

Biodegradación de residuos sólidos urbanos utilizando cultivos microbianos y biofiltro estático de *Eisenia foétida*

Biodegradation of solid urban waste by using microbial starter and static biofilter of *Eisenia foétida*

MSc. Tania María Guzmán Armenteros^{1*}

Olga Pérez Chamorro¹

Oderlaise Valdés Pérez²

¹Universidad UTE Santo Domingo. Ecuador. Cp EC230150

²Grupo Empresarial de la Industria Alimentaria GEIA, Habana, Cuba:

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: tania.guzman@ute.edu.ec

RESUMEN

Se investigaron los efectos de la relación entre las variables: concentración de cultivo iniciador, tiempo de exposición y temperatura, en el proceso de biodegradación de residuos sólidos urbanos en condiciones controladas, utilizando lombrifiltro estático de *Eisenia foétida*. Se empleó un diseño factorial 2^3 ampliado a diseño central compuesto y como variables respuesta el índice de biodegradación. Se halló una influencia significativa de la relación de concentración de cultivo iniciador y el tiempo de exposición en el proceso de biodegradación, obteniéndose dos modelos de superficie de respuesta de segundo orden, validados estadísticamente mediante análisis de varianza. El modelo explica el 96% del cambio de la variable Índice de biodeterioro a partir de la relación de la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno. Se logró una máxima eficiencia del sistema con una concentración de cultivo del 2,5%, un tiempo de 96 días a una temperatura de 32°C, condiciones donde se evidenció un mayor ajuste de los resultados del modelo con mayor índice de biodegradación y menor contenido de contaminantes químicos y orgánicos en el efluente de salida.

Palabras claves: residuos sólidos urbanos; biodegradación; cultivo iniciador; *Eisenia foétida*

ABSTRACT

The effects of the relationship between the variables: concentration of starter culture, time of exposure and temperatura, in the process of biodegradation of urban solid waste under controlled conditions was investigated, by using static vermicelite from *Eisenia foétida*. A factorial design 2^3 extended to a Central Composite Design (DCC) was used and as response variables: the biodegradation ratio (BOD/COD). It was found a significant influence of the concentration ratio of the starter culture and the time of exposure in the biodegradation process, obtaining two second-order response surface models, validated statistically by ANOVA. The model explains 96% the Biodeterioration variable change from the BOD/COD ratio. Maximum efficiency of the system was achieved with a concentration culture of 2,5% for a period of 96 days at a temperature of 32°C, conditions where a greater adjustment of the results of the model with a higher biodegradation ratio and a lower content of chemical and organic contaminants in the output effluent.

Keywords: urban solid waste; biodegradation, starter culture

Recibido: 19/3/2019

Aceptado: 20/7/2019

Introducción

Los residuos sólidos urbanos producen contaminación y modifican el entorno natural dañando los ecosistemas, para el tratamiento de estos residuos se emplean diferentes métodos ya sean físicos, químicos, como biológicos. ⁽¹⁾ Estas técnicas tienen como propósito disminuir el contenido de materia orgánica e inorgánica de los residuos permitiendo su reutilización por la reducción de la carga nociva. Sin embargo la elevada agresividad de los métodos químicos implica que actualmente estén siendo reemplazados por técnicas biológicas. ^(1,2,3)

En los tratamientos biológicos de estos desechos, comúnmente se emplean microorganismos. Sin embargo, la utilización de sistemas mixtos compuestos por

diferentes especies con actividad biodegradable como microorganismos y lombrices supone una ventaja estratégica de elevada funcionalidad. ^(2,4) En estos sistemas, el trabajo simultáneo y sinérgico de diversas especies, propicia no solo la utilización de sustratos complejos sino el aprovechamiento de sus sistemas enzimáticos de forma óptima.⁽³⁾ Mediante la oxidación biológica los microorganismos degradan la materia orgánica contaminante de los lodos en presencia de oxígeno y nutrientes, de acuerdo con la siguiente reacción:

Materia orgánica + Microorganismos + Nutrientes + O₂ => >Productos Finales + Nuevos microorganismos + Energía

La eliminación de los residuos sólidos urbanos mediante técnicas biológicas implica además la utilización de estas plantas procesadoras vivientes (bacterias, protozoos y hongos). Estos sistemas deben funcionar bajo estrictas condiciones operativas de temperatura, concentración y tiempo de exposición. ⁽⁵⁾ La utilización combinada de varios sistemas biológicos puede variar estas condiciones dependiendo de las características del sistema y las especies biológicas implicadas. ⁽⁴⁻⁶⁾ En consecuencia, el estudio de las interacciones de las diferentes variables de estudio se hace necesario para la optimización de estos sistemas.

Materiales y métodos

El sistema de ensayo consistió en 10 kg de residuos sólidos urbanos distribuidos en 25 contenedores plásticos con capacidad de 25 L. Cada sistema se estandarizó con un 85% de humedad y agitación continua. Para generar el lixiviado el sistema biológico mixto fue diseñado a concentraciones estables de *Esenia foétida* (lombriz de tierra) a razón de 5% del volumen total). Las concentraciones del cultivo mixto de microorganismos fueron variables de acuerdo al diseño de experimentos.

Diseño experimental

El diseño experimental fue de tipo factorial ampliado a DCC (diseño central compuesto). En el mismo se evaluaron como variables independientes (factores): concentración de cultivo iniciador (A), temperatura (B) y tiempo de exposición. Como variable respuesta se evaluó la relación entre los niveles de DBO y DQO en el efluente de salida del sistema experimental. El método de superficie de respuesta se realizó en el software Desing Expert 8.0.7.1 (Stat-Ease Inc, USA). Los

ensayos consistieron en 25 corridas experimentales que se ejecutaron aleatoriamente realizándose seis réplicas en los puntos centrales. Para garantizar la validez estadística de los resultados, los ensayos se ejecutaron aleatoriamente y se optó por un diseño rotatable ($\alpha=1.6817$) con el fin de obtener una precisión de estimación igual en todas las direcciones (ortogonalidad) y a la vez proporcionar una mayor consistencia y estabilidad de la varianza en los puntos de interés.

Preparación del cultivo iniciador

El cultivo mixto de microorganismo se preparó a partir de cepas liofilizadas de bacterias y hongos (*Streptomyces sp* y *Aspergillus sp*) previamente aisladas de desechos agropecuarios y conservadas en banco de cepas GEIA. La proporción de los microorganismos en el cultivo mixto fue de (bacterias 3: hongos 2). Todos los microorganismos fueron previamente activados en medios de crecimiento apropiado e incubados a temperatura de óptima de crecimiento durante 18 horas. Cada suspensión celular se diluyó a razón de: 150, 200, y 1 000 veces en tubos para obtener tres concentraciones finales de cultivo mixto en las proporciones antes citadas.

Sistema de biodegradación

En cada una de las muestras de ensayo (unidades experimentales) se ejecutó el mismo procedimiento, añadiendo concentraciones variables del cultivo mixto según diseño desde una concentración mínima de cultivo iniciador de 2% a una concentración máxima de 5%. Se eligió un rango de temperatura de 25 a 40°C y un tiempo de biodegradación desde los 10 días hasta los 100 días.

Diseños utilizados

Inicialmente se modeló el ANOVA con del diseño factorial 2^3 , cuya función lineal de aproximación es un modelo empírico de primer orden:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \dots + \beta_nx_n + \varepsilon$$

Posteriormente se evaluó con el diseño central compuesto (DCC) a partir de un modelo de orden superior, tipo empírico de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Se verificó el ajuste de cada modelo mediante análisis de varianza, despreciando los términos no significativos ($p < 0.05$). En todo momento se procuró encontrar la mejor aproximación de la relación funcional de la variable respuesta (índices de biodeterioro) y el resto de las variables (concentración de cultivo, temperatura y tiempo de exposición).

Evaluación del DBO y DQO

El análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó según procedimiento estándar de las normas ISO ^(7,8). La relación entre variables estableció índice de biodegradabilidad (IB), definido según lixiviado y tratamiento. Una relación (DBO/DQO) $< 0,2$ que indica predominio industrial, no biodegradable, entre $0,4 - 0,5$ biodegradabilidad promedio; valores de $0,2 - 0,4$ lentamente biodegradable y una relación (DBO/DQO) $> 0,5$ es indicador de residuos urbanos biodegradables. ^(9,10).

Resultados y discusión

En el Diseño Factorial 2^3 los resultados del ANOVA mostraron significación ($p < 0,05$) de las variables tiempo y temperatura, y de su interacción (tabla 1). Esto implica que la influencia de índice de degradación varía en función de los factores operantes en el sistema biodegradativo, sin embargo el comportamiento de la variable concentración de cultivo no es descrito con suficiencia por el modelo. En el gráfico de Pareto se observa la contribución de las variables al modelo, la mayor contribución fue para el tiempo de biodegradación (82%) seguido de la temperatura (11%) e interacción de ambos factores (4%).

Tabla 1- P-valores de los términos, ajuste y ecuación de ambos modelos (factorial 2^3 y DCC)

Modelo factorial 2³	P valor	Modelo DCC	P valor
Modelo	0,0020	Modelo	0,0001
A-Conc. Cultivo	0,6983	A- Conc.Cultivo	0,1570
B-temperatura	0,0310	B-temperatura	0,0001
C- tiempo	0,0005	C- tiempo	0,0001
BC	0,0625	BC	0,0005
-	-	LF	0,0032
R ²	0,9699	R ²	0,9792
R ² Ajustado	0,9439	R ² Ajustado	0,9696
Modelo factorial 2 ³	IB=0.30 +0.011* A+0.056 * B+0.15 * C+0.034 * B *C		
Modelo DCC	IB=0.30 +0.041 * A+0.045 * B+0.17 +0.019 * B * C		

Cuando se incluyeron puntos centrales y se evaluaron nuevamente los datos en un diseño central compuesto DCC (manteniendo el principio de ortogonalidad) excluyéndose los términos que no fuesen significativos ($p < 0.05$) hasta obtener los resultados más ajustables. Se pudo observar en el análisis estadístico de varianza un mejor ajuste de los datos al modelo (tabla 1). ($R^2 = 0.9239$) con una función de tipo lineal (tabla 1). Donde se verifica que las variables tiempo, temperatura fueron significativas al igual que la interacción tiempo/temperatura. La significancia del Lack of Fit (LF) indica que el buen ajuste de los datos observados y los estimados. En la figura 1 se presenta el diagrama de Pareto.

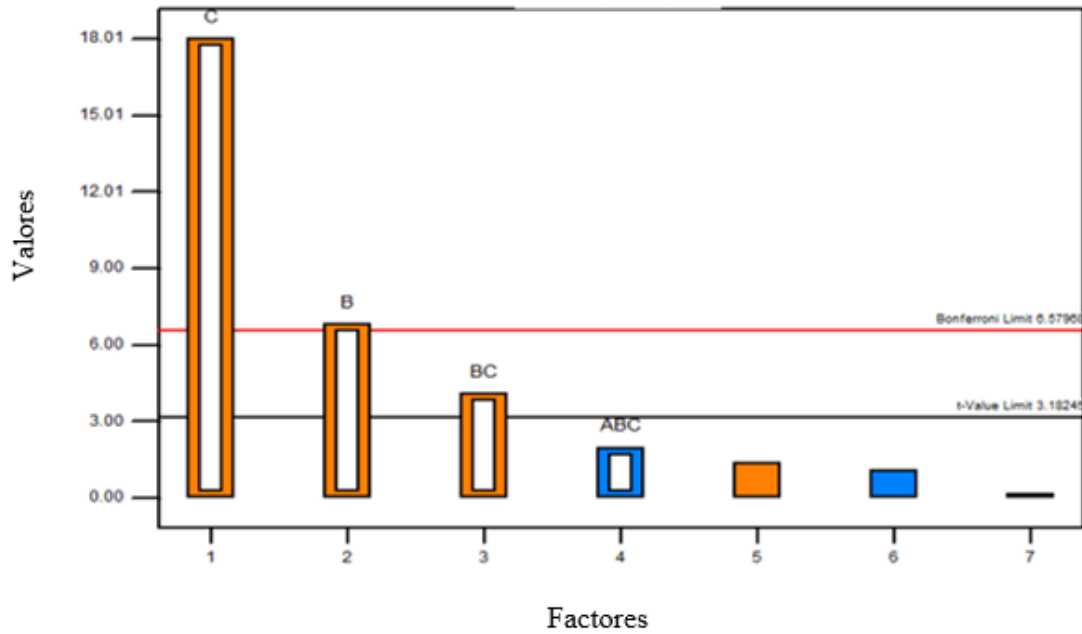


Fig. 1- Diagrama de Pareto

La medida de la cantidad de reducción en la variabilidad de la respuesta que se obtiene al utilizar las variables de regresión en el modelo arrojado, R^2 , fue de 0.97 y el estadístico R^2 ajustada de 0.96. De esta forma la R^2 predicha concuerda razonablemente con la R^2 ajustada, indicando que la capacidad predictiva del modelo fue buena. De esta forma puede esperarse que el modelo explique cerca del 96% de la variabilidad, al predecir nuevas observaciones, en comparación con el 97% de la variabilidad en los datos originales (explica el ajuste de mínimos cuadrados). Por lo tanto la capacidad predictiva global del modelo basado en este criterio es muy satisfactoria.

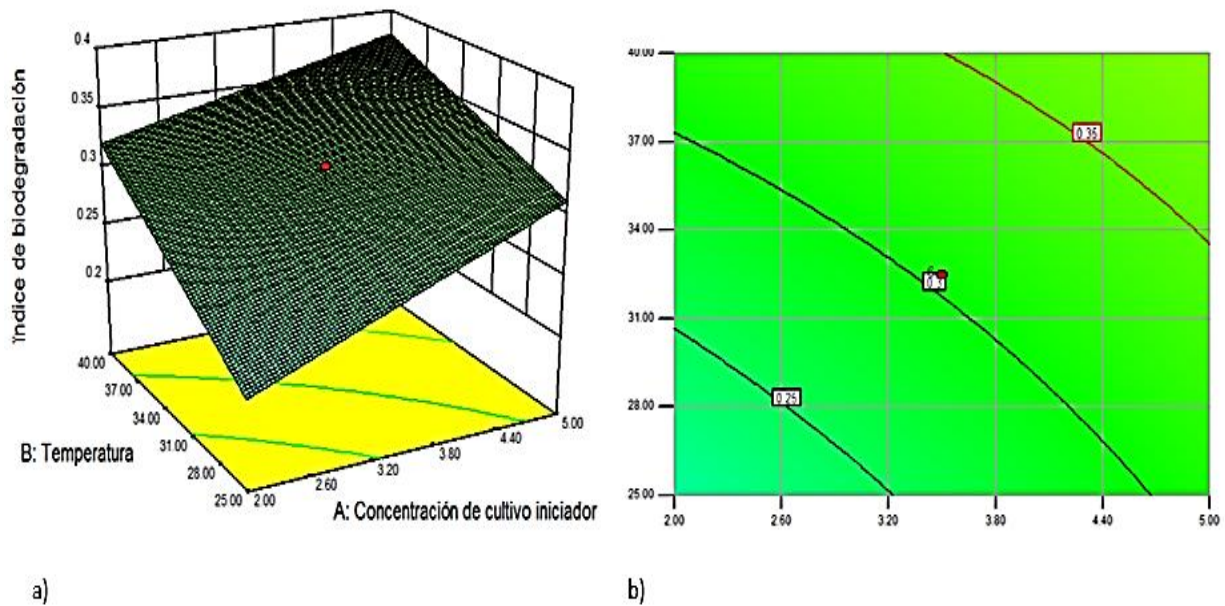


Fig.2-Superficie de respuesta a) y líneas de contorno b) del índice de degradación en función de la temperatura y la concentración de cultivo.

En el gráfico de superficie respuesta, las líneas de contorno indican claramente el efecto de la temperatura y la concentración de cultivo sobre el índice de biodegradación (figura 2). Al incrementarse la temperatura y la concentración del cultivo se incrementa la biodegradación. Sin embargo, el efecto de la concentración de cultivo no fue significativa ($p > 0,05$). Según varios autores la temperatura es un factor crucial en los sistemas biodegradativos ya que seleccionan los microorganismos y los complejos enzimáticos que actúan sobre el sustrato permitiendo un mayor deterioro (con su incremento), hasta valores límites. Aunque en el modelo no se encontró un punto de inflexión de la temperatura, en muchos sistemas es un factor limitante capaz de detener el proceso biológico ya que la mayoría de los microorganismos y sistemas enzimáticos se inactivan a temperaturas superiores a los 55°C.

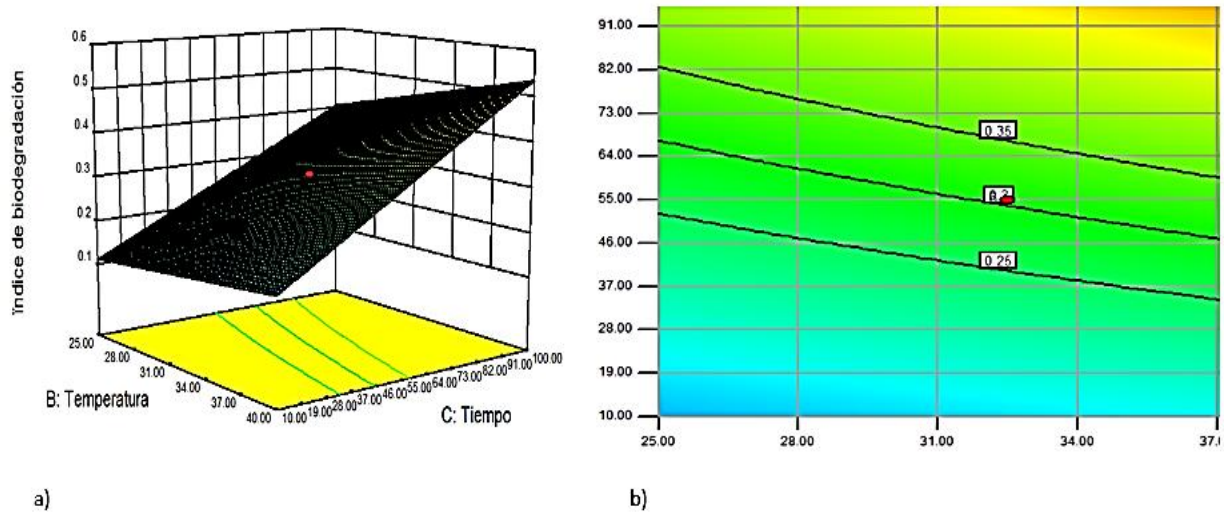


Fig. 3- Superficie de respuesta a) y líneas de contorno b) del índice de degradación en función de la temperatura y el tiempo.

La variable que más efecto tuvo sobre la biodegradación de los residuos sólidos fue el tiempo y su interacción con la temperatura. Se observa que al incrementarse el tiempo se incrementa la biodegradación (figura 3). El efecto del tiempo determina la sucesión de especies microbianas que de forma simultánea van degradando los residuos sólidos, este avance de los procesos biodegradativos en el tiempo es descrito por varias fuentes, quienes también señalan que puede estar controlado por la temperatura. ^(5,11,12,13) En su interacción ambos factores pueden regir de manera efectiva muchos sistemas biodegradativos por ser importantes variables que determinan la cinética de crecimiento de numerosos sistemas biológicos como los microorganismos. ^(12,13,14)

El análisis de superficie de respuesta del modelo obtenido indica que el comportamiento de las variables en el proceso en el tratamiento de los residuos sólidos posee un efecto positivo (figura 1 y figura 2). En las condiciones de estudio se encontraron valores de biodegradabilidad entre moderadas y altas. Se obtuvo un punto máximo extremo (A: 96 días; B: 32°C y C: 2.5%) donde teóricamente se tiene la mejor condición de operación del proceso de de biodegradación, en el cual se obtienen valores óptimos de la variable respuesta (IB=0,4525) para las condiciones experimentales evaluadas. En este punto, las líneas de contorno de la superficie en

la relación de concentración-densidad (figura 1 y figura 2), permite inferir que se está cerca de la región del óptimo, pues es apreciable la tendencia creciente. Por tal motivo, podrían realizarse otros procesos de optimización colocando puntos hacia el exterior del diseño hasta localizar el óptimo local.

Varios autores confirman que un incremento de la temperatura condiciona una mayor acción de los microorganismos y los sistemas enzimáticos que intervienen en el proceso de biodegradación. ^(12,13,14,15,16) Por otra parte, la interacción entre la concentración de microorganismos y la temperatura puede ser observada en diferentes sistemas biodegradativos de lodos, esto se explica no solo por la estimulación en el metabolismo microbiano sino por un cambio en la dinámica de las poblaciones microbianas que se establecen en un determinado ecosistema. ^(12,13,14)

Durante el proceso, la intervención de *Esenia foétida* pudo mejorar las características físicas de los lodos aumentando la capacidad de retención de agua. Este efecto cooperativo a su vez pudo permitir tanto la adecuada selección poblaciones bacterianas y fúngicas como el intercambio adecuado de nutrientes para su desarrollo. ^(15,17)

Conclusiones

Los resultados del modelo arrojado por el análisis de varianza, indican que la temperatura, el tiempo y la interacción tiempo-temperatura influyen en el proceso de biodegradación de residuos sólidos urbanos. Este sistema biológico mixto puede ser empleado para el tratamiento de residuos sólidos urbanos.

Recomendaciones

Se recomienda ampliar el diseño DCC ubicando puntos hacia el exterior del modelo para delimitar el máximo de la variable respuesta fuera de la zona de estudio.

Agradecimientos

Agradecemos la cooperación internacional en redes investigativas GEIA Cuba; Universidad UTE Ecuador.

Referencias bibliográficas

1. FERNÁNDEZ. *et al.* "Sustrato biofísico para agricultura protegida y urbana a partir de compost y agregados provenientes de los residuos sólidos urbanos". *Revista internacional de contaminación ambiental*. 2018, **34**(3), p. 383-394.
2. HERNÁNDEZ-NAZARIO, *et al.* "Caracterización físico-química de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el centro urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba". *Tecnología química*. 2018, **38**(2), p. 369-379.
3. SÁEZ, A.; URDANETA, J. A. "Manejo de residuos sólidos en América latina y el Caribe". *Omnia*, 2014, **20** (3), p. 112-15.
4. ARRECHEA, A.P. *et al.* "Tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos". *Tecnología química*. 2016, p.113-121.
5. MARTINEZ-LOPEZ, A. G., *et al.* "Alternativas actuales del manejo de lixiviados". *Avances en Química*, 2014, **9**(1), p. 38-47.
6. PELLÓN ARRECHEA, A.; LÓPEZ TORRES, M.; ESPINOSA LLORÉNS, M. D. C., & GONZÁLEZ DÍAZ, O. (2015). "Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos". *Ingeniería hidráulica y ambiental*. 2015, **36**(2), p. 3-16.
7. ISO 5815-1:2003 Water quality -- Determination of biochemical oxygen demand after n days (BOD_n). International Organization for Standardization. Ginebra.2003.
8. ISO 15705:2002 Water quality -- Determination of the chemical oxygen demand index (ST-COD) -- Small-scale sealed-tube method. International Organization for Standardization. Ginebra.2002.
9. AL-MOMANI, *etal.* "Biodegradability enhancement of textile dyes and textile wastewater by photolysis. *Journal of photochemistry and photobiology a: chemistry*, 2002, **153**(1-3), p. 191–197. Doi:10.1016/s1010-6030(02)00298-8

10. SCOTT, J. P.; OLLIS, D. F. "Integration of chemical and biological oxidation processes for water treatment: review and recommendations". *Environmental Progress*, 1995, **14**(2), 88-103.
11. CAMPOS-RODRÍGUEZ, R; BRENES-PERALTA, L.P; JIMÉNEZ-MORALES, M. F. "Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras". *Revista Tecnología en Marcha*. 2016, **29**(8), p. 25-32.
11. CAMPOS-RODRÍGUEZ, R; BRENES-PERALTA, L.P; JIMÉNEZ-MORALES, M. F. "Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras". *Revista Tecnología en Marcha*. 2016, **29**(8), p. 25-32.
12. CAMACHO, A.D., et al. "Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos". *Terra Latinoamericana*.2014, **32**(4), p. 291-300.
13. PIÉRART, I.S.P., ROJAS, G.C. "Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del Centro Sur de Chile". *Gestión y Ambiente*. 2013,**16**, p. 39–51.
14. NOVELO, R.I.M., et al, "Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* .2009, **25**, p. 133–145.
16. DE LIMA RODRIGUES, A. S. et al. "Organic waste vermicomposting through the addition of rock dust inoculated with domestic sewage wastewater". *Journal of environmental management*, 2017, **196**, p. 651-658.
17. CAMPOS-RODRÍGUEZ, R., BRENES-PERALTA, L., JIMÉNEZ-MORALES, M.F."Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras". *Revista Tecnología en Marcha*. 2016, **29**(25). doi:10.18845/tm.v29i8.2982.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.