



Confiabilidad y viabilidad para la reutilización de los efluentes de las PTAR que operan con lagunas de estabilización en cundinamarca¹

Jhon Alexander Méndez Sayago² / Fernando Carreño Sayago³
Hugo Alfonso Hernández Escolar⁴

Reliability and feasibility for the reuse of Waste Water Treatment Plants (WWTP) that operate with stabilization ponds in Cundinamarca

Confiabilidade e viabilidade de reutilização de efluentes das Estações de Tratamento de Esgoto nas lagoas de estabilização do estado de Cundinamarca

RESUMEN

La confiabilidad de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se puede definir como la probabilidad de que el sistema de tratamiento cumpla con los vertimientos establecidos en la normativa vigente. En esta investigación se calculó el coeficiente de confiabilidad como parámetro objetivo de cada depuradora, y se relacionaron los valores promedio de las concentraciones de los efluentes de los parámetros de DBO₅ y SST con los parámetros objetivo, para determinar la viabilidad de que los efluentes de las distintas PTAR puedan ser reutilizados. Entre las PTAR analizadas se encontró que las de Cajicá, Cogua, Chocontá y Gachancipá, en las cuales sus efluentes presentan medias por debajo de 30 mg/L en DBO y próximas a este valor en SST, poseen un potencial de reutilización para diferentes fines agrícolas y

¹Este artículo es resultado del proyecto de investigación: "La Ineficiencia en el control de costos de reducción de la contaminación, para el caso de usuarios industriales y comerciales con vertimiento a la red de alcantarillado en Colombia", financiado por la Universidad los Libertadores durante el año 2011. ²Ing. Civil, máster en Economía y Economía Ambiental, profesor asistente, Departamento de Economía, Investigador Grupo GERA, Universidad del Valle. Cali, Colombia, Jhon.mendez@correounivalle.edu.co. ³Ing. Biotecnológico, candidato a máster en Hidrosistemas, profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad EAN. Bogotá, Colombia, ucarreno.d@correo.ean.edu.co. ⁴Economista, máster en Economía, profesor de la Universidad los Libertadores, Bogotá, Colombia, hahernandez@ulibertadores.edu.co

Correspondencia: Jhon Alexander Méndez Sayago, e-mail: Jhon.mendez@correounivalle.edu.co

Artículo recibido: 02/03/2011, Artículo aprobado: 01/06/2011

ambientales, ya que la variación en el costo relativo de abatimiento de la contaminación para el cumplimiento de la normativa no sería alto.

Palabras clave: planta de tratamiento de aguas residuales, reuso de aguas residuales, costo de abatimiento.

ABSTRACT

Waste Water Treatment Plants' reliability can be defined as the system's probability to accomplish with the discharges established by current rules. In this research work, the reliability coefficient as the objective parameter of each purifier was calculated, and the average values of the concentrations of DBO_5 and SST were related with the objective parameters in order to determine the feasibility to reuse the effluents from the WWTP. Among the WWTP analyzed, the ones from Cajicá, Cogua, Chocontá and Gachancipá, in which the effluents have averages below 30 mg/L in BOD and close to this value in SST, have a potential for being reused for agricultural and environmental purposes, because the variation of the relative cost for the abatement of the contamination to meet the rule would not be high.

Key words: waste water treatment plant, waste water reuse, abatement cost.

RESUMO

Os efluentes das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) nas lagoas de estabilização do estado de Cundinamarca podem ser reutilizados na agricultura. Para tanto, deve-se determinar a Confiabilidade da ETE, que é definida como probabilidade do sistema atingir as normativas estabelecidas para derrame de resíduos. O coeficiente de confiabilidade foi calculado como parâmetro objetivo para cada estação de tratamento. Os valores médios das concentrações de efluentes, parâmetros DBO_5 e TSS, foram relacionados com os parâmetros objetivos para determinar a viabilidade de reutilização dos efluentes de cada ETE. Entre as ETEs analisadas verificou-se que as do município de Cajicá, Cogua, Chocontá e Gachancipá, em que os efluentes tiveram médias abaixo de 30 mg/L de DBO_5 e valores para TSS próximos a este valor, possuem potencial para reutilização com fins agrícolas ambientais, pois o custo relativo à redução da poluição para o atendimento das normativas vigentes não é tão alto.

Palavras importantes: redução de custos, estação de tratamento de esgoto, reutilização de águas residuais.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización constituyen la tecnología de tratamiento de aguas residuales más costo-effective para la remoción de microorganismos patógenos, porque funciona por medio de mecanismos de desinfección natural. El agua residual en estos sistemas de tratamiento es generalmente de origen doméstico, con una carga orgánica que puede ser tratada a través de procesos químicos, físicos y, biológicos, basados en los principios de autodepuración de ríos y lagos, proporcionando un efluente de calidad superior a los tratamientos automatizados.

Las lagunas de estabilización son fundamentalmente reservorios artificiales, que comprenden una o varias series de lagunas anaerobias, facultativas y de maduración. El tratamiento primario se lleva a cabo en la laguna anaerobia, la cual se diseña principalmente para la remoción de materia orgánica suspendida (SST) y parte de la fracción soluble de materia orgánica (DBO_5). La etapa secundaria en la laguna facultativa remueve la mayoría de la fracción remanente de la DBO_5 soluble por medio de la actividad coordinada de algas y bacterias heterotróficas. Las lagunas de maduración, en la tercera etapa, tienen como propósito la remoción de microorganismos patógenos y nutrientes.

Un estudio del Banco Mundial¹ encontró que para los niveles de costos de los sistemas de lagunas de estabilización, aun las tierras más productivas en países en desarrollo son lo suficientemente económicas para asegurar la factibilidad de las lagunas de estabilización como alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

El rendimiento, la confiabilidad y la consistencia de estos sistemas de tratamiento depende de muchos factores tales como: la composición del afluente, el mantenimiento y el diseño empleado, entre otros, factores deben tenerse en cuenta para el cumplimiento de la normativa sobre reutilización de las aguas residuales.

Niku, Schroeder y Samaniego² propusieron el coeficiente de confiabilidad (CDF), como medida para estimar el funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales, relacionando valores medios de las concentraciones de los efluentes de los parámetros de calidad, con las limitaciones que hay que cumplir, y con base en análisis de probabilidad.

La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), como entidad encargada del control ambiental en la cuenca del río Bogotá, construyó una serie de plantas de tratamiento de aguas residuales en varios municipios que se encuentran ubicados en la parte alta y media de la cuenca del río Bogotá. Dentro de los objetivos y metas de funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales se encuentran: el cumplir las normas de vertimiento, proteger la salud de las personas, prevenir la transmisión de enfermedades; proteger el medioambiente y garantizar el aprovechamiento de las aguas residuales (reutilización).

El artículo 72 del Decreto 1594 de 1984 estableció normas de vertimiento en Colombia³, que exigen a todos los usuarios con vertimientos directos a un cuerpo de agua, al menos, un 80% de remoción de la carga contaminante de DBO y SST. Posteriormente, el artículo 28 del Decreto 3930 de octubre de 2010 le concedió un plazo de dos meses al Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, para que expidiera las normas de vertimientos puntuales a aguas superficiales. Sin embargo, el artículo 1 del Decreto 4728⁴ modificó el plazo de este mandato, y le otorgó diez meses para la fijación de dichos límites. Por tanto, la normativa vigente corresponde a lo establecido en el Decreto 1594 de 1984.

En la práctica, Colombia no cuenta con una reglamentación que incluya los criterios mínimos de calidad que deba cumplir el agua residual para reúso, de forma tal que no se presenten daños a la salud humana y al ambiente. Pero en general, los países que tienen una normativa sobre el reúso de las aguas residuales han tomado como referencia lo establecido por la Agencia estadounidense de Protección Ambiental (USEPA, por sus siglas en inglés).

La USEPA en 2004⁵ clasificó el reúso en ocho categorías, de acuerdo con la calidad del agua: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reúso indirecto potable. Para usos urbanos, cultivos de productos que se consumen crudos y recreación, la concentración de DBO y SST no debe sobrepasar los 10 mg/L. Para otros usos diferentes, en donde el contacto no generaría un peligro inminente para el ser humano, como por ejemplo, en la industria, usos ambientales y en construcción, la normativa no es tan severa, y su utilización se podría dar si tiene una concentración por debajo de 30 mg/L de DBO y SST.

En este artículo se utilizó el registro histórico mensual de los efluentes de DBO y SST de 14 plantas de tratamiento de aguas residuales de Cundinamarca que emplean el sistema o la tecnología de lagunas de estabilización, con una base de datos de cinco años, desde agosto del 2005 hasta agosto de 2010, para estimar el coeficiente de confiabilidad, y se determinó el funcionamiento del sistema, relacionando los valores medios de los parámetros de calidad, con las limitaciones ambientales para la reutilización del agua residual tratada.

CONFIABILIDAD

En el contexto del funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales, se puede definir la confiabilidad como la probabilidad de que se presente un funcionamiento adecuado, definido como la capacidad de satisfacer los criterios de descarga establecidos por la normativa ambiental vigente.

Los criterios convencionales de diseño usados en la dimensión de plantas de tratamiento asumen condiciones de estado estables, pero las depuradoras rara vez operan bajo estas condiciones. Las fluctuaciones en la carga orgánica e hidráulica de entrada, las condiciones ambientales y las variaciones operacionales son poco consideradas en el diseño⁶.

El rendimiento de una planta de tratamiento y la confiabilidad en el cumplimiento de las limitaciones normativas son aspectos importantes en la elección de los procesos que deben constituir un sistema, para asegurar que cierto diseño de una planta de tratamiento logre posteriormente, en su funcionamiento, concentraciones del efluente que sean menores o iguales a los límites establecidos por la ley⁷.

Esto lleva a plantearse la siguiente pregunta: ¿Qué concentración media garantiza que la concentración de un efluente se halle por debajo de la media, con un nivel determinado de confiabilidad? La respuesta a este interrogante es el coeficiente de confiabilidad, que relaciona los valores medios de las concentraciones de los efluentes, con las limitaciones que hay que cumplir basándose en un análisis de confiabilidad. Oliveira y Von Sperling⁸ referencian que Niku⁹ desarrolló un coeficiente de confiabilidad (CDF), a partir de la función de distribución log normal, que relaciona los valores medios de las concentraciones de los constituyentes (valores de proyecto) con las limitaciones que hay que cumplir, basándose en análisis de probabilidad.

El valor medio de la concentración propuesta puede obtenerse empleando la ecuación (1):

$$M_x = X_s * CDF \quad (1)$$

Donde:

M_x : Media geométrica del parámetro objetivo

X_s : Límite establecido por la normativa.

CDF : Coeficiente de confiabilidad.

El parámetro objetivo es aquel dato histórico que proporciona el funcionamiento actual de la depuradora y orienta al operador de la PTAR sobre el cumplimiento de la normativa establecida. Este parámetro se obtiene al relacionar el coeficiente de confiabilidad con la normativa que se debe cumplir.

El coeficiente de confiabilidad se determina de acuerdo con la ecuación (2):

$$CDF = \sqrt{(V_x^2 + 1)} * \exp(-Z_{1-\alpha}) * \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \quad (2)$$

Donde:

V_x : Coeficiente de variación, cuyo valor es el cociente entre la desviación típica σ_x y la media m_x de la distribución existente.

$Z_{1-\alpha}$: Variable aleatoria normal estándar para una confiabilidad $1-\alpha$.

Para poder calcular el coeficiente de confiabilidad de Niku a partir de la ecuación (2), es necesario demostrar primero que los parámetros de calidad en el efluente se distribuyen como una función de distribución log normal. Varios autores han encontrado parámetros de calidad efluentes e incluso afluentes (DBO, SST, NT y PT, por ejemplo), donde la distribución de probabilidad log normal es la que mejor se ajusta al comportamiento observado, verificado con la prueba de ajuste de bondad de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia del 5%¹⁰

MATERIALES Y MÉTODO

El desarrollo de esta investigación se planteó en dos fases: en la primera fase se realizó un análisis estadístico de las eficiencias de las depuradoras (sistemas lagunares); en la segunda fase se determi-

nararon los diferentes coeficientes de confiabilidad; posteriormente se comparó la media geométrica de los efluentes de las sustancias contaminantes DBO_5 y SST con el parámetro objetivo, para determinar el cumplimiento de la normativa internacional de reutilización del agua, y por último, se determinó el costo adicional de funcionamiento de las plantas de tratamiento para el cumplimiento de la normativa.

Colección y descripción de los datos

En esta fase de la investigación se recopiló y digitalizó la información pertinente para la ejecución de este estudio. Las plantas de tratamiento que forman parte de la investigación son las de los municipios de Cajicá, Cogua, Chía, Chocontá, Gachancipá, Madrid I, Madrid II, Mosquera, Subachoque, Suesca, Tocancipá, Tabio, Zipaquirá I y Zipaquirá II. Para un total de 14 sistemas de tratamiento evaluados.

Los parámetros de calidad utilizados son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y los sólidos suspendidos totales (SST).

Los caudales promedio, y las concentraciones promedio de DBO_5 y SST, así como las eficiencias de remoción histórica asociadas a los diferentes sistemas lagunares, se presentan en la tabla I.

Tabla I. Caudales, concentraciones medias y remociones de los diferentes sistemas de tratamiento para el período de estudio o 2005-2010

PTAR	Caudal promedio (L/s)	DBO(mg/L)			SST(mg/L)		
		Afluente	Efluente	Eficiencias (%)	Afluente	Efluente	Eficiencias (%)
Cajicá	35	252	21	92	148	31	79
Chía	36	258	55	79	205	59	71
Chocontá	35	166	28	83	183	40	78
Cogua	17	173	20	89	132	31	77
Gachancipá	30	285	28	90	238	34	86
Madrid I	50	306	36	88	236	72	69
Madrid 2	15	320	79	75	339	95	72
Mosquera	80	259	66	75	220	75	66
Subachoque	8	276	56	80	169	64	62
Suesca	15	430	63	85	689	109	84
Tabio	13	251	55	78	268	57	79
Tocancipá	35	324	34	90	238	41	83
Zipaquirá I	20	260	50	81	290	82	72
Zipaquirá 2	63	297	42	86	319	65	80

Fuente: Elaboración propia

La planta con mayor caudal de aguas residuales tratadas es la del municipio de Mosquera con un promedio de 80 L/s; y las de menor caudal de agua son las de los municipios de Subachoque y Tabio con 8 L/s y 13 L/s, respectivamente.

En cuanto a las eficiencias de DBO_5 se encontró que a excepción de Chía, Madrid 2, Mosquera y Tabio, los demás sistemas de tratamiento cumplen en promedio con la normativa establecida sobre la remoción del 80% de la concentración de la contaminación, que exige artículo 72 del Decreto 1594 de 1984¹¹.

En las remociones de SST solo los sistemas de tratamiento de Gachancipá, Suesca, Tocancipá y Zipaquirá 2 cumplen en promedio con la normativa establecida para la remoción del 80% que exige artículo 72 del Decreto 1594 de 1984.

Se puede resumir que mientras el 71.5% de las PTAR cumplen en promedio con la remoción del 80% de su carga contaminante de DBO₅, solo el 28.5% de las mismas cumple con la remoción del 80% de la carga contaminante de SST, que exige la normativa ambiental colombiana.

RESULTADOS

Con los datos obtenidos mes a mes de los parámetros de DBO₅ y SST, para el periodo de estudio para cada sistema de tratamiento, se determinaron las distribuciones de probabilidad de los parámetros de interés de las plantas, para validar el uso de la ecuación (2). La comprobación del tipo de distribución se realizó mediante la prueba de bondad y ajuste de Kolmogorov con un nivel de significancia del 5%. Los resultados aparecen en la tabla 2.

Tabla 2. Pruebas de de Kolmogorov

PTAR	Parámetro	P-value Distribución		
		Gamma	Log-normal	Normal
Cajicá	DBO	0,84	0,66	0,26
	SST	0,92	0,90	0,45
Chía	DBO	0,84	0,91	0,10
	SST	0,36	0,56	0,02
Chocontá	DBO	0,28	0,34	0,01*
	SST	0,51	0,36	0,57
Cogua	DBO	0,93	0,98	0,50
	SST	0,93	0,99	0,39
Gachancipá	DBO	0,28	0,69	0,02*
	SST	0,36	0,44	0,19
Madrid 1	DBO	0,94	0,96	0,15
	SST	0,78	0,99	0,20
Madrid 2	DBO	0,33	0,70	0,04*
	SST	0,88	0,45	0,61
Mosquera	DBO	0,70	0,51	0,52
	SST	0,33	0,07	0,18
Subachoque	DBO	0,91	0,99	0,32
	SST	0,11	0,04*	0,71
Suesca	DBO	0,59	0,95	0,00*
	SST	0,52	0,27	0,35
Tabio	DBO	0,85	0,66	0,72
	SST	0,81	0,85	0,15
Tocancipá	DBO	0,02*	0,17	0,00*
	SST	0,44	0,51	0,04*
Zipaquirá 1	DBO	0,78	0,99	0,19
	SST	0,97	0,75	0,32
Zipaquirá 2	DBO	0,55	0,95	0,03*
	SST	0,76	0,97	0,13

* Con $\alpha=5\%$ se rechaza la Ho: Los efluentes siguen un determinado tipo de distribución.

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla anterior, el ajuste de los parámetros de la DBO_5 es de tipo distribución log normal, y se podrá emplear la ecuación (2). En los efluentes de SST, la gran mayoría de las depuradoras se ajustaron a la distribución log normal, excepto la PTAR de Subachoque, que se ajustó mejor a una distribución normal.

Por otra parte, dada esta distribución log normal de los efluentes, se propuso usar la media geométrica, en vez de la media aritmética, para caracterizar de mejor forma su comportamiento medio¹².

Cálculo del coeficiente de confiabilidad e interpretación

Con los datos de los efluentes de DBO_5 y SST de los periodos del estudio de cada uno de los sistemas de tratamiento, que se ajustaron a una distribución Log-normal, se determinó el parámetro objetivo a través de la ecuación (2), relacionándolo con la normativa de la EPA de reutilización del agua residual con un nivel de confiabilidad del 80%. Estos estándares son de 10 mg/L y de 30 mg/L de DBO_5 y SST. Es decir, de la ecuación (1) se despeja .

En las tablas 3 y 4 se muestran los diferentes coeficientes de confiabilidad, parámetro objetivo, y la media geométrica de la DBO_5 y SST, respectivamente, estimados con base en las series de tiempo de concentraciones de DBO_5 y SST para las diferentes plantas de tratamiento.

Tabla 3. Coeficientes de confiabilidad y parámetros objetivos de DBO_5 para reutilización

PTAR	Coefficiente de Confiabilidad	Coefficiente de variación	Parámetro Objetivo 10 mg/L	Parámetro Objetivo 30 mg/L	Media geométrica
Cajicá	0.89	0.81	8.86	26.59	20.74
Chía	0.91	0.98	9.11	27.32	54.70
Chocontá	0.70	0.53	9.98	29.93	28.86
Cogua	0.80	0.61	6.85	20.54	20.48
Gachancipá	0.88	0.78	8.83	26.50	28.57
Madrid 1	0.75	1.85	7.53	22.59	36.64
Madrid 2	0.71	0.81	7.08	21.24	78.61
Mosquera	0.70	0.95	7.02	21.06	66.01
Subachoque	0.87	0.56	8.71	26.14	56.89
Suesca	0.71	0.74	7.13	21.40	63.51
Tabio	0.88	0.73	8.78	26.35	55.43
Tocancipá	0.72	0.66	7.23	21.68	33.76
Zipaquirá 1	0.71	1.38	7.14	20.13	68.60
Zipaquirá 2	0.70	0.90	7.03	21.10	41.80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Coeficientes de confiabilidad y parámetros objetivos de reutilización de SST

PTAR	Coefficiente de Confiabilidad	Coefficiente de variación	Parámetro Objetivo 10 mg/L	Parámetro Objetivo 30 mg/L	Media geométrica
Cajicá	0.70	1.17	7.04	21.12	32.34
Chía	0.87	0.65	8.73	26.19	59.49
Chocontá	0.88	0.72	8.77	26.32	40.71
Cogua	0.54	0.72	5.39	16.17	31.29
Gachancipá	0.70	0.96	6.63	19.89	34.73
Madrid 1	0.74	0.55	7.39	22.17	75.69
Madrid 2	0.73	0.63	7.26	21.78	91.41
Mosquera	0.75	0.86	7.05	21.15	76.02
Subachoque	0.87	0.71	8.77	26.31	64.37
Suesca	0.71	0.76	7.12	21.35	109.87
Tabio	0.88	0.63	8.78	26.35	57.08
Tocancipá	0.71	0.85	7.05	21.16	40.82
Zipaquirá 1	0.72	0.67	7.20	21.61	81.94
Zipaquirá 2	0.71	0.87	7.10	21.29	64.53

Fuente: Elaboración propia

Los coeficientes de confiabilidad de las PTAR para DBO_5 se encuentran en el rango entre 0,70 y 0,81; y los de SST entre 0,70 y 0,88. Entre menos variación presente la concentración de la contaminación de los efluentes de una depuradora a través del tiempo, mejor será su confiabilidad. Las depuradoras con coeficientes de confiabilidad más cercanos al valor de 1,00 son las más consistentes. No obstante, hay que advertir que esa variabilidad también está influenciada por la concentración de la contaminación de los afluentes.

Para una mejor visualización, en las figuras 1 a 4 se compara la media geométrica actual de cada depuradora, con los parámetros objetivos que posibilitan el respectivo cumplimiento de la normativa, para cada uno de los parámetros estipulados.

La figura 1 muestra que las PTAR de Cajicá, Cogua y Chocontá tienen una media geométrica por debajo del parámetro objetivo de 30 mg/L de DBO_5 , así que existe un 80% de confiabilidad o más, de que sus vertimientos no excedan esta concentración de DBO_5 . La PTAR de Gachancipá tiene un nivel de confiabilidad cercano al 80%, porque su media geométrica excede pero solo levemente el parámetro objetivo de 30 mg/L de DBO_5 . Las PTAR de Chía, Madrid 2, Mosquera, Suesca, Tabio, Zipaquirá 1 y Zipaquirá 2, presentan medias geométricas muy por encima del parámetro objetivo de 30 mg/L de DBO_5 .

Según la figura 2, al igual que para el parámetro de DBO_5 , las PTAR con mejores resultados en cuanto al parámetro objetivo de 30 mg/L de SST, para una posible reutilización del agua tratada fueron Cajicá, Chocontá, Cogua y Gachancipá, aunque en general, todas presentan una media geométrica por encima de este parámetro objetivo.

En las figuras 3 y 4 se presenta la comparación de la media geométrica y el parámetro objetivo para el cumplimiento de la reutilización de 10 mg /L de DBO_5 y SST. Se evidencia que ninguna PTAR cumpliría con una posible utilización de los efluentes hacia algún uso urbano o para cultivos de productos que se consumen crudos.

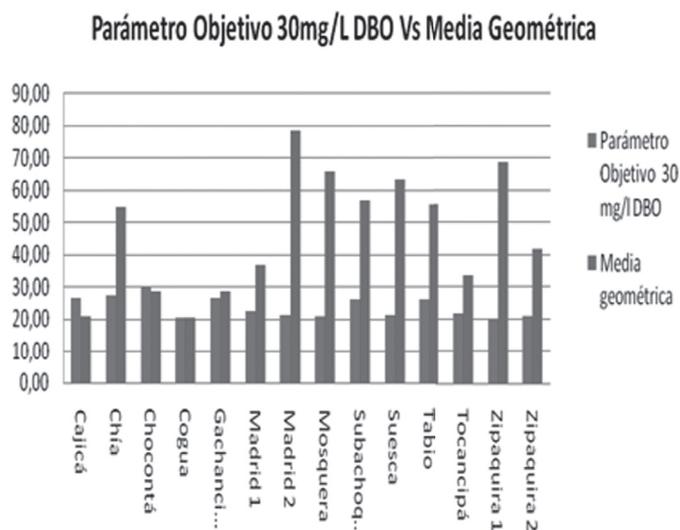


Figura 1. Parámetro objetivo de 30 mg/L de DBO_5 frente a media geométrica

Fuente: Elaboración propia

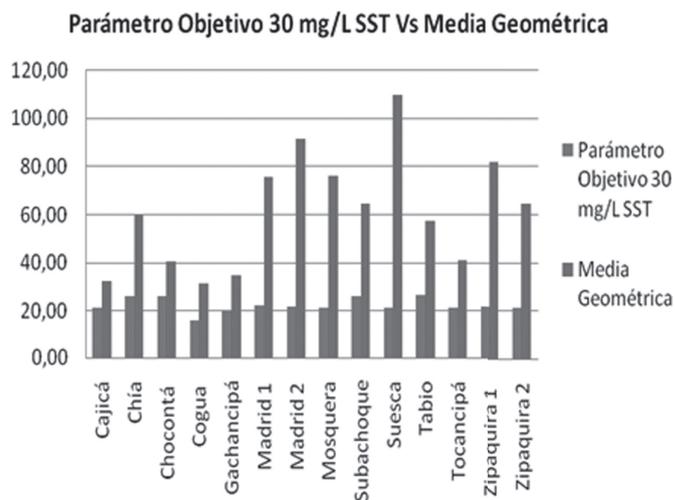


Figura 2. Parámetro objetivo de 30 mg/L de SST frente a media geométrica

Fuente: Elaboración propia

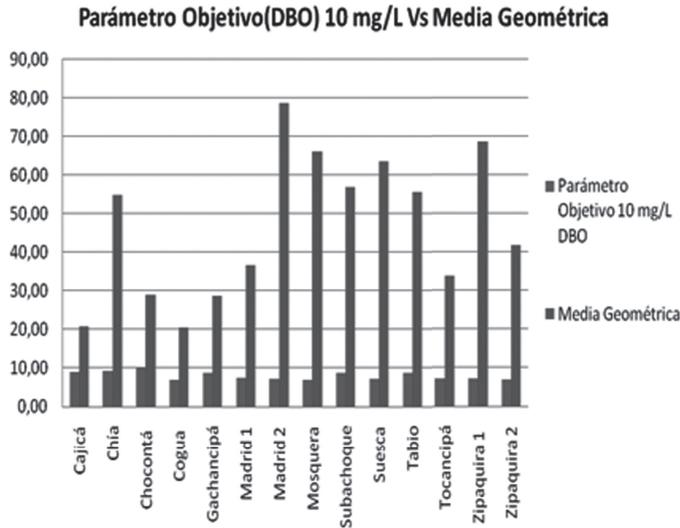


Figura 3. Parámetro objetivo de 10 mg/L de BDO frente a media geométrica

Fuente: Elaboración propia

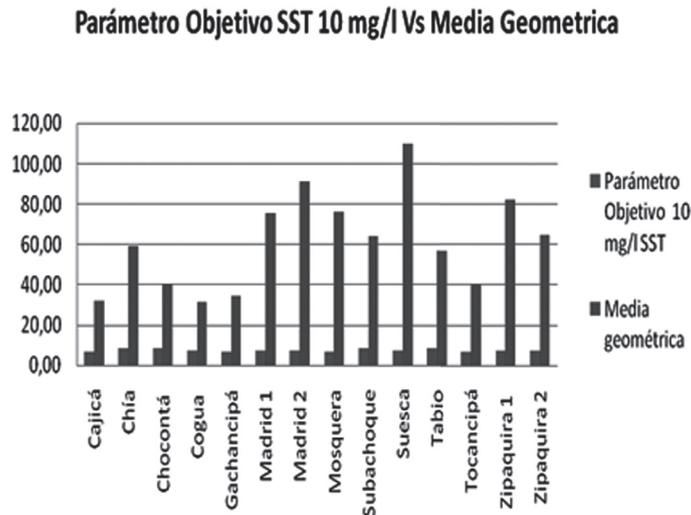


Figura 4. Parámetro objetivo 10 mg/L de SST frente a media geométrica

Fuente: Elaboración propia

Costo de reducción de la concentración de DBO_5 y sst en los efluentes

Para estimar el costo total de cumplimiento de los distintos parámetros objetivo (10 mg/L y 30 mg/L para DBO_5 y SST), se estimó una función de costo total de reducción de la contaminación para una muestra ampliada de 24 plantas de tratamiento de aguas residuales, todas bajo la supervisión de la CAR de Cundinamarca: Cajicá, Cogua, Chía, Chocontá, Gachancipá, Madrid I, Madrid II, Mosquera, Subachoque, Suesca, Tocancipá, Tabio, Zipaquirá I, Zipaquirá II, Anapoima, Suesca, Tenjo; y adicionalmente, las plantas de Bojacá, Facatativá, El Rosal, Funza, Nemocón, La Calera, Guatavita, Ubaté.

La función estimada retoma la propuesta de Dasgupta¹² y Rudas¹³

$$C_i = e^{\alpha_0} * Q^{\alpha_1} * \left(\frac{CC_E}{CC_A}\right)^{\beta} \quad (3)$$

Donde:

C_i = Es el costo total anual de operación y mantenimiento de la PTAR .

Q = Tamaño del proceso de tratamiento asumido por la PTAR , medido en el caudal de agua tratada (en metros cúbicos al año).

CC_E = Concentración de la contaminación del efluente medido en mg/L de carga combinada.

CC_A = Concentración de la contaminación del afluente medido en mg/L de carga combinada.

Dasgupta y otros¹² estiman una función de costo total de reducción de la contaminación que depende de cuatro parámetros de contaminación: SST, DBO_5 , DQO y otras sustancias contaminantes. En esta investigación, la única información disponible es la de los parámetros DBO_5 y SST. Sin embargo, la estimación econométrica de la función de costos, incluyendo el par de parámetros, genera problemas de multicolinealidad, probablemente debido a que en algunos procesos de reducción de la concentración de una sustancia contaminante, también se reduce la otra. Rudas¹³ soluciona este problema utilizando la carga combinada, una expresión que combina las concentraciones de SST, DBO_5 y DQO para obtener una única medida de concentración de la contaminación. La carga combinada (CC) es calculada en este artículo a partir de la expresión:

$$CC = 0.7071 * SST + 0.7071 * DBO_5 \quad (4)$$

Los ponderadores (0,7071 y 0,7071) son extraídos del eigenvector construido a partir del eigenvalor más grande de la matriz de correlación entre las observaciones de DBO_5 y SST. Este eigenvector es el que produce la mayor varianza de la combinación lineal de los dos parámetros de contaminación. A pesar de que tienen dos matrices de correlación, una para el afluente y otra para el efluente, para las dos matrices de correlación los eigenvalores fueron muy parecidos, y los primeros eigenvectores prácticamente iguales:

$$\text{eigenvalores } X'X_{Efluente} = (39,9276; 6,0724)$$

$$\text{Primer eigenvector } X'X_{Efluente} = (0,7071; 0,7071)$$

$$\text{eigenvalores } X'X_{Afluente} = (39,8819; 1181)$$

$$\text{Primer eigenvector } X'X_{Afluente} = (0,7071; 0,7071)$$

La información de los costos se obtuvo del estudio de costos y tarifas para el tratamiento de aguas residuales de la CAR para el año 2008. El modelo econométrico a estimar es el siguiente:

$$\ln C_i = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Q_i + \beta * \ln rCC_i + e_i \quad (5)$$

Donde:

rCC_i : Es la razón entre las cargas combinadas de salida y entrada a la PTAR $\left(\frac{CC_E}{CC_A}\right)$. Esta variable es el inverso de la remoción de la contaminación.

e_i : Perturbación aleatoria.

El modelo econométrico estimado aparece en la tabla 5.

Tabla 5. Estimación econométrica de la función de costos de abatimiento

Dependent Variable: LOG(COSTO)				
Method: LeastSquares				
Included observations: 24				
Newey-West HAC Standard Errors & Covariance (lag truncation=2)				
Variable	Coefficient	Std. Error**	t-Statistic	Prob.
C	12.99751	2.409265	5.394804	0.0000
LOG(Q)*	0.489336	0.210316	2.326671	0.0301
LOG(RCC)*	-0.362238	0.169407	-2.138265	0.0444
R-squared	0.298760	Mean dependentvar		18.70233
Adjusted R-squared	0.231975	S.D. dependentvar		0.623937
S.E. of regression	0.546800	Akaikeinfocriterion		1.747001
Sum squaredresid	6.278796	Schwarzcriterion		1.894258
Log likelihood	-17.96402	Hannan-Quinncrier.		1.786069
F-statistic	4.473465	Durbin-Watson stat		1.743356
Prob(F-statistic)	0.024077			

*Variable significativa con un nivel de significancia $\alpha=0.05$.

**Los errores estándar calculados son robustos a la heterocedasticidad y la autocorrelación.

Fuente: Elaboración propia

La estimación econométrica revela, como se esperaba, que el costo de abatimiento de la contaminación depende tanto del caudal de agua tratado Q , como de la remoción de la contaminación rCC . El coeficiente de determinación permite establecer que un 30% de la variabilidad de la variable dependiente es explicada por el modelo. La parte determinística de la función de costos de abatimiento estimada corresponde a:

$$C_i = e^{12.99751} * Q^{0.489336} * \left(\frac{CC_E}{CC_A} \right)^{-0.362238} \quad (6)$$

Obsérvese en la ecuación (6) que los signos de los coeficientes α_1 y β_1 son los esperados. Los costos de abatimiento se incrementan con el caudal de agua tratada ($\alpha_1 > 0$) y disminuyen cuando aumenta el inverso de la remoción (β_1), de forma tal que los costos de abatimiento aumentan con la remoción.

Costo de cumplimiento de la normativa de reúso

Los resultados de la estimación pueden ser utilizados para encontrar el incremento en los costos de abatimiento de la concentración de la contaminación, en los que sería necesario incurrir para el cumplimiento de la normativa de reúso del agua. Considérense las funciones de costos:

$$C_{i,PO} = e^{12.99751} * Q^{0.489336} * \left(\frac{CC_{E,PO}}{CC_A} \right)^{-0.362238} \quad (7)$$

$$C_{i,MG} = e^{12.99751} * Q^{0.489336} * \left(\frac{CC_{E,MG}}{CC_A}\right)^{-0.362238} \quad (8)$$

Donde $C_{i,PO}$ es el costo de abatimiento hasta alcanzar el parámetro objetivo, y $C_{i,MG}$ es el costo de abatimiento promedio actual (utilizando la media geométrica). La variación porcentual en los costos de abatimiento ($\% \Delta Costo$) que requerirá el cumplimiento de la normativa de reúso será:

$$\begin{aligned} \% \Delta Costo &= \left(\frac{C_{i,PO} - C_{i,MG}}{C_{i,MG}}\right) * 100 \\ &= \left(\frac{C_{i,PO}}{C_{i,MG}} - 1\right) * 100 \\ &= \left[\left(\frac{CC_{E,PO}}{CC_{E,MG}}\right)^{-0.362238} - 1\right] * 100 \end{aligned} \quad (10)$$

Las variaciones porcentuales en los costos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Incremento en los costos de abatimiento para el cumplimiento de la normativa para DBO₅ y SST sobre reúso del agua

PTAR	Parámetro Objetivo 10 mg/L CC	Parámetro Objetivo 30 mg/L CC	Media geométrica	10 mg/L de CC	30 mg/L de CC
Cajicá	11.24	33.74	37.53	55%	4%
Chía	12.61	37.84	80.74	96%	32%
Chocontá	13.26	39.77	49.19	61%	8%
Cogua	8.65	25.96	36.61	69%	13%
Gachancipá	10.93	32.80	44.76	67%	12%
Madrid 1	10.55	31.65	79.43	108%	40%
Madrid 2	10.14	30.42	120.22	145%	65%
Mosquera	9.95	29.85	100.43	131%	55%
Subachoque	12.36	37.09	85.74	102%	35%
Suesca	10.08	30.23	122.60	147%	66%
Tabio	12.42	37.26	79.56	96%	32%
Tocancipá	10.10	30.29	52.74	82%	22%
Zipaquirá 1	10.14	29.51	106.45	134%	59%
Zipaquirá 2	9.99	29.97	75.19	108%	40%

Fuente: Elaboración propia

La tabla 6 revela que la viabilidad para la reutilización de los efluentes de las PTAR, hacia algún uso urbano o para cultivos de productos que se consumen crudos (parámetro objetivo de 10 mg/L), requeriría unos costos de tratamiento adicionales relativos bastante altos. Costos desde un 55% más altos, correspondientes a Cajicá, hasta variaciones porcentuales en los costos del 147%, en el caso de

Suesca. La viabilidad de la reutilización de los efluentes en usos en donde el contacto no genere ningún peligro inminente para el ser humano, como en la industria, usos ambientales y en construcción (parámetro objetivo de 30 mg/L), no requiere grandes cambios relativos en los costos para las PTAR de Cajicá, Chocontá, Gachancipá y Cogua. Sin embargo, para las plantas de Madrid 2 y Suesca, los aumentos relativos en los costos de cumplimiento serían los más altos, 66% y 65%, respectivamente.

CONCLUSIONES

Utilizando el registro histórico mensual para el período de estudio de los efluentes de DBO_5 y SST de 14 plantas de tratamiento de aguas residuales en el departamento de Cundinamarca, se estableció que para todas las PTAR, los parámetros de DBO_5 y SST, excepto para Subachoque, se distribuyen bajo una distribución log normal, que aporta evidencia empírica de que esta distribución es la más representativa de los efluentes de las PTAR. Pero también se comprobó que estos datos se ajustan a una distribución tipo Gamma. Así que sería un propósito investigativo legítimo adaptar una ecuación de confiabilidad para este tipo de distribución.

Se determinó que una depuradora es altamente confiable cuando las variaciones de sus efluentes son mínimas. Al obtener el coeficiente de confiabilidad y, a su vez, el parámetro objetivo para los diferentes cumplimientos de la normativa, se comprobó el adecuado funcionamiento de las PTAR de Cajicá, Cogua, Chocontá y Gachancipá, en las cuales la media geométrica está alrededor del parámetro objetivo para usos en donde el contacto no genere ningún peligro inminente para el ser humano, como en la industria, usos ambientales y en construcción. En los demás sistemas de tratamiento, la media geométrica desborda significativamente el parámetro objetivo, lo que implica que estas PTAR requieran inversiones que permitan mejorar la calidad de sus efluentes.

En el estado actual de las depuradoras, ninguna cumple con la norma EPA 2004 para una posible utilización de los efluentes hacia algún uso urbano o para cultivos de productos que se consumen crudos, debido a que estos sistemas de tratamiento presentan unas medias geométricas de DBO_5 y SST que exceden significativamente los parámetros objetivos de 10 mg/L de DBO_5 y SST.

La adaptación de las PTAR para el cumplimiento del parámetro objetivo de 10 mg/L requeriría de un aumento significativo en los costos relativos de abatimiento de las PTAR: incrementos de costos desde 55%, correspondientes a la PTAR de Cajicá, hasta variaciones porcentuales en los costos del 147% en el caso de la PTAR de Suesca.

La mayor viabilidad de la reutilización de los efluentes en usos, en donde el contacto no genere ningún peligro inminente para el ser humano, se presenta en las PTAR de Cajicá, Chocontá, Gachancipá y Cogua, en donde los aumentos relativos en los costos de abatimiento están por debajo del 15%.

La información de los costos adicionales en los que se debe incurrir en cada planta de tratamiento analizada, para cumplir con los parámetros objetivo de la normativa, deben ser comparados con el conjunto de beneficios sociales que pueden obtenerse por el cambio en la calidad de los vertimientos, derivados de la posible reutilización del agua, la disminución del pago de la tasa retributiva y otros beneficios ambientales, y así la autoridad ambiental puede tomar la decisión sobre la factibilidad de la adaptación de las PTAR a los requerimientos de la norma internacional EPA 2004.

REFERENCIAS

1. ARTHUR, J. P. Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries. Technical paper No 7. [En línea]. Washington D.C.:The World Bank, 1983. [Citado el 20 de enero de 2011]. Url disponible en: http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDS_IBank_Servlet?pcont=details&eid=000178830_98101904165457.

2. NIKU, S.; SAMANIEGO, F. and SCHROEDER, E. Discharge Standards Based on Geometric Mean. En: Journal Water Pollution Control Federation. 1981. Vol. 53, No. 4. p. 471-473
3. COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 1594 de 1984: Usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C.: La Presidencia, 1984.
4. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4728 de Diciembre de 2010. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2010.
5. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Guidelines for water reuse. EPA/ 625/R-92/004. Washington D.C.: EPA, 2004.
6. NIKU, S.; SCHROEDER, E. y SAMANIEGO, F. Performance of Activated Sludge Process and Reliability-Based Design. En: Journal Water Pollution Control Federation. 1979. Vol. 51, No. 12. p. 2841-2857.
7. METCALF, Robert y EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3ª Ed. España: McGraw Hill, 1998.
8. OLIVEIRA, S. and VON SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plants. En: Water Research. 2008. Vol. 42, No. 4-5. p. 1182-1194.
9. NIKU, S.; SCHROEDER, E. and SAMANIEGO, F. Performance of Activated Sludge Process and Reliability-Based Design. Op. cit. p. 2850
10. CHARLES, K.; *et al.* Effluent quality from 200 on-site sewage systems: design values for guidelines. En: Water Science and Technology. 2005. Vol. 51, No. 10. p. 163-169.
11. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4728 de Diciembre de 2010. Op. Cit.
12. NIKU, S.; SCHROEDER, E. y HAUGH, R. Reliability and Stability of Trickling Filter Process. En: Journal Water Pollution Control Federation. 1982. Vol. 54, No. 2. p. 129-134.
13. DASGUPTA, S.; *et al.* Water Pollution Abatement costs in Chinese industry. Policy Research Working Paper. 1630. Washington D.C.: The World Bank. Policy Research Department Environment, Infrastructure and Agriculture Division, 1996.
14. RUDAS, Guillermo. Instrumentos económicos y regulación de la contaminación industrial: Primera aproximación al caso del río Bogotá (Colombia). En: II congreso latinoamericano de economistas ambientales y de recursos naturales (ALEAR). Oaxaca. México, 2005.