

Diseño de una planta para el tratamiento del lixiviado en Vertedero de Sagua La Grande

Design of a plant for the treatment of leachate in Sagua la Grande Landfill

MSc. Teresa Margarita Cárdenas-Ferrer^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-2054-3136>

Dr. C. Ronaldo Francisco Santos-Herrero¹  <https://orcid.org/0000-0002-5009-2084>

Dra. C. Ana Margarita Contreras-Moya¹  <https://orcid.org/0000-0001-9374-9376>

Dra. C. Elena Rosa-Domínguez¹  <https://orcid.org/0000-0002-5371-0976>

MSc. Yania Correa -Cortés¹  <https://orcid.org/0000-0002-0361-2526>

¹Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Cuba.

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: tcardenas@uclv.cu

RESUMEN

Un contaminante presente en el vertedero de Sagua la Grande son los lixiviados, líquidos oscuros producidos por la descomposición de la materia orgánica y el agua que se escurre a consecuencias de las precipitaciones, con alta carga orgánica, sin que reciban el tratamiento adecuado.

En el trabajo se calculó el caudal de lixiviados existente en el vertedero tomando como referencia la época lluviosa del municipio (mayo- octubre) con acumulados importantes en las precipitaciones, para ello se utilizaron dos métodos de cálculo, el método suizo y el método de balance hídrico, como resultado se obtuvo, por el método suizo un caudal de lixiviado es de 0,59 L/seg, mientras que, por el balance hídrico el caudal fue de 0,58 L/seg, por tanto los resultados en ambos métodos fueron similares.

Como resultado del estudio se propone el tratamiento primario, con un desarenador con un caudal máximo de 4 L/seg, de 3,5 m de longitud y un ancho de 0,80 m, con velocidad de sedimentación de 0,030 m/seg y seguidamente el tratamiento biológico

un reactor USAB (Upflow Anaeróbico Sludge Blanket), con una altura de 4 m, un radio de 1,75 m y un volumen de 38,48 m³, tiempo de retención hidráulica (THR) de 2,67 horas con carga hidráulica de 1,49 m/h, el filtro biológico con una altura de 2,80 m y un ancho de 1,20 m. Para el tratamiento físico-químico se propone el lecho de secado para la recolección de los lodos digeridos con un ancho de 1,80 m y una longitud de 2,0 m.

Palabras clave: tratamiento de lixiviado; residuos sólidos urbanos; vertedero.

ABSTRACT

A pollutant present in the landfill of Sagua la Grande is leachate, dark liquids produced by the decomposition of organic matter and the water that draining as a result of rainfall, with high organic load, without receiving adequate treatment.

In the work the flow of leachate existing in the landfill was calculated taking as reference the rainy season of the municipality (May-October) with important accumulated the rainfall, two calculation methods were used, the Swiss method and the water balance, As a result, it was obtained that in the Swiss method the leachate flow rate is 0,59 L/sec, while in the water balance the flow rate was 0,58 L/sec, therefore the results in both methods were similar.

As an alternative, the primary treatment is proposed, by means of a sand trap with a maximum flow of 4 L/sec, 3,5 m in length and a width of 0,80 m, with a sedimentation rate of 0,030 m / sec, a USAB (Sludge Blanket Anaerobic Up flow) reactor for the treatment Biological, with a height of 4 m, a radius of 1,75 m an volume of 38,48 m³, hydraulic retention time (HRT) of 2,67 hours with hydraulic load of 1,49 m / h, the biological filter with a height of 2,80 m, a width of 1,20 m, for the physical-chemical treatment the drying bed is proposed for the collection of digested sludge with a width of 1,80 m a length of 2,0 m.

Keywords: treatment leachate; solid Waste municipally; landfill.

Recibido: 20/09/2019

Aceptado: 25/01/2020

Introducción

El lixiviado es el líquido contaminado que drena de un relleno sanitario, varía ampliamente en cuanto a su composición según la antigüedad del relleno y del tipo de residuos que contiene.^(1, 2) Los lixiviados jóvenes se caracterizan por altas concentraciones de DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), amonio y alcalinidad, una alta relación DBO/ DQO, un bajo potencial de oxidación-reducción, y un color negro, mientras que los lixiviados viejos o aquellos previamente tratados biológicamente presentan un mayor porcentaje de materia orgánica recalcitrante, alta DQO, baja DBO, altas concentraciones de amonio y alcalinidad, una baja relación DBO/ DQO, un alto potencial de oxidación-reducción y un color marrón oscuro o amarillo.⁽²⁾

Por tanto, se define el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión. En los rellenos sanitarios el lixiviado está formado por el líquido que entra al vertedero desde fuentes externas, fundamentalmente el agua aportada por la humedad de los residuos, por la lluvia y por las infiltraciones.

La generación de lixiviados en los vertederos depende de factores como: grado de compactación de los desechos, la humedad inicial de la basura, el tipo de material de cobertura, la precipitación pluvial, la humedad atmosférica, temperatura, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y la capacidad de campo del relleno. Se estima que durante el proceso de descomposición se generan 0,2 m³ de lixiviado por cada tonelada de residuos, y que, tras su clausura, un vertedero puede seguir generando lixiviados durante más de 50 años.⁽³⁾

Existen varios métodos para calcular el volumen de lixiviados producidos en el vertedero, como, el modelo balance hídrico, el cual admite distintos modelos para cuantificar cada uno de sus términos, y por ello, surgen distintas formulaciones para aplicarlo. El planteamiento básico del método es que todo el agua que se infiltra a través de la capa superficial del vertedero y no es evapotranspirada, acaba

apareciendo como lixiviado, lo que sólo ocurrirá en realidad cuando el vertedero haya cubierto su capacidad de retención de humedad, que puede tardar un tiempo considerable. ⁽⁴⁾

La aplicación más general que se ha hecho para el balance hidrológico en un vertedero a través de programas, es la realizada por el modelo HSSWDS (*Hydrologic Simulation for Estimating Percolation at Solid Waste Disposal Sites*), desarrollado para la EPA.

⁽⁵⁾También se han desarrollado programas basados en la parte hidrológica, tales como el HELP (*Hydrology Evaluation Leachate Performance*), ⁽⁶⁾ el MODUELO, que es un programa de simulación en tres dimensiones para la predicción de flujos de lixiviados, la contaminación orgánica y el gas generado en los vertederos de residuos municipales. ^(4,7)

Otro modelo es el método suizo calificado por algunos autores como un modelo poco exacto. ⁽⁸⁾ Pero en ocasiones resulta el método que arroja las estimaciones más próximas a la realidad comparados con otros modelos, el método suizo es un método empírico basados en los estudios de Hans-Hurgen Ehrig, el modelo asume que parte del agua precipitada sobre el terreno se infiltra transformándose en lixiviado, la cantidad transformada depende de la compactación de los residuos, si la compactación es densa menores son los flujos de lixiviados y en compactaciones ligeras el volumen de los lixiviados es mayor. Mientras que su composición depende del tipo de desecho confinado, del nivel de degradación de los residuos y del volumen producido. Todo cambio en la estructura y composición del relleno tiene efecto sobre las corrientes y la acumulación del lixiviado, de tal modo que el agua y los procesos en el relleno son magnitudes que se influyen recíprocamente. ⁽⁹⁾

Por tanto, uno de los problemas medio ambientales con mayor incidencia en los lugares de disposición de los residuos sólidos urbanos, es el impacto producido por la infiltración de los lixiviados en las aguas subterráneas y superficiales. ^(10, 11, 12)

Actualmente el vertedero del municipio de Sagua la Grande no trata los lixiviados, por lo que existe contaminación en sus alrededores, provocando una gran cantidad de agentes patógenos.

La complejidad y variabilidad de la composición del lixiviado de los vertederos urbanos dificultan su tratamiento de depuración. En función de sus características se suele

establecer el tratamiento más adecuado, basándose en procesos físicos, químicos y biológicos mediante reactores UASB (Sludge Blanket Anaerobic Up flow), ⁽¹³⁾ algunos autores estudiaron el tratamiento de un lixiviado de vertedero en un sistema UASB-SBR, llevando a cabo simultáneamente la eliminación de la materia orgánica y del nitrógeno por nitrificación vía nitrito y su posterior desnitrificación.

Sin embargo, los mejores resultados se han obtenido en los estudios en los que se combinan varias tecnologías de tratamiento diferentes. ⁽¹⁴⁾ Además, hay una amplia gama de posibles combinaciones de estos métodos de tratamiento de lixiviados. ⁽¹⁴⁾

Por tanto, el objetivo de este trabajo es el diseño de una planta para el tratamiento biológico de los lixiviados generados en el vertedero municipal de Sagua la Grande, disminuyendo con ello la concentración de agentes químicos y cumplir con las normas establecidas para de esta forma mejorar la calidad de vida de la población cercana al lugar.

Materiales y métodos

Se utilizaron los pasos generales siguientes:

1. Diagnóstico del estado actual del vertedero municipal de Sagua la Grande, provincia de Villa Clara.
2. Determinar las variables del proceso para el diseño de la Planta.
 - a) Población futura.
 - b) Cobertura de diseño.
 - c) Volumen diario de residuos.
 - d) Producción total de residuos.
 - e) Área requerida para el vertedero.
 - f) Volumen de residuos sólidos proyectados para 10 años.
 - g) Caudal de lixiviado.
 - h) Cálculo del caudal por balance hídrico.
3. Diseño de la Alternativa de tratamiento.

Se calcula la cantidad de habitantes, teniendo en cuenta el porcentaje de crecimiento de la población, para ello se puede utilizar el Método Gráfico, Aritmético, Geométrico,

de Incrementos Diferenciales, Malthus, Crecimiento por Comparación, Ajuste por Mínimos Cuadrados y se tiene en cuenta el periodo de diseño.

Para el caso de estudio se toma un periodo de 10 años y se tiene en cuenta la cobertura de recogida en el municipio actualmente.

Para obtener la población futura se emplea el método de crecimiento geométrico o exponencial, partiendo que el crecimiento poblacional crece de forma constante, lo que significa que aumenta proporcionalmente en cada período de tiempo, pero en número absoluto. El crecimiento geométrico de la población futura se describe a partir de la ecuación que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1- Variables del proceso para el diseño de la Planta de tratamiento del lixiviado

Denominación	Fórmula	Siglas	Unidades
Población Futura	$N_t = 1 + (r/100)t$	Nt	Hab.
Área Requerida	$Ars = \frac{Vrs}{hrs}$	Ar	m ²
Área Total	$At = F \cdot Ar$	At	m ²
Volumen proyectado en (10 años)	$VRus = n \cdot vrs$	VRs	m ³
Caudal lixiviado método suizo	$Q = 1 \cdot PA \cdot k/t$	Q	L/seg
Caudal del lixiviado por balance hídrico.			
Infiltración	$I = P - E - ETr$	I	mm
Evapotranspiración Potencial (Método Thornthwaite).	$Etp = K \cdot E$	Etp	mm
Coefficiente de corrección	$K = \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30} \cdot d$	K	h/día
Evapotranspiración potencial diaria	$E = 16 \left(\frac{10T}{I} \right) \cdot a$	E	mm/mes
Índice térmico mensual	$i = (T/5)^{1.5}$	i	mm
Calculo térmico anual	$I_{anual} = \sum i$	I _{anual}	mm
Balance hídrico	$LL = I - Ret$	LL	L/seg

Fuente: (14)

K: coeficiente que depende del grado de compactación de la basura, cuyos valores recomendados son; rellenos débilmente compactados se estima una producción de lixiviado entre 25 y 50% de precipitación media anual correspondiente al área del relleno y para rellenos fuertemente compactado, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25% de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno. ⁽¹⁵⁾

En el caso de estudio se debe considerar un tratamiento primario que puede ser mediante rejillas o un desarenador cuya función es la separación física, por diferencia

de gravedad, de las grasas y los aceites de origen vegetal y animal, además de decantar los sólidos de mayor tamaño.

Fue seleccionado el desarenador, para cuyo diseño se deben tener en cuenta criterios de diseño como: la relación entre el largo/ancho la cual debe estar entre 10 y 20, el período de operación (en el caso de estudio se considera 24 horas), la transición en la unión del canal a la tubería el ángulo no debe ser mayor de los 12° , la velocidad debe ser pequeña con el objetivo de garantizar la menor turbulencia y el arrastre del material. Los parámetros de diseño se muestran en la tabla 2.

Tabla 2- Parámetros de diseño del Desarenador, el reactor UASB y la campana

Denominación	Fórmula	Siglas	Unidades
Velocidad Sedimentación (Zona transición Ley Allen)	$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{Cd} (\sigma - 1) \cdot d}$	Vs	m/seg
Número de Reynolds	$Re = \frac{V_s \cdot d}{\nu}$	Re	adimensional
Coefficiente de Arrastre	$Cd = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$	Cd	adimensional
Area Superficial	$A_s = \frac{Q}{V_s}$	As	m ²
Tiempo Retención hidráulica	$TRH = \frac{V}{Q}$	THR	h
Reactor UASB			
Área Reactor	$AR = \frac{\pi}{4} D^2$	AR	m ²
Volumen Reactor	$VR = AR \cdot H$	VR	m ³
Tiempo de retención hidráulica	$TRH = \frac{VR}{Q} \cdot h$	THR	h
Carga hidráulica	$CH = \frac{Q}{AR}$	CH	m/h
Campana			
Velocidad de Flujo Campana	$v_{fc} = 4CH$	vfc	m/h
Area de abertura	$A_{abertura} = \frac{Q}{v_{fc}}$	A abertura	m ²
Area sección Transversal	$AC = AR - A_{abertura}$	AC	m ²

Fuente: (16)

Si $Re > 0,5$ la velocidad de sedimentación no puede ser calculada por la ley de Stokes, está dentro de la zona de transición hay que calcularla con la ley de Allen.

Los mejores resultados en el tratamiento de los lixiviados se obtienen a partir de la combinación de varias técnicas de tratamiento combinando tratamientos biológicos con tratamientos físicos químicos.

En los filtros biológicos la eficiencia depende de la capacidad de remoción DBO_5 presente en el efluente. La tabla 3 muestra los parámetros de diseño del filtro biológico.

Tabla 3- Parámetros de diseño del filtro biológico

Denominación	Fórmula	Siglas	Unidades
Área del Filtro	$A_{filtro} = Q \left(-\ln \frac{S_e}{S_i / KD} \right)^{1/n}$	A_{filtro}	m^2

Fuente: Elaboración propia

Resultados

Las condiciones climáticas en el municipio son las características de todo el país: clima tropical húmedo con estación seca en invierno; pero la influencia marino - costera en la parte baja, produce una diferenciación importante en la distribución y comportamiento de las condiciones del clima local, las temperaturas son generalmente altas con valores medios anuales que van desde los $20,85^{\circ}C$ hasta los $33^{\circ}C$ y más. El régimen de insolación es muy abundante, como promedio mensual llega hasta 13 horas luz, en sus máximos anuales al final del período poco lluvioso, en el territorio se reconocen 2 temporadas fundamentales: lluviosa (de mayo a octubre) y poco lluviosa (de noviembre a abril). El mes más lluvioso es junio y el más seco es diciembre, los datos se muestran en la tabla 4. La humedad relativa media es alta, con promedios cercanos al 80%. Los máximos diarios, generalmente superiores al 90%, ocurren a la salida del sol, mientras que los mínimos descienden, al mediodía, hasta 50 % y 60 %. ⁽¹⁷⁾

Tabla 4- Duración máxima de Insolación (horas/días) en los meses de mayo- octubre, utilizada en los cálculos de la evapotranspiración

	Meses					
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Días	31	30	31	31	30	31
Horas/días	13,13	13,29	13,21	12,7	12,2	11,3

Fuente: (17)

En la zona del vertedero se observa un abundante humedecimiento durante todo el período lluvioso, el que llega a ser excesivo en algunos meses del año.

Existen además, deficiencias en el estado higiénico-sanitario del vertedero, por tanto la contaminación provocada por la inadecuada disposición de los residuos sólidos, merece especial atención debido al impacto negativo que éstos producen en el medio ambiente del municipio.

La población urbana del municipio de Sagua la Grande es de 36092 habitantes, con un crecimiento poblacional de 1,25 %, según datos del anuario estadístico de Cuba. ⁽¹⁸⁾ La cobertura del servicio actualmente es del 86%, con una frecuencia de recolección diaria para el casco central y en el resto de las zonas inter-diaria. La totalidad de los residuos que se almacenan y recolectan son llevados a vertederos donde son vertidos de manera mezclada.

El esquema utilizado está basado en el método simplificado: almacenamiento, recolección, transportación y disposición final bajo condiciones parcialmente controladas.

En Sagua se generan diariamente 22 226,18 kg/día, para un volumen de 213,41m³, una densidad de 107 kg/m³, según datos aportados por la Dirección de Servicios Comunes de Sagua la Grande, entidad que atiende esta actividad. El índice de generación actual en Sagua la Grande es de 0,71 kg /habitantes/día.

Para el análisis se tomaron las precipitaciones ocurridas en el municipio de Sagua en 2015 como se muestran en la tabla 5, a partir de estos valores se realizó el cálculo de la escorrentía y del flujo de lixiviados ocurridos en el vertedero.

Tabla 5- Régimen Pluvial periodo lluvioso del Municipio Sagua la Grande

Precipitación anual 2015 (mm)	Medición de las Precipitaciones					
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
	211,6	160,3	135,7	104,2	25,5	122,1
Promedio						164,90

Fuente: (18)

El vertedero en estudio no dispone de vegetación y tiene una cobertura semi-compactada con un rango de pendiente del 5-10% de tierra arcillosa, el porcentaje de escorrentía según la metodología de Castillo 1994, es del 57%, por tanto, su escurrimiento es de 19,45mm. Los resultados estimados en el vertedero se muestran en la tabla 6.

Tabla 6- Resultado de los Cálculos estimados en el vertedero de Sagua la Grande.

Denominación	Siglas	Unidad	Resultados
Población Futura	Nt	Hab	40 865,9
Área requerida vertedero	Ars	m ²	47 951,80
Área total vertedero	At	m ²	14 385,54
Volumen residuos (10 años)	VRsu	m ³	7 192 770,05
Caudal lixiviado	Q	L/seg	0,59
Balance Hídrico			
Infiltración	I	Mm	29,29
Evapotranspiración Potencial (Método de Thornthwaite)	ETp	Mm	35,54
Coefficiente de corrección	K	h/día	22,5
Evapotranspiración Potencial diaria	E	mm/mes	1,57
Índice térmico mensual	i	Mm	8,60
Índice térmico anual	Ianual	Mm	27,4
Caudal lixiviado	LL	L/seg	0,58

Fuente: Elaboración propia

Una vez calculado el caudal de lixiviado por el método suizo y el método de balance hídrico observamos que los valores obtenidos en ambos métodos son similares.

A partir de estos resultados se propuso un tratamiento primario mecánico utilizando un desarenador, el tratamiento biológico con el reactor anaerobio de flujo ascendente, UASB, (Upflow Anaerobio Sludge Blanket), usado ampliamente en el tratamiento de aguas residuales complejas con altas cargas orgánicas, como en el caso del lixiviado. Para los cálculos del reactor se asumen los siguientes valores, caudal de 4 L/seg, un diámetro de 3,5 m y una altura de 4,0 m y los resultados del desarenador y del reactor se muestran en la tabla 7.

Como el caudal del lixiviado es pequeño en el diseño se propone una alternativa de tiempo de llenado de 2 a 3 días, para obtener un caudal máximo.

Según la Internacional Critical Tables para una temperatura del agua de 33 °C y una remoción de partículas de 0,2 mm de diámetro, tenemos que la densidad de la arena 2650 kg/m³, densidad del agua 995 kg/m³, viscosidad dinámica 0,0007 kg/ m.s

Tabla 7- Resultado del diseño del desarenador, reactor UASB y la campana

Denominación	Siglas	Unidades	Resultados
Velocidad Sedimentación (Zona transición Ley Allen)	Vs	m/seg	0,030
Número de Reynolds	Re	adimensional	9,05
Coefficiente de Arrastre	Cd	adimensional	3,99
Area Superficial	As	m ²	8,33
Tiempo Retención hidráulica	THR	h	0,155
Largo	L	m	3,5
Ancho	B	m	0,80
Profundidad	h	m	0,50
Reactor UASB			
Area Reactor	AR	m ²	9,62
Volumen Reactor	VR	m ³	38,48
Tiempo de retención hidráulica	THR	h	2,67
Carga hidráulica	CH	m/h	1,49
Campana			
Velocidad de Flujo Campana	vfc	m/h	5,96
Area de abertura	A abertura	m ²	2,41
Area sección Transversal	AC	m ²	7,20

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño del filtro biológico se asumen los siguientes valores, el caudal de entrada de 4 L/seg y la altura el ancho y la profundidad se asume el referenciado en otros trabajos. ⁽¹²⁾

El coagulante recomendado es la cal.

Y se procede a determinar la dosificación para su uso.

$$V_1 \rightarrow V_{\text{consumido}}$$

$$Q \rightarrow X$$

V₁ para el volumen de referencia se toma el test de jarra.

V_{consumido} volumen utilizado de cal.

Siendo C= 0,05 g/L

Q= 4 L/seg

1L→ 0,05g

Tenemos que será utilizado 0,172 kg/día.

Las medidas del filtro biológico aparecen en la tabla 8.

Tabla 8- Resultado del diseño del filtro biológico

Denominación	Siglas	Unidades	Resultados
Área del Filtro	<i>Afiltro</i>	m ²	23,57
Altura		m	2,80
Ancho		m	1,20
Profundidad		m	1,80

Fuente: Elaboración propia

Para el lecho de secado de acuerdo al caudal previsto se asume un ancho de lecho de secado de: 1,80 m. longitud de 2 m y una profundidad de 0,80 m.

Con la implementación de esta alternativa de tratamiento se lograra evitar los impactos negativos que se generan actualmente en el vertedero del municipio de Sagua, logrando con ello beneficios en el ecosistema de la zona y la mejora en la calidad de vida de la población.

Conclusiones

1. El vertedero de Sagua la Grande no cumple con los parámetros higiénicos Sanitarios para la disposición y confiscación de los residuos generados por la población, encontrándose el mismo ubicado en una zona de abundante humedecimiento en el período lluvioso.
2. Al estimar el caudal de lixiviados calculado, por el método suizo es de 0,59 L/seg, mientras que por el método de balance hídrico los valores son de 0,58 L/seg, como se aprecia los resultados obtenidos por ambos métodos son similares.

3. El diseño de la planta para el tratamiento de los lixiviados cuenta con desarenador con un caudal máximo de 4 L/seg , tiene una longitud de 3,5 m y un ancho de 0,80 m, una velocidad de sedimentación de 0,030 m/seg, el tratamiento biológico será con un reactor USAB (Upflow Anaeróbico Sludge Blanket), por su amplio uso en el tratamiento de las aguas residuales, con una altura de 4 m, un radio de 1,75 m, con un volumen de 38,48 m³ , tiempo de retención hidráulica (THR) de 2,67 horas y una carga hidráulica de 1,49 m/h, el filtro biológico tiene una altura de 2,80 m y un ancho de 1,20 m y por último el lecho de secado para la recolección de los lodos digeridos con un ancho de 1,80 m y una longitud de 2, 0 m.

Referencias bibliográficas

1. GLYNL, Henry; GARYNW, H. *Ingeniería Ambiental*. 1999 pp.600-607. Editor: México, D. F. Pearson Educación, ISBN: 9701702662.
2. <https://es.weatherspark.com>. [Consultado marzo,2018]
3. LOBO, A., HERRERO, J., MONTERO, O, FANTELLI, M. and TEJERO, I. "Modeling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part 2: Biodegradation)", *Waste Management and Research*, (2002) **20**(6), pp. 514 - 528.
4. LOBO, A. "Desarrollo de MODUELO 2: Herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos" pp 58. Universidad de Cantabria, (2003).
5. LOBO, A, TEJERO, I. MODUELO 2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills- *Environmental Modelling & Software* 22 (2007). **1**: pp 59-72.
6. HELP (*Hydrology Evaluation Leachate Performance*) (EPA, 1984).
7. PERRIER LAURENT and GIBSON BAR. HSSWDS (Hydrologic Simulation for Estimating Percolation at Solid Waste Disposal Sites), 1980. Desarrollado por la EPA.
8. POWELL, M.D.B.J.C. *Alternative Scenarios to meet the demand of sustainable waste management*. Journal of Environmental Management. (2004).

9. NC-134, N. (2002). "Residuos Sólidos Urbanos. Tratamiento. Requisitos Higiénicos Sanitarios y Ambientales."
10. CHRISTENSEN, T. H. and COSSU, R. "Landfilling of waste: leachate". (1992). Ed. E & FN Spon, London.
11. VILAR, A. Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertederos de residuos sólidos urbanos. Tesis doctoral inédita. pp 43-46 Universidad da Coruña 2015.
12. Cárdenas- Santos, R; Contreras, A; Rosa, E:: "Propuesta Metodológica para el sistema de Gestión de los residuos sólidos urbanos en Villa Clara". *Revista Tecnología Química*. **39**(2), 2019, pp. 463-483 ISSN 2224-6185 Editor Universidad de Oriente. [Consultado 18 agosto 2019]
13. TIBANLOMBO, N.M. "Diseño de una Planta de Tratamiento de lixiviados para el Botadero de Curgua del Cantón Guaranda". pp.73 -85. Tesis inédita. Facultad de Ciencias. Ecuador. 2014
14. VADILLO, I. "Contaminación de acuíferos carbonatados por vertederos de residuos sólidos urbanos: caso del vertedero de La Mina (Marbella, Málaga). pp 224. Tesis Doctoral inédita, Universidad de Málaga, 2003.
15. Organización Panamericana de Salud. (OPS). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. CEPIS 2005 pp. 14-16.
16. GUPTA, S. K, SINGH, G. Assessment of the efficiency & economic viability of various methods of treatment of sanitary landfill leachate. *Environmental Monitoring and Assessment* (2007). **135** (1-3): pp 107-117.
17. www.insmet.cu. Datos Meteorológicos de Sagua la Grande. [Consultado abril 2019]
18. www.one.cu/aec2016.htm. Anuario Estadístico de Cuba 2016. [Consultado junio 2019]

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

MSc. Teresa Margarita Cárdenas-Ferrer: Caracterización del vertedero, realizó los cálculos y escribió el artículo.

Dr. C. Ronaldo Francisco Santos-Herrero: Caracterización del vertedero, realizó los cálculos y escribió el artículo.

Dra C. Ana Margarita Contreras-Moya: Buscó y procesó los datos, participó en el análisis de la alternativa.

Dra. C. Elena Rosa Domínguez: Buscó y procesó los datos, participó en el análisis de la alternativa.

MSc. Yania Correa Cortés: Buscó y procesó los datos, participó en el análisis de la alternativa.