

GENERACIÓN DE MEZCLAS DE SUSTRATOS MEDIANTE UN PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN UTILIZANDO VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Substrates Derived from Simple Materials by Means of an Optimization Program by Using Physical and Chemical Variables

Cruz Crespo Elia^{1‡}, Sandoval Villa Manuel^{1†}, Volke Haller Víctor¹, Ordaz Chaparro Víctor¹, Tirado Torres Juan Luis¹ y Sánchez Escudero Julio¹

RESUMEN

Los sustratos para la producción de cultivos deben de cumplir con ciertos requerimientos en propiedades físicas y químicas. Para tener las propiedades idóneas en éstos se ha recurrido a la mezcla de materiales, inorgánicos u orgánicos, procedimiento que se ha llevado a cabo con base en el acierto y error, lo cual consume tiempo y recursos. El objetivo del presente trabajo fue generar mezclas de materiales para sustratos de menor costo mediante un programa de optimización con SAS. Se tomaron en cuenta rangos de valores que fueron establecidos como adecuados, esto con base en la caracterización de los materiales en laboratorio y a lo reportado en literatura: espacio poroso total (EPT, > 58%), capacidad de aireación (CA, 10-30%) y contenido de materia orgánica (MO, 5-19%). Para probar el programa se utilizaron tezontle (TE) y 3 vermicompost (VC1, VC2 y VC2) así el programa generó combinaciones de distintas proporciones considerando que fueran de bajo costo y que cumplieran con los valores determinados de las propiedades físicas y químicas. De estas combinaciones se seleccionaron las mezclas con las proporciones 65:35, 75:25 y 85:15 (porcentaje de tezontle y vermicompost), para los 3 vermicompost, las cuales se caracterizaron en laboratorio para EPT, CA y MO y, los resultados obtenidos se compararon contra los obtenidos por el programa con SAS. De esto se encontró: para EPT, diferencias menores del 8% para 3 mezclas; para CA, no se detectaron diferencias; para MO, hubo diferencia del 43% para una mezcla y de 18% para 3 mezclas,

con valores mayores para el programa. No obstante, las diferencias se consideraron tolerables y justificables. Se concluyó que el programa de optimización con SAS constituye una opción aceptable para generar mezclas de sustratos.

Palabras clave: espacio poroso total, vermicompost, SAS.

SUMMARY

In the search of the best physical and chemical properties of substrates used to grow crops, researchers usually mix simple materials. This procedure is carried out based on the success and failure, which is time consuming and expensive. The objective of this study was to generate new substrates based on low cost simple materials considering the optimal ranges for total porous space (TPS, > 85%), aeration capacity (AC, 10-30%) and organic matter content (OM, 5-19%) through a program of optimization by using the Statistical Analysis System (SAS). The materials utilized as substrate were red volcano porous gravel locally named "tezontle" and 3 vermicompost (VC1, VC2 y VC2), generating combinations of different proportions between the tezontle and each one of the 3 vermicompost. The chosen combinations were those of lower cost and those that met the optimal range values of the physical and chemical properties. The selected mixtures were those with the proportion 65:35 (% , tezontle and vermicompost), 75:25, and 85:15 for each vermicompost, which were characterized in the laboratory for TPS, AC, and OM. The obtained values were compared to the ones derived from the program. Found differences did not show any trend and were for TPS, lower than 5%, except for 2 mixtures with 7 and 9%; values for AC, lower than 10%, except for 2 mixtures with values of 14 and 16%; and for OM, lower than 20% for 5 mixtures and higher than 20% (22 to 75%) for 4 samples. It was concluded that

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

[‡] Autor responsable (ccruz@colpos.mx)

[†] Autor para correspondencia (msandoval@colpos.mx)

SAS optimization program constitutes an acceptable option for generating of mixtures of substrates.

Index words: *total porous space, tezontle, vermicompost.*

INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en la investigación de sustratos para el crecimiento de plantas consiste en buscar nuevos materiales o mezclas en los que, además de proporcionar mejores condiciones de crecimiento, se considere la disminución del impacto ambiental, en aspectos como reducir el uso de fertilizantes y pesticidas, así como disminuir los costos (Riviére y Caron, 2001). Al respecto, el vermicompost es un material que se ha convertido en una opción como sustrato para el cultivo de plantas, gracias a las características que ésta confiere al medio de crecimiento y por el aporte de nutrimentos, además de que su utilización favorece la disminución del deterioro del medio ambiente al aprovechar los diversos desechos agropecuarios (Sánchez-Hernández *et al.*, 2006). Sin embargo, un material por si solo es difícil que cumpla con las mejores condiciones físicas y químicas para el desarrollo de las plantas, por lo que es necesario hacer mezclas de materiales con diferentes propiedades físicas y químicas, lo cual se aprovecha en la elaboración de un nuevo sustrato para obtener mejores condiciones de crecimiento (Nelson, 1999; Burés 1997; Strojny y Nowak, 2001). Al respecto, Verdonck *et al.* (1983) y Moreno-Álvarez (2002) mencionan que la mezcla de la mayoría de los materiales inertes con materiales orgánicos juega un papel importante en la obtención de buenas propiedades físicas y químicas, dado que la materia orgánica es un componente activo y su incorporación en el sustrato inorgánico mejora el espacio poroso, incrementa la retención de humedad y capacidad de intercambio catiónico. Por otra parte, en diversos estudios se señala que en los sustratos, las propiedades físicas son más relevantes que las químicas, debido a que estas últimas son difíciles de corregir después de establecer el cultivo, por lo que desde el inicio deben ser las más apropiadas posibles (Caron y Nkongolo, 1999). Asimismo, para cumplir con el suministro de agua y aire, los sustratos deben poseer una elevada porosidad (más del 85%) y capacidad de retención de agua, aunado a un drenaje rápido y una buena aireación (entre 10 y 30%) (Ansorena, 1994). Un elemento importante a considerar cuando se utilizan materiales orgánicos

es su contenido de materia orgánica, ya que la biodegradabilidad de ésta afecta las propiedades del sustrato, principalmente las físicas, dado que constituye la mayor parte de la fase sólida (Lemaire *et al.*, 1998).

En general, la obtención de mezclas de sustratos para el cultivo de plantas que cumplan con las características buscadas se ha llevado a cabo mediante acierto y error, lo cual ha implicado mayor tiempo y gastos de recursos. Sin embargo, en esta actividad se han logrado avances mediante la utilización de técnicas como la programación lineal (Burés *et al.*, 1988; Zamora-Morales *et al.*, 2005). No obstante, la comprensión y desarrollo de los aspectos teóricos y de cómputo de esta metodología, han limitado su uso en el ámbito agrícola, debido a que se requiere el conocimiento de los conceptos y de las técnicas fundamentales de varios temas matemáticos, tales como matrices y determinantes, vectores y espacios vectoriales, conjuntos convexos, desigualdades lineales, solución a ecuaciones lineales simultáneas, entre otros (Gass, 1969). Al respecto, la opción para llevar a cabo el cálculo de mezclas de materiales puede ser a través de la utilización de otros programas más simples que la programación lineal, como el programa SAS, el cual permite obtener las mismas mezclas (Statistical Analysis System) (SAS, 1982).

Con base en lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo la formulación de mezclas de sustratos de mínimo costo, a través de un programa de optimización con SAS, para lo cual se consideraron las propiedades físicas (espacio poroso total y capacidad de aireación) y químicas (materia orgánica) de un material inorgánico (tezontle) y materiales orgánicos (3 vermicompost), además del costo de éstos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados fueron el material inorgánico tezontle (TE) y 3 materiales orgánicos correspondientes a 3 vermicompost: una de estiércol bovino más desechos vegetales en proporción 50:50 (VC1), otra de estiércol bovino (VC2) y la de estiércol bovino y pulpa de café en proporción 50:50 (VC3). Todos los materiales fueron tamizados y se empleó un tamaño de partícula entre 2 y 10 mm de diámetro para TE y para vermicompost de 0.5 a 5 mm.

A estos materiales se les determinó sus propiedades físicas tales como: espacio poroso total (EPT, %) y capacidad de aireación (CA, %), y químicas: materia

orgánica (MO, %), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}), capacidad de intercambio catiónico (CIC, $\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$) y nitrógeno total (NT, g kg^{-1}). El EPT y CA se determinaron mediante la metodología de Landis (2000), para esto se utilizaron contenedores de 300 mL con perforaciones en la base, las cuales se taparon para evitar pérdida del material y agua, después se colocó la muestra, secada a medio ambiente, hasta la marca indicada para 300 mL (V1) sin compactar, enseguida se adicionó lentamente agua de la llave hasta cubrir la muestra y saturarla, la cantidad de agua agregada se denominó V2; posteriormente, se drenó el agua del recipiente, la cual se recogió y cuantificó (V3); así, el $\text{EPT}(\%) = (\text{V2}/\text{V1}) \times 100$ y la $\text{CA}(\%) = (\text{V3}/\text{V1}) \times 100$.

Para la MO las muestras de vermicompost se secaron a 105°C , hasta peso constante, se pesaron 5 g y se calcinó a 550°C por 3 h en una mufla (Aendekerk *et al.*, 2000); así, $\text{MO}(\%) = (\text{peso } 105^\circ\text{C} - \text{peso } 550^\circ\text{C}) / \text{peso } 105^\circ\text{C}$. El pH y la CE se obtuvieron con un medidor digital, marca Conductronic modelo PC18, para lo cual se utilizó agua destilada cuyo pH fue de 6.3. La CIC se determinó utilizando acetato de amonio y sodio (Aendekerk *et al.*, 2000) y la concentración de NT por el método Kjeldahl (Kirk, 1950). Las determinaciones se llevaron a cabo en 5 repeticiones.

El programa de optimización para mezclas de sustratos, a través del programa de computo SAS, fue diseñado para mezclar 2 o más materiales, considerando propiedades físicas y, dado el caso, químicas, que en la mezcla encuentren sus valores dentro de cierto rango o mayores a cierto valor, deseados; paralelamente, la consideración de los precios de los sustratos a mezclar, permite obtener las mezclas de sustratos de mínimo costo, que cumplan con las propiedades deseadas. Los costos de los sustratos a mezclar fueron $\$0.1 \text{ L}^{-1}$ para el TE, $\$1.3 \text{ L}^{-1}$ para VC1 y $\$1.3 \text{ L}^{-1}$ para VC3.

En el presente caso, se seleccionaron las propiedades físicas EPT y CA, dada la importancia que tienen en un sustrato ya que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas, además de que no pueden mejorarse una vez en contenedor (Cabrera, 1999), y la propiedad química MO, que influye sobre estas variables por la biodegradabilidad de la misma (Lemaire *et al.*, 1998). Para estas variables, los rangos o valores mínimos que se establecieron de acuerdo con la caracterización en laboratorio y con base en Ansorena (1994) y fueron: EPT, valores iguales o mayores que 58% y para CA, valores entre 10 y 30%; para MO valor mayor a 5%

y menor de 20%, valores que se tomaron de referencia de un suelo muy rico en materia orgánica (Vázquez-Alarcón, 1996).

Estas variables y sus rangos de valores o valores mínimos considerados, se introdujeron como restricciones, en el programa de optimización con SAS, resultando las combinaciones porcentuales en volumen de cada material. Paralelamente, también en términos de restricción se introdujeron los valores de costos máximos a aceptar por el programa de optimización con SAS, para obtener así las mezclas que tuvieran un costo mínimo o no mayor que un cierto valor determinado. Así, el costo máximo establecido fue de $\$0.60 \text{ L}^{-1}$ para el caso de la mezcla TE-VC1 y TE-VC3 y de $\$1.0 \text{ L}^{-1}$ para TE-VC2.

El programa obtuvo mezclas, que cumplieron con las restricciones establecidas, con sus respectivos valores teóricos de las propiedades consideradas. Algunas mezclas se seleccionaron, realizaron y se caracterizaron en laboratorio, los resultados de éstas se compararon con los valores teóricos calculados con el programa de optimización en SAS. Las curvas de retención de humedad de cada una de las mezclas evaluadas también fueron determinadas, utilizando el equipo y metodología descrita por De Boodt *et al.* (1974), que se basa en establecer tensiones a los materiales situados en embudos de Haines mediante un sistema de líneas comunicantes (tubos de plástico). Primero, el material correspondiente (mezcla) se saturó con agua en recipientes perforados, drenando el exceso de agua; posteriormente, se tomó una muestra y se colocó en el embudo de Haines y se tapó. Se dejó transcurrir 24 h para que el nivel de agua contenida en los tubos de plástico se estabilizará al nivel inferior del sustrato, después el nivel del agua del tubo de plástico se bajó a la altura de 10 cm (10 cm de tensión), con respecto al nivel del sustrato, y se monitoreó hasta el momento que éste se estabilizó (aproximadamente 36 h). Enseguida se extrajo una muestra y se pesó, después se secó en estufa y se tomó nuevamente el peso para obtener el contenido de humedad a 10 cm de tensión. Este procedimiento se repitió para 50 y 100 cm de tensión. Finalmente, el contenido de humedad a 0, 10, 50 y 100 cm de tensión fueron obtenidos, los cuales se graficaron para obtener las curvas de humedad volumétrica de cada mezcla.

Los análisis estadísticos consistieron en la comparación de las propiedades físicas y químicas entre los materiales a mezclar, con base en un diseño

experimental completamente al azar y la correlación entre las propiedades físicas y químicas de éstos. También se realizó la comparación de las propiedades EPT, CA y MO, obtenidas en laboratorio, entre las proporciones de las combinaciones TE:VC1, TE:VC2 y TE:VC3, con base en un diseño experimental completamente al azar y prueba de comparación de medias Tukey. Por otra parte, la comparación de las propiedades EPT, CA y MO de las proporciones para cada una de las mezclas TE:VC1, TE:VC2 y TE:VC3 determinadas en laboratorio con las obtenidas con el programa SAS, se realizó con base en un diseño experimental completamente al azar de muestras apareadas y con la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$). Finalmente, para las propiedades químicas pH, CE, CIC y NT se realizó una comparación entre proporciones, con un diseño experimental completamente al azar y la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización física y química de los materiales simples se muestra en el Cuadro 1. Se observó que el EPT varió entre 58 y 63% entre los materiales, con el mayor valor para el vermicompost VC1; sin embargo, estos valores son inferiores al nivel considerado como ideal en los sustratos, el cual debe ser mayor a 85% (Ansorena, 1994; Abad *et al.*, 2004).

La CA mostró diferencias entre los materiales, con valores mayores para el TE (31.7%), intermedios para el vermicompost VC1 (18.8%) y vermicompost VC3 (19.1%), y el menor valor para el vermicompost VC2 (10.8%); sin embargo, a excepción de TE, todos los materiales presentan valores entre 10 y 30%,

los cuales son considerados como ideales para sustratos (Ansorena, 1994).

La MO varió desde 33.9 a 36.55 para VC2 y VC1, respectivamente, hasta 56% para VC3, con diferencias significativas ($P \leq 0.05$). Estos valores se encuentran por debajo del 80%, el cual es el considerado como ideal para materiales orgánicos destinados a ser utilizados como sustratos (Ansorena, 1994).

Durán y Henríquez (2007) señalan que el tipo de ingredientes utilizados para la elaboración de los vermicompost determina en gran medida las características del producto final, manifestándose variabilidad en ellos, lo cual coincide con lo encontrado en los estudiados. Por su parte, Caron y Nkongolo (1999) mencionan que las características de los sustratos para el cultivo de plantas cambian en el tiempo, y por lo general las propiedades físicas del mismo tienden a reducirse, por lo que hay que procurar que dichas características sean al inicio lo más altas o lo más cercano a lo considerado como ideal. Por otro lado, la tendencia actual es producir plantas de calidad en sustratos y con los costos más bajos (Buyatti, 2000). Uno de conceptos por lo cual el costo de producción se eleva es el uso de fertilizantes químicos y de sustratos de valor elevado, como la turba.

Comparando los resultados de EPT, CA y costo del TE en relación a los vermicompost, se observa que resultaría idóneo producir en TE utilizando una solución nutritiva; sin embargo, también es de interés buscar materiales que contribuyan a disminuir el uso de fertilizantes, como es el caso de el vermicompost.

Se ha mencionado que las propiedades químicas, a diferencia de las físicas, pueden modificarse una vez colocado el sustrato en los contenedores; sin embargo, el análisis de las propiedades químicas es importante

Cuadro 1. Principales propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados para la elaboración de mezclas mediante el programa de optimización con SAS.

Sustrato	Variables						
	EPT	CA	MO	pH	CE	CIC	NT
	----- % -----				dS m ⁻¹	meq 100 g ⁻¹	g kg ⁻¹
TE	58.6 b [†]	31.7 a	0.0 d	7.1 b	0.08 c	2.7 c	0.0 c
VC1	63.0 a	18.8 b	36.5 b	8.8 a	3.35 a	57.3 b	11 b
VC2	58.3 b	10.8 c	33.9 c	8.8 a	1.31 b	57.3 b	10 b
VC3	58.0 b	19.1 b	55.9 a	7.1 b	1.33 b	88.4 a	21 a

[†] Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Te = tezontle VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica.

debido a su interacción con los fertilizantes y su efecto en el desarrollo de las plantas, siendo el pH, CE y CIC las principales a considerar (Quesada y Méndez, 2005). El pH óptimo para el crecimiento de las plantas se ha establecido entre 5.3 y 6.8 (Argo, 1998). El VC1 y el VC2 tuvieron un pH alcalino de 8.85 y 8.78, respectivamente, mientras que el VC3 fue neutro (7.08). Al respecto, Bollo (1999) menciona que una de las funciones de la glándula de Morrenen la lombriz es secretar carbonato cálcico y producir una digestión alcalina, por lo que es de esperarse un pH ligeramente alcalino en el vermicompost como lo encontraron Durán y Henríquez (2007). Asimismo, para el caso del TE, el pH fue cercano al neutro (7.14), dado que es un sustrato inerte.

La mayor concentración de sales la presentó el VC1 (con un valor de CE de 3.35 dS m^{-1}). Al respecto, los valores de CE superiores a 3.5 dS m^{-1} son considerados como nocivos para plántulas de hortalizas, aunque también depende de la tolerancia del cultivo (Abad *et al.*, 2004). Por lo tanto, los vermicompost aquí estudiados no presentan problema alguno en cuanto a la concentración de sales. Las diferencias de CE entre los vermicompost depende de la naturaleza del material a transformar; asimismo, pueden deberse a las condiciones en las cuales se haya llevado a cabo el vermicomposteo (Durán y Henríquez, 2007).

En cuanto a la CIC, el VC2 y VC3 presentaron el mayor valor ($88.41 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$) lo que coincide con la mayor concentración de MO, mientras que el TE manifestó el valor menor ($2.69 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$) dado que es un material inerte. El contenido de NT fue mayor para el VC3 con el 2.1%, mientras que para VC1 y VC2 fue cercano a 1%. La presencia de NT en éstas resulta

lógica dado que una de las materias primas en su elaboración fue el estiércol.

Las propiedades consideradas para el diseño de mezclas mediante el programa de optimización con SAS, fueron EPT, CA y MO. En relación a esto, Baumgarten (2008) menciona que los resultados obtenidos del análisis de sustratos por diversos autores, en cuanto a sus características físicas y químicas, pueden ser una base para el desarrollo de modelos, para así reducir el trabajo analítico y gastos. Por ello, se consideró lo señalado por autores como: Zamora-Morales *et al.* (2005) quienes mencionan que el EPT y la CA deben ser incluidos como variables de diseño en la generación de mezclas por programación lineal. Por su parte, Bunt (1976), Bragg y Chambers (1988) y Pastor (1999) mencionan que la fase gaseosa y líquida de un medio de crecimiento la constituye el espacio ocupado por aire (CA) y agua, es decir, el EPT; y éste constituye la propiedad física más importante en los sustratos. Por otra parte, Burés (1997) y Stievenard *et al.* (1999) señalan que la MO es la fracción importante de la fase sólida y que influye en las propiedades físicas y químicas del sustrato.

El análisis que se presenta en el Cuadro 2 indica correlaciones significativas para CA-CIC, CA-NT, NT-CIC, pH-NT, pH-CIC, pH-MO, MO-CIC, CA-MO y NT-MO, lo que confirma lo indicado por Burés (1997) y Stievenard *et al.* (1999), por esta razón es importante considerar la concentración de MO en el diseño de mezclas.

De acuerdo con las propiedades EPT, CA, MO y costo de material, se planteó el programa de optimización con SAS para la generación de mezclas de sustratos considerando 2 materiales, el cual se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre variables físicas y químicas de los materiales utilizados en la obtención de mezclas por el programa de optimización con SAS.

	Variables físicas y químicas						
	EPT	CA	pH	CE	CIC	MO	NT
EPT	-	0.3692 ns	-0.3268 ns	0.0899 ns	0.0629 ns	0.0993 ns	0.1736 ns
CA		-	0.1943 ns	-0.4776 ns	-0.7078**	-0.6904*	-0.5769*
pH			-	0.0195 ns	-0.7692**	-0.7720**	-0.8737**
CE				-	0.5016 ns	0.5245 ns	0.3973 ns
CIC					-	0.9980**	0.9806**
MO						-	0.9829**
NT							-

EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación, CE = conductividad eléctrica, MO = materia orgánica, NT = nitrógeno total, * = significancia a 0.05, ** = significancia a 0.01, ns = no significativo.

Cuadro 3. Programa de optimización con SAS para la generación de mezclas de dos materiales.

Desarrollo del programa

```

Data mezcla;
/*propiedades consideradas, por ejemplo: EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación, MO = materia orgánica*/
/*X1 = material 1, X2 = material 2*/
/*valores de las propiedades y costos (co) para cada material:
material EPT CA MO co
X1 EPT1 CA1 MO1 co1
X2 EPT2 CA2 MO2 co2*/
do X = 0 to 100 by 5;
do X2 = 0 to 100 by 5;
do X12 = X1 + X2;
/*X12 es la suma de los porcentajes de cada material en la mezcla*/
/*las mezclas se considerarán para combinaciones porcentuales, por ejemplo de 5 en 5% de los materiales, que sumen 100%; pueden
considerarse valores diferentes de 5 pero que 100 sea múltiple de ellos*/
ept = (X1 * EPT1 + X2 * EPT2) / X12;
ca = (X1 * CA1 + X2 * CA2) / X12;
mo = (X1 * MO1 + X2 * MO2) / X12;
output; end; end;
data a1; set mezcla; keep X1 X2 X12 EPT CA MO co;
proc sort data = a1; by descending X12; data a11; set a1;
if X12 > 96 and X12 < 105;
/*la última instrucción eliminará todas las combinaciones porcentuales de los materiales que no sume 100%*/
/*Se definen los valores del rango óptimo o valor mínimo de las propiedades en la mezcla, los que se introducen como restricciones, por
ejemplo:
propiedad rango o valor mínimo
EPT EPT>EPTmin
CA CAmin<= Ca <= CAmass
MO MMin<= MO <= MMax*/
data a2; set a11; keep X1 X2 X12 EPT CA MO co;
proc sort data = a2; by descending ept; data a22; set a2;
if EPT >= EPTmin;
data a3; set a22; keep X1 X2 X12 EPT CA MO co;
proc sort data = a3; by descending ca; data a33; set a3;
if CA >= CAmin and CA <= CAmass;
data a4; set a33; keep X1 X2 X12 EPT CA MO co;
proc sort data = a4; by descending MO; data a44; set a4;
if MO >= MMin and MO <= MMax;
/*para obtener las mezclas de mínimo costo se introduce un costo dado aproximado, para que se consideren sólo las mezclas de costo
menor a dicho valor, mismo que se denominará costo X0*/
data a5; set a44; keep X1 X2 X12 EPT CAMO co;
proc sort data = a5; by descending co; data a55; set a5;
if co <= co X0;
data c; set a55; proc print;
run;

```

El programa de optimización SAS se aplicó para realizar la combinación de 2 materiales, señalando que puede ser empleado para más de dos, aunque no suelen considerarse mezclas de más de 3 de ellos.

En los Cuadros 4, 5 y 6 se presentan las mezclas de sustratos, obtenidas para las 3 combinaciones de materiales.

Las mezclas de menor costo contienen mayor proporción de TE, un material de menor costo (\$0.1 L⁻¹)

Cuadro 4. Mezclas de materiales calculadas con el programa de optimización SAS, utilizando tezontle-vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE:VC1).

	Mezcla		Variables			Costo
	TE	VC1	EPT	CA	MO	
	- - - - - % volumen		- - - - - % peso			\$ L ⁻¹
1	60	40	60.3	26.5	14.6	0.58
2	65	35	60.1	27.2	12.8	0.52
3	70	30	59.9	27.8	10.9	0.46
4	75	25	59.7	28.5	9.1	0.40
5	80	20	59.4	29.1	7.3	0.34
6	85	15	59.2	29.8	5.5	0.28

TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación; MO = porcentaje de materia orgánica.

que los vermicompost; por otra parte, el costo de las mezclas TE:VC2 son de mayor costo debido a que este vermicompost tiene el mayor precio.

En las 3 relaciones de mezclas (Cuadros 4, 5 y 6) se observó que el EPT es similar en las diferentes proporciones, mientras que CA es mayor a mayor proporción de TE, en tanto que la MO disminuye a menor proporción de el vermicompost utilizado, lo cual repercute en el costo por unidad.

De la relación de mezclas, las proporciones 65:35, 75:25 y 85:15 de las combinaciones TE:VC1, TE:VC2 y TE:VC3 fueron seleccionadas para realizarlas en el sistema real y caracterizarlas en laboratorio, en las propiedades de EPT, CA y MO. En los resultados obtenidos en laboratorio se encontró diferencia del EPT entre las proporciones estudiadas de las 3 combinaciones consideradas, notándose en general, un incremento de éste a mayor proporción de TE para las combinaciones TE:VC2 y TE:VC3. Sin embargo, estas diferencias no

Cuadro 5. Mezclas de materiales calculadas con el programa de optimización SAS, utilizando tezontle-vermicompost de estiércol de bovino (TE:VC2).

	Mezcla		Variables			Costo
	TE	VC2	EPT	CA	MO	
	- - - - - % volumen		- - - - - % peso			\$ L ⁻¹
1	65	35	58.4	24.4	11.9	0.94
2	70	30	58.4	25.4	10.2	0.82
3	75	25	58.5	26.5	8.5	0.7
4	80	20	58.5	27.5	6.8	0.58
5	85	15	58.5	28.6	5.1	0.46

TE = tezontle; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación; MO = porcentaje de materia orgánica.

son de gran magnitud (Cuadro 7). En el presente ensayo el TE tuvo un rango más amplio en el tamaño de partícula (2 a 10 mm) mientras que en las VC2 y VC3 el tamaño de partícula fue más homogéneo (0.5 a 5 mm), por tanto el incremento en la proporción de TE implicó un mayor número de partículas de tamaño más grande con respecto a el vermicompost incrementando así el EPT, lo cual coincide con lo que reporta Ansorena (1994). Los resultados de EPT contrastan con lo encontrado por Owen *et al.* (2008) en otros trabajos de mezclas de materiales tales como agregados minerales y corteza de pino en diferentes proporciones, ya que no se encontró efecto de estas sobre la porosidad total, aunque si en el volumen de aire, lo cual puede deberse a la naturaleza de las partículas de los materiales utilizados.

En cuanto a CA los valores incrementaron significativamente conforme aumentó la cantidad de TE, así la proporción 85-15 obtuvo la mayor CA (Cuadro 7). Lo anterior se explica debido posiblemente a que el TE presentó la mayor CA (Cuadro 1), por tanto la CA aumenta al incrementar la cantidad de éste en la mezcla, lo cual coincide con lo encontrado por Verdonck y Demeyer (2004) quienes mencionan que al combinar en varias proporciones de turba con 10% de CA y perlita con 20% de CA, la CA incrementó conforme la proporción de perlita fue mayor.

Para la MO, en las 3 combinaciones se observó una disminución significativa a medida que se redujo la proporción de vermicompost en la mezcla, lo cual resulta lógico, puesto que ésta es la que aporta dicho componente en la mezcla (Cuadro 7).

La comparación entre los datos obtenidos en laboratorio y los generados por el programa de optimización SAS, indica: para la combinación TE:VC1, un mayor valor del EPT en la proporción 75:25

Cuadro 6. Mezclas de materiales calculadas por el programa de optimización SAS, utilizando tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE:VC3).

	Mezcla		Variables			Costo
	TE	VC3	EPT	CA	MO	
	- - - - - % volumen		- - - - - % peso			\$ L ⁻¹
1	65	35	58.4	27.3	19.4	0.52
2	70	30	58.4	27.9	16.8	0.46
3	75	25	58.4	28.5	14	0.4
4	80	20	58.4	29.2	11.2	0.34
5	85	15	58.4	29.8	8.4	0.28

TE = tezontle; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación; MO = porcentaje de materia orgánica.

Cuadro 7. Propiedades físicas y químicas obtenidas en laboratorio de las tres combinaciones tezontle-vermicompost en las proporciones 65:35, 75:25 y 85:15.

Combinación y proporción	Valores obtenidos en laboratorio		
	EPT	CA	MO
	----- % -----		
TE-VC1,65:35	61.4 a†	28.9 b	10.5 a
TE-VC1,75:25	55.8 c	24.9 c	8.2 b
TE-VC1,85:15	58.0 b	32.0 a	6.1 c
TE-VC2,65:35	53.7 b	23.5 b	9.7 a
TE-VC2,75:25	55.7 a	24.5 b	7.0 b
TE-VC2,85:15	56.2 a	30.3 a	2.9 c
TE-VC3,65:35	58.0 b	25.3 b	18.1 a
TE-VC3,75:25	58.3 ab	24.6 b	14.3 b
TE-VC3,85:15	60.0 a	32.0 a	6.1 c

† Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica.

con el programa SAS (mayor con 6.5%), también para la MO en las proporciones 65:35 (18%) y 75:25 (9.9%) (Cuadro 8); para la combinación TE:VC2, se encontró mayores valores de EPT en las proporciones 65:35 (7.8%) y 75:25 (4.8%) con el programa SAS, así como también para la MO en las proporciones 65:35 (18.5%),

75:25 (17.6%) y 85:15 (43%) (Cuadro 8); en la combinación TE:VC3, no se observaron diferencias en las 3 proporciones para ninguna de las 3 variables (Cuadro 8). También se observó que las diferencias no siguen alguna tendencia en relación con las proporciones de los materiales dentro de la misma combinación; por ejemplo, el EPT tuvo diferencia en la proporción 75:25 pero no para 65:35 y 85:15, por lo que su origen pudo ser del error experimental.

Una de las causas pudo ser debido a el tamaño de partículas del TE y vermicompost ya en mezcla, lo cual dificultó la toma de la muestra, sobre todo para la determinación de materia orgánica para la cual fue pequeña (5 g).

La variación de los datos obtenidos en laboratorio con relación a los encontrados por el programa de optimización SAS se comprenden si se considera que para poder hacer uso del programa se requiere de la utilización de datos tomados del sistema real, ya que todo proceso de obtención de datos está afectado por el error experimental (Baker y Curry, 1976). Esta situación se observó durante la reproducción de las mezclas en laboratorio, la cual no fue 100% exacta entre una repetición y otra, debido a que durante la determinación de EPT y CA se encontraron problemas tales como la dificultad para saturar completamente la muestra, ya que quedaron espacios de aire que no pudieron llenarse de agua, además de la pérdida de material durante el drenado de la mezcla, situaciones que fueron

Cuadro 8. Comparación de las propiedades físicas y químicas obtenidas en laboratorio y a través del programa SAS de las combinaciones TE:VC1, TE:VC2 y TE:VC3 en las proporciones 65:35, 75:25 y 85:15.

Combinación, proporción	Propiedades					
	EPT		CA		MO	
	Laboratorio	Programa	Laboratorio	Programa	Laboratorio	Programa
	----- % -----					
TE-VC1,65:35	61.4 a†	60.1 a	28.9 a	27.2 a	10.5 b	12.8 a
TE-VC1,75:25	55.8 b	59.7 a	24.9 a	28.5 a	8.2 b	9.1 a
TE-VC1,85:15	58.0 a	59.2 a	32.0 a	29.8 a	6.1 a	5.5 a
TE-VC2,65:35	53.8 b	58.4 a	23.5 a	24.4 a	9.7 b	11.9 a
TE-VC2,75:25	55.7 b	58.5 a	24.5 a	26.5 a	7.0 b	8.5 a
TE-VC2,85:15	56.2 a	58.5 a	30.3 a	28.6 a	2.9 b	5.1 a
TE-VC3,65:35	58.0 a	58.3 a	25.3 a	27.3 a	18.1 a	19.4 a
TE-VC3,75:25	58.3 a	58.4 a	24.6 a	28.5 a	14.3 a	14.0 a
TE-VC3,85:15	60.0 a	58.5 a	32.0 a	29.8 a	6.1 a	8.4 a

† Letras iguales dentro de hilera para la propiedad determinada en el laboratorio y dada por el programa SAS, indican valores estadísticamente iguales. TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica.

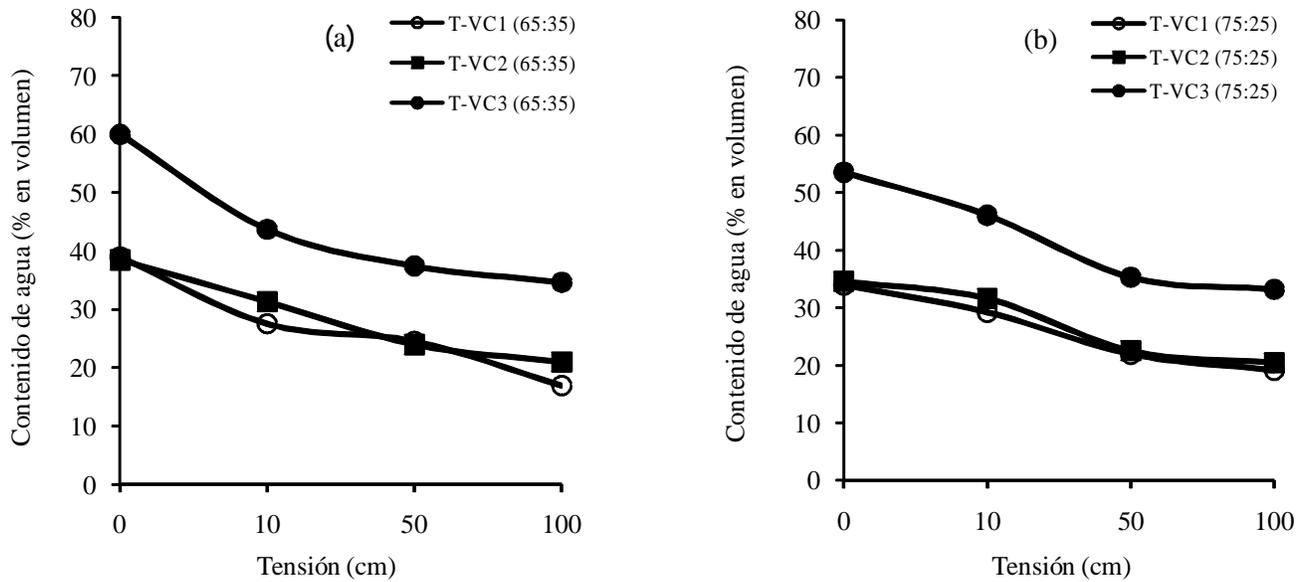


Figura 1. Curvas de humedad de las mezclas tezontle:vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE:VC1), vermicompost de estiércol bovino (TE:VC2) y tezontle:vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE:VC3) para las proporciones a) 65:35 y b) 75:25.

congruentes con lo encontrado por Gabriëls *et al.* (1991). Por otra parte, entre repeticiones de la misma mezcla de materiales se encontró una variación aproximada de 5% en el peso, lo cual se atribuyó a la naturaleza de los materiales utilizados (orgánico e inorgánico).

Otro aspecto físico evaluado en las diferentes mezclas fueron las curvas de humedad que se muestran en las Figuras 1 y 2. En estas se observa que el contenido de agua fue mayor en la combinación TE-VC3 lo que se relacionó con el contenido de MO que ésta contuvo, el cual fue el más alto.

Así también, en las mezclas con la más alta proporción de vermicompost fue mayor el contenido de agua. Al respecto, Ndegwa *et al.* (2000) y Hashemimajd *et al.* (2004) señalan que los vermicompost incrementan la retención de agua, por lo que se usa en medios de crecimiento. No obstante, las proporciones 65:35 y 75:25 de las 3 combinaciones de materiales (Figuras 1a y 1b) muestran contenidos de agua similares.

En cuanto a las otras propiedades químicas determinadas en laboratorio de las mezclas de materiales considerados (Cuadro 9) se obtuvo que el pH no varió entre las distintas proporciones de las diferentes combinaciones, en cambio la CE, CIC y NT disminuyeron en concordancia con la menor proporción de vermicompost en la mezcla (Cuadro 9). De acuerdo con Ndegwa *et al.* (2000) el vermicompost contiene sustancias activas que elevan la CIC, además

se considera a este como uno de los abonos orgánicos que puede satisfacer la demanda nutritiva de los cultivos (Manjarrez *et al.*, 1999).

El programa de optimización con SAS calculó y desplegó una serie de mezclas de materiales en sus proporciones respectivas, las cuales se consideran

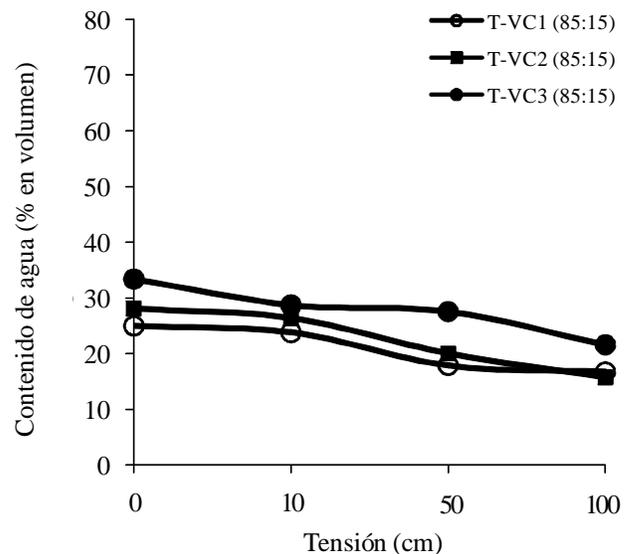


Figura 2. Curvas de humedad de las mezclas tezontle-vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE:VC1), vermicompost de estiércol bovino (TE:VC2) y tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE:VC3) para la proporción 85:15.

adecuadas de acuerdo a las restricciones hechas. Sin embargo, para elegir entre una proporción u otra (Cuadros 4, 5 y 6,) los valores de EPT no señalan una en particular, pues los valores se mantuvieron en general sin variación; la CA mostró mayor valor en la proporción 85:15 aunque en las demás proporciones los valores de CA también se ubicaron dentro del rango óptimo señalado por Ansorena (1994) no indicando un mezcla en especial; sin embargo, la MO indicó que la proporción 65:35 fue la más adecuada, reafirmado esto por la mayor CIC y concentración de NT determinadas en laboratorio en esta misma (Cuadro 9), y en la alta correlación encontrada entre estas propiedades de los materiales antes de ser mezclados (Cuadro 2).

Es importante considerar lo anterior dado que un objetivo del uso de la mezcla, incluyendo vermicompost en el cultivo de plantas, es reducir la utilización de fertilizantes químicos. En lo que respecta a la selección entre una combinación de materiales u otra en la proporción 65:35 es otra situación, en la que hay que considerar aspectos como el económico. En relación a esto, la mezcla TE:VC2 resultó ser la de mayor costo por unidad, dado el mayor costo del vermicompost. Por lo tanto, de acuerdo a lo anterior, la mezcla TE-VC3, 65:35 resultó ser la mejor opción, en función de EPT, CA, MO y costo.

Cuadro 9. Propiedades químicas obtenidas en laboratorio de las combinaciones TE:VC1, TE:VC2 y TE:VC3 en las proporciones 65:35, 75:25 y 85:15.

Combinación, proporción	Variables			
	pH	CE	CIC	N
		dS m ⁻¹	meq 100 g ⁻¹	g kg ⁻¹
TE-VC1,65-35	7.87 a [†]	0.920 a	18.532 a	2.3 a
TE-VC1,75-25	7.87 a	0.686 b	12.635 b	1.9 b
TE-VC1,85-15	7.85 a	0.483 c	6.739 c	1.0 c
TE-VC2,65-35	7.74 a	0.486 a	20.638 a	3.2 a
TE-VC2,75-25	7.70 a	0.400 b	19.375 b	2.4 b
TE-VC2,85-15	7.62 a	0.170 c	13.550 c	0.7 c
TE-VC3,65-35	7.30 a	0.400 a	21.600 a	4.2 a
TE-VC3,75-25	7.25 a	0.313 b	20.217 b	3.3 b
TE-VC3,85-15	7.14 a	0.130 c	16.847 c	2.3 c

[†]Medias con misma letra dentro de mezcla y de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café.

La elección de una mezcla u otra en una proporción determinada para llevarla a la práctica dependerá del objetivo que se persiga, del requerimiento del cultivo, así como la cercanía y costo de los sustratos.

CONCLUSIONES

- La caracterización física y química de los materiales (por separado) es necesaria, ya que sirve para justificar la mezcla o no de los mismos.
- El espacio poroso total, la capacidad de aireación y el porcentaje de materia orgánica, pueden ser utilizados en la generación de mezclas mediante un programa de optimización con SAS, ya que la variación de los valores de las variables obtenidos en laboratorio y por el programa fue aceptable y justificable.
- Considerar el costo de los materiales para realizar las mezclas es necesario, ya que dependiendo de la viabilidad de este puede o no seleccionarse o descartarse una mezcla, además de considerar el cumplimiento de los valores establecidos para las propiedades físicas y químicas.
- La elección de mezclas mediante la exploración de los resultados desplegados por el programa de optimización con SAS reduce el trabajo de laboratorio y gastos.
- El programa de optimización con SAS proporciona opciones de mezcla de materiales de menores costos dentro de los rangos de las propiedades físicas y químicas establecidas, pero para determinar la mejor mezcla, es criterio propio, ya que depende del costo, finalidad y cultivo a establecer.

LITERATURA CITADA

- Abad, B. M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2004. Los sustratos en el cultivo sin suelo. pp. 113-158. In: M. Urrestarazu G. (ed.). Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Aendekerk, G. L., H. Cevat, N. Dolmans, C. van Elderen, J. A. Kipp, C. de Kreij, C. Sonneveld, J. B. G. M. Verhagen, and G. Wever. 2000. International substrate manual. Elsevier International. The Netherlands.
- Ansorena, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Argo, W. R. 1998. Transplant, production and performance: root medium chemical properties. HortTech. 4: 486-494.
- Baker, C.H, and R. B. Curry. 1976. Structure of agricultural simulators: a philosophical view. Agric. Syst. 1: 201-218.
- Baumgarten, A. 2008. Analytical methods for growing media-challenges and perspectives. Acta Hort. 779: 97-104.
- Bollo T., E. 1999. Lombricultura: una alternativa de reciclaje. Quito, Ecuador.

- Bragg, N. C. and B. J. Chambers. 1988. Interpretation and advisory applications of compost air-filled porosity (AFP) measurements. *Acta Hort.* 221: 35-44.
- Bunt, A. C. 1976. *Modern potting composts: A manual on the preparation and use of growing media for pot plants.* Pennsylvania State University Press.
- Burés, S. 1997. *Sustratos.* Ediciones Agrotécnicas S. L. Madrid, España.
- Burés, S., F. X. Martínez, and M. Llorca. 1988. Preliminary study of the application of parametric linear programming in formulation of substrate mixes. *Acta Hort.* 221: 141-152.
- Buyatti, M. 2000. Evaluación del comportamiento agronómico del aserrín de salicáceas compostado en mezcla con perlita para la producción de plantines florales. *Rev. Hortic. Argentina* 19: 94.
- Cabrera, R. I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Rev. Chapingo Serie Horticultura* 5: 5-11.
- Caron, J. and V. K. N. Nkongolo. 1999. Aeration in growing media: recent developments. *Acta Hort.* 481: 545-551.
- De Boodt, M., O. Verdonck, and I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37: 2054-2062.
- Durán, L. y C. Henríquez. 2007. Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense* 31: 41-51.
- Gabriëls, R., W. Van Keirsbulck, O. and Verdonck. 1991. Reference method for physical and chemical characterization of growing media: an international comparative study. *Acta Hort.* 294: 147-160.
- Gass, S. I. 1969. *Programación lineal. Métodos y aplicaciones.* Ed. Continental. México, D. F.
- Hashemimajd, K., M. Kalbasi, A. Golchin, and H. Shariatmandari. 2004. Comparison of vermicomposting and compost as potting media for growth of tomatoes. *J. Plant Nutr.* 27: 1107-1123.
- Kirk, P.J. 1950. Método de Kjeldahl para nitrógeno total. *Anal. Chem.* 22: 354-358.
- Landis, T. D. 2000. Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor. pp. 1-67. *In:* T. D. Landis, R. W. Tinus, S. E. McDonald, J. P. Barnett. *Manual Agrícola. Volumen N° 4.* Department of Agriculture, Forest Service. Washington, DC, USA.
- Lemaire, F., L. Rivière, S. Stievenard, O. Marfa, S. Gschwander, F. Giuffrida. 1998. Consequences of organic biodegradability on the physical, chemical parameters of substrates. *Acta Hort.* 469: 121-138.
- Manjarrez M., M. J., R. Ferrera-Cerrato y M. C. González-Chávez. 1999. Efecto de la vermicompost y la micorriza arbuscular en el desarrollo y tasa fotosintética de chile serrano. *Terra* 17: 9-15.
- Moreno-Álvarez, J. M. 2002. La materia orgánica y la capacidad de retención de humedad en sustratos. *Agric. Orgán.* 1: 23-25.
- Ndegwa, P. M., S. A. Thompson, and K. C. Dass. 2000. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. *Bioresour. Technol.* 71: 5-12.
- Nelson, P. V. 1999. *Greenhouse operation and management.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Owen, J. S., Jr., S. L. Warren, T. E. Bilderback, D. K. Cassel, and J. P. Albano. 2008. Physical properties of pine bark substrate amended with industrial mineral aggregate. *Acta Hort.* 779: 131-138.
- Pastor S., J. N. 1999. Utilización de sustratos en viveros. *Terra* 17: 231-235.
- Quesada, R. G. y C. Méndez S. 2005. Análisis fisicoquímico de materiales y sustratos de uso potencial en almacigos de hortalizas. *Rev. Agri. Trop.* 35: 1-13.
- Rivière, L. M. y J. Caron. 2001. Research on substrates: state of the art and need for the coming 10 years. *Acta Hort.* 548: 29-41.
- Sánchez-Hernández, R., V. M. Ordaz-Chaparro, D. J. Palma-López y J. Sánchez-Bolón. 2006. El vermicompostaje: elemento útil en la agricultura sustentable. *Fundación Produce Tabasco, A. C. Villahermosa, Tabasco.*
- SAS Institute. 1982. *SAS User's guide: Statistics.* Cary, NC, USA.
- Stievenard, S., F. Lemaire, S. Gschwander, F. Giuffrida, R. Cáceres, V. Guérin, L. M. Rivière, J. O. Marfà I. Pagès. 1999. Conseqüències de la biodegradabilitat de la matèria orgànica en les propietats físiques i químiques dels substrats. *Quaderns Agraris* 24: 5-19.
- Strojny, Z. and J. S. Nowak. 2001. Effect of different growing media on the growth of some bedding plants. *Acta Hort.* 644: 157-162.
- Vázquez-Alarcón, A. 1996. *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo.* Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Verdonck, O. and P. Demeyer. 2004. The influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Hort.* 644: 99-101.
- Verdonck, O. and R. Gabriëls. 1992. Reference method for determination of physical properties of plant substrates. *Acta Hort.* 302: 169-79.
- Verdonck, O., R. Penninck and M. De Boodt. 1984. The physical properties of different horticultural substrates. *Acta Hort.* 150: 155-160.
- Zamora-Morales, B. P., P. Sánchez-García, V. H. Volke-Haller, D. Espinosa-Victoria y A. Galvis-Spíndola. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interciencia* 30: 69-81.