



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
Facultad de Economía  
Programa en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales  
PEMAR

VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA CONTAMINACIÓN POR  
LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA:  
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GASTO EN MITIGACIÓN <sup>1</sup>

**José Alberto Estrada**<sup>2</sup>  
Facultad de Economía  
Universidad de Los Andes

Ramón Rosales Álvarez, Ph.D.  
Director de Tesis  
Facultad de Economía  
Universidad de Los Andes

Bogotá D.C. Enero de 2,003

---

<sup>1</sup> Artículo publicable como requisito parcial para optar al Título de Master en Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales.

<sup>2</sup> El autor agradece la valiosa colaboración en esta investigación de Ramón Rosales A. Ph.D., del Ing. Carlos Useche de la Dirección Técnica de la Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos de Bogotá –UESP–, de Katja Vinha, C.Ph.D. de la Facultad de Economía y de la Ingra. Ángela Inés Cadena M. Ph.D. de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes por sus comentarios y orientación.

## TABLA DE CONTENIDO

Siglas y abreviaturas utilizadas	2
1. Introducción	3
2. Revisión de Literatura	7
3. Marco conceptual y metodología	11
3.1 Metodología	13
4. Datos y modelo	17
4.1 Generación de datos de caudal y composición	18
4.2 Modelación de las condiciones de operación	18
4.3 Obtención del valor mínimo de la contaminación ambiental y de la función de gasto en tratamiento de los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana.	19
5. Resultados	20
6. Conclusiones	28
7. Recomendaciones	29
Referencias	30
ANEXO 1	34

## LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y CUADROS

Figura 1. Aplicaciones biyectivas F y H del subconjunto C1 hacia el espacio GT que generan los subconjuntos GT1, GT2 y GT3 _____	16
Figura 2. Aplicación composición h, del subconjunto C1 hacia el espacio GT que genera el subconjunto GT1 _____	16
Figura 3. Comparación del gasto en lixiviados periodo 24 febrero-30 noviembre 2,002_	21
Figura 4. Producción de lixiviados en una Celda_____	34
Tabla 1.Comparación del gasto calculado vrs desembolsado_____	21
Tabla 2. Intervalos de confianza al 95% para el gasto real y calculado Feb.-Nov/02_____	21
Tabla 3. Intervalos de confianza al 99% para el gasto real y calculado Feb.-Nov/02_____	21
Tabla 4. Promedios mensuales para caudal y algunos parámetros fisicoquímicos periodo febrero- noviembre de 2,002_____	22
Tabla 5. Estadísticas descriptivas de las bases aleatorias de caudal y composición _____	22
Tabla 6. Intervalos de confianza al 99% _____	23
Tabla 7. Intervalos de confianza al 95% _____	23
Tabla 8. Estadísticas descriptivas del subconjunto GT*_____	23
Tabla 9.Intervalo de confianza al 95% para el valor de la contaminación._____	24
Tabla 10.Intervalo de confianza al 99% para el valor de la contaminación_____	24
Tabla 11.Valores de las variables de caudal, composición y de proceso del STL del RSDJ._____	25
Tabla 12. Resultados de la regresión lineal de la variable Gasto _____	26
Tabla 13. Regresión de consumo de energía vrs caudal-composición_____	26
Tabla 14. Regresión de producción de lodos vrs caudal-composición _____	26
Tabla 15. Parámetros fisicoquímicos Resolución CAR No. 3358 _____	34
Tabla 16. Valores máximos de los contaminantes _____	37
Tabla 17. Modelación cuadrática del Gasto _____	38
Tabla 18. Modelación rezagada del Gasto _____	38
Tabla 19. Modelación cúbica del Gasto _____	38

Tabla 20. Modelación Box-Cox	38
Cuadro 1. Ecuaciones de lavabilidad	34

# Valoración Económica de la Contaminación por lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana: Aplicación del Método de Gasto en Mitigación.

José Alberto Estrada

Enero de 2,003

## RESUMEN

Este artículo aplica el método de Gasto en Mitigación para calcular el valor económico de la contaminación producida por los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ). El valor calculado es un estimador mínimo del daño ambiental causado por los lixiviados y es el que asigna la sociedad bogotana al invertir en la reducción del impacto ambiental de los mismos. Relaciona el gasto en tratamiento de los lixiviados con variables fisicoquímicas que están asociadas al tipo y composición de las basuras que se depositan en el relleno sanitario (RS). Establece las elasticidades gasto-caudal, gasto- $\text{DBO}_5$ , gasto-nitrógeno y gasto-sólidos suspendidos. Establece los gastos marginales para el caudal, carga orgánica soluble, nitrógeno y sólidos suspendidos. Se determina que en el caso del Relleno Sanitario Doña Juana la sociedad bogotana valora más un kilogramo de carga orgánica soluble y de sólidos suspendidos que el asignado por la agencia ambiental. Aporta elementos básicos para estructurar un modelo dinámico para el uso de la tierra y el depósito de basuras en el RS; además de los elementos básicos para: a) comparar y seleccionar tecnologías de tratamientos de lixiviados, b) seleccionar tecnologías tales como el reciclaje y compostaje, c) seleccionar incentivos económicos que busquen eficiencia económica y ambiental. El valor económico mínimo de la contaminación ambiental medido por el Método de Gasto en mitigación es de Col\$ 88,775,321,868 de Sep/1,999 equivalente a US\$ 45,028,872 de Sep/1,999.

Palabras claves: Valoración de lixiviados, gastos defensivos, gasto en mitigación, relleno sanitario, relleno sanitario Doña Juana, residuos sólidos municipales, basura.

## Siglas y abreviaturas utilizadas

ALC	Alcalinidad
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
CDDBO	Carga diaria de DBO <sub>5</sub>
CDSOL	Carga diaria de Sólidos Suspendidos
CDNH3	Carga diaria de nitrógeno amoniacal
CU	Cobre
CR	Cromo
DAMA.	Departamento Administrativo del Medio Ambiente
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de oxígeno a los 5 días
DO2D	Demanda diaria de Oxígeno
DOPER	Días de operación
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
EMES	Energía consumida al mes
FE	Hierro
GASTO	Gasto mensual en Lixiviados
HG	Mercurio
LMES	Lodos producidos al mes
MINJUSTICIA	Ministerio de Justicia
NI	Níquel
NNKT	Nitrógeno Kjheldal total
PLD	Producción diaria de lodos
Q	Caudal de lixiviados
RS	Relleno Sanitario
RSDJ	Relleno Sanitario Doña Juana
RSM	Residuos Sólidos Municipales
SEPI	Shanghai Environmental Protection Institute
SOL	Sólidos suspendidos
SS	Sólidos Suspendidos
SST	Sólidos suspendidos Totales
SSD	Sólidos Disueltos
STL	Sistema de Tratamiento de Lixiviados
UESP	Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelos
ZN	Zinc o Cinc

## **1. Introducción**

La escasez de zonas y terrenos adecuados para la localización y construcción de Rellenos Sanitarios (RS) es un factor crítico para el manejo y disposición de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) de forma económica en muchas de las grandes ciudades del mundo. La escasez se debe principalmente a que desde el punto de vista social, económico, ambiental y técnico los RS tienen restricciones y generan daños ambientales. Los aportes de este trabajo de investigación al conocimiento económico del Relleno Sanitario Doña Juana de la ciudad de Bogotá (RSDJ) son varios: 1) establece un valor mínimo de la contaminación ambiental causada por el(los) lixiviado(s) o visto de forma dual, establece un valor mínimo del beneficio ambiental por reducir la carga de contaminantes vertidos al medio (Freeman, 1,993). El valor calculado es un estimador mínimo del daño ambiental causado por los lixiviados del RSDJ y es el que asigna la sociedad bogotana al invertir en la reducción del impacto ambiental de los mismos (gastos defensivos), 2) relaciona el gasto en tratamiento de los lixiviados con variables fisicoquímicas que están asociadas al tipo y composición de las basuras que se depositan en el RS, 3) establece las elasticidades de las variables fisicoquímicas con lo cual es factible estructurar políticas de producción, manejo y disposición final de basuras, 4) aporta elementos básicos para estructurar un modelo dinámico para el uso de la tierra y el depósito de basuras en el RS, 5) aporta elementos básicos para: a) comparar y seleccionar tecnologías de tratamientos de lixiviados, b) definir económicamente el momento para introducir tecnologías tales como el reciclaje y el compostaje, c) seleccionar incentivos económicos que busquen eficiencia económica y ambiental, mediante la modificación de la conducta de los productores de basura para disminuir la cantidad y variar la composición de las mismas; 6) el valor mínimo calculado puede utilizarse para cumplir con el mandato legal de la Ley 491/99 (Minjusticia,1,999) que obliga a todos los proyectos con características similares a suscribir Pólizas Ambientales, lo cual es de imposible cumplimiento si no se conoce algún valor de los costos asociados a la mitigación o recuperación del entorno ambiental.

Para continuar se debe definir que es un lixiviado y porqué valorar su impacto ambiental. Desde el punto de vista sanitario, el(los) lixiviado(s) es un residuo líquido de los RS, compuesto principalmente por el agua de infiltración en las celdas, el agua adsorbida y

absorbida en las basuras y la generada en el proceso natural de descomposición de la fracción orgánica de los RSM. Es un líquido muy complejo y nocivo para la salud humana y el medio ambiente, debido a sus componentes fisicoquímicos y bacteriológicos tales como: alto contenido de materia orgánica, metales pesados, sólidos disueltos y en suspensión, sales de amonio, sales disueltas monovalentes, altas cargas biológicas de bacterias y virus y materiales tóxicos en general . Un caso documentado de los daños causados por los lixiviados es el evaluado por la Shanghai Environmental Protection Institute (SEPI) en la ciudad de Shanghai, China. El daño ambiental fue evaluado técnicamente en función del deterioro en la calidad del medio ambiente, estos impactos fueron: 1) contaminación del Río Huangpu, principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad, 2) contaminación difusa, 3) malos olores, 4) producción de vectores, 5) agua marina contaminada, 6) contaminación del suelo, 7) contaminación de las aguas subterráneas utilizadas por las comunidades del área como fuente de agua para consumo, 8) aumento de enfermedades humanas, 9) reducción de especies marinas y contaminación de los peces que se consumen en la ciudad.

En el caso del RSDJ, sus impactos ambientales están parcialmente evaluados y se desconocen la mayoría de ellos. La producción diaria de lixiviados y que se vierten al Río Tunjuelito es superior a los 865 metros cúbicos y con una tendencia creciente debido al incremento diario del stock de RSM con alto contenido de material orgánico. La Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos de Bogotá (UESP), ha tomado medidas defensivas en el relleno para disminuir el daño ambiental que causan los lixiviados al Río Tunjuelito y por consiguiente al Río Bogotá, construyendo un Sistema de Tratamiento de Lixiviados (STL) que entró en operación continua el 24 de Febrero de 2,002. El Río Tunjuelito es el receptor de los lixiviados del RSDJ y atraviesa varias y populosas zonas del sur de Bogotá. El río presenta altos niveles de contaminación orgánica y química debido a los vertimientos de lixiviados, residuos sólidos, descargas industriales y residuos domésticos a lo largo de su curso. Un indicador de la gravedad del problema de contaminación es la carga orgánica expresada como la demanda Bioquímica de oxígeno a los 5 días( $DBO_5$ ). En el río Tunjuelito, la  $DBO_5$  alcanza valores de hasta 2,200 mg/lit, siendo 7 mg/lit la norma de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) en 1,994 (Agendas Ambientales, 1,994). Esta alta carga orgánica crea condiciones anóxicas en el río al



consumirse el oxígeno disuelto en el agua llevando a la extinción de la vida acuática. También presenta un alto grado de contaminación química por metales pesados, compuestos químicos orgánicos y una alta carga de materiales sólidos insolubles. Los problemas agudos de contaminación del río Tunjuelito se han localizado en tres puntos; uno de ellos se observa en el barrio San Benito en la localidad Sexta de Tunjuelito, donde existen empresas de curtiembres que generan grandes volúmenes de aguas residuales y cargas contaminantes de metales pesados como el cromo. Los otros dos puntos están en la zona Diecinueve de la localidad de Ciudad Bolívar y son: 1) el Relleno Sanitario Doña Juana y 2) las canteras que producen aproximadamente 200 toneladas diarias de Sólidos Suspendidos (Departamento Administrativo del Medio Ambiente, DAMA, 1999). El problema se agudiza por la escasa pendiente del terreno que conduce a crear bajas velocidades del agua, disminuyendo su capacidad de autopurificación (DAMA, 1994).

Un impacto negativo de la contaminación hídrica del río Tunjuelito a la comunidad se relaciona con enfermedades gastrointestinales. Según lo determinó en 1994 la Misión Siglo XXI, la población de las localidades cercanas al río contaminado adquieren estas enfermedades en un grado tres veces superior al de las comunidades localizadas a mayor distancia. De igual manera, los residuos no biodegradables presentes en el río terminan en el río Bogotá, cuyas aguas se utilizan frecuentemente para el riego de las hortalizas que se consumen en la ciudad. Adicionalmente se observa la proliferación de plagas de insectos y roedores que son transmisores de enfermedades infecto contagiosas (DAMA, 1994). También, la cuenca del río Tunjuelito hace parte de la recarga del acuífero de la zona industrial del sur de Bogotá, donde se ubican importantes industrias de bebidas y alimentos. La contaminación por metales pesados llevaría al acuífero a su total extinción tanto desde el punto de vista sanitario como económico. A la fecha no se han realizado estudios económicos en general sobre el daño ambiental del RSDJ, ni sobre el impacto económico negativo en los bienes mercadeables y no mercadeables cercanos al RSDJ, tales como terrenos, habitaciones, paisaje, servicios ambientales, etc.

Con lo anterior, el tratamiento de los lixiviados es un factor importante y crítico tanto social, sanitario, ambiental y de la operación del relleno sanitario en sí mismo, ya que afecta directamente su función de costos, pero reduce el impacto ambiental negativo a la sociedad al disminuir las descargas de contaminantes sanitariamente dañinos y de carga

química, bioquímica y sólidos a los cuerpos de agua superficial y subterránea. Los costos defensivos incrementan las inversiones y aumentan los costos operativos en el actual RS y también lo harán en los nuevos proyectos o frentes que se desarrollen para disponer los RSM de la ciudad de Bogotá con el consiguiente efecto sobre las tarifas a los usuarios del servicio.

El presente artículo explica como se obtiene un valor económico mínimo de la contaminación producida por los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana utilizando la metodología indirecta del *Gasto en Mitigación*<sup>3</sup>. El valor calculado es un estimador mínimo del daño ambiental causado por los lixiviados del RSDJ y es el valor que asigna la sociedad bogotana al invertir en la reducción del impacto ambiental de los lixiviados. El gasto defensivo se expresa en función del caudal y parámetros fisicoquímicos de los lixiviados producidos en el RSDJ. El caudal y características fisicoquímicas son efectos de la composición (fracción orgánica e inorgánica) y de la cantidad de RSM que actualmente se manejan y disponen en el RSDJ como resultado de la *actual política de producción y composición de las basuras* depositadas en el RS y de los *actuales incentivos económicos* que la sociedad bogotana les brinda a los productores de basura.

La metodología empleada se puede utilizar para evaluar otras alternativas y políticas de manejo y composición de RSM que se pueden depositar en el RSDJ o en la modelación dinámica para optimizar el uso de la tierra y la tasa de depósito de basura. El valor económico se calcula indirectamente (Freeman,1,993) a partir de los gastos defensivos simulados del Sistema de Tratamiento de Lixiviados (STL) que se encuentra construido y operando.

El artículo está organizado en siete secciones. La primera de las cuales es esta introducción. La segunda presenta una revisión de la literatura relacionada con rellenos sanitarios y en particular los realizados para el RSDJ. La tercera aborda los elementos conceptuales tomados en cuenta para especificar la metodología y el modelo econométrico. La cuarta describe la información utilizada para la construcción del modelo y los criterios operativos resumidos del STL, los cuales son la base para la construcción de las variables

---

<sup>3</sup>Munasinghe define el término Gasto en Mitigación y consiste en valorar los gastos en que incurre un agente económico para evitar o reducir los impactos ambientales no deseados, es decir, determina los costos defensivos en términos monetarios antes que evaluar el activo ambiental en cuestión. En nuestro caso el costo ambiental de los lixiviados será el valor que la sociedad bogotana invierte en reducir el impacto ambiental de los mismos.

del modelo. La quinta muestra los resultados obtenidos en la estimación. La sexta presenta las conclusiones del artículo. La séptima presenta algunas recomendaciones.

## **2. Revisión de Literatura**

La literatura generada y disponible sobre RS tiene dos enfoques: 1) el de ingeniería que se ocupa del diseño, localización, manejo, transporte y el tratamiento de las basuras; así como de la operación, generación y tratamiento de los subproductos (gases y lixiviados); y 2) el económico que busca la eficiencia económica y la optimización del uso del recurso tierra y la valoración de los costos ambientales asociados a la localización y operación de los RS entre otros.

Esta sección presenta algunos resultados encontrados en la literatura académica de los últimos años, con respecto a las investigaciones sobre rellenos sanitarios bajo el enfoque económico y ambiental y los relevantes hechos en Colombia sobre el RSDJ bajo el enfoque de ingeniería. A la fecha, la producción académica mundial no reporta ningún estudio económico sobre valoración económica de lixiviados y la producción académica colombiana solamente reporta un estudio económico sobre el tamaño y ubicación de rellenos sanitarios en Bogotá. Por su aporte metodológico, se mencionan las investigaciones colombianas que relacionan funciones de daño con parámetros fisicoquímicos. Por lo anterior, la pertinencia y relevancia de esta investigación es evidente. Uno de los trabajos importantes en la optimización del uso de la tierra en un RS, es el realizado por Huhtala(1,997) quien calcula para el RS de Helsinki, la tasa óptima de reciclaje de RSM a través de la modelación matemática del fenómeno de acumulación de basura doméstica y la disminución del stock de tierra disponible. Dentro del modelo incluye los costos asociados al reciclado de siete materiales(papel, metal, cartón, materia orgánica, vidrio y plástico), los costos sociales del RS y las preferencias ambientales del consumidor. Simula una solución óptima para el nivel de reciclaje utilizando los costos de disposición de basuras del RS y los beneficios del reciclaje, calculados mediante un estudio de Valoración Contingente. Como resultado obtiene que reciclando el 50% de los RSM, se logra una solución económica y ambientalmente adecuada.

En igual sentido, Highfill y McAsey (1,997) proponen un modelo teórico dinámico para el manejo de RSM en una municipalidad que desea integrar el proceso de reciclado y

el uso óptimo de la tierra de un RS; en este caso la municipalidad puede simultáneamente reciclar y usar el RS durante un tiempo. Mientras la tierra disponible del RS declina, el porcentaje de reciclaje aumenta. Por su parte, Ready y Ready (1,995) desarrollan un modelo general para el precio del terreno agotable y reemplazable y discuten su aplicación en la determinación del punto donde debe iniciar programas alternativos para el manejo de basuras. Demuestran que este punto incluye un componente que crece con la tasa de interés real en la medida en que el espacio disponible para el RS disminuye y la tasa cae cuando se construye un nuevo relleno sanitario. En la medida en que el RS se va llenando, el costo del espacio disponible aumenta, por lo cual la decisión para establecer un programa de reducción de basuras tales como reciclaje, compostaje o incineración debe demorarse hasta que el RS esté parcialmente lleno.

Hite (1,998) por su parte, explora el papel de la información sobre el precio de las viviendas. Utilizó un grupo de transacciones realizadas en el año 1,990 para inspeccionar el conocimiento que un grupo de compradores de vivienda cercana a un RS tenía sobre el deterioro en la calidad del medioambiente local en el momento en que compraban sus casas. En particular, el interés del estudio era investigar el efecto que la información sobre la ubicación de un RS tenía sobre el precio de las casas. El estudio concluyó que los compradores estaban muy poco informados sobre el deterioro ambiental pero tan pronto conocieron la circunstancia de la cercanía del RS, bajo el precio ofrecido por las casas. En el mismo sentido Nelson, Genereux J. y Genereux M. (1,992) aplican un modelo empírico hedónico para estimar el efecto en los precios de 708 casas vecinas a un relleno sanitario en Minnesota en el año de 1,980. Los resultados empíricos indicaron que el relleno afectaba adversamente en un 12% el precio de las casas que se encontraban en el límite del relleno y en un 6% las que estaban aproximadamente a una milla de distancia. Más allá de las 2 - 2.5 millas el efecto adverso era despreciable. Estos resultados tienen implicaciones importantes para el establecimiento de nuevos rellenos cerca de las áreas residenciales. En otro estudio, Roberts, Douglas y Park (1,991) calcularon mediante Valoración Contingente el costo de las externalidades de la comunidad de *Carter del Condado de Knox, Tennessee* cercana a un RS. El costo anual promedio de la externalidad fué de US\$ 227 por hogar. Las variables utilizadas fueron ingreso del hogar, tamaño de hogar, años en la comunidad, distancia al relleno, educación, sexo y percepción de los riesgos a la salud. Los hogares

cuyo suministro de agua estaba bajo riesgo de contaminación estuvieron dispuestos a pagar US\$ 141 adicionales que aquellos que tomaban agua de la red de la ciudad o agua embotellada. Existen otros trabajos para estimar el uso óptimo de la tierra aplicando la teoría de Hotelling o combinando tecnologías de tratamiento RS y reciclaje de RSM, o para estimar los determinantes del reciclaje de materiales tales como los de: Hosoda (2,001); Mrozek (2,000); Gaudet, Moreaux y Salant (1,998); Jakus, Tiller y Park (1,997).

En otra área de estudio microeconómico, Goldar y Mukherji (1,998) utilizaron un modelo Translog para estimar la función de costos para la reducción de la contaminación por agua industrial en plantas de pequeña escala del estado industrial de Nandesari, Gujarat, India. Los datos fueron tomados en los años 1,993-1,994 y 1,995-1,996 y provinieron de 38 empresas. El rango de caudales estudiados se encontraban entre 100,000 l/año a 69,000,000 l/año y los valores de la Demanda Química de Oxígeno(DQO) desde 100 mg/l hasta 10,000 mg/l. El modelo Translog relaciona el costo de tratamiento de las aguas residuales industriales con el caudal producido por las plantas, la DQO a la entrada y a la salida de las mismas, los precios del trabajo, capital, productos químicos y energía. En Colombia, Dimas (1,998) calcula el tamaño económico y la ubicación de cuatro RS en igual número de sitios en la ciudad de Santafé de Bogotá e introduce la variable ambiental en la factibilidad socioeconómica de los proyectos. Calcula por valoración contingente la disponibilidad a pagar de la población por el impacto de los proyectos. Estimó que sin incluir la variable ambiental se necesitaba una inversión de 532.7 millones / año para disponer 4,400 toneladas / día de RSM en un RS y que introduciendo los costos ambientales, la inversión ascendía a 9,069 millones / año.

Otros investigadores colombianos implementaron métodos indirectos de valoración que introducen variables fisicoquímicas como explicativas para determinar beneficios o daños ambientales, así, Cerda (1,996) mediante el *Método de Costos Evitados* (dosis-respuesta) valoró el impacto de la contaminación hídrica de la actividad cafetera en micro-cuencas del Municipio de la Vega Cundinamarca, asimismo analizó la pérdida de ingresos intertemporal y los costos evitados a valor presente de la comunidad estudiada.

De igual manera García (1,996) mediante la *Metodología de la Función de Daño*, valoró económicamente los servicios de protección hídrica y de control de sedimentos de un área boscosa que provee agua a la ciudad de Bucaramanga, Colombia. En el mismo

sentido Canessa (2,000) utilizó el *Método de la Función de Daño* para estimar los beneficios económicos derivados de la política de protección del recurso hídrico en el Parque Nacional Chingaza. Tomó como variable independiente los sedimentos ponderados por mes para la cuenca y estimados por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y como variables dependientes el color aparente y la turbiedad. Los datos provenían de los registros la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá –EAAB- (Planta de Tratamiento Wiesner, 1,996 y 1,999). El beneficio calculado, equivalía al costo directo evitado de tratar un agua más turbia (mayor consumo de químicos).

Bajo el enfoque de ingeniería y para comprender la dinámica de los lixiviados del RSDJ, se mencionan los trabajos realizados en Colombia como consecuencia del derrumbe de aproximadamente de un millón de toneladas de la Zona II el 27 de septiembre de 1,997. Estas investigaciones se centraron en el diseño de las celdas y la producción de gases y lixiviados. Ríos(1,997) estudia por modelación matemática los flujos internos en rellenos sanitarios. Behrentz, Giraldo y Beltz (1,997) desarrollaron el modelo GALIX que estudia la generación de gases y lixiviados a partir de la modelación de los parámetros bioquímicos de descomposición anaeróbica de las basuras y que es la base para algunas innovaciones en investigaciones posteriores. En este sentido, Moya (1,998) estima en 8 l/s la producción promedio de Lixiviados del Relleno Sanitario de Doña Juana. Una base importante para la actual investigación es la realizada por González (1,998), quien mediante la metodología del factor de dilución estudia el efecto de la separación de la materia orgánica sobre los compuestos inorgánicos de los lixiviados producidos en el RSDJ y obtiene las correlaciones sobre la tendencia de los acumulados para la DBO<sub>5</sub>, Cloruros, Sólidos Disueltos, Ca, Mg, K, Mn, Fe y Zn; y simula el comportamiento de la lixiviación a largo plazo por extracciones secuenciales logrando estimar y verificar los factores de dilución para una celda real en RSDJ. Estos resultados fueron confirmados y complementados por Gómez (2,000) quien, utilizando la metodología del factor de dilución obtiene las curvas de producción de lixiviados, concentración de cloruros, sólidos disueltos, Mg, K, Mg, Ca, Fe y Zn para distintos valores de materia orgánica y simulando un periodo de 70 meses en una celda típica del RSDJ. Además incorpora al modelo GALIX el módulo de calidad de lixiviados y lo amplía para el componente de metales pesados.

### 3. Marco conceptual y metodología

Los modelos de optimización dinámica aplicados a rellenos sanitarios, establecen los caminos óptimos del *agotamiento de la tierra* y la tasa de *depósito de basura*, así como también el momento oportuno para introducir tecnologías alternativas o complementarias en un Relleno Sanitario. Estos modelos necesitan como argumentos los costos de recolección, transporte y disposición de las basuras, precios de tecnologías alternativas, así como también los costos ambientales y de los bienes no mercadeables causados por la basura que se deposita en ellos. Según la metodología que se utilice para valorar económicamente los costos ambientales y los bienes no mercadeables, el valor calculado puede estar influenciado por las características socioeconómicas de las comunidades que reciben el daño ambiental. Según Moreno (1,998), las comunidades con bajo nivel de educación y un mayor índice de necesidades básicas insatisfechas, permiten un mayor nivel de contaminación que aquellas que tienen un nivel de vida y educación más alto. Además la capacidad de negociación de estas comunidades está asociada con este índice. En el mismo sentido, Cruz (2,002) determinó que la presión de las comunidades afectadas por los vertimientos industriales, depende principalmente de las condiciones socioeconómicas de la población. En el caso específico del Relleno Sanitario Doña Juana, el valor del daño ambiental y de los bienes no mercadeables que la sociedad bogotana en su conjunto le asigna, se relaciona con el pago directo por el tratamiento de los lixiviados producidos y vertidos al Río Tunjuelo/Tunjuelito con unas características de calidad y cantidad (límite inferior del costo ambiental). La *Valoración Económica* del daño ambiental del RSDJ que reciben las comunidades afectadas mediante la metodología de *Valoración Contingente*, corre el riesgo de tener el sesgo de conducta enunciado por Moreno(1,998) y podría obtenerse una sub-valoración del daño ambiental dadas las bajas condiciones socioeconómicas de las comunidades impactadas puesto que es difícil incorporar en sus preferencias o presupuestos, la percepción del daño causado por los componentes contaminantes de los lixiviados en especial el de los metales pesados ( factor crítico de la contaminación hídrica y del suelo). Una vía para estimar el efecto del daño y por consiguiente el valor económico necesario para el diseño de políticas de manejo de RSM y optimizar la cantidad fija del recurso tierra del RS es la metodología de *Gasto en*

*Mitigación*, puesto que el Sistema de Tratamiento de Lixiviados (STL) incorpora unidades de remoción para los contaminantes más importantes de los lixiviados y para lo cual existe un *pago explícito* por parte de la sociedad bogotana por tal concepto. Este pago mensual es variable porque su estructura incorpora variables operativas del sistema (lodos y energía eléctrica). La metodología de Gasto en Mitigación permite obtener un valor económico mínimo de la contaminación por lixiviados de forma relativamente directa y económica.

Como lo menciona Freeman (1,993), las metodologías indirectas de valoración económica usan datos o comportamientos (sean estos observados o hipotéticos) para lo cual se desarrollan ciertas estructuras teóricas que modelan este comportamiento y lo relacionan con términos monetarios para obtener un valor económico medido en dinero del cambio en el bienestar. Con esta lógica, es posible simular algunas condiciones fisicoquímicas y de caudal que posibilite simular las condiciones de operación del STL, con lo cual se puede obtener mediante el cálculo de los costos defensivos o *Gasto en Mitigación* un valor económico del daño ambiental que es un indicador mínimo de este impacto. Este valor representará la Disponibilidad a Pagar para disminuir el daño ambiental de los lixiviados durante los 20-21 años en los cuales se considera que los lixiviados aportan contaminantes a las aguas del Río Tunjuelo/Tunjuelito.

Analizando en perspectiva el comportamiento de la cantidad fija de tierra en el RSDJ, se nota un aumento en la cantidad del área disponible que está en función de la presión que la sociedad ejerce por nuevo espacio para depositar su basura. Si se toma el análisis de Ready y Ready (1,995), se tendría una función tipo *Dientes de Sierra* en donde los picos corresponden a los periodos de *escasez de terreno por saturación de basura* y donde uno de los factores del costo aumenta en función de la tasa de interés real del mercado, sin embargo cuando se abre un nuevo frente y se aumenta el stock de terreno, este componente disminuye haciendo que el costo marginal disminuya y se prolonga en el tiempo alcanzar el precio para el cambio hacia nuevas alternativas tecnológicas, posponiendo de esta manera la toma de decisiones sobre políticas alternativas en el manejo de los RSM. Caso contrario sucede con el impacto ambiental causado por los lixiviados y por ende con sus costos ambientales, estos no describen el comportamiento de una función "*Diente de Sierra*". El impacto es proporcional a la cantidad y el tipo de basura depositada en el RS (Ward y Li,1,993), por lo cual crece en la medida en que la cantidad de basura aumenta en el



tiempo. En este sentido se espera que los costos ambientales también aumenten describiendo una función creciente. En el caso particular del gasto en tratamiento de lixiviados, este describiría una función mixta entre una función a trozos que representaría la inversión en infraestructura (costos fijos) y una función creciente de costos variables proporcionales al caudal y a la composición fisicoquímica de los lixiviados. Los trozos representan los “saltos” en costos por las nuevas unidades de tratamiento y los saltos pueden ser mayores o menores según las alternativas técnicas seleccionadas para el tratamiento de los lixiviados.

### 3.1 Metodología

Para estimar un valor del daño ambiental de los lixiviados y facilitar su cálculo se necesita hacer las siguientes consideraciones: *Primero*, el periodo de análisis se toma para 21 años [(20 años propuesto por Huhtala (1,997) y 10 meses actuales de operación] cuyo inicio es la entrada en operación estable del STL e inicio de la Fase II del Contrato de Concesión (Febrero 24 de 2,002) y hasta Febrero 24 de 2,023. El actual STL trata los lixiviados de una “cantidad” de basura que produce un caudal promedio de 8 litros por segundo (Moya, 1,998 y UESP, 1,998) con picos de 13,9 litros / segundo (UESP, 1,998) y se supone que en las siguientes dos décadas no existan mayores cambios tecnológicos o costos y que la cantidad de basuras del relleno actual no sobrepase la producción de lixiviados de 14 litros/segundo. *Segundo*, solamente se analizan los costos directos y variables asociadas al tratamiento de los lixiviados. *Tercero*, se supone que los costos asociados al tratamiento es un proxy del costo ambiental atribuido a los lixiviados y no capta los costos ambientales por efecto de los gases y otros costos de los bienes no mercadeables. *Cuarto*, el análisis aplicado se puede extender a caudales mayores (más periodos o cierre y apertura de nuevos frentes), suponiendo que se trata de un gran STL con módulos de 8 l/s + 5.9 l/s (picos). *Quinto*, el método no capta daños potenciales estocásticos como explosiones de gas metano, infiltraciones tóxicas de lixiviados a aguas subterráneas de los frentes viejos ya clausurados. *Sexto*, en la medida de lo posible las cargas de diseño (ver Anexo 1) se mantendrán según lo estipula el Contrato de Concesión esto es: carga máxima al STL de 10,500 Kg DBO<sub>5</sub>/día, 1,400Kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/día y 1,750 KgSS/día. *Séptimo*, en la medida de lo posible la producción máxima de lodos

fisicoquímicos y biológicos se mantendrán según lo estipula el documento técnico del Contrato de Concesión. *Octavo*, se comparará el consumo de potencia reportado por el constructor del STL para aireación de 8,400 Kw.-h/día con el calculado para reducir las cargas aplicadas al sistema y se tomará el mayor. *Noveno*, se supone que los lixiviados mezclados en las lagunas de entrada al STL, presentan una “composición homogénea” y parecidas a las cargas de diseño del sistema durante todo el periodo de análisis. *Décimo*, los costos utilizados son mensuales y calculados a partir de los “valores promedio” de los parámetros fisicoquímicos y los valores totales del consumo de energía y producción de lodos.

Dado que el periodo de análisis es de 21 años y que el STL solamente lleva 10 meses en operación, se necesita proyectar la producción y composición de los lixiviados a partir de los datos seriales disponibles del año 2,002, aplicando las consideraciones arriba expuestas. Desde el punto de vista metodológico esto se hace mediante la generación de un conjunto de vectores aleatorios de caudal y composición fisicoquímica de los principales componentes del lixiviado tenidos en cuenta en el dimensionamiento de los reactores del STL. Se considera que el conjunto de vectores aleatorios es una muestra representativa de un subespacio  $R^n$  factible de la *actual política de basuras y tecnología empleada*. El método obliga a efectuarlo en dos etapas: *la primera* de ellas se orienta a validar la información proyectada comparándola con la información disponible de caudales, composición, potencia, lodos procesados, etc. de los meses febrero a noviembre del año 2,002; en este punto, el aspecto crítico es convalidar el modelo de simulación operativa del tratamiento de lixiviados utilizando la información serial de los vectores caudal-composición reales medidos en el laboratorio y *tratarlos en la planta modelada*. Se comparan los resultados obtenidos en la simulación operativa con los reales de la operación del STL para verificar su ajuste. *La segunda* etapa consiste en seleccionar una base de datos de caudal y composición que estadísticamente sea significativa y que genere un valor del gasto en tratamiento que también sea estadísticamente significativo de la población de gasto y que se aproxime a la media de la población. Una vez se tenga una base de datos estadísticamente significativa y validados con los valores del gasto realmente desembolsados durante el periodo febrero-noviembre del 2,002, se estima económicamente una “Función de Gasto” del tratamiento de lixiviados expresada en

términos de los vectores caudal-composición, la cual se puede utilizar como herramienta de política. La base de datos seleccionada debe en lo posible reflejar el comportamiento detectado en la planta y ser consistente con el comportamiento hidráulico y las características fisicoquímicas de la mezcla de lixiviados producidos por los frentes viejos y nuevos. Las variables del modelo se dividen en dos grupos: 1) *Variables físicas* que incorporan el cambio en la calidad de los lixiviados y por ende su tratamiento y productos del mismo y 2) *Variables de reacción* que muestran la dinámica del costo de tratamiento de lixiviados ante diferentes cambios de caudal y composición fisicoquímica.

El valor económico mínimo de la contaminación por lixiviados (daño ambiental) es un funcional de la política actual de manejo de las basuras en el RSDJ y se expresa en pesos colombianos del mes de septiembre de 1,999 o en dólares estadounidenses liquidados a la tasa de cambio vigente en la fecha de negociación del contrato (4/8/1,999; 1,971.52 Col\$/US\$). Este mecanismo se utiliza porque el actual sistema de facturación liquida el consumo de potencia, los lodos producidos y el caudal tratado en pesos de Septiembre de 1,999 y luego indexa las facturas al mes de facturación. Lo anterior proporciona la ventaja de tener el valor futuro del gasto como un *Valor Presente Neto del costo del tratamiento a pesos o dólares de Septiembre de 1,999* y se evita el uso de tasas de descuento (social o de oportunidad).

El procedimiento anteriormente descrito es el análisis estático del problema y se soporta en la metodología sugerida por Varian (1,992, p.3) cuando analiza las decisiones tecnológicas en abstracto. Conceptualmente la metodología se representa en la figura 1 como un análisis de espacios vectoriales, así: Sea  $C$  el espacio vectorial en  $\mathbb{R}^n$ , continuo, cerrado y convexo donde cada punto está representado por un vector  $X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  y donde  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  representan el caudal y las características fisicoquímicas probables del lixiviado producido por el RSDJ. Sea  $GT$  el espacio vectorial  $\mathbb{R}$ , continuo, cerrado y convexo donde cada punto representa el gasto defensivo probable para el tratamiento de los lixiviados de  $C$ . Sea  $F$  la función de producción del STL, definida por la tecnología de tratamiento fisicoquímico de precipitación metálica, tratamiento secundario de lodos activados y tratamiento terciario de reducción biológica de Nitrógeno por lodos activados. Sea  $L$  la función de producción actual de la política de manejo, disposición y composición de las basuras y el tratamiento de los lixiviados producidos por las basuras dispuestas en el

RSDJ y L1 otra función de producción diferente a la actual política de manejo, disposición y composición de las basuras y el tratamiento de los lixiviados producidos por una diferente composición de basuras que podrían disponerse en el RSDJ, digamos con baja composición porcentual de materia orgánica.

Dados los espacios C y GT es posible hacer una aplicación biyectiva del espacio C al espacio GT mediante las funciones de producción tecnológicas de tratamiento de lixiviados F ó H que pueden ser Lodos Activados, Anaeróbico con tratamiento de membranas, evaporación, etc. Por lo cual, para un subconjunto C1 o C2 de composición de caudal y lixiviados generados por las políticas L y L1 respectivamente, es posible hacer las mismas aplicaciones tecnológicas biyectivas F ó H hacia los subconjuntos GT1, GT2 ó GT3. De igual manera, los subconjuntos GTi (resultados) pueden generar valores puntuales “S” que son el resultado de sumar los “j” elementos del subconjunto GTi involucrados en el proceso y que son representativos de una *población de gasto*. Este valor “S” puede asociarse mediante un funcional Vi a una determinada política de manejo, disposición y composición de los RSM (un indicador de política). Donde a partir del dominio Ci (i =1,2) y mediante F ó H se establecen los codominios GTi (i = 1,2,3).

Mediante el mismo razonamiento es posible establecer dos sub-espacios intermedios entre C y GT llamados Y (energía) y W (lodos), donde cada espacio vectorial es unidimensional, R, continuo, cerrado y convexo y cada punto representan: 1) para Y, cantidades de potencia (energía eléctrica en KW-H) y 2) para W, cantidades de lodos (toneladas). Ver figura 2. Los sub-espacios Y y W están interceptados por un operador f(x) que representa la fórmula de gasto establecida en el contrato firmado con el consorcio Hera-Nam-Valzea.

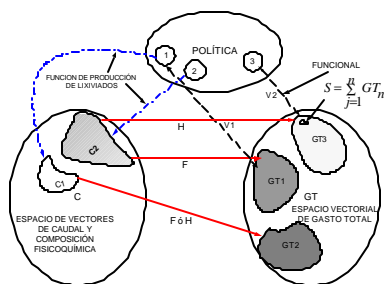


Figura 1. Aplicaciones biyectivas F y H del subconjunto C1 hacia el espacio GT que generan los subconjuntos GT1, GT2 y GT3

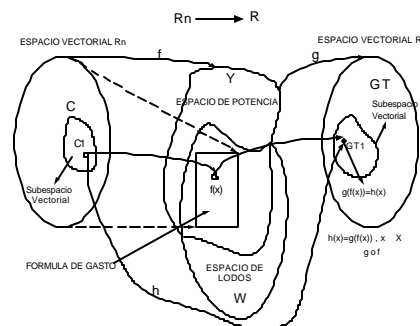


Figura 2. Aplicación composición h, del subconjunto C1 hacia el espacio GT que genera el subconjunto GT1

Si cada punto dentro del subconjunto C1 es potencialmente factible y tiene la misma probabilidad de existencia, se puede tomar una muestra transversal representativa de 252 puntos llamada C\* y que a través de la aplicación composición  $h(x) = g(f(x))$  se puede generar un subconjunto potencialmente factible y probable llamado GT\*; recordando que  $f(x)$  es el operador *fórmula de gasto* el cual produce los costos variables y tiene como insumos el caudal de lixiviados, las cantidades de lodos producidos y la cantidad de energía consumida los cuales están en función del vector  $\hat{X}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ;  $g(f(x))$  incluye los costos fijos mensuales de operación (administración, etc) y los variables del STL dando como resultado final el *gasto en mitigación*  $h(x)$  como función del vector  $\hat{X}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ .

Para garantizar la representatividad de los datos, la toma de la muestra debe ser aleatoria y es una *foto instantánea y congelada en el tiempo* del subconjunto de vectores, que mediante las aplicaciones “F” y “g” (tecnología de tratamiento de lixiviados y cláusulas contractuales) se puede determinar los valores de potencia (Y) y lodos (W), valores que sirven de input para el operador  $f(x)$  con el cual finalmente se determina GT\*.

Con relación al operador  $f(x)$  se tiene que establecer lo siguiente: 1) los precios se expresan en pesos colombianos de septiembre de 1,999 o en dólares estadounidenses liquidados a la tasa de cambio del mes de agosto de 1,999. 2) la fórmula de pago contractual, establece que los costos fijos y administrativos se mantienen *fijos y constantes* durante la vigencia del contrato ( inicialmente 7 años que son prorrogables). 3). Dado que se trabaja con una muestra transversal de 252 datos de C\*, *fijos en el tiempo*, no se considera una tasa de descuento intertemporal, como tampoco la proyección de los precios de la energía en el tiempo. En caso de querer establecer una cifra en “pesos o dólares corrientes” deberá multiplicarse por el factor de indexación de la inflación o la tasa de devaluación e inflación del dólar.

#### 4. Datos y modelo

Las variables del modelo son las siguientes:

<i>Variables Físicas</i>	Caudal medio diario vertido de lixiviados en m3/día Características fisicoquímicas del vertimiento de sustancias de interés en mg/l ó Kg/m3 Producción promedio de lodos fisicoquímicos y biológicos deshidratados en Kg o Ton.
<i>Variables de Reacción</i>	Costo variable medio en pesos o dólares Costos de tratamiento y disposición de lodos promedio en pesos o dólares Gasto mensual promedio en tratamiento de lixiviados en pesos o dólares

#### 4.1 Generación de datos de caudal y composición

Los datos para simular los 21 años de operación del STL consta de 10 bases aleatorias de 252 (243+9) datos cada una, tanto para el caudal como para las siguientes sustancias de interés sanitario: DBO<sub>5</sub>, DQO, nitrógeno amoniacal, sólidos disueltos, sólidos suspendidos totales, alcalinidad, Zn, Cu, Cr, Fe, Ni y Hg. La generación se hace de forma transversal utilizando una hoja electrónica y los siguientes datos: 1) los fisicoquímicos de campo medidos en el laboratorio del STL y 2) las curvas de lavabilidad y acumulados de los lixiviados para una celda del relleno sanitario Doña Juana calculados por González (1,998) y corroboradas por Gómez (2,000). Cada una de las bases de las variables, se nombra de la A a la J para generar los vectores caudal composición. La población del

conjunto C es  $\sum_{r=0}^{13} \binom{13}{r} = 10^{13}$  datos; generar este espacio no es práctico por lo cual se toma

una muestra representativa C\* del conjunto C que se espera refleje sus características y genere el subconjunto de gasto GT\*, del cual se obtiene la media del gasto que se tomará como el valor representativo del subconjunto es decir, como el valor mínimo de la contaminación ambiental causada por los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana.

Los datos de caudal se obtienen aleatoriamente a partir de los datos de la carga hidráulica medidos en el STL y se contrastan con el resultado de la modelación matemática para la generación de gas y producción de lixiviados en un relleno sanitario bajo condiciones típicas, calculado por Moya (1,998) teniendo como límite el valor máximo de diseño de la carga hidráulica del STL.

#### 4.2 Modelación de las condiciones de operación

Para cada vector de caudal y composición fisicoquímica, se estiman entre otras variables operativas las siguientes: Caudal en m<sup>3</sup>, DBO<sub>5</sub> en mg/l, sólidos suspendidos en mg/l, nitrógeno amoniacal en mg/l, carga/día de DBO<sub>5</sub> en Kg, carga/día de sólidos suspendidos en Kg, carga/día de nitrógeno amoniacal en Kg, DBO<sub>5</sub> del efluente en mg/l, sólidos suspendidos del efluente en mg/l, nitrógeno amoniacal del efluente en mg/l, peso eliminado de DBO<sub>5</sub> en Kg, peso eliminado de sólidos suspendidos en Kg, peso eliminado de nitrógeno en Kg, peso a aireación de DBO<sub>5</sub>, peso a aireación de sólidos suspendidos, peso a aireación de nitrógeno, producción de lodos primarios, producción total de lodos en

Kg, lodos biológicos producidos por el nitrógeno, volumen/día de lodos primarios, volumen/día de lodos biológicos, volumen de lodo espesado, volumen deshidratado en m<sup>3</sup>/día al 50%, residual de nitrógeno amoniacal, potencial de nitrificación, rendimiento potencial de desnitrificación, peso por día de nitratos, nitratos eliminados y remanentes, demanda de oxígeno/día en Kg, demanda de oxígeno carbonosa hora y pico en Kg, demanda de oxígeno para nitrificación hora y pico en Kg, aporte día de oxígeno en desnitrificación en Kg, demanda de oxígeno/hora punta en Kg, caudal de aire por hora m<sup>3</sup>, numero de sopladores, potencia consumida hora en K-Wh, consumo de energía día en K-Wh, días de operación, consumo de energía mes, producción de lodos por mes y costo a pesos de septiembre de 1,999. Las condiciones de diseño y operación siguen los criterios de diseño de la “Memoria de Cálculo de Proceso” reportadas por el consorcio Hera-Holding-Velzea Ltda.-Nam Ltda. en el Documento Técnico para la construcción y operación de la planta (1,999).

#### **4.3 Obtención del valor mínimo de la contaminación ambiental y de la función de gasto en tratamiento de los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana.**

Para calcular el gasto mensual en tratamiento de los lixiviados, se utilizan las formulas de pago establecidas en el contrato C.4035/99 firmado por la UESP y el consorcio Hera-Holding-Velzea Ltda.-Nam Ltda.(Anexo 1). La fórmula de gasto se expresa como:

$$CT = ((CF + CV) * 1.0774) + A + CI, \text{ donde:}$$

CT : Gasto total de tratamiento mensual.

CF : Costo fijo por tratamiento \$32,636,474; indexado a la Inflación mensual reportada por el DANE..

1.0774 : Factor de utilidad

A : Costo fijo administrativo mensual \$30,341,724 ; indexado a la Inflación mensual reportada por el DANE.

CI : Costo de tratamiento y disposición de lodo  $CI = \$34,681 * T_{ML}$ . Donde  $T_{ML}$  son las toneladas de lodos producidos en un mes con 33% de humedad residual.

CV :  $(\$4.973 * Q_M) + (\$122 * E_M)$ . Donde  $Q_M$  es el caudal mensual tratado y  $E_M$  es la energía mensual consumida.

Las variables de costos dependen de las variables de proceso tales como el caudal mensual de lixiviados ( $Q_m$ ), energía mensual consumida ( $E_M$ ) y cantidad de lodos producidos mensualmente ( $T_{ML}$ ). A su vez se espera que las variables  $E_M$  y  $T_{ML}$ , dependan de la tecnología de tratamiento utilizada, los vectores caudal-composición fisicoquímica entrantes y salientes del sistema (Resolución CAR 3358/90) y los parámetros de diseño y operativos del STL. Una vez definida la tecnología de tratamiento de lixiviados (Lodos Activados) y el dimensionado del STL, se espera que la cantidad de lodos producidos y la energía consumida dependan de la composición fisicoquímica y del caudal que se procese en la planta. El valor mínimo de la contaminación ambiental de los lixiviados del RSDJ se estima como la sumatoria de los valores mensuales pagados al concesionario valuados en pesos de septiembre de 1,999, es decir:  $S^* = \sum_{j=1}^{252} GT_j^*$ . Para hacer la regresión econométrica de la función de gasto, se propone inicialmente un modelo lineal de la forma:

$$GASTO = \mathbf{b}_0 + \sum_i \mathbf{b}_i (\hat{X}^*)_i + \mathbf{e}_i \quad (1)$$

donde  $\hat{X}^*$  son los vectores caudal-composición de la base de datos que genera el valor mínimo de la contaminación ambiental de los lixiviados  $S^* = \sum_{j=1}^{252} GT_j^*$  y que más se

aproxime a la media  $\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$  del subconjunto de gasto. Los  $\beta_i$  son los coeficientes de las variables explicativas del gasto y  $\mathbf{e}$  es el término del error. Además para corroborar si la hipótesis inicial de modelo lineal es correcta, se hacen regresiones de modelos rezagados, cuadráticos, cúbicos y Box-Cox entre la variable endógena gasto y los vectores caudal-composición y operación; y se determinan para cada uno de ellos su ajuste y si las variables explicativas son o no significativas.

## 5. Resultados

Para comprobar la simulación operativa del STL se someten a proceso los datos reales de caudal y composición medidos en campo y se calcula el gasto mensual para el periodo febrero 24 a noviembre 30 del 2,002. Una vez tratados los lixiviados en la simulación operativa, se comparan los resultados obtenidos para lodos, energía y gasto con los valores reales reportados y desembolsados por la UESP durante el periodo febrero a noviembre de

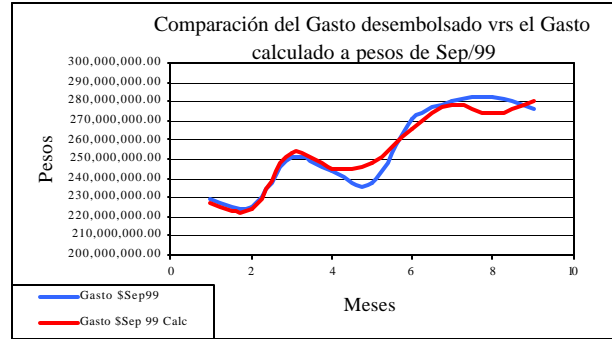


2,002. Se establece un intervalo de confianza para comprobar la hipótesis  $m = m^*$  es decir, si la media de los datos calculados pertenecen a la población real del gasto suponiendo una distribución  $X \approx N(m, S^2)$  para  $S^*$ . Los resultados para el periodo se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 3.

Tabla 1. Comparación del gasto calculado vrs desembolsado

Mes	GASTO DESEMBOLSADO	GASTO CALCULADO
Marzo	229.001.129	227.633.920
Abril	225.131.882	223.037.982
Mayo	251.030.601	252.889.076
Junio	244.034.643	244.912.142
Julio	237.339.033	248.536.012
Agosto	270.586.088	264.889.517
Septiembre	279.904.722	279.297.672
Octubre	282.774.824	273.982.739
Noviembre	276.287.890	280.911.907

Figura 3. Comparación del gasto en lixiviados periodo 24 febrero-30 noviembre 2,002



Durante el periodo 24 de febrero - 30 de noviembre de 2,002 se presentaron eventos tales como interrupciones de energía, remoción de lodos en las lagunas de entrada y sobrecargas hidráulicas entre otras, que muy difícilmente pueden ser captadas o previstas por la modelación, sin embargo con estas limitaciones el ajuste entre lo realmente desembolsado y lo calculado es bastante confiable y puede afirmarse que la media poblacional de los datos modelados pertenece a la población de “gasto real”, lo cual se confirma con los intervalos de confianza al 95% y 99% que se muestran en las Tablas 2 y 3. Por lo tanto la simulación operativa genera unos datos de gasto que pertenecen con el 99% de confianza a la población real del Gasto GT\*.

Tabla 2. Intervalos de confianza al 95% para el gasto real y calculado Feb.-Nov/02

Z	1.96	Probab. 0.95
Intervalo Confianza	Superior	Inferior
GASTO Sep/99	269,918,164	240,324,238
GASTO Calc.Sep/99	269,054,032	241,188,406

Tabla 3. Intervalos de confianza al 99% para el gasto real y calculado Feb.-Nov/02

Z	2.5	Probab. 0.9904
Intervalo Confianza	Superior	Inferior
GASTO Sep/99	273,994,879	236,247,523
GASTO Calc.Sep/99	272,892,664	237,349,774

Una vez establecido el ajuste de la simulación operativa y verificando el intervalo de confianza de los datos de gasto obtenidos, se procedió a generar 10 bases aleatorias para el caudal y para 12 variables de composición fisicoquímica con las cuales se genera un subconjunto del espacio vectorial C (ver figura 1). Cada base se nombra de la A a la J y se combinan (uno de los vectores caudal composición puede tener la siguiente combinación:

AAAAAAAAAAAAA, otro ABAAAAAAAAAAAAA, etc.); para cada base se obtuvieron las medias respectivas y se plantearon los intervalos de confianza tomando los datos de caudal y fisicoquímicos de campo del STL, la Tabla 4 muestra los promedios mensuales de algunos de los parámetros fisicoquímicos reportados por el laboratorio del STL para el periodo febrero-noviembre 2,002 y se cuenta con información de campañas de muestreo para los análisis de tratabilidad de los lixiviados y durante el pre-arranque del sistema. La Tabla 5 muestra las estadísticas descriptivas de las bases aleatorias simuladas para el caudal y algunos parámetros fisicoquímicos.

Tabla 4. Promedios mensuales para caudal y algunos parámetros fisicoquímicos periodo febrero- noviembre de 2,002.

MES	CAUDAL m3/d	pH	DBO5	DQO	N-NH3	NTK	Alc	Zn	Cu	Cr	Fe	Ni	Hg ppb
Febrero	631.80	8.00	16,251					0.01	0.07	0.28	49.90	0.50	10.00
Marzo	691.20	7.95	15,261	26,653	2,821		13,333	1.73	0.06	0.69	50.46	0.50	6.38
Abril	717.20	8.3	12,192	15,663	2,265	2,932	11,971	1.61	0.06	0.70	45.30	0.48	4.86
Mayo	812.00	8.0	12,974	19,416	2,058	2,957	11,676	2.10	0.07	0.70	60.00	0.60	6.00
Junio	800.03	8.0	13,166	17,357	1,695	2,340	9,995	2.20	0.10	0.70	61.50	0.30	7.10
Julio	786.71	8.4	13,355	17,589	2,215	3,044	12,217	1.90	0.04	0.50	43.20	0.40	4.20
Agosto	873.00	8.4	12,524	16,048	1,962	3,137	13,815	1.40	0.05	0.50	52.30	0.40	0.40
Septiembre	894.73	8.0	16,222	23,252	2,443	3,842	13,808	2.10	0.10	0.70	60.70	0.40	5.60
Octubre	867.48	8.0	14,907	21,125	2,274	3,626	13,071	2.00	0.10	0.40	50.20	0.60	2.20
Noviembre	926.87	7.9	14,878	19,610	2,388	3,570	12,215	1.70	0.10	0.70	57.00	0.50	7.70

Tabla 5. Estadísticas descriptivas de las bases aleatorias de caudal y composición

	Mean	Std.Dev.	Minimum	Maximum	NumCases
Q	12.120	0.029	12.074	12.165	10
DBO5	14,196.300	75.686	14,083.600	14,297.700	10
DOO	21,119.400	179.102	20,807.300	21,338.200	10
NNH3	2,274.110	29.172	2,218.410	2,310.380	10
SOL	2,888.800	8.675	2,875.660	2,905.120	10
SSTOT	1,602.560	7.577	1,594.130	1,618.350	10
ALC	11,958.500	74.474	11,796.200	12,065.500	10
Zn	1.912	0.015	1.894	1.931	10
Cu	0.075	0.001	0.073	0.076	10
Cr	0.559	0.007	0.546	0.564	10
Fe	52.910	0.302	52.560	53.394	10
Ni	0.461	0.006	0.447	0.468	10
Hg	6.025	0.104	5.877	6.199	10

La prueba de hipótesis se orienta a establecer si las bases simuladas pertenecen o no al subconjunto  $C^*$  con distribución  $X \approx N(\mathbf{m}, \mathbf{s}^2)$ , por lo cual esta prueba propone si  $\mathbf{m} = \mathbf{m}^*$  se encuentra en el intervalo de confianza. Los intervalos de confianza tanto al 95% como al 99% se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Intervalos de confianza al 99%

Z	2.5	Probab. 0.9904
Intervalo Confianza	Superior	Inferior
Q	12.1420584	12.0969416
DBO5	14256.1354	14136.4646
DQO	21260.9926	20977.8074
NNH3	2297.17225	2251.04775
SOL	2895.65854	2881.94146
SSTOT	1608.54984	1596.57016
ALC	12017.3769	11899.6231
Zn	1.92341999	1.90008001
Cu	0.07533838	0.07383762
Cr	0.56406257	0.55346743
Fe	53.1485263	52.6712737
Ni	0.46657639	0.45639361
Hg	6.10800814	5.94285186

Tabla 7. Intervalos de confianza al 95%

Z	1.96	Probab. 0.95
Intervalo Confianza	Superior	Inferior
Q	12.1371858	12.1018142
DBO5	14243.21092	14149.3891
DQO	21230.40857	21008.3914
NNH3	2292.190807	2256.02919
SOL	2894.177093	2883.42291
SSTOT	1607.256032	1597.86397
ALC	12004.65946	11912.3405
Zn	1.920899272	1.90260073
Cu	0.0751763	0.0739997
Cr	0.562918292	0.55461171
Fe	53.09698299	52.722817
Ni	0.465476646	0.45749335
Hg	6.09017126	5.96068874

Una vez establecidas los intervalos de confianza para las bases se combinaron para generar los vectores caudal-composición los cuales se sometieron a simulación operativa para calcular la cantidad de lodos producidos y la energía consumida que se utilizan en la formula de pago para calcular los 252 datos de gasto que equivalen al gasto mensual para los 21 años de operación ( 24 de febrero 2,002-24 de febrero 2,023); luego se suman los 252 datos ( $S^* = \sum_{j=1}^{252} GT_j^*$ ) para obtener el valor total de los costos variables para el periodo.

Cada sumatoria representa un punto del subconjunto  $GT^*$  y un valor mínimo de la contaminación de los lixiviados. Se simularon y calcularon 130 datos de gasto total variable cuyas estadísticas descriptivas se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Estadísticas descriptivas del subconjunto  $GT^*$

	GASTO Col \$	GASTO US\$
Mean	77.308.329.439	39.212.551
Median	77.300.000.000	39.195.394
Maximum	77.656.551.905	39.389.178
Minimum	76.960.755.963	39.036.254
Std. Dev.	143.000.000	72.493
Skewness	0.176666	0.176666
Kurtosis	3.128835	3.128835
Observations	130	130

Los intervalos de confianza para el valor de la contaminación de los lixiviados con 95% y 99% de confianza, se muestran en las tablas 9 y 10. Tomando el valor promedio de  $GT^*$  más los costos de inversión en la construcción del STL (UESP,2,000), se tiene que el *valor económico mínimo de la contaminación ambiental medido por el Método de Gasto en mitigación es de Col\$ 88,775,321,868 de Sep/1,999 equivalente a US\$ 45,028,872 de Sep/1,999*. Donde Col\$ 77,308,329,439 equivalen a los costos variables de operación y Col\$ 11,466,992,429 a las inversiones por construcción del STL.

Tabla 9. Intervalo de confianza al 95% para el valor de la contaminación.

Z	1.96	Probab. 0.95
Intervalo Confianza	Superior	Inferior
GASTO Col\$	77,332,911,621	77,283,747,257
GASTO US\$	39,225,013.27	39,200,089.64

Tabla 10. Intervalo de confianza al 99% para el valor de la contaminación.

Z	2.5	Probab. 0.9904
Intervalo Confianza	Superior	Inferior
GASTO Col\$	77,339,684,263	77,276,974,615
GASTO US\$	39,228,446.63	39,196,656.28

Una vez se determina el valor medio mínimo de la contaminación por lixiviados se retoma la base de datos de los vectores caudal-composición que más se aproxime al valor medio del gasto total variable y que pertenece a la población GT\* para establecer las relaciones econométricas del gasto en función de los vectores caudal-composición<sup>4</sup>.

Los valores de los vectores de caudal-composición, así como las variables más significativas de la simulación operativa de la base seleccionada se muestran en la Tabla 11. Con esta base de datos se procedió a la estimación econométrica de la función de gasto:  $GASTO = \mathbf{b}_0 + \sum_i \mathbf{b}_i (\hat{X}^*)_i + \mathbf{e}_i$  y de los modelos rezagados, cuadrático, cúbico y Box-Cox cuyos resultados se muestran en el anexo 1. Los resultados del modelo lineal se resumen en la Tabla 12. Las pruebas estadísticas de la base de datos y las regresiones econométricas se realizaron con la ayuda de los paquetes econométricos Eviews 3.0 y LIMDEP versión 7.0.

En el caso del modelo rezagado resultaron únicamente significativos el caudal y la carga orgánica pero no los rezagos, para los modelos cuadrático, cúbico y Box-Cox, ninguna de las variables explicativas resultó significativa. En el caso del modelo rezagado puede deberse a que las lagunas de entrada son capaces de almacenar el caudal de dos o tres día y que existe una homogenización de los lixiviados por lo cual el impacto del rezago se elimina y no puede explicar el gasto. En el caso del modelo cuadrático ni las solas variables como tampoco su interacción explican el gasto. Cuando se analizan los procesos y operaciones unitarias de tratamiento, algunas etapas del proceso evidencian comportamiento logarítmico pero por lo general trabajan en una región cuasilineal, lo anterior no significa que el proceso como tal sea de tipo lineal, por lo cual era necesario comprobar otras posibilidades de modelos.

<sup>4</sup> En archivo magnético se anexa la base de datos completa de la simulación aleatoria y los resultados de los parámetros técnicos de diseño y operativos del sistema de tratamiento de lixiviados, tales como: Cargas diarias de contaminantes, consumos de potencia y producción de lodos fisicoquímicos y biológicos, etc.

Tabla 11. Valores de las variables de caudal, composición y de proceso del STL del RSDJ.

	Mean	Std.Dev.	Minimum	Maximum	NumCases
GASTO	306.789.000	26.538.200	223.630.000	359.647.000	252
Q	1039.56	109.549	691.2	1216.76	252
DBO5	14226	1252.68	12102.6	16292.2	252
SOL	2884.15	271.839	1346.4	3324.6	252
NNKT	2276.42	372.808	1652.29	2894.02	252
ZN	1.906	0.224	0.008	2.24778	252
CU	0.074	0.021	0.0390491	0.109839	252
CR	0.559	0.095	0.28	0.718131	252
FE	52.902	5.795	43.0672	62.9653	252
NI	0.461	0.091	0.3	0.619808	252
HG	6.038	2.387	0.4	10.0926	252
DOO	21,132	3,313	15608	26653	252
SSD	1,601	162	748	1854.23	252
ALC	11,958	1,091	9995	13815	252
CDDBO	14781.8	1983.33	8744.1	19291.4	252
CDSOL	3003.59	447.813	930.632	3912.63	252
CDNH3	2368.08	472.318	1356.05	3432.18	252
PLD	2677.18	360.519	1581.34	3497.67	252
DO2D	24096.4	3142.09	14540.1	31052.8	252
DOPER	30.4087	0.862916	28	31	252
EMES	403660	56191.6	235320	537046	252
LMES	559.55	70.6193	213.28	713.372	252

La regresión lineal del gasto con respecto a las variables fisicoquímicas y de proceso evidenció problemas de multicolinealidad, lo anterior es consecuencia de que algunas variables de proceso se encuentran correlacionadas con algunas variables fisicoquímicas. Para corregir este problema se excluyeron las variables de proceso y únicamente se consideraron las variables del vector caudal-composición como explicativas del gasto como inicialmente se había propuesto. También se detectó problemas de autocorrelación y mediante la prueba de Breusch-Godfrey se determinó autorrelación tipo AR(2). Se descartó problemas de heteroscedasticidad condicional autorregresiva (ARCH) mediante la prueba ARCH en Eviews y se descartó problemas de heteroscedasticidad mediante la prueba de White. La variable gasto se explica significativamente por cuatro de las variables caudal-composición, estas son el caudal, contaminación orgánica expresada como DBO<sub>5</sub>, los sólidos suspendidos y el nitrógeno. Los metales pesados tomados en cuenta no son significativos para explicar el gasto en tratamiento.

En el caso del nitrógeno, el signo negativo del coeficiente puede explicarse por su ciclo de transformación que durante el fenómeno de nitrificación, el nitrógeno amoniacal consume oxígeno, pero en la etapa de desnitrificación los nitratos aportan oxígeno, por lo cual el consumo neto de oxígeno por estabilización del nitrógeno es comparativamente bajo

y la mayor potencia se consume en la estabilización del material carbonaceo, lo anterior se confirma en la memoria de la línea de tratamiento del STL (UESP,1,999).

Tabla 12. Resultados de la regresión lineal de la variable Gasto .

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6783151	9162225	0.740339	0.4598
Q	229667.7	2330.191	98.56173	0.0000
DBO5	4807.053	288.7041	16.65045	0.0000
SOL	3101.576	1360.109	2.280388	0.0235
NNKT	-2239.977	910.8091	-2.459327	0.0146
ZN	1894515	1771320	1.069549	0.2859
CU	383687.5	16701397	0.022973	0.9817
CR	-3688907	3620919	-1.018777	0.3094
FE	-62026.02	59990.68	-1.033928	0.3022
NI	-7763273	3886336	-1.997582	0.0469
HG	225669.2	140591.3	1.605143	0.1098
DQO	-37.28336	105.1487	-0.354577	0.7232
ALC	-523.9847	319.6626	-1.639181	0.1025
AR(1)	-0.577347	0.065783	-8.776516	0.0000
AR(2)	-0.170197	0.066119	-2.574115	0.0107
R-squared	0.946121	Mean dependent var		3.07E+08
Adjusted R-squared	0.942911	S.D. dependent var		25618557
S.E. of regression	6121120	Akaike info criterion		34.15051
Sum squared resid	8.81E+15	Schwarz criterion		34.3618
Log likelihood	-4253.814	F-statistic		294.7579
Durbin-Watson stat	1.98388	Prob(F-statistic)		0.0000
Inverted AR Roots	-.29+ .29i	-.29 - .29i		

Además la estabilización del nitrógeno consume DBO<sub>5</sub> y el volumen de lodos producidos por la eliminación del nitrógeno es bajo. En el caso de los metales pesados, la precipitación consume poca energía, es probable que existan otras variables explicativas del gasto y no tomadas en cuenta como la lluvia, cortes de energía, mantenimientos, etc. Que lleven a sobrecargas hidráulicas y de lodos pero que no se pueden captar en el modelamiento y simulación operativa.

Se hicieron regresiones del consumo de

potencia y producción de lodos mensuales con respecto a las variables del vector caudal-composición, los resultados se muestran en las Tablas 13 y 14.

Tabla 13 Regresión de consumo de energía vrs caudal-composición

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-415693	19792.76	-21.00227	0.0000
Q	387.3198	5.040924	76.83509	0.0000
DBO5	29.38206	0.621802	47.25306	0.0000
SOL	8.340736	2.927227	2.849364	0.0048
NNKT	-3.364173	1.961263	-1.715309	0.0876
ZN	460.7814	3811.506	0.120892	0.9039
CU	-259.3362	36104.09	-0.007183	0.9943
CR	-7395.331	7826.422	-0.944918	0.3457
FE	-208.5572	129.3331	-1.612558	0.1082
NI	-14200.81	8418.871	-1.686783	0.093
HG	280.4045	303.3114	0.924477	0.3562
DQO	-0.038144	0.226907	-0.168102	0.8666
ALC	0.193104	0.689984	0.279867	0.7798
AR(1)	-0.53369	0.065665	-8.127493	0.0000
AR(2)	-0.177487	0.065821	-2.696502	0.0075
R-squared	0.947185	Mean dependent var		404819.8
Adjusted R-squared	0.944039	S.D. dependent var		54847.52
S.E. of regression	12974.83	Akaike info criterion		21.83753
Sum squared resid	3.96E+10	Schwarz criterion		22.04882
Log likelihood	-2714.692	F-statistic		301.035
Durbin-Watson stat	2.003354	Prob(F-statistic)		0.0000
Inverted AR Roots	-.27+ .33i	-.27 - .33i		

Tabla 14 Regresión de producción de lodos vrs caudal-composición

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-368.363	25.20636	-14.61389	0.0000
Q	0.540988	0.006165	87.75175	0.0000
DBO5	0.027154	0.000814	33.34487	0.0000
SOL	0.015498	0.003782	4.097976	0.0001
NNKT	-0.005393	0.002544	-2.119797	0.0351
ZN	2.626758	4.954987	0.530124	0.5965
CU	-45.0484	46.73532	-0.963905	0.3361
CR	-20.42893	10.11667	-2.019333	0.0446
FE	-0.32496	0.168695	-1.926314	0.0553
NI	-22.84939	10.97441	-2.082061	0.0384
HG	0.413955	0.391892	1.056299	0.2919
DQO	-0.000359	0.000292	-1.23155	0.2193
ALC	-0.000913	0.000896	-1.019365	0.3091
AR(1)	-0.790537	0.059415	-13.30543	0.0000
AR(2)	-0.293835	0.058693	-5.006318	0.0000
R-squared	0.929046	Mean dependent var		560.6877
Adjusted R-squared	0.924819	S.D. dependent var		69.69427
S.E. of regression	19.10962	Akaike info criterion		8.796386
Sum squared resid	85816.76	Schwarz criterion		9.007673
Log likelihood	-1084.548	F-statistic		219.7851
Durbin-Watson stat	1.938746	Prob(F-statistic)		0.0000
Inverted AR Roots	-.40 - .37i	-.40+ .37i		

El consumo de energía se explica por la carga hidráulica, la carga orgánica y sólidos suspendidos. Un aumento de la carga hidráulica genera más bombeo y recirculación dentro del sistema, un aumento de carga orgánica genera más lodos biológicos y más sólidos suspendidos produce un aumento de lodos primarios que inducen en conjunto a un mayor consumo de energía en deshidratación contabilizando más kilovatios al mes. Por otra parte si se deriva (1) con respecto a cada una de las variables significativas se tiene que el gasto marginal se representa por:

$$\frac{\partial GASTO}{\partial x_i} = \frac{\partial \left( \mathbf{b}_0 + \sum_i \mathbf{b}_i (\bar{X}^*)_i \right)}{\partial x_i} \quad (2)$$

y si la variable endógena está en función del caudal, la carga orgánica degradable y sólidos suspendidos entonces las elasticidades del gasto se expresa como:

$$\mathbf{h}_Q = \mathbf{b}_2 \left( \frac{\bar{Q}}{GASTO} \right), \quad \mathbf{h}_{DBO_5} = \mathbf{b}_3 \left( \frac{\overline{DBO_5}}{GASTO} \right), \quad \mathbf{h}_{NNKT} = \mathbf{b}_4 \left( \frac{\overline{NNKT}}{GASTO} \right) \text{ y } \mathbf{h}_{SOL} = \mathbf{b}_5 \left( \frac{\overline{SOL}}{GASTO} \right).$$

Donde  $\mathbf{h}_Q = 0.7782$ ,  $\mathbf{h}_{DBO_5} = 0.2229$ ,  $\mathbf{h}_{NNKT} = -0.01662$  y  $\mathbf{h}_{SOL} = 0.02916$  en todos los casos son inelásticos. En este sentido los gastos marginales son los siguientes:

$$1) \frac{\partial GASTO}{\partial Q} = \$229,668, \quad 2) \frac{\partial GASTO}{\partial DBO_5} = \$4,807, \quad 3) \frac{\partial GASTO}{\partial SOL} = \$3,102 \quad \text{y}$$

$$4) \frac{\partial GASTO}{\partial NNKT} = -\$2,240, \text{ todos medidos en pesos de Sep/99. Es decir, el aumento del caudal}$$

de lixiviados incrementa en 47 veces el gasto en tratamiento comparado con una unidad de carga orgánica biodegradable medido como  $DBO_5$  o en 64 veces comparado con los sólidos suspendidos. Lo anterior tiene implicaciones económicas y técnicas importantes: *Primero*, si se compara con las tasas retributivas actualmente fijadas por el Ministerio del Medio Ambiente (69.39 \$/Kg de  $DBO_5$  y 29.68 \$/Kg de SST) se observa que el costo de tratamiento de un kilo de contaminación orgánica en el STL es aproximadamente 69 veces mayor y la de sólidos 105 veces mayor que la compensación fijada por la agencia ambiental, es decir si la UESP que representa a la sociedad bogotana paga más por tratar que por botar, implica que valora más el efecto de la contaminación por lixiviados que lo valorado por la agencia ambiental. Con lo anterior se observa que específicamente en el caso del RSDJ, las señales económicas de la agencia ambiental tienen un efecto adverso al que se pretende, ya que por racionalidad económica induciría a pagar las tasa retributiva y

no a gastar en el tratamiento de lixiviados, en este punto, la DBO<sub>5</sub> ni los sólidos suspendidos totales captarían el efecto adverso de los metales pesados y el resto de cargas contaminantes como los virus, bacterias y residuos peligrosos . *Segundo*, desde el punto de vista técnico se puede afirmar que la reducción de la carga hidráulica y la carga carbonosa como DBO<sub>5</sub> al sistema reduce el gasto y que unos lixiviados nitrificados tiene un efecto favorable al reducir el gasto en tratamiento.

Si se parte de las conclusiones de los estudios de: 1) González (1,998), *Efectos de la separación de la materia orgánica sobre los compuestos inorgánicos de los lixiviados de rellenos sanitarios* y 2) el de SEPI para los rellenos sanitarios de Laogang y Jiangzhen en Shanghai donde estimaron que la cantidad de lixiviados producidos aumenta con el incremento de las basuras depositadas y que una celda de 7 m. de altura produce cerca de 2 veces más lixiviado que una celda de 5 m. y 6 veces más lixiviados que una celda de 3 m. y que además, el depósito de materiales de construcción aumenta la porosidad del medio y la producción de lixiviados. Se infiere que una política de manejo de RSM que reduzca la producción de basuras y el contenido de material orgánico depositado en el RSDJ, llevará a una disminución en la producción de lixiviados, de los costos ambientales y de mitigación. Debe recordarse que los lixiviados producidos por las basuras domésticas e industriales son más contaminantes en razón al mayor contenido de carga orgánica, tóxicos en general y altas cargas de virus y bacterias que los aportados por los materiales de construcción. Lo anterior tiene efectos importantes desde el punto de vista de la economía ambiental, de la ingeniería de rellenos sanitarios y de equidad.

## **6. Conclusiones**

La metodología del *Gasto en Mitigación* y los modelos econométricos especificados en el presente artículo permitieron estimar en Col\$ 88,775,321,868 de Sep/1,999 equivalente a US\$ 45,028,872 de Sep/1,999 el valor económico mínimo de la contaminación de los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana y a determinar que las variables que mejor explican el gasto en mitigación son el caudal, la carga orgánica soluble medida como DBO<sub>5</sub>, el nitrógeno y los sólidos suspendidos.

Se estableció que el STL trabaja por encima del nivel de diseño hidráulico, por lo cual rápidamente alcanzará el nivel de saturación conduciendo a una mala operación y a una



baja calidad del lixiviado tratado y no se podrán tratar sobrecargas hidráulicas ni de contaminantes. Se encontró que el uso de la  $DBO_5$  como parámetro de contaminación orgánica es adecuado para la mayoría de estudios económicos de valoración de contaminación hídrica de tipo doméstica pero no para los industriales con cargas de metales pesados u otros tipos de contaminantes tóxicos.

Se contrastó el valor económico que la sociedad bogotana asigna a un kilogramo de carga orgánica soluble medida como  $DBO_5$  y a un kilogramo de sólidos suspendidos tratados en el STL contra los valores que la agencia ambiental le asigna a las mismas sustancias probablemente en otros contextos. Se determinó que el efecto económico del tratamiento de un metro cúbico de lixiviado es de \$ 229,668, es decir 47 veces mayor que el tratamiento de un kilo de carga orgánica; además que el gasto en el STL no depende de los rezagos de las variables explicativas y que tiene un comportamiento lineal con respecto a estas pero que hay variables explicativas no introducidas en el modelo lineal que afectan al gasto como por ejemplo la lluvia, cortes de energía, etc. que probablemente conlleven a los problemas de autorrelación detectados.

Los resultados de esta investigación permite concluir lo siguiente:

*Primero*, la actual política de RSM del Distrito Capital propicia una alta producción de lixiviados producto de la cantidad y calidad de las basuras depositadas en el relleno sanitario Doña Juana. *Segundo*, un cambio de política de RSM orientada a: 1) disminuir la producción de basuras, 2) disminuir la cantidad de material orgánico asociada a los RSM y a 3) reducir el volumen de basuras que se deposita en el RSDJ; bajará la tasa actual de producción de lixiviados disminuyendo el riesgo potencial del daño ambiental hídrico del RS, los costos operativos del STL y aumentará la vida útil del Relleno Sanitario. *Tercero*, la actual tendencia de producción de lixiviados obliga a buscar soluciones tanto técnicas como de política de RSM de corto y mediano plazo para mitigar el aumento en la contaminación ambiental hídrica de RSDJ. *Cuarto*, el valor económico mínimo de la contaminación puede utilizarse para establecer la suscripción de la póliza ambiental según la Ley 491/99.

## **7. Recomendaciones**

Como complemento a la presente investigación se recomienda lo siguiente:

*Primero*, elaborar un estudio económico para la optimización dinámica de los terrenos del actual RSDJ y de la tasa óptima de depósito de basura donde se incluya las combinaciones de alternativas tecnológicas como el compostaje y el reciclaje con la actual tecnología de Relleno Sanitario. *Segundo*, elaborar un estudio económico que valore el impacto ambiental de las emisiones atmosféricas sobre la salud y otros bienes económicos dentro de la zona de influencia del Relleno Sanitario. *Tercero*, Elaborar un estudio que permita establecer los incentivos económicos más adecuados para Bogotá D.C. con el propósito de reducir la producción de basuras y cambiar la composición de las mismas, por ejemplo: impuesto pigooviano, tasa por producción, subsidios, etc..

## **Referencias**

- Behrentz, E; Beltz, F. y Giraldo E. (1,997). *Modelo computacional de la generación de lixiviados y de la producción de gases en un relleno sanitario*. Universidad de los Andes. Santafé de Bogotá..
- Brunal Brunal, Charles David. (2,001). *Calibración de un modelo matemático aplicado a rellenos sanitarios*. Bogotá. Tesis Magíster en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
- Canessa Mora, Rodolfo. (2,000). *Estimación de los beneficios económicos derivados de la política de protección del recurso hídrico en el Parque Nacional Chingaza*. Tesis PEMAR, Facultad de Economía. Universidad de los Andes.
- Cerda Ampié, Rosa L. (1,996). *Valoración del Impacto de Contaminación Hídrica de la Actividad Cafetera en Microcuencas*. Santafé de Bogotá, Tesis PEMAR, Facultad de Economía. Universidad de los Andes.
- Corporación Siglo XXI-DAMA-DNP. (1,996). “*Perfil Ambiental de Santafé de Bogotá*”, Bogotá.
- Cruz, Guillermo (2,002). *Regulación y gestión ambiental industrial en Bogotá, Colombia*. Tesis de PEG y PEMAR, Facultad de Economía. Universidad de los Andes.
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente. DAMA.(1,994). *Agendas Locales Ambientales*. Bogotá.
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente. DAMA.(1,999). *Gestión Ambiental en el Distrito Capital. Enero 1,998 a Diciembre 1,999*. Bogotá.

- Dimas H, Leopoldo A. (1,998). *Estimación optima del tamaño y ubicación de rellenos sanitarios para la ciudad de Santafé de Bogotá :Un enfoque económico-ambiental*. Tesis Magíster en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Facultad de Economía. Universidad de los Andes.
- Freeman III,A. Myrick.(1,993).*The Measurement of Environmental and Resource Values. Theory and Methods*. Resources for the Future. Washington,D.C.
- García, M.C. (1,996). *Valoración económica de los servicios de protección hídrica control de sedimentos de un bosque: El caso de Bucaramanga*. Tesis PEMAR, Facultad de Economía. Universidad de los Andes.
- Gaudet, Gerard; Moreaux, Michel; Salant, Stephen W.(1,998). *Intertemporal and Spatial Depletion of Landfills* Fondazione Eni Enrico Mattei *Note di Lavoro: 14/98*. [www.feem.it](http://www.feem.it)
- Goldar B, Mukherji B., Smita M. (2,001). *Water Pollution Abatement Cost Function: Methodological issues and an Application to Small-Scale Factories in an Industrial Estate in India*. Environment and Development Economics, 6 (2,001) 103-122. Cambridge University Press.
- Gómez A. Gladys L. (2,000). *Modelación matemática de sustancias presentes en los lixiviados de rellenos sanitarios*. Tesis Magíster en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
- González Grey, Ghisel A.(1,998). *Efectos de la separación de la materia orgánica sobre Los compuestos inorgánicos de los lixiviados de rellenos sanitarios*. Tesis Magíster en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
- Highfill, Jannett; Mcasey, Michael.(1,997). *Municipal Waste Management: Recycling and Landfill Space Constraints*. Journal of Urban Economics, January 1,997, v. 41, iss. 1, pp. 118-36.
- Hite, Diane.(1,998). *Information and Bargaining in Markets for Environmental Quality*. Land Economics, August 1,998, v. 74, iss. 3, pp. 303-16.
- Hosoda, Eiji. (2,001). *Recycling and Landfilling in a Dynamic Sraffian Model: Application of the Corn-Guano Model to a Waste Treatment Problem*. Metroeconomica, August 2,001, v. 52, iss. 3, pp. 268-81.
- Huhtala, Anni. (1,997). *A Post-Consumer Waste Management Model for Determining*

- Optimal Levels of Recycling and Landfilling*. Fondazione Eni Enrico Mattei Note di Lavoro: 84/97. [www.feem.it](http://www.feem.it)
- Jakus, Paul M.; Tiller, Kelly H.; Park, William M.(1,996). *Explaining Rural Household Participation in Recycling*. Journal of Agricultural and Resource Economics, July 1,996, v. 21, iss. 1, pp. 96-108.
- Moreno Pioda, Gabriela.(1,998). *Regulación informal en el control de la contaminación hídrica industrial de las cuencas de los ríos Fucha y Tunjuelito*. Tesis Magíster en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Facultad de Economía. Universidad de los Andes.
- Moya Lozano, Luz Esperanza. (1,998). *Modelación matemática para la generación de gas y producción de lixiviados en un relleno sanitario bajo condiciones típicas*. Bogotá. Tesis Magíster Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
- Mrozek, Janusz R.(2,000). *Changes over Time in the Decision to Adopt Curbside Recycling*. Atlantic Economic Journal, June 2,000, v. 28, iss. 2, pp. 239-53.
- Munasinghe, M. (1,992). *Environmental Economics and Valuation in Development Decision making: Environmental Economics and Natural Resource Management in Developing Countries*. Munasinghe (Ed.) CIDIE.
- Nelson, Arthur C.; Genereux, John; Genereux, Michelle.(1,992). *Price Effects of Landfills on House Values*. Land Economics, November 1,992, v. 68, iss. 4, pp. 359-65.
- Patiño Posse, Miguel. 1999. *Derecho Ambiental Colombiano*. Legis. Bogotá.
- Ready, Mark J.; Ready, Richard C.(1,995). *Optimal Pricing of Depletable, Replaceable Resources: The Case of Landfill Tipping Fees* .Journal of Environmental Economics and Management, May 1,995, v. 28, iss. 3, pp. 307-323.
- Ríos Villegas, Mónica María. (1,997). *Modelación matemática de flujos internos en Rellenos sanitarios*, Bogotá. Tesis Magíster en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
- Roberts, Roland K.; Douglas, Peggy V.; Park, William M.(1,991). *Estimating External Costs of Municipal Landfill Sting through Contingent Valuation Analysis: A Case Study*. Southern Journal of Agricultural Economics, December 1,991, v. 23, iss. 2, pp. 155-65.
- Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos – UESP.(1,999). *Términos de referencia concurso público 003 de 1,999*.

- Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos – UESP .(1,999). *Informe de Evaluación sobre la Planta de Tratamiento de Lixiviados*. Bogotá.
- Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos – UESP .(1,999). *Memoria de Línea de Tratamiento Planta de Tratamiento de Lixiviados*. Bogotá.
- Varian, Hal R. (1,992). *Análisis microeconómico*. Tercera Edición. Antoni Bosch. Barcelona.
- Velzea Ltda, Nam Ltda, Hera Holding. (1,999). *Documento técnico para el tratamiento de lixiviados del relleno*
- Ward, Robert; Li, Jinan.(1,993). *Solid-Waste Disposal in Shanghai*. Geographical Review, Volume 83, Issue 1(Jan.,1,993), 29-42.

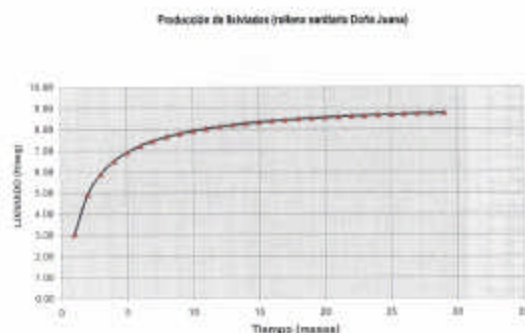
# ANEXO 1

Cuadro 1. Ecuaciones de lavabilidad

DQO acum [mg/kg]= -4,6829*FD <sup>2</sup> +1.964,3 *FD	R <sup>2</sup> =0.9918
Cl acum [mg/kg]= -0,3280* FD <sup>2</sup> +92,9940*FD.	R <sup>2</sup> =0.9918
S.D. acum[mg/kg]= -2,6558*FD <sup>2</sup> +1415,7*FD+9678.	R <sup>2</sup> =0.9957
Ca acum [mg/kg]= -1,1337*FD <sup>2</sup> +239,59 *FD.	R <sup>2</sup> =0.9931
Mn acum[mg/kg] = -0.0025 * FD <sup>2</sup> + 0.6688 * FD + 20,249.	R <sup>2</sup> =0.8001
K acum [mg/kg]= -0.0625* FD <sup>2</sup> +16,38* FD.	R <sup>2</sup> =0.7312
Mg acum [mg/kg]= -0,07*FD <sup>2</sup> +15,786*FD.	R <sup>2</sup> =0.9168
Fe acum. [mg/kg] = -0.0247 *FD <sup>2</sup> +14,815*FD.	R <sup>2</sup> =0.9976
Zn acum. [mg/kg] = -0.045 *FD <sup>2</sup> +3,1545*FD.	R <sup>2</sup> = 0.9979

Donde FD es el factor de dilución de una celda típica de la Zona IV.

Figura 4. Producción de lixiviados en una Celda



## CLAUSULAS CONTRACTUALES Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE LIXIVIADOS DE LA RESOLUCIÓN CAR 3358/90

Tabla 15. Parámetros fisicoquímicos Resolución CAR No. 3358

PARAMETRO	EXPRESADO COMO	VALOR RESOLUCIÓN CAR No 3358	Concentraciones máximas permitidas del Lixiviado crudo y base del diseño del Sistema
ALUMINIO	ppm Al	5.0	0.2
ARSENICO	ppm As	0.1	0.1
BERILIO	ppm Be	0.1	0.1
BORO	ppm Be	0.3	0.3
CINC	ppm Zn	2.0	7-10
COBALTO	ppm Co	0.05	0.05
COBRE	ppm Cu	0.2	0.2-0.3
CROMO TOTAL	ppm Cr	0.1	0.8
DBO5	ppm O2	100	15,000
GRASAS Y ACEITES	ppm	2.0	200-400
HIERRO	ppm Fe	5.0	800
LITIO	ppm Li	2.5	2.5
MANGANESO	ppm Mn	0.2	0.2
MERCURIO	ppm Hg	0.01	0.02
MOLIBDENO	ppm Mo	0.01	0.01
NIQUEL	ppm Ni	0.2	3.5
PLOMO	ppm Pb	0.1	0.8
SELENIO	ppm Se	0.02	0.02
VANADIO	ppm V	0.1	0.1
pH		4.5 - 9.0	7
FENOLES	ppm Fenol	0.2	5
DIFENIL POLICLORADOS	ppm Agente activo	ND	ND
COMPUESTOS ORGANOCLORADOS	ppm Agente activo	0.05	0.05
NITRÓGENO AMONIAICAL	ppm NH4+		2,000
ALCALINIDAD	ppm CaCO3		12,000
CLORUROS	ppm Cl-		4,000
SULFATOS	ppm SO4-		1,000
AGV	ppm AC		7,000
SOLIDOS SUSPENDIDOS	ppm SS		2,500

Cláusula 13. VALOR DEL CONTRATO Y REMUNERACION EN FAVOR DEL CONCESIONARIO: El valor del contrato es indeterminado. No obstante, para efectos fiscales; determinación de los valores a asegurar en la garantía única y demás pólizas que se pacten en el presente contrato; y la cláusula penal pecuniaria, dicho valor se estima así:

13.1. Para la Etapa I, en \$10.800.000.000<sup>oo</sup> discriminados así:

- Un componente en moneda nacional que asciende a \$ 3.975'576.037<sup>oo</sup> (tres mil novecientos setenta y cinco millones quinientos setenta y seis mil treinta y siete pesos colombianos).
- Un componente en moneda extranjera que asciende a US\$ 3'461.500<sup>oo</sup> (tres millones cuatrocientos sesenta y un mil quinientos dólares americanos) que, tasados a \$ 1.971.52 cada uno, corresponden a \$ 6.824'423.964<sup>oo</sup> (seis mil ochocientos veinticuatro millones cuatrocientos veintitrés mil novecientos sesenta y cuatro pesos colombianos).

No obstante, los desembolsos del componente en moneda extranjera se harán en pesos colombianos, utilizando la tasa representativa del mercado, suministrada por las autoridades económicas y correspondiente a las siguientes fechas:

- Para el anticipo, la fecha de firma de la orden de pago.
- Para los demás desembolsos, la fecha de giro efectivo certificado por la entidad financiera receptora de los recursos. La certificación deberá ser allegada a la UESP por el CONCESIONARIO.

El componente en moneda extranjera también podrá ser desembolsado en dólares americanos a discreción de la UESP, en cuyo caso no habrá lugar a diferencial cambiario alguno.

13.2. Para la ETAPA II, en \$ 3.814'008.210<sup>oo</sup> (tres mil ochocientos catorce millones ochocientos diez pesos colombianos) correspondientes a la facturación estimada para el primer año de operación, administración y mantenimiento del STL. Este valor se calculó teniendo en cuenta las cantidades de lixiviados, lodos y energía eléctrica, contenidas en la propuesta del CONCESIONARIO del STL. Se tomaron como datos los precios pactados en este contrato para los tratamientos físico-químico, biológico, y de lodos, contenidos en la cláusula 14 del mismo, al igual que los costos fijos mensuales allí señalados, y detallados en el cuadro 1 anexo al presente contrato y parte integral de éste. Adicionalmente, se asumieron las inflaciones esperadas por las autoridades económicas para los años 1999 y 2000.

#### 14. 2. ETAPA II DEL S.T.L.

Para efectos de calcular la suma mensual retribuida al CONCESIONARIO por las labores de administración, operación y mantenimiento, se adoptan las siguientes definiciones y fórmulas de liquidación:

##### 14.2.1. Definiciones

A: COSTO FIJO DE ADMINISTRACIÓN

CF: COSTO FIJO DE OPERACIÓN MENSUAL

CV: COSTO VARIABLE TOTAL MENSUAL

CT : COSTOS TOTALES MENSUALES

CL: costo unitario de tratamiento y disposición final de lodos

cfq: costo variable de tratamiento físico- químico, expresado en pesos por metro cúbico de lixiviados efectivamente tratados.

cb : costo variable de tratamiento biológico, expresado en pesos por kilovatio hora de energía

K: Caudal de lixiviados efectivamente tratados en el mes, en el proceso físico-químico

T : toneladas de lodo efectivamente tratados en el mes, al 33% de sólidos de la torta

E : kw-hora de energía consumidos en el mes (o tratamiento biológico)

\* : signo de multiplicación

##### 14.2.2. Costos fijos de operación

La suma a cancelar mensualmente al operador por concepto de costos fijos mensuales (CF) es de \$ 32,636,474.<sup>oo</sup> (treinta y dos millones seiscientos treinta y seis mil cuatrocientos setenta y cuatro, pesos colombianos). A partir de la fecha de perfeccionamiento del contrato, este valor se indexará con la inflación mensual observada por el DANE o la autoridad que haga sus veces.

##### 14.2.3. Costos Variables unitarios

Los costos variables unitarios son los siguientes:

Cfq: \$ 4.973<sup>oo</sup> pesos colombianos, por metro cúbico de lixiviado efectivamente tratado.

Cb : \$ 122.0 pesos colombianos, por kilovatio hora consumida por el operador.

Los valores de los costos variables unitarios aquí especificados serán válidos siempre y cuando los correspondientes procesos físico-químicos y/o biológicos estén operativos, según lo certificado por la Interventoría designada por la UESP para tal fin.

A partir de la fecha de perfeccionamiento del contrato, este valor se indexará con la inflación mensual observada por el DANE o la autoridad que haga sus veces.

#### 14.2.4. Costo Variable Total (CV)

La suma a cancelar al concesionario del STL por concepto de costos variables totales del STL en la etapa II, se calculará de la siguiente forma:

$$CV = (cfq * K) + (cb * E)$$

#### 14.2.5. Costo Fijo de Administración (A)

La suma a cancelar al CONCESIONARIO por concepto de costos fijos mensuales de administración, es de \$ 30'341.724<sup>00</sup> (treinta millones trescientos cuarenta y un mil setecientos veinte y cuatro, pesos colombianos).

A partir de la fecha de perfeccionamiento del contrato, este valor se indexará con la inflación mensual observada por el DANE o la autoridad que haga sus veces.

#### 14.2.6. Costo Total de Tratamiento y disposición final de lodos (CL)

El costo unitario por la disposición final de lodos será de \$ 34.681<sup>00</sup> (treinta y cuatro mil seiscientos ochenta y un pesos colombianos) por tonelada de lodo producido y tratado.

A partir de la fecha de perfeccionamiento del contrato, este valor se indexará con la inflación mensual observada por el DANE o la autoridad que haga sus veces.

El valor mensual a reconocer al operador del STL por este concepto se calculará así:

$$CL = \$ 34.681^{00} * T$$

#### 14.2.7. Costo Total mensual de operación, administración y mantenimiento (CT)

La suma a cancelar al CONCESIONARIO por concepto de costos mensuales totales (CT) se calculará con la siguiente fórmula de pago:

$$CT = ( (CF + CV) * 1.0774 ) + A + CL$$

**PARÁGRAFO PRIMERO:** A partir del inicio de la Etapa II, los precios establecidos en esta cláusula se indexarán con la inflación mensual esperada por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). Si al final de cada año calendario la diferencia entre la inflación observada por el DANE o la autoridad que haga sus veces, y la inflación esperada para ese mismo período fuese superior a 2.0 puntos porcentuales, el diferencial inflacionario multiplicado por el monto de pagos del año será reconocido al CONCESIONARIO en cuotas mensuales durante el siguiente año. Este valor se cancelará con cargo al "Fondo De Actividades Relleno Sanitario" mencionado en la Cláusula 13 parágrafo segundo de este contrato. Similar procedimiento se surtirá si el diferencial es a favor de la UESP.

**PARÁGRAFO SEGUNDO:** En el evento en que la liquidación mensual según lo dispuesto por la fórmula del numeral 14.2.7 exceda el valor existente en el "Fondo Actividades Relleno Sanitario" la UESP adoptará las medidas requeridas para garantizar el pago de sus obligaciones con el CONCESIONARIO.



Tabla 16. Valores máximos de los contaminantes

Parámetro	Unidades	Valor diseño *	Carga máxima día ( kg/día ) diseño *	Valor promedio nov-dic99**	Carga máxima día ( kg/día ) nov-dic 99**
pH	Ud	7		7,23	
Potencial Redox	mV			10,75	
DQO total	mg/l O2			46.202	32.341
DQO soluble	mg/l O2			41.048	28.733
DBO5 total	mg/l O2	15	10.5	30.838	21.586
DBO5 soluble	mg/l O2			27.675	19.373
Conductividad	µS/cm (25°C)			24.25	
Alcalinidad	mg CaCO3/l	12		12.85	8.995
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	mg CaCO3/l			12.85	8.995
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg CaCO3/l			0	0
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	2	1.4	2.095	1.466
Aceites - grasas	mg/l	200-400	280	75	52,5
SS(Sólidos S)	mg/l	2.5	1.75	2.5	1.75
Fenoles	mg/l	5	3,5	8	5,6
Organoclorados	mg/l	0,05	0,035	No detect.	-
PCB,s	mg/l	No detect.	-	No detect.	-
Fe	mg/l	800	560	292	204
Mn	mg/l	0.2	0,14	5.46	3.8
Co	mg/l	0,05	0,035	0,68	0,5
Al soluble *	mg/l	0,2	0,14	0,34	0,23
B	mg/l	0,3	0,21	0,2	0,14
V	mg/l	0,1	0,07	0,04	0,028
Mo	mg/l	0,05	0,035	0,01	0,007
Be	mg/l	0,1	0,07	<0,01	0,007
Se	µg/l	20	0,014	<0,91	0,006
As	µg/l	100	0,07	31	0,021
Cr <sup>3+</sup>	mg/l			0,72	0,5
Cr <sup>6+</sup>	mg/l			< 0,05	0,035
Cr	mg/l	0,8	0,56	0,72	0,5
Hg	µg/l	20	0,014	335	0,23
Li	mg/l	2,5	1,75	0,21	0,1
Pb	mg/l	0,8	0,56	0,54	0,4
Cd	mg/l	0,25	0,175	0,03	0,021
Cu	mg/l	0,2-0,3	0,21	0,08	0,1
Zn	mg/l	07-Oct	7	11	7,7
Ni	mg/l	3,5	2,45	1,39	0,97

Notas:

\* Las dos primeras columnas, corresponden a las cargas contaminantes consideradas para el diseño del sistema de tratamiento de lixiviados. Estos coinciden con los valores indicados en el “Tabla No. 1. Valores máximos de los contaminantes“ del anexo al contrato entre la UESP y el Consorcio denominado “ Documento Técnico para el tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario de Doña Juana “

\*\* Valores promedio y carga contaminante máxima establecida, sobre las muestras integradas respecto a los caudales de los lixiviados procedentes de las zonas, I, Mansión, II, IV y VII . La campaña de análisis aquí recogidos, se realizó entre el 24 de noviembre de 1999 y el 7 de Diciembre de 1999, sobre cuatro muestras. Los caudales tomados para la ponderación de la muestra integrada, fueron los que en su momento facilitó la Interventoría del relleno Sanitario de Doña Juana.

Tabla 17. Modelación cuadrática del GASTO

Dependent Variable: GASTO				
Method: Least Squares				
Date: 02/08/03 Time: 09:55				
Sample: 1 252				
Included observations: 252				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-1.62E+08	1.35E+08	-1.202484	0.2304
Q	228311.1	115987.7	1.968408	0.0502
Q^2	9.109323	40.03866	0.227513	0.8202
DBO5	15137.76	12014.47	1.259961	0.2089
DBO5^2	-0.321122	0.350943	-0.915024	0.3611
NNKT	55231.94	30287.98	1.82356	0.0695
NNKT^2	0.168154	3.726402	0.045125	0.964
SOL	46520.59	32366.97	1.437286	0.152
SOL^2	-6.215201	4.52414	-1.373786	0.1708
Q*DBO5	3.824065	4.017643	0.951818	0.3422
Q*NNKT	-51.1127	19.4803	-2.623815	0.0093
Q*SOL	0.992132	19.30306	0.051398	0.9591
DBO5*NNKT	-1.475389	1.336487	-1.10393	0.2707
DBO5*SOL	-1.685297	1.605127	-1.049946	0.2948
Q*DBO5*NNKT*SC	4.30E-07	3.40E-07	1.263863	0.2075
R-squared	0.935486	Mean dependent var	3.07E+08	
Adjusted R-squared	0.931675	S.D. dependent var	26538211	
S.E. of regression	6936846	Akaike info criterion	34.40027	
Sum squared resid	1.14E+16	Schwarz criterion	34.61036	
Log likelihood	-4319.434	F-statistic	245.4721	
Durbin-Watson stat	2.857518	Prob(F-statistic)	0	

Tabla 19. Modelación cúbica del Gasto

Dependent Variable: GASTO				
Method: Least Squares				
Date: 02/08/03 Time: 10:05				
Sample: 1 252				
Included observations: 252				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-1.60E+08	9.09E+08	-0.176295	0.8602
Q	-744189.5	795914.3	-0.935012	0.3507
Q^2	952.3645	792.3014	1.202023	0.2305
Q^3	-0.30857	0.261492	-1.180036	0.2392
DBO5	63145.1	188823.3	0.334414	0.7384
DBO5^2	-3.739442	13.32586	-0.280615	0.7792
DBO5^3	7.90E-05	0.000312	0.252952	0.8005
NNKT	248991.2	186281.9	1.336636	0.1826
NNKT^2	-109.9155	82.88893	-1.326058	0.1861
NNKT^3	0.015901	0.012129	1.310962	0.1911
SOL	-29801.73	104346.8	-0.285603	0.7754
SOL^2	21.74599	41.96529	0.51819	0.6048
SOL^3	-0.003718	0.005541	-0.670963	0.5029
R-squared	0.933007	Mean dependent var	3.07E+08	
Adjusted R-squared	0.929644	S.D. dependent var	26538211	
S.E. of regression	7039195	Akaike info criterion	34.42209	
Sum squared resid	1.18E+16	Schwarz criterion	34.60417	
Log likelihood	-4324.184	F-statistic	277.3798	
Durbin-Watson stat	2.857486	Prob(F-statistic)	0	

Tabla 18. Modelación rezagada del GASTO

Dependent Variable: GASTO					
Method: Least Squares					
Date: 02/08/03 Time: 10:01					
Sample(adjusted): 5 252					
Included observations: 248 after adjusting endpoints					
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.	
C	18769329	18633827	1.007272	0.3149	
Q	216601.3	12708.75	17.04349	0	
Q(-1)	-296.9646	13192.51	-0.02251	0.9821	
Q(-2)	-1450.222	13444.93	-0.107864	0.9142	
Q(-3)	-10802.54	13184.21	-0.819354	0.4134	
Q(-4)	26841.67	12506.38	2.146239	0.0329	
DBO5	4851.148	368.6508	13.1592	0	
DBO5(-1)	74.33458	369.3948	0.201233	0.8407	
DBO5(-2)	-120.4568	369.3614	-0.326122	0.7446	
DBO5(-3)	-136.1562	372.1768	-0.365837	0.7148	
DBO5(-4)	-699.0363	368.4783	-1.89709	0.0591	
NNKT	-85.17839	1236.366	-0.068894	0.9451	
NNKT(-1)	-2673.677	1230.106	-2.173534	0.0308	
NNKT(-2)	1627.571	1217.49	1.336825	0.1826	
NNKT(-3)	-1298.046	1212.189	-1.070827	0.2854	
NNKT(-4)	-956.7597	1218.606	-0.785126	0.4332	
SOL	3465.066	1836.365	1.886916	0.0604	
SOL(-1)	-498.0219	1812.699	-0.274741	0.7838	
SOL(-2)	-1036.568	1814.522	-0.571262	0.5684	
SOL(-3)	717.0128	1806.07	0.397002	0.6917	
SOL(-4)	-2893.464	1728.216	-1.674249	0.0955	
R-squared	0.929009	Mean dependent var	3.08E+08		
Adjusted R-squared	0.922754	S.D. dependent var	25176374		
S.E. of regression	6997292	Akaike info criterion	34.44082		
Sum squared resid	1.11E+16	Schwarz criterion	34.73833		
Log likelihood	-4249.662	F-statistic	148.5297		
Durbin-Watson stat	2.822425	Prob(F-statistic)	0		

Tabla 20. Modelación Box-Cox

**BOXCOX; Lhs=GASTO; Rhs=ONE, Q, DBO5, SOL, NH3, CDDBO, CDSOL, CDNH3, PLD, DO2D, DOPER, EMES, LMES; Lambda=0\$**

Variable	Coefficient	Standard Error	b/St. Er.	P[ Z >z]	Mean of X
Q	-.1004410141E+16	.23701306E+16	-.424	.6717	1040.1642
DBO5	-229.0808493	246.55917	-.929	.3528	14166.526
SOL	-849.9444595	764.29110	-1.112	.2661	2884.1548
NH3	632.4310449	820.11033	.771	.4406	2276.4149
CDDBO	.8035281131E+16	.18961045E+17	.424	.6717	14746.089
CDSOL	792.0947321	760.81423	1.041	.2978	3004.7627
CDNH3	.7045258553E+15	.41396494E+16	.170	.8649	2368.8672
PLD	-.3993634810E+17	.89793751E+17	-.445	.6565	2670.6480
DO2D	-.5180457657E+15	.30439307E+16	-.170	.8649	24046.559
DOPER	5326197.394	76914.776	69.248	.0000	30.408730
EMES	141.2779018	4.3120200	32.764	.0000	402658.15
LMES	40301.56287	1508.5046	26.716	.0000	558.76297
Constant	-91459513.29	.16588783E+13	.000	1.0000	