

Diseño experimental para la obtención de compost apto para uso agrícola a partir de lodo papelerero Kraft

Experimental design for obtaining compost suitable for agricultural use from Kraft paper sludge

ROMERO-CONRADO, Alfonso R. [1](#); SUÁREZ-AGUDELO, Erika A. [2](#); MACÍAS-JIMÉNEZ, Mayra A. [3](#); GÓMEZ-CHARRIS, Yulineth [4](#); LOZANO-AYARZA, Liliana P. [5](#)

Recibido: 23/12/16 • Aprobado: 22/01/2017

Contenido

- [1. Introducción](#)
 - [2. Antecedentes](#)
 - [3. Materiales y métodos](#)
 - [4. Resultados y discusión](#)
 - [5. Conclusiones](#)
- [Referencias](#)

RESUMEN:

Las características físico-químicas de los lodos procedentes de la industria papelerera, permiten su aprovechamiento en el compostaje para uso agrícola, convirtiéndose en una alternativa de disposición sostenible para este tipo de residuos. El objetivo de este artículo es, definir los niveles de tratamiento que permitan la obtención de compost con porcentajes de Carbono (C) y Nitrógeno (N) recomendados para uso agrícola, mediante un diseño experimental. Para ello, se definieron como factores experimentales la proporción de lodo papelerero en la mezcla (50% y 75%) y la técnica de compostaje utilizada (compostaje y vermicompostaje). Se concluyó que la técnica de vermicompostaje, acompañada de una alta proporción de lodo papelerero, permite la obtención de compost con niveles aptos de las variables de respuesta: Porcentaje de carbono (%C) y porcentaje de nitrógeno (%N).

Palabras-chave: : Compostaje, Vermicompostaje, Diseño Experimental, Uso agrícola, Lodo Papelerero

ABSTRACT:

The physicochemical characteristics of paper sludge from the paper industry allow its use in composting for agricultural purposes, becoming a sustainable disposal alternative for this type of waste. The aim of this article is, to define the levels of treatment that allow obtaining compost with recommended percentages of Carbon and Nitrogen for agricultural use, through a design of experiments (DOE). The proportion of paper sludge in the mixture (50% and 75%) and the composting technique (composting and vermicomposting) were defined as experimental factors. It was concluded that the vermicomposting method, accompanied by a high proportion of paper sludge, allows obtaining compost with adequate levels for response variables: % C and % N.

Keywords: Compost, Vermicomposting, Design of Experiments, Agricultural Purpose, Kraft Paper Sludge.

1. Introducción

En el proceso de evolución de la gestión ambiental, se ha orientado su objetivo hacia el control de impactos ambientales desde un enfoque preventivo (Producción más Limpia) y la reducción de la

contaminación ambiental (Cabello-Eras, 2016). Por su parte, la gestión integral de residuos sólidos se ha convertido en una fuente de oportunidades ambientales, sociales y económicas, materializadas en la minimización de los impactos asociados al incremento de la población y la industrialización (Melo Henríquez, 2014). Los residuos sólidos generados por la industria papelera, por sus características físico-químicas, son altamente susceptibles a ser aprovechados como enmienda para los suelos agrícolas y así contribuir a la disminución de los impactos, puesto que en el proceso de fabricación del papel existe un alto consumo de agua, energía y sustancias químicas que pueden favorecer la contaminación de fuentes hídricas y del aire (Doldán García & Chas Amil, 2001).

La generación de residuos sólidos en este proceso depende principalmente de factores como la materia prima utilizada, los procesos específicos de cada industria y el producto final a comercializar (Asociación Española de Fabricantes de Pasta Papel y Cartón ASPAPEL, 2007). Uno de los residuos más comunes es el lodo paplero, cuyo contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa, lo convierten en un insumo con gran potencial de aprovechamiento debido a su alto contenido de materia orgánica.

Adicionalmente, su contenido medio de N (entre un 3% y 4%, según la procedencia del lodo), permite que sea usado como ingrediente para el compostaje de abonos orgánicos, además de aportar cantidades importantes de nutrientes como: Potasio (K), Fosforo (P), Magnesio (Mg), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn) y Zinc (Zn) (Martinez & Rivero, 2007).

Entre las diferentes técnicas de compostaje existentes, se encuentran el compostaje tradicional y el vermicompostaje o también denominado lombricultivo. En este último, generalmente se emplean lombrices rojas californianas (*Eisenia Foetida*), las cuales favorecen la degradación de la materia orgánica bajo condiciones ambientales específicas. La temperatura óptima en promedio es de 20 °C; en temperaturas inferiores a 15 °C, la lombriz deja de reproducirse y muchas de sus crías mueren. En temperaturas superiores a 35 °C las lombrices huyen o mueren (Mosquera, 2010). Entre tanto, durante la conversión de la materia orgánica a materia humificada, los microorganismos presentes pueden soportar temperaturas hasta los 75°C y se ubican generalmente en el centro de la pila (Díaz, 2002).

Según Guo, Wu, Li, Liu, & Yu (2015) el vermicompostaje es un método alternativo que aporta menor cantidad de nutrientes que el compostaje tradicional, sin embargo presenta mejores resultados en la agricultura y los ingresos económicos por el comercio de lombrices. Por su parte, Lim, Lee, & Wu (2016) afirman que el compostaje y el vermicompostaje se encuentran dentro de los métodos más limpios y sostenibles para la gestión de residuos orgánicos, debido a que son capaces de degradarlos para su posterior aprovechamiento. Además, son viables económicamente, comparados con la amplia gama de fertilizantes orgánicos disponibles en el mercado.

El compostaje como un proceso biológico llevado a cabo por micro y macro organismos, debe considerar algunas variables que afectan su crecimiento y reproducción como: el nivel de Oxígeno (O₂) o aireación, la humedad de substrato, temperatura, pH y contenido de C y N. Durante su práctica y para evitar problemas como la fitotoxicidad, el bloqueo biológico del N, la reducción de Oxígeno radicular, y el exceso de Amonio (NH₄⁺) y Nitratos (HNO₃), se deben tener en cuenta factores como la separación de materiales no deseables y la granulometría final del producto. Como parte fundamental, se debe considerar que la relación C:N de los residuos que hacen parte de la mezcla, varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua que va de 35:1 o más a 15:1 (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

En definitiva, el proceso de compostaje depende en gran medida de las condiciones ambientales, el método utilizado, las materias primas empleadas, y otros factores externos no controlables. No obstante, éstos deben estar bajo vigilancia constante para que se encuentren dentro de un rango recomendable (Dalzell, Biddlestone, Gray, & Thurairajan, 1991).

El presente artículo tiene como objetivo la determinación de niveles de tratamiento que permitan la obtención de compost apto para usos agrícolas, teniendo en cuenta los efectos de la proporción de lodo paplero y el uso de vermicompostaje en los niveles resultantes de C y N de la mezcla.

En la sección 2 se presentan algunos antecedentes del uso de lodo paplero en procesos de compostaje. La sección 3, expone la metodología utilizada para la definición y ejecución del experimento realizado. En la sección 4 se muestran y analizan los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones y algunas consideraciones para trabajos futuros.

2. Antecedentes

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones sobre el aprovechamiento de los lodos

papeleros. Behin & Sadeghi (2016) consideran que los efluentes de las industrias papeleras funcionan muy bien como materia prima para la industria fertilizante, en la medida en que podrían contribuir a la eficiencia de suministro del material bioactivo y evitar la contaminación de la superficie y las aguas subterráneas con nitrato.

En Polonia Dominczyk, Krzystek, & Ledakowicz (2014), estudiaron el aprovechamiento de lodo paplero mezclado con una fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos por medio del secado biológico, para la obtención de biocombustible por su poder calorífico.

En Portugal, Gomes, Domingues, & Gama (2016) proponen la valoración del reciclaje de lodo paplero por medio de la producción de bioetanol, empleando enzimas y células en el proceso de hidrólisis y fermentación, constituyéndose como un sistema económico y una eficiente estrategia de reciclaje.

En India, Deeba, Pruthi, & Negi (2015) aprovecharon el contenido de biomasa lignocelulósica del lodo paplero y levadura oleaginosa (*Cryptococcus vishniacii*) para la obtención de lípidos y la producción de biodiesel. Mediante un proceso de transesterificación, se obtuvo un éster metílico de ácido graso (FAME) con elevado contenido de ácidos oleico, palmítico, linoléico y esteárico, brindando una mayor estabilidad en la oxidación del combustible.

En Latinoamérica, se presentan también estudios sobre el aprovechamiento de los lodos papleros en procesos de compostaje y su aplicación en suelos agrícolas:

En Perú, Juárez Uribe (2010) estudió el reciclaje de lodos papleros mediante el lombricultivo, utilizando la especie "*Eisenia Foetida*". Como resultado, se determinó que utilizando una mezcla con 100% de lodo paplero se favorece la supervivencia del mayor número de lombrices. Así mismo, los resultados de los análisis fisicoquímicos, determinaron que el lodo paplero puede ser utilizado como enmienda orgánica según la Norma Española B.O.E.146-1991.

Mientras en Colombia, aunque se evidencian pocas investigaciones en torno al compostaje de lodos papleros, se pueden encontrar estudios sobre evaluaciones del proceso de compostaje de otros residuos orgánicos. Hoyos, Vargas, & Velasco (2010) evaluaron el resultado del compostaje de celulosa (viruta y/o aserrín) mezclada con gallinaza. Mediante un diseño experimental aleatorizado, con cuatro tratamientos y dos réplicas, se analizan los valores de temperatura, pH e intercambio catiónico de acuerdo a la NTC 5167.

En el Valle del Cauca, Sosa Rodríguez, Sánchez De Prager, & Sanclemente Reyes (2014) evaluaron el comportamiento de los niveles de N y P en el compostaje de leguminosas. Silva-Leal, Bedoya, & Torres-Lozada (2013), presentaron los resultados del estudio sobre el compostaje de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales en cultivos de rábano, y las prácticas necesarias de higienización previas a su uso.

El compostaje de lodo paplero puede verse como alternativa para mejorar los sistemas productivos agropecuarios a nivel regional, nacional e internacional teniendo en cuenta los retos de producción sostenible (Suárez-Agudelo & Calderón-Cuartas, 2015). El uso de compostaje de residuos con propiedades como la del lodo paplero, tiene beneficios y efectos sobre las propiedades físico-químicas de los suelos, reduciendo el uso de fertilizantes minerales y el deterioro de la calidad del suelo para la agricultura (Madriñán Molina, Rodríguez Victoria, & Rueda Saa, 2012).

3. Materiales y métodos

El compost objeto de estudio, consiste en una mezcla de lodo paplero y estiércol bovino, este último, es un elemento con alto contenido de N, también fuente importante de nutrimentos vegetales y contribuyente en el mejoramiento del rendimiento y calidad de algunos productos agrícolas (Capulín-Grande, Núñez-Escobar, Etchevers-Barra, & Baca-Castillo, 2001).

3.1. Selección y obtención del lodo paplero

Se utilizó un lodo del proceso de reciclaje para obtención de papel Kraft de una industria paplera ubicada en la ciudad de Barranquilla – Colombia, con el objetivo de evaluar la alternativa de aprovechamiento a partir del compostaje mezclado con otro residuo orgánico para la posible aplicación a suelos agrícolas de la región. El lodo se trasladó en bolsas plásticas hasta el laboratorio y después de determinar el contenido de C y N se procedió a pesar y llevar a canastas forradas previamente con plástico donde se le mezcló con estiércol e inició el proceso de compostaje.

3.2. Variables evaluadas y métodos de análisis

Se evaluó inicialmente el compostaje de los lodos papeleros tipo Kraft, como alternativa de aprovechamiento de la generación de residuos orgánicos, mediante la determinación de los elementos esenciales para la vida C y N, puesto que afectan al crecimiento y reproducción de microorganismos. Lo anterior, teniendo en cuenta la función que cumple la materia orgánica en los suelos y la interacción de los seres vivos en los procesos cíclicos del C y N, en donde los procesos de descomposición y/o mineralización van de su forma orgánica a inorgánica para que puedan ser aprovechados por los organismos y plantas (Román et al., 2013).

Las transformaciones de compuestos presentes en la materia orgánica son complejas, debido a la participación de microorganismos para la satisfacción de los requerimientos de las plantas. Además son consideradas como elementos fundamentales para la fertilidad del suelo que deben mantener una relación C:N óptima, la cual posee una acción inmediata desde el punto de vista de la mejora de la estructura y actividad microbiana del mismo (Julca-Otiniano, Meneses-Florián, Blas-Sevillano, & Bello-Amez, 2006).

Los niveles óptimos de C y N recomendados para uso agrícola, establecidos por la NTC 5167 (ICONTEC, 2011) son de un 15% y un 2% respectivamente, mientras que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) define un 20% para el C y ~1% para el N.

Los métodos empleados para la determinación de N fueron Nitrógeno Total Kjeldahl y para el C el método de Walkley & Black (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006).

3.3. Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental de dos factores, cada uno con dos niveles (22). Se definieron como variables de respuesta, los dos componentes más importantes para la definición de la calidad del compostaje: % C y % N. Los factores principales están definidos por el porcentaje de lodo paplero de la mezcla y la práctica o no del vermicompostaje. Con la realización previa de un diseño experimental de cribado, se definieron los factores a analizar y sus respectivos niveles, junto con las cantidades en kg de lodo paplero y estiércol. El detalle del diseño factorial se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Detalles del diseño factorial.

Variables de respuesta	Factores	Niveles del factor	Montaje	Número de réplicas
% C	% Lodo paplero de la mezcla	Nivel Bajo: 50%	3 kg de lodo paplero y 3 kg de estiércol	2
		Nivel Alto: 75%	4,5 kg de lodo paplero y 1,5 kg de estiércol	2
% N	Uso de Lombrices (<i>Eisenia Foetida</i>)	Nivel Bajo: 0 (No)	3 kg de lodo paplero y 3 kg de estiércol	2
		Nivel Alto: 1 (Sí)	4,5 kg de lodo paplero y 1,5 kg de estiércol	2

El diseño aleatorizado con dos réplicas arrojado por el software estadístico Statgraphics®, se compone de 8 corridas experimentales. Para la realización del experimento se prepararon 8 mezclas de 6 kg cada una, teniendo en cuenta los tratamientos definidos por el diseño experimental (4 mezclas para

compostaje y 4 mezclas para vermicompostaje). En el caso del vermicompostaje, en cada mezcla se agregaron 200 lombrices con un tamaño aproximado de 0.07 a 0.10 m y un peso entre 0.26 – 0.39 kg. Los montajes se cubrieron adecuadamente para evitar la proliferación de insectos durante el proceso de compostaje.

3.4. Montaje de la compostera

Para el diseño y construcción de la compostera se consideraron las siguientes variables que inciden en el proceso de compostaje en áreas urbanas: ventilación, temperatura, control de inundaciones, accesibilidad y el aislamiento físico de otros organismos. La estructura básica consistió en módulos de madera y polisombra, con un techo a una altura de 2.80 m, piso compuesto de tierra, aproximadamente con un área de 0.6 m².

3.5. Consideraciones adicionales

Bueno Márquez, Díaz Blanco, & Cabrera Capitán (2008) exponen que en la evolución de la temperatura se puede comprobar la eficiencia y el grado de estabilización del compostaje, debido a que existe una relación directa entre la temperatura y la degradación de la materia orgánica. Mientras que la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, dado que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de desecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso.

La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%; la actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis.

Entre tanto, la temperatura máxima alcanzada en la primera semana fue de 34°C y la mínima de 29°C. Después de un mes del proceso de compostaje, las temperaturas oscilaron entre los 28°C y 32°C hasta la estabilización en la semana 13 a temperatura ambiente de la ciudad de Barranquilla que oscila entre los 26°C y 33° C. La humedad de mezcla se controló adicionando agua con el fin de mantener el porcentaje establecido por la NTC 5167 (mín. del 100%) y por la FAO (45% - 60%).

Adicionalmente, se registraron lecturas de pH mínimas de 7.2 y máximas de 9.5 por lo que se observó una tendencia alcalina, sin embargo los valores se mantuvieron en el rango óptimo sugerido por la FAO (4.50 a 8.50) (Román et al., 2013). Entre tanto, el rango del pH se encuentra por fuera del establecido por Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo (2007) que oscila entre 6.50 a 7.50.

4. Resultados y discusión

4.1. Resultados obtenidos

En la tabla 2 se observan los valores de C y N obtenidos para cada tratamiento. Al comparar los valores resultantes con los establecidos por la NTC 5167 y la FAO es posible afirmar que la mayoría de las mezclas no alcanzaron los niveles óptimos de estos componentes.

Tabla 2. Contenido de C y N del compost y vermicompost

Tratamiento	% de lodo paplero	Uso de lombrices	% C	% N
1	75	1	16.6	0.91
2	75	0	35.21	0.31
3	50	1	22.35	1.31
4	50	0	24.40	0.41

5	50	0	23.56	0.20
6	75	0	36.71	0.34
7	75	1	18.91	0.97
8	50	1	20.54	1.63

4.2. Supuestos estadísticos

Se comprobaron los supuestos estadísticos para asegurar un análisis confiable de los resultados del experimento. Las pruebas gráficas realizadas se muestran en las figuras 1a y 1b. De acuerdo a las gráficas de probabilidad normal para residuos es posible afirmar que los datos de %C y %N se ajustan en gran proporción a una distribución normal. Así mismo, se verifica el cumplimiento de los supuestos de homocedasticidad y linealidad a través del gráfico de residuos vs predichos.

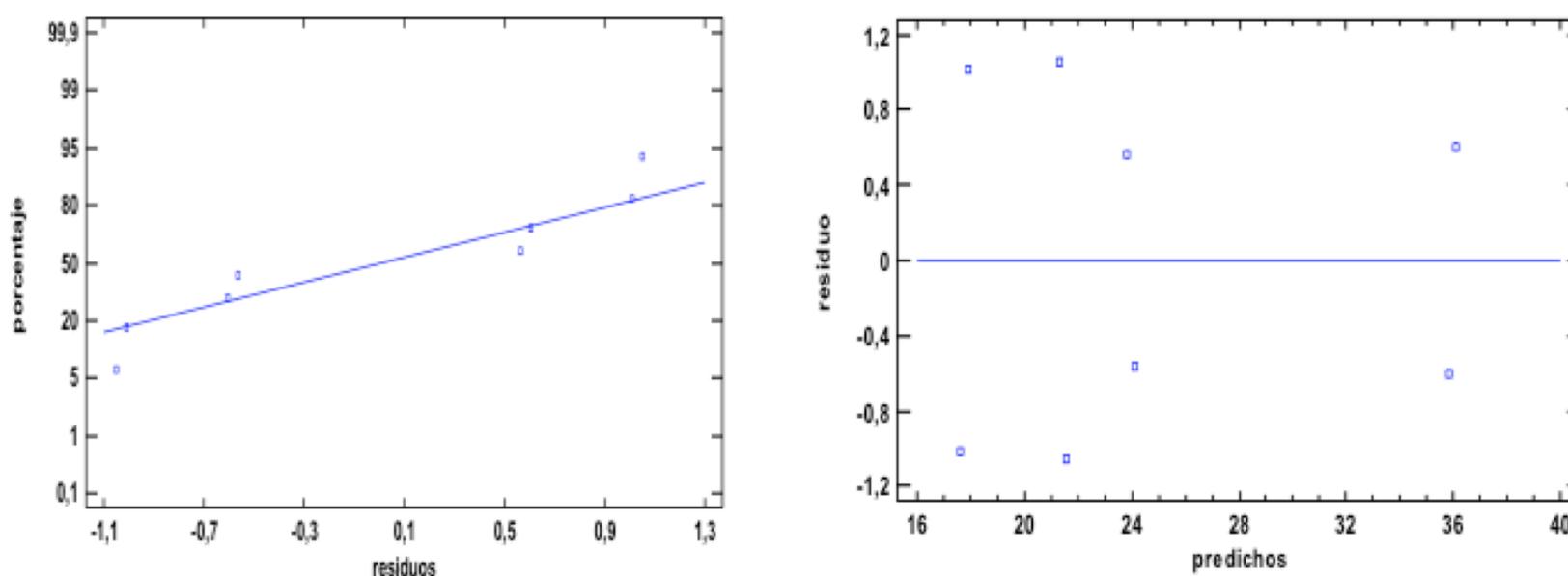


Figura 1a. Gráfico de probabilidad normal para residuos (izquierda) y Gráfico de residuos vs predichos para % C (derecha).
Fuente: Statgraphics®

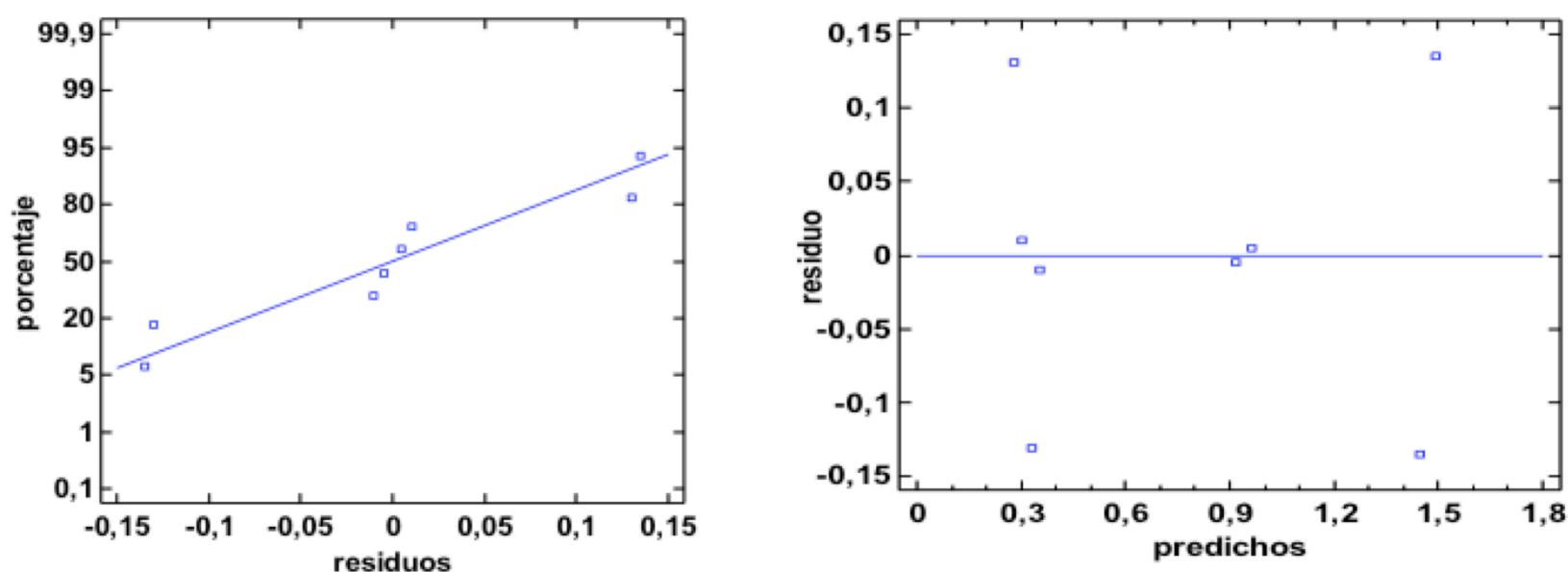


Figura 1b. Gráfico de probabilidad normal para residuos (izquierda) y Gráfico de residuos vs predichos para % N (derecha).
Fuente: Statgraphics®

4.3. Carbono

Con el propósito de identificar si el efecto del uso de lombrices y/o el porcentaje de lodo paplero presentan un efecto significativo sobre el %C de las mezclas, se realizó un análisis de varianza que se muestra en la tabla 3.

A partir de la tabla ANOVA obtenida y considerando los valores del estadístico P, se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que los dos factores considerados (A - % de lodo papelero y B- Uso de lombrices), así como sus interacciones, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre %C presente en el compostaje. Como se puede observar en la figura 2, el uso de lombrices es el factor que mayor efecto genera sobre el contenido de C.

Los valores de los estadísticos R cuadrado (98.5143%) y R cuadrado ajustado (96.533%) evidencian que el modelo arrojado explica de manera adecuada la variabilidad del % C.

Tabla 3. Análisis de varianza para %C. Fuente: Statgraphics®

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:% de Lodo	34.3621	1	34.3621	18.36	0.0234
B:Uso de Lombrices	215.074	1	215.074	114.90	0.0017
AB	122.774	1	122.774	65.59	0.0039
bloques	0.1682	1	0.1682	0.09	0.7839
Error total	5.6157	3	1.8719		
Total (corr.)	377.994	7			

R-cuadrada = 98.5143 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.5335 por ciento

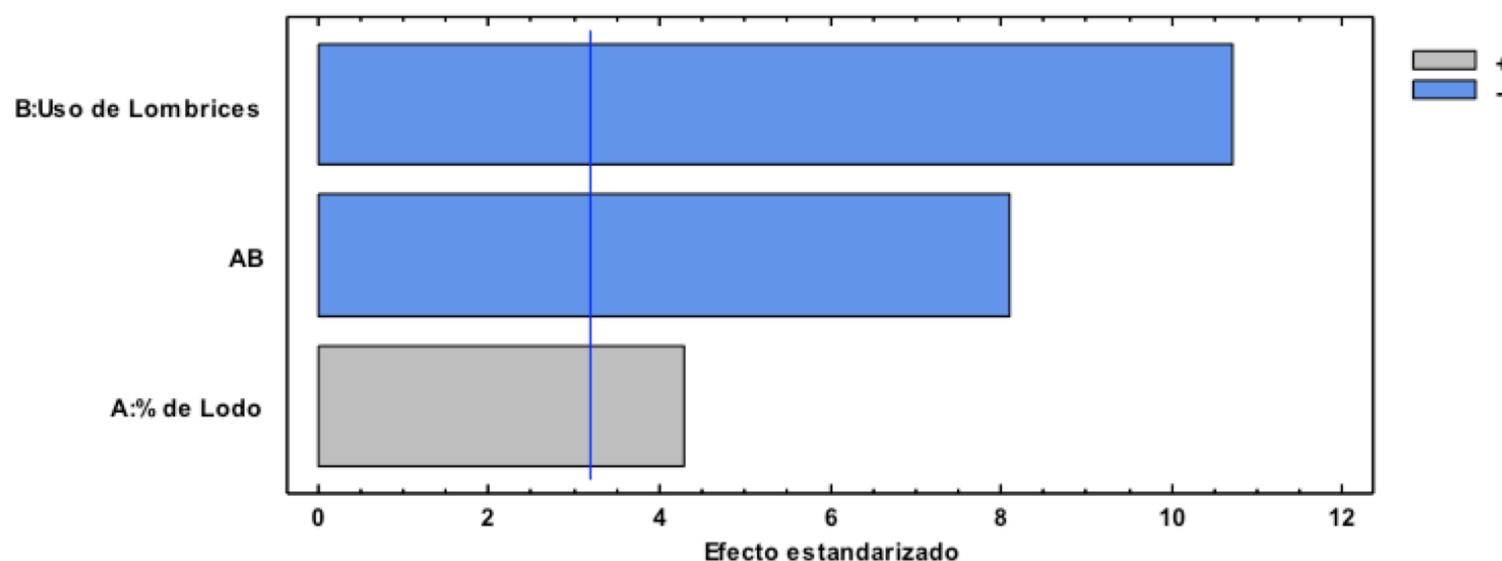


Figura 2. Diagrama de Pareto estandarizada para %C. Fuente: Statgraphics®

En la figura 3 se muestra el gráfico de efectos principales, en el cual se evidencia que el %C en la mezcla es directamente proporcional al porcentaje de lodo papelero utilizado. El uso de lombrices, por el contrario, presenta un efecto inverso sobre la variable de respuesta, arrojando bajos niveles de C.

Según la gráfica de interacciones, se pueden obtener valores mínimos de %C al combinar los niveles de: 1 ("SI") para uso de lombrices y 75% de lodo papelero. Al realizar un procedimiento de compostaje sin lombrices, con un 75% de lodo papelero se obtienen los mayores niveles de C, esto evidencia la labor de las lombrices en la reducción de los niveles de este elemento.

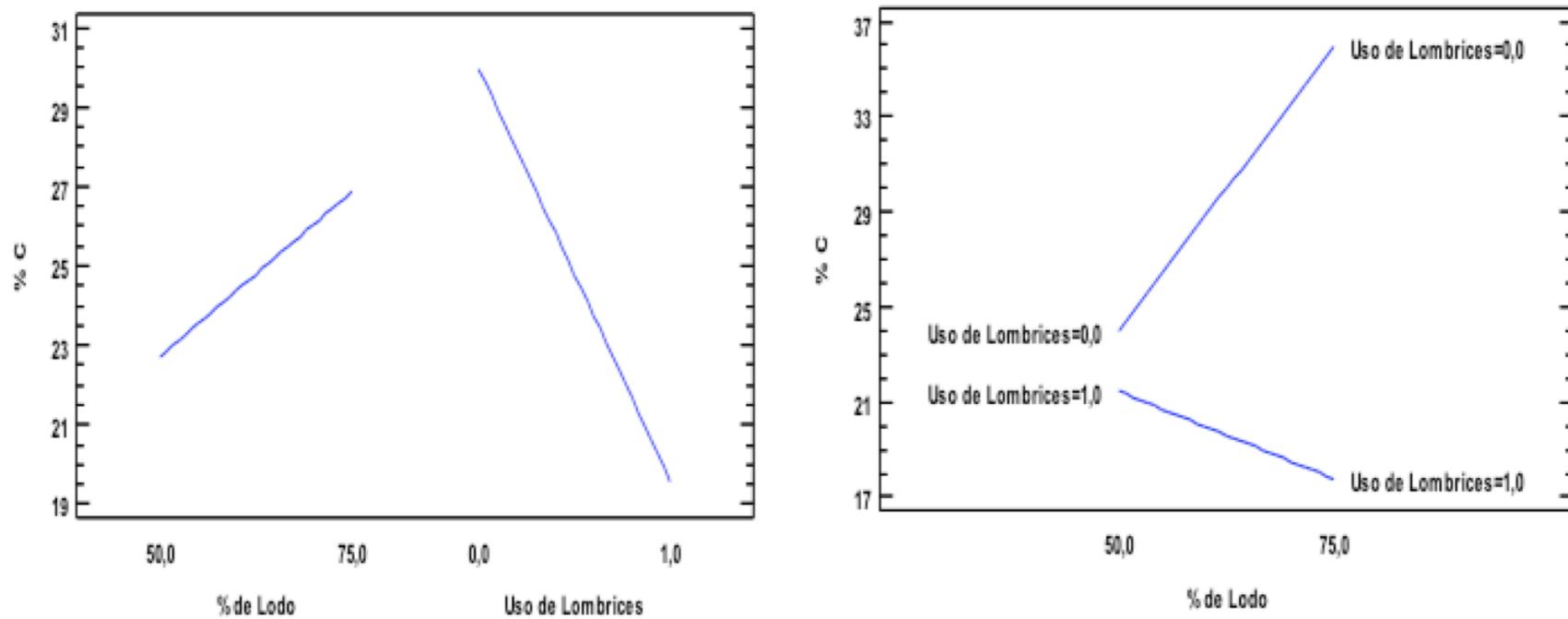


Figura 3. Gráfica de efectos principales (izquierda) y Gráfico de interacciones (derecha) para %C. Fuente: Statgraphics®

4.3.1. Niveles recomendados y optimización de la respuesta %C

Según el gráfico de interacciones (figura 3) es posible obtener los niveles de C cercanos a los recomendados por la NTC 5167 (15%) y la FAO (20%). El uso de lombrices en el compostaje permite que los valores de %C se mantengan cercanos a los recomendados, siendo el tratamiento [Uso de lombrices=1] y [% de Lodo =75%] aquel que presenta niveles de carbono cercanos a 17%.

Con el fin de soportar la selección de los niveles anteriores, se presenta la ecuación de regresión (ecuación 1) que describe el modelo ajustado para el comportamiento del %C ante una variación en escala continua de los porcentajes de lodo papelero y el uso de lombrices:

$$\% C = 0.02 + 0.4792 * \% \text{ de Lodo} + 28.805 * \text{Uso de Lombrices} - 0.6268 * \% \text{ de Lodo} * \text{Uso de Lombrices} \quad (1)$$

En la figura 4 se muestra la gráfica de la superficie de respuesta obtenida a través de este modelo.

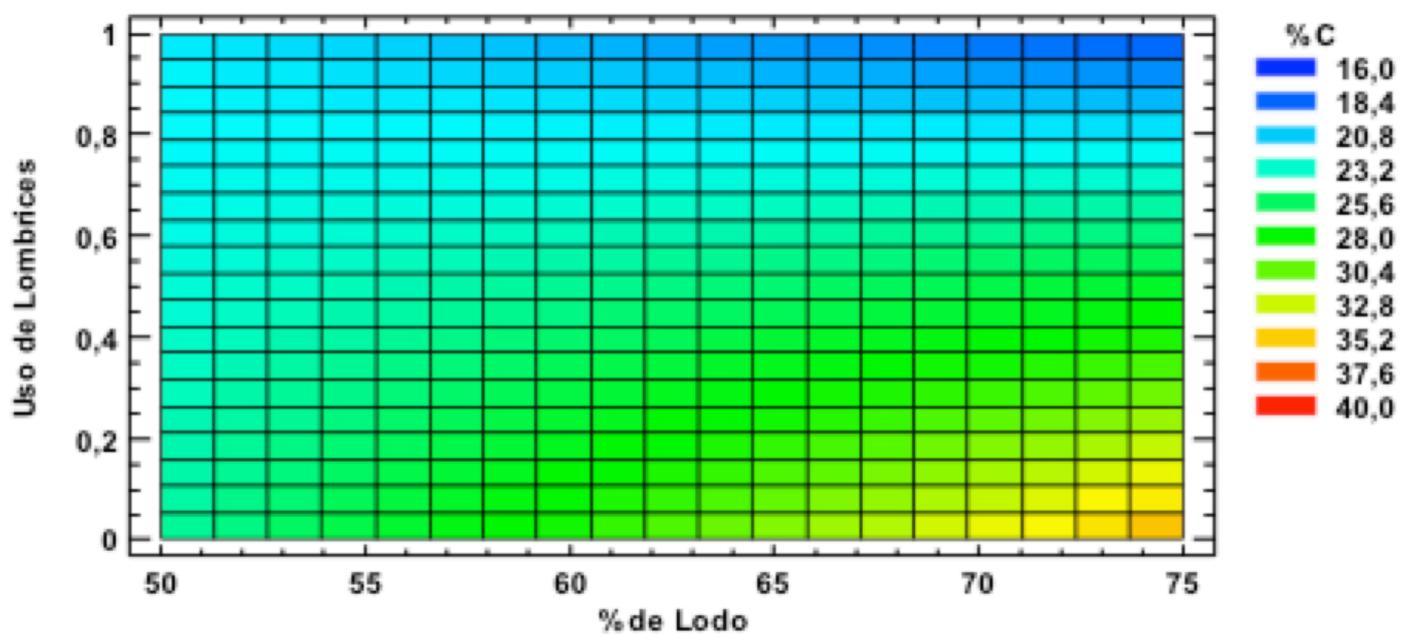
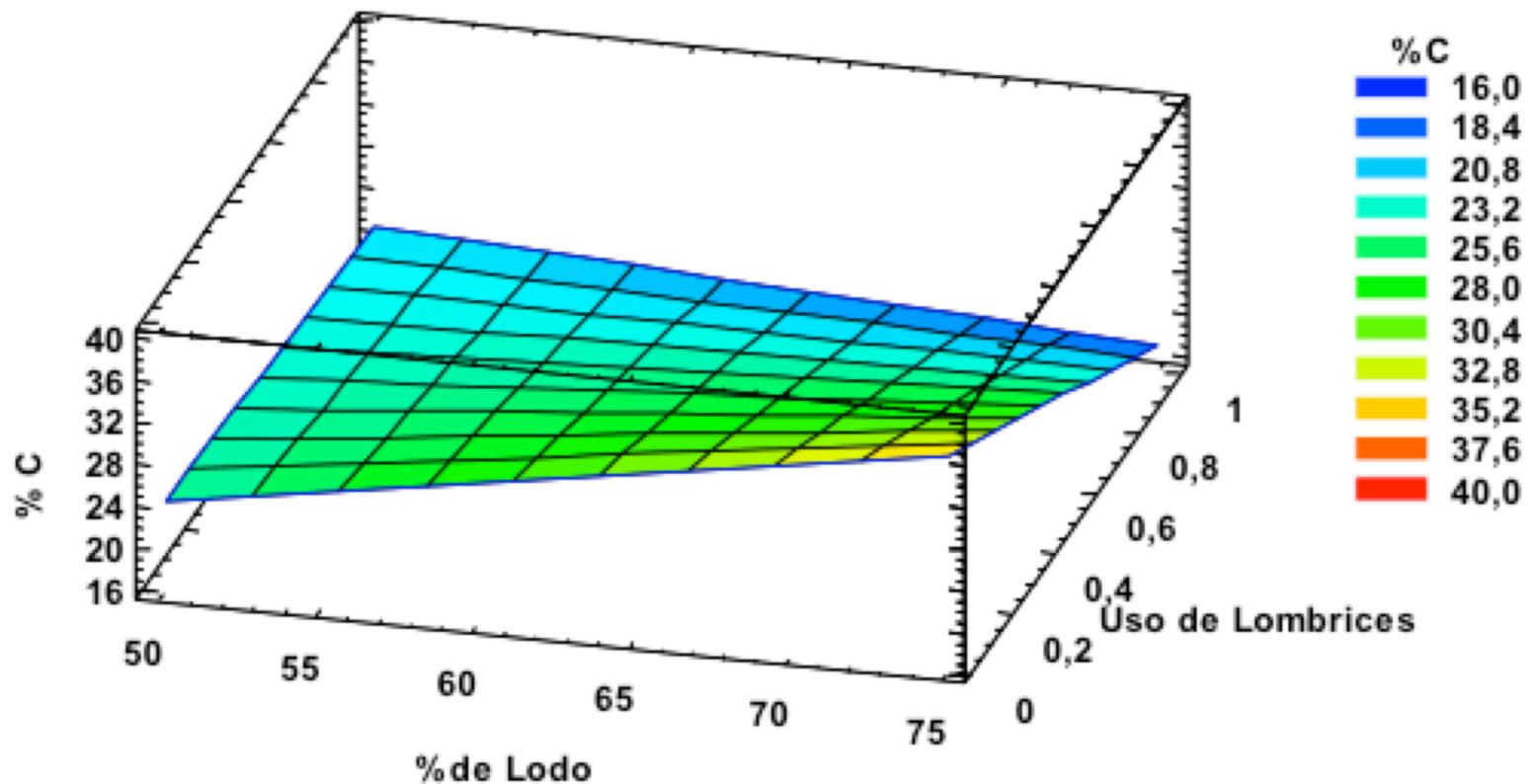


Figura 4. Contornos de la superficie de respuesta estimada para %C. Fuente Statgraphics®

Reemplazando los niveles seleccionados en la ecuación 1 se obtiene el valor estimado de %C.

$$\% C = 0.02 + 0.4792 \cdot 75 + 28.805 \cdot 1 - 0.6268 \cdot 75 \cdot 1$$

$$\% C = 17.755$$

4.4. Nitrógeno

Analizando los resultados del ANOVA obtenido para la determinación de la influencia de los factores estudiados en el % N (tabla 5), es posible inferir con un nivel de confianza del 95% que solo el uso de lombrices posee un efecto significativo sobre esta variable de respuesta, en tanto que el Valor-P del estadístico es menor que 0.05. Como se puede observar en la figura 5, la influencia significativa positiva del uso de lombrices en el %N era esperada, esto debido a que estos influyen en la rápida descomposición de la materia orgánica durante el vermicompostaje. Aunque el lodo papelerero puede aportar pequeñas cantidades de N a la mezcla, su influencia no resultó estadísticamente significativa.

Tabla 5. Análisis de varianza para %N.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>

A:% de Lodo	0.13005	1	0.13005	5,53	0.1001
B:Uso de Lombrices	1.5842	1	1.5842	67,41	0.0038
AB	0.15125	1	0.15125	6,44	0.0849
Bloques	0.005	1	0.005	0,21	0.6760
Error total	0.0705	3	0.0235		
Total (corr.)	1.941	7			

R-cuadrada = 96.3679 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 91.525 por ciento

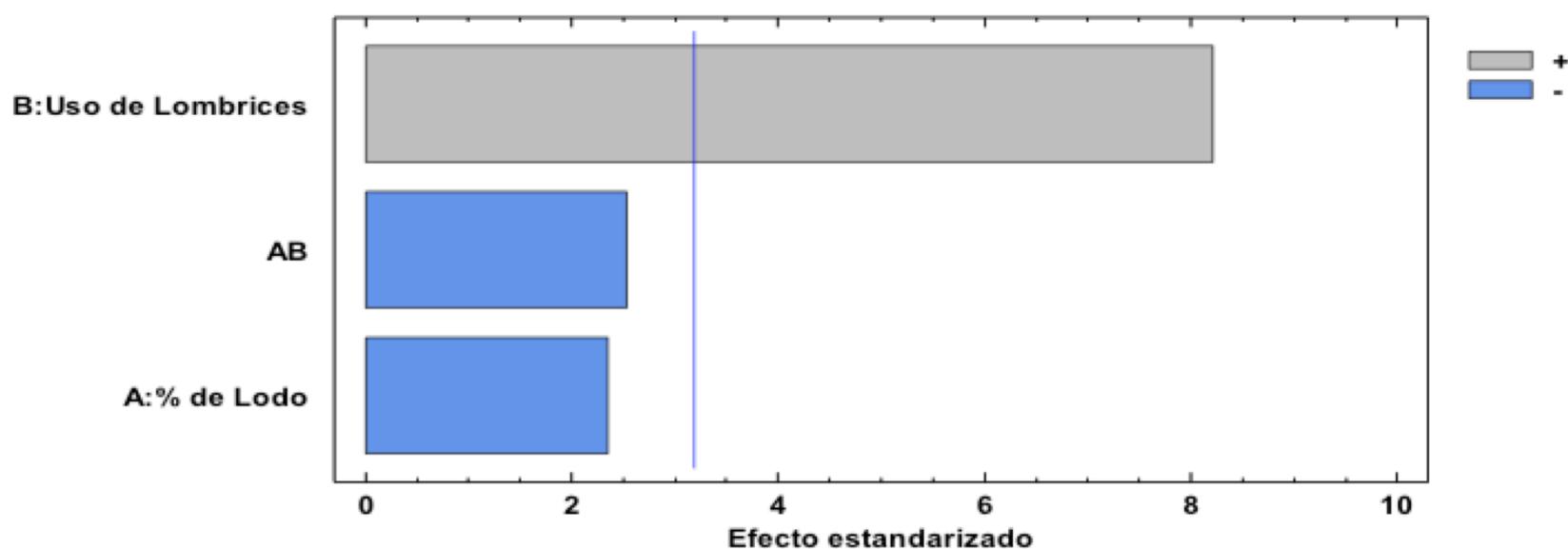


Figura 5. Diagrama de Pareto estandarizada para %N. Fuente: Obtenido de Statgraphics®

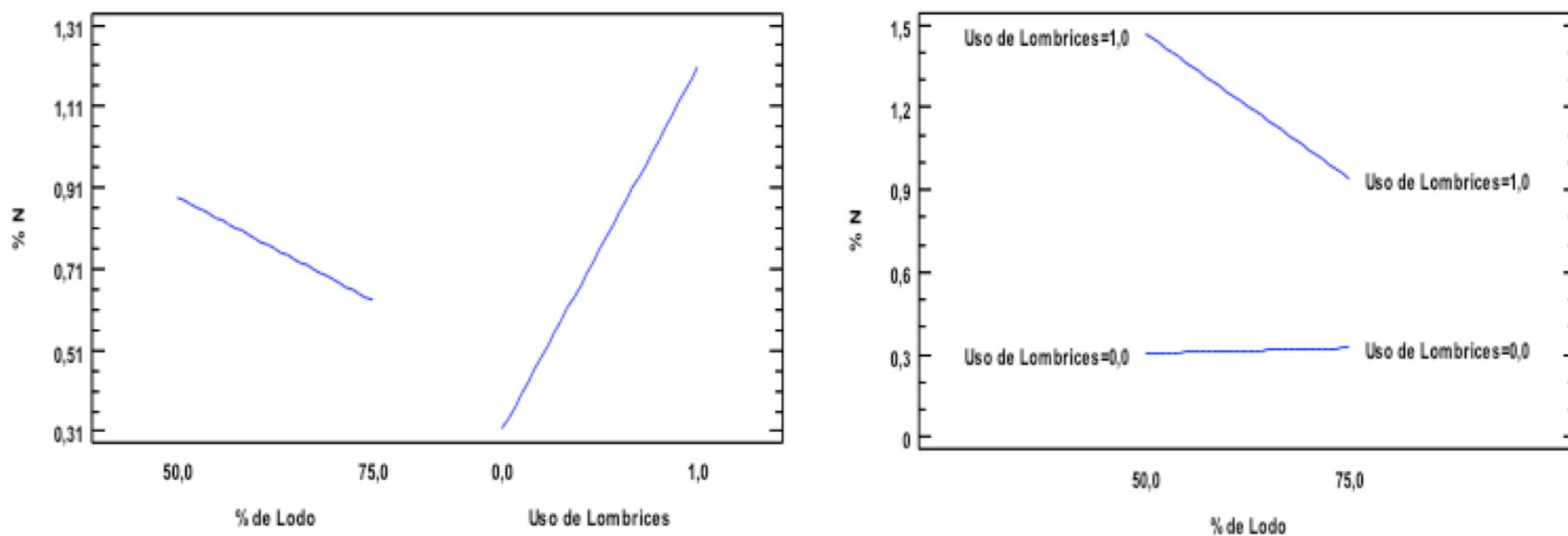


Figura 6. Gráfica de Efectos Principales (izquierda) y Gráfico de interacciones (derecha) para %N. Fuente: Statgraphics®

4.4.1. Niveles recomendados y optimización de la respuesta para %N

Teniendo en cuenta el gráfico de interacciones (figura 6), el % N presenta un comportamiento inversamente proporcional al porcentaje de lodo papelero. Al utilizar lombrices, se observan cambios significativos en los niveles de N al cambiar la proporción de lodo papelero, y cuando no se utilizan lombrices no se presentan cambios significativos en el nivel de N al variar el porcentaje de lodo papelero de la mezcla.

El uso de lombrices en el proceso de compostaje asegura que los niveles de N se encuentren dentro del rango recomendado por la NTC 5167 (2%) y la FAO (~1%). Combinando este nivel de tratamiento con

un porcentaje de lodo papелero del 50% se obtiene un nivel de N cercano al 1.5%. Al seleccionar un porcentaje de lodo papелero del 75%, el nivel de N desciende hasta un valor cercano al 1%.

La ecuación de regresión (ecuación 2) que describe el modelo ajustado para el comportamiento del % N ante una variación en escala continua de los porcentajes de lodo papелero y el uso de lombrices:

$$\% N = 0.265 + 0.0008 * \% \text{ de Lodo} + 2.265 * \text{Uso de Lombrices} - 0.022 * \% \text{ de Lodo} * \text{Uso de Lombrices} \quad (2)$$

En la figura 7 se muestra la superficie de respuesta obtenida a través del modelo de regresión.

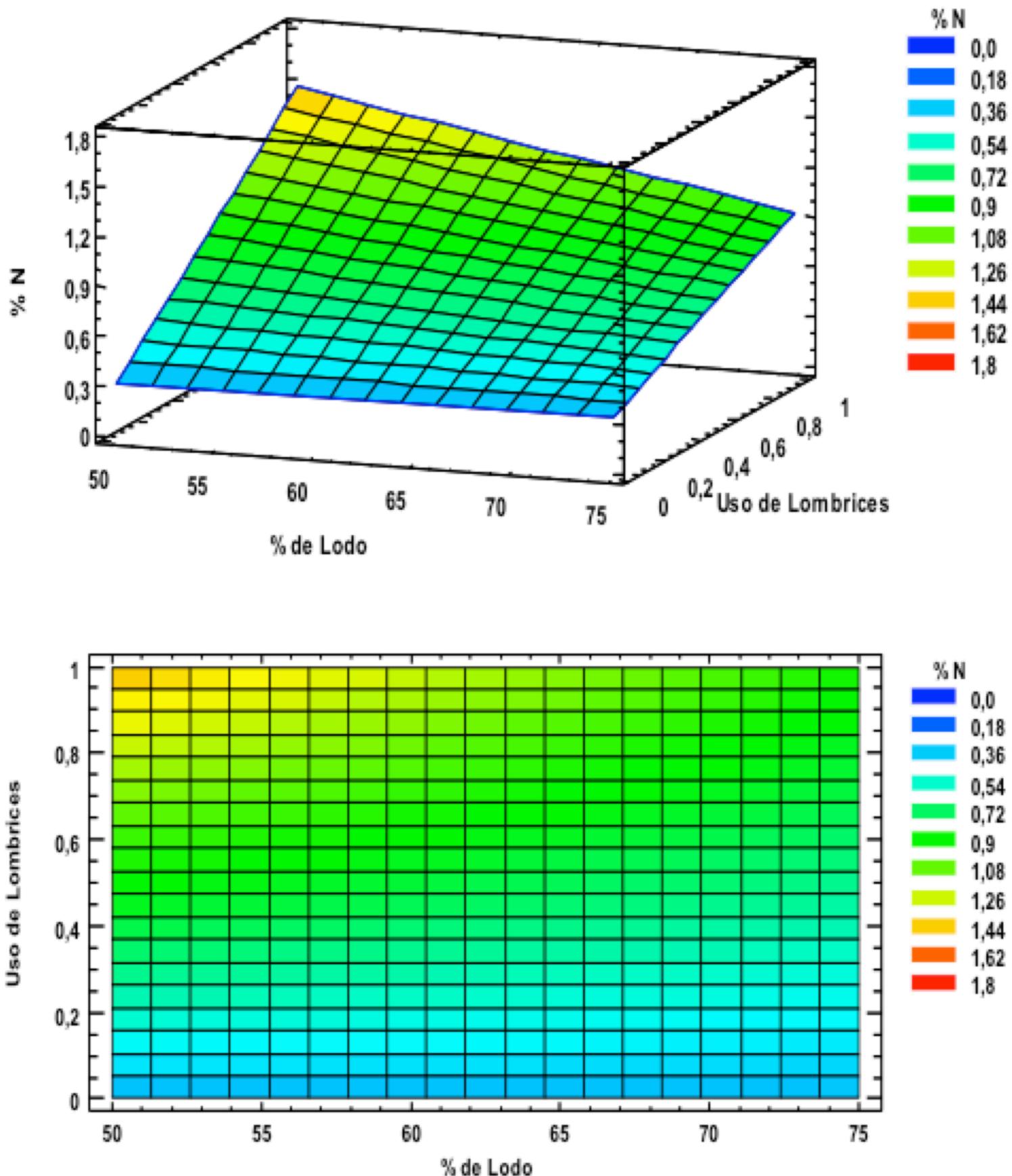


Figura 7. Contornos de la superficie de respuesta estimada para %N. Fuente Statgraphics®

Reemplazando en la ecuación 2 los valores correspondientes para el tratamiento [Uso de Lombrices =1] y [% de Lodo Papелero = 50%], se obtiene:

$$\% N = 0.265 + 0.0008 * \% \text{ de Lodo} + 2.265 * \text{Uso de Lombrices} - 0.022 * \% \text{ de Lodo} * \text{Uso de Lombrices} \quad (2)$$

$$\% N = 0.265 + 0.0008 * 50 + 2.265 * 1 - 0.022 * 50 * 1$$

$$\% N = 1.47$$

Reemplazando en la ecuación 2 los valores correspondientes para el tratamiento [Uso de Lombrices =1] y [% de Lodo Papelero = 75%], se obtiene:

$$\% N = 0.265 + 0.0008*75 + 2.265*1 - 0.022*75*1$$

$$\% N = 0.94$$

4.5. Solución al problema multiobjetivo.

Dada la naturaleza y comportamiento de las variables de respuesta, la consecución de valores aceptables para cada una de éstas constituye un problema de naturaleza multiobjetivo. De acuerdo a los resultados expuestos anteriormente, el tratamiento [Uso de Lombrices =1] y [% de Lodo Papelero = 75%] permite la consecución de niveles aceptables de C y N, de acuerdo a los niveles recomendados expuestos en la sección 3.2.

5. Conclusiones

El análisis realizado permitió la identificación de los niveles recomendados de tratamiento para la obtención simultánea de valores aceptables para las variables de respuesta seleccionadas. El uso de lombrices y una alta proporción de lodo papelero en la mezcla de compostaje permiten alcanzar porcentajes de C y N cercanos a los recomendados para el compostaje de uso agrícola.

El control de variables como la temperatura, la humedad y el pH durante el proceso de experimentación con mezclas de compostaje es de vital importancia para la estimación confiable del comportamiento de las variables de respuesta. En el caso del vermicompostaje, el número de lombrices utilizadas también debe ser un factor controlado, y es necesario un constante monitoreo en la tasa de supervivencia de éstas.

Como tema para investigaciones futuras se propone la utilización de un diseño experimental de mezclas y la inclusión de variables de respuesta adicionales (como los elementos P y K).

Adicionalmente, se propone la evaluación de la efectividad del compostaje en la práctica agrícola, mediante la experimentación en el cultivo y crecimiento de plantas representativas de la región.

Referencias

Asociación Española de Fabricantes de Pasta Papel y Cartón ASPAPEL. (2007). Diagnóstico de la Generación y Gestión de Residuos Sólidos en la Industria Papelera Española. Retrieved from http://www.aspapel.es/sites/default/files/publicaciones/Doc_83.pdf

Behin, J., & Sadeghi, N. (2016). Utilization of waste lignin to prepare controlled-slow release urea. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. <http://doi.org/10.1007/s40093-016-0139-1>

Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2008). Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje. In *Compostaje* (pp. 93–109). Ediciones Mundi Prensa. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=IWYJAQAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Cabello-Eras, J. J. (2016). Approaching a Cleaner Production as an Environmental Management Strategy. *IMJSOR*, 1(1), 4–7. dx.doi.org/10.17981/ijmsor.01.01.01

Capulín-Grande, J., Núñez-Escobar, R., Etchevers-Barra, J. D., & Baca-Castillo, G. A. (2001). Evaluación del extracto líquido de estiércol bovino como insumo de nutrición vegetal en hidroponía. *Agrociencia*, 35(3), 287–299.

Colomer Mendoza, F. J., & Gallardo Izquierdo, A. (2007). *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Tratamiento_y_gesti%C3%B3n_de_residuos_s%C3%B3li.html?id=T7RTGQAACAAJ&pgis=1

Dalzell, H. W., Biddlestone, A. J., Gray, K. R., & Thuraijan, K. (1991). *Manejo del Suelo, Producción y Uso del Composte en Ambientes Tropicales y Subtropicales* (56th ed.). Food & Agriculture Org. Retrieved from https://books.google.com/books?id=WgZ47ud_bpoC&pgis=1

- Deeba, F., Pruthi, V., & Negi, Y. S. (2015). Converting paper mill sludge into neutral lipids by oleaginous yeast *Cryptococcus vishniacii* for biodiesel production. *Bioresource Technology*, *213*, 96–102. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.105>
- Díaz, E. (2002). Guía de Lombricultura. *Agencia de Desarrollo Económico Y Comercio Exterior*. La Rioja.
- Doldán García, X. R., & Chas Amil, M. L. (2001). La contaminación de la industria de pasta-papel en Galicia: un análisis de flujos de materiales y energía. *Estudios de Economía Aplicada*, *18*, 143–158.
- Dominczyk, A., Krzystek, L., & Ledakowicz, S. (2014). Biodrying of Organic Municipal Wastes and Residues from the Pulp and Paper Industry. *Drying Technology*, *32*(11), 1297–1303. <http://doi.org/10.1080/07373937.2014.901349>
- Gomes, D., Domingues, L., & Gama, M. (2016). Valorizing recycled paper sludge by a bioethanol production process with cellulase recycling. *Bioresource Technology*, *216*, 637–644. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.004>
- Guo, L., Wu, G., Li, C., Liu, W., Yu, X., Cheng, D., & Jiang, G. (2015). Vermicomposting with maize increases agricultural benefits by 304 %. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(3), 1149–1155. <http://doi.org/10.1007/s13593-015-0307-0>
- Hoyos, J. L., Vargas, C. A., & Velasco, R. J. (2010). Evaluación de compost obtenido en pila móvil empleando mezclas de gallinaza de jaula con material celulósico. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, *8*(1), 54 – 60.
- ICONTEC. NTC 5167: Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizante y enmiendas o acondicionadores de suelo., Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) 1–51 (2011).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelo*. Bogota.
- Juárez Uribe, R. A. (2010). *Reciclaje de lodos residuales de la industria del papel mediante lombricultura utilizando la especie "Lombriz roja californiana" Eisenia foética*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1658>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La Materia Orgánica, Importancia y Experiencia de su uso en la Agricultura. *Idesia (Arica)*, *24*(1), 49–61. <http://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Lim, S. L., Lee, L. H., & Wu, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, *111*, 262–278. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083>
- Madriñán Molina, R., Rodríguez Victoria, J. A., & Rueda Saa, G. (2012). Efecto de la aplicación de compost en algunas propiedades químicas de un suelo Typic haplustoll en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, *61*(5), 59–60.
- Martínez, Y., & Rivero, C. (2007). Effect of the paper sludge use on N, P, and K on two soils of agriculture importance at the Valencia lake basin. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, *30*(Especial), 1–11.
- Melo Henríquez, A. I. (2014). Generación de Residuos Sólidos en el Municipio de Galapa (Atlántico) y su Aprovechamiento como Forma de Minimizar la Problemática Ambiental. *Inge Cuc*, *10*(1), 89–96.
- Mosquera, B. (2010). Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos: Abonos orgánicos, protegen el suelo y garantizan alimentación sana. *Fondo Para La Protección Del Agua - FONAG*. Retrieved from www.fonag.org.ec
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor, Experiencias en América Latina*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Food & Agriculture Org. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/019/i3388s/i3388s.pdf>
- Silva-Leal, J. A., Bedoya, D. F., & Torres-Lozada, P. (2013). Evaluación del potencial de aplicación de biosólidos higienizados en el cultivo de rábano. *Acta Agronómica*, *62*(2), 155–164.
- Sosa Rodríguez, B. A., Sánchez De Prager, M., & Sanclemente Reyes, O. E. (2014). Influencia de abonos verdes sobre la dinámica de nitrógeno en un Typic Hapluster del Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, *63*(4), 343–351. <http://doi.org/10.15446/acag.v63n4.38528>

Suárez-Agudelo, A., & Calderón-Cuartas, P. A. (2015). Retos para la producción agropecuaria sustentable en Colombia. In *Alternativas sustentables de participación comunitaria para el cuidado del medio ambiente* (pp. 97–108). México.

1. Maestrante en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Costa. Colombia aromero17@cuc.edu.co
 2. Maestrante en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de la Costa. Colombia ing.erikasuarezagudelo@gmail.com
 3. Maestrante en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Costa. Colombia mmacias3@cuc.edu.co
 4. Maestrante en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Costa. Colombia ygomez6@cuc.edu.co
 5. Maestrante en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de la Costa. Colombia llozano2@cuc.edu.co
-

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 38 (Nº 28) Año 2017

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a webmaster]

©2017. revistaESPACIOS.com • Derechos Reservados