

Desarrollo de un sistema alternativo para la evaporación de lixiviado aprovechando la energía solar*

Development of an alternative system for the evaporation of leached by using solar energy

Recibido: mayo 10 de 2020 - Evaluado: junio 17 de 2020 - Aceptado: agosto 18 de 2020

Francisco Ernesto Moreno-García**
Jhon Jairo Ramírez-Mateus***
Sandra Milena Gómez-Peñaranda****
Pablo Andrés Guerrero*****
Henry Manuel Navarro*****

Para citar este artículo / To cite this Article

F. E. Moreno-García, J. J. Ramírez-Mateus, S. M. Gómez-Peñaranda, P. A. Guerrero y H. M. Navarro, “Desarrollo de un sistema alternativo para la evaporación de lixiviado aprovechando la energía solar” Revista de Ingenierías Interfaces, vol. 3, no. 2, pp.1-14, 2020.

Resumen

En el tema de la disposición de residuos sólidos en el mundo, los rellenos sanitarios presentan su mayor utilidad en cuanto aplicabilidad y técnica. Sin embargo, dicha metodología presenta un inconveniente por la generación de lixiviados, cuyo líquido formado a través del paso de aguas que se drenan en los correspondientes rellenos presentan altos índices de contaminación que no pueden ser vertidos a los afluentes de agua limpia. Diferentes técnicas en este campo de estudio involucran procesos químicos, biológicos entre otros, pero lamentablemente necesitan de fuentes de energía eléctrica no renovable representando altos costos en operación y mantenimiento. Entre las fuentes de energía renovables más promisorias es la energía irradiada por el sol y aplicando los conocimientos de transferencia de calor y masa, se reorienta la energía para evaporar y filtrar los lixiviados en cantidades razonables. Este proyecto de investigación inicia en el diseño, elaboración y puesta en marcha de un prototipo a escala para la evaporización como forma de tratamiento de lixiviados aprovechando la energía irradiada por el sol. Cabe resaltar el gran aporte sustentado en satisfactorias pruebas experimentales en los productos y subproductos generados a partir del lixiviado como materia prima.

*Artículo inédito: “Desarrollo de un sistema alternativo para la evaporación de lixiviado aprovechando la energía solar”.

**Correo electrónico: femgarcia@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander.

***Correo electrónico jhonjairorm@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander.

****Correo electrónico: sgomez@corponor.gov.co, Corporación autónoma regional de la frontera nororiental

*****Correo electrónico: pabloandresgp@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander.

*****Correo electrónico: henrymanuelnm@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander.

El sistema electrónico está sustentado en una estructura arduino in circuit para la adquisición y exportación de la correspondiente data, que posteriormente fueron debidamente analizados para identificar y analizar el comportamiento y eficiencia del referido prototipo al transcurrir las horas del día. Finalmente, las muestras de los subproductos del lixiviados fueron analizadas en los laboratorios de aguas de CORPONOR, dentro de su estudio fisicoquímicos en el tratamiento de residuos líquidos industriales a bajos costos de nuestro prototipo.

Palabras clave: colector solar, caracterización de lixiviados, base reflectora, deflexión.

Abstract

On the subject of the disposal of solid waste in the world, the landfills to present their greatest utility in terms of applicability and technique. However, this methodology has a drawback due to the generation of leachates, whose liquid formed through the passage of water that is drained in the corresponding landfills present high levels of contamination that cannot be discharged to the tributaries of clean water. Different techniques in this field of study involve chemical, biological processes among others, but unfortunately they need non-renewable electric power sources representing high operating and maintenance costs. Among the most promising sources of renewable energy is the energy radiated by the sun and applying knowledge of heat and mass transfer, the energy is redirected to evaporate and filter leachates in reasonable quantities. This research project starts on the design, elaboration and start-up of a prototype scale for evaporation as a way to treat leachates taking advantage of the energy radiated by the sun. It is worth noting the great contribution sustained in satisfactory experimental tests in the products generated from the leachate as raw material. The electronic system is supported by an Arduino in circuit structure for the acquisition and export of the corresponding data, that later were duly analyzed to identify the behavior and efficiency of the referred prototype as the hours of the day. Finally, the samples of the leached products were analyzed in the water laboratories of the CORPONOR, within your physicochemical study in the industrial waste treatment low costs of our prototype.

Keywords: solar collector, characterization of leachates, reflector base, deflection.

1. Introducción

El aumento de la población humana y la mejoría de los índices de calidad de vida están relacionados al incremento del consumo generado por el desarrollo tecnológico. Los aspectos negativos de dicho incremento productivo son una mayor explotación de los recursos naturales que tienen como efecto final los desechos de grandes volúmenes de residuos sean biológico y no biológicos.

La contaminación de los afluentes naturales, causada por el manejo de los residuos biológicos y no biológicos, ha representado en un riesgo para medio ambiente y la salud humana. Dicho efecto ha generado a nivel mundial una alerta y conciencia de optimizar los procesos de residuos (RSU), Figura 1, de forma adecuada y seria [1].



Figura 1. Generación de lixiviados.

Fuente: [1].

Según [2] los lixiviados son líquidos contaminantes infiltrados a través de una masa de residuos en los rellenos sanitarios, formados por la humedad existente en la masa de dichos residuos, y en proceso de degradación biológica, y por la filtración de aguas lluvias. La razón orgánica de los residuos es biodegradable y sus componentes orgánicos e inorgánicos son solubilizados en las aguas lluvias [3].

De acuerdo [4], [5], los lixiviados presentan una mezcla de altas concentraciones de contaminantes como lo son ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales inorgánicas entre otros.

Actualmente cerca del 20% de la población mundial carece de agua potable y cerca del 50% carece de infraestructuras sanitarias. En la práctica, los procesos a los cuales se recurre para el tratamiento de los lixiviados son insuficientes al aumento de calidad del producto final. En la gran mayoría, los costos del tratamiento, asociados a los costos de las instalaciones dejan lagunas difíciles de superar. Por lo tanto, se torna un reto poder crear impactos positivos a través de nuevas soluciones a estos problemas de tratamiento de lixiviados a la vez que se estará dando respuesta a los problemas ambientales.

Además, se deja un punto inicial para futuros estudios afines, que nos lleven a mejorar los componentes y eficiencia cada día más (Figura 2).

Por esta razón, al poder dar nuevas alternativas para el tratamiento de lixiviados a partir del aprovechamiento de la energía térmica solar se sienta una tendencia innovadora promisoriosa que no se ha explorado en ningún otro relleno (región oriental de Colombia) y es una alternativa para las características de calidad, cantidad y operación, ante las condiciones climatológicas, ante la disponibilidad de espacio y disposición de la administración del relleno que facilitan la operatividad del tratamiento.



Figura 2. Piscina de almacenamiento totalmente llena de lixiviados.

Fuente: Autores.

Finalmente, es importante desarrollar sistemas y estrategias que permitan un uso más eficiente del agua y a la vez que sean más respetuosos con la conservación de los recursos naturales y en general con el medio ambiente.

Para este trabajo se optó por el diseño y desarrollo de un sistema de evaporación aprovechando la energía solar, reduciendo así el costo energético industrial y dando paso al uso de alternativas como son las energías renovables, de forma, se pueda contribuir a la disminución en la contaminación ambiental producida por lixiviados de rellenos sanitarios a partir del uso de energías renovables como método alternativo en los procesos de tratamiento convencionales.

2. Materiales y Métodos

Este proyecto de investigación inicia con una detallada explicación del tratamiento de lixiviados más comunes a partir de su grado de peligrosidad y manejo. Posteriormente se presenta el diseño, elaboración y puesta en marcha del prototipo a escala para la evaporización como forma de tratamiento de lixiviados aprovechando la energía irradiada por el sol. El diseño del prototipo se realizó en un banco de pruebas experimental que permitieron conocer el momento y el ángulo de incidencia solar efectivo para el prototipo.

3. Resultados

Tratamiento de lixiviados más comunes

Existe un compendio de normatividad para la clasificación de los residuos a partir de su grado de peligrosidad y manejo. De forma que se presentan una variedad de tratamientos para su inertización o neutralización, por ejemplo, por manejo de arcillas que buscan la sedimentación o fijación de materiales o compuestos orgánicos contaminantes [6].

Otro tipo de tratamiento de residuos es la osmosis inversa, cuyo objetivo es la separación de sales inorgánicas a través de una membrana. Sin embargo, esta técnica representa costos elevados solo con adquirir la membrana y costos por mantenimiento debido a la sensibilidad a la temperatura y ensuciamientos [7].

Otro tratamiento es el procesamiento de borras, cuya extracción del agua se desarrolla por el espesamiento gravitacional mediante agentes biológicos o químicos como la cal [8]. Desde un principio, la evaporación natural se destacó como una alternativa para evaporar el líquido de los lixiviados sobre superficies a partir de la variación de humedad relativa y velocidad del aire [9]. La principal desventaja que se tiene con estos sistemas es la cantidad de terreno que requiere para localizar los procesos. Que a su vez son susceptibles a factores ambientales (por ejemplo, precipitaciones) que intervienen negativamente en el proceso de evaporización (Figura 3).

Adicionalmente la evaporación natural también ha reportado problemas operativos, como es el caso de la formación de espumas por la turbulencia generada en el proceso de evaporación, el incrustamiento de precipitados en el sistema, y el arrastre de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Igualmente, cuando los lixiviados son jóvenes y existen altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y amoníaco, dependen del pH cuando se realice la evaporación, estos compuestos se pueden arrastrar junto con el vapor de agua.

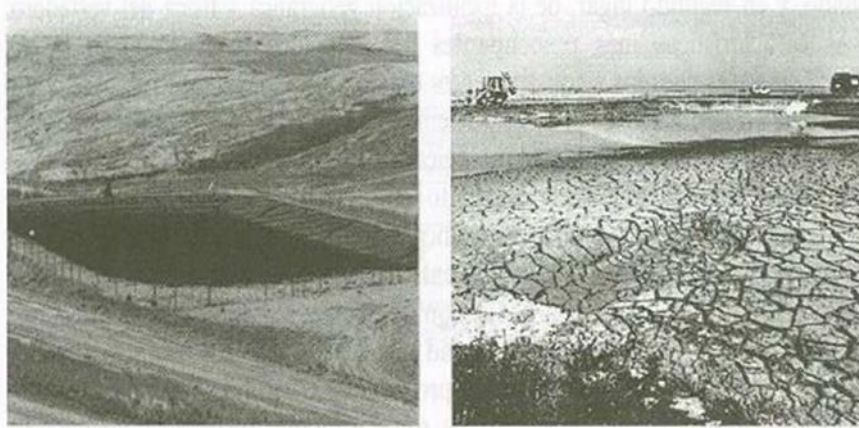


Figura 3. Piscinas antes y después del proceso de evaporización ambiental de lixiviados.
Fuente: [9].

Otros problemas que pueden presentar consisten en la corrosión, reducción de la sedimentación del lodo y los problemas operacionales en la planta debido a la precipitación de óxidos de hierros. Además, la alta concentración de metales puede inhibir la actividad biológica del lodo y reducir o eliminar la posibilidad de su posterior aplicación como fertilizante.

Por otro lado, la evaporización forzada es una alternativa, pues se basa desde el mismo concepto de la evaporización natural, pero destaca por su alto rendimiento a partir de un manejo adecuado de alguna fuente de energía de entrada. Esta técnica puede ser

implementada utilizando el biogás generado como fuente de energía calorífica entre otras. La operacionalidad de sus unidades de evaporación forzada deben considerar algunas propiedades del lixiviado, tales como: concentración, formación de espumas, temperatura, presión, entre otros [11]. Según [12], el tratamiento de evaporación forzada reduce el volumen en un 90%, y puede aprovecharse las diferentes fuentes de energía calorífica.

Desde el aspecto medioambiental, existen diferencias muy significativas en cuanto a la influencia al aplicar cualquier método tratamiento sobre el medio ambiente. Los expertos en esta materia, han coincidido en que el factor que determina con mayor exactitud la incidencia sobre el medio ambiente de una máquina o proceso, es el que se ha dado en denominar Tel (Total Environmental Impact) que engloba todos los parámetros de influencia [13]:

- ODP (Potencial de destrucción de Ozono).
- GWP (Potencial de calentamiento global-Efecto Invernadero)
- Rendimiento energético del sistema (COP).
- Vida atmosférica.
- Carga de los equipos (químicos).
- Emisiones de los equipos.

En la Tabla I y II, se observa un resumen de las principales características y consideraciones que se deben tener en cuenta en la comparación de las técnicas

Tabla I. Comparación entre tecnologías para el tratamiento (complejidad tecnológica)

Problemas con	Tratamiento					
	Aerobio	Anaerobio	Evaporación natural	Recirculación	Membranas	Sistemas naturales
Necesidad de insumos químicos	+++ (1)	+++ (1)	++ (2)	-	+++ (1)	-
Necesidad de insumos operacionales	++	+	+	+	+++	-
Necesidad de suministro de partes	++	-	+	+	+++	-
Suministro de energía eléctrica	+++	+(4)	-	+	+++	+(3)
Complejidad operacional	+++	+	++	+	+++	-

(1) Requiere un extenso pretratamiento

(2) Puede requerir pretratamiento, algunos sistemas usan sustancias para control de pH

(3) Requiere de bombeo del lixiviado

(4) Puede requerir de un sistema de pretratamiento

+ Una cruz significa como afecta negativamente la característica al proceso en cuestión. Entre más cruces más negativamente lo afecta

Fuentes: [10].

Tabla II. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados. de características problemáticas de lixiviados).

Problemas con	Tratamiento					
	Aerobio	Anaerobio	Evaporación natural	Recirculación	Membranas	Sistemas naturales
Formación de precipitados	++	+++	+	++	+++	+
Toxicidad a los microorganismos	++	++	No	No	No (5)	+
Formación de espumas	+++	+	++	+(5)	Variable (6)	No
Emisión de COV	+++	+	++	+	Variable (6)	+
Sensibilidad a variaciones de caudal	++	++	+	+	+	No
Producción de lodos	+++	+	+	No	+	
Requerimiento de áreas	Baja	Baja	Alta	Alta	Baja	Alta

(5) Pueden formarse en tanques de almacenamiento

(6) Si los sistemas son aerobios, la problemática puede ser muy alta.

+ Una cruz significa como afecta negativamente la característica al proceso en cuestión. Entre más cruces más negativamente lo afecta.

Fuentes: [10].

Banco de pruebas experimental

Para el diseño del prototipo, basado en el efecto secuencial de dos subprocesos como refuerzo al principio de evaporización natural, se desarrollaron una serie de cálculos para el dimensionamiento de dos secciones principales: la base reflectora y dos destiladores solares tipo piramidal en serie. En el caso de la base reflectora fueron calculados los parámetros del lado recto y los puntos máximos en X e Y de la parábola que se forma, según figura 4b.

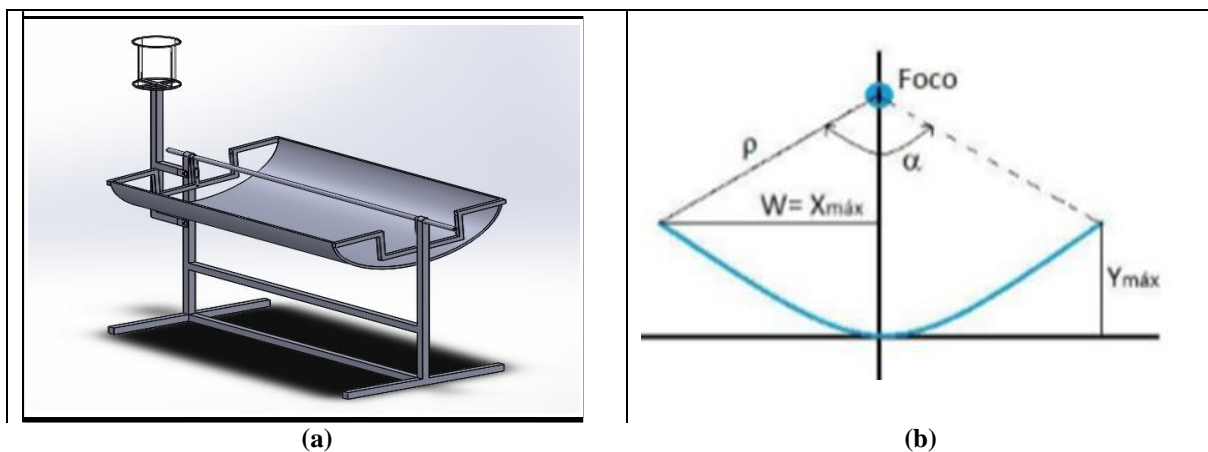


Figura 4. a) Representación del diseño del colector cilíndrico parabólico con el soporte b) Ángulo de abertura y distancia ρ del colector.

En este componente, según la ecuación (1) de la parábola se halla los valores del lado recto y se diseña para un punto focal reflector ($F = 30\text{cm}$).

$$f(x) = y = \frac{x^2}{4 \cdot F} \quad (1)$$

De forma que al analizarse la fórmula del arco de una curva para el cálculo del ángulo de abertura α y la distancia ρ según figura anterior, cuya relación, ecuación (2), está basada en el principio triángulo rectángulo. Con el cual, obtenemos un colector cilíndrico con un $\alpha = 157,38$ cms y un $\rho = 50$ cms para una distancia máximas permitidas de Y_{\max} en 20 cms y un X_{\max} a 50 cms.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{X_{\max}}{F - Y_{\max}} \quad (2)$$

Para el diámetro del tubo receptor del colector cilíndrico, se obtuvo un valor de diámetro mínimo 2,54 cms para los 50 cms de distancia focal (ρ). En el caso del diseño de los destiladores solares tipo piramidal, se definió un volumen de almacenamiento tolerable máximo permitido a 20 litros con un ángulo de inclinación de 45° .

En la Figura 5, se presenta el diseño estructural y versión final del prototipo desarrollado. Para la respectiva instrumentación, se desarrolló un sistema de medición de temperaturas, humedad, radiación solar y medición del viento. Un sistema de adquisición basado en arduino uno in circuit, consistió en la toma de muestras por sensores de temperatura (pt-100), sensores de humedad (DHT11) y sensor de flujo de agua para una data medida cada 5 segundos. Adicionalmente se respaldó el sistema de adquisición con datalogger cuya función fue la de ir almacenando y creando una base de datos con las respectivas mediciones en tiempo real.



Figura 5. Diseño final del prototipo.

Fuente: Autores.

Resultados Experimentales

Se realizaron pruebas experimentales que permitieron saber en qué hora y ángulo de incidencia solar fue más eficiente el prototipo, para esto se ejecutaron pruebas experimentales durante cuatro (4) días variando los ángulos y teniendo un registro online de las mediciones de radiación solar, velocidad del viento, temperaturas y humedad, para una carga inicial de 10 litros de lixiviados de base crudo descargados a un flujo de 0,22 ml/s.

Se aplicó un diseño factorial a través de un planeamiento DOE (Design of Experiments) cuyo factor independiente en nuestro caso fue el ángulo de incidencia para nuestro colector solar a [-1, 0 y 1], los cuales representan los diferentes ángulos a [-45°, 0° y 45°] en el transcurso de trabajo desde las 8am hasta las 6pm.

En la figura 6, fue identificado la hora solar pico (HSP) la cual nos permitió definir la energía por unidad de superficie que se recibió para irradiación solar por encima de los 1000 W/m². Para las mediciones solares con ángulo de -45°, 0° y 45°, la hora solar pico estuvo alrededor entre las 10 am y las 4 pm, representando un máximo aprovechamiento de la radiación solar en el colector en dicha franja. Para las mediciones solares con ángulo variable la hora solar pico esta alrededor de las 8 am y las 4 pm, extiéndase en una franja mayor comparado cuando se trabaja a un ángulo fijo.

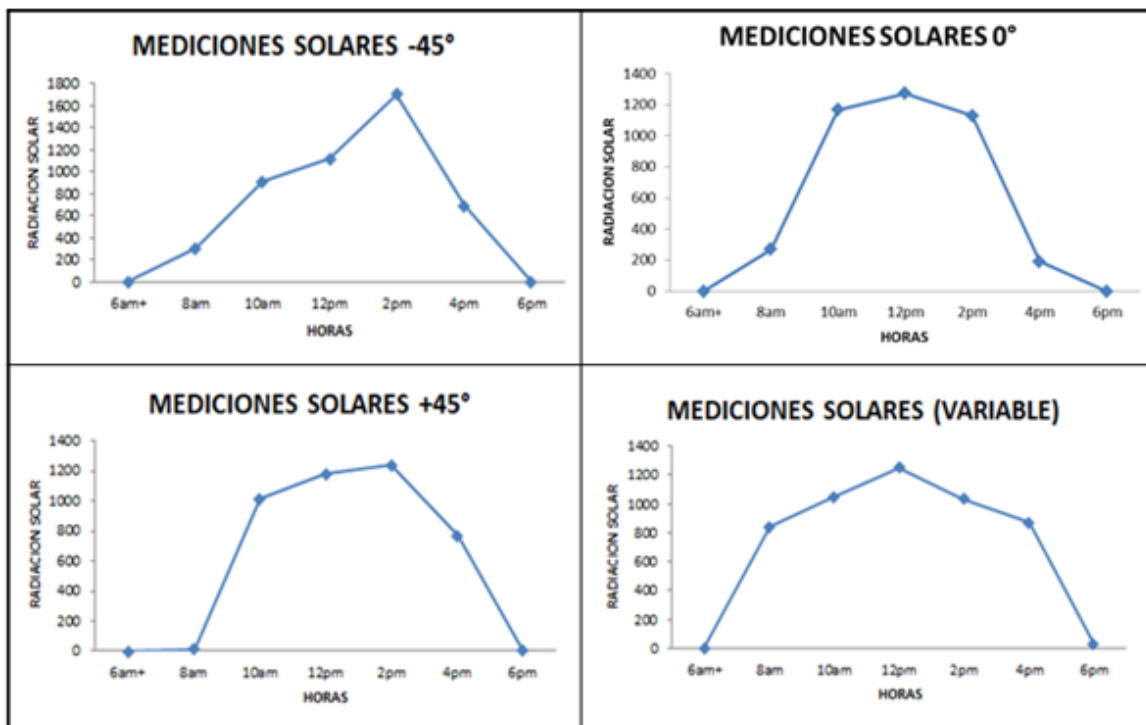


Figura 6. Representación gráfica de radiación solar respecto al tiempo.

Fuente: Autores.

Por otro lado, en los domos de destilación tipo piramidal, después de un balance en estado estacionario, se pudo identificar el calor absorbido por cada uno de los destiladores internamente al transcurso de las diferentes horas del día. Se observó un primer proceso de evaporización en el orden del 30% para los 10 litros iniciales de lixiviado base crudo a una alta temperatura adquirida por el paso en el colector, posteriormente parte del lixiviado evaporado fue condensado y separado hacia el segundo destilador, que finalizó el proceso de tratamiento 24 horas después, objeto de investigación de dicho proyecto.

De tal manera el lixiviado en el día absorbe calor en el orden de los 20764,7 KJ/Kg•m²•°C dentro de la franja de hora solar pico, prácticamente a las 12pm. Parte del lixiviado primario evaporado fue posteriormente condensado en el transcurso de las horas de la noche. En la Figura 7, se resalta óptimos valores de calor interno para el destilador primario exclusivamente para un ángulo de incidencia solar de 45°, lo que representa un mejor eficiencia y aprovechamiento de energía solar desde las primeras horas del día, 8am. Sin embargo, para las pruebas cuando se varía el ángulo de incidencia en el transcurrir del día también se obtiene picos de calor en el orden de los 19862,6 KJ/Kg•m²•°C, pero para este caso extendiéndose a franjas de las 2 pm y manteniéndose un calor residual hasta horas de las 6 pm, a pesar de que la radiación solar prácticamente ya está en su mínima presencia.

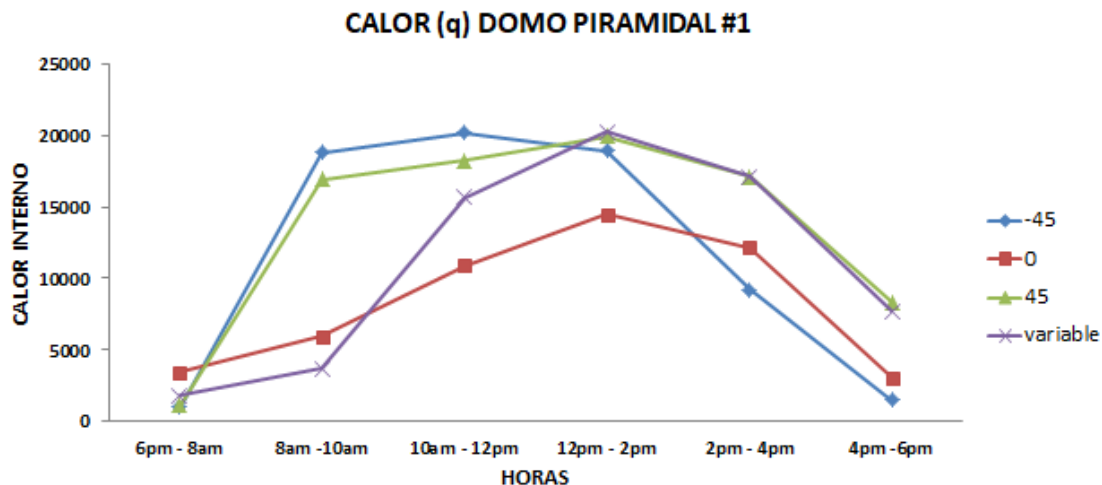


Figura 7. Representación gráfica del calor absorbido en el destilador primario para diferentes ángulos

Fuente: Autores.

Desde el aspecto de balance de masa para los ángulos de incidencia -45°, 0°, 45° y ángulo variable se obtuvieron 480 ml, 630 ml, 780 ml y 900 ml de lixiviado tratado por nuestro prototipo para los correspondientes ángulos. Se pudo constatar que con ángulo variable se obtuvo el mayor efluente final del proceso de tratamiento de lixiviado siendo de 900ml, relacionado con mayor aprovechamiento de energía solar.

De manera general, como se puede identificar en la Tabla III, los parámetros de las muestras del lixiviado tratado (T1, T2, T3, T4, T5) donde: T1 es el lixiviado base crudo del relleno sanitario del parque tecnológico los guayabales de la región, T2 es el proceso o el tratamiento con ángulo de -45° y 0° , T3 con ángulo de 45° , T4 producto medio variable, T5 con ángulo variable. Los indicadores de estudio para los análisis fisicoquímicos fueron:

- Sólidos totales (ST): son los residuos del material que quedan en un recipiente después de la evaporación de la muestra.
- Sólidos suspendidos totales (SST): es el residuo filtrable de una muestra de agua natural o residual doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a $103-105^\circ\text{C}$ hasta peso constante.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5): determina la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general residuales.
- Demanda química de oxígeno (DQO): parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.
- Adicionalmente la prueba de Nitrógeno (NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL), fosforo total (PTOTAL) de fosfatos solubles en una muestra de agua y la prueba de Hierro total (HT) son parámetros de estudio para determinar el grado de contaminación en cada una de las muestras.

El tratamiento que mejor evidenció la disminución de parámetros fue la muestra (T3) la cual se obtuvo trabajando con el ángulo de 45° el cual hace referencia a las horas de la tarde porque se apreció una disminución considerable comparado con la muestra (T1) el cual es el lixiviado base crudo del parque tecnológico los guayabales.

Tabla III. Resultados de las pruebas fisicoquímicas de las muestras recolectadas.

Resultados									
Tratamientos									
	T1	T2		T3		T4		T5	
Volumen	10 L	480 ml – 630 ml		780 ml		800 ml		900 ml	
Parámetros	Producto Base o crudo	Angulo -45° & 90°	%	Angulo -45°	%	Angulo variable producto medio	%	Angulo variable producto medio	%
S	16000	354	2,2	70	19,97	5250	32,81	716	4,475
SST	353	10,9	3,08	5,33	1,5	44,5	12,6	7,2	2,03
DB OS	1200	77,2	6,43	28,6	2,38	147	12,25	37,5	3,125
DQO	3700	231	6,24	99,7	43,6	361	9,756	112	3,07
NT	1859	110	5,94	52	47,27	245	13,24	31	1,67
PT	10,6	<0,200	1,88	<0,200	1,88	16,3	0,0153	<200	1
FET	6550	344	5,25	<70	20,34	28000	41,74	88,2	1,54

Fuente: Autores.

De acuerdo [14] sobre los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas (ARD), de las actividades industriales, comerciales o de servicio hace referencia a que el efluente final del proceso posee ciertas características de composición que de acuerdo al informe de resultados de laboratorio de la muestra recolectada presenta menores cargas contaminantes y así permitiéndonos a futuro continuar con un proceso donde sean aprovechadas en actividades de uso superficial según el tratamiento adecuado que les den. Finalmente, el resultado presenta una gran estabilidad frente a variaciones importantes en cuanto a las características del lixiviado y ausencia de olores desagradables (Figura 8).



Figura 8. Muestras de lixiviado en diferentes puntos del prototipo variando el ángulo de inclinación.

Fuente: Autores.

Conclusiones

Se observó una mejoría en el aspecto físico del lixiviado final, con una reducción en el orden del 90% para los diferentes parámetros fisicoquímico representando bajas cargas contaminantes del lixiviado base crudo inicial.

A nivel de masa, en un 7,8% y 9% de volumen del lixiviado base bruto (T1) fue tratado con un mayor aprovechamiento solar relacionado a mayores flujos por parte de nuestro prototipo.

Adicionalmente el efecto de UV (UVI) como indicador asociado a la intensidad de la radiación solar ultravioleta (UV-B) alcanzó niveles altos a un ángulo de 45° indicando un aprovechamiento óptimo del colector. Por lo tanto, el colector CPC diseñado absorbió la radiación difusa, permitiendo a futuro estudios relacionados a sistema de control de seguimiento solar.

Referencias

- [1] Universidad Pedagógica Nacional, Manual para el Manejo de los Residuos Químicos y Peligrosos, 2009. [En línea]. Disponible en: http://mpp.pedagogica.edu.co/download.php?file=manual_riesgos_peligrosos_pgirp_.pdf
- [2] A. Rehman, “Landfill leachate treatment using evaporation technology” (Thesis of Master). Carleton University, Ottawa, Ontario, 2003.
- [3] G. D. B. Souto, “Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo de remoção de nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (stripping)” (Tese Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2009.
- [4] S. M. A. Andrade, “Caracterização físico-química e tratabilidade por coagulação-floculação dos líquidos percolados gerados no aterro sanitário de Uberlândia-MG. 182 f. Dissertação” (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- [5] J. Wiszniowski, D. Robert, J. Surmacz-Gorska, K. Miksch, y J.V. Weber, “Landfill Leachate Treatment Methods: A Review”. Environ. Chem. Lett. Vol. 4, pp. 51–61, 2006.
- [6] F. A. López, y A López, “Solidificación / estabilización de residuos orgánicos mediante granulación con sepiolita”. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 41, no. 3, pp. 51–61, 2011. DOI: 10.3989/cyv.2002.v41.i3.657
- [7] F.R. Beviá, J.L. Fernández, R. Salcedo y P.G. Algado, “Estudio de la capa de polarización durante el proceso de ósmosis inversa”. Revista Ingeniería química, ISSN 0210-2064, N°. 431, pp. 147-154, 2006.
- [8] C. Estrada. “Tratamiento de residuos químicos peligrosos generados en los laboratorios de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos” (Tesis de Magister). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2011.
- [9] Arnal, J. M. “Tratamiento de residuos peligrosos mediante la tecnología evaporativa de bajo consumo ENA”. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, pp. 1109-1116, 2012.
- [10] E. Giraldo y C.R. Carmona, "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", Editorial ministerio de medio ambiente 1998.
- [11] C. J. Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations. Englewood: New Jersey, Prentice – Hall, 1993
- [12] J. M. Bahé. “Estudo da Evaporação de Lixiviados de Aterros Sanitários como Alternativa Tecnológica de Tratamento: Testes em Bancada” (Dissertação de Mestrado.). Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2008.
- [13] Departamento de instalaciones frigoríficas del CIFP. Refrigeración por absorción. Interés energético e impacto ambiental, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://departamentofrigorificohesperides.blogspot.com/2016/03/refrigeracion-por-absorcion-interes.html>

[14] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Resolución 631 de 2015 parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>