

Aplicación de un modelo matemático al monitoreo de una laguna facultativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas

Carlos Ibáñez¹

1Ingeniero Civil, consultor y asesor en temas de ingeniería sanitaria y especialmente en sistemas de tratamiento de aguas residuales

Este es un artículo inédito preparado especialmente para esta edición de la Revista REDESMA

Resumen

El tratamiento de las aguas residuales de origen doméstico en Bolivia constituye un problema de alta prioridad debido al crecimiento poblacional tanto urbano como rural, con el consecuente incremento en el volumen de consumo de agua y producción de aguas residuales. En Bolivia existen asentamientos humanos importantes entre los aproximadamente 100 m.s.n.m. hasta los 4,300 m.s.n.m., lo que hace que los parámetros de diseño para las plantas de tratamiento sean muy variables y hasta hoy en día existan grandes divergencias entre los ingenieros sobre la elección de dichos parámetros en función a la altitud sobre el nivel del mar. Debido al bajo costo de operación y el bajo costo relativo de las tierras en el área rural, se está haciendo común la utilización del método de lagunaje para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Sin embargo los estudios sobre el comportamiento operativo de estas obras de saneamiento están lejos de ser completos. El trabajo que se presenta, se dirige a proporcionar las herramientas matemáticas a través de un modelo dinámico que permita analizar las diferentes y complejas variables que intervienen en el proceso, y mostrar cómo sus fluctuaciones e interacción inciden sobre la calidad del efluente vertido al terreno o los cuerpos de agua.

Abstract

The treatment of wastewater from households in Bolivia is a high priority problem due to population growth, both urban and rural, with a consequent increase in the volume of water consumption and wastewater production. In Bolivia there are important human settlements among approximately 100 up to 4.300 m.a.s.l, therefore design parameters for plant treatments are highly variable and even today there are large differences between the preferences of engineers on these parameters depending on the altitude above sea level. Because of low operation cost and low land cost in rural areas, the use of lagoon methods for treating domestic wastewater is becoming common. However, studies on the operational performance of these drainage works are far from complete. This work aims to provide mathematical tools through a dynamic model to analyze different and complex variables involved in the process and show how fluctuations and interaction affect the quality of the effluent discharged to land or water bodies.

Palabras clave.– Aereadores, Coliformes, Oxidación, Materia Carbonosa, Sólidos Coloidales, Heterótrofos, Autótrofos, Fotótrofos, Quimiótrofos, Nitrificantes, Quimioheterótrofos, Purinas y Pirimidinas, Desarenador, Lagunaje, Metanogénesis, Flujo Pistón.

Keywords.– Aerators, Coliforms, Oxidation, Carbonaceous Matter, Colloidal Solids, Heterotrophs, Autotrophs, Phototrophs, Chemotrophs, Nitrifying Chemoheterotrophs, Purines and Pyrimidines, Sand Trap, Ponds, Methanogenesis, Piston Flow.

El problema

El aporte de contaminantes físicos, químicos y biológicos al suelo y cuerpos de agua, producido por la descarga de aguas residuales provenientes de instalaciones de tratamiento con un funcionamiento inadecuado, tiene un impacto considerable sobre la degradación del medio ambiente y los ecosistemas.

En el medio rural, debido a los bajos costos de operación y mantenimiento así como el bajo costo de los terrenos, se está generalizando el uso de lagunas de estabilización en el tratamiento de las aguas residua-

les de origen doméstico. Debido a la falta de un modelo matemático que involucre la multiplicidad de variables que inciden en su desempeño, dichas lagunas son diseñadas bajo parámetros demasiado simplificados. Esta situación lleva a resultados desastrosos porque las lagunas de estabilización generalmente se sobredimensionan debido a la incertidumbre sobre los parámetros de diseño, lo que hace que se encarezca su construcción y finalmente ésta no pueda llevarse a cabo. Por otro lado, una planta de tratamiento sobredimensionada encarece los costos de operación y mantenimiento al extremo de que se abandone.

Este problema puede resolverse a partir del diseño de un modelo operacional para lagunas de estabilización facultativas utilizando la dinámica de todas las variables físicas, químicas y biológicas que intervienen en el proceso, permitiendo conocer cómo sus fluctuaciones e interacción, inciden en la calidad del tratamiento.

Aspectos básicos del tratamiento

La creciente contaminación de cursos y cuerpos de agua a causa del vertido de aguas residuales provenientes del consumo doméstico, requiere la utilización de tratamientos cada vez más sofisticados y completos. Los métodos convencionales de tratamiento exigen una fuerte inversión en partes mecánicas (motores, bombas, aereadores, químicos, etc.).

El tratamiento de las aguas residuales necesita realizarse en diversas etapas y fundamentalmente se puede

de hablar al menos de un tratamiento primario y uno secundario.

En el tratamiento primario, el objetivo principal es remover los sólidos gruesos que se encuentran en suspensión en el agua de desecho pero no resultan significativamente afectados por este tratamiento, ni la DBO, ni los organismos indicadores de contaminación fecal y menos aún los nutrientes.

El tratamiento secundario tiene por objeto fundamental remover con gran eficiencia tanto la DBO como los coliformes y nutrientes.

Parámetros más importantes para medir la contaminación orgánica

DBO

El parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado, aplicable tanto a aguas residuales

Contaminante	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO y la DQO. Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitir enfermedades contagiosas.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten sin tratar pueden favorecer el crecimiento de vida no deseada, perjudicando así el desarrollo de especies nativas. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden ocasionar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de varias actividades comerciales e industriales. Son generalmente muy tóxicos.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua. Pueden causar la salinización y sodificación de los suelos.

Contaminantes de importancia en las aguas residuales domésticas

como a aguas superficiales es la DBO a 5 días (DBO_5). La determinación de la misma está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.

La oxidación bioquímica es un proceso lento, cuya duración es, en teoría, infinita. En un periodo de 20 días se completa la oxidación del 95 al 99% de la materia carbonosa. En los 5 días que dura el ensayo de la DBO se llega a oxidar entre el 60 y el 70%.

Organismos indicadores

Los organismos patógenos se presentan en las aguas contaminadas y residuales en cantidades muy pequeñas y, además, resultan difíciles de aislar y de identificar. Por ello se emplea el organismo coliforme como organismo indicador, puesto que su presencia es más numerosa y fácil de comprobar. El tracto intestinal humano contiene innumerables bacterias con forma de bastoncillos, conocidas como organismos coliformes. Aparte de otras clases de bacterias, cada ser humano evacua de 100.000 a 400.000 millones de organismos coliformes cada día. Por ello se considera que la presencia de coliformes puede ser un indicador de la posible presencia de organismos patógenos, y que la ausencia de ellas es un indicador de que las aguas están libres de patógenos.

Generalidades del tratamiento biológico

Objetivos

En la mayoría de los casos con un análisis y control adecuados del entorno, es posible tratar por vía biológica la práctica totalidad de las aguas residuales. Por lo tanto, es necesario conocer perfectamente el funcionamiento y las características de cada uno de los procesos de tratamiento biológico, a fin de que se pueda asegurar el control y adecuación del medio ambiente al proceso de tratamiento escogido.

Papel de los microorganismos

La eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables, y la esta-

bilización de la materia orgánica se consiguen, biológicamente, gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Los microorganismos se utilizan para convertir la materia orgánica carbonosa coloidal y disuelta en diferentes gases y tejido celular. Dado que el tejido celular tiene un peso específico ligeramente superior al del agua, se puede eliminar por decantación.

Es importante señalar que, salvo que se separe de la solución el tejido celular que se produce a partir de la materia orgánica, no se alcanzará un tratamiento completo. Ello es debido a que el tejido celular, que es de naturaleza orgánica, aparecerá como parte de la DBO del efluente.

Introducción al metabolismo bacteriano

La comprensión de las actividades bioquímicas de los microorganismos importantes, es básica en el proyecto del tratamiento biológico y en la elección de los procesos que forman parte de él.

Para poder reproducirse y funcionar de manera correcta, un organismo necesita: una fuente de energía; carbono para la síntesis de materia celular nueva, y elementos inorgánicos (nutrientes) tales como nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio y magnesio. Los nutrientes orgánicos (factores de crecimiento) también pueden ser necesarios para la síntesis celular.

La materia orgánica y el dióxido de carbono son dos de las principales fuentes de carbono celular para los microorganismos. Los organismos que utilizan el carbono orgánico para la formación de tejido celular se denominan heterótrofos. Los organismos que obtienen carbono celular a partir del dióxido de carbono reciben el nombre de organismos autótrofos. El proceso de conversión del dióxido de carbono a tejido celular orgánico en un proceso reductivo que precisa un suministro neto de energía. Por lo tanto, los organismos autótrofos deben emplear una parte mayor de su energía para la síntesis de tejido celular que los

organismos heterótrofos, lo cual comporta unas tasas de crecimiento menores que las de éstos.

La energía necesaria para la síntesis celular se obtiene de la luz o bien de las reacciones químicas de oxidación. Los organismos capaces de utilizar la luz como fuente de energía reciben el nombre de organismos fotótrofos. Estos organismos pueden ser heterótrofos (algunas bacterias sulfurosas) o autótrofos (algas y bacterias fotosintéticas). Los organismos que obtienen la energía a partir de reacciones químicas se conocen como organismos quimiótrofos. Al igual que en el caso de los fotótrofos, los organismos quimiótrofos también pueden ser heterótrofos (protozoos, hongos y la mayoría de las bacterias) o autótrofos (bacterias nitrificantes). Los organismos quimioautótrofos consiguen la energía a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos tales como el amoníaco, el nitrito y el sulfuro. Los organismos quimioheterótrofos suelen obtener la energía mediante la oxidación de compuestos orgánicos.

En ocasiones los nutrientes pueden condicionar y limitar, en mayor medida que el carbono y la energía, la síntesis celular y el crecimiento bacteriano. Los principales nutrientes inorgánicos necesarios para los microorganismos son: N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na y Cl, mientras que entre los nutrientes de menor importancia se hallan el Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni V y W.

Al margen de los nutrientes inorgánicos que se acaban de citar, algunos microorganismos pueden necesitar también algunos nutrientes orgánicos. Los nutrientes orgánicos, conocidos como “factores de crecimiento”, son compuestos que necesitan los organismos como precursores o constituyentes para la síntesis de materia celular orgánica que no se puede obtener a partir de otras fuentes de carbono. A pesar de que los factores de crecimiento varían de un organismo a otros, los principales factores de crecimiento se pueden dividir en las siguientes tres clases: aminoácidos; purinas y pirimidinas, y vitaminas.

La nutrición bacteriana y los procesos de tratamiento biológicos

El principal objetivo de la mayoría de los procesos de tratamiento biológico es la reducción del contenido de materia orgánica (DBO carbonosa) del agua residual. Para conseguir este objetivo son de gran importancia los organismos quimioheterótrofos, pues además de energía y carbono también necesitan compuestos orgánicos. Cuando los objetivos del tratamiento incluyan la conversión de amoníaco en nitrato, son de gran importancia las bacterias nitrificantes quimioheterótrofas.

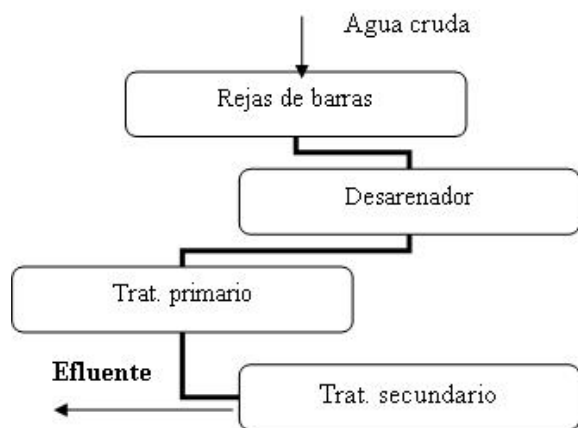
Las aguas residuales municipales suelen contener cantidades de nutrientes (tanto orgánicos como inorgánicos) adecuadas para permitir el tratamiento biológico para la eliminación de la DBO carbonosa.

Tratamiento primario y secundario de las aguas residuales

Existen varias alternativas para el tratamiento de las aguas servidas provenientes de redes de alcantarillado, sin embargo la mayoría de éstas resultan inviables económicamente en nuestro medio. El tratamiento más usual y recomendable en áreas rurales de Bolivia debido a que representa la alternativa de más bajo costo y buena eficiencia consiste de tres fases:

1. Retención de sólidos gruesos por rejillas.
2. Desarenador para la retención de partículas de grava y arena.
3. Tratamiento primario por sedimentación para decantar todos aquellos sólidos que no pudieron ser removidos en las fases 1 y 2.
4. Tratamiento secundario donde se realiza la depuración biológica.

Las aguas así tratadas son objeto de la posterior disposición final a un cuerpo o curso de agua o muchas veces al terreno donde son reutilizadas para el riego. El proceso se muestra esquemáticamente a continuación.



Esquema básico de tratamiento
Fuente: elaboración propia

Tratamiento por lagunaje, fundamentos del proceso

Los sistemas de lagunaje se constituyen en procesos no mecanizados de tratamiento por cultivos en suspensión, en el cual los procesos están controlados únicamente por las condiciones medioambientales. En lagunas de estabilización, el aporte de oxígeno proviene de la difusión aire-líquido y de la fotosíntesis de las algas. La poca mezcla que se produce es debida al efecto del oleaje que a su vez está condicionado por el viento. En resumen, el proceso tiene particularidades que lo hacen un sistema complejo y cuyo estudio requiere el profundo conocimiento de una serie de variables interactuantes que, al no ser controladas mecánicamente, presentan fluctuaciones de importancia. Se pueden clasificar, con relación a la presencia de oxígeno, en lagunas aerobias, facultativas y anaerobias que son denominadas así por el tipo predominante de bacterias que realizan el tratamiento.

El efluente del tratamiento

Remoción de la DBO. La DBO, es removida por el tratamiento primario y secundario, dependiendo de la eficiencia de los sistemas, entre un 75% y 95%. Este porcentaje de remoción es considerado suficiente y se encuentra dentro de lo establecido por la norma.

Remoción de los coliformes. La remoción de los coliformes varía dependiendo de la eficiencia del sistema de tratamiento primario – secundario, entre 99% y 99.99%, garantizando que luego de este tratamiento, el agua residual se encuentra prácticamente libre de contaminación fecal, materia que ha sido degradada prácticamente por completo.

Los nutrientes en el efluente del tratamiento secundario. La eficiencia en su remoción es muy variable por lo que debe prestarse una fuerte atención a este aspecto el cual, sin embargo, es generalmente descuidado por los proyectistas. Dependiendo del destino de las aguas del efluente, puede ser que no sea necesaria ni deseable su remoción, como cuando dichas aguas van a ser usadas en un sistema de riego. Sin embargo cuando este no es el caso, la deficiencia en la remoción de nutrientes puede ocasionar problemas serios de eutrofización de los cuerpos de agua que los reciben.

Enfoque de ecosistema

En general, la literatura sobre el tema y por tanto los proyectistas, debido a la complejidad de las variables que intervienen e interactúan en el tratamiento de aguas servidas por lagunaje, tratan al estanque o reactor como una caja negra donde entra el agua cruda y sale tratada. Las simplificaciones que se hacen en el diseño son en muchos casos inadmisibles.

El presente trabajo intenta tratar una laguna de estabilización, como un ecosistema donde los diversos microorganismos interactúan en un frágil equilibrio que el proyectista y quien realiza el monitoreo de la planta deben intentar preservar.

Simulación del modelo matemático dinámico

Con la utilización del paquete computacional VEN-SIMPLE®, de libre uso académico y especializado para la elaboración de modelos dinámicos de sistemas, se ha confeccionado el modelo para la laguna facultativa, haciendo uso de las ecuaciones y variables que, por su complejidad no se citan en el presente artículo por la razón fundamental de que se trata solamente de dar un pantallazo al proceso y no entrar en el mundo aparte de su desarrollo matemático.

Sin embargo, cabe citar que las ecuaciones envueltas en el proceso se refieren fundamentalmente a:

- Metabolismo bacteriano
- Metabolismo bacteriano aerobio
- Cinética microbiana
- Utilización del sustrato
- Balance de masa para el sustrato
- Metabolismo de fotótrofos
- Balance de masa para autótrofos
- Suministro de O₂ para el crecimiento bacteriano
- Sedimentación de bacterias aerobias a la zona anaerobia
- Metanogénesis
- Remoción de Coliformes

A fin de simular el comportamiento hidráulico de la laguna como un punto medio entre mezcla completa y flujo pistón se ha subdividido la laguna en 10 partes en serie de las mismas dimensiones.

El modelo general está compuesto de varios modelos particulares que simulan un sistema en especial, los cuales se interrelacionan luego para conformar un solo cuerpo comprensible del ecosistema que da lugar al tratamiento biológico de aguas residuales en una laguna de estabilización facultativa.

A continuación se da un listado de las variables de entrada al modelo.

Profundidad total	Profundidad total de la laguna
Profundidad aerobia	Profundidad aerobia de la laguna
Largo	Largo total de la laguna
Ancho	Ancho total de la laguna
Caudal	Caudal de ingreso a la laguna
fs0	Factor de síntesis para células aerobias
p, s, t, r	Coefficientes de C, H, O y N en la ecuación empírica de la materia orgánica.
k	Concentración mitad del máximo crecimiento
Xa0	Concentración de células activas que ingresa a la laguna
ben	Tasa de agotamiento endógeno de las células aerobias
Pt	Rendimiento medio de la reacción de producción de células fotótrofas
Ea	Energía para producir un miligramo de células fotótrofas
Rm	Radiación solar media
Kdcolif	Tasa de remoción de coliformes
Temp	Temperatura del agua en la zona aerobia
T2	Temperatura del agua en la zona anaerobia
R1	Porcentaje de remoción 1
Dh1	Tabla de valores de la altura a la cual la sedimentación tiene un promedio entre R1 y R2.
R2	Porcentaje de remoción 2
Dh2	Tabla de valores de la altura a la cual la sedimentación tiene un promedio entre R2 y R3
R3	Porcentaje de remoción 3
Dh3	Tabla de valores de la altura a la cual la sedimentación tiene un promedio entre R3 y R4
R4	Porcentaje de remoción 3
Dh4	Tabla de valores de la altura a la cual la sedimentación tiene un promedio entre R4 y R5
R5	Porcentaje de remoción 3
Entrada	Concentración de sustrato que ingresa a la laguna en términos de la DBO último
DBO5	Concentración de sustrato que ingresa a la laguna en términos de DBO5
Rel	Relación entre DBOu y DBO5
Ealga	Concentración de entrada de algas a la laguna
EColif	Cantidad o porcentaje de coliformes que ingresa a la laguna
alfa, beta, gamma	Coefficientes de C, H, O y N en la ecuación empírica de las células fotótrofas
feana	Factor de energía de las células anaerobias
x, ye, z	Coefficientes de C, H, O y N en la ecuación empírica de la materia orgánica que sedimenta a la zona anaerobia

Verificación del modelo

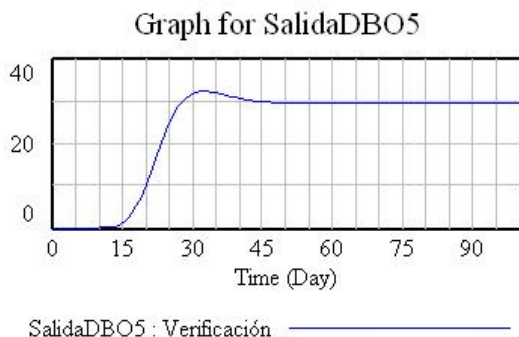
Una vez establecido el modelo debe realizarse su verificación comparándolo con los resultados obtenidos por los métodos tradicionales de diseño de lagunas de estabilización facultativas.

Para realizar la verificación, tomaremos el siguiente ejemplo:

Diseñar una laguna facultativa para tratar un caudal de $946 \text{ m}^3/\text{d}$ de agua residual con una concentración de DBO_5 en el afluente de 220 mg/l , si se espera alcanzar una concentración de DBO_5 en el efluente, de 30 mg/l . Utilizar para la temperatura del agua el valor recomendado por la NB 688 para la zona altiplánica. Compararemos el resultado con un cálculo realizado por el método de flujo pistón y el de la carga superficial.

Introduciendo los datos antes mencionados en el modelo, damos valores a las variables Largo y Ancho a fin de que, con una profundidad total de 1.5 m se alcance una concentración de DBO_5 en el efluente de aproximadamente 30 mg/l que es lo que pide el ejemplo.

Como resultado de este proceso obtenemos la siguiente gráfica para la variable Salida10 que precisamente representa la concentración de DBO en el efluente:



Obsérvese que no se obtiene un valor estático en la concentración del efluente sino que se obtiene el comportamiento dinámico del mismo en un periodo de 100 días en los cuales la laguna entra en un estado estable. En los primeros días, que corresponden al inicio de la operación, en el gráfico anterior vemos que la concentración de DBO en el efluente es cero, lo cual es lógico pues al haberse simulado una combinación de flujo pistón y mezcla completa, los primeros días la contaminación del afluente todavía no ha alcanzado el efluente.

La tabla siguiente, extractada también del modelo, nos permite verificar el tiempo de detención que ha sido necesario para alcanzar esta concentración en el efluente:

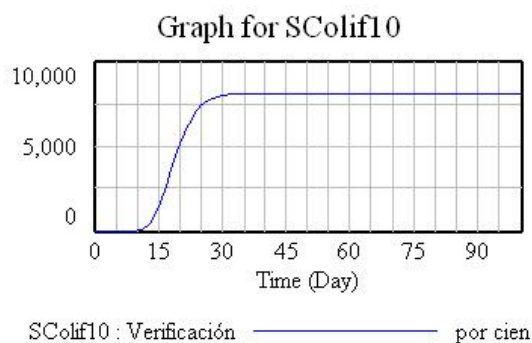
"Td total"	Runs:	Verificación
Td total	31.7	

Observamos que el tiempo de detención que encontramos mediante el modelo dinámico es de 31.7 días frente a los 43.97 días encontrados por el método de la carga superficial y los 31.42 días del método de flujo pistón con dispersión axial.

Por lo tanto los resultados del modelo se aproximan más al método del flujo pistón con dispersión axial, el cual se asemeja más a la realidad que el de la carga superficial el cual, siendo mucho más simplificado es también más conservador.

Además de proporcionar la concentración de DBO el efluente, el modelo también proporciona información sobre cualquiera de las otras variables utilizadas. Por ejemplo, asumiendo una cantidad de coniformes en el Afluente de $1,000,000 \text{ colif}/100 \text{ ml}$, el modelo nos da el siguiente gráfico para su remoción (Variable SColif10).

Nótese que se tiene una cantidad de coliformes en el efluente de aproximadamente $8,000 \text{ colif}/100 \text{ ml}$, lo cual implica una remoción de 99.4%.



Cambio en la filosofía de diseño y operación de lagunas facultativas

La introducción de un modelo dinámico cambia la filosofía de diseño de las lagunas de estabilización, considerándolas como ecosistemas en frágil equilibrio que merecen una permanente atención en cuanto a las variaciones que pudieran poner en riesgo su estabilidad, provocando fluctuaciones en la calidad del efluente tratado.

De esta manera, tanto el proyectista como el operador tendrán una sensible imagen real de la complejidad de los procesos que ocurren dentro de una laguna de estabilización facultativa. A partir de esta visión integral, los operadores podrán tomar las medidas que el caso aconseje, realizando las verificaciones y ensayos correspondientes para poder verificar todos los parámetros que gobiernan el tratamiento y así poder explicar las variaciones con relación a las estimaciones de diseño, entender y corregir el comportamiento real cuando éste se aleja de los resultados esperados.

Análisis de sensibilidad

Un gran aporte del modelo es poder realizar un análisis de sensibilidad que muestre las variaciones en los resultados del tratamiento, frente a fluctuaciones pre-visibles en las condiciones del entorno.

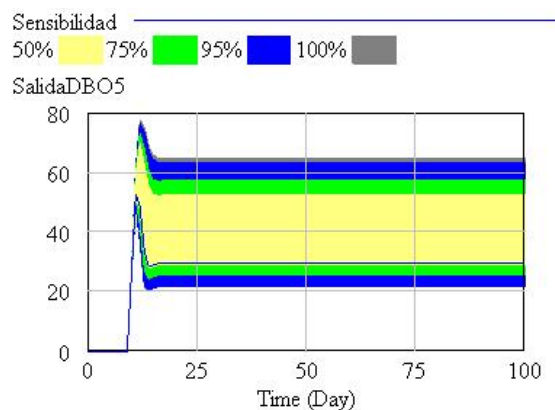
Para este análisis tomaremos condiciones de contorno que reflejen una población rural boliviana de alrededor de 1,500 habitantes, con un consumo medio diario de 80 litros por habitante y por día (Norma Boliviana de diseño para sistemas de agua potable en poblaciones menores a 5000 habitantes), lo cual arroja un caudal promedio de 120 m³/día. Por otro lado, utilizaremos el parámetro del ejemplo 3.1.3. para la DBO en el afluente de 220 gr/m³

Para la radiación solar incidente y la temperatura del agua tomaremos la recomendación de la NB 688 que, para la región de valles (altura media en Bolivia), arroja un valor de 300 Cal/cm²/día, es decir 12,550,000 julios/m²/día para la radiación y 21 °C para la temperatura del agua en el mes más frío.

Si estos valores se mantuvieran constantes con el tiempo, para obtener una calidad de efluente de aproximadamente 30 grDBO/m³, el modelo arroja un tiempo de detención necesario de 13 días. Veremos a continuación cuál la sensibilidad del modelo a variaciones en las condiciones de entorno.

Variaciones en la DBO del efluente y remoción de coliformes debidas a las fluctuaciones de temperatura del agua

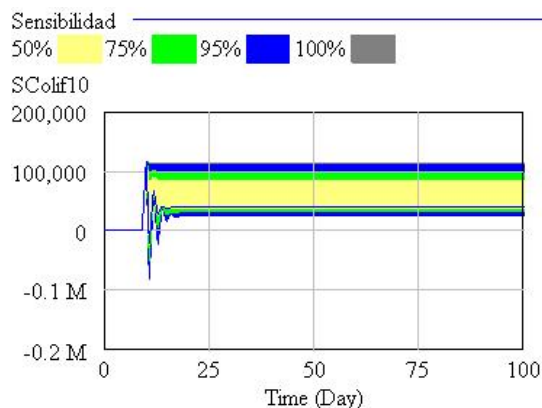
Considerando una variación de la temperatura ambiente entre los 9°C y los 25°C que corresponden aproximadamente a los valores de la NB 688 entre altiplano y llano obtenemos el gráfico1:



En el gráfico 1 se puede apreciar el efecto de la temperatura en la calidad del efluente. Recordemos que para 21°C (valor del modelo) teníamos aproximadamente 30 grDBO/m³ en el efluente. Mejoramos la calidad del mismo a 21 grDBO/m³ cuando la temperatura se incrementa a 25°C. Al contrario si la temperatura baja hasta los 9°C, la calidad del efluente se deteriora arrojando valores de hasta 66 grDBO/m³.

Este efecto de la temperatura es muy conocido y hace que las lagunas facultativas sean bastante menos efectivas en el altiplano que en el valle o el llano requiriendo mayores áreas en el primer caso.

Para los coliformes tenemos el gráfico 2:

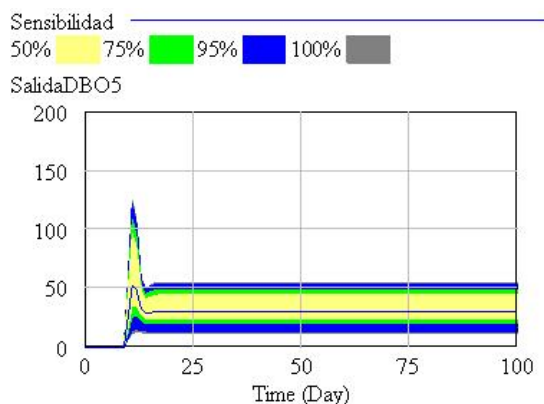


Luego de una inestabilidad inicial, el N° de coliformes en el efluente se mantiene entre 25000 y 120000 por 100 ml.

Variaciones en la DBO del efluente debidas a las fluctuaciones de la concentración de DBO en el afluente del agua

Nuestro parámetro básico para la DBO5 afluente es de 220 gr/m³, veamos ahora que sucede con la eficiencia en la remoción de este indicador en el efluente si hacemos variar su concentración en el afluente entre 50 y 500 gr/m³.

El análisis de sensibilidad correspondiente se muestra en el gráfico 3:

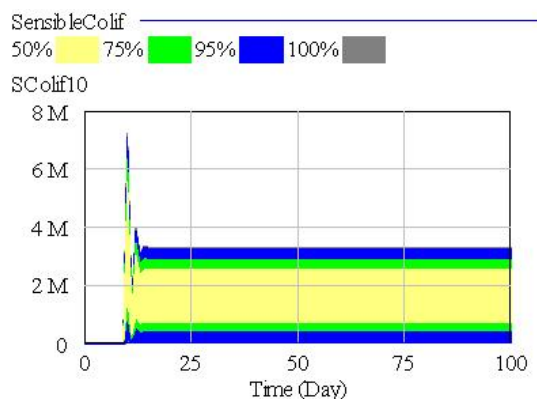


Observamos de la gráfica anterior, que una variación de 1:10 en el afluente produce aproximadamente una variación de 1:6 en el efluente por lo que, si bien existe cierta amortiguación, la relación entre las concentraciones del afluente y del efluente son directamente proporcionales.

Variaciones en la cantidad de coliformes del efluente debida a las fluctuaciones en los coliformes del afluente

Nuestro parámetro básico para los coliformes presentes en el afluente es de 10⁷/100ml, veamos ahora que sucede con la eficiencia en la remoción de este indicador en el efluente si hacemos variar su cantidad en el afluente entre 10⁸ y 10⁴.

El análisis de sensibilidad correspondiente se muestra en el gráfico 4:



Observamos de esta gráfica que los coliformes en el efluente varían desde cero para el valor más bajo hasta 3,200,000 para el valor de entrada de 10^8 . Es decir, la eficiencia del tratamiento varía desde un 100% para valores bajos en el afluente hasta 96.8% para valores altos.

Conclusiones

El modelo matemático dinámico establecido en el presente trabajo de investigación, es una herramienta de gran utilidad tanto para el proyectista como para el operador de una planta de tratamiento basada en lagunas de estabilización facultativas.

Al contrario de lo que ocurre con la tendencia actual de diseñar lagunas de estabilización con unos cuantos parámetros como la carga superficial y el tiempo de detención, el modelo dinámico establecido permite conocer el comportamiento en el tiempo de todas las variables que realmente intervienen en el proceso y permite conocer cómo sus variaciones inciden en la calidad del tratamiento.

Para una aplicación efectiva del modelo en la etapa de operación de una planta, se deben realizar permanentemente pruebas, medir la DBO afluente y efluente, realizar ensayos de sedimentación y conteo de coliformes, medir la temperatura y, todas las variables de ingreso que se consideran en el modelo, para encontrar la explicación al comportamiento de la laguna en una época dada.

Modelos dinámicos de esta naturaleza permitirán también reformular la Norma Boliviana en la materia a fin de hacerla más flexible y explicativa, tomando en cuenta la multiplicidad de parámetros que intervienen en el tratamiento de las aguas residuales de origen doméstico, por lagunas de estabilización facultativas.

Referencias bibliográficas

- Tchobanoglous – Burton, 1995 *Ingeniería de Aguas Residuales*, McGraw – Hill Editores Tercera edición, 1485 páginas
- Metcalf & Hedi, 1995 *Ingeniería de Aguas Residuales*, McGraw – Hill Editores, Tercera Edición, 1966 páginas
- Organización Panamericana de la Salud, 1987 *Guías para la calidad de agua potable* 732 páginas
- Winkler A., 1994 *Tratamiento biológico de aguas de deshecho*, Editorial LIMUSA S.A. 337 páginas
- Capra Jenio Guido, 1999 *Ingeniería Sanitaria* Imprenta-Editorial de la UMSA, La Paz, Bolivia. 210 páginas
- Organización Panamericana para la Salud, Universidad Mayor de San Andrés, 1969 *Curso sobre lagunas de estabilización* 203 páginas, La Paz, Bolivia
- Ibáñez Carlos, 1994 *Coletores sanitarios principales, zonas este y norte de la ciudad de Oruro*, Revista de Ingeniería Sanitaria, La Paz, Bolivia 5 páginas
- Ibáñez Carlos, 2003, *Lineas de aduccion en sistemas de agua potable*, 14 páginas
- PROSABAR, Banco Mundial, 1993 *Determinacion de tecnologias de tratamiento de aguas residuales adecuadas a comunidades de 500 a 5000 habitantes*, 45 páginas
- Organización Panamericana para la Salud, Universidad Mayor de San Andrés, 1970 *Plantas de tratamiento de aguas potables UMSA – OPS*, 437 páginas La Paz, Bolivia
- Fair – Géyer – Okun, 1971 *Purificacion de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*, Editorial LIMUSA S.A. 764 páginas
- CEPIS, 1981 *Avances en el tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización* 105 páginas, México
- Tchobanoglous Crites, 2001 *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones* McGraw – Hill Editores, 776 páginas
- Rittman, Carty, 2001 *Bioteconologia del medio ambiente*, McGraw – Hill Editores, 744 páginas
- Soli J Arceivala, 1986 *Wastewater treatment for pollution control* Tata McGraw – Hill Publishing Company Limited, 183 páginas
- Gobierno Municipal de La Paz, 1985, *Manejo de las aguas residuales en la cuenca del río Choqueyapu*, H.Alcaldía Municipal de La Paz