

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de ILHA Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias

Performance evaluation of the ILHA Solteira's city (SP) sewage treatment plant by primary facultative ponds

Iván Andrés Sánchez Ortiz*
Universidad de Nariño (Colombia)

Tsunao Matsumoto**
Universidade Estadual Paulista (Brasil)

* M.Sc. en Ingeniería Ambiental y Recursos Hídricos de la UNESP. Profesor Asistente del Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad de Nariño, Pasto (Colombia). iaso@udenar.edu.co.

** Ph.D. en Hidráulica y Saneamiento de la USP. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil Universidad Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira (Brasil). tsunao@feis.unesp.br.

Correspondencia: Iván Andrés Sánchez Ortiz, Universidad de Nariño, Departamento de Recursos Hidrobiológicos. Ciudad Universitaria Torobajo, Carrera 22 No.18-109, Pasto, Nariño (Colombia). Tel.: (032) 7311449, Ext. 239

Subvenciones y apoyos. Resultados del proyecto Acompanhamento da Tratabilidade do Esgoto Doméstico das Estações de Tratamentos dos Serviços Autônomos de Água e Esgoto da Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados. Processo FEHIDRO 413.

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el desempeño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ilha Solteira-SP durante las diferentes épocas climáticas del año. Se realizó un levantamiento batimétrico de las lagunas facultativas primarias, un monitoreo de 24 horas y el seguimiento de su desempeño en 3 etapas de colecta de 3 meses de duración cada una. La planta tuvo cerca del 40% de su volumen efectivo ocupado por lodos; el efluente final registró una eficiencia media de remoción de la DBO de 80,2%; únicamente 3 muestras reportaron valores de NMP de Coliformes Fecales menores al tope de 1000/100mL definidos por la legislación; en la tercera etapa, los valores de sólidos sedimentables superaron el límite permisible de 1,0 mL/L. La mayor parte del tiempo y pese a las variaciones climáticas, la planta cumplió con la normatividad ambiental brasilera en términos de remoción de DBO y sólidos sedimentables, pero transgredió la norma en cuanto a NMP de Coliformes Fecales, evidenciando la necesidad de implementar un sistema de pos tratamiento que reduzca los eventuales impactos ambientales producidos por los efluentes y los riesgos a la salud pública en la zona de descarga y aguas abajo del vertimiento.

Palabras clave: Eficiencia de remoción, lagunas facultativas primarias, legislación ambiental brasilera, monitoreo, tratamiento de aguas residuales.

Abstract

The main objective of this research was to evaluate the performance of IlhaSolteira-SP Sewage Treatment Plant during the different yearly climatic seasons. A bathymetric survey of the primary facultative lagoons, a 24-hour monitoring and the tracking of its performance in 3 stages of collection of 3-month long each were conducted. The plant had almost 40% of its effective volume occupied by sludge; the final effluent registered an average BOD removal efficiency of 80,2%; only 3 samples reported values of MPN of Faecal Coliforms under the limit of 1000/100mL defined by legislation; in the third stage, the effluent recorded settleable solid values above the permissible limit of 1,0 mL/L. Most of the time and despite of the climate variations, the plant met the Brazilian environmental regulations in terms of BOD removal and settleable solids, but infringed the regulations in terms of the MPN of fecal coliforms, making the need to set up a post-treatment system to reduce the eventual environmental impact caused by the effluents and the risks to public health in the discharge area and downstream the dumping final point evident.

Keywords: Brazilian environmental legislation, monitoring, primary facultative lagoons, removal efficiency, waste water treatment.

Fecha de recepción: 11 de marzo de 2012
Fecha de aceptación: 15 de agosto de 2012

1. INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización (LE) son sistemas de tratamiento relativamente fáciles de construir y operar, capaces de asimilar grandes variaciones en el flujo de aguas residuales (AR), que pueden proporcionar eficiencias de tratamiento similares a las producidas por sistemas convencionales (generando un efluente altamente purificado) a un costo muy inferior [1].

Las LE se proyectan para el tratamiento de AR por medio de la interacción de biomásas (algas, bacterias, protozoarios, entre otros) como grandes reservorios dentro de los cuales las AR fluyen, saliendo después de un período de retención definido, contando únicamente con los procesos naturales de purificación biológica que ocurren en cualquier cuerpo natural de agua. Para su operación no se requiere ninguna energía externa, además de la originada por la luz solar [2].

Las LE son usualmente el más apropiado método de tratamiento de AR de origen doméstico y municipal en países en vías de desarrollo; son opciones de bajo costo, que requieren poco mantenimiento y presentan alta eficiencia, por medio de mecanismos naturales y altamente sostenibles [3]. Los sistemas de tratamiento por LE suelen definirse como una única serie de lagunas anaerobias, facultativas y de maduración, o varias series de unidades en paralelo [3], [4]. Las lagunas pueden clasificarse por su estado aeróbico y la fuente del oxígeno para la asimilación bacteriana de la materia orgánica (MO) de las AR [5]. Los principales tipos de lagunas son: aerobias, facultativas, de mezcla parcial, aireadas y anaerobias.

Las condiciones hidráulicas y biológicas involucradas en el proceso de tratamiento de las AR a través de las lagunas de estabilización pueden ser afectadas por una serie de factores físicos o químicos. Algunos de ellos se tienen en cuenta en el proyecto y otros, por su naturaleza incontrolable, deben considerarse con criterio ingenieril para minimizar su interferencia Uehara & Vidal [6]. Los factores naturales no controlables están representados por los fenómenos meteorológicos y por variables intrínsecas a las condiciones locales, tales como viento, temperatura, radiación solar, precipitación y evaporación. Los factores físicos son controlados por el diseñador en los proyectos de LE, entre ellos están el área superficial, la profundidad y el tiempo de retención hidráulica.

Los factores químicos, tales como el pH, la alcalinidad y sustancias tóxicas, son indicadores del estado de funcionamiento de las lagunas de estabilización [6].

Existen dos tipos de LE facultativas: lagunas facultativas primarias, que reciben el agua residual cruda (después de un tratamiento preliminar) y las lagunas facultativas secundarias, que reciben el agua residual después de un proceso de sedimentación (usualmente el efluente de lagunas anaerobias, donde además de la sedimentación se producen complejos procesos de digestión anaerobia de los lodos resultantes) [7].

En las lagunas facultativas el tratamiento consiste en la retención de las AR por un período de tiempo lo suficientemente largo para que se desarrollen los procesos naturales de estabilización de la MO [8]. Sus principales ventajas y desventajas están asociadas a la predominancia de los fenómenos naturales, cuyo mecanismo de purificación de las AR ocurre en tres zonas: una anaerobia, una aerobia y una facultativa. Este tipo de lagunas presentan profundidades y tiempos de retención hidráulica (TRH) del orden de: 1,5 a 2,5 metros (m) y 10 días (d) [9]; 1,0 a 1,5m y 20d [2]; 1,0 a 2,0m y 15 a 35d [6].

El principal objetivo de esta investigación fue la determinación de la variabilidad en el desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Ilha Solteira, estado de São Paulo (Brasil), conformada por lagunas facultativas primarias bajo las diferentes condiciones climáticas anuales, para monitorear la capacidad de asimilación por parte del sistema de tratamiento de la variación de concentraciones y verificar si las eficiencias de remoción de los parámetros de control de calidad del agua en la planta se ajustan a las directrices establecidas por la legislación ambiental brasilera.

Con base en los resultados obtenidos, se formularon recomendaciones relacionadas con la operación y el mantenimiento de la planta y se definieron posibles opciones de tratamiento complementarias que le permitan a la PTAR cumplir con los estándares de vertimiento de efluentes definidos por la legislación ambiental brasilera.

2. METODOLOGÍA

Localización de la PTAR

La ciudad de Ilha Solteira se ubica en el noroeste del estado de São Paulo dentro de la cuenca del río São José dos Dourados, a una altitud de 347,36 msnm, longitud 51°06'35"W y latitud 20°38'44"S. Según la clasificación de Koeppen, el clima de la ciudad es de sabana tropical (tipo Aw), con lluvias de verano y sequía de invierno, precipitaciones medias de 1309 mm anuales y temperatura promedio anual de 24,8°C [10].

La PTAR del municipio de Ilha Solteira se encuentra en la margen izquierda del río Paraná, aguas abajo de la represa hidroeléctrica, en las coordenadas: latitud 20°25'20,68"S y longitud 51°21'41,37"W, en un área denominada "Cinturón Verde", con predominio de pequeñas fincas de reposo. La planta consta de dos lagunas facultativas primarias operadas en paralelo, posee tratamiento preliminar con depósito para recolección del material de mayor tamaño, una rejilla de barras paralelas con espaciamiento de 1", desarenador con dos cámaras paralelas y una canaleta Parshall para medición de caudal con abertura de garganta de 9"; la salida del efluente de cada laguna se realiza por medio de sistemas *stop-log* que propician la captura del líquido superficial. La ubicación de las unidades de pretratamiento y de las lagunas, así como la secuencia de los flujos del AR, se puede apreciar en la figura 1.

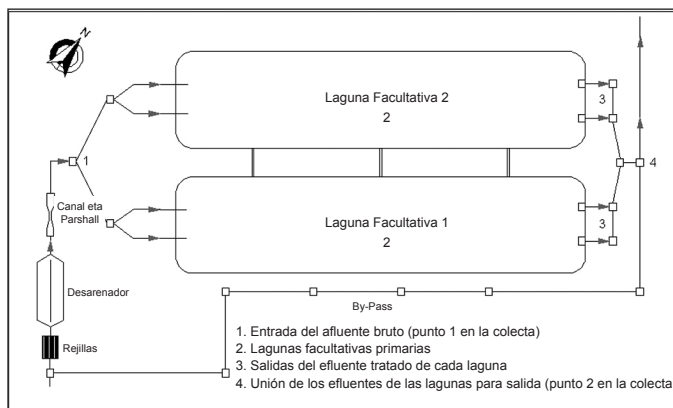


Figura 1. Esquema de la PTAR de Ilha Solteira

Levantamientos preliminares

Previo al estudio en mención y con el fin de disponer de información que contribuyera a evaluar el desempeño de la estación, se ejecutó un levantamiento batimétrico de las unidades de tratamiento y un monitoreo de 24 horas consecutivas del afluente crudo y del efluente de la planta, con el propósito de determinar los perfiles de acumulación de lodos en las lagunas y caracterizar la variación del caudal así como algunos parámetros de calidad del agua a lo largo de un día promedio.

- *Caracterización de los afluentes y efluentes*

Se monitorearon durante 24 horas consecutivas el afluente y el efluente de la PTAR, mediante la medición de 14 parámetros a saber: caudal; pH; Temperatura (T); demanda química de oxígeno (DQO); demanda bioquímica de oxígeno (DBO); número más probable (NMP) de coliformes totales (CT) y fecales (CF); sólidos totales (ST), fijos (STF) y volátiles (STV); sólidos suspendidos totales (SST), fijos (SSF) y volátiles (SSV); y sólidos sedimentables (SSed). Se tomaron muestras cada hora en los puntos 1 y 4 (figura 1) mediante recipientes libres de impurezas; se dispusieron en frascos de polipropileno y de polietileno transparente; se almacenaron en cajas de icopor refrigeradas y se transportaron al laboratorio en el plazo de tolerancia estipulado para muestras sin preservación química. Las metodologías de análisis para la determinación de los parámetros fueron las preconizadas por APHA et al. [11], en las modalidades: analítica, colorimétrica y espectrofotométrica.

- *Batimetría*

El levantamiento batimétrico se realizó con ayuda de equipos para medición de profundidad y consistencia del lodo acumulado, según lo descrito por Gonçalves [12]; de igual manera, se utilizaron equipos ópticos para mantener el alineamiento de los ejes transversales y longitudinales y una embarcación auxiliar. Los datos colectados se digitalizaron y se usaron para el trazado de los perfiles de acumulación de lodo y el cálculo de los respectivos volúmenes acumulados por medio de programas de diseño asistido por computador.

Monitoreo

El monitoreo se ejecutó en 3 etapas de colecta de 3 meses por período de investigación. La primera etapa se ejecutó en el período de lluvias (diciembre a febrero del primer año); la segunda etapa en el período de sequía (mayo a julio del segundo año); y la tercera etapa durante el inicio del período de lluvias (agosto a octubre del tercer año). El programa de monitoreo consistió en realizar, por lo menos dos veces por mes, el levantamiento de datos de los siguientes parámetros: pH, oxígeno disuelto (OD), DBO, DBO filtrada, DQO, SSed, ST, STF, STV, SST, SSF, SSV, nitrógeno amoniacal total (NAT), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), T, NMP de CT y NMP de CF de los afluentes y efluentes de la PTAR. El pH, el oxígeno disuelto y la temperatura se midieron en campo con instrumentos portátiles, el resto de parámetros se midieron en el Laboratorio de Saneamiento del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira. Los puntos de muestreo y las metodologías de análisis conservaron las mismas condiciones del levantamiento preliminar.

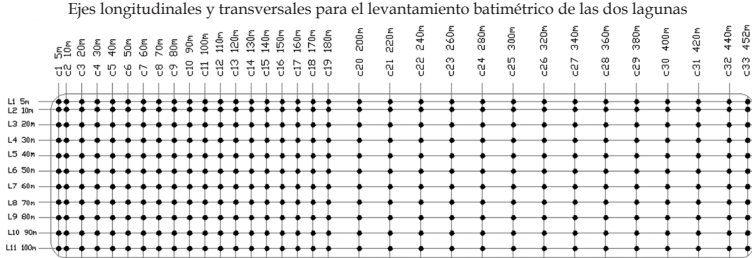
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Batimetría de la PTAR de Ilha Solteira

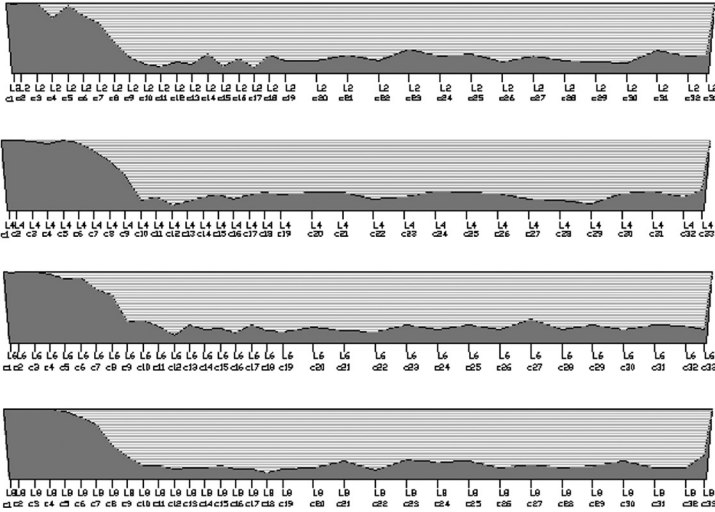
Cada laguna facultativa primaria de la planta tiene 106m de ancho; 457m de longitud; y profundidad media de 1,14m. El área aproximada del sistema de lagunas es de 96.800m² y el volumen total estimado es de 110.000m³. La figura 2 representa esquemáticamente la disposición de los 11 ejes longitudinales, los 33 ejes transversales utilizados, y los 363 puntos verificados en cada una de las lagunas.

Las dos unidades de tratamiento presentaron cerca de la tercera parte de su porción de entrada tomada por el lodo sedimentado, con una reducción importante de la profundidad en puntos donde inclusive se verificó la presencia de montículos superficiales. La parte media de la figura 2 ilustra esta situación en los perfiles de las secciones longitudinales L2, L4, L6 y L8; la parte inferior de dicha figura esquematiza los perfiles transversales C1, C4, C7, C8, C9 y C10 de la Laguna 2. Tal acumulación de

lodos produce caminos de flujo preferencial y zonas muertas que afectan significativamente la eficiencia de la PTAR, pues modifican las condiciones contempladas en el proyecto en cuanto al TRH del líquido a ser tratado.



Ejemplo de perfiles longitudinales en la batimetría de la Laguna 2



Ejemplo de perfiles transversales en la batimetría de la Laguna 2

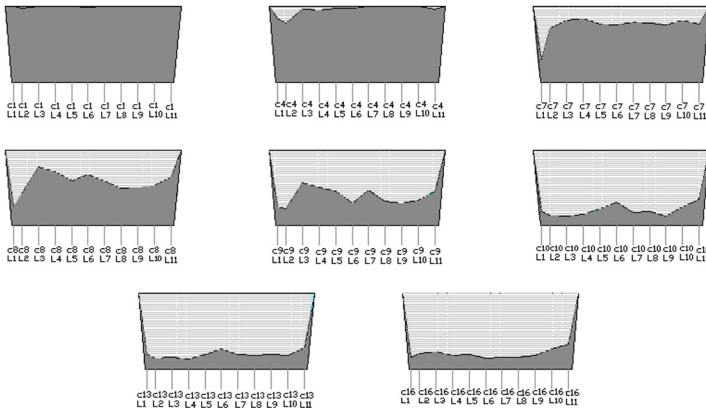


Figura 2. Detalles de los perfiles batimétricos de la PTAR de Ilha Solteira

La disposición de los tubos de entrada por medio de una tee que descarga el líquido afluente con flujo descendente, ha contribuido a la sedimentación de los sólidos, con tendencia a localizarse en la zona próxima a la entrada, según lo reportado por Alvarado et al. [13], como se aprecia en la figura 2. La acumulación de los lodos a lo largo del tiempo cambia la topología interna de la laguna y afecta los patrones de flujo de manera negativa, pues puede crear zonas muertas y caminos de flujo preferencial.

El volumen de lodo acumulado para la Laguna 1 se estimó del orden de 20.044 m³, equivalentes a cerca de 20'851.374 kg de lodo húmedo, representando una altura media de material de 0,42 m y una reducción del 36,3% de su volumen efectivo. El volumen de lodo estimado para la Laguna 2 fue de 22.865 m³, equivalente a cerca de 23'321.916 kg de lodo húmedo, representando una altura media de material de 0,47 m para una reducción de 41,4% de su volumen efectivo. Para la estimación de la masa de lodo húmedo se utilizaron los valores de densidades reportados por Andreoli et al. [14].

Con base en el volumen de lodos acumulado y considerando que para la fecha de ejecución del estudio batimétrico la PTAR completaba 9 años de trabajo continuo, y que según el censo del año 2000 la población de Ilha Solteira fue de 23.996 habitantes [15], la producción media de lodo per cápita fue del orden de 0,198m³/hab.año, valor que superó las cantidades reportadas por autores como von Sperling y Gonçalves [16], Alvarado et al. [13] y Gonçalves et al. [17] y los valores recomendados por el CEPIS [18] para diseño de lagunas facultativas.

El grupo de perfiles transversales y longitudinales obtenidos son útiles para la planificación del mantenimiento de las lagunas en cuanto a la remoción controlada de lodo en los puntos críticos de acumulación que existen en cada célula.

Caracterización del afluente y efluente

Con base en los 25 muestreos realizados en los dos puntos antes descritos, se caracterizaron el afluente y el efluente tratado de la PTAR a partir de los 14 parámetros de control citados. La figura 3 muestra la variación de la DBO, DQO y el caudal a lo largo del período de 24 horas.

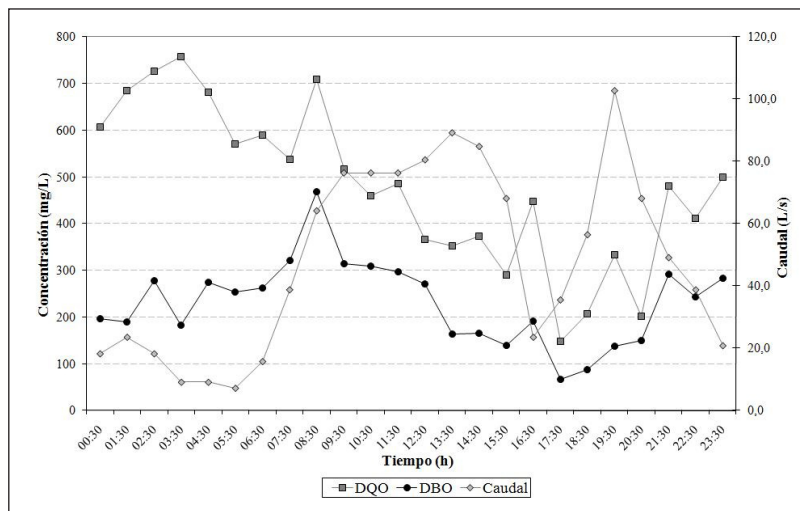


Figura 3. Variación del Caudal, DQO y DBO afluentes a la PTAR a lo largo de 24h

El caudal afluente reportó un valor promedio calculado de 49,26L/s, para un valor diario de aproximadamente 4.434m³/d. Debido a la acumulación de lodos anteriormente comentada, el volumen útil de cada laguna -cuyo valor calculado fue de cerca de 55.200m³- se redujo en la Laguna 1 a aproximadamente 35.156m³ y en la Laguna 2 a 32.335m³; para tales condiciones y con base en el caudal promedio se estima que el TRH de la PTAR fue de 15,2 días.

La concentración de la DBO afluente a la PTAR varió entre 66mg/L y 469mg/L con promedio de 235,3mg/L; la DQO varió de 148mg/L a 758mg/L con promedio de 424mg/L. La relación DQO/DBO estuvo en torno de 2, como lo afirman diversos autores [8], [19] y [6].

Con los caudales y las concentraciones de DBO y DQO afluentes se estimó que la carga diaria aplicada de DBO fue 1.043kgDBO/d, y la carga de DQO de 1.880kgDQO/d. La carga superficial (CS) de las lagunas con área de 9,68 hectáreas (ha) fue de 107kgDBO/ha.d, presentando un valor bajo frente a los estándares establecidos para esta región del estado de São Paulo por Kawai et al. [20], quienes recomiendan proyectar lagunas facultativas con CS de hasta 260kgDBO/ha.d. De igual manera, las cargas calculadas se encuentran por debajo del promedio reportado por Oliveira y von

Sperling [21] en su estudio de 73 lagunas facultativas primarias en el territorio brasileiro.

La tabla 1 presenta los valores medios de los parámetros analizados en la PTAR.

Tabla 1
Valores medios de las características de las AR afluentes y efluentes

Parámetros	Afluente	Efluente
pH	7,3±0,2	8,3±0,5
Temperatura (°C)	28,9±0,7	29,2±2,9
DQO (mg/L)	424,0±168,5	245,3±82,7
DBO (mg/L)	235,3±90,2	51,1±27,5
Coliformes Totales (NMP/100mL)	5,06E+07±3,09E+08	3,35E+06±2,56E+06
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	5,13E+06±3,92E+07	7,33E+05±7,43E+05
Sólidos Totales (mg/L)	409,0±125,5	311,2±116,8
Sólidos Totales Fijos (mg/L)	176,0±75,8	115,2±58,3
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	232,0±72,5	196,0±87,7
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	169,2±61,1	139,2±85,2
Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L)	55,6±26,8	40,0±26,6
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	108,6±47,8	99,2±70,1

Bajo las condiciones anteriormente citadas, la eficiencia media de remoción de DBO estimada fue del 78%, inferior al valor mínimo recomendado por la legislación estatal del 80% para DBO total [22]; la concentración media de DBO efluente fue próxima a la máxima permitida de 60mg/L, definida por el mismo Decreto. Una alternativa para mejorar la eficiencia del proceso es la remoción de sólidos, principalmente en los tramos iniciales de las lagunas, los cuales reducen el TRH y desfavorecen la mezcla y distribución apropiada del flujo; tal acción propiciaría un flujo más uniforme, la reducción de zonas muertas y caminos preferenciales e incrementaría la eficiencia de remoción de DQO, cuya concentración varió entre 100 y 501mg/L.

El valor medio de CF de 7,33E+05 en el efluente fue muy elevado para su vertimiento o disposición final, pues la norma brasilera recomienda que el NMP/100mL sea menor a 1000 [23].

Con los valores medidos de ST, STF y STV, al realizar el balance de masa sólida de las lagunas se verifica que hubo acumulación de sólidos dentro de las mismas, pues las concentraciones en el efluente fueron menores que en el afluente.

Las concentraciones de SST en el afluente oscilaron desde 80 a 280mg/L; divididos entre SSF, de 20 a 120mg/L, y SSV de 40 a 220mg/L; en el efluente, se registraron SST entre 40 y 340mg/L, con SSF entre 20 y 120mg/L y SSV de 20 a 280mg/L. Los altos valores del efluente pueden explicarse por la producción celular de microorganismos en este tipo de lagunas, especialmente de algas arrastradas por el efluente final debido al tipo de sistema de salida implementado en las lagunas de la PTAR.

En relación con los S. Sed en el efluente, cuyo valor máximo recomendado en el ensayo en cono Imhoff durante una hora es de 1,00mL/L [22], [23], se registraron valores entre 0,01 y 0,50mL/L, lo cual muestra que, en términos de este parámetro, el efluente de la planta estuvo dentro del límite recomendable.

Monitoreo de la PTAR

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los parámetros analizados sobre muestras sencillas realizadas en horarios entre 9:00 y 10:00 de la mañana durante las tres fases del monitoreo de la planta.

- *Temperatura*

Los valores medios de temperatura registrados en las tres etapas para el afluente y el efluente respectivamente fueron: en la primera etapa 22,6°C y 21,8°C; en la segunda etapa 25,6°C y 22,3°C; y en la tercera etapa 26,9°C y 25,1°C. Hubo mayor variación de este parámetro en el efluente como consecuencia del enfriamiento de la masa líquida de las lagunas en horas de la madrugada, mientras que el AR bruta mantiene una temperatura más elevada y con variación menor, ya que los tubos colectores se encuentran enterrados en el suelo donde la temperatura es más uniforme.

- *pH*

El promedio de valores de pH registrados en las tres etapas del monitoreo fueron: en la primera etapa 7,1 y 7,4; en la segunda etapa 7,2 y 7,4; en la tercera etapa 7,7 y 7,8 medidos en el afluente y el efluente respectivamente. Los valores en la primera y segunda etapas fueron muy similares; sin embargo, en la tercera etapa, el afluente fue más alcalino con valores hasta de 10,8 debido a la intensa actividad fotosintética de las algas presentes en las lagunas, que pueden incrementar el pH a valores superiores a 11 cuando requieren cantidades mayores de CO₂ que las disponibles por los procesos de respiración y descomposición, como lo afirman Kayombo et al. [24].

- *DBO y DBO Filtrada*

La legislación estatal establece la DBO como parámetro de remoción de MO carbonácea. La medición de la DBO filtrada en lagunas de estabilización sirve como base para determinar la eficiencia real de una PTAR, pues en la DBO bruta, la presencia de algas puede aumentar los valores de la concentración final, enmascarando la real eficiencia del tratamiento.

Durante la investigación, la concentración promedio de la DBO afluente fue de 343mg/L y la del efluente de 33,3mg/L. Las concentraciones medias de DBO filtrada (DBOF) del efluente para cada fase fueron: 46,4mg/L; 16mg/L y 37mg/L, para la primera, segunda y tercera etapas respectivamente. La figura 4 presenta los valores medidos de DBO y DBOF; en ella se puede apreciar que, pese a que las concentraciones medias del efluente, se encontraron por debajo de los 60mg/L recomendados por el Decreto 8464/76 [22], hubo valores que superaron ese límite.

La eficiencia de remoción de la DBO varió entre 57,4% y 92,4%, con un valor promedio de 80,2%; para la DBOF, la remoción media fue de 90,6%, variando entre 76,2% y 99,4%. De las 20 colectas realizadas en el período de estudio, 8 muestras (40%) reportaron valores por debajo del 80% mínimo exigido por la legislación del estado de São Paulo [22].

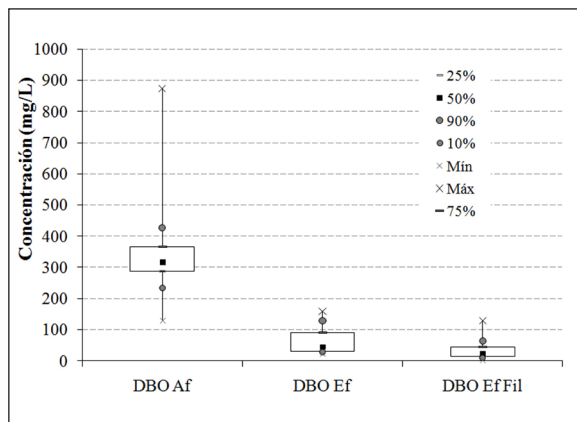


Figura 4. Valores de DBO en el afluente y efluente y DBO Filtrada efluente

En los resultados de la DBOF únicamente 2 colectas presentaron datos por debajo del porcentaje exigido, lo cual significa que en 90% de las colectas la meta fue alcanzada.

La eficiencia media de remoción de la DBO fue superior a las reportadas en lagunas facultativas con y sin baffles por Oliveira et al. [25] y mayor al valor promedio de 73% obtenido por Oliveira y von Sperling [21] en su estudio sobre 73 lagunas facultativas primarias con un TRH medio de 54 días; tales autores afirmaron que el desempeño de este tipo de unidades de tratamiento es altamente afectado por las condiciones de carga y una combinación de aspectos operacionales y de diseño, como el nivel de control del proceso y la correcta ejecución de los requisitos de operación y mantenimiento. Para mejorar el desempeño de la PTAR es necesario abordar la remoción del lodo acumulado y ejecutar la operación alternada de las dos cámaras de desarenado.

- *DQO*

La concentración media calculada de DQO total en el afluente fue de 306,5mg/L, con variación entre 41 y 470mg/L. Durante el estudio, los valores medios registrados para la primera, segunda y tercera etapas respectivamente fueron de 399mg/L; 232,4mg/L y 352,7mg/L. La figura 5 presenta las concentraciones de DQO medidas durante el periodo de investigación.

Los porcentajes de remoción de la DQO variaron entre 39,8% y 93,0%, con un valor medio de 61,6%. Las eficiencias promedio calculadas fueron: 57,4% en la primera etapa; 69,6% en la segunda etapa y 57,1% para la tercera etapa, tales valores fueron superiores a los reportados por Oliveira et al. [25].

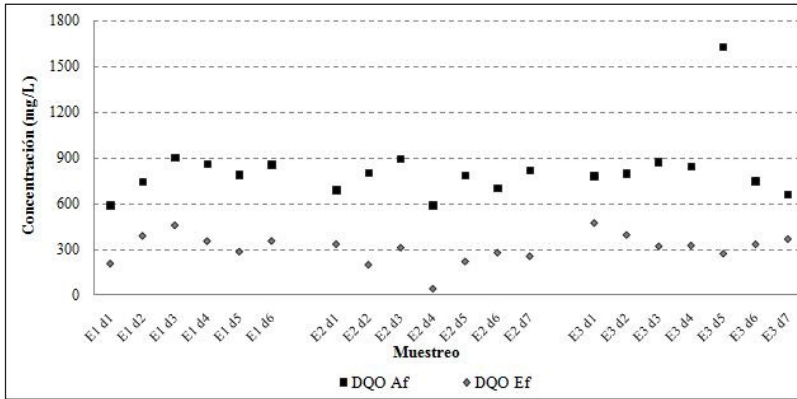


Figura 5. Concentraciones de DQO en el afluente y efluente de la PTAR

Los resultados presentados permiten apreciar que hubo similitud en las concentraciones medias de DBO y DQO calculadas tanto para el monitoreo de 24 horas como para el estudio desarrollado durante las tres etapas de tres meses.

- OD

En todos los casos el líquido afluente a la PTAR tuvo una concentración de OD de 0mg/L; por su parte, el efluente registró valores entre 0 y 8,4mg/L, con promedio general de 2,3mg/L. Las concentraciones medias de los efluentes para la primera, segunda y tercera etapas fueron: 1,5mg/L; 3,2mg/L; y 2,2mg/L respectivamente.

Durante el monitoreo se apreció en muy pocas oportunidades la exhalación de olores desde las lagunas, ya que los muestreos se realizaron durante el día; sin embargo, en el seguimiento de 24 horas consecutivas sí se evidenció en horas de la madrugada la salida de burbujas de gas provenientes del fondo de las mismas.

Regularmente las lagunas presentaron coloración gris oscura en la zona cercana a las entradas del afluente crudo y gris un poco más claro a medida que se alejaba de dichos puntos; desde la mitad de la laguna hasta su zona de salida, la coloración fue variable entre un verde grisáceo hasta un verde oliva en la salida.

Aunque en el efluente se midieron valores mayores al mínimo recomendado de 2mg/L, 25% de las muestras registró 0mg/L y 15% concentraciones entre 0 y 2mg/L. En aras de mantener la concentración de OD mayor a 2mg/L podría realizarse un ajuste en el dispositivo de salida de la PTAR (tipo *stop log*), para que mediante una salida sumergida se logre retener mayor cantidad de algas flotantes en las lagunas y de esta manera garantizar mayor producción y mantenimiento del OD producido por fotosíntesis durante el día, así como reducir el valor de la DBO en el efluente, como ya fue comentado.

- *Coliformes Totales y Coliformes Fecales*

El NMP de CT/100mL en el afluente varió entre 1,00E+01 y 1,36E+09; y de 7,20E+03 a 1,36E+09 en el efluente. El NMP/100mL de CF varió de 1,00E+01 a 2,78E+08 en el afluente; y entre 1,00E+01 y 4,08E+08 en el efluente. La figura 6 presenta los valores de CT y CF, donde se evidencia que en la segunda etapa hubo una reducción de las concentraciones de los organismos Coliformes, probablemente debido a la mayor dilución de las AR por el mayor consumo de agua en la época de sequía.

El parámetro de control de contaminación bacteriana en efluentes definido por la legislación brasilera y del estado de São Paulo es un valor límite de NMP/100mL de 1,00E+03 CF para cuerpos de agua de la Clase 2 [23], [22]. Solo 3 muestras del efluente final registraron valores menores que el recomendado. La elevada cantidad de CF en el efluente final afecta significativamente la calidad del agua del cuerpo receptor, lo cual cobra mayor importancia si se considera que la zona aguas abajo del punto de vertimiento está ocupada por fincas de descanso, donde se cultivan hortalizas y se practican actividades como la pesca y la natación.

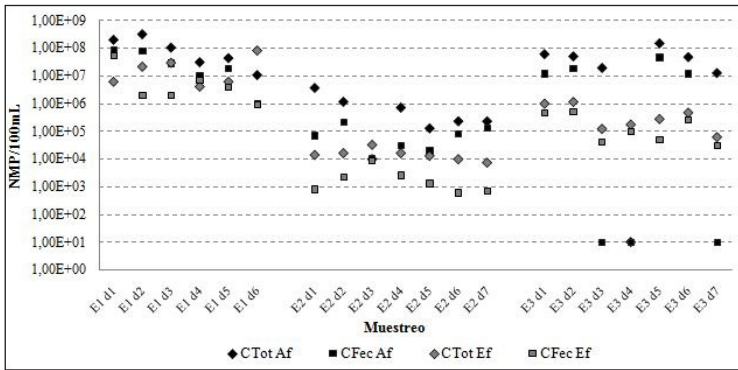


Figura 6. NMP de CT y CF medidos en el afluente y el efluente de la PTAR

La eficiencia de remoción de CT durante la investigación reportó como valores máximo, medio y mínimo 2,8; 1,6 y 0,6 unidades logarítmicas respectivamente. Para CF las eficiencias máxima, media y mínima calculadas fueron: 3,0; 1,3 y 0,1 unidades logarítmicas. Nuevamente, los resultados sugieren que la PTAR requiere de un mantenimiento en términos de la remoción de lodos acumulados para así aumentar el TRH y propiciar un mejor desempeño, además precisa de un pos-tratamiento del efluente final para lograr un encuadramiento en las recomendaciones de la legislación brasilera.

- *Nitrógeno Total y Nitrógeno Amoniacal Total*

En todas las etapas se midió el NT en el efluente; en la primera etapa se determinó el NAT en el efluente y en la tercera etapa se determinó el NAT afluente y efluente para verificar la eficiencia de remoción de este parámetro.

El NT del efluente varió entre 8,7 y 90mg/L, con promedio de 42,9g/L. Los valores medios por etapa fueron: en la primera etapa de 15,8mg/L; en la segunda de 31,4mg/L y en la tercera de 77,7mg/L.

El NAT afluente en la tercera etapa varió entre 5 y 18mg/L con promedio de 9mg/L. El NAT efluente en la primera etapa varió de 0,2mg/L a 6,2mg/L; y en la tercera etapa de 0,2mg/L a 3mg/L con respectivos promedios de 2,2mg/L y de 1mg/L.

La eficiencia de remoción de NAT osciló entre 76,0% y 97,1%, con promedio de 89,2%. Según Camargo [26], las vías y mecanismos para transformación y eliminación de nitrógeno en lagunas de estabilización facultativas pueden ser: la asimilación a través de algas y bacterias, la volatilización del amonio, la nitrificación-desnitrificación, la sedimentación y la mineralización. Con relación al nitrógeno amoniacal, van der Linde et al. [27] enfatizan que este es rápidamente asimilado como material celular por la biomasa de las lagunas, principalmente por las algas, lo cual puede justificar los valores obtenidos.

- *Fósforo Total*

El PT se monitoreó en el efluente final durante las tres etapas, y las concentraciones variaron entre 1,5 y 10,4mg/L, con promedio de 4mg/L; los valores medios por etapa fueron: primera etapa 4,1mg/L; 2ª Etapa 4,9mg/L; y tercera etapa 3,1mg/L. En la tercera etapa se monitoreó también el afluente cuyas concentraciones variaron entre 5,4 y 7mg/L, con promedio de 6,3mg/L.

Con base en los valores registrados, en la tercera etapa se calculó la eficiencia de remoción de PT que varió entre 24,3% y 72,9%, con un promedio de 56,7%. La remoción de este nutriente pudo deberse a la mineralización del fósforo orgánico, a su precipitación como sales insolubles, o a la asimilación del fósforo soluble en el crecimiento de algas y bacterias según lo estipulado en [28].

- *Sólidos Sedimentables*

Los valores medios calculados de SSed del afluente en la primera y segunda etapas fueron de 5,3mL/L y 6,9mL/L; y en el efluente fueron de 0,3mL/L y 0,8mL/L. En la tercera etapa la concentración media del efluente fue 50mL/L, mayor al valor recomendado por la norma de 1mL/L, lo cual pudo producirse por efecto de las precipitaciones o eventual burbujeo de gases provenientes de la capa de lodos que resuspenden material sedimentado en zonas donde la columna del líquido es muy baja. La eficiencia media de remoción de este parámetro en la primera etapa fue de 94,2% y en la segunda de 88,4%, el 60% de las muestras tomadas en el efluente cumplió con las directrices establecidas por la legislación ambiental.

Para efectos de remoción de los lodos acumulados, podría optarse por el vaciado de una laguna y el secado del lodo *in situ* por efectos del sol y el aire seguido de su remoción mecanizada, o mediante una draga para extraer el lodo desde la base de la laguna y proceder a su deshidratación externa, según lo recomiendan O'Dempsey y Archer [29]. La primera opción es la menos costosa y podría ser viable para la PTAR de Ilha Solteira por la posibilidad de realizar el tratamiento del agua sobrecargando una de las unidades de tratamiento.

- *Sólidos Totales, Fijos y Volátiles*

Durante la investigación, los valores máximo, medio y mínimo de ST en el afluente fueron: 1.453, 652, y 113mg/L; y en el efluente: 820, 483, y 110mg/L. La tabla 2 presenta los valores medios de ST, STF, STV; SST, SSF, SSV; SDT, SDF y SDV calculados en la investigación.

Tabla 2.
Valores promedio de ST, SS y SD Fijos y Volátiles en la PTAR

Etapa	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
	ST (mg/L)		STF (mg/L)		STV (mg/L)	
Primera	271,0	275,0	271,0	275,0	351,2	250,5
Segunda	817,1	536,6	360,6	290,9	456,6	245,7
Tercera	812,1	607,8	317,9	304,0	522,0	303,8
	SST (mg/L)		SSF (mg/L)		SSV (mg/L)	
Primera	354,8	259,8	79,7	77,3	275,2	182,5
Segunda	293,1	132,3	63,7	7,4	229,4	124,9
Tercera	333,6	237,6	41,8	53,4	279,8	186,7
	SDT (mg/L)		SDF (mg/L)		SDV (mg/L)	
Primera	267,3	265,7	191,3	241,2	76,0	68,0
Segunda	524,0	404,3	296,9	283,4	227,1	120,9
Tercera	478,5	370,2	276,0	250,6	242,1	138,9

Los STF medidos en el afluente y efluente variaron entre 20 y 520mg/L, y de 110 a 438mg/L, con promedios de 319mg/L y 291mg/L respectivamente. Los STV variaron de 96 a 1.340mg/L y de 92 a 507mg/L; con promedios de 448mg/L y 268mg/L.

Las eficiencias medias de remoción de ST, STF y STV fueron de 23,3%; 14,8%; y 37,7% respectivamente. En términos generales, se evidencia que la cantidad de ST que ingresó a las lagunas fue mayor que la que salió, lo cual justifica la acumulación de lodos en las unidades de tratamiento.

- *Sólidos Suspendidos Totales, Fijos y Volátiles*

Los SST afluentes variaron entre 108 y 705mg/L, con promedio de 325mg/L; los efluentes de 65 a 513mg/L y promedio de 207mg/L. Los SSF máximos, medios y mínimos en el afluente y en el efluente fueron: 288, 61, y 4mg/L; y 187, 45 y 0mg/L. Los SSV en el afluente oscilaron entre 88 y 610mg/L con promedio de 261mg/L, y en el efluente de 47 a 327mg/L con promedio de 164mg/L.

Las altas concentraciones de sólidos suspendidos a la salida de la PTAR guardan correspondencia con las diferencias de valores evidenciadas por la DBO y la DBO filtrada efluentes, que indicaron la presencia de biomasa algal en el líquido tratado.

Las eficiencias medias de remoción calculadas fueron de 42,6% para SST; 63,9% para SSF; y 39,9% para SSV. Las eficiencias de remoción de sólidos en suspensión fueron menores a las reportadas por Oliveira et al. [25] para lagunas facultativas con TRH similares al de las lagunas investigadas, probablemente debido a la heterogeneidad hidráulica por la acumulación irregular de lodos.

- *Sólidos Disueltos Totales, Fijos y Volátiles*

Las concentraciones de SDT en el afluente variaron entre 108 y 1.085mg/L; para el efluente entre 124mg/L y 532mg/L. Los SDF variaron en el afluente entre 2mg/L y 448mg/L y en el efluente de 128mg/L a 370mg/L. Los SDV en el afluente variaron de 8 a 1.040mg/L y en el efluente de 22mg/L a 321mg/L. La tabla 2 presentó los valores medios de SDT, SDF y SDV para cada etapa. Las eficiencias medias en la remoción de SDT, SDF y SDV fueron: 27,9%; 19,7% y 51,7% respectivamente.

Para mejorar el desempeño de la PTAR, además de la oportuna remoción de lodos acumulados y un riguroso programa de operación y mantenimiento,

se puede optar por el incremento del número de unidades y tipos de tratamiento; bien sea para mejorar la calidad del afluente a las lagunas, por medio de un sistema anaerobio, tal como una laguna anaerobia o un tanque Imhoff o convirtiendo las lagunas en sistemas de postratamiento del efluente de un reactor UASB, como lo sugieren Feitosa et al. [30] y Chernicharo [31].

Otra alternativa es la adición de una unidad para mejorar la calidad del efluente de las lagunas facultativas en cuanto a la presencia de sólidos en suspensión, indicadores bacterianos y nutrientes, como es el caso del uso de filtros de piedra, filtros intermitentes de arena, macrófitas flotantes, remoción físico-química y lagunas de maduración [8], o el uso de filtros de roca aireados, cuyos resultados han sido reportados por Hamdan y Mara [32].

4. CONCLUSIONES

Cada laguna registró una acumulación de cerca de 20.000m³ de lodos, localizados principalmente en el primer tercio de las unidades de tratamiento, situación que redujo el volumen efectivo disponible y el tiempo de retención hidráulica de la PTAR en aproximadamente 40%.

Los resultados del levantamiento batimétrico evidenciaron la necesidad de efectuar la remoción de los lodos acumulados en las lagunas para homogenizar las condiciones hidráulicas de funcionamiento, incrementar el TRH de las unidades y, en consecuencia, mejorar el desempeño de la PTAR.

Aunque el efluente final de la planta cumplió con la normatividad ambiental en términos de los análisis para DBO con una concentración promedio de 33,3mg/L y una eficiencia media de remoción de 80,2%, el 40% de las muestras analizadas reportaron valores por debajo del porcentaje mínimo exigido por el Decreto 8464/76.

Además, durante la investigación el efluente registró valores de sólidos sedimentables que en un 40% de las ocasiones superaron el límite permisible de 1,0 mL/L.

Durante la investigación únicamente 3 de las 20 muestras tomadas en el efluente final se ajustaron a lo establecido por la legislación brasilera al registrar valores de NMP de coliformes fecales menores a 1000/100mL.

Para mejorar la calidad del efluente final de la PTAR, principalmente en términos de organismos Coliformes y materia orgánica, es necesaria la implementación de un sistema de tratamiento adicional que sirva como pulimento de los resultados obtenidos por las dos lagunas facultativas primarias.

REFERENCIAS

- [1] F. Spellman, *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. 2nd Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [2] E. Kellner and E. C. Pires, *Lagoas de Estabilização-Projeto e Operação*. Rio de Janeiro, Brasil: Editorial da ABES, 1998.
- [3] M. Peña and D. Mara, *Waste Stabilisation Ponds*. The Netherlands: IRC International Water and Sanitation Centre, 2004.
- [4] S. Kayombo *et al.*, *Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands Design Manual*. Osaka, Japan: United National Environment Programme, 2005.
- [5] R. Crites and G. Tchobanoglous, *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [6] M. Y. Uehara and W. L. Vidal, *Operação e Manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas - Série Manuais*. São Paulo, Brasil: Ed. CETESB, 1989.
- [7] D. Mara, *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London, UK: Earthscan Ed., 2004.
- [8] M. von Sperling, *Lagoas de Estabilização - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*, 2da Ed., vol. 3. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG), 2009.
- [9] F. C. Yañez, *Lagunas de Estabilización. Teoría, diseño y mantenimiento*. Cuenca, Ecuador: Ed. ETAPA, 1993.
- [10] Centro de pesquisas meteorológicas e climáticas aplicadas à agricultura - CEPAGRI, 2012. Clima dos municípios paulistas. [Online]. Available: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_236.html.
- [11] *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA, AWWA & WPCF, 18th ed. New York: Public Health Association Inc., 1998.
- [12] R.F. Gonçalves. (Coord.) *et al.*, *Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas*. Rio de Janeiro, Brasil: Ed. ABES, 2000.
- [13] A. Alvarado *et al.*, "CFD analysis of sludge accumulation and hydraulic performance in Ucubamba WSP (Cuenca, Ecuador)" presented at the 9th

- IWA Specialist Group on Waste Stabilisation Ponds*. Adelaide, SA, Australia, 1-3 August 2011, Paper 08.
- [14] C.V. Andreoli, M. Von Sperling, and F. Fernandes, *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*, vol. 6. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- [15] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2000 - Resultados do universo. [Online]. Available: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000>.
- [16] M. von Sperling y R.F. Gonçalves "Lodo de esgotos: características e produção", in *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*, vol. 6. C.V. Andreoli, M. Von Sperling and F. Fernandes, Eds. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2001, pp. 17-67.
- [17] R.F. Gonçalves *et al.*, "Sludge production in anaerobic pond treating sewage, algal and physico-chemical sludge from polishing system of facultative pond" presented at the *9th IWA Specialist Group on Waste Stabilisation Ponds*. Adelaide, SA, Australia, 1-3 August 2011, Paper 44.
- [18] Organización Panamericana de la Salud -OPS-, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente -CEPIS-, *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización*. Lima, Perú: CEPIS, Unidad de apoyo técnico al saneamiento básico rural - UNATSABAR, 2005.
- [19] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd ed. New York: Metcalf & Eddy Inc., 1991.
- [20] H. Kawai *et al.*, "Estabelecimento de critérios para dimensionamento de lagoas de estabilização", *Revista DAE*, vol. 127, pp. 37-45, Dez. 1981.
- [21] S. C. Oliveira, M. von Sperling, "Assessment of classical surface organic loading design equations based on the actual performance of primary and secondary facultative ponds" presented at the *8th IWA specialist group conference on waste stabilization ponds - 2nd Latin-American conference on waste stabilization ponds*. Belo Horizonte, MG, Brazil, 26-30 April 2009.
- [22] São Paulo. *Decreto Estadual nº 8.468*, de Setembro 8 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. [Online]. Available: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf>.
- [23] Brasil. *Resolução CONAMA Nº 357*, de 17 de março de 2005. [Online]. Available: http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/resolucao_conama357.pdf.
- [24] S. Kayombo *et al.*, "Diurnal cycles of variation of physical-chemical parameters in waste stabilization ponds", *Ecological Engineering*, vol. 18, pp. 287-291, 2002.

- [25] R. Oliveira *et al.*, "Baffled primary facultative ponds with inlets and outlets set at different levels treating domestic wastewater in northeast Brazil" presented at the *8th IWA specialist group conference on waste stabilization ponds - 2nd Latin-American conference on waste stabilization ponds*. Belo Horizonte, MG, Brazil, 26-30 April 2009.
- [26] M. A. Camargo, "Nitrogen transformation pathways and removal mechanisms in domestic wastewater treatment by maturation ponds," Ph.D. Thesis, School of Civil Eng., Univ. of Leeds, U.K., 2008.
- [27] E. R. C. van der Linde *et al.*, "Nitrogen removal during summer and winter in a primary facultative WSP pond: preliminary findings from 15N-labelled ammonium tracking techniques" presented at the *8th IWA specialist group conference on waste stabilization ponds - 2nd Latin-American conference on waste stabilization ponds*. Belo Horizonte, MG, Brazil, 26-30 April 2009.
- [28] Ministerio de Obras Públicas y Transportes MOPT, *Depuración por lagunaje de aguas residuales - Manual de operadores*. Madrid - España: Centro de publicaciones del MOPT, 1991.
- [29] B. O'Dempsey and H. Archer, "Desludging ponds in New Zealand" presented at the *9th IWA Specialist Group on Waste Stabilisation Ponds*. Adelaide, SA, Australia, 1-3 August 2011, Paper 35.
- [30] P. F. Feitosa *et al.*, "Pós-tratamento de efluentes anaeróbios por lagoas de polimento", in *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*, C. A. L. Chernicharo, (Org.). Belo Horizonte, Brasil: FINEP, 2001, 544p.
- [31] C. A. L. Chernicharo, *Reatores Anaeróbios - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, 2da Ed., vol. 5. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [32] R. Hamdan and D. Mara, "Aerated blast-furnace-slag filters for the simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from primary facultative pond effluents" presented at the *9th IWA Specialist Group on Waste Stabilisation Ponds*. Adelaide, SA, Australia, 1-3 August 2011, Paper 50.