

## **SUPERFICIE DE RESPUESTA QUE PERMITE RELACIONAR CANTIDAD DE FÓSFORO EN ABONO ELABORADO A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS**

*CARMEN CAROLLA<sup>1</sup>, REBECA SÁNCHEZ<sup>2</sup>, EDIE MONTIEL<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Universidad Central de Venezuela. Facultad de Medicina. e-mail: vicarolla@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. e-mail: rebeaucv@gmail.com

<sup>3</sup> Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. e-mail: emontiel69@cantv.net

Recibido: julio 2015

Aprobado para publicación: noviembre 2016

### **RESUMEN**

La calidad del abono producido a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos, depende entre otros factores, del contenido de macro (N, K, Ca, S, P y Mg) y micro nutrientes (Cl, Fe, B, Mn, Na, Zn, Cu, Ni y Mo) en la forma química y cantidad necesaria para que puedan ser aprovechadas por los microorganismos del suelo y las plantas para su óptimo crecimiento. Verificar tal condición requiere determinar la combinación apropiada de constituyentes a ser procesados (mezcla inicial) para producir un abono con un contenido de los nutrientes de interés (respuesta) que sea óptimo y reproducible. En el presente estudio se propone elaborar una superficie de respuesta para un nutriente en particular, aplicando el diseño factorial fraccionado de Box-Behnken, utilizando los factores identificados y rangos de variación obtenidos en ensayos preliminares: cantidades agregadas de desechos generados en el campus UCV (D), aserrín (C) y humedad agregada (A), así como el periodo de aireación (B). La respuesta seleccionada como indicador de aporte de nutriente fue el fósforo (P). Se preparó una muestra de 29 abonos diferentes, donde se combinaron los factores considerados de acuerdo al diseño mencionado. El modelo de superficie obtenido fue  $(y)^{1/2} = [\text{Fósforo-fosfato}]^{1/2} = 0,30 + 0,31 A^2$ . La coincidencia encontrada entre los valores de aporte máximo de fósforo calculado y los medidos en un abono preparado con las especificaciones dadas por el modelo desarrollado, confirman su utilidad en la determinación de las condiciones de mezcla inicial para preparar abono orgánico cuyo aporte de fósforo se puede predecir.

*Palabras clave:* desechos, compost, fósforo, superficie de respuesta

## **RESPONSE SURFACE THAT ALLOWS RELATING AMOUNT OF PHOSPHORUS IN A FERTILIZER PRODUCED FROM ORGANIC WASTE**

### **ABSTRACT**

The quality of the fertilizer produced from the organic fraction of solid waste depends, among other factors, on the content of macro (N, K, Ca, S, P and Mg) and micro nutrients (Cl, Fe, B, Mn, Na, Zn, Cu, Ni and Mo) in the chemical form and amount required to be processed by soil microorganisms and plants for their optimal growth. Verifying such conditions requires establishing the appropriate combination of constituents to be processed (initial mix) in order to produce a fertilizer with a content of nutrients of interest (response) that is optimal and reproducible. In this study we claim to elaborate a response surface for a particular nutrient, applying the fractional factorial design of Box-Behnken, using the identified factors and ranges of variation obtained in preliminary tests: aggregate quantities of waste generated in the UCV campus (D), sawdust (C) and added humidity (A), as well as the aeration period (B). The response selected as indicator of nutrient contribution was phosphorus (P). A sample of 29 different fertilizers was prepared, where the factors considered according to the afore mentioned design were combined. The surface model obtained was  $(y)^{1/2} = [\text{Phosphorus-phosphate}]^{1/2} = 0.30 + 0.31 A^2$ . The coincidence found between the values of maximum contribution of phosphorus calculated and those measured in a fertilizer prepared with the specifications given by the developed model, confirm its usefulness in determining the initial mixing conditions to prepare organic fertilizer whose contribution of phosphorus can be predicted.

*Key words:* Wastes, Compost, Phosphorus, Response Surface

## INTRODUCCIÓN

La fotosíntesis es una transformación fotoquímica importante para el crecimiento del tejido vegetal y es bien conocido que en ella el agua es un ingrediente fundamental, por lo que se pudiera decir que sin esta, aunque se disponga de luz natural o artificial, la fotosíntesis no se llevaría a cabo. Esto traería consecuencias importantes en la generación de alimentos para los seres vivos comprometiéndose su subsistencia cada vez más.

Además, el manejo inadecuado del recurso agua puede llevar a los seres vivos, especialmente al ser humano, a condiciones preocupantes de subsistencia. Los cambios en el clima parecen tener su origen en el hecho de que la población humana aumenta y, como consecuencia, también se eleva la demanda de recursos energéticos para satisfacer sus necesidades básicas, siendo estos una cantidad finita de la cual se debe beneficiar una población que cada día es mayor. De acuerdo a la información conocida, los recursos naturales tienen un tiempo determinado de vida, es decir, que pueden llegar a agotarse de seguir un ritmo incontrolado de su consumo y contaminación. Es preocupante para las generaciones futuras que los recursos estén disminuyendo, porque esto podría acarrear cambios sustancialmente crónicos en las condiciones futuras del planeta (Pernía y Fornés, 2008). Entonces, es crucial que se realicen las gestiones educativas, políticas y económicas para evitar el uso indiscriminado y la contaminación de los recursos.

En este orden de ideas, el consumo de los diferentes recursos energéticos está conduciendo a la generación de gases de efecto invernadero, a la acumulación de grandes cantidades de desechos que pudieran ser aprovechados, y a la contaminación de mares, lagos, ríos, con sus consecuencias negativas para la vida acuática y las poblaciones biológicas. En el presente es cada vez más urgente la necesidad de implementar sistemas para la recolección y segregación de fracciones de la basura, reciclables o compostables. Si esto se logra, se contribuiría al desarrollo sustentable de la sociedad (Mc Dougall, White, Franke y Hindle, 2004).

Las diversas actividades que han conducido al desarrollo económico de diferentes naciones han tenido, por un lado, excelentes consecuencias en lo que se refiere a diferentes avances científicos, tecnológicos y de innovación; pero también han ocasionado cambios que no parecen ser los más adecuados para preservar los recursos necesarios para el sustento de los seres vivientes presentes y para las futuras generaciones.

El creciente volumen de desechos y su complejidad asociada con la economía moderna está colocando en serio riesgo a los seres humanos y a los ecosistemas. Cada año, se recolecta un estimado de 11,2 mil millones de toneladas de desechos sólidos a nivel mundial. De ese total la fracción orgánica contribuye con alrededor del 5 % de las emisiones globales de los gases del efecto invernadero (UNEP, 2005). La solución, en primer lugar, es la minimización de la producción de desechos. La segunda opción, cuando los desechos no puedan ser evitados, es recuperar los materiales y la energía de los desechos, remanufacturarlos y reciclarlos para obtener nuevos productos. El reciclaje conduce al ahorro sustancial de los recursos. Por ejemplo, por cada tonelada de papel reciclado, se evita la tala de 17 árboles y se ahorra 50 % del agua empleada para la obtención de ese producto. Además, reciclar crea empleos; esta política ha generado doce millones de empleos en Brasil, China y Estados Unidos (UNEP, 2005).

En la actualidad, cada vez cobra mayor importancia la gestión integral de los desechos y residuos sólidos, debido, entre otras razones, a su interrelación con los diversos problemas ambientales que enfrenta la humanidad y sus consecuencias.

Entre las posibilidades de gestión se puede destacar el compostaje, el cual representa una alternativa agroambiental valiosa para resolver problemas de contaminación del entorno causados por la acumulación de desechos sólidos. A la vez, permite producir abonos orgánicos denominados compost, ricos en compuestos húmicos que, una vez incorporados al suelo, benefician sus características físicas, químicas y biológicas (Madrid, Quevedo y Andrade, 2000). Además, puede sustituir el uso excesivo de fertilizantes químicos de los cuales se conocen sus efectos adversos para la salud y el ambiente por ser compuestos que podrían ocasionar intoxicación a la fauna acuática y eutrofización de los lagos (Kreith, 1994).

Cuando son separados los desechos sólidos generados y se utilizan los desechos orgánicos biodegradables mediante el proceso de “compostaje”, los desechos sólidos se reducen en aproximadamente 50 %, por lo tanto, se puede decir que la cantidad de desechos sólidos a manejar para su disposición final sería menor (Tchobanoglous y Kreith, 2002). Reduciendo la cantidad de desechos sólidos a disponer finalmente, se contribuye a incrementar la vida útil del relleno sanitario (Kreith, 1994).

La elaboración de abono orgánico también conduce a disminuir costos de manejo de los desechos y mejora las condiciones sanitarias de las áreas donde se generan, lo que

puede disminuir el riesgo de enfermedades por proliferación de agentes patógenos.

Para caracterizar el producto final, el abono orgánico, se han aplicado métodos químicos, físicos y ensayos microbiológicos, utilizando criterios empíricos para su evaluación, los cuales desafortunadamente no han sido consistentes, además de que no resultan sencillos de aplicar, pues implican tiempo de ejecución y disponibilidad de recursos considerables (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

Para obtener las características del abono orgánico o compost, elaborado a partir de la biodegradación de los materiales orgánicos presentes en los residuos y desechos sólidos, se han establecido diversas determinaciones, entre las cuales se destacan el contenido nutricional, contenido orgánico, pH, textura, distribución del tamaño de las partículas, contenido de humedad, grado de estabilización o maduración, presencia de organismos patógenos, concentración de metales pesados, entre otros (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994). Algunas de estas características pueden garantizar el buen desarrollo del proceso de degradación, pero no necesariamente se logra un abono cuyo aporte de nutrientes y cualidades microbiológicas sean reproducibles.

Es importante que el producto final, el abono orgánico, contenga los macro y micronutrientes bajo la forma química y cantidad necesaria. Los macronutrientes deben estar presentes en su forma química más simple, en ambiente de humedad adecuada, con el fin de que sean aprovechados por los microorganismos y las plantas para su óptimo crecimiento. De ahí la importancia de que sea reproducible el aporte de nutrientes en el producto elaborado.

Lo anteriormente expuesto se realiza desde el punto de vista del manejo de los recursos y de los desechos generados por la población. Sin embargo, observando las necesidades de las plantas a las que beneficiará el abono que se pueda producir, se debe considerar que además del agua y la luz que utilizan para producir sus azúcares, las plantas necesitan nutrientes minerales que obtienen del suelo en forma de iones. Estos son absorbidos a través de las raíces junto con el agua en la que están disueltos (Hernández, 2002).

La concentración de estos nutrientes esenciales varía mucho en distintos suelos y depende de las propiedades de la roca madre, la capacidad de retención del agua del suelo, el clima, el relieve, los seres vivos que lo habitan y la edad del suelo. Los nutrientes esenciales son las sustancias imprescindibles para que un organismo complete su ciclo de vida. Los macronutrientes que constituyen del 0,5

a 6 % de la materia seca son N, K, Ca, S, P y Mg. Los micronutrientes presentes en proporciones muy bajas en la materia seca son Cl, Fe, B, Mn, Na, Zn, Cu, Ni y Mo (Curtis, Barnes, Schnek y Massarini, 2007).

En el presente caso, se estudió el fósforo, el cual es tomado por las plantas casi exclusivamente como iones fosfato diácido ( $H_2PO_4^-$ ), ya que este es absorbido más fácilmente que el fosfato monoácido ( $HPO_4^{2-}$ ). El pH del suelo controla la abundancia relativa de esas dos formas iónicas del fósforo. Si el pH es muy alcalino, la forma predominante es el fosfato ( $PO_4^{3-}$ ), la cual no es absorbible por las plantas. El papel central del fósforo es la transferencia de energía. Se acumula principalmente en las regiones de los tejidos embrionarios, (células meristemáticas) que se multiplican activamente para formar tejidos adultos diferenciados y, a su vez, originan nuevas células meristemáticas, del tallo y raíces.

El fósforo es un nutriente esencial para vegetales y animales, debido a que forma parte de las moléculas de ADN que llevan la información genética; de las moléculas de ATP y ADP que almacenan energía química para el uso de los organismos en respiración celular; de ciertas grasas de las membranas que envuelven las células animales y vegetales; y de los huesos y dientes de los animales.

La deficiencia de fósforo se parece mucho a la del nitrógeno, y se caracteriza por producir un retardo en el crecimiento: las raíces se desarrollan poco y se produce enanismo en hojas y tallos. La proporción aproximada en las plantas oscila entre 0,05-1 % del peso seco, y depende del estado nutricional de la planta, de la especie, estación y tejido muestreado (Hernández, 2002).

En consecuencia, si el fósforo es uno de los elementos químicos importantes para el desarrollo de los seres vivos y si las plantas requieren de este elemento para cumplir con su ciclo vital, este nutriente debe estar presente en los suelos, en cantidad y forma química adecuada.

En el caso del fósforo se debe tener en consideración los alimentos que lo proporcionan con cierta abundancia. Según la Tabla de Composición de Alimentos de 2001, los alimentos de consumo frecuente en Venezuela con mayor contenido de fósforo son los lácteos (queso parmesano, leche en polvo completa enriquecida), soya en forma de harina desgrasada y en grano entero, embutidos, yema de huevo de gallina y la parte sólida de sardinas enlatadas (INN, 2001). El fósforo también se encuentra en aditivos usados en el procesamiento de los alimentos, como en las bebidas carbonatadas, y en los medicamentos, en forma

de sal de fosfato; estos generalmente no son incluidos en las bases de datos de alimentos, por lo que hay una subestimación (Macías-Tomei, Palacios, Mariño, Carías, Noguera y Chavez, 2013).

Esta información es necesaria para evaluar la posibilidad de incluir los desechos, generados luego de consumir estos alimentos, en la mezcla de elaboración del abono.

Ahora bien, parte de la realidad que se experimenta en la Universidad Central de Venezuela es la de tratar de gestionar satisfactoriamente los desechos sólidos que allí se generan. Entre las opciones universalmente aceptadas para minimizar las condiciones sanitarias que desfavorecen el entorno, se encuentra la separación de los desechos de naturaleza orgánica para la preparación de abono. Sin embargo, no se dispone de una metodología estandarizada (al menos en Venezuela) que permita elaborar abono, a partir de la fracción orgánica de los desechos sólidos, con calidad nutricional reproducible para su utilización.

Por otro lado, la legislación venezolana permite que la materia orgánica pueda ser reciclada para elaborar abono (Ley de Gestión Integral de la Basura, 2010). No obstante, los criterios para definir la calidad del abono que se pueda elaborar a nivel nacional no están establecidos en ella. Si se pudieran definir algunos criterios de calidad para la utilización y posible comercialización del abono se contribuiría con la sistematización de la producción de abono orgánico obtenido a partir de los desechos orgánicos generados en la preparación de alimentos.

Lo expuesto conduce a proponer una metodología que permita determinar la combinación apropiada de los factores o variables independientes (mezcla inicial), de forma tal que lleve a la obtención de abono orgánico cuyo aporte de nutriente o variable dependiente (respuesta) sea reproducible.

Esta metodología consiste en la utilización del diseño multifactorial, herramienta estadística mediante la cual se determina la influencia que pueden tener los factores (variables independientes) sobre las respuestas, llamadas variables dependientes. Ello permite proporcionar un diseño estadístico multifactorial que puede estimar la combinación inicial apropiada de los factores escogidos en el proceso de compostaje para obtener abono orgánico cuyo aporte de nutrientes sea óptimo y reproducible. Este diseño conforma una ecuación matemática que determinaría la influencia que pueden tener los factores (variables independientes) sobre la respuesta o variable dependiente, es decir, la atribución o capacidad que pudieran tener los desechos mezclados

inicialmente sobre la obtención de una cantidad de fósforo. Además, de la ecuación matemática se puede obtener un gráfico o superficie de respuesta. Esta última relaciona el aporte de nutriente (fósforo) del abono en función de las condiciones de mezcla inicial o variables independientes. Así mismo, una vez obtenida la función matemática que pudiera relacionar la variable dependiente (fósforo) con una o más variables independientes (factores) y su gráfico respectivo, se pueden seleccionar los factores o mezcla inicial adecuada para lograr un producto cuyo aporte de nutrientes sea reproducible.

En este sentido, resulta útil desarrollar un modelo de superficie de respuesta como herramienta que facilite la operación y elaboración de abono con calidad de nutrientes (nitrógeno) adecuada y reproducible para su uso.

Se tiene que la metodología de superficie de respuesta (MSR) consiste en un grupo de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para el modelado y análisis en aplicaciones, donde la respuesta de interés está influenciada por varias variables y donde el objetivo generalmente es el de optimizar (maximizar, minimizar u obtener un punto de silla) esa respuesta (Chacín, 2000).

Una modalidad del diseño experimental para generar superficies de respuestas se conoce como diseño de Box-Behnken. A continuación se describe en qué consiste el método mencionado.

Si se tienen cuatro factores o variables independientes a considerar, entonces se puede crear un diseño en bloques incompletos balanceados de cuatro factores (variables independientes), obteniéndose seis bloques ( $C_4^2 = 6$ ) al combinar los tratamientos. A cada combinación se le denomina bloque incompleto y el conjunto se denomina diseño factorial de bloques incompletos (DFBI). En este caso se obtendrán seis bloques. Si los dos tratamientos por bloques se identifican con la letra X, el diseño experimental quedaría de la siguiente forma (Box y Behnken, 1960):

Bloques	Factores			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	X	X		
2			X	X
3	X			X
4		X	X	
5		X		X
6	X		X	

Ahora se combinará el precedente DFBI con un diseño factorial ( $2^k = 2^2 = 4$ ) para cada par de variables independientes o factores, que se coloca a continuación:

$X_i$	$X_j$
-1	-1
1	-1
-1	1
1	1

Posteriormente, esta última información correspondiente para cada par de factores  $X$ , se sustituye para cada uno de los bloques señalados. La combinación se hace de la siguiente manera: cada fila o bloque identificado con la  $X$  se reemplaza con la matriz de diseño colocada anteriormente. Se agregan ceros cuando no exista  $X$  en las casillas de los diferentes bloques. En el diseño se incrementa el número de tratamientos, debido a la adición de puntos centrales (0, 0, 0), que corresponden al nivel cero o central. El diseño de tres niveles (-1, 0, 1) resultante de Box-Behnken para cuatro factores, consiste de 27 puntos producto de esta superposición.

Los niveles indicados (-1, 0, 1) están codificados, ya que cada valor representa un nivel particular del factor considerado el más bajo (-1), el más alto (1) y el central (0). En el desarrollo de la presente investigación se codifican los niveles de los factores para facilitar el manejo de las funciones matemáticas. Sin embargo, para obtener los valores originales se pueden descodificar posteriormente (Khuri y Cornell, 1996).

La codificación de los niveles correspondientes a cada factor o variable independiente medida, se realizó de la siguiente manera:

FACTOR CONSIDERADO		CODIFICACIÓN	
		UNIDAD DE MEDIDA	NIVELES = UNIDAD MEDIDA
$X_1 = A =$	Humedad	1 Taza (250 mL)	-1 = 0 0 = 1 1 = 2
$X_2 = B =$	Aireación	Días	-1 = 2 0 = 5 1 = 8
$X_3 = C =$	Aserrín	kg	-1 = 0,5 0 = 1,0 1 = 1,5
$X_4 = D =$	Desechos	kg	-1 = 1 0 = 2 1 = 3

Por otro lado, se debe dejar claro que no está dentro de los alcances de este trabajo asegurar si las condiciones proporcionadas por el modelo de superficie de respuesta, en cuanto a mezcla inicial y la cantidad de fósforo obtenido en el abono, son suficientes para satisfacer los requerimientos nutricionales de los diferentes cultivos o plantas.

## METODOLOGÍA

A fin de cumplir con las condiciones de una investigación de campo de tipo experimental, se consideraron varias fases en el estudio. Estas últimas se estructuraron de la siguiente forma:

La fase N° 1 consistió en un estudio preliminar, donde se elaboró abono orgánico para escoger los factores o variables independientes a ser controladas y medir su efecto sobre el aporte de fósforo. Los factores escogidos fueron cantidad de desechos orgánicos en kg, cantidad de aserrín en kg, periodo de aireación medido en días y cantidad de agua agregada al inicio del proceso de degradación indicada como humedad agregada y medida en tazas (taza = 250 mL).

La fase N° 2 se caracterizó por la determinación de la influencia de los factores en la respuesta de los diferentes abonos elaborados, de acuerdo a la matriz de diseño estadístico multifactorial que se explicó en la parte introductoria. Se realizó la mezcla inicial rigurosamente y siguiendo el orden aleatorio de la matriz de diseño de la cantidad de desechos orgánicos (D), la cantidad de aserrín (C), el periodo de aireación (B) y la humedad agregada (A) para obtener los diferentes abonos orgánicos. Se determinó la concentración de fósforo en su forma de fosfato ( $PO_4^{3-}$ ). Se procedió de acuerdo a lo que reseña el Programa de la Comisión Europea, el Community Bureau of Reference, donde se indica que debe hacerse una extracción acuosa al sólido seco, con ácido acético 0.11 N, durante 16 horas. Esta fracción acuosa corresponde a la fracción intercambiable, donde se encuentran disueltas las sustancias que pueden ser absorbidas por los microorganismos y las plantas (Quevauviller, Ure, Muntau y Griepink, 1993; Ure, Quevauviller, Muntau y Griepink, 1993; y Quevauviller, Palacios, Mariño, Carías, Noguera y Chavez, 1994).

Se realizaron determinaciones de fósforo al extracto acuoso, empleando el método del ácido ascórbico (APHA, WEF, AWWA, 1998).

El equipo empleado para medir la absorbancia tenía las siguientes especificaciones: Spectronic 20, a una longitud de onda de 880 nm, filtro entre (650-990) nm. Spectronic Instruments.

La fase N° 3 consistió en el desarrollo del modelo, es decir, teniendo los valores de los factores (variables independientes) y las respuestas (variable dependiente = fósforo) se elaboró la superficie de respuesta. Para ello se aplicó la metodología de regresión lineal múltiple, donde se estiman los parámetros por mínimos cuadrados. Posteriormente, se realizó el análisis de varianza para la respuesta, lo que llevó a la obtención del estadístico de prueba F y se comparó con el valor de F tabulado para los grados de libertad de cada factor y los del residual. Se tomó como nivel de significación 0,05. En el caso en que el valor de F calculado resultaba mayor que el valor de F tabulado, se concluyó que el factor considerado influye significativamente sobre la respuesta medida. Además, se determinó la probabilidad de que el valor de F calculado sea mayor que el valor de F tabulado y aquella obtenida por debajo de 0,05 coincide con la conclusión anterior (Steel y Torrie, 1990).

Posteriormente se optimizó el modelo, empleando un método interactivo, que se desarrolló con ayuda del software Statgraphics Plus para obtener el valor máximo posible correspondiente a la respuesta (fósforo) y los factores correspondientes.

Para hacer las estimaciones y probar la bondad del modelo se utilizó el software JMP ver 5.0.1; Systat ver 11; Statgraphics Plus ver 5.1.

La fase N° 4 llevó a la aplicación de la superficie de respuesta como modelo para elaborar abono orgánico. Se realizó la mezcla inicial de desechos (factores), conociendo la optimización previa para obtener la cantidad de fósforo máxima que indicaba el modelo. De esta manera se verificó la concordancia o no de lo que se infiere con ayuda de la superficie de respuesta y lo obtenido experimentalmente, dentro del intervalo de confianza.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La determinación de la cantidad de fósforo condujo a valores entre 0,00 y 0,87 mg/g abono base seca, es decir, estos resultados están por debajo del 1 %. Por lo tanto, estos valores indicadores de la calidad nutricional del abono obtenido se consideran bajos. Se esperaba que estuviesen entre 1 y 2 %, ya que es el intervalo que en general se consigue para el abono orgánico. Esto, de acuerdo a la bibliografía consultada (Carrión, Sio, Salcines y Rodríguez, 2003; y Trejo, 1996).

Para la variable fósforo se transformaron los datos obtenidos a su raíz cuadrada. De esta forma, los datos

cumplen los supuestos esperados, es decir, presentaron una distribución normal y varianza constante. Se realizó el análisis de regresión lineal múltiple empleando el software adecuado para obtener la ecuación matemática asociada a la superficie de respuesta para el macronutriente estudiado. En la Figura 1 la línea recta representa la ecuación obtenida para la variable dependiente,  $(\text{Fósforo-fosfato})^{1/2}$  y los puntos representan los resultados obtenidos experimentalmente.

En esta figura se observa que el modelo correspondiente al fósforo no se ajusta apreciablemente a los datos debido a la alta variabilidad de este factor.

Posteriormente al análisis de residuales observado en la Figura 1, se realizó el análisis de varianza para la variable dependiente (fósforo) con el fin de encontrar la función matemática que expresara la dependencia de la respuesta con respecto a todos o algunos de los factores escogidos.

El análisis de varianza para la variable dependiente  $(\text{fósforo-fosfato})^{1/2}$ , solo depende del factor A<sup>2</sup> (humedad<sup>2</sup>), es decir, este es el único factor que ejerce efecto significativo sobre la cantidad de fósforo del abono que se elaboró (Tabla 1).

Se llega a este resultado debido a que la probabilidad obtenida para este factor es menor que la probabilidad significativa esperada,  $P < 0,05$ .

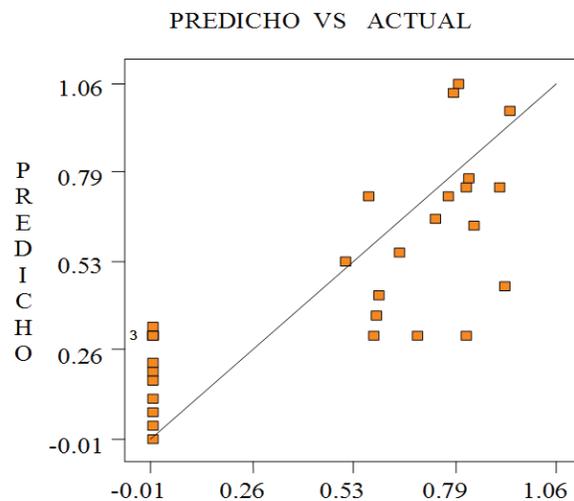


Figura 1. Comparación modelo de superficie de respuesta y los valores obtenidos experimentalmente para  $[\text{Fósforo-fosfato}]^{1/2}$  del abono elaborado

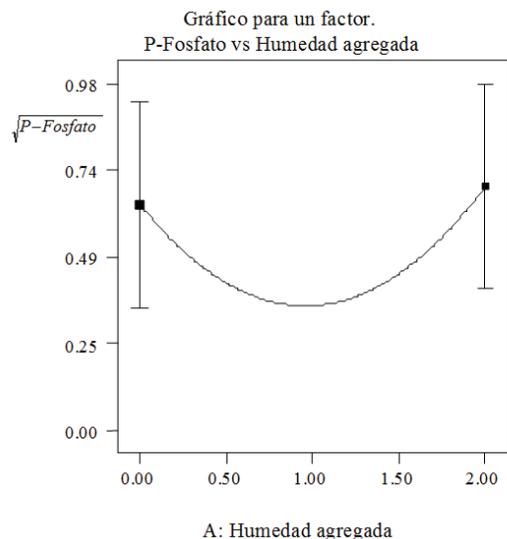
**Tabla 1.** Análisis de varianza para [Fósforo-fosfato]<sup>1/2</sup> encontrado en abono

Fuente Variación	Suma Cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio	Valor F	Probabilidad Obtenida
Modelo	2.48	14	0.18	1.59	0.1968
A (Hum. Agr.)	1.119 x 10 <sup>-5</sup>	1	1.119 x 10 <sup>-5</sup>	1.006 x 10 <sup>-4</sup>	0.9921
B (Aireación)	0.29	1	0.29	2.59	0.1298
C (Aserrín)	0.042	1	0.042	0.38	0.5487
D (Desechos)	0.021	1	0.021	0.19	0.6721
A2	0.63	1	0.63	5.68	0.0319
B2	0.49	1	0.49	4.40	0.0545
C2	0.025	1	0.025	0.23	0.6404
D2	0.14	1	0.14	1.22	0.2879AB
AB	8.549 x 10 <sup>-4</sup>		8.549 x 10 <sup>-4</sup>	7.686 x 10 <sup>-4</sup>	0.9314
AC	0.10	1	0.10	0.94	0.3494
AD	0.17	1	0.17	1.52	0.2374
BC	0.25	1	0.25	2.23	0.1577
BD	0.17	1	0.17	1.49	0.2420
CD	0.000	1	0.00	0.00	1
Residual	1.56	14	0.11		
Falta de ajuste	0.86	10	0.86	0.50	0.8298
Error puro	0.69	4	0.17		

El modelo que describe la dependencia del macronutriente estudiado con respecto a la humedad se muestra en la Figura 2. La ecuación matemática que representa el modelo correspondiente a la respuesta [Fósforo-fosfato]<sup>1/2</sup>, el macronutriente estudiado, queda de la siguiente manera:

$$(y)^{1/2} = [\text{Fósforo-fosfato}]^{1/2} = 0,30 + 0,31 A^2 \quad (1)$$

Como se puede notar de la ecuación obtenida, la respuesta solo depende del factor A, es decir, de la humedad agregada, de acuerdo a las condiciones establecidas en este caso.



*Figura 2. Comportamiento de [P-fosfato]<sup>1/2</sup> para el compost en función de la humedad agregada. Desechos = 2,60 kg; Aserrín = 1,05 kg; aireación = 8,00 días*

Se realizó el análisis de la ecuación correspondiente para la respuesta, empleando el software Statgraphics Plus y el Matlab 7.0.4. Con la ayuda de ellos se logra obtener los valores de los factores que permiten obtener el máximo valor para la concentración de fósforo-fosfato. Al mismo tiempo se determinó el intervalo de confianza. Los valores encontrados para los factores son los siguientes:

A: Humedad agregada (Tazas) = 2,00; B: AIREACIÓN (Días) = 8,00; C: ASERRÍN (kg) = 1,05; D: DESECHOS (kg) = 2,60

La respuesta fue

$y = P-PO_4^{3-}$  (mg P/g abono) = 0,0913072 con su intervalo de confianza entre - 0,48 y 1,09 reportados como raíz cuadrada.

La probabilidad de que cada respuesta se encuentre dentro de un rango estimado es de 95 %. A este rango se le denomina intervalo de confianza, en el cual se espera encontrar el valor de cada parámetro.

Para comprobar si el modelo de superficie de respuesta obtenido permite predecir los valores de las respuestas en el abono orgánico que se produce, se elaboró un nuevo abono, esperando obtener los valores máximos (óptimos) para las respuestas analizadas. Los valores obtenidos para la respuesta medida están dentro del intervalo de confianza, por lo que se puede decir que el modelo permite, bajo

las condiciones establecidas, predecir los valores de las respuestas analizadas.

## CONCLUSIONES

El diseño factorial de Box-Behnken permitió la preparación de diferentes abonos orgánicos, a los cuales se les determinó la concentración de fósforo (respuesta).

Estos resultados, en conjunto con los factores, permitieron elaborar el modelo de superficie. La ecuación que permite establecer la relación en forma significativa entre las condiciones de mezcla inicial (factores) considerados y el aporte de nutriente (respuesta) es la siguiente:

$$(y)^{1/2} = [\text{Fósforo-fosfato}]^{1/2} = 0,30 + 0,31 A^2 \quad (1)$$

De acuerdo a la ecuación obtenida se tiene que el fósforo presente depende solo de la cantidad de agua agregada (A) en la mezcla inicial.

La metodología desarrollada para optimizar la superficie de respuesta llevó a la localización del punto estacionario, el cual representa el punto máximo, es decir, el valor del o los factores considerados para los cuales se produce el aporte de nutriente máximo. En la fase de aplicación del modelo se preparó abono orgánico a partir de las especificaciones obtenidas, y se encontró coincidencia entre los valores dados por el modelo y la determinación realizada experimentalmente para el aporte de nutriente máximo (respuesta máxima).

Se puede decir que el modelo permite establecer las condiciones óptimas para preparar abono orgánico a partir de los desechos provenientes del comedor universitario de la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC), cuyo aporte de fósforo es reproducible.

## RECOMENDACIONES

Para incrementar la diversidad de macronutrientes y su concentración se recomienda incorporar otros desechos orgánicos al proceso de compostaje. Se puede agregar desechos orgánicos de otros tipos de vegetales comestibles principalmente aquellos que sean ricos en fósforo, además de los desechos de la poda de las áreas verdes de la CUC. Esta adición de desechos llevaría a un tamaño mayor para las pilas de compostaje lo que pudiera contribuir con la variación esperada de la temperatura, puesto que se asegura la presencia de los diferentes microorganismos (mesófilos y termófilos) que degradan la materia orgánica.

Se recomienda determinar la cantidad de fósforo en el abono producido bajo la forma de otros iones y así observar el aporte total de fósforo disponible para la nutrición de la planta. Además, se sugiere continuar los estudios sobre el fósforo, ya que fue una respuesta que no presentó un ajuste satisfactorio al modelo estadístico a pesar de la transformación aplicada.

Por otro lado, se recomienda estudiar la presencia de las poblaciones de microorganismos durante el proceso de degradación de los desechos que darán origen al abono orgánico. Probablemente, conociendo las condiciones en las cuales se desarrollan estas poblaciones durante el proceso aerobio, pudieran ser optimizadas y en conjunto con otros parámetros contribuir en la obtención del mejor proceso para preparar un abono cuyo aporte de nutrientes sea reproducible. En el mismo orden de ideas, se pudieran conocer las condiciones que favorecen el proceso de degradación de los desechos en forma anaerobia y, por consiguiente, de acuerdo al interés evitarlas.

A pesar de que altas temperaturas se deberían producir en el proceso de degradación de los desechos como forma de controlar la ausencia de patógenos, se puede realizar análisis microbiológico para determinar la presencia de agentes patógenos que puedan ser nocivos a la planta y a las personas que manipulan el producto o la mezcla en degradación. Esto para tomar los correctivos que sean necesarios.

Se pudiera evaluar, en futuros trabajos de investigación, el aporte de nutrientes u otras características del abono orgánico producido con el modelo de superficie obtenido, sobre las plantas en algunos cultivos.

Finalmente, este modelo de superficie pudiera ser incorporado en la política de gestión de los desechos sólidos de la Universidad Central de Venezuela. La toma de decisiones quedaría en manos de las autoridades universitarias para acondicionar un área y proporcionar el personal necesario para lograr la aplicación de esta metodología.

## REFERENCIAS

APHA, WEF, AWWA (American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation). (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington: Autor.

- BOX, G.E.P. y BEHNKEN, D.W. (1960). Some New Three-Level Designs for to Study of Quantitative Variables. *Technometrics*, 2, 455-475.
- CARRIÓN M., SIO M., SALCINES A. y RODRIGUEZ A. (2003). *Manual de organopónicos y huertos intensivos*. Caracas: Alcaldía del Municipio Libertador.
- CHACÍN L.F. (2000). *Diseño y análisis de experimentos para generar superficies de respuesta*. Maracay: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía.
- CURTIS H., BARNES S., SCHNEK A. y MASSARINI A. (2007). El transporte en las plantas. En *Biología*. Editorial Médica Panamericana. s/p. Recuperado de <http://www.curtisbiologia.com/node/1739>
- HERNÁNDEZ R. (2002). Nutrición Mineral de las plantas. En *Botánica on Line*. Mérida: Universidad de Los Andes. Recuperado de <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral>
- INN (Instituto Nacional de Nutrición. División de Investigaciones en Alimentos). (2001). *Tabla de composición de alimentos para uso práctico*. Serie de Cuadernos Azules, N° 54. Caracas: Autor
- KHURI A.I. y CORNELL J.A. (1966). *Response Surface*. USA: Marcel Dexker.
- KREITH, F. (1994). *Handbook of Solid Waste Management*. USA: McGraw-Hill.
- Ley de Gestión Integral de la Basura. (2010, diciembre 30). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, 6.017, Diciembre, 30, 2010.
- MACÍAS-TOMEI C., PALACIOS C., MARIÑO M., CARIÁS D., NOGUERA D. y CHÁVEZ J. (2013). Valores de referencia de calcio, vitamina D, fósforo, magnesio y flúor para la población venezolana. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición. Órgano Oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición*, 63, 362-378.
- MADRID, C., QUEVEDO, V. y ANDRADE, E. (2000). Estudio de la biotransformación aeróbica de los desechos lignocelulósicos pergamino de café (*Coffea arabica* L.) y tallos de pasto guinea (*Panicum maximum*). *Revista Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 17, 505-517.
- MC DOUGALL F.; WHITE P.; FRANKE M. y HINDLE P. (2004). *Gestión integral de residuos sólidos: inventario de ciclo de vida*. Caracas: Epsilon Libros.
- PERNÍA J.M. y FORNÉS J.M. (2008) Cambio climático y agua subterránea, visión para los próximos decenios. España: Edipack Gráfico.
- QUEVAUVILLER P.H., RAURET G., MUNTAU H., URE A.M., RUBIO R., LÓPEZ-SÁNCHEZ J.F., FIEDLER H.D. y GRIEPINK B. (1994). Evaluation of a Sequential Extraction Procedure for the Determination of Extractable Trace Metal Contents in Sediments. *Fresenius Journal Analysis Chemical*, 349: 808-814.
- QUEVAUVILLER P.H., URE A., MUNTAU H. y GRIEPINK B. (1993). Improvement of Analytical Measurements within the BCR-Programme: Single and Sequential Extraction Procedures Applied to Soil and Sediment Analysis. *International Journal Environment Analysis Chemical*, 51, 129-134.
- STEEL R. y TORRIE J. (1990). *Bioestadística: principios y procedimientos*. México: McGraw-Hill.
- TCHOBANOGLIOUS, G. y KREITH, F. (2002). *HandBook of Solid Waste Management*. Nueva York: McGraw Hill.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN H. y VIGIL S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. España: McGraw Hill / Interamericana de España.
- TREJO R. (1996). *Procesamiento de la basura urbana*. España: Trillas.
- UNEP (United Nations Environment Programme), (2005). Solid Waste Management. Recuperado de <http://www.unep.org/resourceefficiency/Policy/ResourceEfficientCities/FocusAreas/SolidWasteManagement/tabid/101668/Default.aspx>
- URE A., QUEVAUVILLER P.H., MUNTAU H. y GRIEPINK B. (1993). Speciation of Heavy Metals in Soils and Sediments. An Account of the Improvement and Harmonization of Extraction Techniques Undertaken Under the Auspices of the Community Bureau of Reference (BCR) of the Commission of the European Communities. *International Journal of Environment Analytical Chemical*, 51, 135.-151.

