

Eliminación de coliformes fecales en lagunas anaerobias utilizando un método gráfico

Fecal coliform removal in anaerobic lagoons using a graphical method

¹Facundo Cortés-Martínez, ¹Arturo Tadeo Espinoza-Fraire, ¹Francisco Luis Camporredondo-Reyes, ²Rosa Angélica Zamora-Ríos

¹Departamento de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura, Universidad Juárez del Estado de Durango. Avenida Universidad s/n Fracc. Filadelfia, C. P. 35010, Gómez Palacio, Durango, México. Correos electrónicos: fcortes@ujed.mx; atespinoza@ujed.mx; fcamporredondo@ujed.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2189-3912>; <https://orcid.org/0000-0001-5619-7744>; <https://orcid.org/0000-0001-7750-7326>

²Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Juárez del Estado de Durango. Avenida Universidad s/n Fracc. Filadelfia, C. P. 35010, Gómez Palacio, Durango, México. Correo electrónico: rzamora@ujed.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5146-816X>

*Autor para correspondencia

Recibido: 12 de mayo del 2023
Aceptado: 23 de octubre del 2023
Publicado: 31 de enero del 2024
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2024914508e4508>

Resumen

Las lagunas anaerobias realizan la remoción de materia orgánica en ausencia de oxígeno y deben diseñarse considerando lagunas facultativas o aireadas, con el fin de continuar con el tratamiento y a la vez re oxigenar el agua residual. El propósito del presente documento es determinar dos gráficas para calcular la eliminación de coliformes fecales. Se incluye un ejemplo de aplicación con el método tradicional adoptado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la Comisión Nacional del Agua, posteriormente se utilizan las gráficas elaboradas previamente. Los resultados muestran los mismos valores calculados con el criterio tradicional.

Palabras clave: Sistemas lagunares; tiempo de retención; coliformes fecales

Abstract

Anaerobic lagoons remove organic matter in the absence of oxygen and must be designed considering facultative or aerated lagoons, to continue with the treatment and at the same time re-oxygenate the wastewater. The purpose of this document is to determine two graphs to calculate the elimination of fecal coliforms in anaerobic lagoons. An application example is included with the traditional method adopted by the Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la Comisión Nacional del Agua, later the graphs previously prepared are used. The results show the same values calculated with the traditional criteria.

Keywords: Lagoon systems; retention time; fecal coliform

Introducción

Los sistemas lagunares refieren a la acumulación de agua residual por un tiempo definido en el diseño, lo anterior con el propósito de llevar a cabo el tratamiento de limpieza en forma natural. La depuración se realiza a través de bacterias y algas (Rolim, 2000; Conagua/IMTA, 2007; Conagua/IMTA, 2016).

Las lagunas de estabilización básicamente remueven la materia orgánica, así como nutrientes y organismos patógenos (Metcalf & Eddy, 1991). Estos sistemas (en términos generales) se componen de tres diferentes tipos de lagunas: anaerobias, facultativas y de maduración o pulimento. De acuerdo con Mara, (2004); Kaya, Dilek, & Gökçay (2007); Naddafi *et al.*, (2009) una desventaja importante de los sistemas lagunares es que ocupan grandes áreas de terreno en su conjunto. En el presente estudio se abordará solamente el diseño de lagunas anaerobias. Éstas son diseñadas para remover grandes concentraciones de materia orgánica, también llamada Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) lo indicado se realiza por medio de la sedimentación y un proceso en ausencia de oxígeno, es decir anaerobio (Rolim, 2000).

Una característica de este tipo de lagunas es que no requieren de grandes áreas como las lagunas facultativas o de pulimento, los tiempos de retención son breves, y como ya se indicó, no necesitan de oxígeno disuelto, por lo tanto, no se generan algas. Las bacterias y huevos de helminto sedimentan y la remoción se lleva a cabo por el proceso anaerobio, otra condición importante para el funcionamiento es que debe existir una temperatura mayor a 15°C. Por otro lado, la eficiencia depende principalmente del tiempo de retención y las profundidades recomendadas son de 3 a 5 metros. Según Rolim, (2000) el proceso anaerobio en este tipo de lagunas es similar al del digester anaerobio y tanques sépticos.

El proceso que se desarrolla en lagunas anaerobias es: Licuefacción y Gasificación: la primera refiere a la transformación de la materia orgánica en ácidos grasos, mientras que en la gasificación se presenta la remoción de la materia orgánica. En la Figura 1 se indica el proceso de que se realiza en una laguna anaerobia.

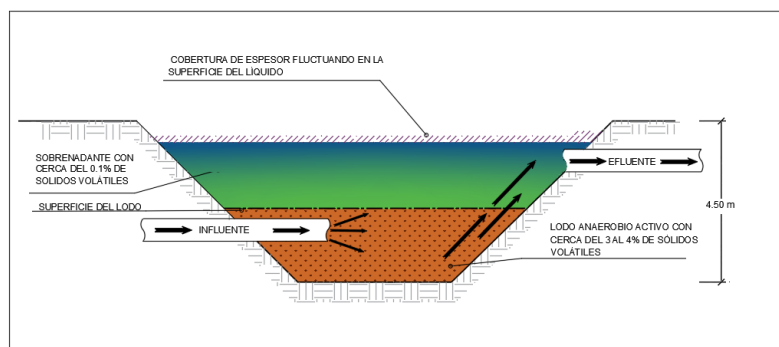


Figura 1. Tratamiento de una laguna anaerobia [Fotografía] (2016). Adaptada de Conagua/IMTA

En la revisión bibliográfica no se encontraron antecedentes específicamente, para el diseño de lagunas anaerobias por medio de un método gráfico.

Se identificaron dos criterios de diseño simplificados en sistemas lagunares: el primero es un Manual simplificado para el diseño, operación y evaluación de lagunas de estabilización de aguas residuales publicado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Collí et al. (1992); mientras que el segundo es un método de diseño reducido para lagunas de estabilización de Treviño y Cortes (2016). Estos últimos autores publicaron un diseño de lagunas facultativas con gráficas, con base en el criterio del IMTA: Cortes-Martínez et al. (2020) diseño gráfico para la materia orgánica y el tiempo de retención en lagunas facultativas.

Revisión bibliográfica en el diseño de lagunas de estabilización con gráficas. Para lagunas en serie: Uhlmann et al. (1983) desarrollaron un procedimiento que puede ser utilizado para calcular el coeficiente de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de primer orden (k_1) para una combinación de carga volumétrica de DBO (L), tiempo medio de permanencia del agua (t) y temperatura media (T) para periodos mayores o iguales a un mes, obtuvieron como resultado un grado razonable de correspondencia entre la eliminación de la DBO calculada. El método se limita a lagunas de estabilización en serie, se compararon de manera gráfica la remoción de DBO medidas en sistemas de lagunas durante las diferentes estaciones del año.

Tiempo después Yáñez (1993) presenta una discusión sobre el uso de lagunas estabilizadoras en la Región de Lima, Perú. También, menciona las consideraciones prácticas de diseño, resaltando los países con climas tropicales y se enfoca en lagunas facultativas, este autor presenta gráficas de la relación entre carga superficial, temperatura y la profundidad para lagunas de estabilización, reducción de bacteria fecal en lagunas de estabilización, remoción de DBO en función de carga superficial, la tasa de acumulación de lodo con años de operación y la reducción gradual de volumen de laguna. Enseguida, Ellis y Rodríguez (1995) consideraron la regresión múltiple en lagunas facultativas y de pulimento para eliminar tanto la materia orgánica como los coliformes fecales. Reynolds y Ahmad (1997) mencionan que los compuestos biodegradables en aguas residuales son medidos por los valores de la DBO. Realizaron gráficas relacionando la absorción con la longitud de onda de las aguas residuales sin tratar y de los efluentes tratados, así como de la variación de absorción y la variación de intensidad de fluorescencia a 340 nm con los valores de la DBO correspondientes.

Luego Adrian y Sanders (1998) sostienen que las constantes de velocidad para una ecuación de la DBO de segundo orden pueden ser evaluadas por métodos gráficos o numéricos, por lo

que propuso una ecuación donde se incluía la caída del oxígeno utilizando un modelo de segundo orden, las gráficas que reportaron consideran el tiempo de retención de la DBO.

Enseguida, Borsuk y Stow (2000) describen una versión generalizada del modelo de desintegración de la DBO, en la que se permite que la reacción asuma un orden distinto del otro, este enfoque utiliza el teorema de Bayes para desarrollar una distribución de probabilidad conjunta para los valores de los parámetros condicionados a los datos observados. El modelo facilita la consideración explícita de la incertidumbre en la gestión de la calidad del agua y en la toma de decisiones.

Tiempo después Xinglong y Boyd (2005) evaluaron un método directo para medir la DBO en un periodo de 5 días en muestras de acuacultura que no fue necesario que la muestra se diluyera o necesitara un enriquecimiento bacteriano y de nutrientes. Realizaron el análisis de manera gráfica, relacionando los métodos con la DBO en mg/l por un periodo de cuatro semanas en 32 muestras de estanques de bagres por el método directo y el método estándar y se obtuvo un coeficiente de regresión de 0.996.

Posteriormente Kehl et al. (2009) reportaron un estudio estadístico donde utilizaron el análisis Monte Carlo. Luego Kohn et al. (2016) adaptaron un modelo, utilizado comúnmente, para estimar la foto degradación de contaminantes orgánicos, con el propósito de explorar el destino de virus humanos en lagunas de estabilización, lo anterior basados en datos experimentales. Se modeló la inactivación de los virus en función de la profundidad, composición del agua, estación y latitud, encontraron que no es posible una validación completa del modelo debido a la falta de datos de campo suficientes, pero las tasas de inactivación estimadas corresponden con las reportadas en estudios de campo. Realizaron gráficos relacionando las unidades absorción con la longitud de onda, así como los rendimientos cuánticos de foto inactivación de sustitutos de virus humanos de uso común con su longitud de onda. También, graficaron el porcentaje de contribución en relación con la profundidad del agua.

Finalmente, Morales, Domínguez y Mata (2016) publicaron un criterio estocástico para el diseño gráfico para lagunas facultativas primarias. En cuanto a la remoción de materia orgánica y coliformes fecales, en lagunas anaerobias, no se encontraron artículos. El propósito del presente manuscrito es definir dos gráficas para la eliminación de coliformes fecales en lagunas anaerobias, lo anterior considerando el criterio de diseño adoptado por la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Como objetivos específicos se tiene:

- a) Conocer el método de diseño del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
- b) Desarrollo de las gráficas para determinar los coliformes fecales en el efluente de laguna anaerobia.
- c) Aplicación de las gráficas en el análisis de la concentración de coliformes fecales,
- d) Comparación de resultados entre el método tradicional y gráficas.

Materiales y métodos

La metodología para el diseño de una laguna anaerobia fue tomada del libro: Conagua (1997). Paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales,

Nomenclatura

C. O. = Carga orgánica

Q_i = Gasto en la entrada de la laguna en ($m^3/día$)

DBO_i = Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)

1000 = factor de conversión

λ_v = Carga orgánica volumétrica ($g\ DBO_i / m^3-día$).

T = Temperatura mínima ($°C$).

V_a = Volumen en (m^3).

L_i = Concentración de la DBO en el ingreso de la laguna en (mg/l).

Q_i = Gasto en el influente en ($m^3/día$).

A_a = Área de la laguna en (m^2).

Z = La variable ya fue definida.

O_a = Tiempo de retención hidráulico (días).

DBO_e = Materia orgánica en la salida de la laguna anaerobia en (mg/l).

Q_e = Gasto en la salida del estanque ($m^3/día$).

e_v = Evaporación en ($mm/día$).

$K_t^{(d-1)}$ = Decaimiento en (d^{-1}).

NE = Coliformes fecales en el efluente de la laguna en (NMP/100 ml).

N_i = Coliformes fecales en la entrada del estanque en (NMP/100 ml).

B_{prom} = Ancho promedio de la laguna en (m).

L_{prom} = Longitud promedio del estanque anaerobio en (m).

B_{sup} = Ancho superior del estanque anaerobio en (m).

Z = Profundidad en (m).

L_{sup} = Largo superior del estanque en (m).

A_{sup} = Área superficial en (m^2).

Criterio de diseño para laguna anaerobia

a) Carga orgánica

$$C.O. = \frac{Q_i DBO_i}{1000} \quad (1)$$

b) Carga volumétrica de diseño

$$\lambda_V = 20T - 100 \quad (2)$$

c) DBO₅ removida

$$\% DBO_{removido} = 2T + 20 \quad (3)$$

d) Volumen de la laguna

$$V_a = \frac{L_i Q_i}{\lambda_V} \quad (4)$$

e) Área de la laguna

Profundidad sugerida ($Z =$ de 3.0 a 5.0 m).

$$A_a = \frac{V_a}{Z} \quad (5)$$

f) Tiempo medio de retención hidráulico

$$O_a = \frac{V_a}{Q_i} \quad (6)$$

g) Concentración de la materia orgánica en la salida de la laguna

$$DBO_e = (100 - \% DBO_{removido}) DBO_i \quad (7)$$

h) Gasto en el efluente corregido por evaporación

$$Q_e = Q_i - 0.001 A_a \text{ ev} \quad (8)$$

i) Remoción de coliformes fecales. Factor de decaimiento

$$Kt(d^{-1}) = 2.6(1.19)^{T-20} \quad (9)$$

Coliformes fecales en el efluente de la laguna.

$$N_e = \frac{N_i}{1+Kt Oa} \quad (10)$$

j) Cálculo de la materia orgánica incluyendo la evaporación

$$DBO_{corr} = \frac{DBO_e Q_i}{Q_e} \quad (11)$$

k) Coliformes fecales corregidos por evaporación

$$N_{ecorr} = \frac{N_e Q_i}{Q_e} \quad (12)$$

l) Dimensionamiento de la laguna. Se contempla un largo-ancho $x = 2$. De acuerdo con la Conagua (1997) este valor representa la relación largo-ancho

$$B_{prom} = \sqrt{\frac{Aa}{x}} \quad (13)$$

Para la longitud promedio se tiene:

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} \quad (14)$$

Cálculo del ancho superior del estanque anaerobio:

$$B_{sup} = B_{prom} + Z(talud) \quad (15)$$

Longitud superior de la laguna

$$L_{sup} = L_{prom} + Z(talud) \quad (16)$$

Cálculo del área superficial

$$A_{sup} = B_{sup} L_{sup} \quad (17)$$

Desarrollo de las gráficas para determinar N_e en el efluente

Para simplificar el cálculo de los coliformes en el efluente, se relacionan las variables independientes de tiempo de retención (O_a) y temperatura (T) con el factor de decaimiento (F). Este factor de decaimiento (ecuación 19) es el primer término de la ecuación (18) la cual se toma de la ecuación (10):

$$N_e = \frac{1}{1+Kt Oa} * N_i \quad (18)$$

$$F = \frac{1}{1+Kt Oa} \quad (19)$$

En la expresión (19) se sustituye el factor Kt (ecuación 9) y se obtiene la fórmula (20):

$$F = \frac{1}{1+2.6 \cdot 0a \cdot (1.19)^{T-20}} \quad (20)$$

Con la expresión (20) se calcula el factor de decaimiento de los coliformes fecales (F) con diferentes rangos de temperatura y tiempos de retención. En la tabla 1 se muestra el cálculo del factor.

En las Tablas 1 y 2 ya editadas se muestran los resultados

Tabla 1
Relación de temperaturas con diferentes tiempos de retención de 15 a 20 °C

Temp. Oe	15 Ne/Ni	16 Ne/Ni	17 Ne/Ni	18 Ne/Ni	19 Ne/Ni	20 Ne/Ni
1	0.4786	0.4354	0.3933	0.3526	0.3140	0.2778
2	0.3146	0.2783	0.2448	0.2140	0.1862	0.1613
3	0.2343	0.2045	0.1777	0.1537	0.1324	0.1136
4	0.1866	0.1617	0.1394	0.1198	0.1027	0.0877
5	0.1551	0.1336	0.1148	0.0982	0.0839	0.0714
6	0.1327	0.1139	0.0975	0.0832	0.0709	0.0602
7	0.1159	0.0992	0.0847	0.0722	0.0614	0.0521
8	0.1029	0.0878	0.0749	0.0637	0.0541	0.0459
9	0.0925	0.0789	0.0672	0.0571	0.0484	0.0410
10	0.0841	0.0716	0.0609	0.0517	0.0438	0.0370

Elaboración propia

Tabla 2
Relación de temperaturas con diferentes tiempos de retención de 21 a 30 °C.

Temp. Oe	21 Ne/Ni	22 Ne/Ni	23 Ne/Ni	24 Ne/Ni	25 Ne/Ni	26 Ne/Ni	27 Oe	28 Ne/Ni	29 Ne/Ni
1	0.2443	0.2136	0.1858	0.1609	0.1388	0.1193	0.1022	0.0873	0.0744
2	0.1391	0.1196	0.1024	0.0875	0.0746	0.0634	0.0538	0.0456	0.0386
3	0.0973	0.0830	0.0707	0.0601	0.0510	0.0432	0.0366	0.0309	0.0261
4	0.0748	0.0636	0.0540	0.0458	0.0387	0.0328	0.0277	0.0234	0.0197
5	0.0607	0.0515	0.0437	0.0369	0.0312	0.0264	0.0223	0.0188	0.0158
6	0.0511	0.0433	0.0366	0.0310	0.0262	0.0221	0.0186	0.0157	0.0132
7	0.0441	0.0374	0.0316	0.0267	0.0225	0.0190	0.0160	0.0135	0.0114
8	0.0388	0.0328	0.0277	0.0234	0.0197	0.0166	0.0140	0.0118	0.0099
9	0.0347	0.0293	0.0247	0.0209	0.0176	0.0148	0.0125	0.0105	0.0089
10	0.0313	0.0264	0.0223	0.0188	0.0159	0.0134	0.0113	0.0095	0.0080

Elaboración propia

Por último, se multiplica el factor F por el número de coliformes fecales en el influente (Ni) y se obtiene el número de coliformes fecales en el efluente (Ne).

Las figuras 2 y 3 muestran de manera gráfica lo indicado en las Tablas 1 y 2, para obtener el factor de decaimiento (F) con temperaturas de 15 a 20 °C y de 21 a 30 °C, respectivamente.

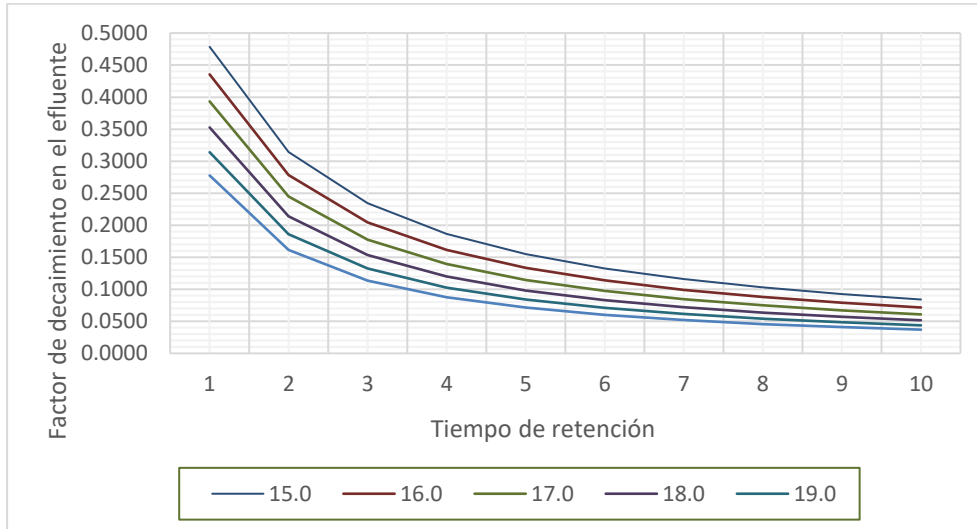


Figura 2. Curvas que corresponden a la ecuación (20) factor de cálculo para los coliformes fecales para temperaturas entre 15 y 20 grados centígrados en la eliminación de coliformes fecales. Elaboración propia

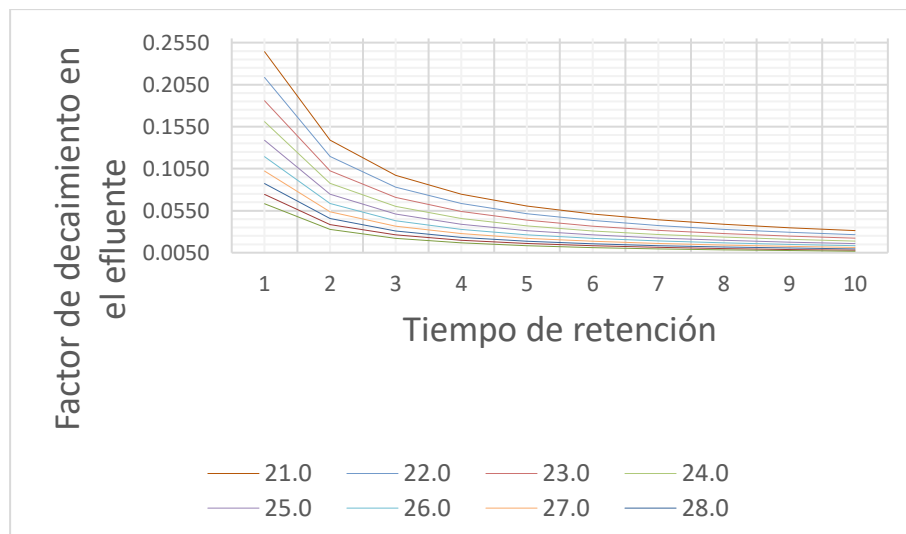


Figura 3. Curvas que corresponden a la ecuación (20) factor de cálculo para los coliformes fecales para temperaturas entre 21 y 30 grados centígrados. Elaboración propia

Resultados

Aplicación. Se necesita diseñar una laguna anaerobia con los siguientes datos: Gasto $Q = 220$ $m^3/d.$, DBO en el influente = 320 $mg/l.$, temperatura promedio = 15 $^{\circ}C.$, Coliformes fecales en el influente $N_i = 14\ 000\ 000$ $NMP/100$ $ml.$, los valores corresponden a las aguas residuales domésticas.

En la Tabla 3 se muestran los resultados utilizando el método tradicional de diseño.

Tabla 3
 Resultados del diseño de laguna Anaerobia

Qi	DBOi	T	Z (2 A 4 M)	e (mm/día)	Ni	X Relación Largo/Ancho	Talud
220	320	15	2	5	14000000	2	1
Carga orgánica	Carga superficial de diseño	% DBO removido	Volumen de la laguna	Área de la laguna	Tiempo Medio De Retención (O)	DBOe	Qe
70.40	200.00	50.00	352.00	176.00	1.60	160.00	219.12
Constante de Decaimiento Kt	Ne	BDOe Corregida por evaporación	Bprom	Lprom	Bsup	Lsup	Asup
1.09	5103444.29	160.64	9.38	18.76	11.38	20.76	236.28

Elaboración propia

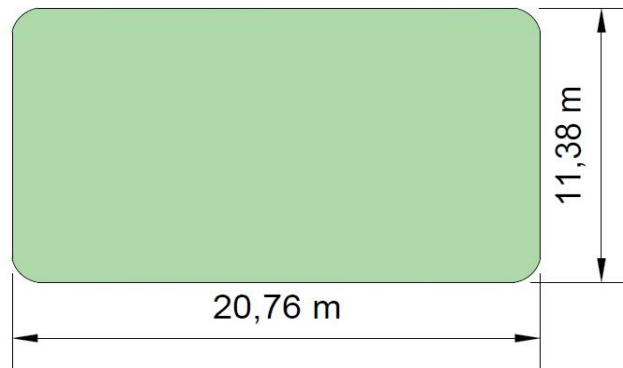


Figura 4. Laguna anaerobia con el método tradicional de diseño.
 Elaboración propia

Se observa un tiempo de retención de 1.6 días, mientras que los coliformes fecales resultaron con un remanente de 5 103 444.29 NMP/100ml.

Aplicando la Figura 2 se obtiene la Figura 5.

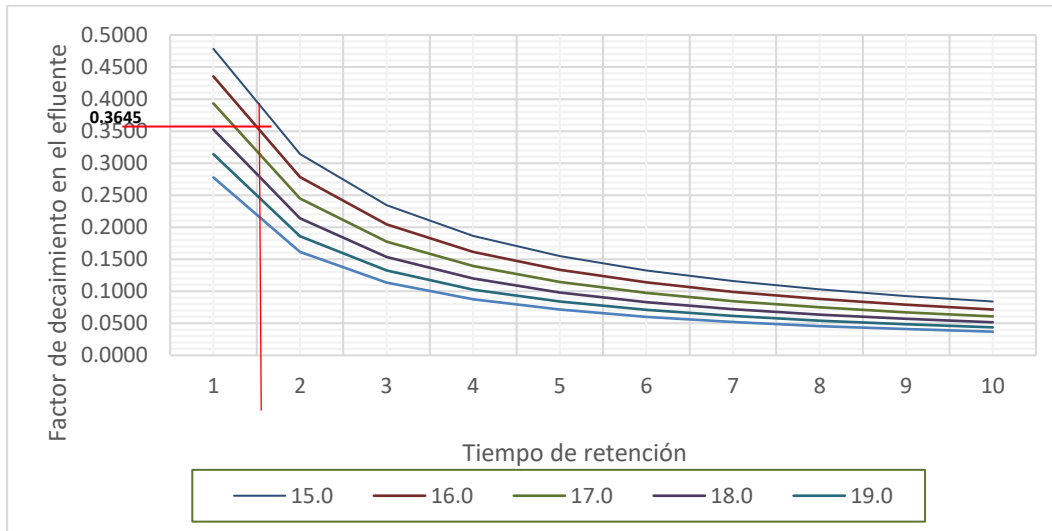


Figura 5. Ejemplo de aplicación del factor de cálculo para los coliformes fecales para temperaturas entre 15 y 20 grados centígrados en la eliminación de coliformes fecales. Elaboración propia

Se localiza en el eje de las X el tiempo de retención calculado, luego se intercepta con la curva de 15 °C., enseguida se gráfica una línea horizontal hacia el eje Y. De esta manera se obtiene el factor que posteriormente se multiplicará por el número de coliformes fecales en el influente de la laguna; es decir, $0.3645 (14\ 000\ 000) = 5\ 103\ 000$. Este número representa el 99.99 % del valor que se indica en la tabla 3.

Lo anterior simplifica el diseño tradicional, no obstante, es importante indicar que la metodología propuesta puede utilizarse como herramienta auxiliar en el diseño de lagunas anaerobias, es decir, primero se lleva a cabo el cálculo con el método tradicional, donde se define el tiempo de retención y las dimensiones. Posteriormente podrá utilizarse el criterio de verificación propuesto en el presente artículo.

Es importante indicar que el remanente de coliformes fecales deberá ser tratado con Lagunas anaerobias y de maduración, el presente estudio sólo incluye lagunas anaerobias. Por otro lado, debe existir un tratamiento preliminar para el desbaste primario, es decir, la retención de sólidos gruesos, así como canales desarenadores para que posteriormente el agua residual puede ingresar a la laguna anaerobia.

Para comprobar el resultado del factor que indica el método gráfico se introduce en la tabla de cálculo en Excel, el tiempo de retención de 1.6 días, la tabla 4 muestra el resultado.

Tabla 4
 Cálculo del factor para coliformes fecales con el tiempo de retención de 1.6 días

: f_x =1/(1+2.6*(1.19)^(B\$1-20))*\$A4

A	B	C	D	E	F	G
Temp.	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0
Oe	Ne/Ni	Ne/Ni	Ne/Ni	Ne/Ni	Ne/Ni	Ne/Ni
1	0.4786	0.4354	0.3933	0.3526	0.3140	0.2778
1.6	0.3645	0.3253	0.2883	0.2540	0.2224	0.1938
2	0.3146	0.2783	0.2448	0.2140	0.1862	0.1613
3	0.2343	0.2045	0.1777	0.1537	0.1324	0.1136

Elaboración propia

Discusión

Un trabajo de diseño de lagunas de estabilización con gráficas es el publicado por Uhlmann *et al.*, (1983) donde la aplicación es estrictamente en lagunas de estabilización en serie; mientras que en el presente estudio únicamente se consideró las lagunas anaerobias. Luego Yáñez (1993) utiliza gráficas para el diseño de lagunas facultativas tanto para coliformes fecales y materia orgánica; mientras que el estudio presente considera lagunas anaerobias y solamente coliformes. Un estudio donde se relaciona la remoción de la materia orgánica y coliformes fecales en sistemas lagunares es el publicado por Ellis y Rodríguez (1995) donde usaron una regresión múltiple, pero no se incluyó la laguna anaerobia, sólo facultativas y de maduración; mientras que, en el presente estudio, se relaciona la temperatura con diferentes tiempos de retención para calcular un factor que posteriormente, se multiplicará por la concentración de coliformes fecales en el efluente de la laguna. Adrián y Sanders (1998) propusieron gráficas para calcular la caída de oxígeno, donde se consideró el tiempo de retención, a diferencia del estudio presente las lagunas anaerobias no utilizan oxígeno para realizar el tratamiento. Borsuk y Stow (2000) publicaron un modelo donde utilizan el teorema de Bayes para predecir la calidad del agua, el presente trabajo utiliza gráficas para determinar la concentración de coliformes fecales en lagunas anaerobias. Xinglong y Boyd (2005) propusieron un criterio para calcular la materia orgánica, donde utilizaron el coeficiente de regresión, mientras que el presente estudio utiliza solamente gráficas para calcular coliformes fecales. Posteriormente Domínguez y Mata (2016) utilizaron un modelo estocástico para diseñar lagunas facultativas, consideraron la materia orgánica y coliformes, mientras que el presente análisis considera gráficas para determinar los coliformes fecales, basándose en el criterio tradicional de diseño.

Conclusiones

Los resultados obtenidos con el uso de las gráficas complementan la metodología tradicional, la cual requiere de varios pasos para llegar al mismo resultado, por lo que se recomienda su aplicación para la simplificación del diseño de lagunas anaerobias y para la verificación del cálculo y como una herramienta para evaluar diferentes temperaturas ambiente y tiempos de retención.

Se explica paso a paso el desarrollo para la obtención de las ecuaciones y el factor de decaimiento, éste último es utilizado para el cálculo de los valores en las tablas I y II. Posteriormente se elaboraron las gráficas con los valores de las tablas, enseguida fueron aplicadas a un ejemplo de diseño teórico: los resultados resultaron muy similares.

De esta manera se responde al objetivo general y específicos planteados en el presente estudio.

Referencias

- Adrian, D. D.; & Sanders, T. G. (1998). Oxygen sag equation for second-order BOD decay. *Water Research*. 32(3):840-848. doi: [doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00259-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00259-5)
- Borsuk, M. E.; & Stow, C. A. (2000). Bayesian parameter estimation in a mixed-order model of BOD decay. *Water Research*. 34(6): 1830-1836. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00346-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00346-2)
- Collí, M.J.; Rico, M. M.; Rivas, H. A.; Escalante, E. V. E. & Luyendijk, R. (1992). *Manual simplificado para el diseño, operación y evaluación de lagunas de estabilización de aguas residuales*. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México. 32 p.
- Conagua (1997). *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales*. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México. 318 p.
- Conagua (2016). *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Manual de diseño de lagunas de estabilización*. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México. 186 p.
- Cortés-Martínez, F.; Treviño-Cansino, A.; García, M. A. A.; & Vélez, J. G. L. (2020). Diseño gráfico para la materia orgánica y el tiempo de retención en lagunas facultativas/Graphic design for organic matter and retention time in facultative

lagoons. *Tecnología y ciencias del agua*, 11 (2), 158-189. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-04>

- Ellis, K.V.; & Rodríguez, P. C. C. (1995). Multiple regression design equations for stabilization ponds. *Water Research*. 29(11): 2509-2519. doi: 10.1016/0043-1354(95)00081-U
- Kaya, D.; Dilek, F. B. & Gökçay, C. F. (2007). Reuse of lagoon effluents in agricultura by post-treatment in a step feed dual treatment process. *Desalination*. 215(1-3): 29-36. doi: 10.1016/j.desal.2006.11.013
- Kehl, O.; Wichern, M.; Lübken, M.; Horn, H. (2009). Analysis of design approaches for stabilization ponds under different boundary conditions. A comparison. *Ecological Engineering*. 35(8): 1117-1128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.022>
- Kohn, T.; Mattle, M. J.; Minella, M. & Vione, D. (2016). A modeling approach to estimate the solar disinfection of viral indicator organisms in waste stabilization ponds and surface waters. *Water research*. 88: 912-922. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.022>
- Mara, D. D. (2004). *Domestic wastewater treatment in developing countries*. Routledge
- Metcalf and Eddy Inc. (1991). *Wastewater engineering treatment, disposal, and reuse*. New York, USA: McGraw-Hill. 752 p.
- Morales, R. S.; Domínguez, E. R. & Mata, M. M. (2016). Procedimiento gráfico para la implementación del diseño estocástico – bajo condiciones de incertidumbre y variabilidad – de unidades naturales de tratamiento de aguas residuales. *Afinidad*. 73(575): 219-225.
- Naddafi, K.; Hassanvand, A. S.; Dehghanifard, E.; Faezi-Razi, D.; Mostofi, S.; Kasaei, N.; Nabizadeh, R. & Heidari, M. (2009). Performance evaluation of wastewater stabilization ponds in Arak-Iran. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 6(1): 41-46.
- Reynolds, D. M. & Ahmad, S. R. (1997). Rapid and direct determination of wastewater BOD values using a fluorescence technique. *Water Research*. 31(8): 2012-2018. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00015-8)
- Rolim, M. S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización, cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego*. Santa Fe de Bogotá, Colombia: Nomos. 370 p.
- Treviño-Cansino, A. & Cortés-Martínez, F. (2016). Método de diseño reducido para lagunas de estabilización. *Revista mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7 (4): 729-742.
- Uhlmann, D.; Recknagel, F.; Sandring, G.; Schwarz, S. & Eckelmann, G. (1983). A new design procedure for waste stabilization ponds. *Water Pollution Control Federation*. 1252-1255pp.

- Xinglong, J. & Boyd, C. E. (2005). Measurement of 5-day biochemical oxygen demand without sample dilution or bacterial and nutrient enhancement. *Aquacultural engineering*, 33(4): 250-257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.02.005>
- Yáñez, F. (1993). *Lagunas de estabilización: Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento*. Cuenca, Ecuador. 493 p.