



EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES DE O.S.E.

Jimena Alonso⁽¹⁾, Emma Fierro⁽¹⁾, Juan Ascúe⁽¹⁾, Sergio Gigena⁽¹⁾.

(1) Administración de las Obras Sanitarias del Estado, Gerencia de Producción, Unidad de Aguas Residuales

Dirección⁽¹⁾:

Calle: Carlos Roxlo 1275

Ciudad: Montevideo

Uruguay

CP: 11200

Tel: 598 (2) 1952-1939

Fax: 598 (2) 1952-1947

e-mail: jimena.alonso@ose.com.uy

RESUMEN

La Administración de las Obras Sanitarias del Estado presta el servicio de saneamiento en el interior del país y tiene en servicio 147 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Este trabajo presenta una evaluación del funcionamiento de 25 de estas plantas diseñadas de acuerdo a distintas tecnologías de tratamiento secundario. Dentro de éstas se encuentran 8 sistemas de lagunas, un reactor UASB y 16 plantas de lodos activados. Se pretende con este trabajo hacer pública por parte del organismo una evaluación de dichas plantas que sirva como devolución a la comunidad profesional del Uruguay de los resultados del funcionamiento en las condiciones operativas actuales de los diseños proyectados. La evaluación fue realizada en primer lugar mediante un análisis de fiabilidad, concepto éste que aplicado a plantas de tratamiento de aguas residuales puede definirse en función del porcentaje de tiempo durante el cual las concentraciones del efluente cumplen con los límites normativos o proyectados del vertido. Existen al menos tres aplicaciones de este análisis. En primer lugar las plantas de tratamiento deben ser diseñadas para que la variabilidad esperada de sus efluentes sea tal que la legislación sea cumplida el porcentaje de tiempo requerido. La segunda aplicación refiere a que las prácticas operativas en una planta en funcionamiento deben ser tales que las concentraciones medias reales y la variabilidad de su efluente alcancen el porcentaje de cumplimiento normativo requerido y que además verifiquen los valores esperados de proyecto. La tercer aplicación es la de permitir al organismo regulador especificar estándares de vertido sensibles a las tecnologías existentes en el país. Para realizar este análisis se siguió la metodología aplicada por Oliveira & Von Sperling (2007), determinando el porcentaje de tiempo en que las concentraciones de DBO y SST del efluente de las plantas cumplen con los límites establecidos en la normativa y paralelamente con los valores medios establecidos en el diseño.

En segundo lugar se presentarán evaluaciones preliminares sobre concentraciones de nitratos en el efluente y eficiencia de los sistemas de desinfección UV, en las últimas PTAR de lodos activados que se han puesto en marcha.

Se espera que las conclusiones de este trabajo sean de utilidad tanto a nivel de proyecto como de los operadores, en particular a la hora de ajustar las técnicas operativas de forma de optimizar la relación costo-eficiencia del tratamiento, y en el mismo sentido generar antecedentes que sirvan como herramienta para la utilización de conceptos probabilísticos, basados en el desempeño de PTAR locales.



INTRODUCCIÓN

En términos del desempeño de las plantas de tratamiento de aguas residuales la fiabilidad puede definirse en función del porcentaje de tiempo durante el cual las concentraciones del efluente cumplen con los límites normativos o proyectados del vertido (Metcalf & Eddy, 1998). Una planta será completamente fiable cuando los límites establecidos en el diseño del proyecto o en la normativa vigente no sean superados (Oliveira & Von Sperling, 2007). Esta claro que lograr un desempeño con estas características exige además de un diseño riguroso y un control estricto de la operación, costos operativos excesivamente altos. Es por ello que las PTAR son diseñadas para producir concentraciones medias de efluente inferiores a los límites establecidos. El Coeficiente de Fiabilidad (CDF) relaciona los valores medios de las concentraciones de los constituyentes con las limitaciones que deben cumplirse basándose en un análisis de probabilidad (Metcalf & Eddy, 1998).

Una aplicación de esta metodología ha sido utilizada por Oliveira & Von Sperling (2007) para analizar la fiabilidad en 166 PTAR en Brasil relativas a seis diferentes tecnologías de tratamiento. La misma metodología será utilizada para la evaluación de 25 PTAR en Uruguay que funcionan con diferentes tecnologías dentro del tratamiento secundario.

OBJETIVOS Y METAS

El objetivo general de este trabajo es evaluar el desempeño de distintas PTAR con tratamiento secundario en Uruguay en relación con la normativa vigente y con los parámetros de diseño establecidos en cada proyecto.

Para lograr esto se apuntará a los siguientes objetivos específicos:

- a. Procesar la base de datos analíticos de DBO, SST, nitratos y coliformes fecales de efluentes de PTAR
- b. Verificar la hipótesis del ajuste de la distribución log-normal a las concentraciones de efluentes de PTAR
- c. Análisis de fiabilidad, mediante la determinación de los coeficientes de fiabilidad y del porcentaje de cumplimiento de la normativa vigente
- d. Evaluación de las eficiencias de funcionamiento de los sistemas de denitrificación y desinfección UV

METODOLOGIA

Información de base

Se incluyeron para este estudio 25 plantas de tratamiento que funcionan con distintas alternativas del tratamiento secundario. En la Tabla 1 se resumen: las características de las PTAR, el período analizado en cada caso, el número de conexiones al saneamiento de la localidad, el caudal actual de funcionamiento y para el caso en que se dispuso de la información: el porcentaje que éste representa del caudal de diseño de la PTAR.

La información de base para este análisis fue obtenida directamente de los reportes de resultados de análisis del Laboratorio Central de O.S.E. En general el Laboratorio efectúa controles con frecuencia trimestral, sin embargo en varias plantas se han registrado frecuencias menores. En el caso particular de las plantas que están actualmente operadas por terceros la frecuencia de monitoreo es mensual, al igual que para las plantas construidas con prestamos del Banco Mundial. Para el análisis de las plantas de Pan de Azúcar y San Carlos la información fue complementada con la proporcionada por el Laboratorio de la UGD que realiza muestreos semanales de afluente y efluente en todas las PTAR bajo su responsabilidad.

Basados en la disponibilidad de información, los parámetros elegidos para el análisis de fiabilidad fueron la DBO₅ y los sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente de cada planta. Respecto a la eficiencia de remoción de coliformes y la concentración de nitratos en el efluente, el nivel de análisis posible con la información disponible alcanza a ser meramente descriptivo.



Tabla 1 – Características de las PTAR y período analizado

<i>Planta</i>	<i>Tipo</i>	<i>desde</i>	<i>hasta</i>	<i>Nº Conexiones</i>	<i>Caudal actual (m³/día)</i>	<i>% del caudal de proyecto</i>
Bella Unión	Lag. F	1998	2006	1693	630	
Canelones	L.A. Ext AD	2007	2008	4199	3500	81%
Cardona	Lag. A-F	2002	2006	694	258	
Casupá	L.A. ZO	2003	2008	359	134	
Durazno	L.A. Ext AD	2006	2008	8256	4000	62%
Florida	L.A. Ext AD	1999	2008	8350	3106	
Libertad	Lag. A-F	1999	2006	1494	556	
Melo	L.A. Ext AD	2008	2008	9805	7500	88%
Minas	L.A. Conv AD	2005	2008	7340	3300	58%
Pan de Azúcar	L.A. Ext AM	1998	2008	1266	471	
Pando	UASB	2000	2007	3506	2000	
Paso de los Toros	L.A. ZO	2000	2007	1653	615	
Río Branco	Lag. F	2002	2006	1906	709	
Rivera	Lag. A-F.a.	2003	2008	8587	3194	
Rocha	Lag. A-F	2003	2007	3576	1330	
Rosario	Lag. A-F	1999	2007	1993	741	
San Carlos	L.A. ZO	2001	2008	4642	1727	
San José	L.A. Ext AD	2007	2008	7535	2803	37%
Santa Lucía	L.A. Conv AD	2002	2007	3483	1296	18%
Sarandí Grande	L.A. ZO	2003	2006	1767	657	
Tacuarembó	L.A. Ext AD	2003	2008	8496	3161	
Treinta y Tres	L.A. Ext AD	2004	2008	7004	3500	49%
Trinidad 1	L.A. Ext AM	2003	2006	6497	2417	
Trinidad 2	L.A. Ext AM	2002	2006			
Young - G2	Lag. F	2000	2008	670	249	

L.A. Ext AM: Lodos activados, aireación extendida con aireación mecánica

L.A. Ext AD: Lodos activados, aireación extendida con aire difuso

L.A. Conv AD: Lodos activados, aireación convencional con aire difuso

L.A. ZO: Lodos activados, zanjas de oxidación

Lag. F: Lagunas Facultativas

Lag. A-F: Lagunas Anaerobias y Facultativas

Lag. A-F.a.: Lagunas Anaerobias y Facultativas aireadas

Porcentaje esperado de cumplimiento

La bibliografía consultada muestra que la distribución log-normal es la que más se ajusta a los datos de concentraciones de los parámetros en el efluente de las PTAR. Para confirmar esta hipótesis se analizaron los resultados de DBO y SST en el efluente de las 25 plantas, en el período de datos existente en cada una.

El porcentaje esperado de cumplimiento para un parámetro particular del efluente se calcula mediante la integral de la función de densidad de probabilidad de la distribución log-normal. Una simplificación de esa metodología es la que plantean Oliveira & Von Sperling, tomando el desarrollo de Niku et al (1979) basado en las relaciones entre la distribución normal y log-normal que obtiene la siguiente fórmula de cálculo simple:

$$Z_{1-\alpha} = \frac{\ln X_s - \left[\ln m_x - \frac{1}{2} \ln(CV^2 + 1) \right]}{\sqrt{\ln(CV^2 + 1)}} \quad [\text{Ec 1}]$$



$Z_{1-\alpha}$ = diferencia entre el valor determinado y la media de la distribución, supuesta normal, tomando como unidad de referencia la desviación típica de la distribución

$1-\alpha$ = nivel de fiabilidad (probabilidad acumulada de ocurrencia)

CV = Coeficiente de variación (desviación estándar dividido la media)

m_x = concentración media del constituyente (valores medidos)

X_S = límite establecido por la normativa o el diseño

Coeficiente de fiabilidad (CDF)

El CDF relaciona los valores medios de las concentraciones de efluente con el estándar a alcanzar, mediante la siguiente expresión:

$$m_x = (CDF).X_S \quad [\text{Ec 2}]$$

m_x = concentración media de diseño del constituyente

CDF= coeficiente de fiabilidad

X_S = límite establecido por la normativa o el diseño

Basándose en que la serie de datos tiene una distribución log-normal, se puede determinar el coeficiente de fiabilidad mediante la siguiente expresión (Niku et al, 1979):

$$CDF = \sqrt{(CV^2 + 1)}. \exp\left[-Z_{1-\alpha} \ln(\sqrt{(CV^2 + 1)})\right] \quad [\text{Ec 3}]$$

CV = Coeficiente de variación (desviación estándar dividido la media)

$Z_{1-\alpha}$ = diferencia entre el valor determinado y la media de la distribución, supuesta normal, tomando como unidad de referencia la desviación típica de la distribución

$1-\alpha$ = nivel de fiabilidad (probabilidad acumulada de ocurrencia)

RESULTADOS

Características de los efluentes

Se resumen en la Tabla 2 características del efluente final de las distintas plantas estudiadas incluyendo: DBO₅, SST, nitratos y coliformes fecales.

Tabla 2 – Características del efluente final (valor medio ± desviación estándar)

Planta	DBO5 (mg/l)	SST (mg/l)	Nitratos (mg/l - N)	Col. Fecales (NMP/100 ml)
Bella Unión	70.5 ± 65.3	106.6 ± 51.4		
Canelones	4.4 ± 3.4	18.0 ± 14.8	7.4 ± 2.9	336 ± 474
Cardona	84.3 ± 59.6	152.1 ± 74.5		
Casupá	16.7 ± 16.6	82.5 ± 62.2		
Durazno	3.6 ± 2.3	26.0 ± 21.4	17.6 ± 7.2	297 ± 429
Florida	17.2 ± 12.5	70.6 ± 56.5		45867 ± 27782
Libertad	107.8 ± 68.8	141.1 ± 82.3		
Melo	4.7 ± 0.6	11.0 ± 2.0		643 ± 690
Minas	15.8 ± 21.8	45.4 ± 33.8	19.1 ± 4.7	39 ± 64
Pan de Azúcar	20.1 ± 18.4	40.7 ± 45.2		
Pando	84.8 ± 50.2	80.3 ± 54.1		
Paso de los Toros	31.1 ± 16.3	59.8 ± 43.6		
Planta	DBO5 (mg/l)	SST (mg/l)	Nitratos (mg/l - N)	Col. Fecales (NMP/100 ml)



Río Branco	47.5 ± 41.2	115.9 ± 43.1		
Rivera	85.0 ± 44.7	54.3 ± 20.5		
Rocha	91.9 ± 63.3	104.0 ± 89.9		
Rosario	71.5 ± 44.7	86.5 ± 54.3		
San Carlos	16.4 ± 25.9	36.0 ± 57.2		
San José	2.8 ± 0.4	39.2 ± 53.0	19.5 ± 0.4	385 ± 363
Santa Lucía	20.4 ± 23.4	76.5 ± 63.2		
Sarandí Grande	8.7 ± 9.7	99.8 ± 55.4		
Tacuarembó	5.9 ± 1.8	65.5 ± 52.4		
Treinta y Tres	6.4 ± 8.5	51.9 ± 38.4		
Trinidad 1	8.2 ± 9.2	89.7 ± 73.0		
Trinidad 2	12.4 ± 9.1	74.4 ± 46.4		
Young - G2	120.8 ± 78.5	155.7 ± 78.5		

Verificación de la distribución de las series

La hipótesis realizada acerca de la distribución log-normal de las muestras fue aceptada en 46 de las 50 series analizadas. Las series que no ajustaron a la distribución log-normal fueron DBO en: Minas; San Carlos y San José y SST en Pan de Azúcar. En el caso particular de Minas se encontraron valores en el entorno de 60 mg/l en un período de 2006 cuando la planta experimentó un problema de bacterias filamentosas. En el caso de San José los valores de DBO se distribuyen en forma binaria entre 2 y 3 mg/l. Para las PTAR de Pan de Azúcar y San Carlos la situación de no ajuste es consecuencia de la utilización de datos provenientes de distintos laboratorios, situación que esta siendo abordada por el nuevo Sistema Integrado de Gestión de Laboratorios (SIGLA) de O.S.E.

Debido a que la gran mayoría de las series ajusta a la distribución de probabilidad elegida y que las excepciones cuentan con un grado de explicación razonable se decidió validar la hipótesis de distribución log-normal para los efluentes de todas las PTAR analizadas.

Porcentaje de cumplimiento de la normativa:

Se calculó para cada PTAR el porcentaje de cumplimiento de la normativa, utilizando la Ec 1. Los resultados obtenidos considerando la normativa vigente para descarga de efluentes a cursos de agua, se presentan en forma de diagramas de bloques en la Figura 1.

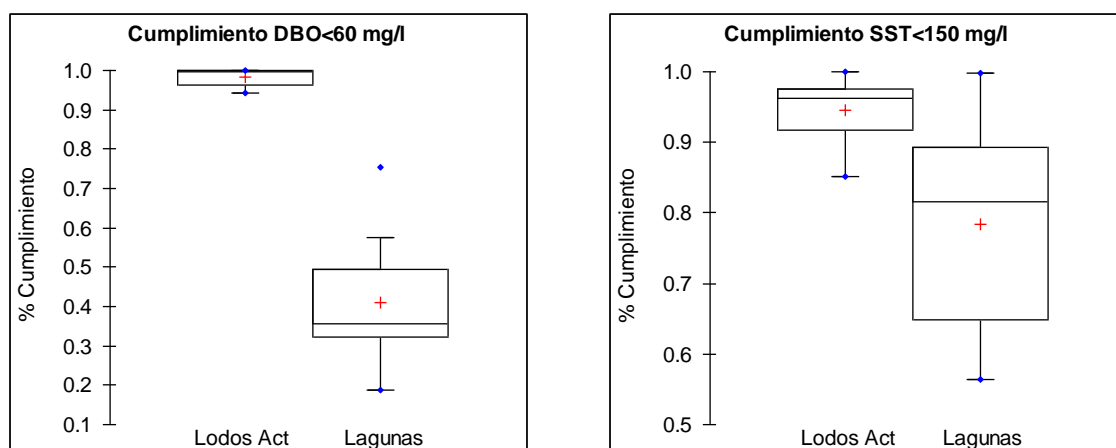


Figura 1 – Cumplimiento de la normativa en los dos parámetros estudiados (DBO₅ y SST)

Se observa que para las plantas de lodos activados el cumplimiento de la normativa en el parámetro DBO₅ supera en todas las plantas el 95%, mientras que el límite de SST es cumplido en todos los casos mas del 85% del tiempo. Por otro lado las lagunas se encuentran en condiciones mas comprometidas, la mitad de las plantas cumplen el



parámetro de DBO_5 como máximo el 36% de las veces, siendo mucho mejor la situación en el parámetro SST cuyo límite se cumple en más del 82% del tiempo por la mitad de las plantas y en más del 56% por la otra mitad.

Respecto a los valores de DBO_5 por fuera de los límites vale aclarar que el efluente de las lagunas estudiadas se encuentra aún en el caso más comprometido el 80% de las veces por debajo de los 170 mg/l.

Coeficiente de fiabilidad

En el análisis de Oliveira & Von Sperling los diagramas muestran una tendencia general en la cual valores mayores de CV llevan a menores CDF. Como se observa en la Figura 2, donde se representa la Ec 2 para distintos niveles de fiabilidad, ese resultado es válido para altos niveles de fiabilidad, pero la tendencia puede variar si se llegara a trabajar con menores niveles de fiabilidad o mayores CV.

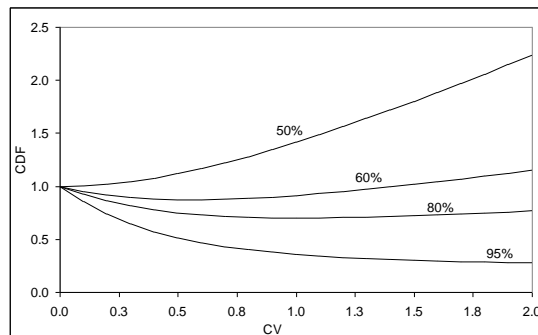


Figura 2 –Coeficiente de fiabilidad en función del CV y el nivel de fiabilidad

Se calculó el coeficiente de fiabilidad (CDF) para los parámetros de interés en las 25 plantas analizadas, utilizando la Ec 2 para un nivel de fiabilidad $(1-\alpha)$ del 95% y considerando el coeficiente de variación (CV) real de cada planta, los resultados se resumen en la Tabla 3 y en la Figura 3 en forma de box-plots. Los resultados muestran cuales deberían ser los valores de diseño para que las plantas cumplan el estándar con un nivel de fiabilidad de 95% bajo las condiciones operativas actuales.

En la Figura 3 los extremos del box-plot muestran el máximo y el mínimo valor de la serie, las líneas horizontales inferior, intermedia y superior de la caja representan los percentiles 25, 50 y 75 respectivamente y finalmente la cruz roja representa el valor medio de la serie.

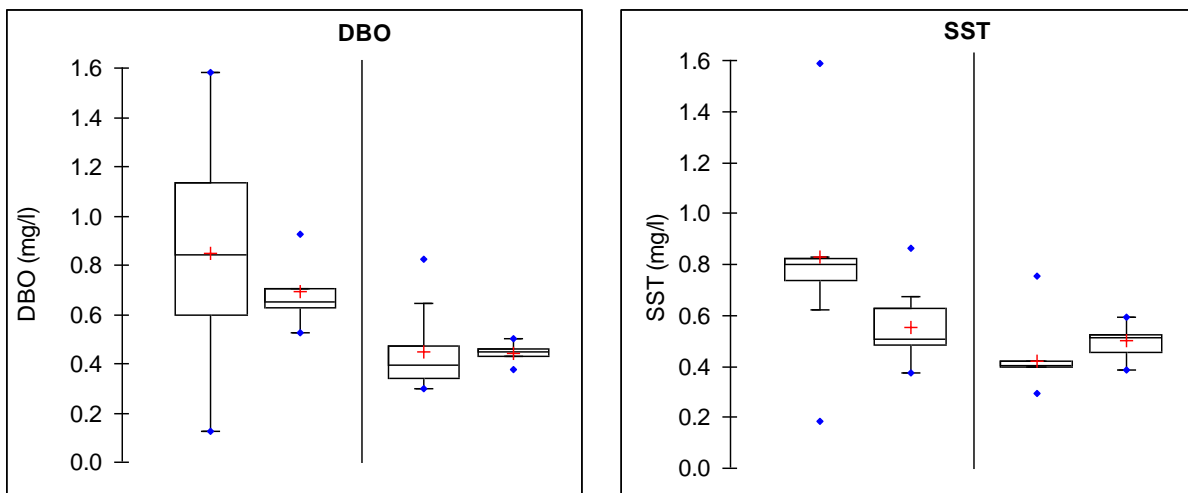


Figura 3 – Coeficiente de variación (CV) y Coeficiente de fiabilidad (CDF) para las 25 PTAR



Los valores de CV son en general menores a 1.0, las excepciones se dan para el parámetro DBO y se deben a las bajas concentraciones del efluente que en esos casos es menor incluso que la desviación estándar. Es importante notar que bajos valores de CV (y consecuentemente altos valores de CDF) no implican necesariamente un buen funcionamiento de la planta, sino condiciones estables de la operación que minimizan la desviación estándar de la serie de datos. Los mayores CV y por tanto los menores CDF fueron obtenidos para las PTAR de lodos activados, lo cual implica que son las que pueden aceptar menores valores de diseño.

Tabla 3 – CV y CDF para los parámetros analizados en las 25 PTAR

Planta	CV		CDF	
	DBO5 (mg/l)	SST (mg/l)	DBO5 (mg/l)	SST (mg/l)
Bella Unión	0.9	0.5	0.37	0.52
Canelones	0.8	0.8	0.41	0.40
Cardona	0.7	0.5	0.43	0.52
Casupá	1.0	0.8	0.36	0.42
Durazno	0.6	0.8	0.46	0.40
Florida	0.7	0.8	0.42	0.40
Libertad	0.6	0.6	0.45	0.48
Melo	0.1	0.2	0.82	0.76
Minas	1.4	0.7	0.31	0.42
Pan de Azúcar	0.9	1.1	0.38	0.34
Pando	0.6	0.7	0.47	0.44
Paso de los Toros	0.5	0.7	0.50	0.42
Río Branco	0.9	0.4	0.39	0.59
Rivera	0.5	0.4	0.50	0.59
Rocha	0.7	0.9	0.44	0.39
Rosario	0.6	0.6	0.46	0.46
San Carlos	1.6	1.6	0.30	0.30
San José	0.2	1.4	0.78	0.31
Santa Lucía	1.1	0.8	0.34	0.40
Sarandí Grande	1.1	0.6	0.34	0.49
Tacuarembó	0.3	0.8	0.64	0.40
Treinta y Tres	1.3	0.7	0.32	0.42
Trinidad 1	1.1	0.8	0.34	0.40
Trinidad 2	0.7	0.6	0.42	0.46
Young - G2	0.6	0.5	0.45	0.51

Otro resultado se muestra en la Figura 4, donde se comparan los valores medios de diseño necesarios para lograr los estándares de vertido para el nivel de fiabilidad planteado ($1-\alpha = 0.95$) con los valores medios observados.

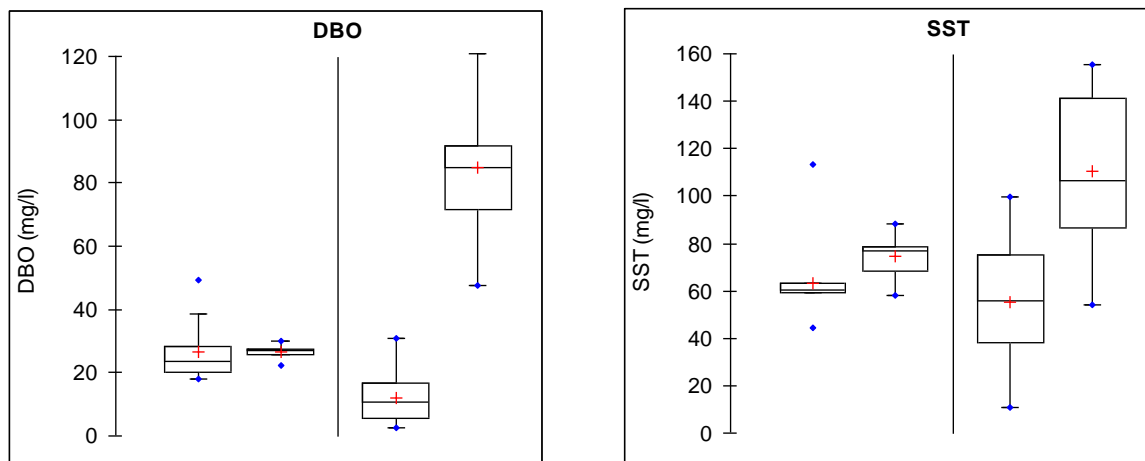


Figura 4 – Concentraciones de diseño para alcanzar un 95% de cumplimiento y concentraciones medias observadas



Para las PTAR de lodos activados las concentraciones de diseño y observadas son muy similares en ambos parámetros, mostrando incluso la posibilidad de esta tecnología de alcanzar estándares más restrictivos. En el caso de las lagunas existe una diferencia considerable, en particular para la DBO, entre la concentración de diseño necesaria para alcanzar los estándares y la concentración media observada.

Eficiencia de sistemas de desinfección UV y denitrificación

En base a los datos presentados en la Tabla 1, se determinaron en primer lugar la eficiencia de remoción de coliformes y los valores medios de coliformes fecales antes y después de la desinfección UV, los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 – Eficiencia de remoción de coliformes

<i>Planta</i>	<i>Valor medio Coliformes fecales antes del UV (NMP/100ml)</i>	<i>Valor medio Coliformes fecales después del UV (NMP/100ml)</i>	<i>Eficiencia de remoción</i>
Canelones	12973	336	97.1%
Durazno	13212	297	96.4%
Melo	26163	643	95.8%
Minas	47549	39	99.2%
San José	18759	385	95.6%

Se observa un excelente desempeño de los sistemas UV, con eficiencias superiores al 95% en todos los casos y valores medios de coliformes fecales a la salida que no superan en ningún caso los 1000 NMP/100ml.

En segundo lugar se intentó realizar una evaluación respecto a la eficiencia de remoción de nitratos con los distintos sistemas de las PTAR de lodos activados, vale decir con y sin recirculación de licor mezcla. Si bien la planta que presenta menor valor medio de nitratos en su efluente (7.4 mg/l) es una planta que cuenta con este sistema de recirculación y la que presenta mayores valores (19.5 mg/l) no lo tiene instrumentado, los resultados fueron elaborados en función de una serie de datos tan escueta que no es posible formular conclusiones definitivas.

CONCLUSIONES

Este trabajo intenta ser una devolución a la comunidad profesional nacional, de los resultados alcanzados en la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales con tratamiento secundario en el Uruguay. En particular pretende generar antecedentes que sirvan como herramienta para la utilización de conceptos probabilísticos tanto en el diseño como la operación, basados en el desempeño de PTAR locales.

Los resultados del estudio indican principalmente una clara diferencia entre el desempeño de las PTAR con tecnología de lodos activados y las de sistema de lagunas. Mientras que las primeras muestran porcentajes de cumplimiento de la normativa referente a DBO₅ de más del 95% en todos los casos, los sistemas de lagunas superan porcentajes de cumplimiento del 36%. Respecto al parámetro SST las diferencias son menos acentuadas verificándose el cumplimiento de la normativa para PTAR de lodos activados en valores superiores al 85% mientras que los sistemas de lagunas se ubican sobre el 56%. Si bien esta relación de resultados era previsible por parte de los técnicos involucrados tanto en el diseño como en la operación de estas PTAR, se considera de interés la cuantificación lograda.

Respecto al análisis de fiabilidad los resultados muestran para las condiciones operativas reales de cada planta cuales deberían ser los valores de diseño para que se cumplan los estándares con un nivel de fiabilidad de 95%. Se observa que los menores CDF fueron obtenidos para las plantas de lodos activados indicando así su potencial para cumplir con estándares menores al establecido en este estudio. En el mismo sentido las PTAR de lodos activados son las que presentan valores medios de funcionamiento menores a los valores medios de diseño necesarios para alcanzar el nivel de fiabilidad especificado de 95%.



Finalmente los resultados presentados respecto a concentración de nitratos en el efluente y eficiencia de remoción del sistema UV indican un cumplimiento estricto no solo de la normativa sino también de los parámetros de diseño establecidos, alcanzando valores menores a 25 mg/l de NO₃ como N y a 1000 NMP/100 ml, respectivamente. En la medida en que se cuente con una base de datos más extensa, será posible el análisis de las distintas eficiencias de remoción de los sistemas de denitrificación.

Se espera que las conclusiones obtenidas sobre el nivel de fiabilidad de las plantas sean de utilidad para los proyectistas y operadores a la hora de predecir la eficiencia del tratamiento e incluso para la DINAMA ya que dispondrá de información de base para evaluar futuras modificaciones en los límites regulatorios.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- COLMENAREJO, M.F.; RUBIO, A.; SANCHEZ, E.; VICENTE, J.; GARCÍA, M.G.; BORJA, R. Evaluation of municipal wastewater treatment plants with different technologies at Las Rozas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 81, 399-404. 2006
- 2.- OLIVEIRA, S.C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plants. *Water Res.* (2007), doi:10.1016/j.watres.2007.09.001
- 3.- METCALF & EDDY, 1998. *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera Ed. Mc Graw-Hill, México. 205p.
- 4.- NIKU, S; SCHROEDER, E.D.; SAMANIEGO, F.J. 1979. Performance of activated sludge process and reliability-based design. *J. Water Pollut. Control Assoc.* 51 (12), 2841-2857.