

Diseño y construcción de un filtro biológico para el tratamiento de aguas residuales de la empresa de lácteos Flor de Leche S.R.L mediante el uso de la Lombriz Eisenia Foetida, Lombrifiltro

Design and construction of a biological filter for the treatment of wastewater from the dairy company Flor de Leche S.R.L through the use of the worm Eisenia Foetida, Lombrifiltro.

Milena Beatriz Pérez Flores^{1*}, PhD. Cristhian Alvaro Carrasco Villanueva

¹ IIDEPROQ, Calle 30 de Cota Cota Campus Universitario UMSA.

*Autor de contacto: mile14lrg@gmail.com

RESUMEN

Durante el proceso de elaboración de yogures y quesos se produce una alta generación de aguas residuales con alto contenido orgánico. Flor de Leche es una microempresa, ubicado en el municipio de Achocalla, La Paz, que viene produciendo variedad de yogures y quesos desde 1998, presenta una generación de aguas residuales diaria de 8000 litros de efluente y 3000 litros de suero, con una carga orgánica de 3000mg/L y 70000mg/L respectivamente. Se cuenta con un sistema de tratamiento en base a biodigestores y humedales, los cuales presentan valores óptimos de remoción, pero con el aumento en la producción se sobrepasó la capacidad del sistema. En el presente proyecto, se muestra la implementación del Lombrifiltro en el sistema de tratamiento, trabajando en forma paralela con los demás tratamientos, con resultados óptimos de degradación de materia orgánica, que varían desde 70 a 95% de eficiencia. Encontramos mediante la instalación de un lombrifiltro piloto, en el que variamos la carga hidráulica en 1; 0,6 y 0,2 m³/m²-día y el porcentaje de suero en 30, 20 y 10% en la alimentación del filtro, que las condiciones más óptimas de tratamiento y diseño fueron de 0,6m³/m²-día con un 20% de suero, tomando en cuenta la eficiencia en remoción de materia orgánica, representada por la DQO y las condiciones de temperatura y pH del agua en tratamiento. Previamente se realizó la adecuación y masificación de la Eisenia Foetida con su nueva alimentación en base a efluente y suero. Los resultados obtenidos es probable que funcionen en empresas de lácteos, sin uso de agentes de limpieza tóxicos, y que cuenten con altos niveles de materia orgánica.

Palabras clave: Lombrifiltro, agua residual, efluentes lácteos, Flor de Leche

ABSTRACT

During the process of making yoghurts and cheeses, a high generation of wastewater with a high organic content is produced. Flor de Leche is a small business, located in the municipality of Achocalla, La Paz, which has been producing a variety of yogurts and cheeses since 1998. It has a daily wastewater generation of 8,000 liters of effluent and 3000 liters of serum, with an organic load of 3000mg / L and 70000mg / L respectively. There is a treatment system based on bio-digesters and wetlands, which present optimal values removal , but with the increase in production, the capacity of the system was exceeded. In the present project, the implementation of the Lombrifiltro in the treatment system is shown, working in parallel with the other treatments, with optimal results of degradation of organic matter, ranging from 70 to 95% efficiency. We found that by installing a Pilot Lombrifiltro, in which we vary the hydraulic load in 1; 0,6 and 0,2 m³ / m²-day and the percentage of serum in 30, 20 and 10% in the feeding of the filter, that the most optimal treatment

and design conditions were 0.6m³ / m²-day with 20% serum, taking into account the efficiency in organic matter removal, represented by the COD and the temperature and pH conditions of the water under treatment. Previously the adaptation and massification of the *Eisenia Foetida* was carried out with its new feed based on effluent and serum. The results obtained are likely to work in dairy companies, without the use of toxic cleaning agents, and that have high levels of organic matter.

Keywords: Lombrifiltro, wastewater, dairy effluents, Flor de Leche

1. INTRODUCCION

Los residuos industriales líquidos provenientes de la industria láctea, se caracterizan principalmente por el alto contenido de materia orgánica disuelta, si se almacenan tienden a fermentar, se vuelven anaerobios y desprenden un olor fuerte; al mismo tiempo si estos residuos líquidos son vertidos a cuerpos de agua, se produce la contaminación hídrica por eutrofización, en estos casos un sistema de tratamiento de estos residuos líquidos, es una alternativa efectiva para mitigar el impacto ambiental.

La Empresa "Flor de Leche S.R.L." es una industria de alimentos, orientada a la producción de lácteos, con elaboración de quesos y yogures de manera artesanal, se encuentra ubicada en el municipio de Achocalla, provincia Murillo, departamento La Paz, a unos 30 km de la ciudad de La Paz, se halla a 3.750 metros sobre el nivel del mar (Censo nacional 2012). Tiene una política encaminada al cuidado del medio ambiente, priorizando el tratamiento de aguas residuales que genera durante la producción, y se proyecta como una empresa ecosostenible.

Actualmente la empresa Flor de Leche genera una cantidad de 7000 a 8000 litros por día de efluente, con una carga orgánica de 2623 g/L medidos en términos de DQO, que provienen de: procesos de producción de la planta, limpieza de los equipos y de las instalaciones. Así también existe una generación diaria de 3000 litros de suero, con carga orgánica de 60548 g/L en DQO, que proviene de la elaboración y refinamiento de quesos.

El sistema de tratamiento en la empresa Flor de Leche, antes de la incorporación del Lombrifiltro, consistía en: **Tratamiento primario**, consiste de un ecualizador, que es donde llegan todas las aguas utilizadas por la planta, tiene una capacidad de 9000 L, en esta etapa se realiza la regulación del pH, añadiendo carbonato de calcio, también se realiza una separación de sólidos por gravedad. **Tratamiento secundario**, pasando del ecualizador,

las aguas llegan a un tanque de alimentación, el cual es bombeado a un conjunto de biodigestores que contienen microorganismos encargados de degradar la materia orgánica, de este sistema anaerobio, también se obtiene biogás, el cual en tratamientos posteriores será recuperado y utilizado en la generación de energía, y un **tratamiento terciario**, saliendo las aguas tratadas del biodigestor, son utilizadas para el riego de humedales artificiales, el cual es un filtro biológico encargado de disminuir la materia orgánica restante.

El principal problema que contaba el sistema de tratamiento, era la capacidad limitada para tratar la totalidad de efluentes producidos, con descargas diarias de 3500 a 4000 litros de efluente y 1500 litros de suero, correspondientes al excedente de efluente y suero sin tratamiento.

En el caso del suero, no se realiza ningún tratamiento previo antes de su descarga, siendo el suero total producido, repartido entre los comunarios, que lo llevan de forma gratuita como alimento a su ganado, y el resto, pasa a ser descargado a la quebrada cercana.

El Lombrifiltro o filtro biológico es una variante de los biofiltros, que consiste en el desarrollo de cultivo de lombrices, que actúan como agente de depuración del contenido orgánico (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003). Las aguas residuales se percolan a través de un medio filtrante, donde quedan retenidos los solutos contaminantes, principalmente materia orgánica, en este sustrato se encuentra gran cantidad de lombrices, que se alimentan de la materia retenida.

1.1. Lombrifiltro

Se puede decir que el lombrifiltro, corresponde a una fusión entre la lombricultura tradicional y un filtro percolador. Se realizan operaciones relacionadas a la cría, producción y masificación de lombrices, y, la operación de filtración como tratamiento de aguas residuales, para

quitarle su principal contaminante, materia orgánica, que es utilizado como alimento de las lombrices (Salazar, 2005).

El lombrifiltro está constituido principalmente por tres capas y lombrices de la especie *Eisenia foetida*. Las

capas son: una base filtrante de bolones, sobre la cual se agrega una capa de ripio o grava. La parte superior se cubre con aserrín o viruta de madera sobre el cual se mantiene un alto número de lombrices (Quezada, 2001)

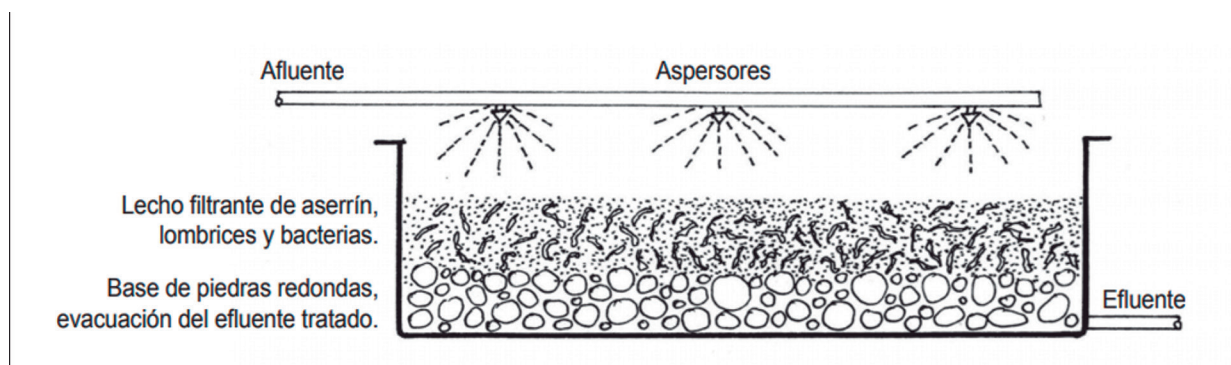


FIGURA 1: Lombrifiltro Modelo Sistema Tohá

FUENTE: Recuperado de Parra & Chiang, 2013.

Con la incorporación del Lombrifiltro al sistema de tratamiento se pretende tratar la totalidad de las aguas residuales generadas por la empresa, efluente y suero. Se realizó el estudio a los principales parámetros que afectan el funcionamiento del lombrifiltro, en base a la eficiencia en remoción de materia orgánica, y posterior se realizó el diseño y la construcción.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterización fisicoquímica del agua residual y suero

Con la finalidad de obtener la línea base de partida en la investigación, se realizó la caracterización fisicoquímica del agua residual, tomando muestras simples del ecualizador y tanque de almacenamiento de suero, de los cuales se determinó: temperatura, utilizando termómetro de inmersión marca Hanna; pH, con papel tornasol; conductividad eléctrica; DQO, método de reflujo cerrado; Sólidos totales, gravimetría; Nitrógeno total y aceites y grasas, método soxhlet. Las muestras fueron recolectadas y transportadas en cooler, a 4°C, y, analizadas en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la UMSA.

2.2. Recopilación de información Lombrifiltro

Se recaudó información sobre el tipo de medio de soporte, para obtener información sobre la distribución y altura de las diferentes capas, por sus características se tomó

al Lombrifiltro como un filtro percolador de baja carga (Organización Panamericana de la Salud, 1981), tomando como referencia, Metclaf & Eddy, y en combinación con estudios de Lombrifiltros ya implementados.

Según revisión bibliográfica y con la asistencia a un curso taller (2017), realizado en Cochabamba, sobre aplicaciones de la lombricultura, se obtuvo el parámetro principal de diseño para filtros, que es la tasa o carga hidráulica, según el experto Ing. Abdon Alvarez Ph.D, que fue el diseñador de la planta de tratamiento Lombrifiltro en Santa Cruz, brinda que la tasa utilizada para el diseño es de:

$$\text{Tasa} = 1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-día}$$

este parámetro es utilizado como dato principal para estructurar las pruebas realizadas.

2.3. Adecuación y masificación de la *Eisenia Foetida*

El objetivo de esta prueba es determinar el crecimiento y adaptación de la lombriz *Eisenia foetida* en sustrato de aserrín Ochoa, con diferentes mezclas de alimentación

efluente-suero, tomando como parámetro medible el crecimiento poblacional.

La prueba se realizó en el área de Medio Ambiente de la empresa, en un invernadero con una temperatura promedio de 20°C. Los materiales fueron previamente adquiridos y preparados, se realizó dentro de canastillas de plástico (56 x 36,5 x 20cm), forrados en su interior con polietileno de baja densidad, para evitar fugaz. Se introdujo 0,04 m3 de aserrín Ochoa, como tratamiento previo se procedió a lavar los lechos con efluente, para eliminar los restos de pinturas y sustancias que puedan afectar el desarrollo de la lombriz, se adicionó una población de 50 individuos maduros, lo que equivale a 1250 individuos por m2.



FIGURA 2: Pruebas de adecuación y masificación – Flor de Leche

FUENTE: Elaboración propia

El inóculo para la siembra provino del criadero de Lombrices *Eisenia foetida*, que tiene la empresa Flor de Leche. Las lombrices fueron criadas en sustrato de estiércol de oveja y residuos de cocina. Para las pruebas se eligió lombrices adultas con notable presencia de clitelium, tamaño mayor a 4 cm. Previamente a la incorporación a los canastillos se calculó la biomasa en peso, 0,71 – 0,85g/lombriz. Se realizaron 3 pruebas, con alimentación de efluente y suero, la adición de suero tuvo una variación entre 10, 20 y 30% de suero en volumen.

Procedimiento de muestreo. Los canastillos se comen-

zaron a alimentar al día siguiente de iniciado el ensayo, diariamente se alimentaba los canastillos con 2 litros de efluente y una cantidad de suero, esto tuvo una duración de dos semanas, para ir ambientando a las lombrices al medio ácido de la mezcla (pH: 5 – 6,5, dependiendo la cantidad de suero). Al transcurso de un mes se incrementó el caudal a 10 litros por día, el cual se mantuvo constante hasta terminar la prueba.

El muestreo semidestructivo se realizó cada dos meses, (antes de la alimentación) dividiendo el canastillo en cuatro partes y extrayendo dos de ellas sobre un canastillo vacío (recubierto con plástico), se procedió al conteo de Lombrices adultas, jóvenes y cocones. Se consideraron adultas aquellas rojas con Clitellum, jóvenes rosadas y sin clitellum y los cocones no eclosionados.

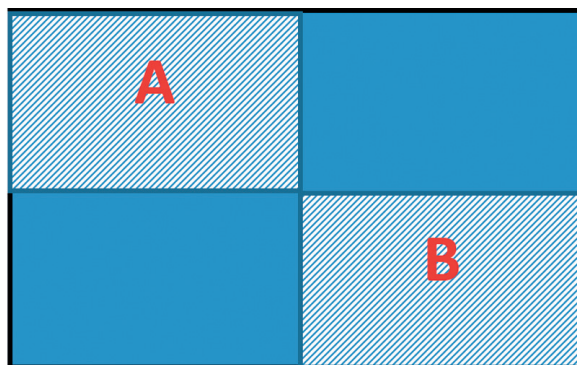


FIGURA 3: Ilustración del método de conteo – Método del cuarteo.

FUENTE: Elaboración propia

Una vez contabilizadas se repusieron en su canastillo de origen conjuntamente con el sustrato extraído y se procedía a alimentarlas.

2.4. Prueba piloto

Para la realización de la prueba piloto, se instala un prototipo de Lombrifiltro, que se fundamenta en dos principios, la actividad biológica realizada por las lombrices y el material físico que sirve como soporte para el cultivo de las lombrices *Eisenia foetida*, y también sirve como material filtrante, que conjuntamente degradan la materia orgánica.



FIGURA 4: Diseño prueba piloto.

FUENTE: Elaboración propia

Objetivo. El objetivo principal de la prueba piloto fue determinar la mezcla en la alimentación al Lombrifiltro (suero, efluente y orín) y la carga hidráulica, tasa, mediante un monitoreo de la calidad del agua, al ingreso y salida del Lombrifiltro. También se realizó el estudio del proceso y las posibles falencias que pueda existir a escala industrial.

Procedimiento. El lombrifiltro piloto se alimentó mediante una mezcla de efluente, suero y orín, para el orín se toma un valor constante del 0,5% del caudal diario, tomado como dato referencial de la OMS en aguas para riego, se realiza un arreglo de 3k con 5 corridas, con las variables de % de suero y carga hidráulica.

Se realizó variaciones de %de suero de 10, 20 y 30% y como valor máximo de diseño se tiene la carga hidráulica de 1m³/m²-día, se partió de este dato para la realización de pruebas, se tomó los valores de 1, 0,6 y 0,2 m³/m²-día, para verificar que la carga hidráulica recomendada por bibliografía sea aplicable al tipo de aguas residuales generados en la empresa Flor de Leche S.R.L.

Se realiza una combinación de estos dos factores, T y %S, en 3 niveles, y con la ayuda del programa Minitab se analiza la importancia de cada uno y la influencia en el porcentaje de remoción de materia orgánica.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Evaluación Sistema de tratamiento - Línea base

En Flor de Leche se cuenta con registros desde el año 2012, el parámetro de la Demanda Química de Oxígeno es el más completo, se realizó la sistematización de datos de la DQO, complementando con análisis realizados con el proyecto para el año 2017. En la siguiente tabla podemos notar la evolución del sistema de tratamiento y su eficiencia.

TABLA 1: Variación de la DQO anual y por tratamiento (mg/L)

Punto	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Ent. Sedimentador	4110	5114	2380	-	-	-
Ecualizador	4100	1630	855	1360	2623	2970
Tanque de alimentación	4140	1650	-	2372	2040	3148
Tanque de baches	-	-	-	2411	366	832
Sal. Hum. Vert 1	3090	1104	657	-	-	244
Sal. Hum. Vert 2	-	-	-	-	-	-
Sal. Hum. Hor 1	1520	536	107	177	35	107
Laguna	-	-	-	-	-	107

NOTA: Elaboración propia

El sistema de tratamiento es óptimo para disminuir la carga orgánica para el efluente, pero no así, para tratar la totalidad de efluentes generados. De los registros históricos, se obtuvo un promedio men-

sual de la generación de efluentes, a partir del año 2015. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla, conjuntamente con la cantidad de efluentes que son tratados y la cantidad sin tratamiento.

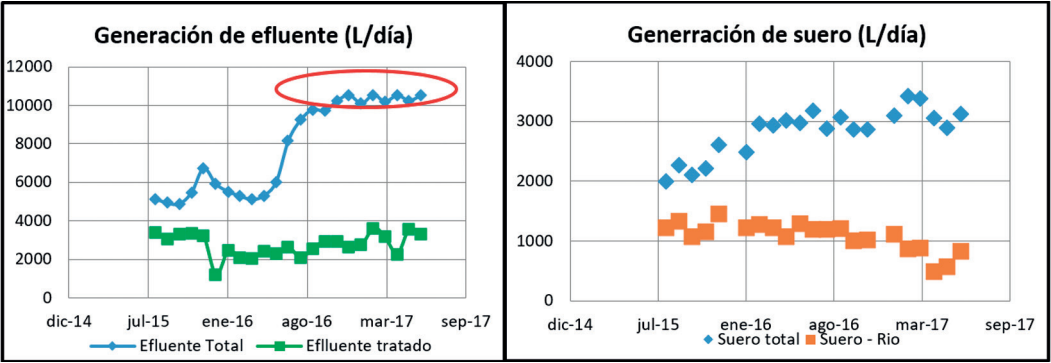


FIGURA 5: Generación de efluente y suero
NOTA: Elaboración propia

3.2. Caracterización del efluente y suero.

Los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

TABLA 2: Caracterización del Efluente

Parámetro	2017	2018
DQO (mg/L)	2842 - 3050	2800
T (°C)	16,0 - 19,0	16,2 - 18,6
pH	6,5 - 7,0	6,5 - 7,0
Aceites y grasas (mg/L)	48,2	30,5
Nitrógeno Total (mg/L)	10,5	9,4

NOTA: Elaboración propia

TABLA 3: Caracterización del Suero

Parámetro	2017	2018
DQO (mg/L)	60548,2	72.124,7
T (°C)	16 - 19	16,2 - 18,6
pH	4,5 - 5	4,5 - 5,5
Nitrógeno Total (mg/L)	322,6	288,5

NOTA: Elaboración propia

En la caracterización del efluente se puede notar la baja cantidad de nitrógeno que presenta, esto es compensado con la mezcla de suero, como fuente de nitrógeno, para la alimentación de las lombrices.

3.3. Masificación *Eisenia foetida*

De la adecuación y masificación de la *Eisenia foetida*, se

determinó con que cantidad de suero se dio un mayor crecimiento en la población de lombrices. En las pruebas b y c (20 y 30% en suero) se tuvo un mayor crecimiento en la población y un desarrollo mas rápido en las lombrices. Como limitante en la adición de suero, se tiene la disminución de pH, creando un sustrato ácido que podría convertirse en un parámetro intolerable para las lombrices.

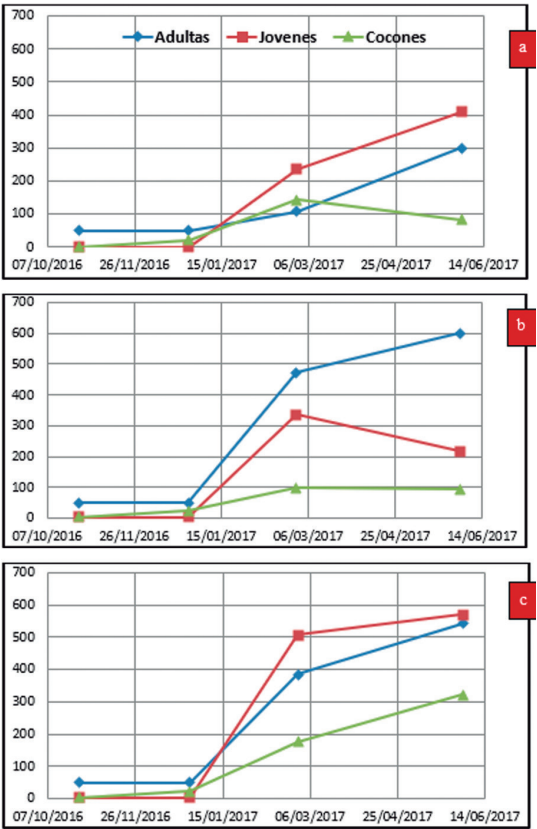


FIGURA 6: Crecimiento Poblacional *Eisenia foetida* con 10% Suero**FUENTE:** elaboración propia.**Parámetros adecuados para el diseño del Lombrifiltro**

Se tomaron como datos referenciales la tasa de alimentación y la distribución de capas.

Parámetro	Valor	Fuente
Tasa	1 m ³ /m ² -día	Álvarez, A. 2016, Quinchel, Ibáñez
Altura de capas	1,20a m	Coronela, Nancy, 2015. pág. 20

Con la prueba piloto se determinó la carga hidráulica de diseño y la mezcla en la alimentación de efluente y suero.

De las pruebas realizadas en la prueba piloto se tienen los siguientes datos.

TABLA 4: Sistematización de los datos obtenidos de la prueba piloto

T1 = 0,2m ³ /m ² .día			T2 = 0,6 m ³ /m ² .día			T3 = 1 m ³ /m ² .día		
S1 (10%)	S2 (20%)	S3 (30%)	S1 (10%)	S2 (20%)	S3 (30%)	S1 (10%)	S2 (20%)	S3 (30%)
93,87	95,97	98,51	89,45	90,34	91,76	78,23	80,1	85,3
96,14	95,84	95,22	88,9	92,4	94,54	76,9	79,33	83,2
92,51	94,38	94,35	86,51	92,65	90,76	77,87	60,6	81,23
94,67	94,79	95,7	88,32	91,3	92,89	75,76	75,87	82,98
87,43	93,76	97,12	85,3	92,54	91,34	70,24	78,5	81,23

NOTA: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 4, nos muestran el porcentaje de remoción de DQO determinados al ingreso y salida del Lombrifiltro, calculado mediante:

$$\%RemDQO = \left(\frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \right) * 100\%.$$

Con el programa Minitab 18, se analizaron los datos y se obtuvieron que los valores de mejor respuesta y comportamiento se da con una carga hidráulica de 0,6 m³/m².día y con un 20% de suero de mezcla en la alimentación.

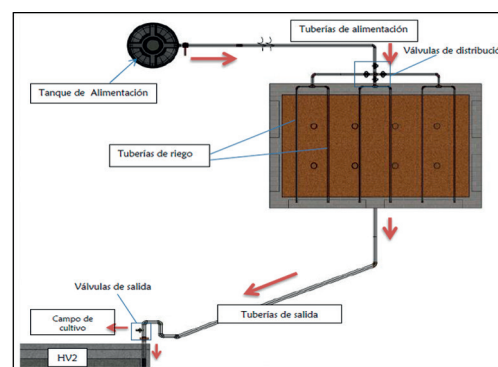
Se determino el área requerida para el lombrifiltro por la semejanza hidráulica para el diseño de aplicación con los datos experimentales, se establece el dimensionamiento del área del lombrifiltro.

factor de seguridad de 20%, obtenemos un **área total de Lombrifiltro de 20m²**.

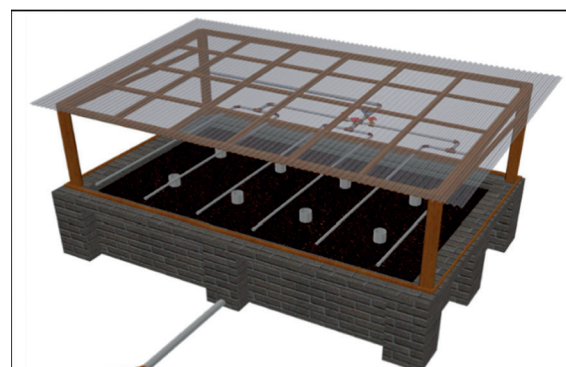
$$q = \left(\frac{Q}{A} \right)_{Diseño} = \left(\frac{Q}{A} \right)_{exp}$$

$$A_{Diseño} = 16,66 m^2$$

La construcción se realizó con personal capacitado en base al estudio realizado. Los datos obtenidos con la construcción a escala industrial fueron, DQO al ingreso y salida del Lombrifiltro, 12944 y 912 mg/L respectivamente; solidos totales, ingreso y salida de 4,31 a 2,25 mg/L, pH, ingreso y salida de 5,8 a 7; aceites y grasas de 35,2 a 15,5mg/L y nitrógeno total de 141 a 56 mg/L.



*HV2- Humedal vertical 2

**FIGURA 6:** Diseño en Autocad Lombrifiltro en planta**FUENTE:** elaboración propia

El agua que sale del Lombrifiltro posee una carga orgánica que esta fuera del rango permitido por la normativa boliviana (250mg/L para descargas líquidas) por lo que le agua tratada requiere un tratamiento terciario. El agua tratada se envía al humedal cercano al Lombrifiltro (Humedal vertical 2) que tiene una reducción de carga orgánica del 80% (Clavijo & Vino, 2016) obteniéndose una carga orgánica de 182 mg/L enmarcándose en la normativa boliviana.

4. CONCLUSIONES

El lombrifiltro se implementó aprovechando las características del efluente y del suero, por su contenido en alta carga orgánica y como fuente de nitrógeno. El lombrifiltro presenta grandes virtudes que son fácilmente acoplables a este tipo de industria, se presenta como una fusión entre la lombricultura y los filtros percoladores, llegando a complementarse de manera efectiva para el tratamiento. No presenta formación de lodos y presenta como un subproducto formado el humus. Realizado la prueba piloto del Lombrifiltro se establecieron conclusiones que nos permitieron cumplir los objetivos trazados, el Lombrifiltro presentó valores estables de remoción que se encuentran entre 85 y 95% en remoción de materia orgánica, con cantidades de suero de 20 a 30%, realizando riegos diarios con intervalos no mayores a 1 hora. Se procedió a proyectar las obras de construcción del sistema con la cooperación de personal capacitado de la empresa, en base al caudal total y de acuerdo a sus parámetros contaminantes. Se determinaron los materiales adecuados, para la distribución y descarga, evitando usar equipos sofisticados, como bombas o aspersores, esto con el fin de que el Lombrifiltro pueda ser fácilmente replicado por comunarios y/o otras microempresas que no cuenten con un presupuesto elevado.

5. REFERENCIAS

- A.V.F. Ingeniería Ambiental. (2003). *Fundación para la Transferencia Tecnológica*. Recuperado el 2017, de www.biofiltro.cl
- Agroflor. (s.a.). *Agroflor Lombricultura*. Recuperado el 2017, de agro.unc.edu.ar/~biblio/Manual%20de%20Lombricultura.pdf
- Clavijo, H., & Vино, J. (2016). *Estudios comparativos entre los biorreactores UASB y EGSB para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea "Flor de Leche S.R.L."*. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.
- Metclaf & Eddy, I. (1995). *INGENIERIA DE AGUAS RESIDUALES tratamiento, vertido y reutilización* (Vol. I). Madrid, España: McGRAW-HILL.
- Organización Panamericana de la Salud. (1981). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Paco, G., Loza, M., Mamani, F., & Sainz, H. (2011). Efecto de la Lombriz Roja Californiana (*Eisenia foetida*) durante el composteo y vermicomposteo en predios de la Estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 2(2).
- Parra, I., & Chiang, G. (2013). Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Revista Gestión y Ambiente*, 16(3).
- Quezada, P. (2001). *Planta de Tratamiento de Residuos Industriales Lácteos*. Tesis de pregrado, Universidad de la Frontera, Temuco.
- Quinchel, I. (2015). *Plan de Gestión de Manejo de Sistema Sanitario de Aguas Servidas por Sistema Tohá, Putre*. Ilustre Municipalidad de Putre, Chile.
- Salazar, P. (2005). *"Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales"*. Tesis de grado, Universidad Austral de Chile, Chile.