11]

El tamaño del digestor (en volumen  $V_d$ ) es determinado por el tiempo de retención (TR) y por la cantidad diaria de cieno de fermentación (Cf).

La cantidad de cieno de fermentación se compone del material de fermentación y del agua de mezcla.

El volumen del digestor se obtiene con la siguiente fórmula:

$$V_d [L] = C_f [L / dias] * TR [dias] \quad (3)$$

El tamaño del depósito de gas (en volumen  $V_g$ ) depende de la producción de gas y de la cantidad de gas que se utilice. La producción de gas depende de la cantidad y de propiedades del cieno de fermentación, de la temperatura del digestor y del tiempo de retención. La relación entre el volumen del depósito de gas ( $V_g$ ) y la producción diaria de gas (G) se llama de capacidad de almacenamiento gas (C).

$$(V_g / G) * 100 = C \quad (4)$$

La capacidad de almacenamiento de gas requerida y con esto, el tamaño que debe tener el depósito de gas, son factores muy importantes en la planificación. Si la capacidad de almacenamiento no es suficiente, se pierde parte del gas producido. El gas sobrante que queda almacenado en el

depósito no es suficiente. Si se escoge un depósito de gas demasiado grande, surgen gastos de construcción innecesarios. Debe tenerse en cuenta que la producción de gas puede fluctuar desde el 75% hasta el 125% de la producción calculada. Para el cálculo solo es importante la diferencia entre producción y consumo. Para viviendas rurales en países del Tercer Mundo (nuestro caso), capacidades de almacenamiento del 50% al 60% son en general correctas [12].

Posterior a esta primera etapa de se pasa a diseñar el clarificador o sedimentador para poder separar los lodos del agua para luego que son enviadas a los lechos de secado donde luego del proceso de evaporación los lodos pueden ser compostados con otros materiales o solos, para posteriormente ser utilizados como bioabonos en los sembradíos de la granja otro posible uso es la venta como producto para la venta en huertos o plantas ornamentales.

#### Ejemplo de Cálculo del sedimentador

Los datos de partida son; Caudal de diseño a 5 años: 118 m<sup>3</sup>/día., ancho del sedimentador: B = 1.5m. Sólidos sedimentables en 120 min = 0.9.

La velocidad de sedimentación se ha encontrado a partir de la literatura. En el ensayo físico se determinó que el 90% de los sólidos sedimentables lo hacían en dos horas. De esta manera invirtiendo el cálculo que se detalla a continuación se obtuvo la velocidad de sedimentación de las partículas más finas:  $V_s = 1, 3 \cdot 10^{-2}$  cm/s. Dato que es necesario para empezar a realizar el cálculo. El tiempo de retención será entre 2-6 horas.

$$3 < \frac{L}{B} < 6$$

$$5 < \frac{L}{B} < 20$$

$$\frac{L}{B} = \frac{V_H}{V_S}$$

El primer paso es calcular el área superficial de la zona de sedimentación. Con la utilización de la ecuación (5).

$$A_s = \frac{Q}{V_s} \quad (5)$$

Donde  $V_s$  es la velocidad de sedimentación (m/s) y  $Q$  es el caudal de diseño ( $m^3/s$ ).

Una vez ya tenemos el área superficial necesaria podemos determinar con la relación (6) las dimensiones de largo  $L_2$  (m) determinando así la longitud de sedimentación partiendo del ancho  $B$  (m) del sedimentador que tomamos como dato de partida (1.5 m).

$$L_2 = \frac{A_s}{B} \quad (6)$$

Que teniendo en cuenta que la pantalla difusora se tiene que ubicar a 0.7 m como poco obtenemos una longitud total de la unidad según se muestra a continuación.

$$L = 0.7 + L_2 = 7.70 \text{ m} \quad (7)$$

Este es el momento de comprobar que se cumple la relación  $3 < BL < 6$ :

$$\frac{L}{B} = 5.14 \quad (8)$$

Y que también se cumple la relación  $5 < HL < 20$ :

$$\frac{L}{H} = 7.70 \quad (9)$$

Una vez vemos que se cumplen las relaciones de forma del sedimentador podemos calcularla velocidad horizontal con la siguiente formula.

$$V_H = 100 \cdot Q / B \cdot H \quad (7)$$

Obteniendo un valor de:

$$V_H = 0.091 \text{ cm/s}$$

Y a continuación obtenemos el tiempo de retención mediante

$$T_0 = \text{volumen caudal} \quad (8)$$

$$T_0 = 7692.30 \text{ s} = 2.13 \text{ horas}$$

Este valor es muy importante, ya que como se ha comentado según el análisis físico del agua el 90 % de los sólidos sedimentan en 2 horas. De esta manera la turbidez que tendrá que tratar el filtro lento de arena ya es un valor muy asumible para este tipo de tratamiento.

El fondo de la unidad tendrá una pendiente del 10 % para poder evacuar los lodos para limpiar el sedimentador. De esta manera la altura máxima se obtiene mediante la ecuación (9).

$$H^* = H + 0,1 \cdot L_2 = 1,70 \text{ m} \quad (9)$$

Por ultimo nos faltaría saber cuál será el pelo de agua de salida del vertedero que lo obtendremos mediante la fórmula (10).

$$H_2 = (1,84Q \cdot B)^{2/3} \quad (10)$$

Obteniendo un valor de:

$$H_2 = 0.0063 \text{ m}$$

Con este cálculo valor hemos finalizado los cálculos para la caja del sedimentador, faltando el estudio de la pantalla difusora. Las dimensiones finales del sedimentador son:

$$B = 1.5 \text{ m}$$

$$L \text{ total} = 7.70 \text{ m}$$

$$H = 1 \text{ m}$$

A continuación, vamos a proceder a calcular los orificios de la pantalla difusora que va a obligar el agua a moverse por la caja del sedimentador con flujo pistón. La pantalla debe ubicarse a 0.7 m de la entrada de agua en el sedimentador y está compuesta por un numero de orificios que cumplen que el área total de todos ellos cumple la relación, asumiendo que la velocidad de paso entre los orificios será de  $V_h = 0.1 \text{ m/s}$ .

$$A_0 = \frac{Q}{V_h} \quad (11)$$

Obteniendo el valor de:

$$A_0 = 0.0137 \text{ m}^2$$

EL paso siguiente es adoptar un diámetro de orificio,  $d_0 = 0.025$  m en nuestro caso y se determina el área de cada orificio que da como resultado  $a_0 = 0.0005$  m. Con estos datos somos capaces de obtener el número de orificios utilizando la formula (12).

$$n = \frac{A_0}{a_0} \quad (12)$$

Que resulta ser de:

$$n = 28$$

Seguidamente determinamos la porción de altura de la pantalla difusora con orificios con la relación  $h = H - 2/5 \cdot H$  obteniendo que  $h = 0.6$  m. Una vez conocemos la parte que van a ocupar los orificios en la pantalla difusora y el número de orificios solo nos queda ubicarlos homogéneamente en ésta zona. De manera que tenemos que decidir las filas y columnas que habrá en la pantalla. Asumimos el número de filas,  $n_f = 4$  y el número de columnas  $n_c = 7$  y mediante las siguientes relaciones.

$$a_1 = \frac{h}{n_f} \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{(B - a_1) * (n_c - 1)}{2} \quad (14)$$

Podemos llegar a la conclusión que debe haber un espaciamento, entre filas de  $a_1 = 0.15$ m entre columnas de  $a_2 = 0.30$ m.

Posterior al diseño del sedimentador se pasa a la última etapa del diseño con la construcción de humedal artificial en el cual se filtrará el agua Se utilizará un valor conservador, porque mucho del tratamiento depende de la actividad de los microorganismos en el humedal, que no puede ser determinado antes de la construcción. Más investigación es necesaria para mejor caracterizar la [velocidad de reacción] y parámetros de diseño ideales. Calcule el tiempo de detención  $t$  (día), el tiempo que el agua debe quedarse en el sistema

para alcanzar el nivel de BOD deseado, con la ecuación:

$$k_r = k_{20} \left( 1.06^{(T-20)} \right) \quad (15)$$

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)}{k_r} \quad (16)$$

Dónde  $C_0$  es la concentración del BOD del agua que entra el sistema ( $\text{mg/L} = \text{g/m}^3$ ) y  $C$  es la concentración de BOD deseada del agua ( $\text{mg/L} = \text{g/m}^3$ ) que sale del sistema, o la meta.

Verifique la “organic loading rate”,  $L_{org}$  ( $\text{g BOD/m}^2\text{-día}$ ), con la ecuación siguiente. Este número indicará la masa de BOD por área por día que el sistema recibirá. En general, la “organic loading rate” no debe exceder  $11.2$  g BOD/ $\text{m}^2\text{-día}$ . Este umbral no será excedido con afluyente aplicado hasta  $5\text{cm}$  por día. Casi todos los sistemas de humedales construidos de aguas grises tendrán una debajo de este umbral.

$$L_{org} = \frac{(C)(d_w)(\eta)}{t} \quad (17)$$

Determinar el área necesaria para la cama del humedal construido.

$$A_s = \frac{(Q_{ave})(t)}{(\eta)(d_w)} \quad (18)$$

Y finalmente, para calcular las dimensiones del humedal (m), se utilizará la siguiente formula:

$$w = \left( \frac{A_s}{R_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

En los escritos de Crites and Tchobanoglous (1998) recomiendan que la proporción esté entre 2:1 y 4:1, pero Salte et al. (1998) no encontró una diferencia significativa de la reducción de nutrientes ni BOD en tres humedales construidos de  $25\text{m}^2$  tratando efluente doméstico con proporciones de aspecto que recorren de 4:1, 10:1, y 30:1 sobre



un período de dos años (Dallas 2005). La longitud,  $L$ , del humedal construido (m) puede ser calculado por la expresión:

$$l = \frac{A \cdot s}{W} \quad (20)$$

Dónde  $C_0$  es la concentración del BOD del agua que entra el sistema ( $\text{mg/L} = \text{g/m}^3$ ) y  $C$  es la concentración de BOD deseada del agua ( $\text{mg/L} = \text{g/m}^3$ ) que sale del sistema. Una meta razonable es de 3-7  $\text{mg/L}$ ; un humedal construido puede disminuir los niveles de BOD, pero no los puede eliminar del todo.

La Vegetación que se puede utilizar es variada las clases de plantas actúan sobre los contaminantes de la misma manera. Todas plantas pueden utilizar los nutrientes y BOD en las aguas negras y grises hasta cierto punto. Sin embargo, relativamente pocas plantas prosperan en las aguas negras o grises que tiene altas niveles de nutrientes y BOD, que son típicos de los humedales construidos [12]. Hay unas pocas plantas que son utilizados normalmente para humedales de bio filtración de las aguas grises, muchos de los cuales pueden ser encontrados en humedales naturales.

Las plantas encontradas en humedales naturales cerca del área escogida para el humedal construido son muy beneficiosas ya que están adaptadas al clima local. Si estas plantas no pueden adquirirse localmente, se debería explorar la posibilidad de utilizar cualquier planta de humedal que crezca bien localmente.

- Las aneas (*Typha* spp.) son fuerte, fácil de propagar, y capaz de producir una biomasa anual grande. Típicamente quitan cantidades grandes del nitrato y del fosfato.
- Juncos (*Schoenoplectus* spp., *Scirpus* spp.) crecen en grupos y crecen bien en agua que tiene una profundidad de 5 cm a 3 m. Estas plantas agresivas logran una eliminación alta de contaminantes.
- Céspedes de caña (*Phragmites australis*) son plantas altas con raíces profundas, que

permiten más oxígeno a alcanzar la zona de raíz que las dos plantas descritas previamente.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Mediante la evaluación de varios tipos de Biodigestores se seleccionó el tipo pistón por ser el más simple en la construcción, mantenimientos, diseño y costo operacional mínimo, la selección del tipo principalmente se tomó en consideración el mantenimiento que es uno mínimo, una de las consideración que se debe tener especial cuidado es las temperaturas ya que esta afecta el tiempo de retención, se seleccionó como parámetro de diseño un tiempo de retención de 35 días, que es el más usado para el clima que predomina en Puerto Rico que es uno cálido. Se obtuvo un largo de 55 pies. Para poder reducir el largo se puede incorporar el utilizar pantallas las cuales al hacer el recorrido más sinuoso y acortan el largo del Biodigestor a unos 35 pies. Posterior al diseño del Biodigestor se trabajó con el sedimentador para reducir en todo lo posible los sedimentos o que reciba la menor cantidad posible en el humedal, para el diseño del sedimentador se trabajó con una velocidad  $V_h$  de  $1 \text{ pie}/\text{min}$  y para finalizar se trabajó con la parte final que sería el diseño del humedal el cual tiene un doble propósito que es el filtrar las aguas y posteriormente ayudar con el tratamiento de las mismas con la remoción de los nutrientes resultantes de la descomposición de la materia orgánica.

## CONCLUSIÓN

Podemos llegar a la conclusión que es completamente viable la construcción de estos circuitos cerrados en las granjas los cuales serán muy beneficios en especial los beneficios que se obtiene con la implantación del sistema tales como la obtención de gas que es aproximadamente  $230 \text{ p}^3/\text{kg.d}$  lo cual será utilizado en varias etapas de la granja, como el calentar el área de los recién nacidos a una temperatura adecuada, Generará energía mediante un pequeño generador, en la iluminación y calentar el agua para la limpieza y

hasta para las hornillas de la cocina, para cocinar. El segundo punto de beneficio esta en los bioabonos producidos en el proceso de secado de los lodos resultantes de la actividad dentro del Biodigestor que son separados en la cámara de Sedimentación, los mismo pueden ser vendidos dando un valor a lo que antes se consideraba un desperdicio. Para finalizar tercer lugar, la creación del humedal artificial también trae beneficios, ya que una parte del mismo se puede dedicar a la siembra de plantas para el consumo tanto humano como de los animales de la granja, aunque este beneficio económico no es tan significativo como los anteriores. Para finalizar la reutilización del agua luego de pasar por el proceso aparte de traer un beneficio económico y ecológico por no tener que utilizar más agua a diario el ahorro es de aproximadamente 254,800 galones al año, tiene un beneficio de sustentabilidad.

## REFERENCIAS

- [1] J. d. C. A. Estado Libre Asociado de Puerto Rico, "Reglamento 7656, para el control de los Deperdicios Fecales de Animales de Empresas Pecuarias," Estado Libre Asociado de Puerto Rico, San Juan, 2008.
- [2] J. Guzmán, "Apuntes sobre consumo energético de biomasa," PROLEÑA Soluciones Energéticas Eficientes, La paz,Bolivia, 2008.
- [3] A. Guevara V., "Fundamentos básicos para el diseño de biodigestoresanaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes.," Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente , Lima, 1996.
- [4] S. Alcayaga, J. Glaría and L. Guerrero, "Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandida.," Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso, Marzo, Valparaiso, 1999.
- [5] R. a. G. T. Crites, "Small and Decentralized Wastewater," McGraw-Hill Science/Engineering/Math, Sacramento, California, 1998.
- [6] GTZ-CVC-OEKOTOP, "Difusión de la tecnología del biogás en Colombia.," Documentación del Proyecto, Cali, 1987.
- [7] J. Álvarez, L. Caneta and C. Moyano, "Biomasa y biogás," Universidad Nacional del Nordeste., Mexico, 2009.
- [8] R. Botero y T. Preston, «Biodigestor de bajo costo para la producciónde combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para instalación, operación y utilización.» Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda – Universidad EARTH., San José, Costa Rica, 1987.
- [9] M. Vargas, "Introducción a las energías alternativas con experimentos sencillos.," n/a, La paz, Bolivia, 2008.
- [10] J. Jenkins, "Humanure Handbook," Chelsea Green Publishing, US, 2005.
- [11] R. H. Beckman, Anaerobic digestion of food waste: Comparing leachate exchange rates in sequential batch systems digesting food waste and biosolids; School of Biological Sciences, Flinders University of South Australia, Adelaide, Australia, 2007.
- [12] J. Corace, M. Aeberhard, P. Martina, A. Ventfín and E. García, "Comparación del tiempo de reacción en el proceso de biodigestión según el tamaño de las partículas de aserrín utilizado como materia orgánica.," Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad Nacional del Nordeste., Colombia, 2006, 2008.