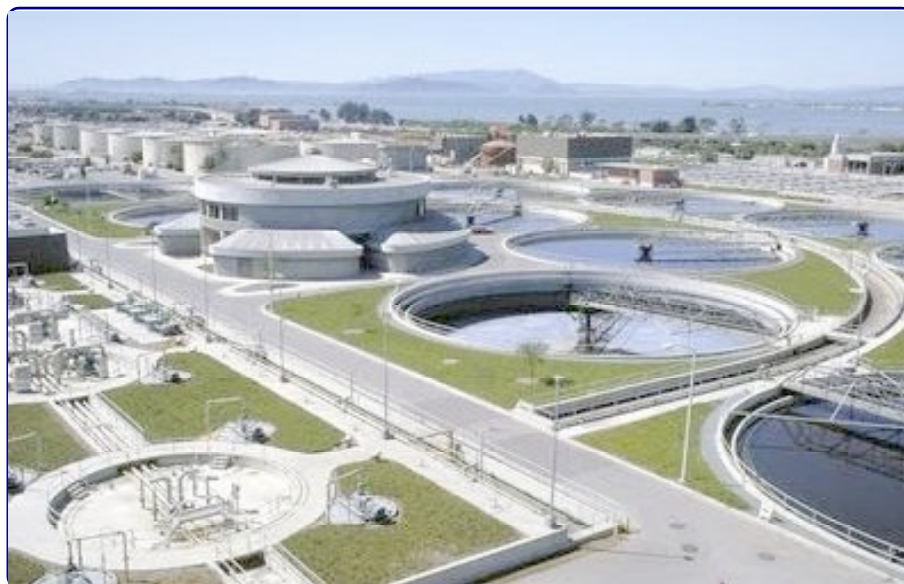

ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES QUE OPERAN CON LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ

ESTIMATION CONFIABILITY OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS THAT OPERATE AT STABILIZATION PONDS IN THE UPPER AND HALF BASIN OF BOGOTA RIVER



RESUMEN

Uriel Fernando Carreño Sayago; M.Sc. Cand.
Profesor
Universidad EAN
Bogota - Colombia.

Jhon Alexander Méndez Sayago M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad del Valle
Cali – Colombia.
jhon.mendez@correounivale.edu.co

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 normatividad vigente. En esta investigación se conoció el coeficiente de confiabilidad y el parámetro objetivo de cada depuradora determinando el funcionamiento de cada una de estas, relacionando valores medios de las concentraciones de los efluentes de los parámetros de DBO y SST con las limitaciones que hay que cumplir para la reutilización, basándose en análisis de probabilidad. Se comprobó que existen PTAR como las de Cajicá, Cogua, Chocontá y Gachancipá donde sus efluentes presentan medias por debajo de 30 mg/L en DBO y próximas en SST, evidenciando que se podrían reutilizar para diferentes fines agrícolas y ambientales.

**Recibido: 10 Mayo 2011 *Aceptado 3 Junio 2011*

PALABRAS CLAVE

Confiabilidad, planta de tratamiento de aguas residuales, reutilización de aguas residuales.

ABSTRACT

The reliability of a wastewater treatment plant can be defined as the probability of this treatment system to comply with the dumping established in existing regulations. This research met the reliability coefficient or parameter determining sewage objective of each operation of each of these, relating mean values of the effluent concentrations of BOD and TSS parameters with the constraints that must be met for reuse based on probability analysis. It was found that there wastewater treatment plant such as Cajicá, Cogua, Chocontá and Gachancipá where their effluents have averages below 30 mg / L BOD and TSS coming in, showing that might be reused for different agricultural and environmental purposes.

KEYWORDS

Reliability, plant wastewater treatment, wastewater reuse

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales con sistemas de lagunas de estabilización o de oxidación, es una alternativa viable para nuestro país, ya que presenta bajos costos de construcción, inversión, sencillez en la operación y en el mantenimiento. El agua residual en estos sistemas de tratamiento es generalmente de origen doméstico, con una carga orgánica susceptible a ser transformada y tratada a través de procesos químicos, físicos y, sobre todo, biológicos, basado en los principios de autodepuración de ríos y lagos, proporcionando un efluente de calidad superior a los tratamientos automatizados (Catalán, 1997).

El rendimiento, la confiabilidad y consistencia de estos sistemas de tratamiento depende de muchos factores

tales como: la composición del afluente, mantenimiento y el diseño empleado, entre otros (Charles et al., 2005) y deben tenerse en cuenta para el adecuado cumplimiento de la normatividad vigente.

Niku, Schroeder y Samaniego (1979), 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, basándose 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 cumplimiento de las normas de vertimiento, proteger la salud de las personas previniendo la transmisión de enfermedades, proteger el medio ambiente y garantizar el aprovechamiento de las aguas residuales (reutilización).

El artículo 72 del Decreto 1594 de 1984 estableció normas de vertimiento en Colombia, 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 4728 del 23 de diciembre del 2010 modificó el plazo de este mandado, y le otorgó diez meses para la fijación de dichos límites. Por tanto, la normatividad vigente corresponde a lo establecido en el decreto 1594 de 1984.

Evidentemente Colombia no cuenta con una reglamentación que incluya los criterios mínimos de calidad que deba cumplir el agua residual para reuso, de forma tal que no se presenten daños a la salud humana y al medio ambiente. Pero en general, los países que tienen una normatividad sobre el reuso 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 (2004) clasificó el reuso 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 reuso 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 diferentes usos, 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 normatividad 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, 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. Esto permitió conocer el modo de operación histórico de estos sistemas y la viabilidad de cada planta de tratamiento para el vertimiento futuro de estas aguas a cultivos aledaños, riego a campos de golf, recuperación de terrenos áridos, Entre otros.

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 el dimensionamiento de plantas de tratamiento, asumen condiciones de estado estables pero estos procedimientos rara vez operan bajo estas condiciones. Las fluctuaciones en las cargas de entrada, las condiciones ambientales, y las variaciones operacionales son poco consideradas en el diseño (Niku et al., 1979).

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 de tratamiento. Como la calidad de los efluentes es variable

debido a diferentes causas (variabilidad de las cargas, cambios de las condiciones ambientales, etc), es necesario asegurar que el diseño de la planta produzca concentraciones del efluente, que sean menores o iguales a los límites establecidos por la ley (Metcalf y Eddy, 1998).

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? (Oliveira y von Sperling, 2007).

La respuesta a esta cuestión 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 (Metcalf y Eddy, 1998).

Niku et al. (1979), 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 (Oliveira y Von Sperling, 2008). El valor medio de la concentración propuesto puede obtenerse empleando la siguiente expresión:

$$Mx = Xs * CDF \quad (1)$$

Donde:

Mx: Media geométrica del parámetro objetivo

Xs: Límite establecido por la normativa.

CDF: Coeficiente de confiabilidad.

El parámetro objetivo Mx es aquel dato histórico que proporciona el funcionamiento actual de la depuradora y orienta al operador de la PTAR sobre el cumplimiento debido de la normatividad establecida. Este parámetro se obtiene al relacionar el coeficiente de confiabilidad con la normatividad que se debe cumplir (Oliveira y Von Sperling, 2008).

El coeficiente de confiabilidad se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

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

Donde:

Vx: 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 emplear la ecuación de confiabilidad de Niku, es necesario demostrar primero que los parámetros de calidad en el efluente se distribuyen con 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% (Niku et al., 1979; Niku et al., 1982; Charles et al., 2005; Oliveira y von Sperling, 2007; Oliveira y Von Sperling, 2008).

2. MATERIALES Y METODOS

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, basadas en sistemas lagunares, y en una segunda fase se determinaron los diferentes coeficientes de confiabilidad.

Colección y descripción de los datos

En esta fase de la investigación se coleccionó y se digitalizó la información pertinente para la ejecución de este estudio. Las plantas de tratamiento en las que se investigó 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.

Los parámetros de calidad utilizados fueron la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los caudales promedio, y las concentraciones promedio de DBO y SST, así como las eficiencias de remoción histórica asociadas a los diferentes sistemas lagunares, se presentan en la tabla 1. La planta con mayor volumen

Tabla 1. Caudales, concentraciones medias y remociones de los diferentes sistemas de tratamiento

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 1	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 1	20	260	50	81	290	82	72
Zipaquirá 2	63	297	42	86	319	65	80

tratado es la del Municipio de Mosquera con un promedio de 80 L/s; y la de menor volumen 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 se encontró que todos los sistemas de tratamiento están por encima del 75% y todas cumplen con la normatividad establecida en la remoción del 80% a excepción de Chía, Madrid 2, Mosquera y Tabio.

En las remociones de SST solo los sistemas de tratamiento de Gachancipá, Suesca, Tocancipá y Zipaquirá

2 cumplen con la normatividad establecida para la remoción del 80%.

Prueba de bondad y ajuste

Con los datos obtenidos mes a mes de los parámetros de DBO y SST, de los 5 años de cada sistema de tratamiento, se determinaron las distribuciones de probabilidad de los parámetros de DBO y SST de las plantas, para validar el uso de la ecuación de confiabilidad de Niku. 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	DBC	0,84	0,66	0,26
	SST	0,92	0,90	0,45
Chía	DBC	0,84	0,91	0,1
	SST	0,36	0,56	0,02
Chocontá	DBC	0,28	0,34	0,01*
	SST	0,51	0,36	0,57
Cogua	DBC	0,93	0,98	0,5
	SST	0,93	0,99	0,39
Gachancipá	DBO	0,28	0,69	0,02*
	SST	0,36	0,44	0,19
Madrid 1	DBC	0,94	0,96	0,15
	SST	0,78	0,99	0,2
Madrid 2	DBC	0,33	0,7	0,04*
	SST	0,88	0,45	0,61
Mosquera	DBC	0,70	0,51	0,52
	SST	0,33	0,07	0,18
Subachoque	DBC	0,91	0,99	0,32
	SST	0,11	0,04*	0,71
Suesca	DBC	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	DBC	0,02*	0,17	0,00*
	SST	0,44	0,51	0,04*
Zipaquirá 1	DBC	0,78	0,99	0,19
	SST	0,97	0,75	0,32
Zipaquirá 2	DBC	0,55	0,95	0,03*
	SST	0,76	0,97	0,13

* Con $\alpha = 5\%$ se rechaza la H_0 : Los efluentes siguen un determinado tipo de distribución.

Como se muestra en la tabla 2, el ajuste de los parámetros de la DBO es de tipo distribución log normal y se podrá emplear la ecuación de Niku. 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 medio (Niku et al., 1981a).

Interpretación del Coeficiente de confiabilidad

Con los datos de los efluentes de DBO y SST de los últimos 5 años 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 de Niku relacionándolo con la normatividad de la EPA de reutilización del agua residual con un nivel de

confiabilidad del 80%. Estos estándares son de 10 mg/L y de 30mg/L de DBO y SST, tomando la media geométrica de los datos.

En las tablas 3 y 4 se muestran los diferentes coeficientes de confiabilidad, parámetros objetivos y la media geométrica de la DBO y SST respectivamente de 5 años de tratamiento, respectivamente.

El coeficiente de confiabilidad de las PTAR se encuentra en un rango entre 0,7 y 0,88, y el coeficiente de variación es muy variable entre las depuradoras.

Entre menos varíen los parámetros de los efluentes de una depuradora, mejor será su confiabilidad, pues esta variación se puede interpretar como inconsistencias de las depuradoras.

En las figuras 1 a 4 se comparará la media geométrica actual de cada depuradora con los parámetros objetivos para el respectivo cumplimiento de la normatividad y para cada uno de los parámetros estipulados.

Tabla 3. Coeficientes de confiabilidad y parámetros objetivos de reutilización de DBO

PTAR	Coeficiente de Confiabilidad	Coeficiente 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	54,7
Chocontá	1	0,53	9,98	29,93	28,86
Cogua	1,02	0,61	6,85	20,54	20,48
Gachancipá	0,88	0,78	8,83	26,5	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	0,7	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	21,4	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	68,6
Zipaquirá 2	0,7	0,9	7,03	21,1	41,8

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

PTAR	Coeficiente de Confiabilidad	Coeficiente de variación	Parámetro Objetivo 10 mg/L	Parámetro Objetivo 30 mg/L	Media geométrica
Cajicá	0,7	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	0,7	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	7,2	21,61	81,94
Zipaquirá 2	0,71	0,87	7,1	21,29	64,53

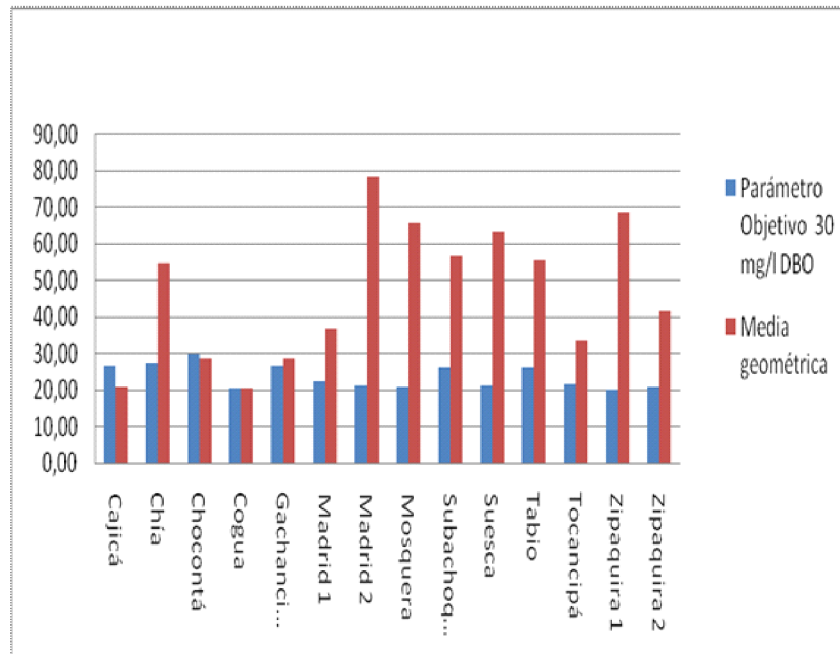
Como lo muestra la figura 1, las PTAR de Cajicá, Cogua, Chocontá y Gachancipá tienen la viabilidad de sus efluentes, en cuanto al parámetro objetivo de 30 mg /L de DBO, para la posible utilización de sus aguas residuales con un 80% de confiabilidad.

Especialmente las PTAR de Cajicá y Chocontá, que tienen una media geométrica por debajo del parámetro objetivo, evidenciando la potencialidad de sus vertimientos para usos en donde el contacto no genere ningún un peligro inminente para el ser humano, como en la industria, usos ambientales y en construcción.

Para este mismo parámetro las PTAR de Chía, Madrid 2, Mosquera, Suesca, Tabio, Zipaquirá 1 y Zipaquirá 2, tienen poca viabilidad en cuanto a la utilización de sus aguas tratadas, ya que presentan medias geométrías muy por encima del parámetro objetivo.

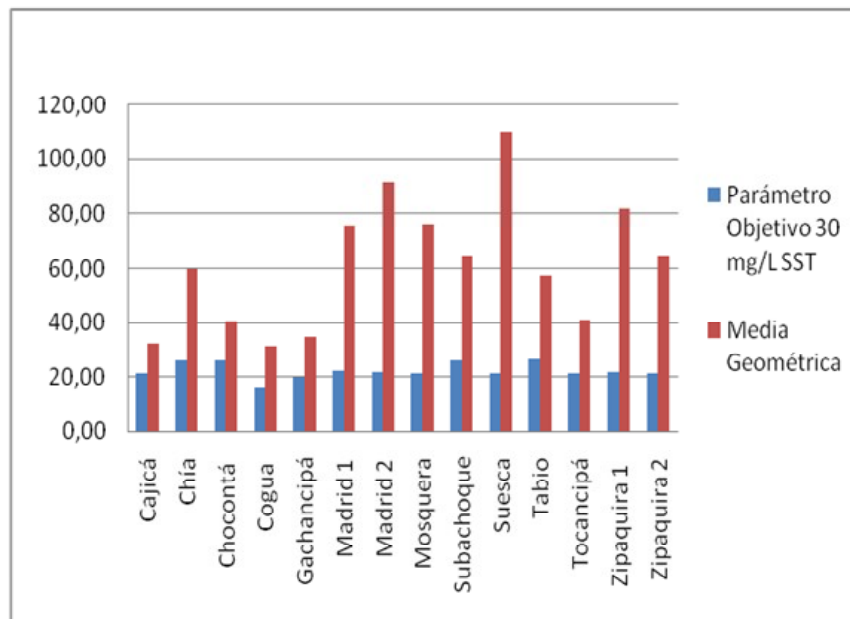
Como lo muestra la figura 2 y al igual que para el parámetro de DBO, las PTAR con mejores resultados en cuanto al parámetro objetivo de 30 mg /L de SST, para una posible reutilización del agua tratada fueron Cajicá, Chocontá, Cogua y Gachancipá.

En las figuras 3 y 4, la comparación de la media geométrica y el parámetro objetivo para el cumplimiento de la reutilización de 10 mg /L de DBO y SST, 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.



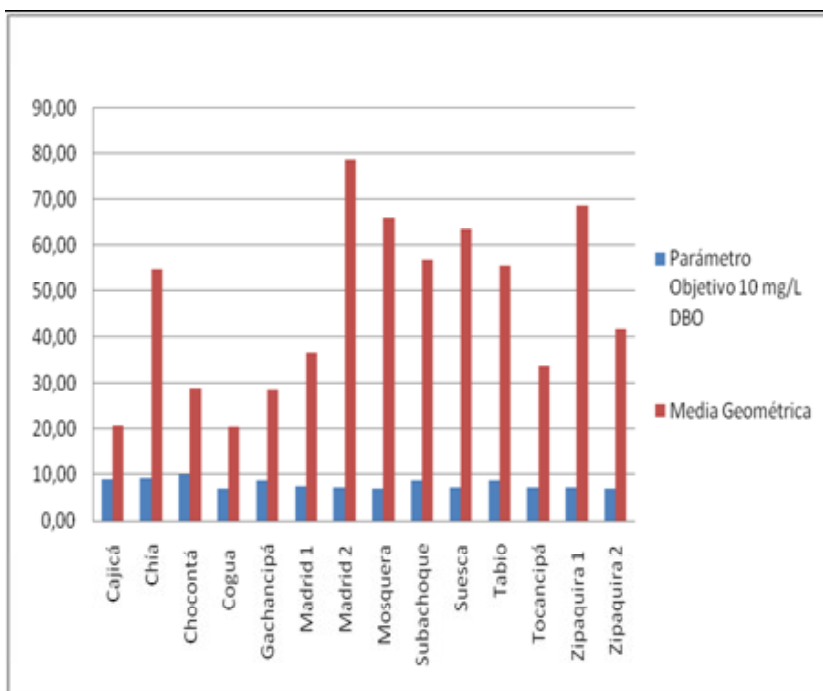
Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Parámetro Objetivo DBO para 30mg/L Vs Media Geométrica



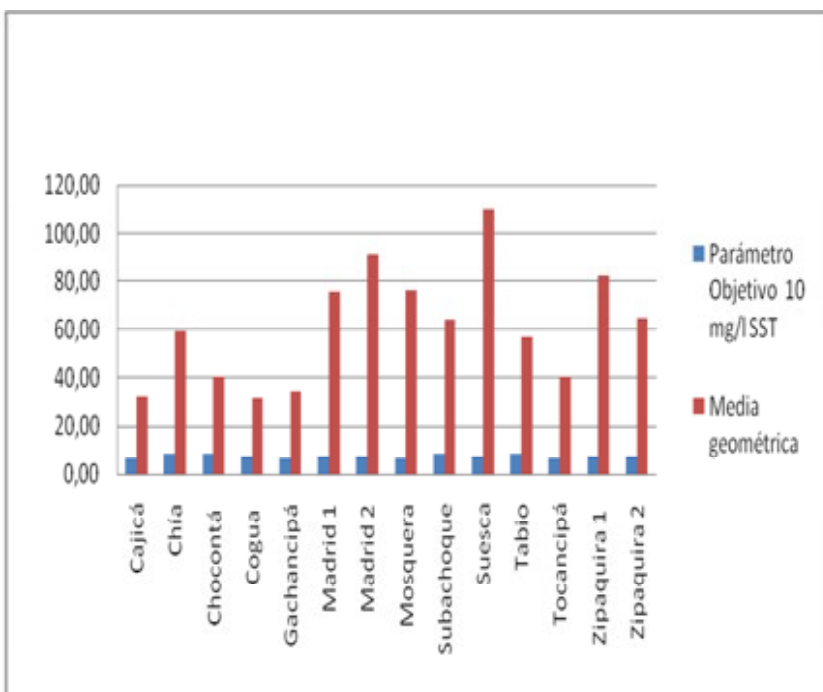
Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Parámetro Objetivo SST para 30mg/L Vs Media Geométrica



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Parámetro Objetivo DBO para 10 mg/L Vs Media Geométrica



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Parámetro Objetivo SST para 10 mg/L Vs Media Geométrica

4. CONCLUSIONES

Utilizando el registro histórico mensual durante 5 años, de los efluentes de DBO y SST de 14 plantas de tratamiento de aguas residuales de Cundinamarca, se estableció que para todas las PTAR, los parámetros de DBO y SST (excepto Subchoque) se distribuyen bajo una distribución log normal, aportando así mayor evidencia empírica, de que esta distribución es la más representativa de los efluentes de las PTAR. Pero también se comprobó que estos datos se comportaron bajo una distribución tipo Gamma. Así que sería un propósito investigativo legítimo, adaptar una ecuación de confiabilidad para este tipo de distribución.

Se reconoció 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 normatividad, se comprobó el buen funcionamiento de las PTAR de Cajicá, Cogua, Chocontá y Gachancipá, estando su media geométrica alrededor del parámetro objetivo para usos en donde el contacto no genere ningún un peligro inminente para el ser humano, como en la industria, usos ambientales y en construcción. En los demás sistemas de tratamiento se evidencia una diferencia muy representativa del parámetro objetivo con la media geométrica, evidenciando que estas PTAR deben tener un tratamiento previo o mantenimiento de sus estructuras.

En el estado actual de las depuradoras, ninguna cumpliría con el estándar de reutilización 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 no superan lo establecido en la normatividad de 10 mg/ L de DBO y SST.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Charles, K.; Ashbolt, N.; Roser, D.; McGuinness, R.; Deere, D. (2005). Effluent quality from 200 on-site sewage systems: design values for guidelines Water Science and Technology, 51(10): 163-169.
- Catalán, J. (1997). Depuradoras: Bases Científicas. Madrid, Bellisco
- Niku, S.; Schroeder, E.; Haugh, R. (1982). Reliability and Stability of Trickling Filter Process. Journal Water Pollution Control Federation, 54(2): 129-134.
- Niku, S.; Samaniego, F.; Schroeder, E. (1981a). Discharge Standards Based on Geometric Mean. Journal Water Pollution Control Federation, 53(4): 471-473.
- Niku, S.; Schroeder, E.; Samaniego, F. (1979). Performance of Activated Sludge Process and Reliability-Based Design. Journal Water Pollution Control Federation, 51(12): 2841-2857.
- Oliveira, S.; Von Sperling, M. (2007). Reliability analysis of stabilization pond systems. Water Science and Technology, 55(11): 127-134.
- Oliveira, S.; Von Sperling, M. (2008). Reliability analysis of wastewater treatment plants. Water Research, 42(4-5): 1182-1194.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency. (2004). Guidelines for water reuse. EPA/625/R-92/004. Washington, DC.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.