



SECCIÓN ARTÍCULOS ORIGINALES
Año 10 Vol. 1 N° 12 - 2010 (Pags. 65 - 78)

EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS FACULTATIVAS E IMPLICACIONES EN LA SALUD PÚBLICA

Tsunao Matsumoto,¹ Iván Andrés Sánchez Ortiz²

Fecha de recepción: Mayo 15 - 10

Fecha de aceptación: Septiembre 12 - 10

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAR) de Ilha Solteira (SP) en relación a su eficiencia, acumulación de lodos y los posibles efectos en la salud pública producidos por la calidad del efluente final. La investigación consistió en el estudio batimétrico de las lagunas de estabilización facultativas primarias y un monitoreo de 24 horas consecutivas en el que se caracterizó los afluentes; los efluentes; las condiciones físicas de la ETAR y se diagnosticó el comportamiento de la Estación en relación al tratamiento de las aguas residuales. Se determinó que pese a que la carga orgánica efluente se encontró dentro de los rangos recomendados, la eficiencia de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de 78% estuvo muy próxima a la mínima permitida por la legislación brasilera vigente; la cantidad de Coliformes totales y fecales, así como las concentraciones de sólidos totales en el efluente sobrepasaron los valores permitidos; sin embargo, la concentración de sólidos sedimentables cumplió a cabalidad con la norma ambiental presentando valores menores a 1,0mL/L. Los resultados mostraron que la estación requiere control operacional y mantenimiento más efectivos. Se evidenció la necesidad de implementar un sistema de pos tratamiento que garantice la disminución de los impactos ambientales producidos por los efluentes y los riesgos a la salud pública tanto en la zona de descarga como aguas abajo del punto de vertimiento final.

Palabras clave: Aguas residuales urbanas; tratamiento; lagunas facultativas; monitoreo; salud pública

1. Ingeniero. Civil, M.Sc. y Ph.D. en Hidráulica y Saneamiento. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil Universidad Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira - Brasil. e-mail: tsunao@feis.unesp.br

2. Ingeniero. Civil, Esp. M.Sc. en Ingeniería Civil. Profesor Asistente del Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad de Nariño. e-mail: iaso@udenar.edu.co

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the situation of the Ilha Solteira's (SP) Sewage Treatment Plant (STP) in connection with its efficiency, sludge accumulation and possible effects on public health produced by the quality in the final effluent. The research consisted in the batimetric study of the facultative primary stabilization ponds and a 24 consecutive hours monitoring in which there were characterized the affluent, the effluents and the STP physical conditions, and the Station behavior in relation to the wastewater treatment was diagnosed. It was established that despite the fact that the effluent organic load was between the recommended levels, the Biochemical Oxygen Demand efficiency removal of 78% was very near to the minimum values allowed by the Brazilian current Legislation; the total and faecal Coliforms, and total solids concentrations at the effluent exceeded the permitted values. However, the settleable solids concentration achieved the environmental regulation with values lower than 1,0mL/L. The results indicated that the STP requires operational controls and more effective maintenance. It was showed the need to install a post treatment system that guarantees the reduction of the environmental impacts produced by the effluents and the public health risks in the discharge zone as well as in the downstream of the final dump point.

Keywords: Wastewater treatment facultative lagoons; monitoring; public health

INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización son tanques de baja profundidad construidos en tierra, donde las aguas residuales son tratadas por procesos naturales que involucran la participación de algas y bacterias. Es un proceso de tratamiento biológico simple, eficiente y de bajo costo, en el que la estabilización de la materia orgánica se logra por medio de oxidación bacteriológica (oxidación aeróbica o fermentación anaerobia) y/o reducción algal fotosintética. Ninguna energía externa, además de la originada por la luz solar, es requerida para la operación. KELLNER y PIRES,¹

Según Peña y Mara,² las lagunas de estabilización son usualmente el método más recomendable para tratamiento de aguas residuales (AR) de origen doméstico y municipal en países en vías de desarrollo. En lugares donde el clima es más favorable para su operación, las lagunas son opciones de bajo costo (usualmente la alternativa más económica), que requieren poco

mantenimiento, presentan alta eficiencia, y el tratamiento es totalmente natural y altamente sostenible.

Las condiciones hidráulicas y biológicas que toman parte en el proceso de tratamiento de las AR en lagunas de estabilización pueden ser afectadas por una serie de factores naturales no controlables.

Entre los factores naturales descritos por Uehara y Vidal,³ se encuentran fenómenos meteorológicos y variables intrínsecas a las condiciones locales como: los vientos, que aportan en la homogenización de la masa líquida, permiten mayor contacto del AR afluyente con los microorganismos existentes en las lagunas y ayudan a la movilidad de las algas productoras de oxígeno; la temperatura, que afecta la velocidad de la fotosíntesis y el metabolismo de las bacterias responsables por la depuración de las AR; las precipitaciones que pueden provocar dilución de las AR, disminución del tiempo de retención hidráulica (TRH), cambios súbitos en

la temperatura de la masa líquida, y arrastres de la población de algas, lo que altera el rendimiento de una laguna; la evaporación, que provoca una reducción de la altura de la lámina de agua hasta niveles no aconsejables para su operación, que propicia el desarrollo de vegetaciones emergentes y un menor TRH; y la radiación solar, manifestada en altas temperaturas e intensidades solares que contribuyen a la producción de oxígeno a través de la fotosíntesis.

Los factores físicos son aquellos que normalmente pueden ser controlados por el diseñador y que generalmente están contemplados en los proyectos de lagunas de estabilización; entre ellos se encuentran: El área superficial, en lagunas facultativas se requiere de gran área, pues la misma debe ser expuesta a la luz solar para que ocurra la fotosíntesis e intercambio superficial de oxígeno ya que al garantizar la fotosíntesis y el crecimiento de algas, se tiene una producción de oxígeno disuelto (OD) suficiente para suplir su demanda nocturna, von Sperling;⁴ la mezcla, cuando la distribución de AR en la laguna se hace de manera uniforme se optimiza el uso de su volumen, con ello se aproxima la detención real a la teórica prevista en el proyecto y se evita el surgimiento de corrientes preferenciales, cortos circuitos y zonas muertas.⁵

Según Silva y Mara,⁶ los dos más importantes factores que influyen el grado de mezcla en una laguna de estabilización son el viento y el calor; pues la mezcla minimiza la posibilidad de ocurrencia de cortos circuitos o de zonas estancadas, y asegura una razonable y uniforme distribución en el sentido vertical de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), las algas y por ende, del OD.

Entre los factores químicos cabe resaltar la importancia del pH, como indicador del medio líquido en las lagunas, pues éstas necesitan

de un medio ambiente ligeramente ácido o alcalino de acuerdo con el sistema para el cual hayan sido proyectadas. El pH elevado junto con otros factores como la radiación solar favorece la disminución o mortalidad de las bacterias entéricas.

Tipos de lagunas de estabilización

Los tipos de lagunas de estabilización generalmente descritas en la literatura son: Lagunas Anaerobias, Lagunas Facultativas y Lagunas de Maduración.

Lagunas Facultativas. Según von Sperling,⁷ estas lagunas son la variante más simple de los sistemas de lagunas de estabilización. Básicamente, el proceso consiste en la retención de las aguas residuales por un período de tiempo largo o suficiente para que se desarrollen los procesos naturales de estabilización de la materia orgánica (MO). Las principales ventajas de las lagunas facultativas están asociadas, por tanto, a la predominancia de los fenómenos naturales.

Algunos autores expresan que las lagunas facultativas presentan una profundidad que varía de 1,5 a 2,5m y TRH próximos a 10 días;⁸ 1,0 a 1,5m y TRH del orden de 20 días,⁹ y 1,0 a 2,0m y TRH, en torno de 15 a 35 días.¹⁰ Los menores TRH se adoptan en regiones donde la temperatura del líquido es más elevada, lo que reduce el volumen requerido.

El mecanismo de purificación de las AR en lagunas facultativas ocurre en tres zonas: zona anaerobia, zona aerobia y zona facultativa. En la parte superior de este tipo de lagunas existe una simbiosis entre algas y bacterias donde estas últimas degradan la MO utilizando el oxígeno producido por las algas para sintetizar su alimento y reproducirse. Los compuestos formados por la síntesis bacteriana son

utilizados por las algas como nutrientes, en la parte inferior los procesos son similares a los presentados en lagunas anaerobias.¹¹

El objetivo de este trabajo fue evaluar la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (ETAR) de Ilha Solteira (SP) con relación a su eficiencia en el tratamiento, acumulación de lodos y los posibles efectos en la salud pública producidos por la calidad del efluente final. La investigación consistió en la ejecución del levantamiento batimétrico de las lagunas de estabilización facultativas primarias que constituyen la ETAR, así como la toma de datos de parámetros como pH, OD, DBO, DBO filtrada, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Sedimentables (SSed), Sólidos Totales (ST), Fijos (STF) y Volátiles (STV), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Fijos (SSF) y Volátiles (SSV), Temperatura, Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF) de los afluentes y efluentes de cada unidad de tratamiento implantados en la ETAR durante 24 horas consecutivas.

Con base en los resultados obtenidos fue posible diagnosticar el comportamiento de la estación en el tratamiento de las AR en términos de remoción de MO; Coliformes; sólidos y formular las respectivas recomendaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este ítem se describirá la localización del municipio de Ilha Solteira y la ETAR de la ciudad con igual nombre, así como las metodologías y procedimientos adoptados en el levantamiento batimétrico y de los datos de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos investigados.

Ilha Solteira

El municipio de Ilha Solteira, situado en el noroeste del estado de São Paulo (Brasil), se

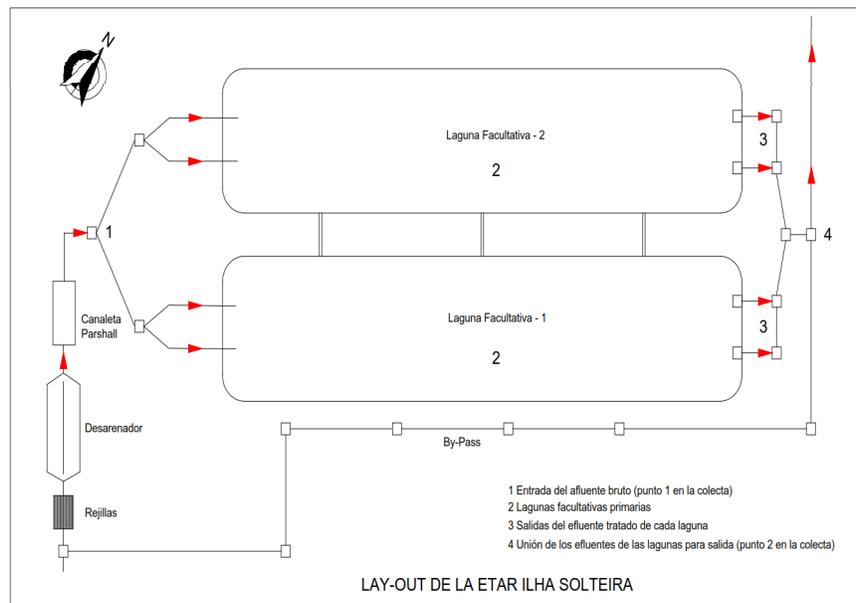
encuentra bañado al occidente por el río Paraná; al sur por el río Tietê; y hacia el centro por el río São José dos Dourados. Su capital, Ilha Solteira (longitud 51°06'35"W y latitud 20°38'44"S) está a una altitud de 347,36msnm; posee clima tropical tipo AW, con índice pluviométrico en torno de 1300mm anuales, y temperatura promedio anual de 28°C. La ciudad cuenta con aproximadamente 25.144 habitantes, según los datos del IBGE.¹²

ETAR de Ilha Solteira

La estación de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Ilha Solteira está localizada al oeste del núcleo urbano en las coordenadas: latitud 20°25'20,68"S y longitud 51°21'41,37"W, en un área denominada "Cinturón Verde", donde predominan pequeñas fincas de reposo. El sistema de tratamiento adoptado por la ETAR consiste en dos lagunas facultativas primarias, operadas en paralelo. Posee tratamiento preliminar con depósito (cesta de reja metálica) para recolección del material de mayor tamaño transportado por las aguas negras, una rejilla de barras paralelas con 25,4mm (0,0254m) de espaciamiento, desarenador de dos cámaras paralelas y una canaleta de medición de caudal tipo Parshall con garganta de 9" (0,2286m). El borde libre de las lagunas es de 0,6m y la cobertura superior de los taludes consiste en placas de concreto de 1,0m de longitud.

En el Gráfico 1. se presenta una vista en planta de la ETAR de Ilha Solteira, donde las dimensiones de las 02 unidades de tratamiento son 106m de ancho x 457m de largo y 1,14m de profundidad.

Gráfico 1. Vista en planta de la ETAR de Ilha Solteira con los puntos de muestreo



El Gráfico 2 presenta una foto satelital de la ETAR de Ilha Solteira donde se evidencian detalles del entorno de la misma así como la acumulación de lodos y espuma en la zona de entrada.

Gráfico 2. Vista superior de la ETAR de Ilha Solteira



Fuente: Google Earth, 2007

Levantamiento batimétrico

Se realizó el levantamiento batimétrico con la finalidad de verificar los perfiles de acumulación de sólidos sedimentados y estimar la cantidad de lodo acumulado en el fondo de las mismas así como el volumen útil disponible en cada unidad. Para ello se determinó en cada laguna 11 perfiles longitudinales a lo largo de cada una de las lagunas de estabilización, espaciados a cada 10 metros; de igual manera se levantaron datos para 33 perfiles transversales, los dos primeros en el sentido del flujo afluente espaciados a cada 5m, los 17 siguientes espaciados a cada 10m y los restantes a cada 20 metros, con excepción del último que conservó una distancia de 12m en relación al penúltimo; en total se realizaron las verificaciones y mediciones batimétricas para 363 puntos en cada laguna. El espaciamiento adoptado en los perfiles transversales se determinó con el propósito de identificar con mayor precisión la configuración de los lodos acumulados cerca de las zonas de entrada, más particularmente en el tercio inicial de la longitud total de la laguna donde es previsible una mayor acumulación de Sólidos Sedimentables ya que el líquido pasa de una zona de flujo turbulento a flujo laminar.

Los levantamientos batimétricos se realizaron con equipos especiales de medición de profundidad y consistencia del lodo acumulado y se mantuvo el alineamiento de los perfiles tanto longitudinales como transversales por medio de equipos ópticos, así como por medio del uso de una embarcación auxiliar. Los datos recopilados se almacenaron en planillas electrónicas para posterior compilación y utilización en la elaboración de los perfiles de deposición y en el cálculo de los volúmenes acumulados con programas de diseño asistido por computador (CAD).

Caracterización de los afluentes y efluentes

Los afluentes y los efluentes de la estación fueron monitoreados durante 24h para verificar

la variación de parámetros importantes en el funcionamiento de la misma. Este acompañamiento se realizó en la ETAR, por medio de la medición de 15 parámetros, a saber: Caudal, OD, pH, Temperatura, DQO, DBO, CT, CF, ST, STF, STV, SST, SSF, SSV, y SSed. Se realizaron muestreos del agua de hora en hora; las muestras se almacenaron en cajas de icopor, se refrigeraron y transportaron al laboratorio dentro del plazo de tolerancia estipulado para muestras sin preservación química.

Los muestreos se realizaron en los puntos 1 y 4, indicados en la gráfico 1. se utilizaron recipientes apropiados, libres de impurezas e interferentes para la muestra, y se almacenaron en frascos de polipropileno y de polietileno transparente para su transporte y eventual almacenamiento.

Las metodologías de análisis utilizadas en la determinación de los parámetros citados fueron las preconizadas por Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater,¹³ en las modalidades: analítica, colorimétrica y espectrofotométrica. Con base en lo anterior, algunas de las determinaciones de los parámetros citados se realizaron en campo con instrumentos portátiles y otras en el Laboratorio de Saneamiento del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de Ilha Solteira de la Universidade Estadual Paulista. Los datos obtenidos se almacenaron en planillas electrónicas para posterior compilación, confección de tablas y gráficos e interpretación de los resultados obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Batimetría de la ETAR de Ilha Solteira

El levantamiento batimétrico realizado en la ETAR fue fundamental para conocer las condiciones de funcionamiento de la estación antes de efectuar el monitoreo de los parámetros de calidad del agua. La batimetría permitió determinar los puntos de acumulación de

Las dos lagunas presentaron cerca de la tercera parte de su zona de entrada tomada por el lodo sedimentado, ello redujo drásticamente la profundidad de las lagunas en dicha zona, hasta tal punto que se observaron montículos de sólidos en la entrada del afluente. Este comportamiento; muy similar en las dos unidades de tratamiento, puede apreciarse en la parte media de la Figura 3, cuyos gráficos representan los perfiles obtenidos a partir de las secciones longitudinales L1, L5 y L9 de la Laguna 1 (laguna de la derecha según el sentido del flujo afluente).

El volumen total de lodo acumulado en las unidades de tratamiento se estimó del orden de 20.044m^3 en la laguna de la derecha, equivalente a cerca de $20'851.374\text{kg}$ de lodo húmedo, lo que representó un valor de altura media del lodo de $0,422\text{m}$. Por su parte, el volumen estimado de lodo acumulado en la laguna de la izquierda (Laguna 2) fue del orden de 22.865m^3 , equivalente a cerca de $23'321.916\text{kg}$ de lodo húmedo, que representa una altura media de lodo aproximada de $0,472\text{m}$. Las masas de lodos húmedos se calcularon con base en las densidades de lodo reportadas por Andreoli, von Sperling y Fernández.¹⁴

La concentración de los lodos acumulados se dio, como era previsible, principalmente en el tercio inicial de las lagunas conforme se indica en los perfiles longitudinales ya mencionados y los perfiles transversales c1 a c9 de la Laguna 1, ilustrados en la parte inferior del gráfico 3. Los perfiles transversales evidencian que la acumulación de los lodos puede generar caminos preferenciales del flujo, e inclusive cortos circuitos que afectan de manera significativa la eficiencia del sistema de tratamiento de las AR como lo reportado por Saraiva et al.¹⁵

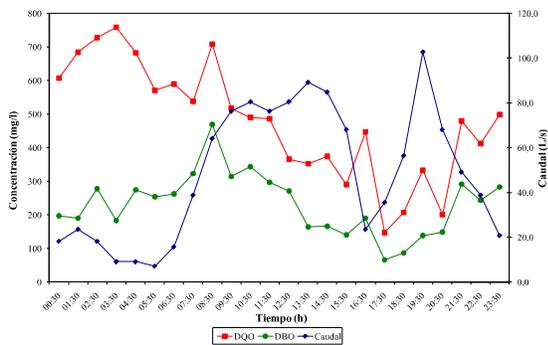
El grupo de perfiles transversales y longitudinales obtenidos pueden auxiliar en la planificación y remoción controlada de lodo de los puntos críticos de acumulación y de las obstrucciones existentes dentro de cada célula; así como también en la toma de decisiones de las medidas de acción pertinentes para cada caso. Las acumulaciones de lodo sugieren que las limpiezas del desarenador no se han realizado con la frecuencia determinada por el manual de operación de la ETAR -donde se recomienda el uso alternado de sus dos cámaras para facilitar la limpieza diaria de las mismas. Tal situación se comprobó con las consultas realizadas al operador de la estación quien afirmó que la operación de limpieza era esporádica y realizada con ayuda de maquinaria. Una operación alternada diariamente y una limpieza más frecuente de los desarenadores contribuirán en la preservación del sistema de tratamiento, disminuirán la formación de zonas muertas y caminos de flujo preferencial, y permitirán mantener por más tiempo el volumen efectivo de tratamiento de las lagunas de la ETAR de Ilha Solteira.

Caracterización del afluente y efluente de la ETAR Ilha Solteira

Con base en los 25 muestreos realizados en los dos puntos se caracterizaron las aguas residuales brutas del afluente y de los efluentes tratados de la estación de Ilha Solteira a partir de los 15 parámetros de control citados.

El gráfico 4 muestra la variación de la carga orgánica afluente, en términos de DBO y DQO, a la ETAR, así como la variación del caudal afluente a lo largo del período de 24 horas.

Gráfico 4. Variación del Caudal, DQO y DBO afluentes a la ETAR a lo largo de 24h



El diagrama de caudal obedece a la variación reportada en la literatura, con un valor medio ponderado estimado en 49,26L/s; o sea, un caudal diario de aproximadamente 4.434m³/d. El caudal a lo largo del periodo monitoreado tuvo una variación entre 7,2L/s (mínimo) y 102,7L/s (máximo). Como el volumen útil de cada laguna es de aproximadamente 55.200m³, lo que representa un volumen total de 110.400m³, se estima que el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de la ETAR fue de 24,9 días. Este tiempo puede ser considerado adecuado para una estación con lagunas facultativas primarias, normalmente proyectadas para TRH de 20 a 35d.

La concentración de la DBO afluente a la ETAR presentó variación entre 66mg/L y 469mg/L con promedio de 235mg/L, mientras que la concentración de la DQO varió entre 148mg/L y 758mg/L con un promedio de 424mg/L. De esta forma se puede verificar la relación DQO/DBO en torno de 2 como afirman autores como von Sperling;¹⁶ Metcalf & Eddy;¹⁷ y Uehara y Vidal.¹⁸

Los resultados anteriormente citados, junto con el levantamiento de los caudales, permitieron calcular la carga orgánica aplicada en la ETAR. Así, la carga diaria de DBO fue de 1043kgDBO/d; en términos de DQO, la carga afluente diaria fue de 1880kgDQO/d.

La carga superficial (CS) de las lagunas de estabilización facultativas primarias estudiadas, con área superficial de 96.800m² (9,68ha), puede considerarse como una CS baja (aproximadamente 107kgDBO/ha/d), en relación a los estándares establecidos para esta región del Estado de São Paulo por Kawai et al.,¹⁹ quienes definieron que lagunas de estabilización facultativas podrían ser proyectadas con CS de hasta 260kgDBO/ha/d. Por su parte, en el nordeste brasilero, en clima del semi-árido, la carga puede llegar hasta 460kgDBO/ha/d, según Silva & Mara.²⁰

Literatura más reciente,²¹ recomienda en regiones con invierno caliente y alta insolación, cargas entre 240 y 300kgDBO/ha/d. De esta manera, las lagunas en cuestión se encuentran con carga equivalente de regiones de invierno frío y de baja insolación, en que la carga debe estar entre 100 y 180kgDBO/ha/d, según este mismo autor.

El tabla 1 presenta un resumen con los valores promedio de los resultados obtenidos en el levantamiento de los parámetros analizados tanto para el afluente como para el efluente de la ETAR.

Tabla 1. Resumen de valores medios de las características de aguas residuales afluentes y del efluente de la ETAR de Ilha Solteira

| Parámetros | Afluente | Efluente |
|--------------------------------|----------|----------|
| OD (mg/L) | 7,1 | 10,76 |
| pH | 7,35 | 8,31 |
| Temperatura (°C) | 28,9 | 29,2 |
| DQO (mg/L) | 424 | 245,3 |
| DBO (mg/L) | 235 | 51,1 |
| Coliformes Totales (NMP/100mL) | 5,06E+07 | 3,35E+06 |
| Coliformes Fecales (NMP/100mL) | 5,13E+06 | 7,33E+05 |

| | | |
|--------------------------------------|-----|-------|
| Sólidos Totales (mg/L) | 409 | 311,2 |
| Sólidos Totales Fijos (mg/L) | 176 | 115,2 |
| Sólidos Totales Volátiles (mg/L) | 232 | 196 |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) | 169 | 139,2 |
| Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L) | 60 | 40 |
| Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L) | 109 | 99,2 |

En el efluente de la ETAR la variación de la DBO_{bruta} fue de 21 a 158mg/L, con un promedio estimado de 51mg/L, lo que lleva a una eficiencia de remoción promedio estimada en 78%, por debajo del porcentaje de remoción recomendado por el Decreto 8464 de 1976²² y próximo de la concentración máxima permisible de 60mg/L. Este resultado indica que deben tomarse cuidados especiales por parte de los operadores de la estación con el fin de aumentar la eficiencia del proceso; una alternativa para tal fin corresponde a la remoción de sólidos sedimentados principalmente en los tramos iniciales de las lagunas, que reducen el TRH, así como la mezcla y distribución apropiada del flujo.

La DQO del efluente varió entre 100 y 501mg/L con una media aritmética en torno de 245mg/L, valor también coherente con resultados reportados por la literatura especializada. La eficiencia media de remoción de la DQO fue del 42%; este valor, así como el de la remoción de la DBO son semejantes a los reportados por da Silva, de Souza y Araújo²³ también para lagunas facultativas primarias. De manera similar a lo manifestado para DBO, la remoción de lodos acumulados incrementará la eficiencia del sistema en términos de remoción de DQO al favorecer el flujo uniforme y la reducción o eliminación de zonas muertas y caminos preferenciales.

La concentración de OD varió en este levantamiento de 1,2 a 14,8mg/L en la entrada de la ETAR. Los altos valores registrados pudieron ser ocasionados por la sonda de medición, al haber estado programada con lectura instantánea, pues normalmente la concentración de OD esperada para aguas residuales brutas está entre 0,0 y 1,0mg/L. De la misma manera, la concentración de OD en el efluente varió de 7,4 a 18,7mg/L, lo que indicó alta producción de OD dentro de la laguna por la presencia de algas que realizan el proceso fotosintético. Las altas concentraciones en el efluente favorecen la preservación de los procesos biológicos normales en el cuerpo de agua receptor (Río Paraná).

El pH afluente siempre estuvo en torno de la neutralidad, varió de 7,2 a 7,8 con promedio de aproximadamente 7,4. En el efluente, los resultados indicaron que el pH fue alcalino, con valores que oscilaron entre 7,3 y 9,2, con promedio en torno de 8,3. Los valores de pH medidos estuvieron dentro del rango reportado por la literatura.

La temperatura del afluente de la ETAR osciló entre 27,5 a 29,9°C; mientras que en el efluente varió de 28,1 a 34,8°C, debido a la alta insolación característica de la región donde se encuentra la estación estudiada. En términos de temperatura media, la variación entre el afluente y el efluente fue de apenas 0,3°C, cuyos valores fueron de 28,9 °C y 29,2°C, respectivamente.

En los exámenes bacteriológicos se registraron valores de NMP que variaron de $2,00 \times 10^6/100\text{mL}$ a $9,90 \times 10^8/100\text{mL}$ y de $1,00 \times 10^5/100\text{mL}$ a $8,70 \times 10^6/100\text{mL}$ de Coliformes Totales tanto en el afluente como en el efluente. Además hubo una variación de NMP de $1,77 \times 10^3/100\text{mL}$ a $2,00 \times 10^8/100\text{mL}$ y de $8,80 \times 10^4/100\text{mL}$ a $3,70 \times 10^6/100\text{mL}$ de Coliformes Fecales en el afluente y el efluente de la ETAR, respectivamente. Los valores de Coliformes Fecales en el efluente pueden considerarse como altos para el lanzamiento o disposición

final del líquido tratado, pues el valor mínimo está muy próximo de 04log (10000CF/100mL), mientras que la norma brasilera recomienda que el NMP/100mL se encuentre siempre por debajo de 03log (1000CF/100mL). Tales cantidades de Coliformes en el efluente final representan implicaciones importantes en cuanto a la afectación de la calidad del agua del cuerpo receptor, principalmente al considerar que la zona aguas abajo del punto de lanzamiento corresponde a un lugar ocupado por fincas de descanso, donde en algunas de ellas se practica la pesca de especies nativas; se destinan espacios para el cultivo de hortalizas; o se practica la natación.

En cuanto a los Sólidos Totales, el aporte de ST en el afluente osciló entre 140 y 580mg/L con promedio de 409mg/L, divididos entre 40 a 280mg/L de STF con promedio de 176mg/L y de 80 a 440mg/l de STV con promedio de 232mg/L. Por su parte, en el efluente los ST oscilaron de 110 a 460mg/L con promedio de 311mg/L, divididos entre 30 a 240mg/L de STF (promedio de 115mg/L) y de 80 a 420mg/L de STV (promedio de 196mg/L). Por estos resultados, en el balance de masa sólida de las lagunas se aprecia que existe acumulación de sólidos dentro de las mismas, independiente de la estabilización de la MO que ingresa al sistema de tratamiento, ya que la concentración de sólidos en el efluente es menor que en el afluente. Sin embargo, y tal como se apreció en la fotografía satelital y en los perfiles batimétricos, la excesiva acumulación de sólidos en la zona aledaña a la entrada del afluente desfavorece el comportamiento hidráulico de la laguna al disminuir su capacidad de remoción de sólidos.

Respecto a los SST, en el afluente la oscilación fue de 80 a 280mg/L, con promedio de 169mg/L; divididos entre SSF, 20 a 120mg/L (promedio de 60mg/L), y SSV de 40 a 220mg/L (promedio de 109mg/L). En el efluente, se registró SST entre 40 y 340mg/L, divididos entre SSF, 20 a

120mg/L (promedio de 40mg/L) y SSV de 20 a 280mg/L (promedio de 99mg/L). Los resultados mostraron que hubo mayor descarga de SST en el efluente que el valor aportado en el afluente de la ETAR, esta variación puede ser atribuida a la producción celular de microorganismos en las lagunas de estabilización facultativas primarias, especialmente de algas que son arrastradas hacia el efluente final pues la captura de dicho efluente se realiza de manera superficial donde se localizan principalmente tales algas.

Por otro lado, el parámetro de control normativo se enfoca a la presencia de Sólidos Sedimentables en el efluente de ETARs, cuyo valor máximo admisible es de 1,0mL/L en el ensayo en cono de Imhoff.^{24,25} A pesar de la concentración elevada de SST presentada, la oscilación de los Sólidos Sedimentables permaneció entre >0,01 y 0,50mL/L, lo que mostró que en términos de este parámetro, el efluente de la estación estuvo dentro del límite recomendable.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos durante el monitoreo se puede diagnosticar que la ETAR evidenció problemas operacionales principalmente debidos a falta de mantenimiento adecuado del sistema de tratamiento. Particularmente se puede concluir que:

- Por la batimetría realizada, existe una gran acumulación de lodo, para cada laguna en torno de 20.000m³, principalmente localizados en el primer tercio de las lagunas.
- La rutina de operación del desarenador debe ser replanteada, ya que debe realizarse limpieza diaria de la cámara de retención de arena, lo que evita la acumulación de lodo y el taponamiento de sectores de las lagunas.
- La ausencia de registro diario de parámetros esenciales como caudal, pH, Temperatura y OD, dificultan el acompañamiento de la evolución del tratamiento de la ETAR.

- Los fuertes olores en el tercio inicial de las lagunas son producidos por la acumulación de lodo y arena hasta zonas muy próximas a la superficie de las mismas, lo que impide la solubilización de los gases por la lámina de agua que debería existir sobre la capa anaerobia.
- La presencia de espumas en diversas partes de la laguna puede provenir de la gruesa capa anaerobia existente principalmente en zonas cercanas a la entrada del afluente de las lagunas, pues tales espumas se desprenden cuando hay inversión térmica o por la excesiva producción de gas en dicha capa.
- El efluente estudiado en el monitoreo no alcanzó el porcentaje mínimo de remoción exigido por la Legislación Estatal en términos de concentración de DBO, pues permaneció ligeramente por debajo del 80% exigido (promedio de 78%).
- Los valores de Coliformes Fecales en el efluente son muy altos para el lanzamiento o disposición final del líquido tratado, pues el valor mínimo registrado fue próximo a 10000 CF/100mL y la norma brasilera recomienda que el NMP/100mL se encuentre siempre por debajo de 1000. Este hecho afecta significativamente la calidad del agua del cuerpo receptor ya que aguas abajo del punto de lanzamiento, hay fincas de descanso, donde se practica la pesca de especies nativas; se cultiva hortalizas; o se practica la natación.

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que además de labores correctivas del actual sistema, existe la necesidad de efectuar pos-tratamiento del efluente final de las lagunas facultativas primarias, de esta manera lograr minimizar los impactos que la disposición final causa en el cuerpo de agua receptor que recibe la descarga de la ETAR de Ilha Solteira.

RECOMENDACIONES

Para la ETAR de Ilha Solteira se recomienda:

- Remoción de los lodos acumulados en el tercio de la entrada a las lagunas facultativas, donde los bancos de detritos son visibles y una gruesa capa de espuma ha ocupado dicha área. Tal remoción favorecerá el comportamiento hidráulico e incrementará la eficiencia del tratamiento.
- Adecuación o ajuste de los dispositivos de salida de la laguna para que el efluente se capture de manera sumergida y así evitar la pérdida de la capa supersaturada de OD durante el día que puede inducir a las lagunas a permanecer anóxicas o anaerobias durante la noche y perjudicar de esta manera la actividad de los organismos aerobios.
- Implementación de un contingente efectivo en la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento para que sean realizadas con eficiencia las rutinas operacionales básicas y se implemente el mantenimiento de anotaciones diarias para montar un archivo histórico del funcionamiento de la ETAR, fundamental en el mantenimiento de la calidad del efluente tratado y de la protección del medio ambiente.
- Como opciones específicas para mejorar el desempeño del sistema y disminuir los problemas de salud pública que pueden producir sus efluentes podría ser: la introducción en parte de la laguna facultativa de una unidad anaerobia con cobertura para retener los gases; la implementación de un reactor anaerobio del tipo UASB; adoptar un sistema de separación físico química para remoción de los sólidos sedimentables.
- Como opción para disminuir la cantidad de Coliformes presentes en el efluente en caso de disponer del área suficiente podría implementarse una laguna de maduración

ya que la insolación en la zona es bastante elevada.

- Finalmente es importante recalcar la importancia del mantenimiento periódico de la ETAR para conservar condiciones de limpieza e higienización, pues su descuido podría convertirla en un foco de proliferación de malos olores y de vectores de enfermedades que afecten la salud de la población, además de causar daños ambientales, que perjudiquen a las comunidades aguas abajo de la descarga del efluente final.

REFERENCIAS

1. Kellner, E.; Pires, E. C. Lagoas de estabilização-projeção e operação. Rio de Janeiro: ABES, 1998. Pp 13-17, 28-36, 48-59.
2. Peña V. M.; Mara, D. Waste stabilisation ponds. IRC International Water and Sanitation Centre. The Netherlands. 2004. 37p.
3. Uehara, M.Y., Vidal, W.L. Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Série manuais, ed. CETESB, São Paulo, 1989, 91p.
4. von Sperling, M. Lagoas de estabilização - princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.3. 2ª Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009. 196p.
5. Uehara, M.Y., Vidal, W.L. Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Série manuais, ed. CETESB, São Paulo, 1989, 91p.
6. Silva, S. A.; Mara, D. D. – Tratamentos biológicos de águas residuárias: Lagoas de estabilização, ed. ABES, Rio de Janeiro, 1976, 140p.
7. von Sperling, M. Lagoas de estabilização - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.3. 2ª Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009. 196p.
8. Yañez, F. C. , Lagunas de Estabilización. Teoría, diseño y mantenimiento. ETAPA, Cuenca, Ecuador, 1993. 421p.
9. Kellner, E.; Pires, E. C. Lagoas de estabilização-Projeção e Operação. Rio de Janeiro: ABES, 1998. Pp 13-17, 28-36, 48-59.
10. Uehara, M.Y., Vidal, W.L. Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Série manuais, ed. CETESB, São Paulo, 1989, 91p.
11. Peña V. M.; Mara, D. Waste Stabilisation ponds. IRC International Water and Sanitation Centre. The Netherlands. 2004. 37p.
12. IBGE, 2007. Estimativas de população censo 2007. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponible en internet URL:http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2009/POP_2009_TCU.pdf
13. APHA, AWWA & WPCF. "Standard methods for the examination of water and wastewater". 18th ed. public heart association Inc. New York, 1998.
14. Andreoli, C. V.; von Sperling, M.; Fernandes, F. Lodo de Esgotos: Tratamento e disposição final. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484p.
15. Saraiva, L. B.; Meneses, C. G. R.; Melo, H. N. S.; Araújo, A. L. C. Lagoa facultativa primaria no nordeste do Brasil: interferência da sedimentação e do acúmulo de lodo na eficiência de remoção da matéria orgânica. In: 8th IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilization Ponds. Belo Horizonte, 2009.
16. von Sperling, M. Lagoas de Estabilização - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.3. 2ª Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009. 196p.
17. Metcalf & Eddy. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse, metcalf & eddy Inc. 3ª ed., 1991, 1334p.
18. Uehara, M.Y., Vidal, W.L. Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Série manuais, ed. CETESB, São Paulo, 1989, 91p.
19. Kawai, H.; Yano, T.; Rocha, M. J. M.; Limas, A.; Scheneiderman, B. Estabelecimento de criterios para dimensionamento de lagoas de estabilização. Revista DAE, São Paulo, SABESP 41 (127) 37-45, dez. 1981.
20. Silva, S. A.; Mara, D. D. – Tratamentos biológicos de águas residuárias: Lagoas de estabilização, ed. ABES, Rio de Janeiro, 1976, 140p.
21. Von Sperling, M. Lagoas de estabilização - princípios do tratamento biológico de águas

- Residuárias, v.3. 2ª Edição ampliada. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009. 196p.
22. São Paulo. Decreto Estadual nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Disponível em internet URL: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf>
23. da Silva, F. J. A.; de Souza, R. O.; Araújo, A. L. C. Revisiting the influence of loading on organic material removal rates in primary facultative ponds. In: 8th IWA Specialist group conference on waste stabilization ponds. Belo Horizonte, 2009.
24. São Paulo. Decreto Estadual nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do Meio Ambiente. Disponível em internet URL:
25. Brasil. Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em internet URL: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>.