



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

EXTRACTOS DE VERMICOMPOSTA EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN HIDROPONÍA

VICTORINO DAMIÁN JIMÉNEZ MORALES

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2008

iii

La presente tesis titulada: **“Extractos de vermicomposta en la producción de lechuga en hidroponía”** realizada por el alumno: **Victorino Damián Jiménez Morales**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA

Dra. Libia Iris Trejo-Téllez

ASESOR

Dr. Fernando Carlos Gómez Merino

ASESOR

Dr. Aníbal Griseldo Quispe Limaylla

ASESOR

Dr. Jorge Leonardo Tovar Salinas

ASESOR

Dr. José Antonio Santizo Rincón

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, JULIO 2008

EXTRACTOS DE VERMICOMPOSTA EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN HIDROPONÍA

Victorino Damián Jiménez Morales, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2008

En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación simple y combinada de extractos de vermicomposta y solución de Steiner a cinco concentraciones (0, 25, 50, 75 y 100% v/v, respectivamente para cada factor), sobre la concentración nutrimental en hojas, producción de biomasa seca, crecimiento vegetativo y calidad postcosecha de lechuga (*Lactuca sativa* var. longifolia cv. Parris Island) en un sistema hidropónico. Los resultados mostraron que la aplicación individual de dosis bajas de extractos de vermicomposta incrementaron los valores de todas las variables medidas. Sin embargo, este efecto se tornó negativo conforme se incrementó la concentración de extractos de vermicomposta. Se observaron también efectos positivos de bajas concentraciones de extractos de vermicomposta adicionada con bajas concentraciones de la solución de Steiner. Sin embargo, al aumentarse el nivel de ambos factores se observan efectos negativos, los cuales fueron más pronunciados conforme se incrementó la concentración de extractos de vermicomposta. Estos efectos negativos pueden estar asociados a los valores altos de conductividad eléctrica para los tratamientos con los niveles más altos de ambos factores.

Palabras clave: *Lactuca sativa*, fertilización órgano-mineral, concentración nutrimental, crecimiento vegetativo, calidad postcosecha.

VERMICOMPOST EXTRACTS ON THE PRODUCTION OF LETTUCE IN HYDROPONICS CULTURE

Victorino Damián Jiménez Morales, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2008

Herein, the effect of the simple or combined application of vermicompost tea and the Steiner's solution at five concentrations (0, 25, 50, 75 y 100%, v/v for each factor, respectively), on the nutrient concentration of leaves, biomass production, vegetative growth and postharvest quality of lettuce (*Lactuca sativa* var. longifolia cv. Parris Island) in a hydroponic system was evaluated. Results showed that the simple application of vermicompost tea at low concentration improved all variables measured. However, this effect turned negative as the concentration of the vermicompost tea increased in the nutrient solution. Low concentrations of the vermicompost tea in combination with low levels of the Steiner's solution improved plant growth. Nevertheless, when concentration of both factors increased in the hydroponic culture, negative effects on all variables measured were observed, and such effects were more evident when vermicompost tea concentrations were high. There negative effects may be associated to high electric conductivity observed in treatments with the highest levels of both factors.

Key words: *Lactuca sativa*, organo-mineral fertilization, nutrient concentration, vegetative growth, postharvest quality.

AGRADECIMIENTOS

DIOS, gracias por permitirme llegar a este punto de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, por haberme dado la oportunidad de seguirme formando en esta noble y maravillosa profesión.

A la **Dra. Libia Iris Trejo Téllez** por su orientación, conducción y dirección de mi trabajo de tesis y sobre todo por su enorme paciencia y consideración con un servidor que hicieron posible la culminación de este ciclo en mi vida.

Al Dr. Victor Volke Haller por su desinteresada asesoría y sugerencias brindadas en la parte de análisis de los datos.

Al Consejo particular por sus atinadas sugerencias y correcciones al presente trabajo. Dr. Fernando Gómez Merino, Dr. Aníbal Quispe L., Dr. Jorge Leonardo Tovar S., Dr. José Santizo.

A todos mis profesores del Colegio de Postgraduados cuyos conocimientos y orientación contribuyeron a mi formación.

A mis sinceros amigos y compañeros Nelzon, Soledad, Rosalba, Fabiola, Elena, Mauricio, Maribel, Maria Luisa, Victor, Simón, Dulce, José Tun, Eduardo, Ibar, por las satisfacciones, las variadas y positivas experiencias. Gracias por su afecto.

DEDICATORIAS

A Dios, humilde tributo a su amor infinito.

A mi familia por el amor y el apoyo brindado. Mónica, Damián Enrique, Nidia Fernanda y el pequeño que viene en camino.

A mis padres, Alejandro y Adelaida por el ejemplo que han sido para mí, por sus consejos, por su apoyo, por enseñarme los principios más valiosos de la vida: la humildad, el trabajo y la sencillez, les dedico este trabajo muy especialmente a ellos que siempre contaran con mi cariño y respeto.

A mis hermanos Chucho, Tere, Cobo, Male y Edy. Los quiero mucho.

“Los hombres que intentan hacer algo y fracasan están definitivamente mejor que los que tratan de no hacer nada y lo consiguen”

LLOYD JAMES

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Compostaje.....	3
2.1.1 Beneficios en el uso del compostaje	3
2.2. La vermicomposta.....	4
2.2.1. Características generales de la lombriz roja de California (<i>Eisenia foetida</i>).....	7
2.3. Propiedades de los vermicompostas.....	8
2.3.1. Biológicas.....	9
2.3.2. Físicas.....	11
2.3.3. Químicas.....	12
a. Características nutrimentales.....	13
b. Ácidos húmicos y reguladores de crecimiento.....	15
2.3.4. Uso de la fracción líquida de vermicomposta.....	18
a. Definición.....	18
b. Calidad.....	19
c. Uso y beneficios.....	19
d. Métodos de aplicación.....	20
e. Investigación actual.....	20
2.4. Conclusiones de la revisión de literatura.....	20
III. OBJETIVOS	22
3.1. Objetivo general.....	22
3.2. Objetivos específicos.....	22
IV. HIPÓTESIS	23
4.1. Hipótesis general.....	23
4.2. Hipótesis específicas.....	23
V. MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1. Ubicación del experimento y condiciones experimentales.....	24
5.2. Material Vegetal.....	24
5.3. Sistema hidropónico.....	25
5.4. Diseño de tratamientos y diseño experimental.....	25
5.5. Establecimiento del experimento.....	26
5.6. Obtención y Caracterización del extracto de vermicomposta.....	27
5.6.1. Obtención del extracto de vermicomposta (EV).....	27
5.6.2. Análisis químico del extracto de vermicomposta.....	28
5.6.3. Tratamiento del extracto.....	28
5.7. Variables de estudio.....	29
5.7.1. Altura de la planta.....	29
5.7.2. Número de hojas.....	29
5.7.3. Área foliar.....	29
5.7.4. Biomasa seca del vástago.....	30
5.7.5. Lecturas SPAD.....	30
5.7.6. Absorción nutrimental.....	30
5.8. Variables de calidad.....	31
5.8.1. Coloración (L, a, b).....	32
5.8.2. Resistencia del corte.....	32
5.9. Análisis estadístico.....	33

	Página
VI. RESULTADOS	35
6.1. Análisis matemático.....	35
6.2. Respuestas de las concentraciones nutrimentales en la parte aérea.....	36
6.2.1. Nitrógeno.....	36
a. Primer Muestreo.....	36
b. Segundo muestreo.....	37
c. Tercer muestreo	38
6.2.2. Fósforo.....	39
a. Primer muestreo.....	39
b. Segundo muestreo.....	41
c. Tercer muestreo.....	42
6.2.3. Potasio	43
a. Primer muestreo.....	43
b. Segundo muestreo.....	44
c. Tercer muestreo.....	45
6.2.4. Calcio.....	46
a. Primer muestreo.....	46
b. Segundo muestreo.....	47
c. Tercer muestreo.....	49
6.2.5. Magnesio.....	50
a. Primer muestreo.....	51
b. Segundo muestreo.....	51
c. Tercer muestreo.....	52
6.2.6. Boro.....	54
a. Primer muestreo.....	54
b. Segundo muestreo.....	55
c. Tercer muestreo.....	56
6.2.7. Manganeso.....	57
a. Primer muestreo.....	57
b. Segundo muestreo.....	58
c. Tercer muestreo.....	59
6.2.8. Hierro.....	60
a. Primer muestreo.....	60
b. Segundo muestreo.....	61
c. Tercer muestreo.....	62
6.2.9. Zinc.....	63
a. Primer muestreo.....	63
b. Segundo muestreo.....	65
c. Tercer muestreo.....	66
6.2.10. Sodio.....	67
a. Primer muestreo.....	67
b. Segundo muestreo.....	68
c. Tercer muestreo.....	69
6.3. Respuesta de las variables vegetativas.....	70
6.3.1. Peso de biomasa seca (PBS)	70
6.3.2. Área foliar (AF)	71
6.3.3. Altura de planta.....	73
6.3.4. Unidades SPAD (LS).....	74
6.3.5. Número de hojas (NH).....	75

	Página
6.4. Respuesta de variables de postcosecha.....	76
6.4.1. Luminosidad (L).....	77
6.4.2. Coloración rojo-verde (A).....	78
6.4.3. Coloración amarillo-azul (B).....	79
6.4.4. Índice de saturación o croma (CR).....	80
6.4.5. Resistencia al corte (RC).....	81
6.5. Discusión general.....	83
a. Concentración nutrimental.....	83
b. Variables vegetativas.....	86
c. Variables postcosecha.....	87
VII. CONCLUSIONES.....	91
VIII. RECOMENDACIONES.....	93
IX. LITERATURA CITADA.....	94

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Características generales de <i>Eisenia foetida</i>	8
Cuadro 2. Características generales de la vermicomposta.....	9
Cuadro 3. Microflora contenida en el abono de lombrices.....	11
Cuadro 4. Comparación en uso de agua por plantas de jitomate establecidas en diferentes sustratos.....	12
Cuadro 5. Principales nutrimentos de las plantas en vermicompostas de diferentes sustratos (% en base seca).....	14
Cuadro 6. Compuestos húmicos en vermicomposta.....	16
Cuadro 7. Contenido de fitohormonas en vermicomposta.....	16
Cuadro 8. Efectos del tratamiento de vermicomposta sobre el enraizamiento después de 6 semanas.....	18
Cuadro 9. Factores y niveles evaluados.....	25
Cuadro 10. Tratamientos evaluados.....	26
Cuadro 11. Valores de la conductividad eléctrica de los diferentes tratamientos.....	29
Cuadro 12. Fechas de medición de las lecturas SPAD.....	30
Cuadro 13. Fechas de muestreos para el análisis nutrimental.....	31
Cuadro 14. Variables auxiliares por tratamiento.....	35
Cuadro 15. Signo de los efectos simples y de interacción de los factores de estudio sobre la concentración nutrimental de la parte aérea en lechuga.....	83
Cuadro 16. Signo de los efectos simples y de interacción de los factores de estudio sobre variables vegetativas en lechuga.....	87
Cuadro 17. Signo de los efectos simples y de interacción de los factores de estudio sobre la coloración y resistencia al corte en lechuga.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. <i>Lactuca sativa</i> var. <i>longifolia</i> cv. Parris Island Cos.....	24
Figura 2. Esquema del sistema hidropónico utilizado en el experimento.....	25
Figura 3. Vista de dos unidades experimentales.....	26
Figura 4. Arreglo de tratamientos en el invernadero.....	27
Figura 5. Selección de hojas “S” y “N”, para determinación de coloración y resistencia al corte.....	31
Figura 6. Selección de áreas de medición en la determinación del color.....	32
Figura 7. Medición de la resistencia al corte.....	33
Figura 8. Respuesta de la concentración de nitrógeno (N ₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	37
Figura 9. Respuesta de la concentración de nitrógeno (N ₂) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	38
Figura 10. Respuesta de la concentración de nitrógeno (N ₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	39
Figura 11. Respuesta de la concentración de fósforo (P ₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	40
Figura 12. Respuesta de la concentración de fósforo (P ₂) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	41
Figura 13. Respuesta de la concentración de fósforo (P ₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	42
Figura 14. Respuesta de la concentración de potasio (K ₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	43
Figura 15. Respuesta de la concentración de potasio (K ₂) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	44
Figura 16. Respuesta de la concentración de potasio (K ₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	46
Figura 17. Respuesta de la concentración de calcio (Ca ₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	47
Figura 18. Respuesta de la concentración de calcio (Ca ₂) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	48
Figura 19. Respuesta de la concentración de calcio (Ca ₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	49
Figura 20. Respuesta de la concentración de magnesio (Mg ₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	51
Figura 21. Respuesta de la concentración de magnesio (Mg ₂) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	52
Figura 22. Respuesta de la concentración de magnesio (Mg ₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	53
Figura 23. Respuesta de la concentración de boro (B ₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	54
Figura 24. Respuesta de la concentración de boro (B ₂) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	55
Figura 25. Respuesta de la concentración de boro (B ₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	57
Figura 26. Respuesta de la concentración de manganeso (Mn ₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	58
Figura 27. Respuesta de la concentración de manganeso (Mn ₂) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).....	59

	Página
Figura 28	Respuesta de la concentración de manganeso (Mn_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 60
Figura 29	Respuesta de la concentración de hierro (Fe_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 61
Figura 30	Respuesta de la concentración de hierro (Fe_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 62
Figura 31	Respuesta de la concentración de hierro (Fe_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 63
Figura 32	Respuesta de la concentración de zinc (Zn_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 64
Figura 33	Respuesta de la concentración de zinc (Zn_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 65
Figura 34	Respuesta de la concentración de zinc (Zn_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 66
Figura 35	Respuesta de la concentración de sodio (Na_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 68
Figura 36	Respuesta de la concentración de sodio (Na_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 69
Figura 37	Respuesta de la concentración de sodio (Na_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 70
Figura 38	Respuesta del peso de biomasa seca (PBS) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 71
Figura 39	Respuesta del área foliar (AF) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 72
Figura 40	Respuesta de la altura (AL) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 73
Figura 41	Respuesta de la lectura SPAD (LS) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 74
Figura 42	Respuesta del número de hojas (NH) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 75
Figura 43	Diagrama de los parámetros del color: luminosidad (L), ángulo hue e índice de saturación, usados en el color postcosecha de frutos..... 77
Figura 44	Respuesta de la luminosidad (L) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 78
Figura 45	Respuesta de la coloración rojo-verde (A) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 79
Figura 46	Respuesta de la coloración amarillo-azul (B) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 80
Figura 47	Respuesta del valor croma (CR) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 81
Figura 48	Respuesta de la resistencia al corte (RC) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V)..... 82

I. INTRODUCCIÓN

El abono orgánico es considerado como un abono universal por el hecho de que aporta casi todos los nutrimentos que las plantas requieren para su desarrollo, los cuales son liberados durante la mineralización en diferentes cantidades de acuerdo a la riqueza en nutrimentos de este material orgánico (Trinidad, 1999).

Mediante la aplicación de sales químicas no es fácil controlar los balances nutrimentales ni los factores que influyen sobre la disponibilidad nutrimental bajo condiciones naturales de cultivo. Sin embargo, sí se pueden corregir fácilmente algunos de los problemas nutrimentales con el empleo de abonos orgánicos, porque no sólo proporcionan los elementos que los fertilizantes químicos tradicionales ofrecen, sino también otros nutrimentos que la planta necesita (Volke, 1973; Chen *et al.*, 1986 citados por Trinidad, 1999).

En los últimos años, la regulación que controla la deposición y aplicación de materiales orgánicos en campos de cultivo se ha vuelto más estricta, por lo que el interés por usar lombrices composteras como un sistema ecológico para el manejo de residuos orgánicos ha aumentado (Atiyeh *et al.*, 2000a).

El compostaje o composta ha sido empleado por los agricultores para reutilizar los residuos orgánicos procedentes de la actividad agrícola y de la doméstica, consiguiendo un abono orgánico de buena calidad (Labrador, 2001).

El vermicompostaje es una modificación del composteo normal, donde interviene la participación de lombrices composteras (Santamaría, 2000). Debido a la alta carga microbiana dentro del intestino de la lombriz, la vermicomposta resultante muestra una elevada carga enzimática y bacteriana, además de otros compuestos como fitorreguladores que le dan ciertas características especiales que los materiales composteados en ausencia de lombrices no tienen (Santamaría, 2000; Bello, 2003; Barbado, 2003).

La investigación sobre el uso de la fracción líquida de las vermicompostas es poco conocida en México, centrándose ésta básicamente en la parte sólida. Sin embargo, en el mercado existen algunos productos de este tipo, obtenidos a partir de compostas o de procesos de digestión anaeróbica y que han mostrado resultados positivos. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de distintas proporciones de extracto de vermicomposta y de solución

nutritiva de Steiner (v:v) sobre variables vegetativas, absorción nutrimental y calidad de lechuga en un sistema hidropónico bajo condiciones de invernadero. La investigación realizada permitió obtener los siguientes resultados y conclusiones.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Compostaje

El uso de materiales orgánicos como fertilizantes está ligado a la agricultura desde sus inicios. Los antiguos griegos ya citaban y recomendaban el uso de abonos verdes y estiércoles en la producción de cultivos.

Más próximo a nuestros días, las prácticas agrícolas tradicionales, que todavía siguen estando vigentes en muchas zonas, mantenían la fertilidad de los suelos principalmente optimizando el uso del agua y la materia orgánica a través del riego, el entarquinado, el uso de enmiendas orgánicas con estiércol, hojarasca, restos de cosecha, entre otras.

En contraparte, la fertilización (como definición y como práctica agrícola) adoptada por el modelo de producción generado por la llamada “Revolución Verde” no responde totalmente a la realidad del suelo como medio vivo ni a su dinámica (Labrador, 2001).

El compostaje ha sido empleado por los agricultores para reutilizar los residuos orgánicos procedentes de la actividad agrícola y de la doméstica, consiguiendo un aporte complementario al estiércol, a un costo aceptable y de buena calidad.

El compostaje es un proceso biooxidativo y controlado, en el que intervienen una gran diversidad de microorganismos, que requieren humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en su composición y homogéneos en su tamaño y estado sólido, y que pasa por una fase termófila, dando al final como producto de los diferentes procesos de transformación de dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica estabilizada e higienizada (libre de patógenos y de semillas adventicias), rica en poblaciones microbianas útiles, en sustancias húmicas y en bioactivadores de la fisiología vegetal.

La calidad (composición) de la composta varía de acuerdo al tipo de residuos orgánicos que se emplean en su fabricación. De ello depende también la velocidad de descomposición (Santamaría, 2000).

2.1.1. Beneficios en el uso del compostaje

Labrador (2001) cita los siguientes beneficios a partir del uso de materiales orgánicos composteados:

- Supresión de olores desagradables.
- Mejora de las condiciones higiénicas de los residuos.
- Reducción de la capacidad de germinación de las semillas de vegetación no deseada.
- Mejora del valor fertilizante orgánico y mineral de los residuos.
- Incremento de las poblaciones microbianas beneficiosas.
- Incremento de la actividad estructural y mejora de parámetros físicos.
- Influencia positiva sobre el desarrollo del vegetal.
- Minimización de las pérdidas de nutrimentos durante su aplicación y en el suelo.
- Mejoramiento de la aplicabilidad del producto.
- Minimización de los gastos para el agricultor.
- Minimización de los gastos energéticos en el proceso y después en el uso.
- Facilidad de comercialización y mercado amplio.

2.2. La vermicomposta

El vermicomposteo es una técnica modificada del composteo convencional donde participan lombrices composteras (Santamaría, 2000). La actividad de estas lombrices aumenta la mineralización del nitrógeno y la conversión de nitrógeno amoniacal a nitrógeno nítrico. El mayor efecto de las lombrices sobre la materia orgánica es mejorar la maduración y estabilidad de la misma durante el vermicomposteo (Albanell *et al.*, 1988; Atiyeh *et al.*, 2000b). En este proceso se transforman los desperdicios orgánicos al ser ingeridos, digeridos y mezclados en el tubo digestivo con compuestos minerales, microorganismos y fermentos, que provocan una transformación bioquímica inicial de la materia orgánica y finalmente excretados por las lombrices (vermicomposta) (Labrador, 2001). La acción de las lombrices no es aislada, sino que se realiza en múltiples vías, junto con los microorganismos degradadores aeróbicos a los cuales favorece y multiplica dentro de su intestino (Albanell *et al.*, 1988; Capistrán *et al.*, 2001).

La vermicomposta es la excreta de la lombriz que se alimenta de desechos de descomposición. Este material es conocido también como lombricomposta o humus de lombriz (Martínez, 1999). Tiene la misma apariencia y olor de la tierra negra y fresca, es un sustrato estabilizado de gran uniformidad, contenido nutrimental y con una excelente estructura física, porosidad, aereación, drenaje y

capacidad de retención de humedad (Capistrán *et al.*, 2001); está enriquecida con microorganismos y enzimas ricas en nitrógeno (mucoproteínas, ácido úrico, hipúrico y creatina) y además es rica en fósforo, potasio y gran cantidad de micronutrientes (Angulo, 1994; Gómez, 1998, citado por Bello, 2003). Contiene una elevada carga enzimática y bacteriana que aumenta la solubilización de los nutrientes haciendo que puedan ser inmediatamente asimilable por las raíces (Barbado, 2003; Bello, 2003).

En el composteo en general se requiere de proporcionar ciertas condiciones para que el ambiente sea propicio para la transformación de los residuos orgánicos. Las diferencias en cuanto a los factores que afectan al composteo convencional con el vermicomposteo están principalmente relacionadas con la humedad, temperatura y pH. La diferencia entre ambos procesos de composteo lo constituye el hecho de que las lombrices transforman el ambiente en el que se encuentran. Fabrican galerías por donde el oxígeno, CO₂ y otros gases liberados en el proceso de descomposición fluyen libremente, modifican el tamaño de partícula al fraccionar el residuo, con lo cual se acelera la biotransformación. Además, el movimiento de residuos que hay que realizar comúnmente en el composteo convencional (sin lombrices), no es necesario cuando las lombrices realizan dicho trabajo (Santamaría, 2000).

Los principales mecanismos de acción de la participación de las lombrices en la biotransformación de la materia orgánica son (Aranda, 1995; citado por Santamaría, 2000):

- a. Las lombrices incrementan el área superficial del sustrato al fraccionar los materiales orgánicos, con lo que un número mayor de microorganismos pueden participar en la mineralización.
- b. Estimulan la descomposición del material por la actividad microbiana intracorporal por medio de una relación de simbiosis intestinal.
- c. Favorecen la digestión microbiana extracorporal, ya que las lombrices forman una membrana peritrófica mucoproteica en sus excretas que estimulan la actividad microbiana.
- d. Producen compuestos bioactivos que se generan por las relaciones anteriores, entre ellos se encuentran: enzimas, antibióticos, vitaminas, hormonas, que contribuyen a mejorar la fertilidad de los suelos donde se aplique el abono.

Dentro del intestino de las lombrices composteras se favorece el rápido crecimiento de algunas poblaciones microbianas, lo cual se debe a la presencia del mucus o materia orgánica hidrosoluble y que provoca que las transformaciones de la materia orgánica se aceleren considerablemente (Lavelle y Gilot, 1994; Barois *et al.*, 1998; citados por Santamaría, 2000).

Sabine (1983) (citado por Martínez, 1999) menciona que el potencial del cultivo intensivo de lombrices se resume de la siguiente forma:

- Reducen las características nocivas de los desechos orgánicos, eliminando los malos olores y reduciendo los microorganismos dañinos al hombre;
- Alcanzan altas densidades de población en poco tiempo, debido a su rápida reproducción y fácil manejo en camas;
- Producen subproductos útiles y negociables, tales como fertilizantes orgánicos (ácidos húmicos y fúlvicos) y vermicomposta;
- Son materia prima para producir harina de lombriz, con altos contenidos de proteína para la alimentación humana y animal.

En este sentido, Bollo (1992) menciona que las características más importantes de la vermicomposta son:

- Alto porcentaje de ácidos húmicos y fúlvicos cuya acción combinada permite una entrega inmediata de nutrientes asimilables y un efecto regulador de la nutrición que perdura hasta 5 años en el suelo.
- Alta carga microbiana que restaura la actividad biológica del suelo.
- Opera en el suelo mejorando su estructura, haciéndolo más permeable al agua, al aire, aumentando la retención de agua y la capacidad de almacenar y liberar los nutrientes requeridos por las plantas.
- Es un fertilizante bioorgánico activo que emana en el terreno una acción biodinámica y mejora las características organolépticas de las plantas, flores y frutos.
- Su pH es neutro y se puede aplicar en cualquier dosis sin riesgo de quemar la planta.

2.2.1. Características generales de la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*)

La lombriz roja de California (*Eisenia foetida*) se alimenta selectivamente de materiales con un alto contenido en nitrógeno, excretándolo en forma orgánica

metabólicamente soluble. El intervalo de pH en el que se desarrolla esta lombriz está comprendido entre 4.0 y 8.0; sin embargo, presenta una respuesta sensorial a la acidez, pudiendo secretar calcio en las glándulas calcífugas de su intestino cuando el medio es más ácido.

En el suelo mejoran la estabilidad de los agregados, estabilizando los materiales minerales y orgánicos, por la acción de los microorganismos que se desarrollan en las heces y fuera del intestino (Burgess, 1971; citado por Labrador, 2001), por el calcio secretado y por compuestos prehúmicos originados con la biodegradación y que actúan como cemento de las partículas minerales, dando una mejor resistencia del agregado y una mejora de la retención hídrica: finalmente también remueven el suelo y originan pequeñas galerías, con lo que actúan positivamente sobre la conductividad hidráulica, el drenaje y la porosidad (Labrador, 2001).

Los puntos más importantes a considerar dentro de los requerimientos de la lombriz roja son: la humedad, el pH, la oxigenación, la iluminación y las características del alimento (Reines *et al.*, 2001).

La humedad en las camas de las lombrices debe ser 80% de la capacidad de campo (Martínez 1999; Martínez, 2000; Reines *et al.*, 2001). Además, la mayoría de las especies de lombrices prefieren los suelos con pH cercano a 7 (Edwards y Lofty, 1977, citado por Trejo-Téllez, 1995; Martínez, 2000). Por otro lado, las lombrices se desarrollan mejor a una temperatura entre 24 y 27 °C. (Reines *et al.*, 2001). Martínez (1999) menciona que la temperatura óptima es de 25 °C.

Dependiendo de la relación C/N será el tiempo de maduración y transformación del desecho antes de ser entregado a la lombriz; una relación alta da como resultado mayor tiempo en el proceso de descomposición. Se considera que la relación óptima al inicio del proceso debe ser entre 26/1 y 35/1 para finalmente quedar entre 20 y 10 (Martínez, 2000).

Martínez (1999) presenta el siguiente cuadro para resumir las principales características y los principales requerimientos de la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características generales de *Eisenia foetida* (Martínez, 1999).

Característica	Valor o indicador
Color	Rojo-rosa
Tamaño	7-12 cm
Madurez sexual	10-12 semanas
Peso	1 a 2.5 g
Temperatura óptima	25 °C
pH ideal	6.8 - 7.2
Humedad	70-80 %

2.3. Propiedades de las vermicompostas

La vermicomposta es un abono que se puede utilizar no solo como fuente natural de nutrientes sino también como un efectivo mejorador o acondicionador de suelos y un eficiente sustrato nutritivo para el crecimiento y desarrollo de las plantas, mejorando la fertilidad química y física de los suelos gracias a las características de este material orgánico (Cuadro 2).

Cuando se adiciona al suelo o como medio de crecimiento (sustrato), usualmente mejora el desarrollo y crecimiento de plántulas e incrementa la productividad de una gran variedad de cultivos. Dicha mejora es atribuida a sus características físicas y químicas de este material procesado (Atiyeh *et al.*, 2000b).

Cuadro 2. Características de las vermicompostas (Bollo, 2005).

Característica	Valor o indicador
pH	6.8 - 7.2
Materia Orgánica (%)	30 a 50
CaCO ₃ (%)	8.0 - 14.0
Cenizas (%)	27.9 - 67.7

Carbono Orgánico (%)	8.7 - 38.8
Nitrógeno Total (%)	1.5 - 3.35
NH ₄ /N Total (%)	20.4 - 6.1
NO ₃ /N Total (%)	79.6 - 97.0
N-NO ₃ (ppm)	2.18 - 1.693
Ácidos H/Ácidos F	1.43 - 2.06
P Total (ppm)	700 - 2.500
K Total (ppm)	4.400 - 7.700
Ca Total (%)	2.8 - 8.7
Mg Total (%)	0.2 - 0.5
Mn Total (ppm)	260 - 576
Cu Total (ppm)	85 - 490
Zn Total (ppm)	87 - 404
Capacidad de Retención Humedad	1.3 cm ³ kg ⁻¹ de material seco
CIC (cmol _c kg ⁻¹ de humus)	150 - 300
Actividad Fitohormonal	1 mg L ⁻¹ de C.H.S.
Superficie Específica	700 a 800 m ² g ⁻¹
Humedad (%)	45-55
Relación C:N	9:13
Flora Microbiana	20 a 50.000 millones g ⁻¹ de material seco

2.3.1. Biológicas

La característica más importante de la vermicomposta es su alta carga microbiana (Martínez, 1999; Capistrán *et al.*, 2001; Reines *et al.*, 2001), lo cual le hace ubicarse como un excelente material regenerador de suelos (Martínez, 1999).

Las lombrices favorecen el desarrollo de microorganismos en su tracto digestivo con los cuales vive en simbiosis, ya que dichos microorganismos le ayudan a metabolizar y transformar muchas sustancias que la lombriz no podría digerir por si misma (Capistrán *et al.*, 2001); de tal forma se da esta asociación lombrices-microorganismos, en la que ambas partes se benefician y en conjunto dan lugar a un proceso de alta eficiencia y rapidez. De hecho, el procedimiento dura el justo tiempo que la lombriz tarda en comer y defecar la materia orgánica, lo que se ha calculado en no más de 4-5 horas (Edwars y Boleen, 1996; citado por Capistrán *et al.*, 2001).

Otro aspecto importante que menciona Capistrán *et al.* (2001) es el hecho que cada unidad de excreta (al que le llama turrículo) está recubierta de una membrana gelatinosa y nutritiva conocida como membrana peritrófica que proporciona un desarrollo favorable a los microorganismos fuera del intestino de la lombriz. Con esta presencia de microorganismos, aun fuera del intestino de las lombrices, continúa todavía la transformación orgánica bajo condiciones de humedad y disponibilidad de nutrimentos.

La cantidad y tipo de microorganismos contenidos en el tracto digestivo y en las excretas de las lombrices, depende en gran medida del tipo de alimento, siendo un factor muy importante el pH, pues los hongos prefieren los medios ácidos, mientras que las bacterias proliferan mejor en medios neutros, pudiéndose decir que el tracto contiene una rica flora microbiana que favorece la formación de micorrizas (Bello, 2003).

Dichos microorganismos son los responsables de la síntesis de nuevas sustancias y compuestos orgánicos que serán inoculados, junto con una gran cantidad de los mismos microorganismos a las excretas de la lombriz (Cuadro 3). Dentro de los compuestos originados se encuentran los antibióticos que protegen contra el crecimiento y multiplicación desmedida de patógenos y enfermedades. (Capistrán *et al.*, 2001).

Se ha demostrado que la incidencia de enfermedades de las plantas puede ser controlada por las vermicompostas. Además, debido a la presencia de este material se ha observado incremento en la actividad de la micorriza vesículo arbuscular y se ha suprimido la población de nemátodos (Atiyeh *et al.*, 2002a).

Cuadro 3. Microflora contenida en el abono de lombrices (Velazco y Fernández, 1989 citado por Capistrán *et al.*, 2001).

Microorganismos	Nivel	μg equivalente g^{-1} de material seco
-----------------	-------	--

Bacterias del suelo	Alto	110 millones
Actinimorfis	Medio	3100 millones
Hongos	medio	10,700 millones
Población bacteriana específica para los ciclos de C, N y P		
Bacterias celulolíticas	células g ⁻¹	45
Bacterias que deshidratan almidón	células g ⁻¹	8,450 millones
Bacterias amino-oxidantes	células g ⁻¹	1.4 millones
Bacterias nitrito-oxidantes	células g ⁻¹	1.4 millones
Bacterias nitro fijadoras libres	células g ⁻¹	45
Bacterias solubilizadoras de fósforo	células g ⁻¹	1,350

Gajalakshmi *et al.* (2001), señalan que dentro de los beneficios de las vermicompostas, está la aportación de enzimas y hormonas que estimulan el crecimiento de las plantas e impiden la proliferación de organismos patógenos.

2.3.2 Físicas

La alta superficie específica (700 a 800 m² g⁻¹) de este material, se traduce en una mayor superficie de contacto que permite retener más agua, gran parte de la cual puede ser aprovechada por los vegetales (Bollo, 2005).

Presenta gran capacidad de retención de humedad (Gajalakshmi *et al.*, 2001) de hasta 1.3 veces su volumen, permitiéndole ser un abono captador de agua, con baja plasticidad y cohesión (García, 1996; citado por Bello, 2003). Debido a la característica de la vermicomposta de lograr mejoras físicas y aumentar la capacidad de retención de humedad en el suelo que lo contiene, presenta la propiedad de atenuar los fenómenos erosivos hídricos que se producen en suelos desnudos (Bollo, 2005).

Tomando en cuenta que este material se comporta como "esponja" captadora de agua, que presenta un tamaño de partícula pequeña y baja plasticidad y cohesión, hacen de él un excelente sustrato de germinación, ya que cumple con los requisitos para que en él las semillas germinen y emerjan sin encontrar a su paso barreras mecánicas que eviten o retrasen su salida a la superficie (Bollo, 2005).

Quiñones (2000) evaluó diferentes sustratos para jitomate en invernadero que consistían en mezclas de tezontle, vermicomposta, carbón y suelo en diferentes proporciones, encontrando que la mezcla suelo-vermicomposta 95% + 5%, resultó ser la más eficiente, siendo suficiente tres riegos por semana para un total de 45 en el período de estudio después del trasplante, en comparación con 150 y 210 riegos para los tratamientos que más agua necesitaron, dando como consecuencia un ahorro en solución nutritiva, menos utilización de agua, menos jornales de riego y un ahorro económico (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación en uso de agua por plantas de jitomate establecidas en diferentes sustratos.

Tratamiento	Riegos semana ⁻¹ planta ⁻¹	Riegos tratamiento ⁻¹	L planta ⁻¹ ciclo ⁻¹	semanas	Eficiencia g planta ⁻¹ L ⁻¹ Tratamiento ⁻¹
1 (T+V+C)	5	75	281	15	38.00
2 (T+V+C)	5	75	206	15	46.09
3 (T+V+C)	10	150	412	15	25.17
4 T	14	210	525	15	19.90
5 S+V	3	45	45	15	179.50

T=tezontle; V=vermicomposta; C=carbón. 1=57.5+37.5+5; 2=47.5+47.5+5; 3=67.5+27.5+5; 4 = 100; 5 = 95+5

2.3.3 Químicas

Dentro del proceso de la descomposición orgánica de la vermicomposta se da la formación de sustancias húmicas. Estas sustancias tienen una composición química a base de carbono, hidrógeno y oxígeno, con una organización coloidal de partículas muy pequeñas (Capistrán *et al.*, 2001). Cada partícula cargada negativamente (aunque la carga es dependiente del pH) (Porta *et al.*, 1999), es capaz de retener por adherencia infinidad de cationes (Capistrán *et al.*, 2001).

Presenta capacidad de intercambio catiónico entre 150 y 300 cmol_c kg⁻¹ de suelo seco, lo que le permite aumentar fuertemente la capacidad de retención de nutrimentos y agua utilizables por las plantas (Bollo, 2005).

Las vermicompostas presentan una baja relación carbono:nitrógeno (13 a 9), lo cual permite evitar fenómenos de competencia por nutrimentos (nitrógeno) entre los microorganismos del suelo y los cultivos que en él se desarrollen (Bollo,

2005). Además presenta capacidad amortiguadora o capacidad “buffer” (Porta *et al.*, 1999; Capistrán *et al.*, 2001).

a. Características nutrimentales

Las vermicompostas contienen nutrimentos en formas muy fácilmente asimilables por las plantas como nitratos, fósforo intercambiable, y potasio, calcio y magnesio soluble (Orozco *et al.*, 1996; Albanell *et al.*, 1988).

Se ha encontrado en diversas investigaciones que el uso de la vermicomposta sola o en combinación con fertilizantes químicos en la producción de cultivos incrementa, la calidad comercial y los rendimientos de éstos en comparación con testigos fertilizados solo químicamente o a los que no se aplica vermicomposta, lo que posibilita la reducción del uso de fertilizantes químicos (Atiyeh *et al.*, 2000a; Gajalakshmi *et al.*, 2001; Moreno y Aguilera, 2003; Cano y Márquez, 2004; Moreno-Reséndez *et al.*, 2005).

Otras investigaciones mencionan el efecto positivo que tiene la aplicación de vermicomposta junto con la inoculación de micorrizas sobre la tasa fotosintética y el incremento en producción en cultivos como el tomate de cáscara y el chile serrano (Manjarrez *et al.*, 1999; Velasco *et al.*, 2001).

El contenido nutrimental de la vermicomposta es variable como la composición química del sustrato que fue usado para alimentar a las lombrices, la calidad del mismo y la variedad de lombriz que se use (Cuadro 5). Un manejo adecuado de los desechos, una mezcla bien balanceada permite obtener un material de buena calidad (Martínez, 1999). El aporte nutrimental de la vermicomposta no es elevado; sin embargo, su principal beneficio es el aportar sustancias prehúmicas (Bello, 2003), lo que facilita a la planta una mejor absorción de nutrimentos asimilables. Sin embargo en algunos casos se ha encontrado que la vermicomposta si llega a suplir las necesidades nutrimentales de ciertas especies vegetales bajo ciertas condiciones (Moreno y Aguilera, 2003).

Capistrán *et al.* (2001), presentan una tabla con diferentes contenidos nutrimentales de vermicomposta citando varios autores (Cuadro 5).

Cuadro 5. Principales nutrimentos de las plantas en vermicompostas de diferentes sustratos (% en base seca) (Capistrán *et al.*, 2001).

Sustrato	N	P	K	Ca	Mg	Autores
ORIGEN ANIMAL						

Estiércol vacuno (E. U. A)	2.98	0.32	0.40	1.20	0.36	Fosgata y Babb, 1972
Estiércol vacuno (Inglaterra)	2.20	0.40	0.90	1.20	0.25	Edwards y Burrows, 1988
Estiércol vacuno (Cuba)	1.70	0.62	1.22	10.0	1.53	Ramón y Romero, 1993
Estiércol vacuno (Perú)	1.20	0.95	0.47	-	-	Ríos y Calle, 1994
Estiércol vacuno (Brasil)	0.60	0.34	0.13	0.40	0.20	Martínez, 1995
Estiércol vacuno (México)	1.50	0.67	1.23	1.00	1.10	Lombrimex, 1996
Estiércol vacuno (México)	2.00	0.72	1.22	3.80	1.70	Santamaría, 1996
E. vacuno/Paja (Inglaterra)	2.50	0.50	2.50	1.55	0.30	Edwards y Burrows, 1988
E. vacuno/Desperdicios Mercado (México)	1.71	0.64	1.16	3.50	1.50	Santamaría, 1996
Estiércol de cerdo (Inglaterra)	2.60	1.70	1.40	3.40	0.55	Edwards y Burrows, 1988
Estiércol de cerdo (Hong Kong)	1.10	3.20	1.20	-	-	Wong y Griffiths, 1991
Estiércol de cerdo (Cuba)	1.89	0.50	0.34	10.8	1.46	Ramón y Romero, 1993
Estiércol de cerdo/paja (Inglaterra)	3.00	1.60	2.40	4.00	0.60	Edwards y Burrows, 1988
Estiércol de borrego (España)	1.76	4.37	1.02	-	-	Albanel et al., 1988
Estiércol de borrego (Cuba)	1.51	0.64	0.78	4.40	1.37	Ramón y Romero, 1993
Estiércol de borrego/algodón (España)	1.71	4.31	0.96	-	-	Albanel et al., 1988
E. borrego/orujo (Perú)	2.60	0.13	0.01	0.24	0.24	Quevedo, 1994
Estiércol de conejo (Cuba)	1.23	0.28	0.67	-	-	Ramón y Romero, 1993
Estiércol de pato/paja (Inglaterra)	2.60	2.00	1.70	9.50	1.00	Edwards y Burrows, 1988
Gallinaza/viruta (Inglaterra)	1.80	2.70	2.10	4.80	0.70	Edwards y Burrows, 1988
Contenido ruminal (Cuba)	1.68	0.62	1.21	9.80	1.58	Ramón y Romero, 1993
ORIGEN VEGETAL						
Pulpa de café (México)	2.86	0.14	0.76	1.62	0.28	Aranda, 1987
Pulpa de café (Colombia)	2.01	0.27	2.14	0.96	0.37	Arango y Dávila, 1991
Pulpa de café (Colombia)	3.80	0.25	0.17	0.70	0.20	Rodríguez et al., 1992
Pulpa de café (Cuba)	2.01	0.27	2.14	1.96	0.37	Ramón y Romero, 1993
Pulpa de café (México)	4.00	0.25	0.73	1.72	0.80	Insson, 1995
Pulpa de café (México)	3.50	0.13	1.39	1.70	0.60	Uncador, 1996
Pulpa de café (México)	2.29	0.54	0.13	3.72	4.54	Ramos, 1996
Pulpa/vacuno/hojas/tierra ¹ (México)	1.69	0.54	0.23	2.80	4.42	Ramos, 1996
Lodos celulolíticos (Italia)	1.10	0.57	0.29	8.02	0.53	Piccone <i>et al.</i> , 1987
Cachaza de caña (Cuba)	2.67	2.11	0.40	4.08	1.89	Ramón y Romero, 1993
Paja de cultivo de hongos (México)	1.69	0.23	0.73	2.20	0.80	Santamaría, 1996
Residuos domésticos (Italia)	1.21	0.98	0.26	12.2	0.60	Piccone <i>et al.</i> , 1987
Residuos domésticos (Cuba)	0.90	0.44	3.60	3.60	3.10	Ramón y Romero, 1993
Desperdicios de mercado (México)	1.87	0.55	1.20	2.50	1.30	Santamaría, 1996
Desperd. de merc./paja de cultivo de hongos (México)	2.10	0.50	1.22	2.20	1.20	Santamaría, 1996
Desperd. de merc./Paja de cultivo de hongos/E. vacuno ²	1.83	0.60	1.24	3.30	1.40	Santamaría, 1996
Mezcla "Biodinámica" ³ (México)	1.46	0.56	0.22	33.3	29.4	Ramos, 1996
Tallos de plátano (Cuba)	2.50	0.56	3.74	2.36	1.50	Ramón y Romero, 1993
Hojarasca (Suiza)	0.80	0.34	0.82	1.96	0.53	Lofs-Homin, 1985
Pastos, corteza y estiércoles (Finlandia)	1.40	0.03	0.04	0.20	0.03	Haimi y Huhtam, 1987
Cáscara de mafafa (Nigeria)	1.98	0.14	1.80	0.40	0.14	Mba, 1983
Residuos farmacéuticos (Italia)	3.10	0.82	0.26	8.80	0.54	Piccone <i>et al.</i> , 1987
Peat moss comercial (Inglaterra)	1.80	0.21	0.48	0.94	2.20	Edwards y Burrows, 1988

¹ Pulpa de café: 42%; estiércol vacuno: 42%; hojarasca 7%; Tierra 9%.

² Desperdicios de mercado 30%; Paja de cultivo de hongos 40%; estiércol vacuno 30%

³ Pulpa de café 21%; estiércol vacuno 21%; cachaza 21%; hojarasca y pastos 21%; tierra 16%.

Cano y Márquez (2004) compararon parcelas de jitomate producido en vermicomposta, una composta comercial y jitomate producido con fertirrigación, encontrando que si bien el testigo (fertirrigación) tiene el doble de rendimiento que

el producido solo con vermicomposta, la calidad de ambos es similar e incluso el producido con vermicomposta presenta mayor contenido de sólidos solubles (°Brix) característica relacionada con la vida de anaquel. Además de acuerdo a los datos económicos para producir en fertirrigación se necesita de una fuerte inversión cosa que no sucede en la producción con vermicomposta donde el capital de trabajo requerido es mucho menor al ser la vermicomposta un producto que se puede obtener de forma casera, adicionalmente al ser producido (el jitomate) sin el uso de fertilizantes sintéticos puede tener acceso a otros mercados donde la demanda de este tipo de productos llega a pagar el doble del precio por lo que prácticamente los ingresos también serían similares en ambos casos.

b. Ácidos húmicos y reguladores de crecimiento

La vermicomposta presenta otros componentes (Cuadros 6 y 7) como son los ácidos húmicos y fúlvicos (Bello, 2003; Atiyeh *et al.*, 2002b; Capistrán *et al.*, 2001; Martínez, 1999; Grapelli *et al.*, 1985), compuestos de regulación biológica, como son enzimas, hormonas (Capistrán *et al.*, 2001; Gajalakshmi *et al.*, 2001) y vitaminas, los cuales son compuestos activos que funcionan como verdaderos reguladores de los procesos bioquímicos de las plantas y los suelos. Interactúan de manera repetida sin desactivarse, tanto con el suelo como con las plantas y además regulan la liberación o absorción de otros nutrimentos presentes en los suelos (Capistrán *et al.*, 2001; Chen y Aviad, 1990).

Algunos efectos que presentan las sustancias húmicas son: aportación de nutrimentos, incrementan la población de microorganismos, quelatante natural, incrementa la permeabilidad de la membrana celular, favorece la respiración, biosíntesis de ácidos nucleicos, la absorción nutrimental por las raíces de las plantas y actividad enzimática, y promueven efectos parecidos a los reguladores de crecimiento (Arancon *et al.*, 2004a; Atiyeh *et al.*, 2002b; Nardi *et al.*, 2002; Varanini y Pinton, 2001; Yang *et al.*, 2004).

Ferretti *et al.* (1991, citado por Yang *et al.*, 2004) encontró que los ácidos húmicos de bajo peso molecular promueven la asimilación de sulfatos en maíz.

Cuadro 6. Compuestos húmicos en vermicomposta (Irisson, 1995; citado por Capistrán *et al.*, 2001).

Elemento	Unidad	Intervalo
----------	--------	-----------

Huminas	%	60-80
Acido húmico	%	15-30
Acido fúlvico	%	5-10
Relación húmicos/fúlvicos	Relación	2.0-3.0

Cuadro 7. Contenido de fitohormonas en vermicomposta (Grapelli *et al.*, 1987; citado por Capistrán *et al.*, 2001).

Sustancia	Nivel	$\mu\text{g equiv. g}^{-1}$ seco
Citocininas (IPA)	Medio	0.80-1.22
Giberelinas (GA3)	Medio	1.80-2.75
Auxinas (AIA)	Medio	1.80-3.80

Las sustancias húmicas presentan reacciones de superficie con otros compuestos, formando complejos, ya sea directamente o a través de iones metálicos. Los quelatos (complejos) se pueden formar con hierro, aluminio, zinc, manganeso, cobre, o níquel, por lo que es importante en procesos de translocación, así como de inmovilización de metales tóxicos. Por otro lado también hay formación de complejos con productos fitosanitarios y participa en la inmovilización, degradación y persistencia en el suelo (Porta *et al.*, 1999).

En general, Varanini y Pinton (2001) mencionan que las sustancias húmicas en el suelo contribuyen a regular el balance químico de metales, así como influenciar su solubilidad. Respecto a la disponibilidad para las plantas es importante considerar las dimensiones moleculares y la solubilidad de las sustancias húmicas. Los mismos autores mencionan que las fracciones con alto peso molecular son sobre todo insolubles y pueden retener grandes cantidades de metales, especialmente en condiciones alcalinas. Lo anterior es importante ya que se crea una reserva de nutrimentos (sobre todo de micronutrimentos).

Por otra parte, bajo condiciones de concentraciones altas de metales la formación de complejos con las sustancias húmicas puede limitar la cantidad de metales en solución, lo que favorece al reducir a niveles no tóxicos la actividad de ciertos elementos, sobre todo de metales pesados (Varanini y Pinton, 2001).

Mitchell (1997) citado por Santamaría (2000), menciona que el contenido de sodio en materiales composteados es menor en presencia de lombrices que en ausencia, encontrando un 50% de reducción de dicho elemento en la vermicomposta respecto a los residuos antes del composteo.

Por otro lado, el aporte de una amplia gama de sustancias fitorreguladoras del crecimiento por parte de las vermicompostas, le permite ser utilizado con muy buenos resultados en propagación clonal de plantas (Martínez, 1999). Además, se sugiere que esta actividad fitohormonal tiene efectos sobre semillas en germinación y plántulas en crecimiento, ya que en una primera etapa aumentaría la tasa mitótica del tejido caulinar y radicular, para en una segunda, favorecer el desarrollo de raíces con lo cual las plantas se encuentran mejor preparadas para resistir dentro de ciertos rangos, los efectos depresivos de crecimiento causado por un insuficiente contenido de humedad en el suelo de cultivo (Bollo, 2005).

En la literatura existen referencias que demuestran que los reguladores de crecimiento de las plantas, tales como el ácido indol-acético (auxinas), giberelinas y citocininas, son generados por microorganismos, y en dichas referencias se ha sugerido que la promoción de la actividad microbiana en la materia orgánica por las lombrices podría provocar la producción de cantidades significativas de reguladores de crecimiento: auxinas, giberelinas y citoquininas (Atiyeh *et al.*, 2002b).

Grapelli *et al.* (1987; citado por Capistrán *et al.*, 2001) encontraron en excretas de lombrices composteras sustancias parecidas a giberelinas, auxinas y citocininas (Cuadro 7), y demostraron que el uso de este material permite un mejor enraizamiento de estacas de diferentes especies vegetales en comparación con el control (Grapelli *et al.*, 1985), además mencionan que la composta convencional (sin lombrices) no presenta los mismos beneficios (Cuadro 8). A este respecto Tomati *et al.* (1993) mencionan que la propagación de plantas es estrictamente dependiente de la rizogénesis, la cual es controlada por las fitohormonas. Las fitohormonas sintéticas –particularmente auxinas- son usadas para estimular el enraizamiento.

Cuadro 8. Efectos del tratamiento de vermicomposta sobre el enraizamiento después de 6 semanas (Grapelli *et al.*, 1985).

Especie y medida	Control	Vermicomposta:control Mezcla 1:1 (peso de biomasa fresca))	vermicomposta
<i>Ficus elastica</i>			
peso de biomasa fresca (g)	6	8	12**
longitud de raíz (cm)	5	6	10**
<i>Dracaena deremensis</i>			
peso de biomasa fresca (g)	5	6	9*
longitud de raíz (cm)	9	10	13*
<i>Dieffenbachia amonea</i>			
peso fresco (g)	10	10	15**
longitud de raíz (cm)	9	9	12*

** , * : significancia al 1 y 5% respectivamente.

Los resultados de Reyes *et al.* (1998, 2001) al adicionar vermicomposta al sustrato donde se plantó aguacate (portainjerto) mostraron un efecto positivo en el diámetro del tallo y altura de la planta de aguacate en vivero, además de un mejor desarrollo del injerto cuando se adicionaba vermicomposta que cuando no se hacia.

Muscolo *et al.* (1999) encontraron que la aplicación de excretas de lombriz *Nicodrilus caliginosus* y *Allolobophora rosea* (que también son lombrices composteras) a células de zanahoria provocaron los mismos efectos que al tratarlas con auxinas (AIA), promoviendo crecimiento celular, incremento de aminoácidos y afectando el metabolismo de los nitratos. Ellos concluyeron que este material puede influenciar el crecimiento vegetal vía efectos fisiológicos gracias a que contienen sustancias húmicas de bajo peso molecular que tenían efectos parecidos a hormonas reguladoras del crecimiento.

2.3.4 Uso de la fracción líquida de vermicomposta

a. Definición

Los extractos de vermicomposta a base de agua pueden ser utilizados para adicionarlos a la superficie del suelo o a las plantas de manera foliar. Estos productos puede ser de dos tipos, lixiviados de las camas de vemicomposta y extractos acuosos de vermicomposta madura (Recycled Organics Unit, 2003).

Los extractos acuosos se obtienen de vermicomposta madura que ha sido remojada excesivamente en agua, filtrado los sólidos para obtener un producto líquido. Usualmente están compuestos de una solución de nutrientes orgánicos e inorgánicos y un gran número de organismos, incluyendo bacterias y hongos (Recycled Organics Unit, 2003).

b. Calidad

En la actualidad no existen estándares internacionales o estándares industriales para la producción de extractos de vermicomposta. Debido a que no existen métodos de manufactura estandarizados, la concentración de nutrientes, organismos vivos y tamaño de las partículas sólidas es variable en dichos materiales (Recycled Organics Unit, 2003).

c. Uso y beneficios

Los extractos de vermicomposta, tienen usos a pequeña y gran escala, pueden ser utilizados en almácigos, plantas de maceta, en suelo de cultivos agrícolas y asperjados de manera foliar (Recycled Organics Unit, 2003).

Los extractos de vermicomposta reducen potencialmente el riesgo de toxicidad por aluminio en suelos ácidos (Alter y Mitchell, 1992; Mitchell y Alter, 1993). Es posible, que controlen enfermedades como la fracción sólida, además se sugiere que contienen hormonas del crecimiento que pueden favorecer el crecimiento de las plantas (Recycled Organics Unit, 2003).

El almacenamiento por mucho tiempo puede provocar un decremento en la actividad microbiana, y por lo tanto puede perder efectividad para controlar enfermedades. Estos productos deben ser usados poco después de su preparación (Recycled Organics Unit, 2003).

Las dosis de aplicación son difíciles de especificar debido a la variabilidad de su composición y a la ausencia de productos estándares. En muchos casos el extracto de vermicomposta necesita ser diluido en agua antes de realizar una aplicación a las plantas o al suelo. Pueden ser inoculados con diferentes microorganismos para aumentar su capacidad de control de enfermedades (Recycled Organics Unit, 2003).

d. Métodos de aplicación

Para pequeñas aplicaciones, como jardines de casas, el extracto puede ser aplicado directamente a las plantas o al suelo con regaderas o aspersoras manuales. En el caso de grandes aplicaciones, pueden ser incorporados al suelo por medio de los sistemas de riego o aspersión.

e. Investigación actual

En México existen pocas investigaciones sobre los beneficios y usos de extractos de vermicomposta, encontrándose una sola investigación para el uso de lixiviados de vermicomposta y dos sobre extractos de otros materiales orgánicos.

Morales (2006), aplicó foliarmente lixiviados de vermicomposta a plantas de nochebuena, no encontrando efectos significativos en la concentración nutrimental en las hojas y brácteas de dicha planta.

Capulín (1999, 2004) confirma que el extracto líquido de estiércol de bovino (ELEB) contiene los nutrimentos para el desarrollo de las plantas y que sólo requiere un complemento de nitrógeno, fósforo, calcio y azufre para obtener una solución nutritiva completa y balanceada.

Suárez (2001), aplicó a cempoalxóchitl desarrollado en macetas con suelo, extracto líquido de estiércol digerido anaerobicamente (ELEDA) diluido al 5% con una CE de 2.26 dS m^{-1} y encontró que las plantas tuvieron un mejor crecimiento y floración comparadas con el testigo; además el extracto presentó una mayor cantidad de nutrimentos hidrosolubles como potasio, sodio, magnesio y amonio que la fracción sólida de este material digerido.

2.4 Conclusiones de la revisión de literatura

Los abonos orgánicos contienen todos los nutrimentos que las plantas requieren. Además del aporte nutrimental ejercen un efecto benéfico sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, que repercuten en un mejor desarrollo y rendimiento de los cultivos.

El compostaje es un proceso biooxidativo y controlado, en el que intervienen una gran diversidad de microorganismos que ha sido empleado por los agricultores para reutilizar los residuos orgánicos procedentes de la actividad agrícola y de la doméstica, consiguiendo un abono orgánico de buena calidad.

El vermicompostaje es una modificación del composteo normal donde además intervienen lombrices composteras, resultando un abono con una elevada

carga enzimática y bacteriana, además de otros compuestos como fitoreguladores y sustancias húmicas que le dan ciertas características especiales, que los materiales composteados en ausencia de lombrices no tienen.

Las características anteriores le permiten (al abono de vermicomposta) influir en forma efectiva en la germinación de las semillas y en el desarrollo de las plantas, aumentando notablemente el porte de las mismas, por el efecto fisiológico que realizan las sustancias húmicas y los reguladores de crecimiento que contienen. Durante el trasplante previene enfermedades y lesiones por cambios bruscos de temperatura y humedad. Se puede usar sin inconvenientes en estado puro y se encuentra libre de nemátodos, su pH neutro lo hace sumamente confiable para ser aplicado a plantas delicadas.

El uso de extracto de vermicomposta es poco conocido y usado en México, situación que se refleja en el número de investigaciones realizadas en México con dichos productos, a pesar de que se presume que presenta los mismos beneficios de la fracción sólida y que además, los extractos pueden ser aplicados en el sistema de riego o vía foliar. Los resultados de las investigaciones en México han mostrado poca efectividad al aplicarlas foliarmente; y en forma contraria, se han obtenido resultados positivos cuando estos productos se incorporan al suelo.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Estudiar el efecto de distintas proporciones de extracto de vermicomposta y de solución nutritiva de Steiner (v:v) sobre variables vegetativas, absorción nutrimental y calidad comercial de lechuga en un sistema hidropónico bajo condiciones de invernadero.

3.2. Objetivos específicos

Determinar si la combinación de extracto de vermicomposta y solución nutritiva de Steiner tiene influencia en el comportamiento de variables vegetativas en lechuga.

Investigar el efecto del extracto de vermicomposta sobre la absorción nutrimental en lechuga.

Evaluar la influencia de la combinación de distintas proporciones de extracto de vermicomposta y la solución de Steiner (v:v) sobre la calidad comercial de lechuga.

IV. HIPÓTESIS

4.1. Hipótesis general

La adición de extracto de vermicomposta a la solución nutritiva de Steiner tiene efectos en variables vegetativas, absorción de nutrimentos esenciales y en el incremento de la calidad en lechuga.

4.2. Hipótesis específicas

El extracto de vermicomposta adicionado a la solución nutritiva de Steiner tiene un efecto positivo en los valores de variables vegetativas de lechuga como altura de planta, número de hojas, peso de biomasa seca, lecturas SPAD y área foliar.

La combinación de extracto de vermicomposta a la solución nutritiva de Steiner incrementa el contenido de nutrimentos esenciales en el tejido foliar de lechuga.

La combinación de extracto de vermicomposta con la solución nutritiva de Steiner aumenta los indicadores calidad comercial de lechuga.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del experimento y condiciones experimentales

El cultivo hidropónico de lechuga se estableció en un invernadero con una estructura semicircular, cubierto con plástico calibre 600, ubicado en el km. 36.5 de la carretera México-Texcoco, Montecillo, Municipio de Texcoco Estado de México.

5.2. Material vegetal

El material vegetal de lechuga utilizada fue *Lactuca sativa* var. *longifolia* cv. Parris Island (Figura 1). Planta erecta que produce hojas largas abundantes, onduladas del tipo orejona. Este cultivar se caracteriza por ser vigorosa y uniforme y que presente una cabeza de mediana a grande (Harris Moran Seed Company, 2005).



Figura 1. *Lactuca sativa* var. *longifolia* cv. Parris Island Cos

Lactuca sativa L. var. *longifolia* (Lam.) Janchen: corresponde a las lechugas llamadas Romanas o Cos. La planta desarrolla hojas grandes, erguidas, oblongas y obovadas, de 20 a 30 cm de largo y 6 a 10 cm de ancho, con nervadura prominente, superficie ligeramente ondulada, y borde irregularmente denticulado. El tallo se presenta de mayor longitud que las variedades capitata y crispera, y permanece protegido por el conjunto de hojas, las que forman una cabeza cónica o cilíndrica, por su disposición erecta, pudiendo alcanzar un gran peso de hasta 2 kg. Los cultivares más conocidos son Conconina, Corsica, Costina Abarca, Parris Island, Romabella, Odessa y Oreja de Mulo (Krarup y Moreira, 1998).

5.3. Sistema hidropónico

Se usó un sistema abierto de hidroponía con riego por goteo (Figura 2), el cual emplea goteros (sc4 lph Spider 4 salidas y estaca flujo turbulento), localizados en cada bolsa.

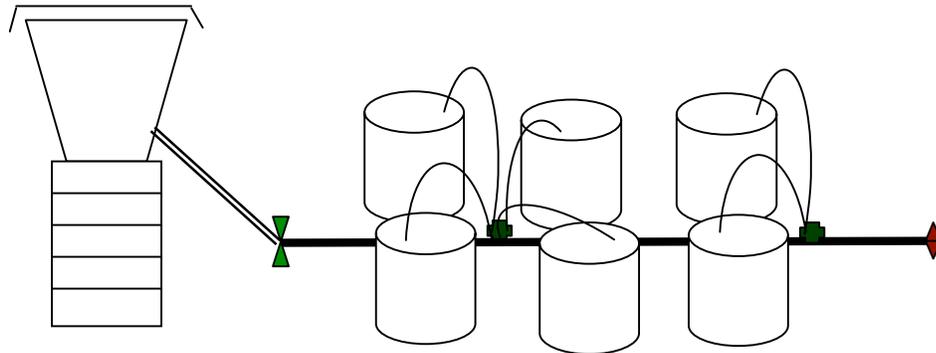


Figura 2. Esquema del sistema hidropónico utilizado en el experimento.

5.4. Diseño de tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental usado fue completamente al azar factorizado. En el estudio se trabajaron dos factores: Extracto de vermicomposta (EV) y Solución nutritiva de Steiner (S); ambos en 5 niveles (0, 25, 50, 75 y 100% en unidades de volumen), resultando un experimento factorial 5^2 (Cuadros 9 y 10). Cada tratamiento constó de 3 repeticiones. Cada unidad experimental quedó representada por seis plantas en un modulo hidropónico (Figura 3).

Cuadro 9. Factores y niveles evaluados.

Factor	Niveles	Nomenclatura
Extracto de vermicomposta (V)	0	V ₀
	25	V ₂₅
	50	V ₅₀
	75	V ₇₅
	100	V ₁₀₀
Solución nutritiva de Steiner (S)	0	S ₀
	25	S ₂₅
	50	S ₅₀
	75	S ₇₅
	100	S ₁₀₀

Cuadro 10. Tratamientos evaluados.

Factores	S ₀	S ₂₅	S ₅₀	S ₇₅	S ₁₀₀
V ₀	V₀ S₀	V ₀ S ₂₅	V₀ S₅₀	V ₀ S ₇₅	V₀ S₁₀₀
V ₂₅	V ₂₅ S ₀	V₂₅ S₂₅	V ₂₅ S ₅₀	V₂₅ S₇₅	V ₂₅ S ₁₀₀
V ₅₀	V₅₀ S₀	V ₅₀ S ₂₅	V₅₀ S₅₀	V ₅₀ S ₇₅	V₅₀ S₁₀₀
V ₇₅	V ₇₅ S ₀	V₇₅ S₂₅	V ₇₅ S ₅₀	V₇₅ S₇₅	V ₇₅ S ₁₀₀
V ₁₀₀	V₁₀₀ S₀	V ₁₀₀ S ₂₅	V₁₀₀ S₅₀	V ₁₀₀ S ₇₅	V₁₀₀ S₁₀₀

Los tratamientos sombreados son los que fueron eliminados.



Figura 3. Vista de dos unidades experimentales.

Por cuestiones económicas y de espacio disponible en el invernadero se usó un factorial incompleto para el diseño de tratamientos, utilizando el “cuadrado doble” el cual permite probar 13 tratamientos en lugar de los 25 resultantes del factorial completo (5^2), presentando una misma área de exploración (Volke *et al.*, 2006).

5.5. Establecimiento del experimento

El almácigo se estableció el 15 de abril de 2006 en charolas de plástico de 200 cavidades regándolas diariamente con agua destilada. Una vez que presentaron las primeras dos hojas verdaderas los riegos se dieron con la solución de Hoagland al 25% (Hoagland y Arnon, 1950).

El transplante se realizó 27 días después de la siembra (12 de mayo de 2006), empleando tezontle (8 mm de diámetro) como sustrato contenido en bolsas de plástico negro (25 X 25 cm).

La distribución de los tratamientos de acuerdo al diseño experimental es el que se muestra en la Figura 4.

S ₅₀ V ₀ R ₂	S ₁₀₀ V ₀ R ₁				
S ₁₀₀ V ₀ R ₃	S ₂₅ V ₂₅ R ₂				
S ₀ V ₁₀₀ R ₃	S ₀ V ₅₀ R ₁	S ₀ V ₀ R ₁	S ₇₅ V ₂₅ R ₃	S ₀ V ₁₀₀ R ₂	S ₁₀₀ V ₁₀₀ R ₂
S ₁₀₀ V ₅₀ R ₂	S ₁₀₀ V ₅₀ R ₃	S ₇₅ V ₇₅ R ₂	S ₀ V ₅₀ R ₂	S ₁₀₀ V ₀ R ₂	S ₂₅ V ₂₅ R ₁
S ₀ V ₀ R ₂	S ₇₅ V ₇₅ R ₁	S ₅₀ V ₅₀ R ₂	S ₅₀ V ₁₀₀ R ₂	S ₂₅ V ₇₅ R ₁	S ₅₀ V ₅₀ R ₃
	S ₂₅ V ₇₅ R ₃	S ₁₀₀ V ₅₀ R ₁	S ₅₀ V ₅₀ R ₁	S ₀ V ₀ R ₃	S ₇₅ V ₂₅ R ₂
S ₅₀ V ₀ R ₃	S ₅₀ V ₁₀₀ R ₁	S ₅₀ V ₁₀₀ R ₃	S ₇₅ V ₇₅ R ₃	S ₁₀₀ V ₁₀₀ R ₁	S ₂₅ V ₇₅ R ₂
S ₀ V ₁₀₀ R ₁	S ₁₀₀ V ₁₀₀ R ₃	S ₇₅ V ₂₅ R ₁	S ₅₀ V ₀ R ₁	S ₀ V ₅₀ R ₃	S ₂₅ V ₂₅ R ₃

S = Solución de Steiner al 100, 75, 50, 25 y 0 %
V = Extracto de Vermicomposta al 100, 75, 50, 25 y 0 %
R = Repetición

Figura 4. Arreglo de tratamientos en el invernadero.

5.6 Obtención y Caracterización del extracto de vermicomposta

5.6.1. Obtención del extracto de vermicomposta (EV)

La obtención del extracto de vermicomposta se realizó solubilizando vermicomposta madura con una solución de KOH al 1% usando una relación de 1:10 (KOH 1%:vermicomposta) de acuerdo al siguiente procedimiento.

En un contenedor de 200 l de capacidad, al cual previamente se la había agregado 120 l de la solución de KOH al 1%, se le adicionaron 12 kg de vermicomposta madura, teniéndose de esta manera 10% de concentración de vermicomposta, la mezcla fue agitada hasta obtener una suspensión lo más homogénea posible. Posteriormente el contenedor fue cubierto para evitar proliferación de algas o de algún otro tipo de organismos en la solución.

Diario durante 15 días consecutivos, el contenedor fue destapado y se agitó la mezcla durante 5 min.

Al cabo de este tiempo la solución fue filtrada para separar el extracto (fracción líquida) de la parte sólida. El proceso de filtración se realizó con una malla de tul con aberturas de 1 mm.

El extracto obtenido se dejó reposar durante una semana, para que al cabo de este tiempo se pasara el extracto a contenedores negros de 100 l por decantación, se desecharon las partículas sólidas que pudieran haberse colado en el filtrado y evitar que éstas obturaran los goteros durante los riegos en el desarrollo del experimento.

El extracto se almacenó durante el tiempo que duró el experimento en los contenedores (mencionados anteriormente) dentro de un invernadero con cubierta de plástico lechoso calibre 720; el cual permite una transmitancia luminosa del 50%, para evitar que el extracto se calentara demasiado o recibiera demasiada luz.

5.6.2 Análisis químico de la fracción líquida

El análisis del extracto de vermicomposta se realizó en el laboratorio de nutrición vegetal del Colegio de Postgraduados. Se determinaron; pH (potenciometría), conductividad eléctrica (puente de conductividad) y nitrógeno total (método Semimicro-Kjeldahl). La determinación de fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, zinc, manganeso, boro y sodio se realizó mediante la técnica de espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente. Para esto, se hizo pasar la fracción líquida a través de papel filtro Whatman No. 42. Posteriormente, los extractos obtenidos fueron leídos en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma ICP-AES VARIAN™ Liberty II.

5.6.3 Tratamiento del extracto

Las soluciones resultantes de la mezcla de las distintas proporciones de extracto de vermicomposta y de solución nutritiva de Steiner fueron ajustadas a un pH de 5.8. Sin embargo, presentaron distintos valores de conductividad eléctrica (CE) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Valores de la conductividad eléctrica de los diferentes tratamientos.

TRATAMIENTO	CE (dS m ⁻¹)
S ₀ V ₀	0
S ₀ V ₅₀	3.78
S ₀ V ₁₀₀	6.84
S ₂₅ V ₂₅	1.95
S ₂₅ V ₇₅	5.77
S ₅₀ V ₀	0.67
S ₅₀ V ₅₀	3.88
S ₅₀ V ₁₀₀	6.97
S ₇₅ V ₂₅	2.63
S ₇₅ V ₇₅	5.68
S ₁₀₀ V ₀	1.28
S ₁₀₀ V ₅₀	4.10
S ₁₀₀ V ₁₀₀	7.10

5.7 Variables de estudio

5.7.1 Altura de planta

Se determinó la altura de las plantas, realizando la medición con una regla de plástico de 30 cm desde el punto de inserción de los cotiledones hasta la punta de la hoja más larga. La altura se reportó en centímetros lineales (cm). Esta variable fue evaluada cuando las lechugas fueron cosechadas, a los 53 días después del transplante (ddt).

5.7.2 Número de hojas

Se consideraron todas las hojas, con excepción de las de la envoltura floral. Esta variable fue evaluada a los 53 ddt (cosecha).

5.7.3 Área foliar

Se realizó utilizando un integrador de área foliar LICOR (modelo LI-300 AREA METER), pasando todas las hojas (con excepción de las de la envoltura floral) para obtener el área foliar total reportada en centímetros cuadrados (cm²). Esta variable fue evaluada a los 53 ddt (cosecha).

5.7.4 Biomasa seca del vástago

La parte aérea de la lechuga (vástago) fue secada en una estufa (marca CLIMATEST modelo SW-17TA) en el laboratorio de Nutrición Vegetal, durante 72 h a 60 °C. Una vez concluido este período el material vegetal se pesó usando una balanza digital (OHAUS modelo GT410D) y el valor de peso de biomasa seca se reportó en gramos (g). Los muestreos para evaluar esta variable se realizaron a los 27, 42 y 53 ddt.

5.7.5 Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD se realizaron en las tardes los días de muestreo (Cuadro 12) a partir de las 17:00 hrs. Se midió una lechuga por unidad experimental y siempre fue evaluada la misma planta en el transcurso del experimento. Asimismo, por cada lechuga se midieron cuatro hojas, en cada hoja se realizaron 10 lecturas (cinco del lado derecho de la hoja y cinco del lado izquierdo). La medición fue realizada con un medidor de clorofila (modelo SPAD 502 Minolta); el cual mide la diferencia entre la transmisión de luz infrarroja y luz roja de la hoja, lo que corresponde al contenido de clorofila. Sus valores numéricos están dados en unidades arbitrarias (Yadava, 1986).

Cuadro 12. Fechas de medición de las lecturas SPAD.

Muestreo	Fecha de muestreo	ddt
1	01-Junio-2006	20
2	07-Junio-2006	26
3	14-Junio-2006	33
4	21-Junio-2006	40
5	29-Junio-2006	48

5.7.6 Absorción nutrimental

El contenido de nitrógeno total en hoja se determinó empleando el método Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965). La determinación de fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre, zinc, manganeso, boro y sodio se realizó mediante digestión húmeda del material seco con una mezcla de ácidos perclórico y nítrico (Alcántar y Sandoval, 1999). Los extractos obtenidos fueron leídos en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma ICP-AES

VARIAN™ Liberty II. La concentración de los nutrimentos se expresó en porcentaje para el caso de nitrógeno total (%) y en miligramos por kilogramo (mg kg^{-1}) para el resto de los elementos.

Para estas determinaciones se realizaron tres muestreos durante el desarrollo del cultivo tal como se muestra en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Fechas de muestreos para el análisis nutrimental

Muestreo	Fecha de muestreo	ddt
1	08-Junio-2006	27
2	23-Junio-2006	42
3	04-Julio-2006	53

5.8 Variables de calidad

La evaluación de las variables de calidad coloración y resistencia al corte, se realizó a los 53 ddt (último muestreo del experimento). Se emplearon dos hojas por planta, seleccionando la tercera hoja completa (de la periferia hacia el centro) del lado donde a la planta recibía la incidencia solar por la mañana (marcada como **S**) y otra del lado opuesto (marcada como **N**). (Figura 5).



Figura 5. Selección de hojas “S” y “N”, para determinación de coloración y resistencia al corte.

5.8.1 Coloración (L, a, b).

Se determinó la luminosidad (L), las tonalidades verde-rojo (a) y el valor de las tonalidades azul-amarillo (b) (valores adimensionales). Las variables se determinaron usando un colorímetro HUNTER LAB D25-PC2 (OPTICAL SENSOR) ROM CARTRIDGE.

Las hojas se dividieron en tres secciones (a lo largo de la misma) y en cada sección se realizó una medición (por el haz), la medición se realizó en la parte media entre la nervadura principal y el borde exterior de la hoja (Figura 6).

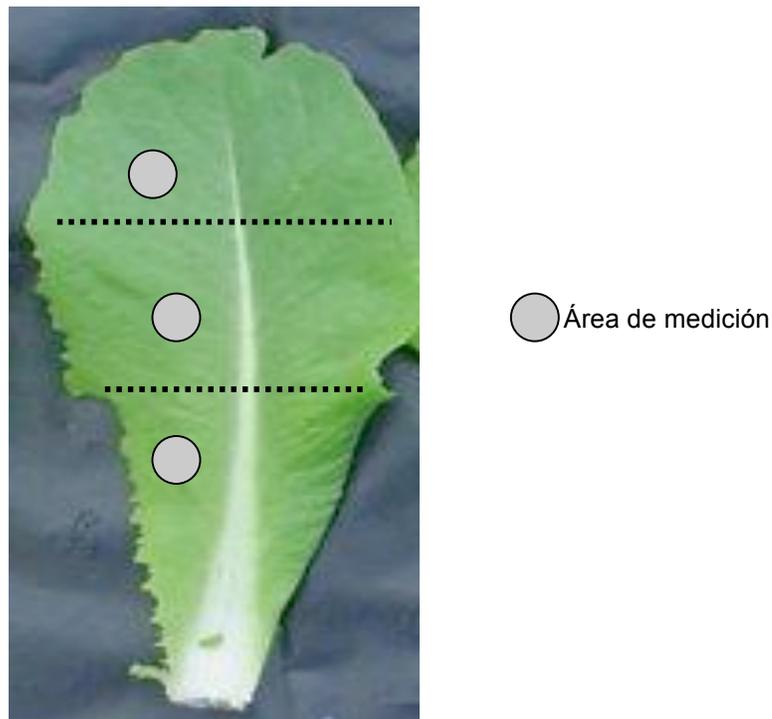


Figura 6. Selección de áreas de medición para la determinación del color.

5.8.2 Resistencia al corte

La medición se basó en el grado de deformación que experimento la hoja al ser sometida a una presión ejercida por un peso determinado y para un tiempo dado. Se utilizó un texturómetro universal marca FORCE FIVE, modelo FDV-30 con escala de 30 lb x 0.01 lb y un puntal de corte de 1 cm. Los resultados se expresan en kilogramos fuerza (kg F) y se consideró el valor promedio de dos hojas por planta.

Para realizar esta medición se marcaron tres puntos sobre la nervadura central por el envés de las hojas donde se realizó la aplicación de la presión con el texturómetro (Figura 7).

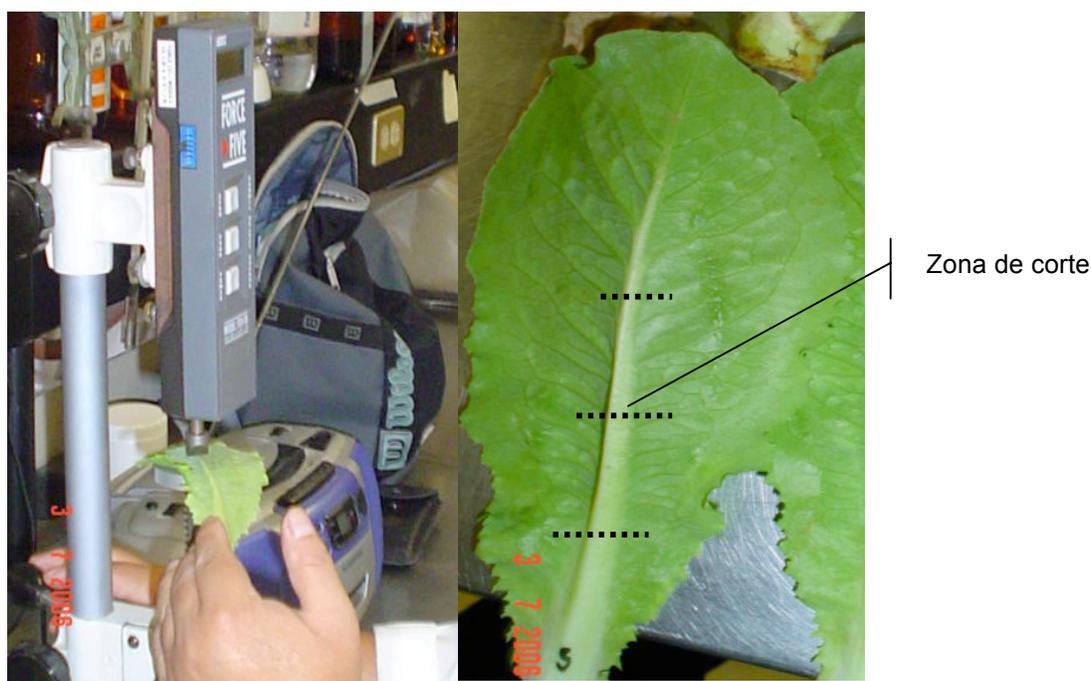


Figura 7. Medición de la resistencia al corte.

5.9. Análisis estadístico

Las variables evaluadas, concentración nutrimental, vegetativas y de postcosecha; se analizaron por regresión mediante el procedimiento de eliminación hacia atrás (Backward), para estimar modelos matemáticos de la función de producción, a partir de un modelo especificado con base en las gráficas de respuesta, según el diseño de tratamientos cuadrado doble. El análisis se realizó usando el programa SAS.

De acuerdo al procedimiento Backward se considera una significancia de permanencia de las variables de 0.10 (nivel de probabilidad que maneja el programa SAS de forma automática); sin embargo, el modelo matemático final seleccionado fue aquel con menor cuadrado medio del error (CME).

Para la obtención de la función de producción mediante regresión se usó el procedimiento desarrollado por Volke (1990) y Volke *et al.* (2006) el cual consiste en:

- Graficar las curvas de respuesta a cada factor a niveles constantes de los demás factores, según el diseño de tratamientos.
- De acuerdo con las curvas de respuesta, especificar el modelo de regresión a probar, para lo cual se procede a; 1) especificar las

variables simples de cada factor, con base en la curva de respuesta con valores cero o los más bajos de los demás factores, según la forma de respuesta; 2) especificar las variables de interacciones, con base en el conjunto de curvas de respuesta de cada factor, comenzando por las interacciones de las variables simples de menor exponente y continuando con las interacciones de las variables simples con mayor exponente si así correspondiese; 3) especificar el signo esperado de las variables en el modelo, según las respuestas observadas.

- Estimar el modelo reducido final mediante el procedimiento de eliminación de regresión hacia atrás (STEPWISE/BACKWARD) de las variables con menor probabilidad en la estadística t o de F parcial, considerando como criterio de bondad para determinar el mejor modelo el menor cuadrado medio de las desviaciones de regresión.
- Los coeficientes de regresión del modelo final deben tener signos concordantes con los signos específicos para las variables; de no ser así, se deberán eliminar del modelo especificado aquellas variables que muestren un menor efecto en las curvas de respuesta, y se volverá a estimar el modelo reducido final.

VI. RESULTADOS

6.1 Análisis matemático

Se estimaron modelos matemáticos de la función de respuesta. Las funciones matemáticas de respuesta estimadas consideran los efectos tanto simples (aplicación individual del extracto de vermicomposta y de la solución nutritiva de Steiner), como los efectos de interacción (aplicación combinada de ambos materiales) significativos de los factores experimentales.

En el caso de este trabajo de investigación, los modelos de regresión estimados son significativos al nivel de probabilidad de 0.05; sin embargo, varios de ellos presentan valores relativamente bajos de R^2 .

En dichos modelos **V** es el factor extracto de vermicomposta, **S** es el factor solución de Steiner, y **T_j** son las variables auxiliares para tratamientos que mostraron valores medios de la variable de respuesta muy bajos o muy altos, que se salen de la tendencia general de la respuesta (Cuadro 14), y que pueden conducir a imprecisiones con cualquier procedimiento de optimización (Volke, 1990).

Cuadro 14. Variables auxiliares por tratamiento

Variable T _j	Tratamiento
T ₁	S ₀ V ₀
T ₂	S ₀ V ₅₀
T ₃	S ₀ V ₁₀₀
T ₄	S ₂₅ V ₂₅
T ₅	S ₂₅ V ₇₅
T ₆	S ₅₀ V ₀
T ₇	S ₅₀ V ₅₀
T ₈	S ₅₀ V ₁₀₀
T ₉	S ₇₅ V ₂₅
T ₁₀	S ₇₅ V ₇₅
T ₁₁	S ₁₀₀ V ₀
T ₁₂	S ₁₀₀ V ₅₀
T ₁₃	S ₁₀₀ V ₁₀₀

6.2 Respuestas de las concentraciones nutrimentales en la parte aérea a la aplicación de los factores de estudio.

En diversas investigaciones ha sido reportado que la adición de vermicomposta sola o combinada con fertilizantes sintéticos incrementa la calidad y en algunos casos los rendimientos de los cultivos en comparación con aquellos que son fertilizados únicamente con fertilizantes sintéticos (Atiyeh *et al.*, 2000a; Moreno y Aguilera, 2003; Cano y Márquez, 2004; Moreno-Reséndez *et al.*, 2005). Si bien, el aporte nutrimental de la vermicomposta no es elevado, se ha encontrado que bajo ciertas condiciones la vermicomposta llega a suplir las necesidades nutrimentales de ciertas especies vegetales (Moreno y Aguilera, 2003).

Bello (2003) menciona que aún cuando el aporte nutrimental sea mínimo, el principal beneficio de las vermicompostas es el de contribuir con sustancias prehúmicas, lo que favorece una mejor absorción de nutrimentos asimilables presentes en el medio. Estas sustancias incrementan la absorción nutrimental por las plantas porque aumentan la disponibilidad de los nutrimentos y liberan compuestos que afectan por un lado el crecimiento de la raíz y por el otro la distribución de los nutrimentos absorbidos por las plantas (Chen y Aviad, 1990).

6.2.1 Nitrógeno

a. Primer muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de nitrógeno en el primer muestreo (N_1) es el siguiente:

$$N_1 = 1.769 + 0.00112 S + 0.00955 V - 0.0000814 V^2 - 0.214 T_7$$

(CME = 0.0429; $R^2 = 0.244$; Pr. F. = 0.055)

El efecto simple de la solución de Steiner; es decir, en ausencia de extracto de vermicomposta es positivo, por lo que al incrementar la dosis de la solución de Steiner la concentración de nitrógeno en las hojas de lechuga aumenta (Figura 8a). En el caso del extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, para dosis bajas se presenta una respuesta positiva, pero al incrementar la dosis de este material la respuesta toma una tendencia negativa, lo que indica que ya no se observarán incrementos en la concentración de nitrógeno (Figura 8b). El efecto de interacción de los factores de estudio no fue significativo; es decir, no se observa un efecto combinado de la aplicación del extracto de vermicomposta y la solución de Steiner.

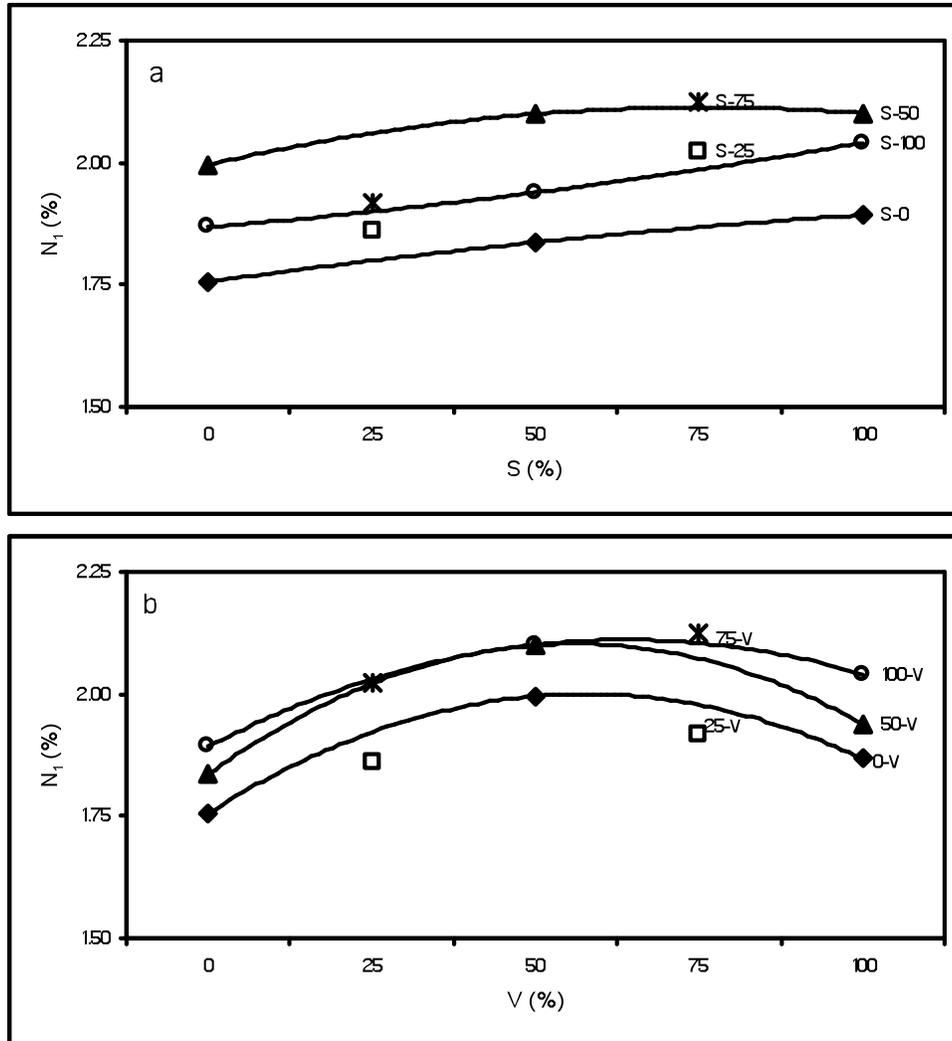


Figura 8. Respuesta de la concentración de nitrógeno (N_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de nitrógeno en la segunda fecha de evaluación (N_2) es el siguiente:

$$N_2 = 1.568 + 0.0000249 S^2 - 0.0289 V^{0.5} + 0.860 T_3$$

$$(CME = 0.178; Pr. F. = 0.0336; R^2 = 0.223)$$

La aplicación conjunta del extracto de vermicomposta y de la solución de Steiner no presentó efecto significativo. La solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta mostró un efecto positivo sobre la concentración de nitrógeno (Figura 9a). En forma contraria, la aplicación del extracto de vermicomposta en ausencia de la solución nutritiva mostró un efecto negativo sobre la concentración de nitrógeno (Figura 9b).

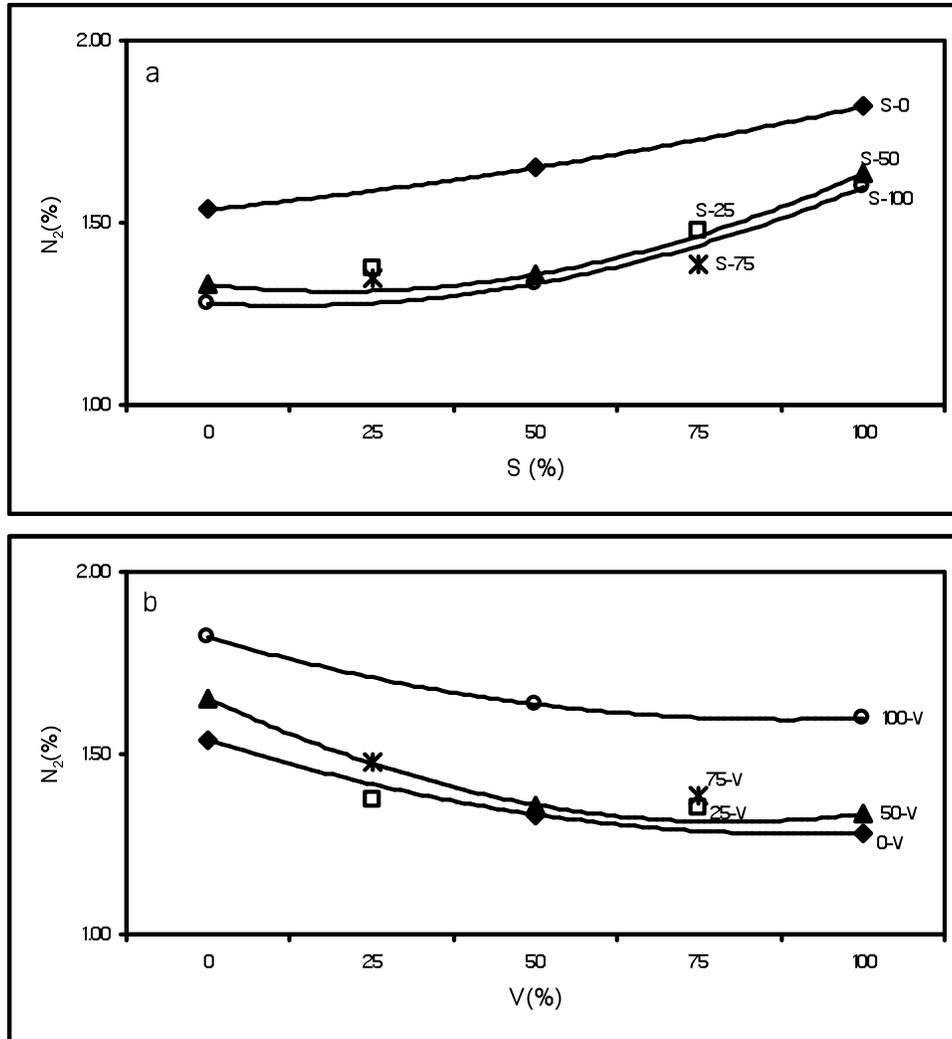


Figura 9. Respuesta de la concentración de nitrógeno (N_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de nitrógeno en el tercer muestreo realizado (N_3) es el siguiente:

$$N_3 = 1.852 + 0.000106 VS - 8.0949E-7 SV^2 - 0.259 T_{10}$$

$$(CME = 0.0420; Pr. F. = 0.0271; R^2 = 0.228)$$

En este muestreo no se presentan efectos significativos simples de ambos factores de estudio; en forma contraria, se observa una interacción positiva entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta (Figura 10) sobre el contenido de nitrógeno; sin embargo, esta interacción se hace negativa para los valores más altos del extracto de vermicomposta.

Conforme el cultivo va creciendo los efectos simples dejan de ser significativos, pero se observan incrementos en la concentración de nitrógeno en

la parte aérea de lechuga al aplicar de manera conjunta ambos factores experimentales. No obstante, estos incrementos, solo se dan a dosis bajas de extracto de vermicomposta en la mezcla de ambos materiales, ya que el efecto de interacción positiva se vuelve negativo a niveles altos del extracto de vermicomposta en la aplicación conjunta, independientemente del nivel de la solución de Steiner.

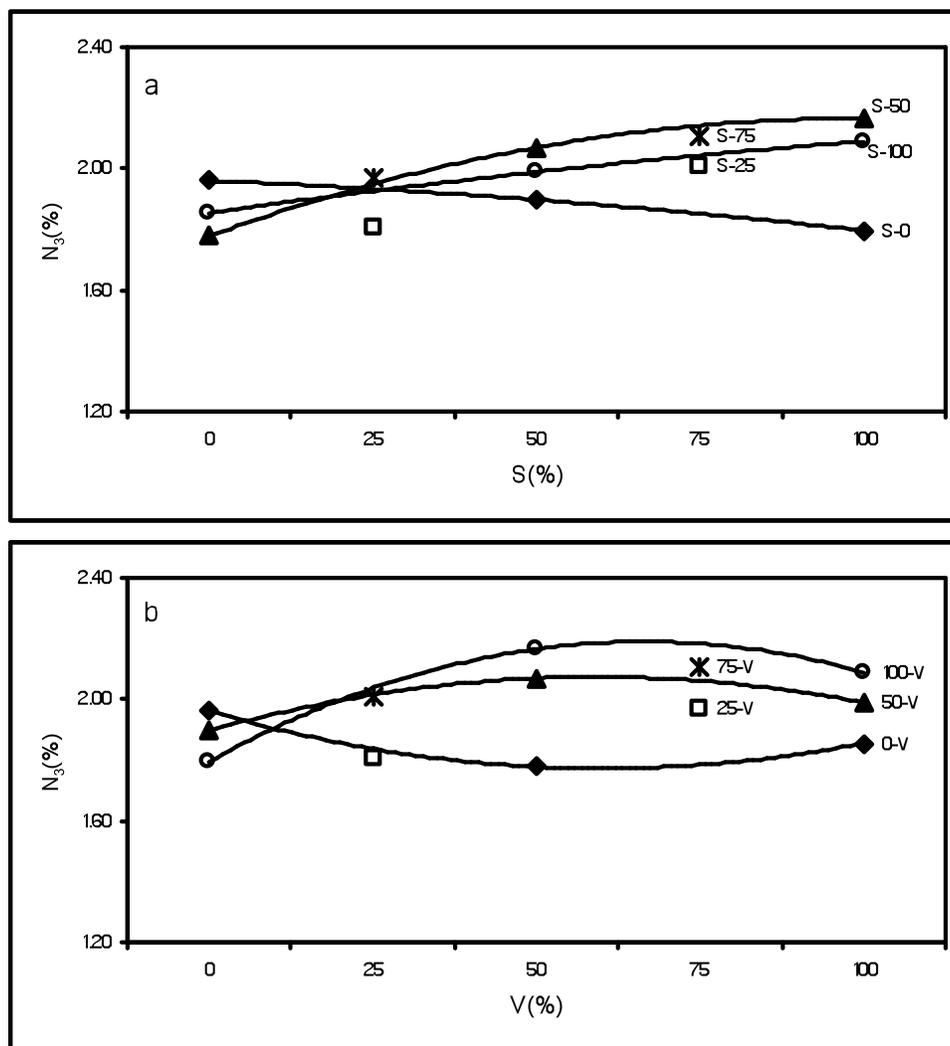


Figura 10. Respuesta de la concentración de nitrógeno (N₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.2 Fósforo

a. Primer muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de fósforo en la primera evaluación (P₁) es el siguiente:

$$P_1 = 1690.332 + 13.105 S + 52.296 V - 0.337 V^2 + 1487.733 T_4$$

(CME = 631346; Pr. F. = 0.0001; R² = 0.613)

Se observa una relación positiva entre el factor solución de Steiner y el contenido de fósforo en tejido foliar (Figura 11a). Este mismo efecto lo presenta la aplicación en dosis bajas del extracto de vermicomposta en ausencia de la solución de Steiner, observándose incluso incrementos mayores a los producidos por la aplicación de solución de Steiner (Figura 11b). Sin embargo, a dosis altas del extracto de vermicomposta, la respuesta se vuelve negativa observándose decrementos paulatinos en la concentración de fósforo. No se observan efectos significativos de la aplicación conjunta de los dos factores experimentales.

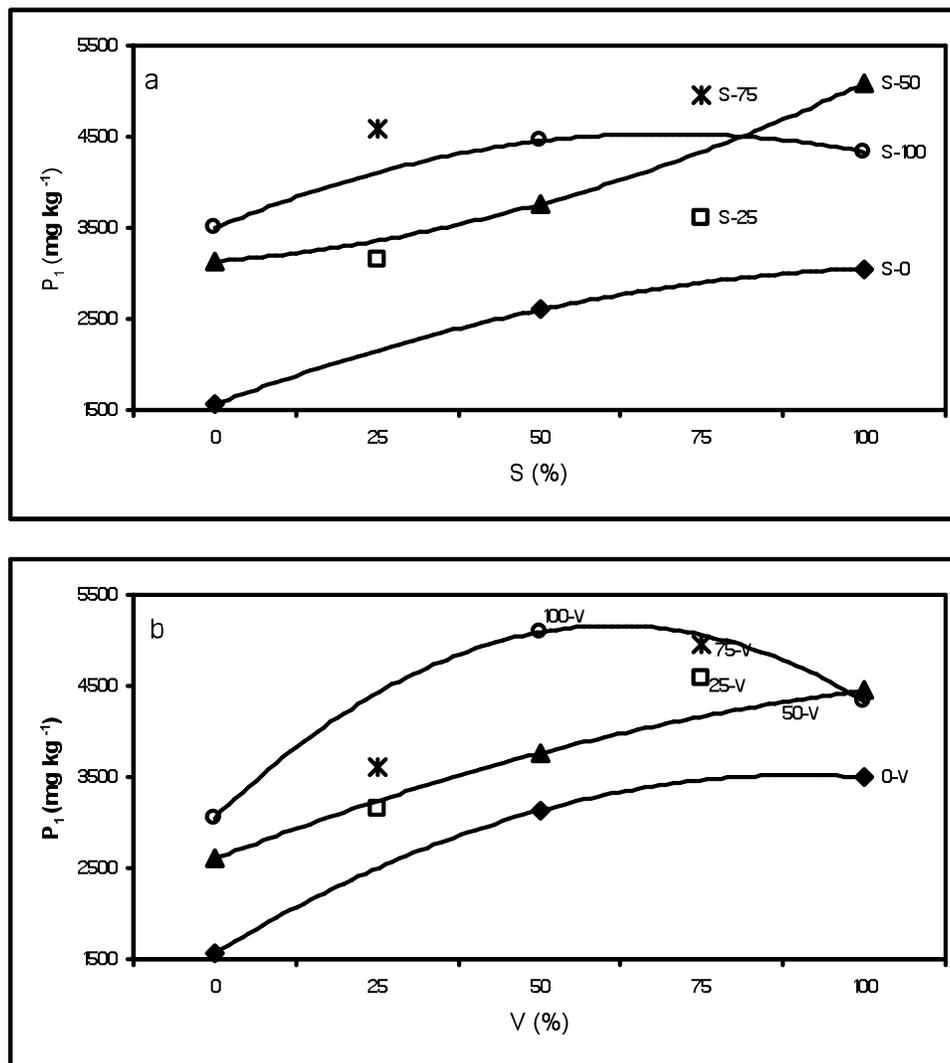


Figura 11. Respuesta de la concentración de fósforo (P₁) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de fósforo en el segundo muestreo (P_2) es el siguiente:

$$P_2 = 1129.059 + 34.073 S + 58.549 V - 0.211 S^2 - 0.405 V^2 + 1989.678 T_3$$

(CME = 419802; Pr. F. = 0.0001; $R^2 = 0.767$)

Al igual en el primer muestreo el efecto simple de la aplicación aislada de solución de Steiner y extracto de vermicomposta es positivo sobre la concentración de fósforo en el tejido vegetal, pero por otro lado la respuesta es negativa para los dos factores a los niveles más altos, siendo los decrementos más notorios para el caso del extracto de vermicomposta (Figura 12). El efecto de interacción de los dos factores de estudio no fue significativo para este muestreo.

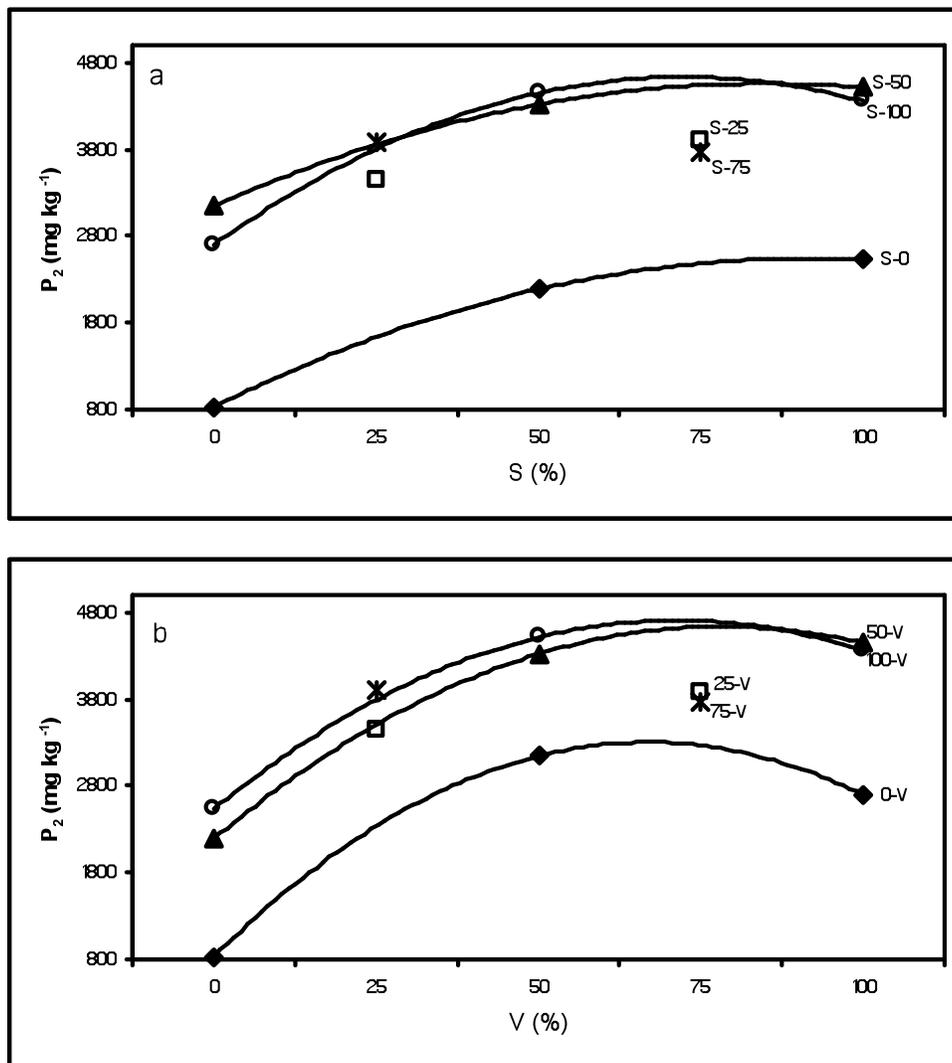


Figura 12. Respuesta de la concentración de fósforo (P_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de fósforo en la tercera evaluación (P_3) es el siguiente:

$$P_3 = 1304.908 + 12.577 S + 58.746 V - 0.199 V^2 - 0.000949 SV^2$$

(CME = 457308; Pr. F. = 0.0001; $R^2 = 0.8222$)

Para este muestreo fue significativa la aplicación individual tanto de la solución de Steiner, como del extracto de vermicomposta; el efecto registrado es positivo a niveles bajos y cambia su tendencia a negativo a niveles altos en ambos factores de estudio (Figura 13).

Existe una interacción negativa entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta, que ocasionó que la concentración de fósforo disminuyera cuando fueron suministrados en forma conjunta (Figura 13).

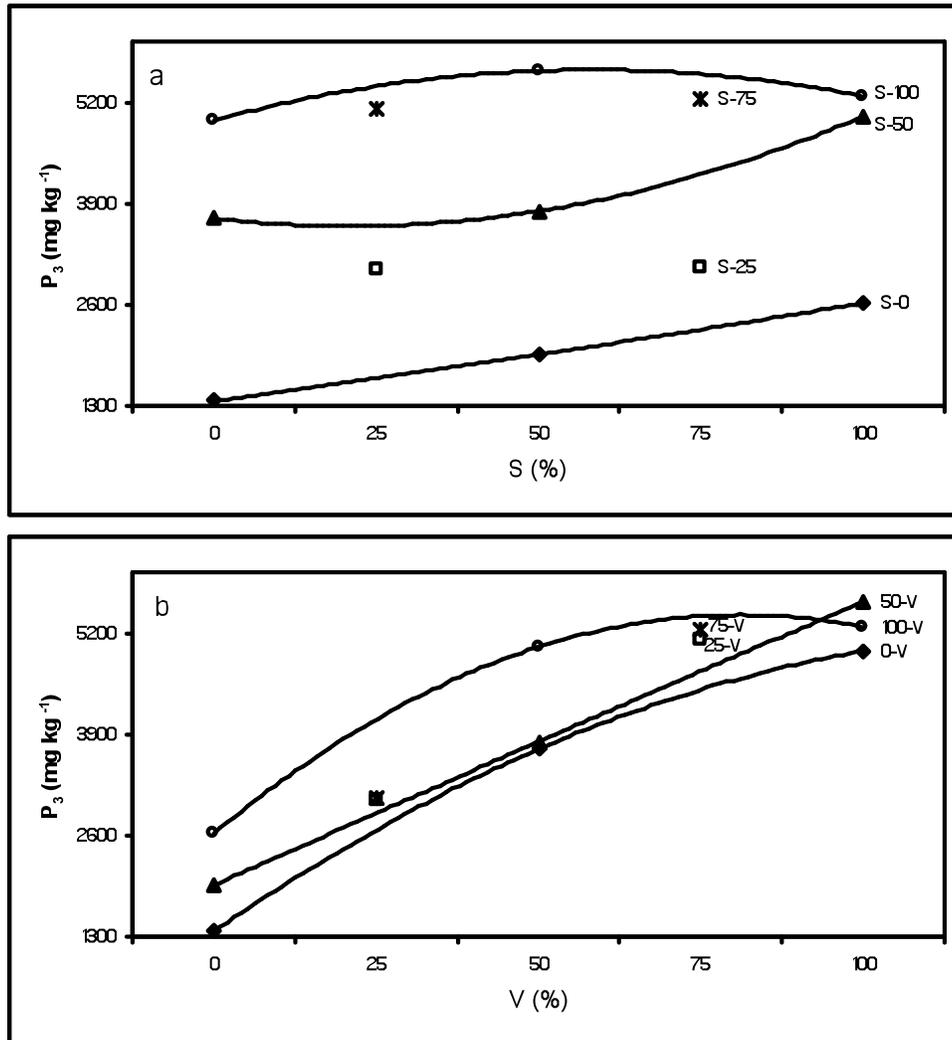


Figura 13. Respuesta de la concentración de fósforo (P_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.3 Potasio

a. Primer muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de fósforo en el primer muestreo realizado (K_1) se presenta a continuación:

$$K_1 = 15539 + 146.39 S + 209.984 V - 0.827 S^2 - 1.415 V^2 + 7371.002 T_4$$

$$(CME = 17981053; Pr. F. = 0.0001; R^2 = 0.542)$$

En la Figura 14 se muestran los resultados de la concentración de potasio obtenidos. Se observa efecto simple de ambos factores experimentales, siendo positivo a niveles bajos y negativo a los niveles más altos de la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta aplicados de forma aislada. Por otra parte, los efectos de interacción sobre la concentración de potasio no son significativos en este muestreo.

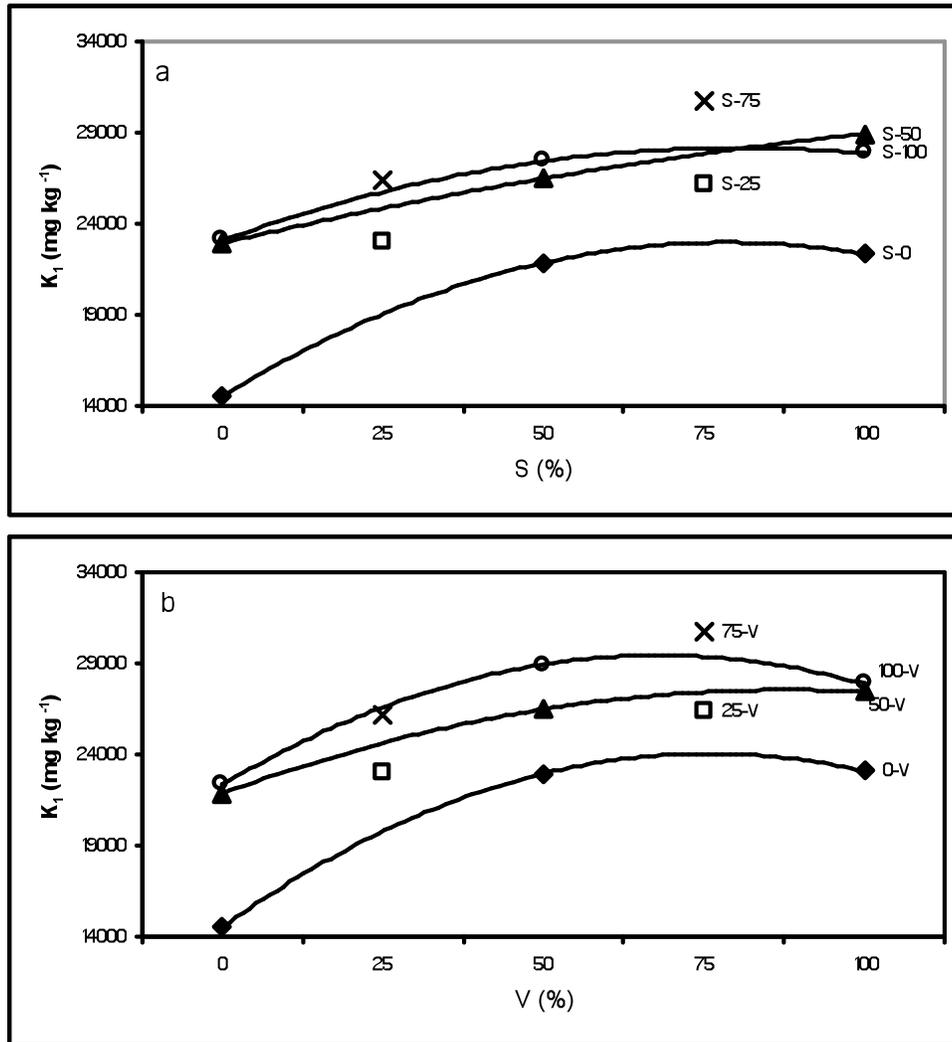


Figura 14. Respuesta de la concentración de potasio (K_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

A continuación se presenta el modelo de la función de respuesta de la concentración de potasio en el segundo muestreo (K_2):

$$K_2 = 12783 + 77.394 S + 238.116 V - 1.705 V^2 + 12780 T_3$$

$$(CME = 10342330; Pr. F. = 0.0001; R^2 = 0.742)$$

En este caso, la aplicación de solución de Steiner en forma individual está relacionada en forma positiva con la concentración de potasio en la planta (Figura 15a). Por su parte, la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner a dosis bajas incrementa la concentración de potasio en la planta, pero a niveles altos provoca un efecto negativo al observarse decrementos en dicha variable (Figura 15b). En lo que a la interacción de factores de estudio respecta, no se observó efecto significativo.

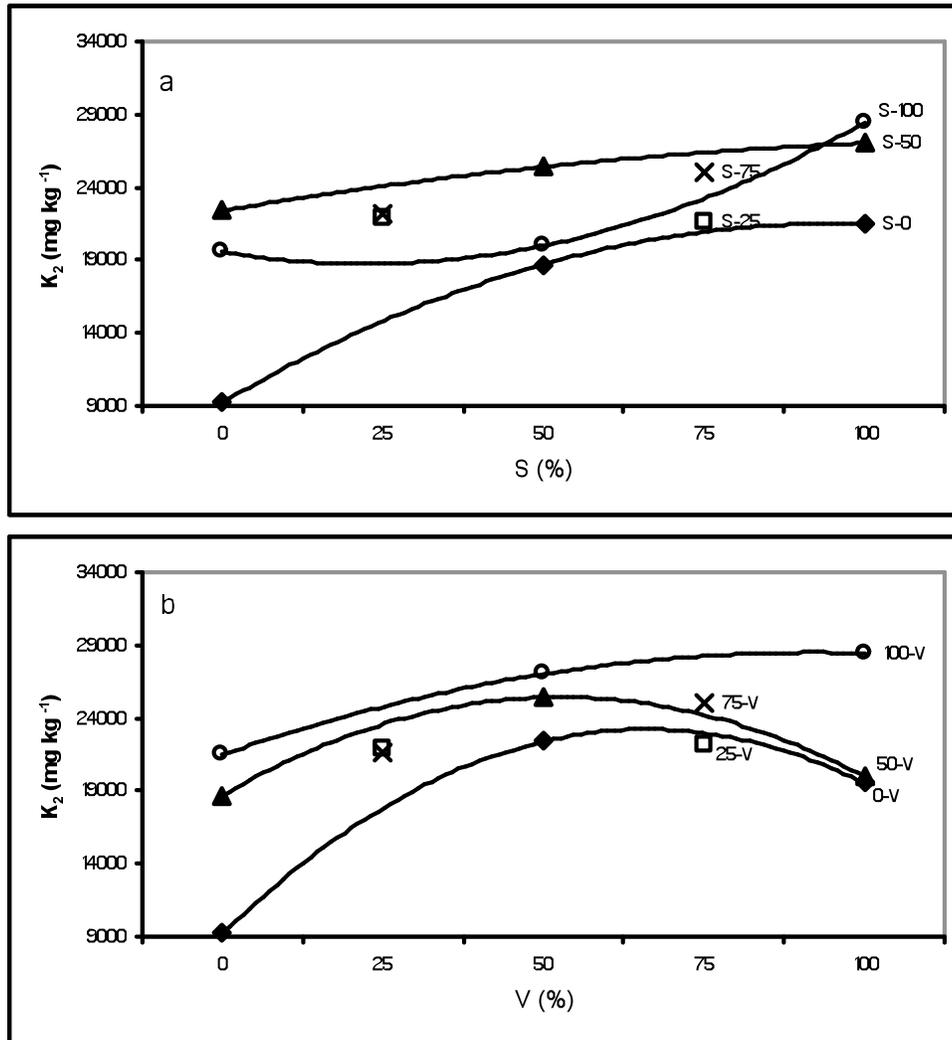


Figura 15. Respuesta de la concentración de potasio (K_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

La función de respuesta de la concentración de potasio en el tercer muestreo (K_3) es representada por el siguiente modelo:

$$K_3 = 10161 + 145.647 S + 104.534 V - 0.996 S^2 - 5785.137 T_9$$

$$(CME = 10892523; Pr. F. = 0.0001; R^2 = 0.699)$$

La concentración de potasio para el tercer muestro es afectada en forma positiva cuando la solución de Steiner es aplicada de forma individual a niveles bajos, pero con la concentración más alta evaluada en el presente experimento la respuesta comienza a hacerse negativa para este mismo factor (Figura 16a). Por otro lado, el extracto de vermicomposta presenta efecto positivo sobre la concentración de potasio al aplicarse en ausencia de solución de Steiner, presentando incrementos de la concentración de potasio al aumentar la dosis de ésta (Figura 16b). La aplicación conjunta de la solución de Steiner con la del extracto de vermicomposta no presenta efectos significativos sobre la variable de respuesta.

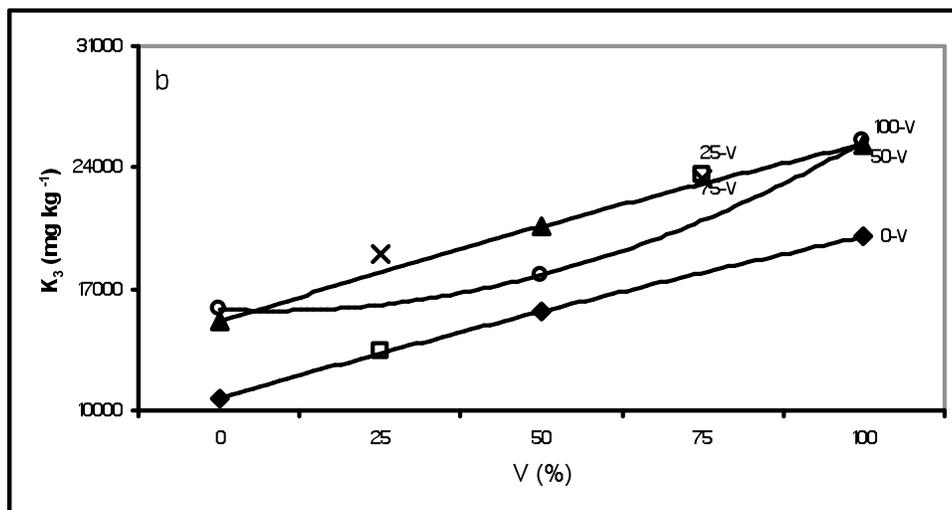
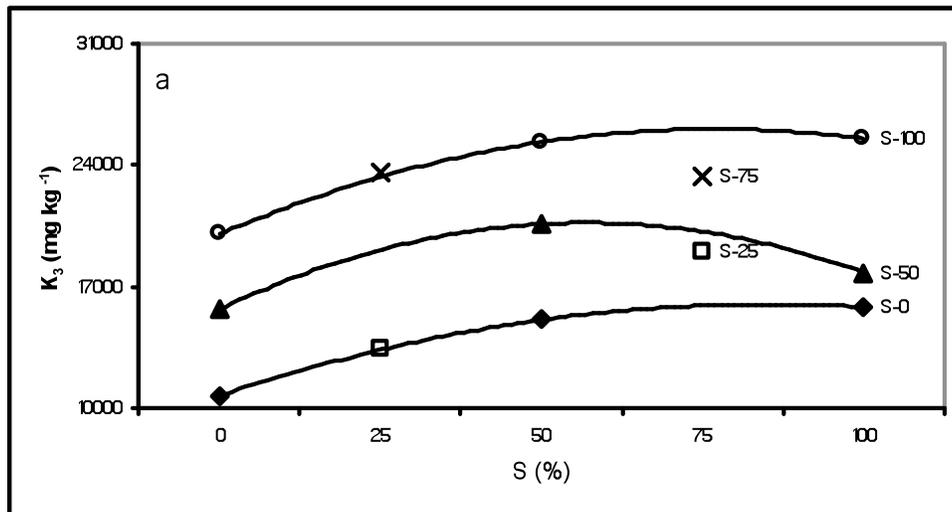


Figura 16. Respuesta de la concentración de potasio (K_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.4 Calcio

a. Primer muestreo

El modelo de función de respuesta de la concentración de calcio determinada en la primera fecha de evaluación (Ca_1) se presenta a continuación:

$$Ca_1 = 8238.95 - 67.147 S + 814.082 S^{0.5} - 2123.515 T_7$$

(CME = 3777452; Pr. F. = 0.0393; $R^2 = 0.215$)

La solución de Steiner es el único factor experimental que presenta efectos significativos sobre la concentración de calcio en esta evaluación. La respuesta a este factor es negativa a niveles bajos de la solución de Steiner, pero una vez que se incrementa el nivel de aplicación, la respuesta se vuelve positiva (Figura 17a).

Efectos significativos sobre la concentración de calcio no fueron observados por la aplicación del extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner (Figura 17b); así mismo, tampoco se observa efecto de interacción por la aplicación conjunta de ambos factores para este muestreo.

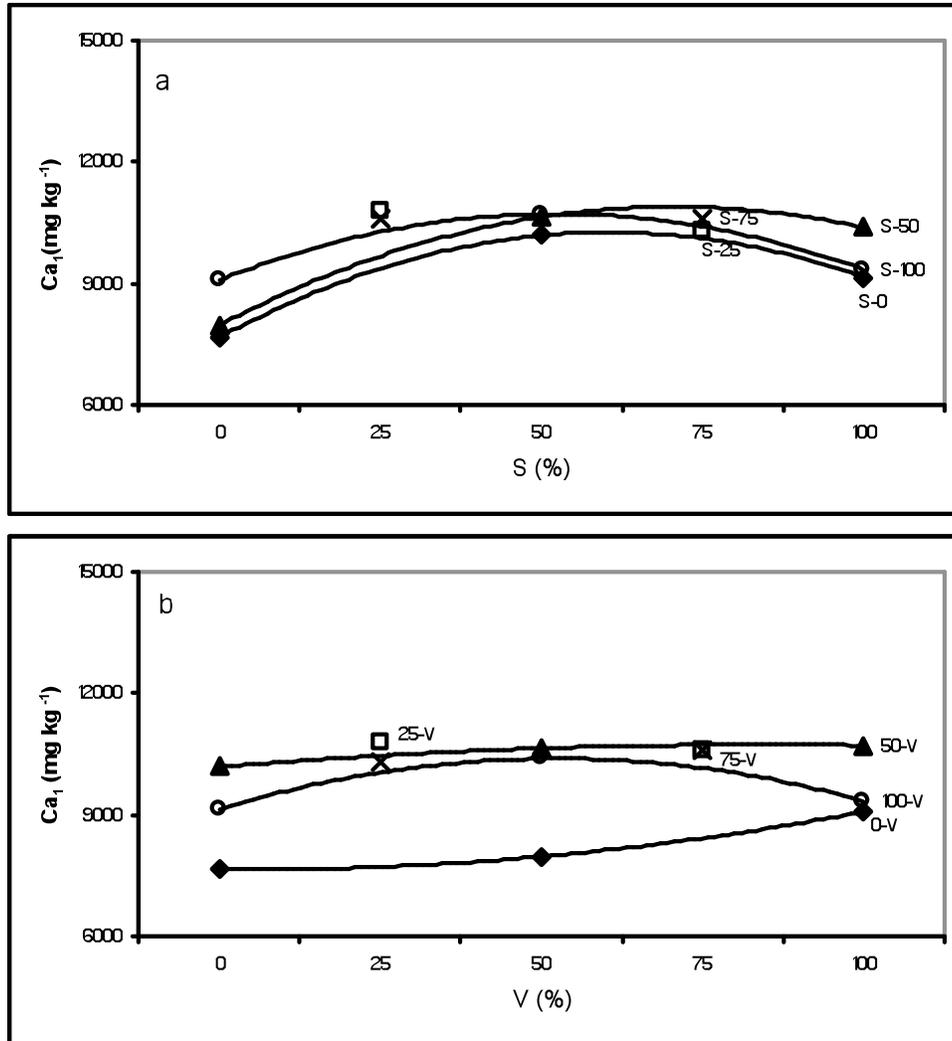


Figura 17. Respuesta de la concentración de calcio (Ca_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

La función de respuesta de la concentración de calcio en el segundo muestreo (Ca_2) es la siguiente:

$$Ca_2 = 6772.204 + 81.206 S - 0.459 S^2 - 0.305 SV - 1823.509 T_{10}$$

(CME = 2314853; Pr. F. = 0.001; R2 = 0.418)

Se observa efecto simple significativo de la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta sobre la concentración de calcio en esta fecha de evaluación, el cual es positivo a dosis bajas, presentando incrementos en la concentración de calcio mientras las dosis no sean altas. A los niveles más altos la respuesta se vuelve negativa, mostrando decrementos de la variable de respuesta Figura 18a).

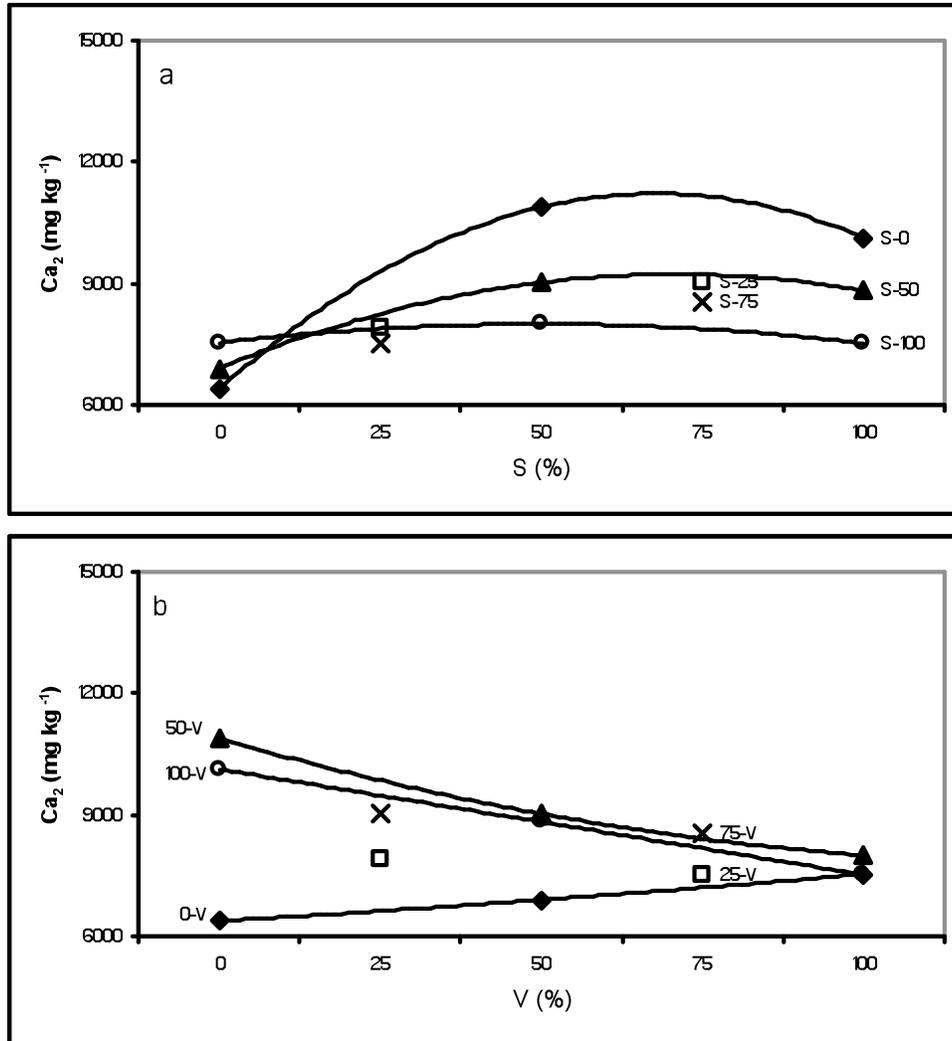


Figura 18. Respuesta de la concentración de calcio (Ca_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

La aplicación de extracto de vermicomposta de forma individual no afecta significativamente la concentración de calcio (Figura 18b). Por otro lado, se muestra un efecto de interacción negativo resultante de la aplicación en forma conjunta de la solución de Steiner y extracto de vermicomposta, provocando decrementos de la concentración de calcio en la planta.

c. Tercer muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de calcio en la tercera evaluación (Ca_3) se presenta a continuación:

$$Ca_3 = 9908.191 + 9.622 S - 36.532 V - 3583.555 T_9$$

(CME = 2752817; Pr. F. = 0.0001; $R^2 = 0.471$)

En el último muestreo se observa un efecto positivo sobre la concentración de calcio al suministrar de manera individual la solución de Steiner (Figura 19a). Por el contrario, al aplicar de forma individual el extracto de vermicomposta se tiene un efecto negativo sobre esta variable (Figura 19b). La interacción entre los dos factores experimentales no fue significativa en este muestreo para la variable de respuesta.

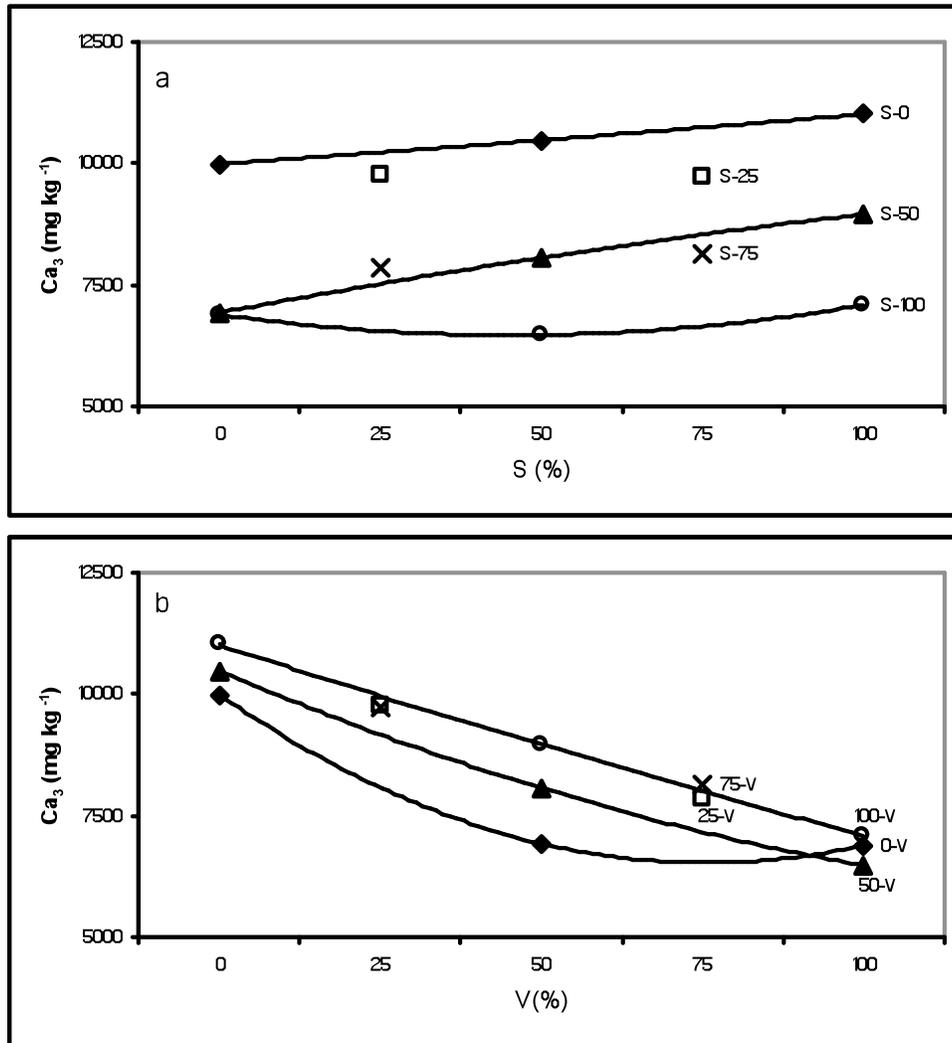


Figura 19. Respuesta de la concentración de calcio (Ca_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.5 Magnesio

a. Primer muestreo

A continuación se presenta el modelo de la función de respuesta de la concentración de magnesio en el primer muestreo (Mg_1), en función de los factores de estudio evaluados.

$$Mg_1 = 3197.975 - 17.734 S + 251.975 S^{0.5}$$

(CME = 543966; Pr. F. = 0.022; $R^2 = 0.206$)

La concentración de magnesio en la planta para este muestreo, fue influenciada por la aplicación de solución de Steiner en forma individual. Los efectos mostrados son negativos a los niveles más bajos de solución Steiner, y positiva conforme se incrementa la concentración de la misma (Figura 20a). La aplicación de extracto de vermicomposta no presentó efecto significativo aplicado en forma individual (Figura 20b) sobre la concentración de magnesio. De igual forma, la aplicación conjunta de ambos materiales no produjo efectos de interacción significativos.

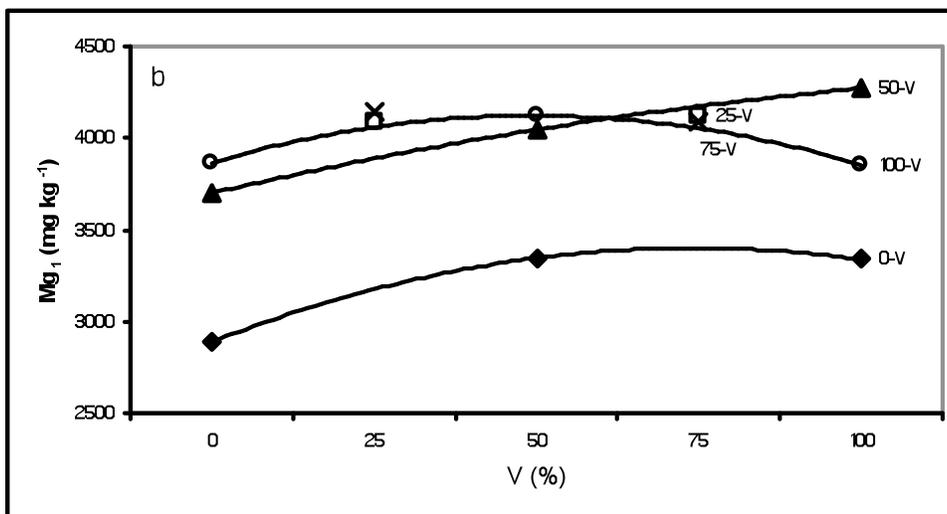
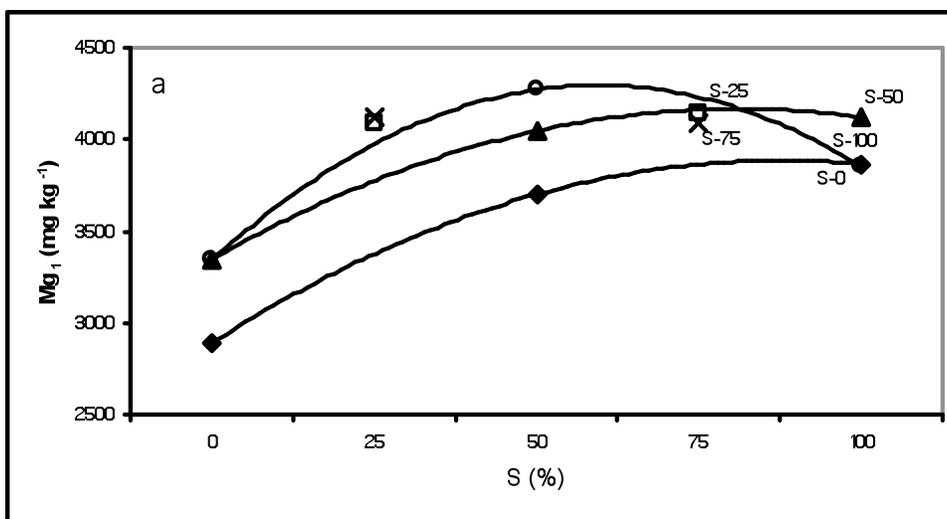


Figura 20. Respuesta de la concentración de magnesio (Mg_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

El modelo matemático de estimación de respuesta de la concentración de magnesio en la tercera evaluación (Mg_3) se presenta a continuación:

$$Mg_2 = 2841.667 + 23.414 S - 0.115 S^2 - 0.182 SV$$

$$(CME = 260024; Pr. F. = 0.0002; R^2 = 0.462)$$

Al igual que en el muestreo anterior la concentración de magnesio respondió a la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta siendo positiva en los niveles bajos; es decir, que se incrementa su valor conforme se aumenta la concentración de la solución de Steiner; esta tendencia se vuelve negativa con la solución Steiner a altas concentraciones (Figura 21a). La concentración de magnesio en tejido foliar en este muestreo, es reducida en forma importante conforme se incrementa la concentración de los extractos de vermicomposta suministrados (Figura 21b).

Existe un efecto significativo de interacción, por la aplicación de manera conjunta de la solución de Steiner y extracto de vermicomposta. Dicha interacción es negativa, presentándose decrementos en la concentración de magnesio conforme se incrementan los niveles de ambos factores en la mezcla (Figura 21).

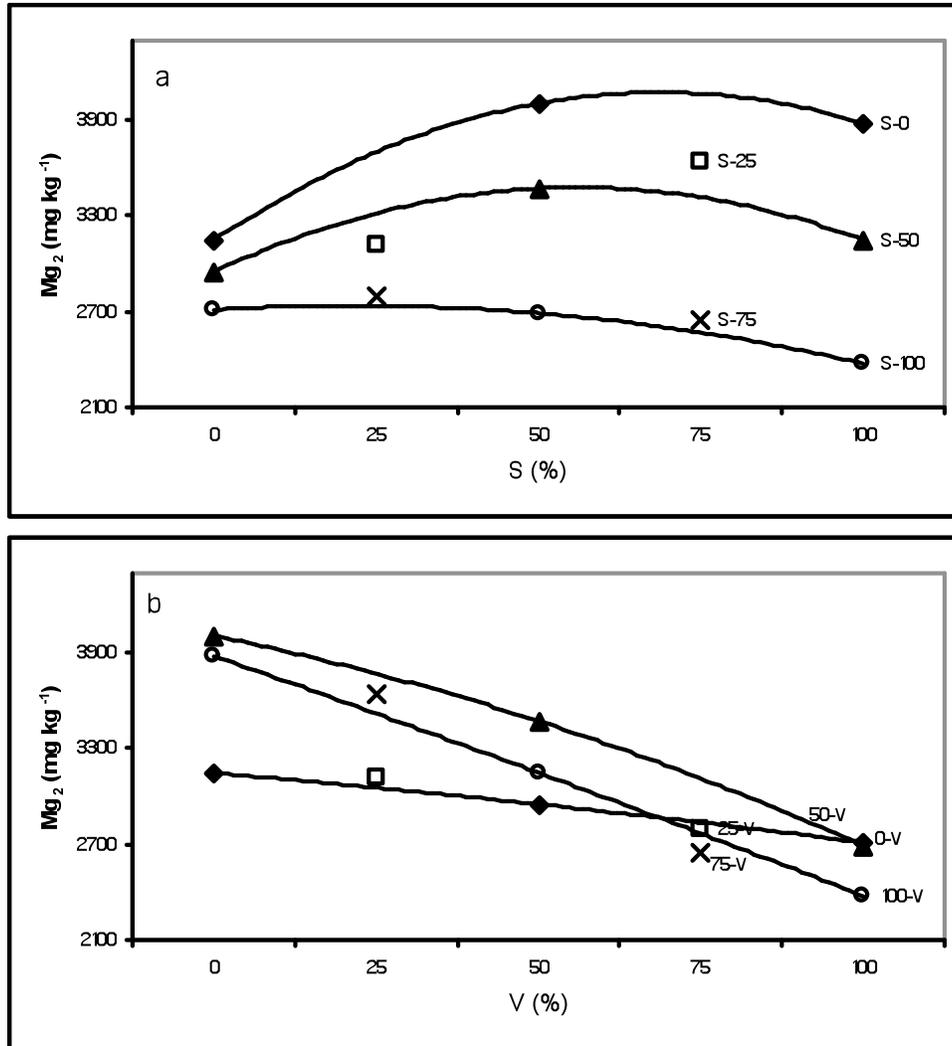


Figura 21. Respuesta de la concentración de magnesio (Mg_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

La concentración de magnesio en la tercera evaluación muestra el siguiente modelo de función de respuesta:

$$Mg_3 = 2993.044 + 6.895 S - 6.233 V + 553.955 T_8 - 985.094 T_9$$

$$(CME = 285136; Pr. F. = 0.004; R^2 = 0.356)$$

En la Figura 22 se observa efecto significativo de la aplicación individual tanto de la solución de Steiner y del extracto de vermicomposta sobre la concentración de magnesio. El efecto de la aplicación de la solución de Steiner es positivo, presentando la concentración de magnesio incrementos a medida que se eleva el nivel de aplicación de este factor (Figura 22a). Para el caso del extracto

de vermicomposta el efecto es negativo, por lo que al incrementar el nivel de aplicación se observan decrementos de la concentración de magnesio (Figura 22b). No se observa para este muestreo efecto significativo en la concentración de magnesio por la aplicación conjunta de los dos factores experimentales.

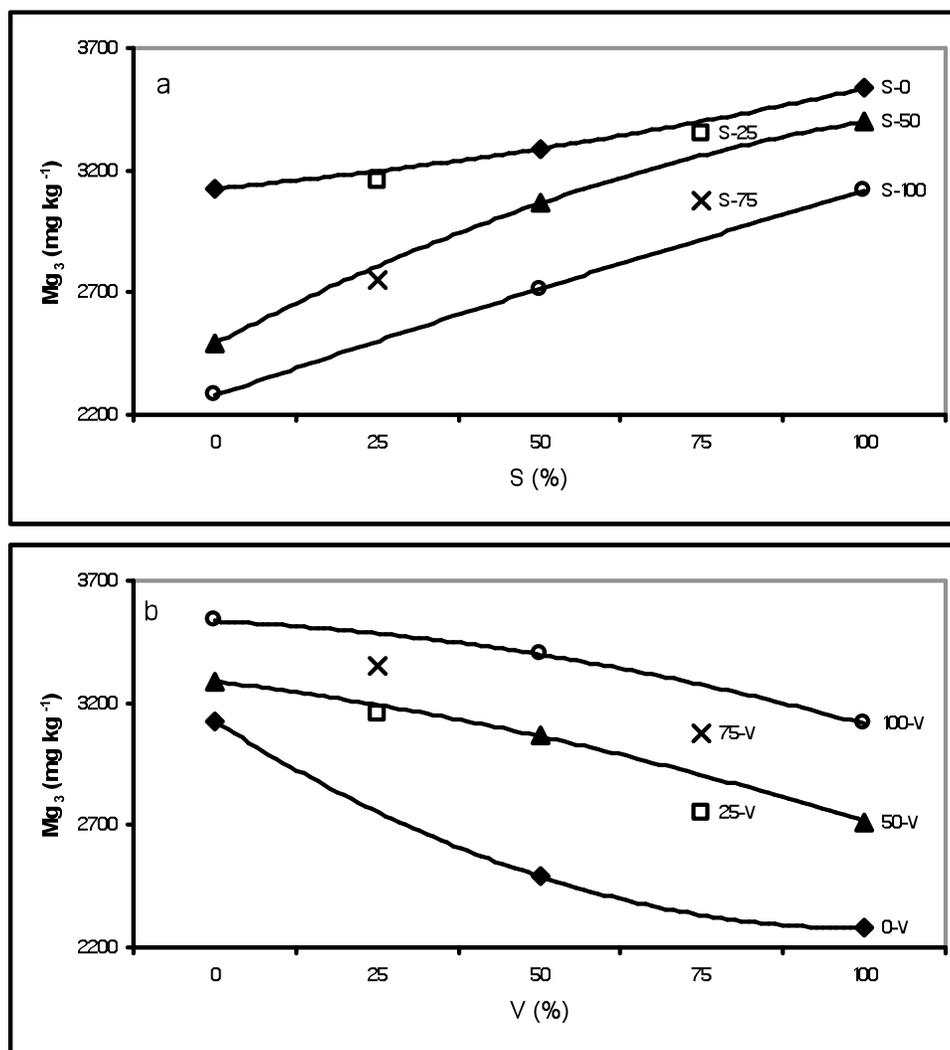


Figura 22. Respuesta de la concentración de magnesio (Mg_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.6 Boro

a. Primer muestreo

El modelo de función de respuesta que define la concentración de boro en tejido foliar en la primera fecha de muestreo se presenta a continuación:

$$B_1 = 200.471 + 0.0688 SV^{0.5} + 49.402 T_5 - 63.679 T_{13}$$

$$(CME = 1590.899; Pr. F. = 0.020; R^2 = 0.254)$$

No se observan efectos significativos en la concentración de boro por la aplicación de solución de Steiner o de extracto de vermicomposta en forma individual (Figura 23). No obstante, existe una interacción positiva entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta, lo que implica que ambos factores en conjunto incrementan la concentración de boro, este efecto es mayor al incrementarse los valores del extracto de vermicomposta en la mezcla.

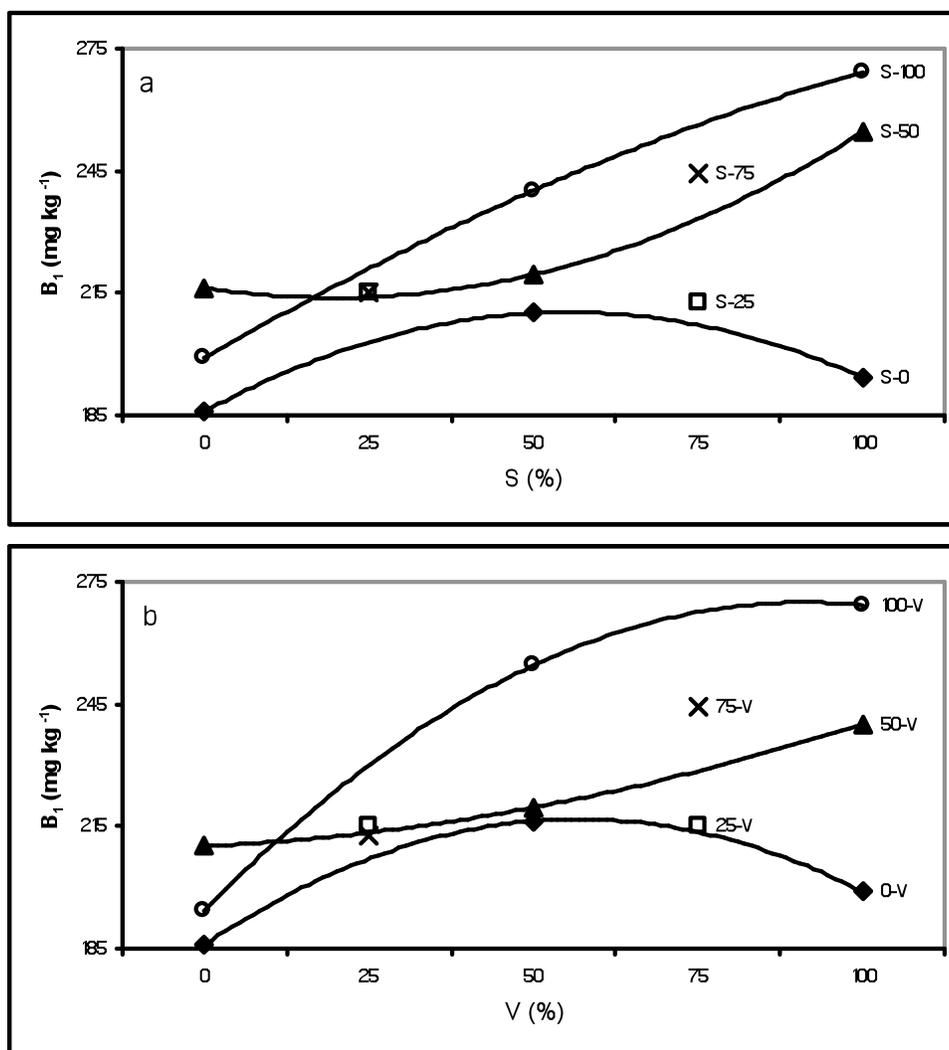


Figura 23. Respuesta de la concentración de boro (B_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

La respuesta de la concentración de boro determinada en el segundo muestreo se muestra en el modelo siguiente:

$$B_2 = 179.613 + 0.721 V + 46.167 T_6$$

$$(CME = 1140.503; Pr. F. = 0.0006; R^2 = 0.356)$$

Para el segundo muestreo la concentración de boro no fue influenciada en forma significativa cuando se aplicó únicamente solución de Steiner (Figura 24a). Por el contrario, la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución nutritiva de Steiner tuvo un efecto positivo sobre la concentración de boro; es decir, a medida que se incrementan la dosis de aplicación de este material orgánico los valores de la concentración de boro aumentan (Figura 24b). Por otro lado, no se observó efecto significativo de interacción al aplicar de manera conjunta los dos factores.

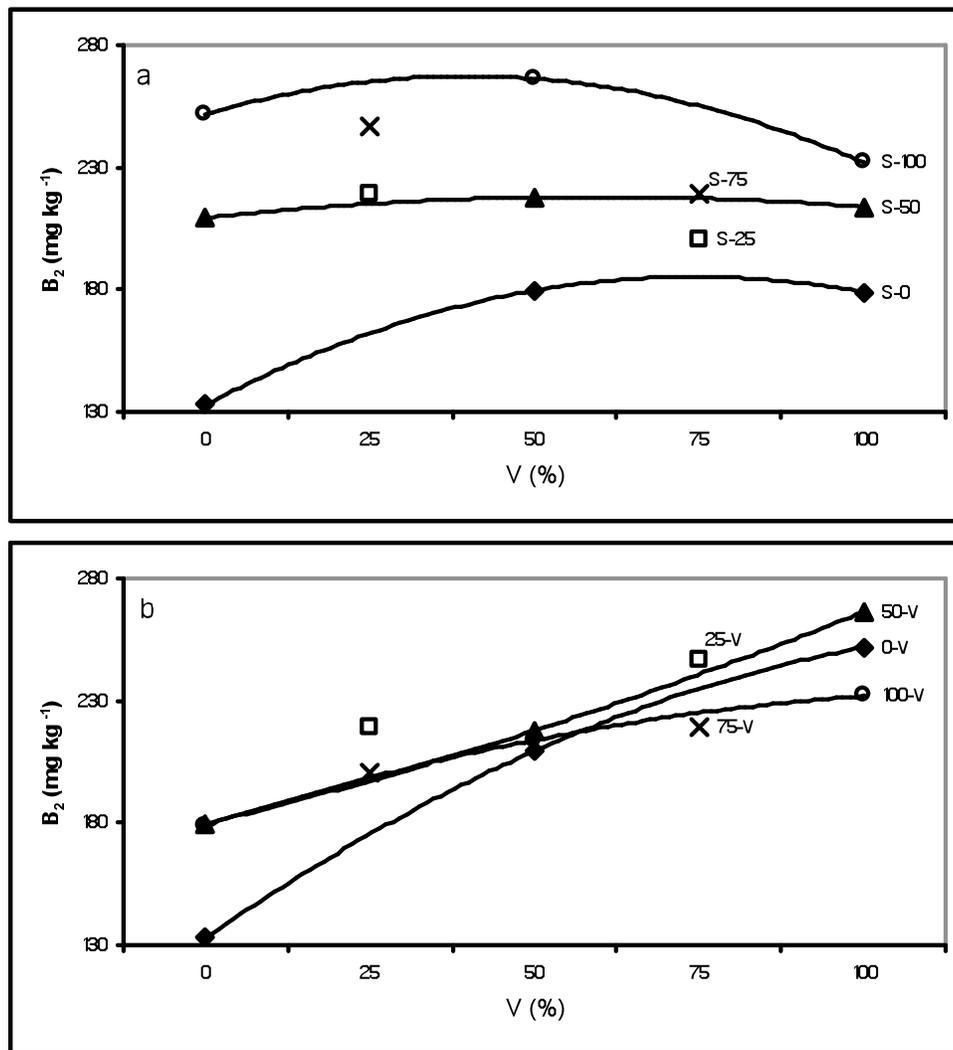


Figura 24. Respuesta de la concentración de boro (B_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

La respuesta en la concentración de boro en la tercera evaluación realizada en función de los factores de estudio se encuentra representada con el modelo siguiente:

$$B_3 = 158.62 + 0.729 V + 0.0039 S^2 + 52.343 T_1$$

$$(CME = 936.115; Pr. F. = 0.0003; R^2 = 0.472)$$

En este último muestreo, se observa un efecto positivo simple de la aplicación de la solución de Steiner (Figura 25a). De igual forma, se observa el efecto positivo de la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de la solución de Steiner sobre la concentración de boro (Figura 25b). Por el contrario, no se observa efecto significativo al aplicar de manera conjunta ambos factores experimentales.

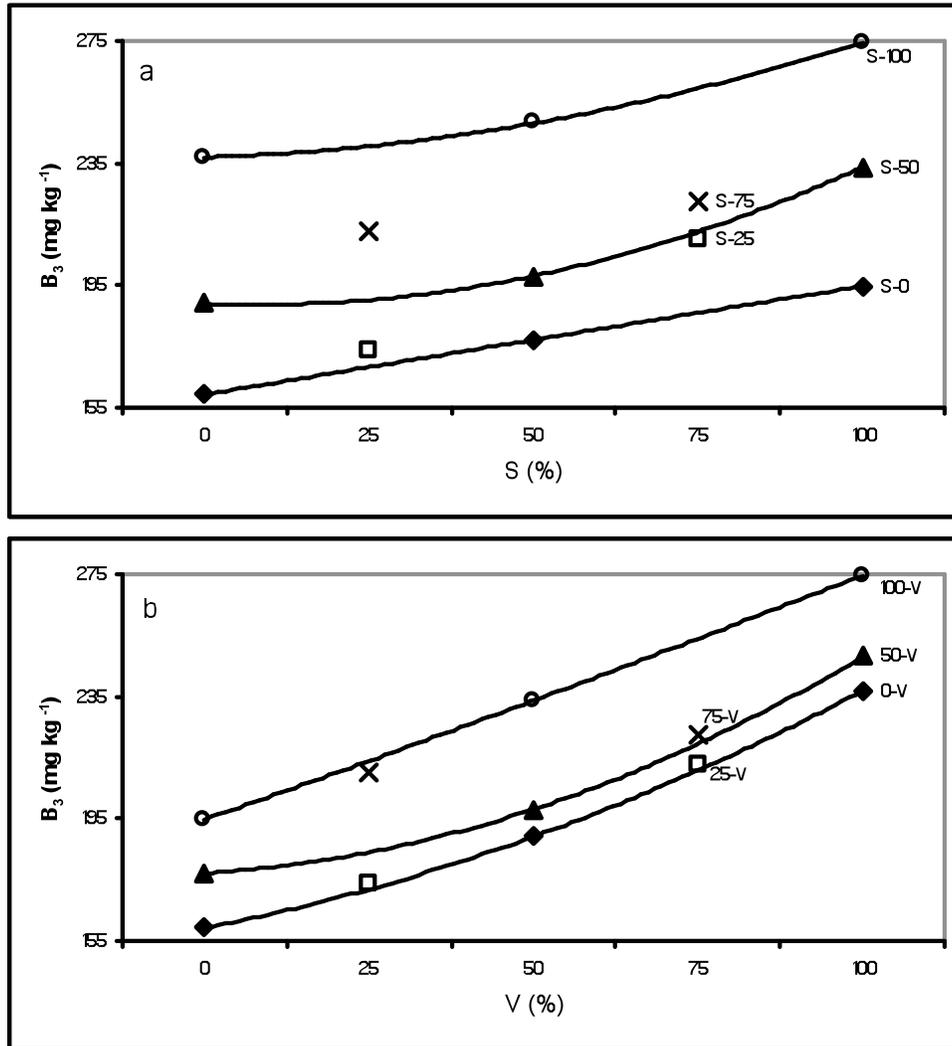


Figura 25. Respuesta de la concentración de boro (B_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.7 Manganeso

a. Primer muestreo

El modelo de función de respuesta de la concentración de manganeso en hoja es el siguiente:

$$Mn_1 = 230.089 + 0.432 S + 0.484 V - 83.36 T_7$$

$$(CME = 4292.984; Pr. F. = 0.0371; R^2 = 0.23)$$

Se observa efecto simple positivo en la aplicación de solución de Steiner, incrementando la concentración de manganeso (Figura 26a). La aplicación de extracto de vermicomposta en forma individual también presenta un efecto positivo sobre la concentración de manganeso (Figura 26b). A pesar de lo anterior, no se observan efectos significativos de interacción al aplicar los dos factores de forma combinada.

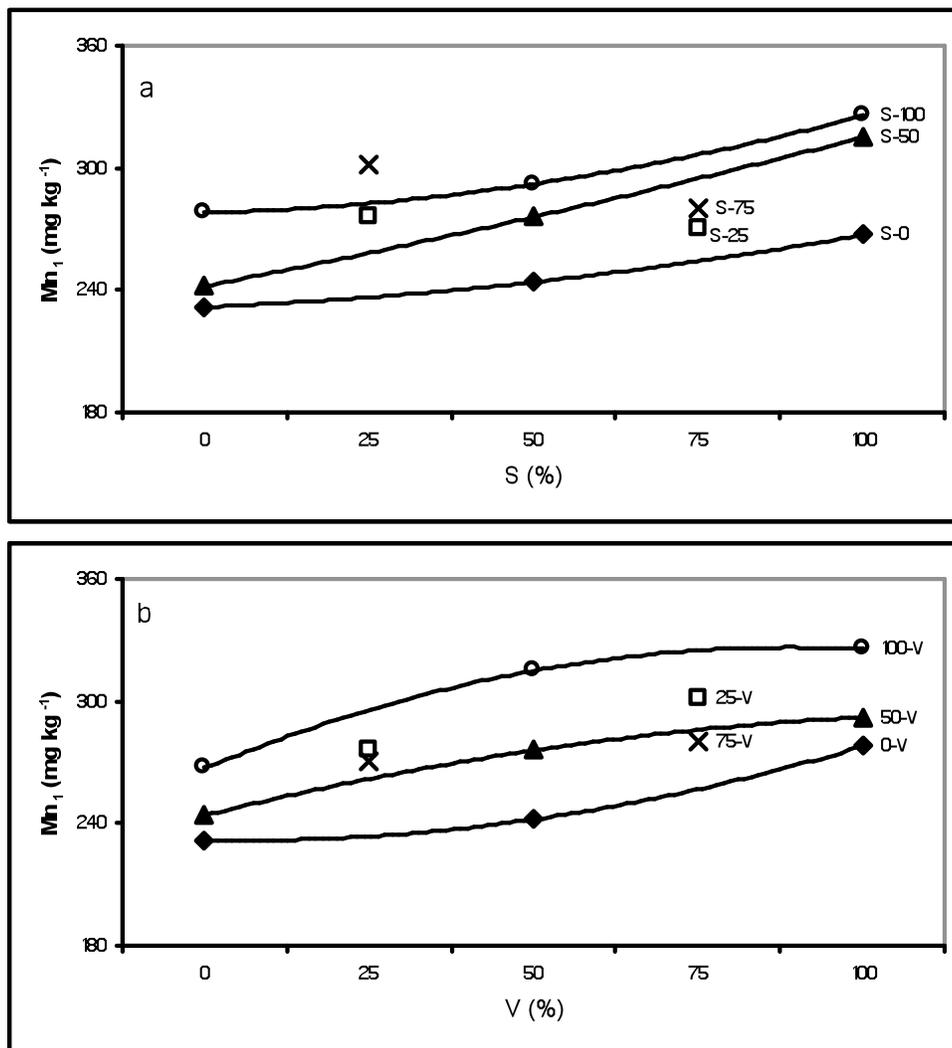


Figura 26. Respuesta de la concentración de manganeso (Mn_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

El modelo de respuesta de la concentración de manganeso en la segunda evaluación es:

$$\text{Mn}_2 = 157.025 + 0.404 \text{ S} + 1.141 \text{ V} + 99.137 \text{ T}_6$$

$$(\text{CME} = 1142.004; \text{Pr. F.} = 0.0001; \text{R}^2 = 0.647)$$

En este muestreo se repiten las tendencias registradas en la evaluación anterior. Por un lado se observa el efecto positivo de la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto vermicomposta y por el otro también existe un efecto positivo de la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner. A su vez, no se observan efectos de interacción significativos en la aplicación conjunta de solución de Steiner y extracto de vermicomposta (Figura 27).

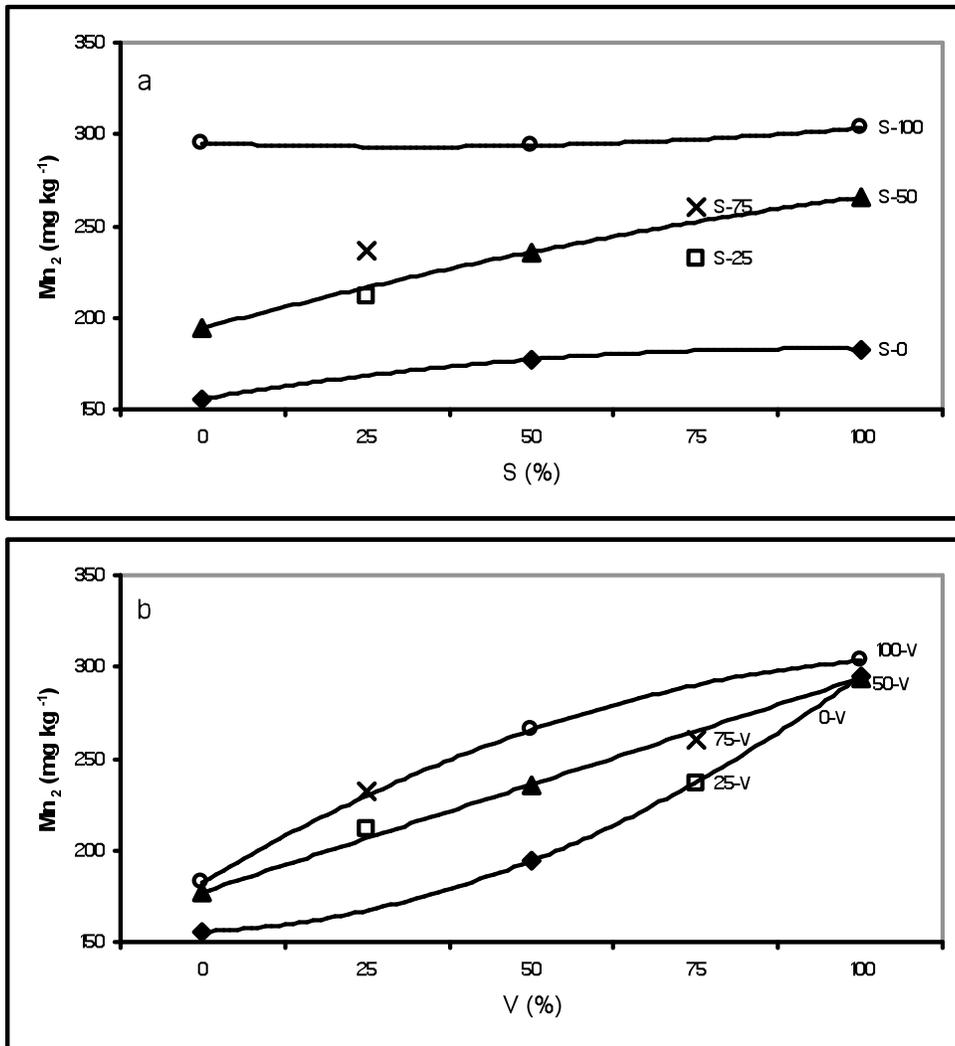


Figura 27. Respuesta de la concentración de manganeso (Mn_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

El modelo de función de respuesta de la concentración de manganeso en la última evaluación es el siguiente:

$$Mn_3 = 186.479 + 0.866 V + 0.00469 SV$$

$$(CME = 2405.181; Pr. F. = 0.0001; R^2 = 0.454)$$

No se observa un efecto significativo al aplicar solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta. Por el contrario, la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner incrementa la concentración de manganeso. Asimismo, se presenta un efecto de interacción positivo entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta, es decir, que la concentración de manganeso se incrementa con la aplicación combinada de ambos factores (Figura 28).

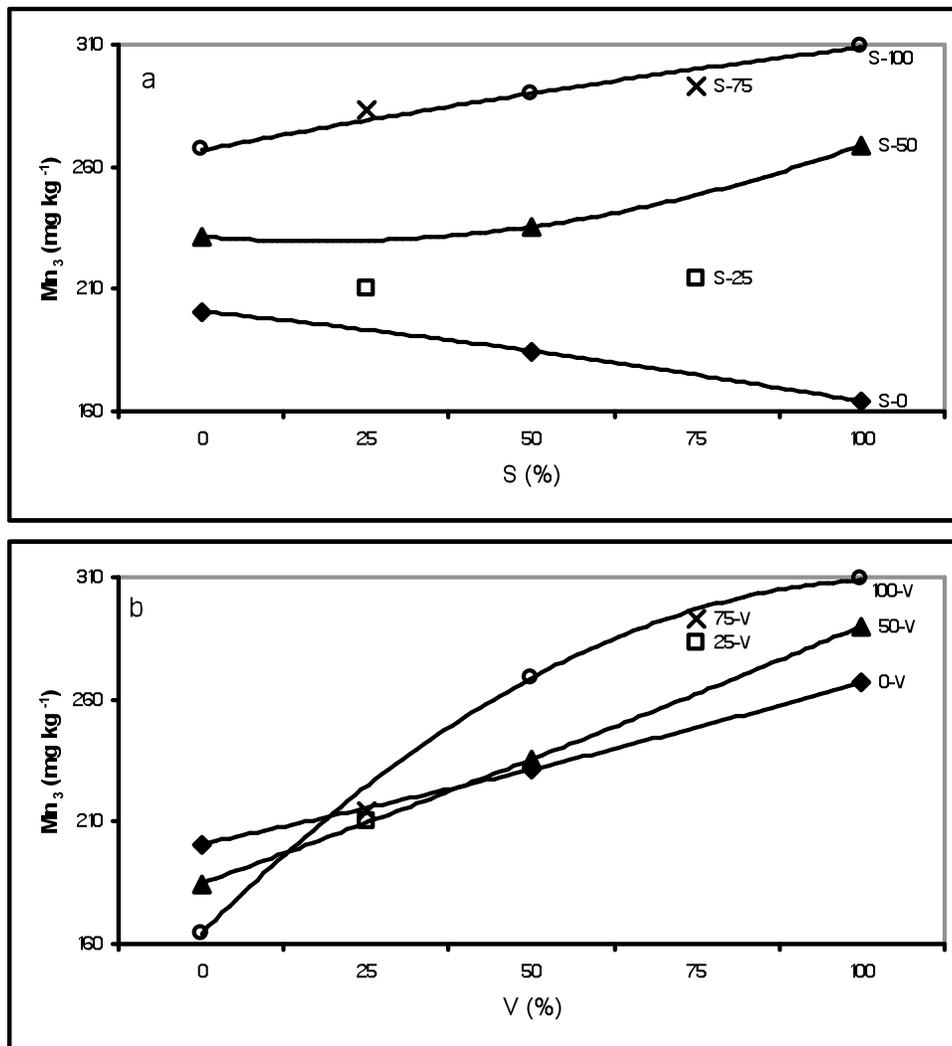


Figura 28. Respuesta de la concentración de manganeso (Mn_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.8 Hierro

a. Primer muestreo

A continuación se presenta el modelo de función de respuesta de la concentración de hierro en la primera evaluación realizada.

$$Fe_1 = 105.285 + 0.0127 SV - 0.0001 SV^2 + 46.385 T_6$$

$$(CME = 1104.167; Pr. F. = 0.078; R^2 = 0.189)$$

En esta variable no se observan efectos significativos simples de los factores evaluados; sin embargo, si se presenta un efecto de interacción; por lo que la aplicación conjunta de ambos materiales incrementa la concentración de hierro, pero esta interacción se vuelve negativa para el caso de valores altos de extracto de vermicomposta en la mezcla (Figura 29).

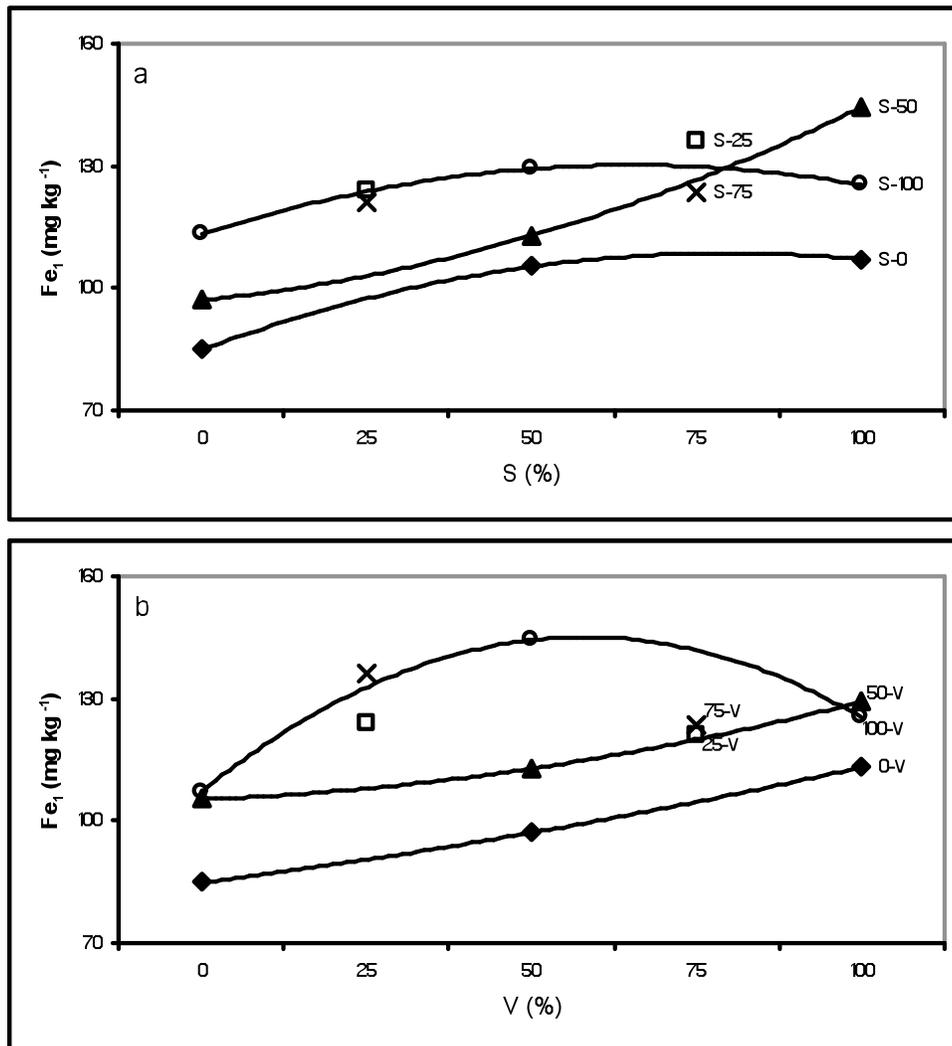


Figura 29. Respuesta de la concentración de hierro (Fe_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

El modelo de función de respuesta de la concentración de hierro en la segunda evaluación es el siguiente:

$$\hat{Fe}_2 = 94.217 + 0.266 S - 29.347 T_4$$

(CME = 922.639; Pr. F. = 0.031; $R^2 = 0.19$)

La aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta incrementa la concentración de hierro (Figura 30a). La aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner no presenta algún efecto significativo sobre la concentración de hierro; al igual que la aplicación combinada de ambos factores.

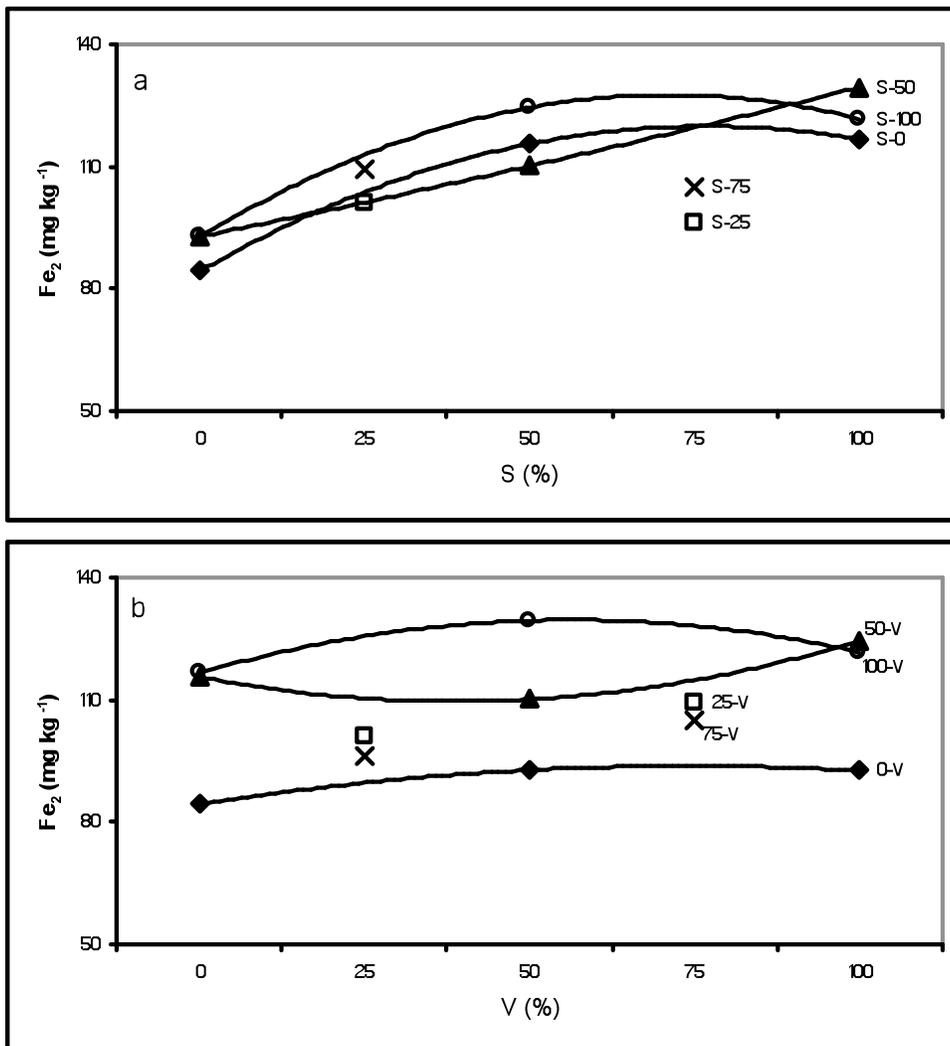


Figura 30. Respuesta de la concentración de hierro (Fe_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

A continuación se presenta el modelo matemático que define la respuesta en la concentración de hierro en hoja en el tercer muestreo del experimento:

$$Fe_3 = 93.893 + 0.00375 V^2 + 0.00008 S^2V + 67.031 T_8$$

$$(CME = 1986.1; Pr. F. = 0.0001; R^2 = 0.489)$$

En este muestreo la solución de Steiner no presentó efectos significativos sobre la concentración de hierro (Figura 31a). Por el contrario, al aplicar extracto de vermicomposta, hubo efecto positivo sobre la variable (Figura 31b). Así mismo, se observó un efecto de interacción de los factores positivo. Dicho efecto se hace más positivo en los valores más altos del factor solución de Steiner.

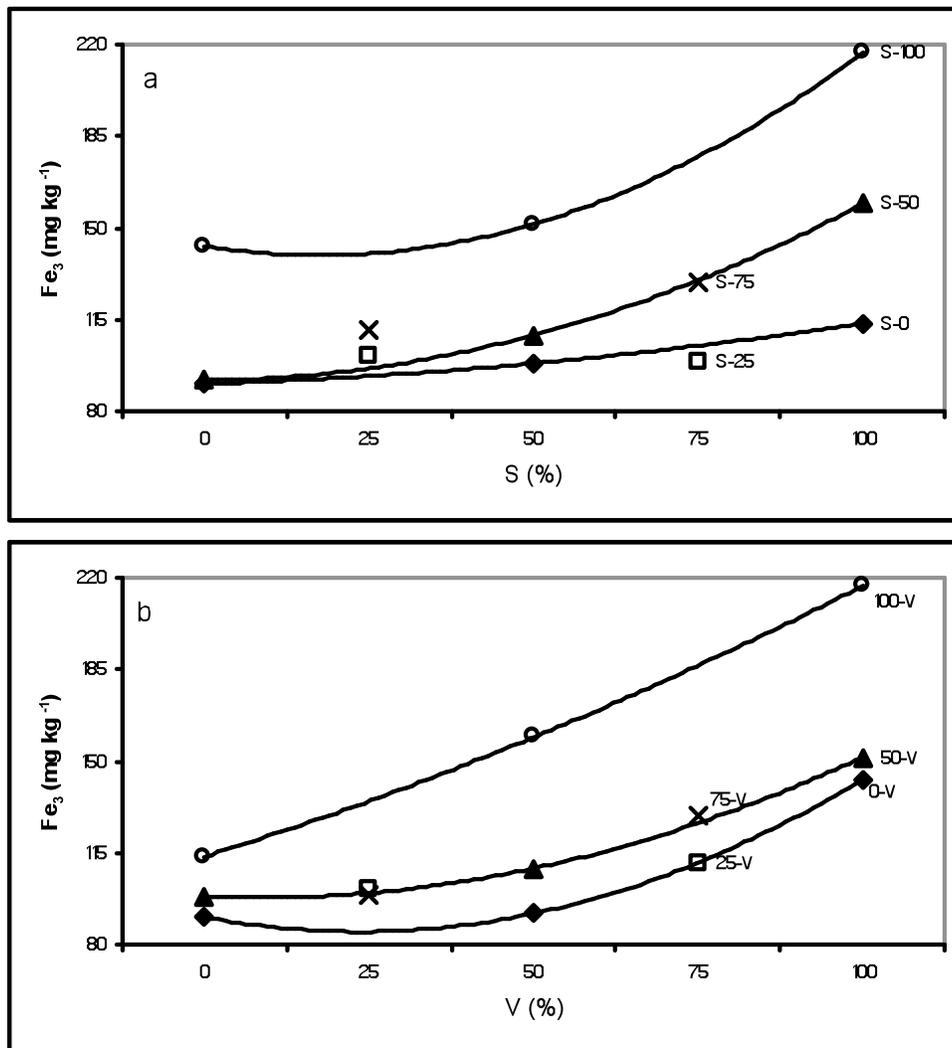


Figura 31. Respuesta de la concentración de hierro (Fe_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.9 Zinc

a. Primer muestreo

La función de respuesta de la concentración de zinc en hoja en la primera evaluación está representada por el siguiente modelo:

$$Zn_1 = 38.145 + 0.287 S + 0.297 V - 0.00281 S^2 - 0.00251 V^2 + 16.125 T_8$$

(CME = 105.96; Pr. F. = 0.0262; $R^2 = 0.333$)

La variable concentración de zinc fue afectada en forma significativa por la aplicación de solución de Steiner en ausencia de vermicomposta. A niveles bajos la respuesta es positiva, pero a niveles altos la respuesta se hace negativa (Figura 32a).

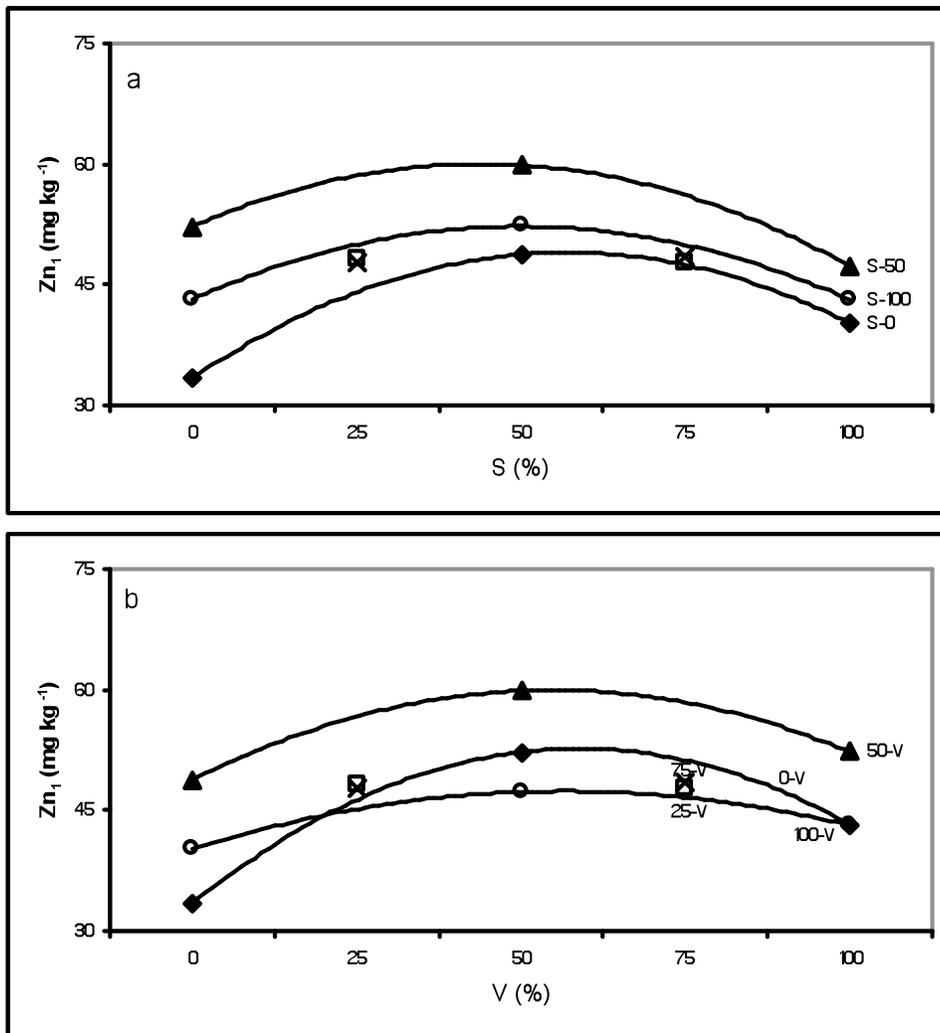


Figura 32. Respuesta de la concentración de zinc (Zn_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

De la misma manera, la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, presentó un efecto positivo a valores bajos de este factor y conforme se incrementa la dosis de este material, el efecto se torna negativo (Figura 32b). Para este muestreo no se observaron efectos de interacción entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta.

b. Segundo muestreo

El modelo que describe la función de respuesta de la concentración de zinc en tejido foliar en la segunda fecha de evaluación es mostrado a continuación:

$$Zn_2 = 24.277 + 0.16 S + 0.198 V - 0.00541 SV + 0.000032 S^2V$$

$$(CME = 84.943; Pr. F. = 0.059; R^2 = 0.234)$$

Se observa un efecto positivo por la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta (Figura 33a). Este mismo efecto se observa cuando se aplica extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner (Figura 33b). Por otro lado, existe también un efecto de interacción negativo de la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta sobre la concentración de zinc. Esto implica, que la aplicación de ambos factores en conjunto disminuye la concentración de zinc; sin embargo a concentraciones altas de la solución de Steiner, el efecto de interacción se vuelve positivo.

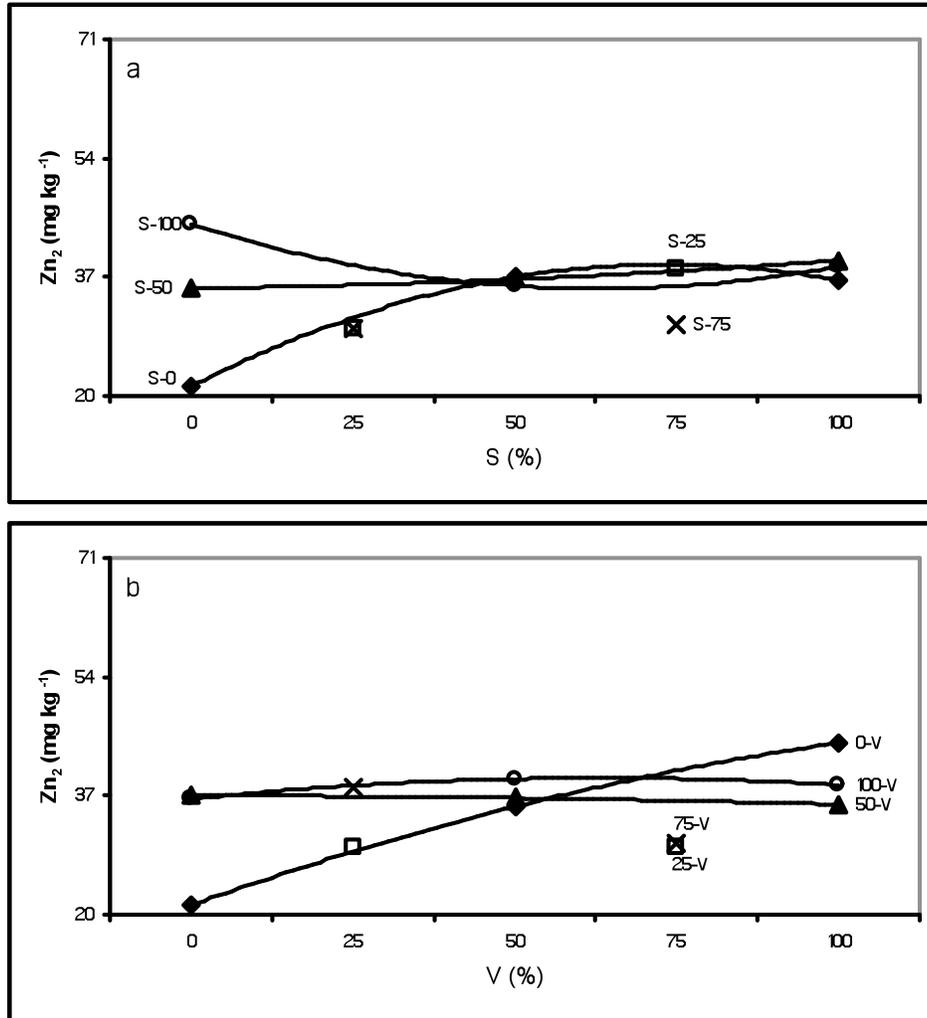


Figura 33. Respuesta de la concentración de zinc (Zn_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

La función de respuesta de la concentración de zinc en el tercer muestreo es definida por el modelo siguiente:

$$Zn_3 = 30.382 + 0.144 S + 0.112 V$$

$$(CME = 71.937; Pr. F. = 0.0001; R^2 = 0.411)$$

En esta evaluación se observa que existe un efecto positivo de la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta (Figura 34a). Sin embargo, al aplicar extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner también incrementa la concentración de zinc, esto es, también presenta un efecto positivo (Figura 34b). No se observan efectos de interacción entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta sobre la concentración de zinc.

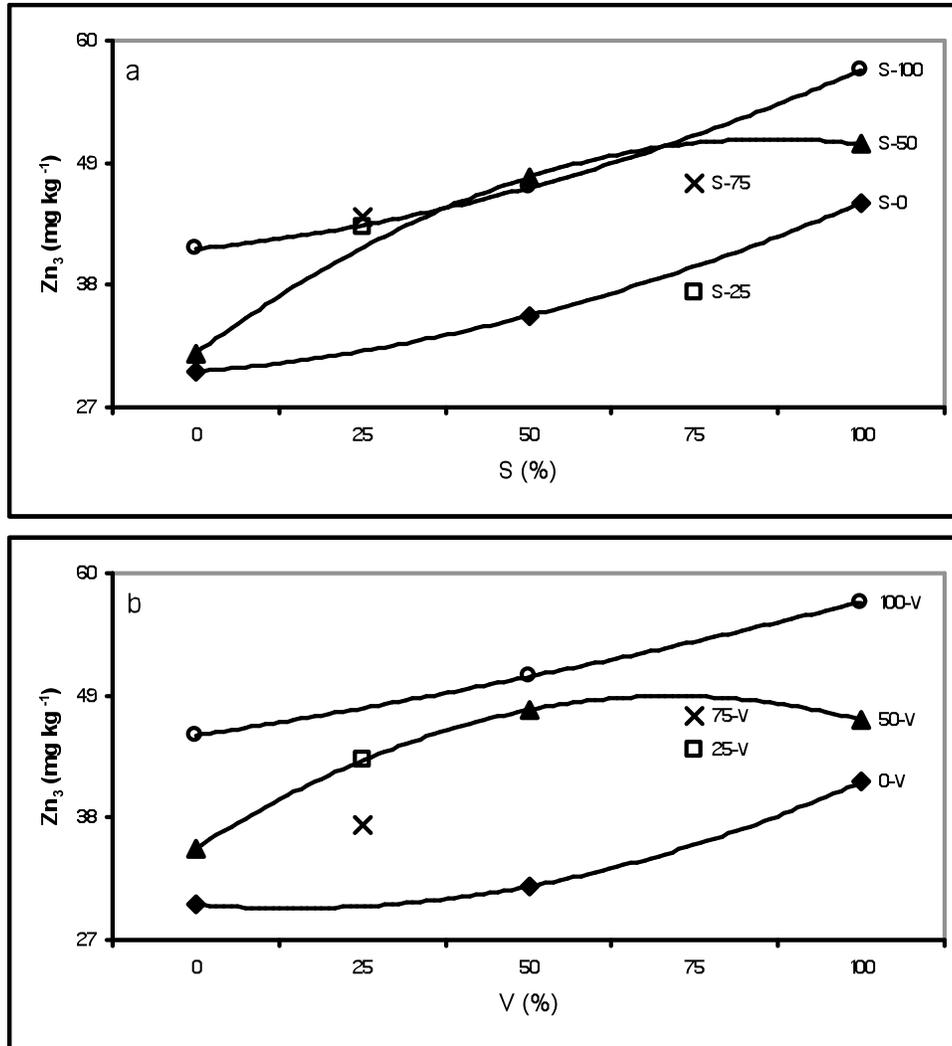


Figura 34. Respuesta de la concentración de zinc (Zn_3) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.2.10 Sodio

a. Primer muestreo

El modelo de función de respuesta de la concentración de sodio en el primer muestreo es como sigue:

$$Na_1 = 2461.587 - 8.29 S + 0.136 SV + 512.191 T_5$$

$$(CME = 200363; Pr. F. = 0.0004; R^2 = 0.431)$$

La concentración de sodio se ve afectada en forma negativa con la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta, observándose la disminución del valor de la variable en los niveles altos de la solución de Steiner (Figura 35a). El extracto de vermicomposta no presentó efectos significativos cuando es aplicado en forma individual (Figura 35b). Por otro

lado, se presentó un efecto de interacción positivo entre los dos factores experimentales, por lo que la concentración de sodio se incrementa cuando la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta son aplicados de forma conjunta.

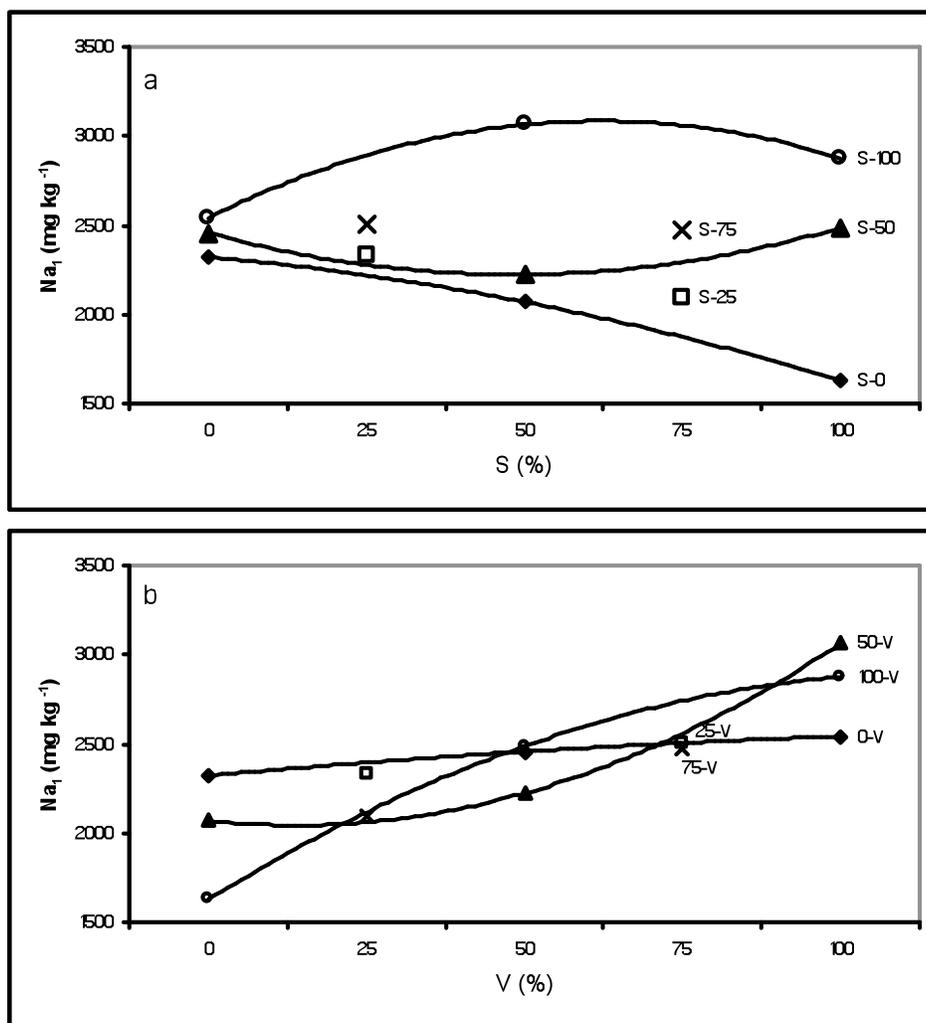


Figura 35. Respuesta de la concentración de sodio (Na_1) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

b. Segundo muestreo

La concentración de sodio en tejido foliar en la segunda fecha de evaluación es definida por el modelo siguiente:

$$Na_2 = 2158.646 + 4.89 S + 15.069 V - 0.112 V^2 - 906.588 T_{10}$$

$$(CME = 205404; Pr. F. = 0.0162; R^2 = 0.33)$$

Se observa un efecto positivo sobre la concentración de sodio, al aplicar solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta (Figura 36a). El

mismo comportamiento se presenta al aplicar extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, incrementando la concentración de sodio en el tejido vegetal. Sin embargo este efecto se vuelve negativo cuando este factor es aplicado a la dosis más alta evaluada (Figura 36b). No se presenta en este muestreo efectos de interacción significativos entre ambos factores experimentales.

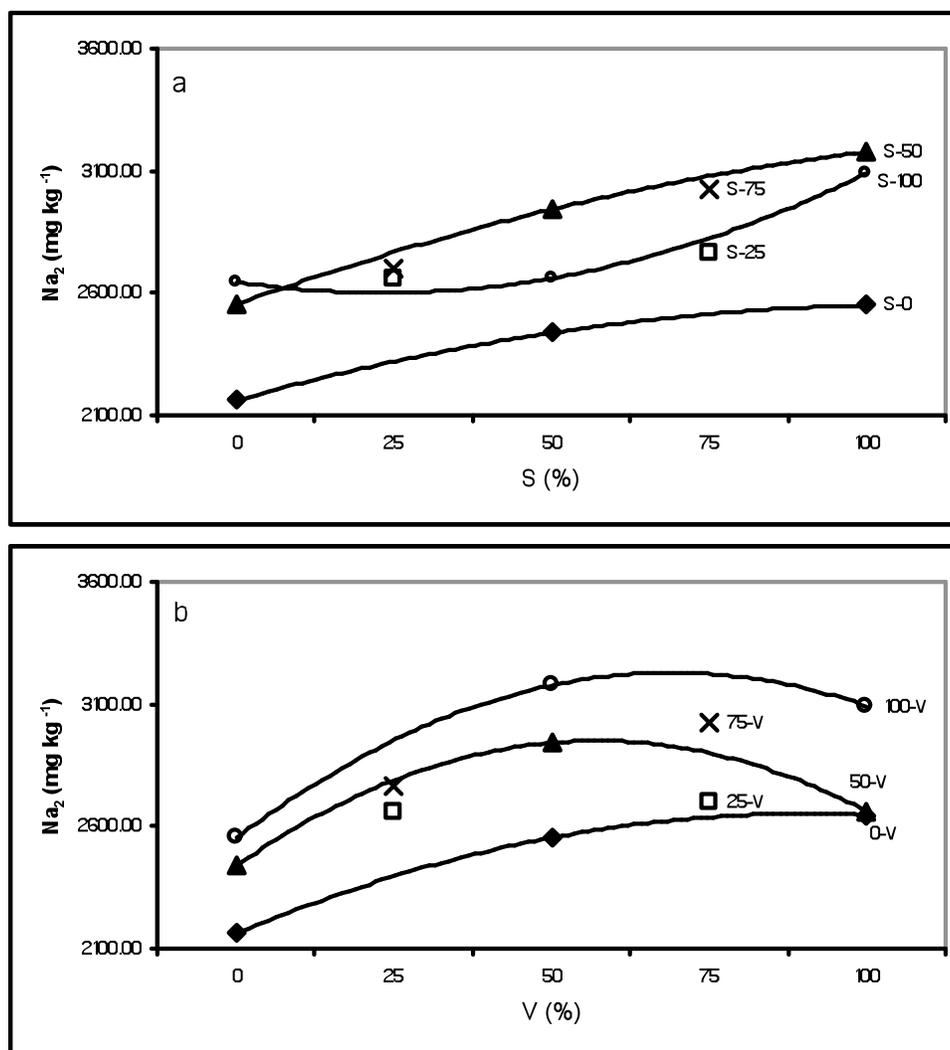


Figura 36. Respuesta de la concentración de sodio (Na_2) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

c. Tercer muestreo

La función de respuesta de la concentración de sodio en hoja en el tercer muestreo es definida por el modelo siguiente:

$$\text{Na}_3 = 2285.591 - 7.977 S - 4.962 V + 15.058 S^{0.5}V^{0.5} + 470.567 T_{13}$$

$$(\text{CME} = 93847; \text{Pr. F.} = 0.0001; R^2 = 0.693)$$

Para el último muestreo, se presenta un efecto negativo de la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta (Figura 37a). Los valores de la concentración de sodio también se ven disminuidos por la aplicación del factor extracto de vermicomposta aplicado de forma individual (Figura 37b). Sin embargo, se observa un efecto de interacción positivo, por lo que la aplicación conjunta de ambos factores experimentales incrementa la concentración de sodio.

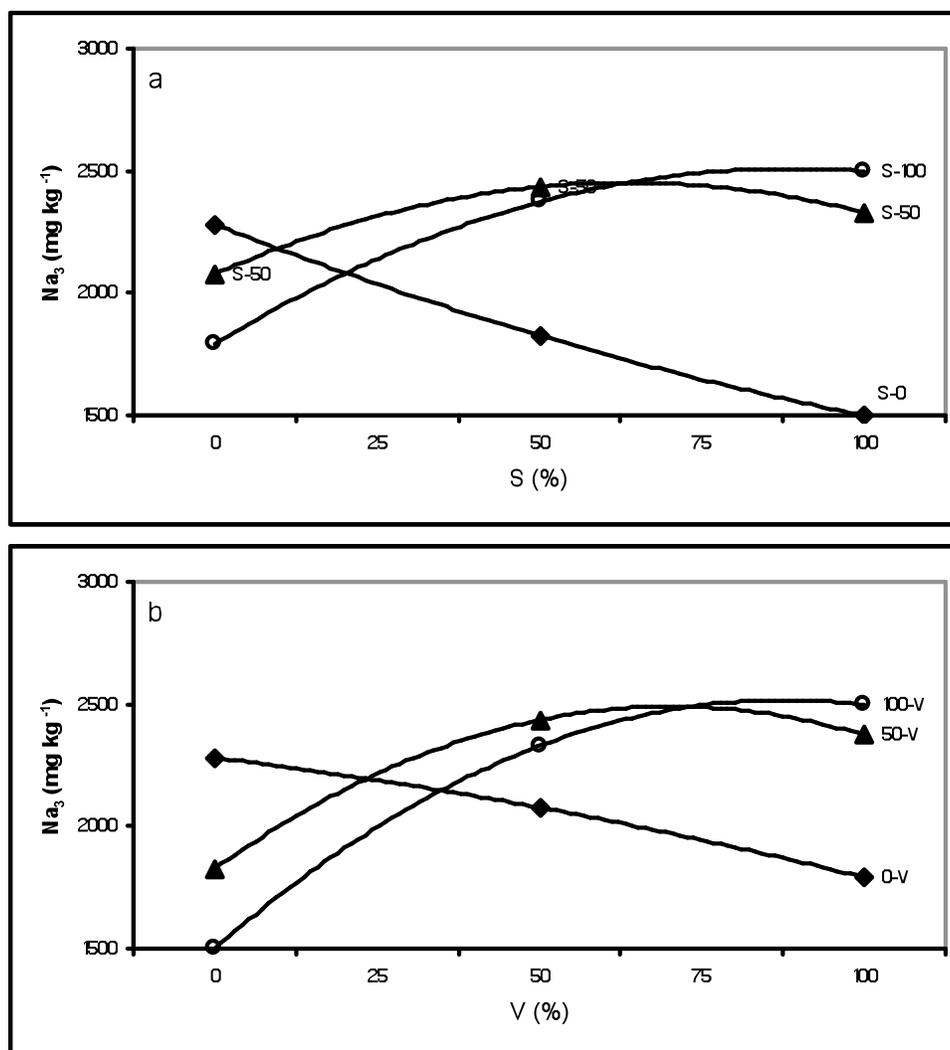


Figura 37. Respuesta de la concentración de sodio (Na₃) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.3 Respuesta de las variables vegetativas

6.3.1 Peso de biomasa seca (PBS)

A continuación se representa el modelo de función de respuesta del peso de biomasa seca de hojas de lechuga:

$$\text{PBS} = 5.499 + 0.105 \text{ S} + 0.0483 \text{ V} - 0.00000708 \text{ SV}^2$$

(CME = 4.073; Pr. F. = 0.0001; R² = 0.73)

El peso de biomasa seca tuvo una respuesta positiva con la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta, al observarse aumento en el valor de esta variable conforme se elevaban los niveles de aplicación de factor (Figura 38a). Se presentó también efecto positivo por la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, promoviendo el aumento de peso de biomasa seca (Figura 38b). Por otro lado, se observó un efecto de interacción negativo entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta, por lo que la aplicación conjunta de ambos factores no incrementa el peso de biomasa seca, este efecto se hace más notorio a los niveles más altos del factor extracto de vermicomposta.

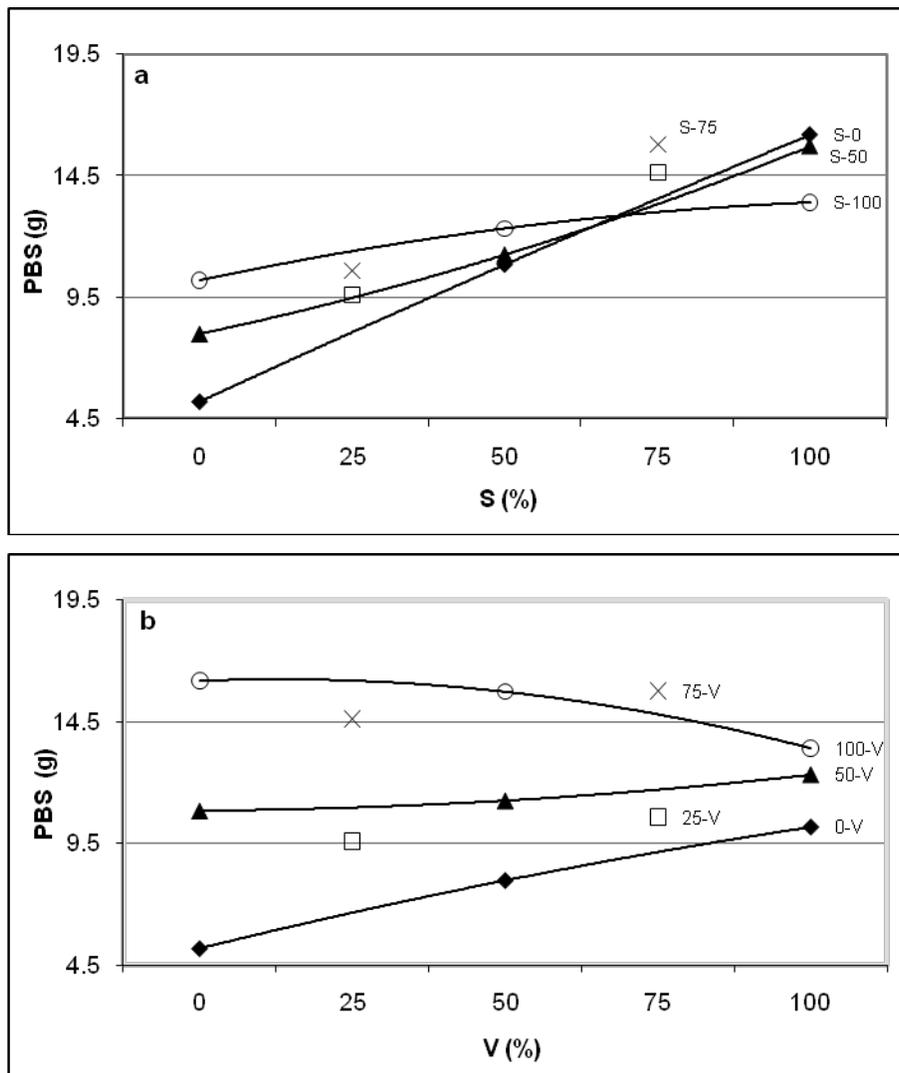


Figura 38. Respuesta del peso seco (PS) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

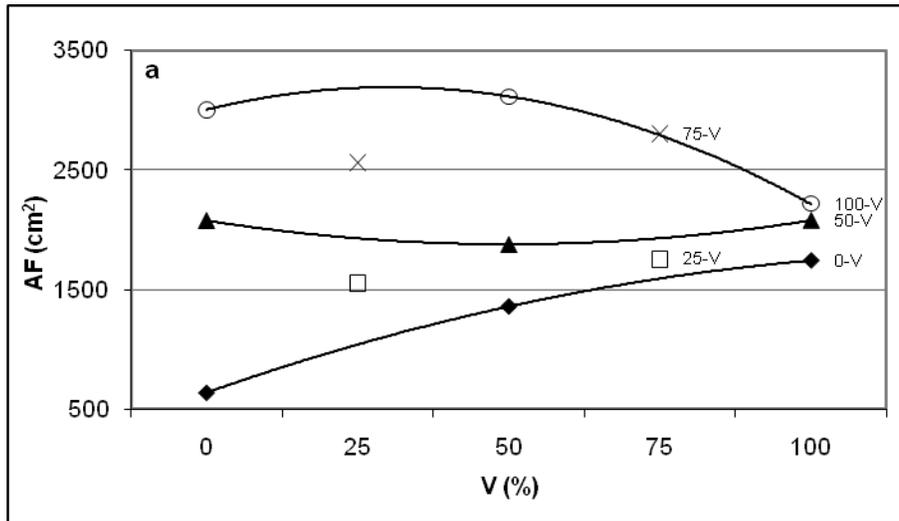
6.3.2 Área foliar (AF)

El modelo de función de respuesta que define al área foliar de este experimento es:

$$AF = 698.539 + 23.908 S + 11.12 V - 0.00176 SV^2$$

(CME = 208938; Pr. F. = 0.0001; $R^2 = 0.72$)

La aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta tiene efecto positivo en el área foliar (Figura 39a). El extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, muestra un comportamiento similar sobre la cantidad de área foliar, al presentar un efecto simple significativo positivo (Figura 39b). Se presenta un efecto de interacción negativo; esto es, el valor del área foliar no muestra incrementos adicionales a niveles altos de la aplicación combinada de los dos factores experimentales, teniendo más influencia sobre esta variable el factor extracto de vermicomposta.



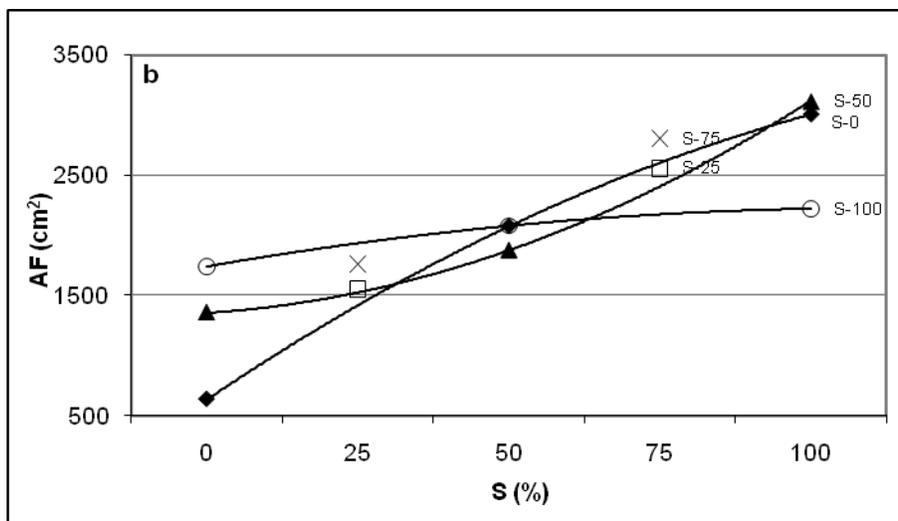


Figura 39. Respuesta del área foliar (AF) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.3.3 Altura de planta (AP)

El modelo de función de respuesta de altura de planta es el siguiente:

$$AP = 15.018 + 0.1405 S - 0.000574 S^2 + 0.000377 V^2 - 0.000415 SV$$

$$(CME = 1.958; Pr. F. = 0.0001; R^2 = 0.79)$$

Para esta variable de respuesta la solución de Steiner afecta positivamente a dosis bajas, aplicada en forma individual. Sin embargo a niveles altos el efecto se hace negativo (Figura 40a). Asimismo, la altura se ve afectada significativamente con la sola aplicación de extracto de vermicomposta, aumentando el valor de la variable conforme se incrementa la dosis de este factor experimental (Figura 40b). Se presenta una interacción negativa entre la solución de Steiner y el extracto de vermicomposta. De esta manera, la altura no presentará incrementos significativos con la aplicación conjunta de ambos factores.

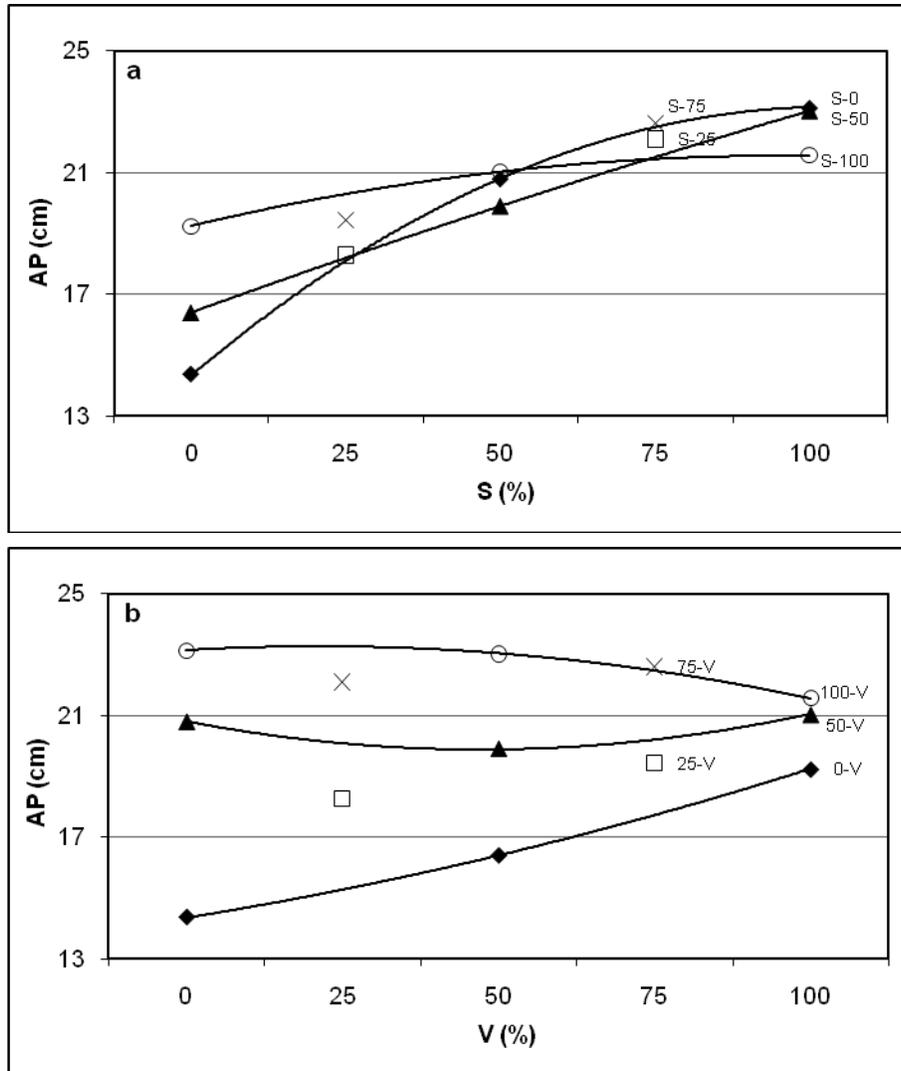


Figura 40. Respuesta de la altura (AL) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.3.4 Unidades SPAD (LS)

Las lecturas SPAD de este experimento, son representadas con el modelo:

$$LS = 25.431 + 0.069 S + 0.045 V - 0.00000593 SV^2$$

(CME = 2.627; Pr. F. = 0.0001; $R^2 = 0.64$)

El factor solución de Steiner en ausencia de vermicomposta, incrementa los valores de las lecturas SPAD (Figura 41a). De igual forma el extracto de vermicomposta aplicado en forma individual también incrementa los valores de las lecturas SPAD (Figura 41b). Sin embargo al aplicar de manera conjunta ambos factores el efecto se vuelve negativo, haciéndose más notorio este efecto para los valores más altos de extracto de vermicomposta en la mezcla.

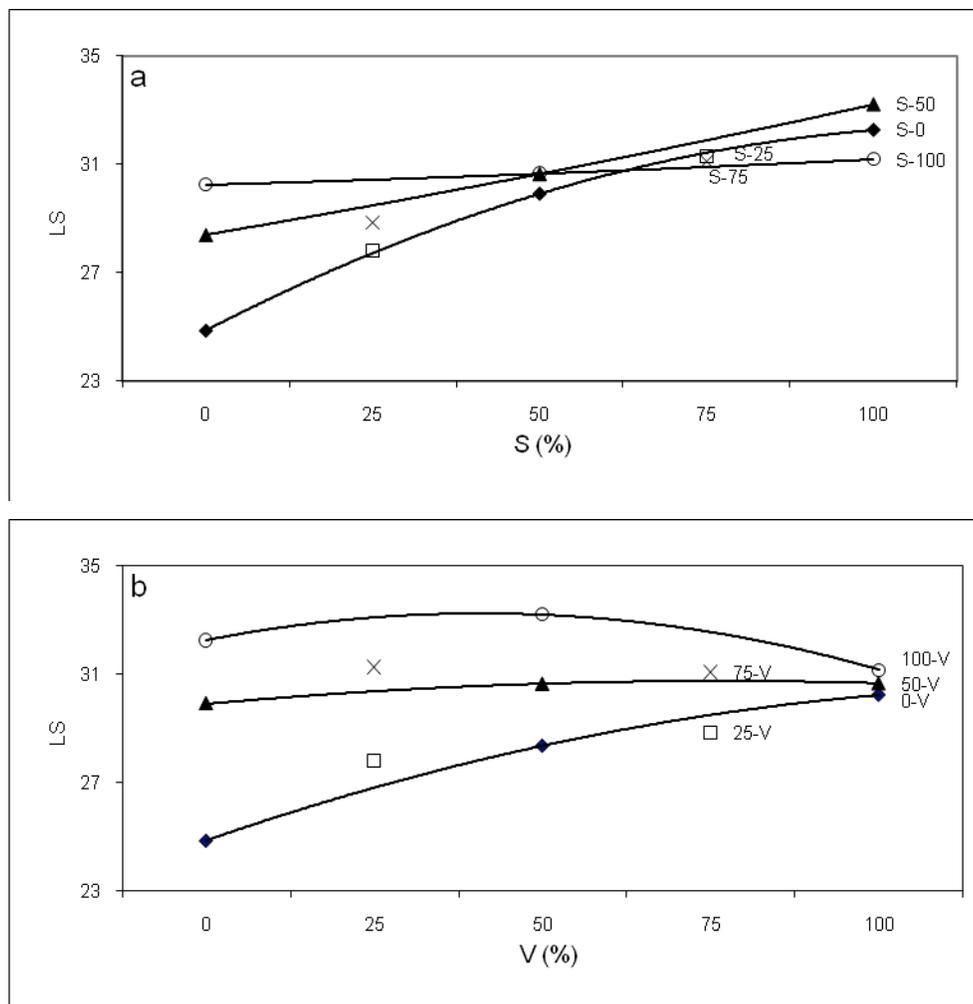


Figura 41. Respuesta de la lectura SPAD (LS) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.3.5 Número de hojas (NH)

La función de respuesta que define los resultados obtenidos en el número de hojas por planta es mostrada a continuación:

$$NH = 19.919 + 0.238 S + 0.198 V - 0.000963 S^2 - 0.00123 V^2 - 0.000998 SV$$

(CME = 7.328; Pr. F. = 0.0001; R² = 0.74)

El número de hojas se incrementa significativamente con la aplicación de niveles bajos de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta, pero para los niveles más altos de este mismo factor ya no se observan incrementos significativos de la cantidad de hojas (Figura 42a).

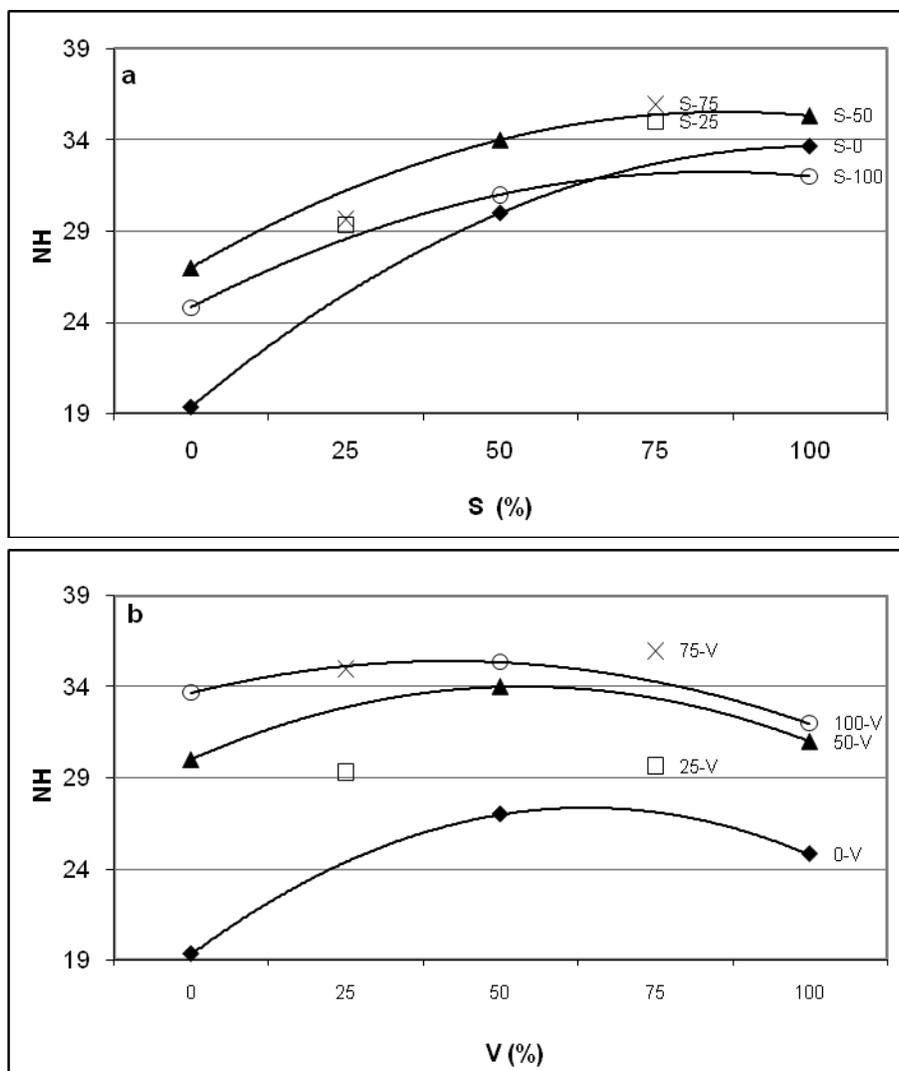


Figura 42. Respuesta del número de hojas (NH) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

El extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, tiene un efecto significativo positivo a niveles bajos; mientras que, a los niveles más altos el efecto se hace negativo, guardando entonces el mismo comportamiento que el factor solución de Steiner (Figura 42b). Por otro lado la aplicación conjunta de ambos factores, presenta un efecto negativo por lo que los incrementos en número de hojas dejan de ser significativos.

6.4 Respuesta de las variables de postcosecha

La coloración de las frutas y verduras es de los criterios de calidad más importantes usados por los consumidores, ya que puede ser utilizado como

indicador para definir la madurez de dichos productos. El color constituye uno de los factores organolépticos más atractivos, y los causantes de este carácter son la clorofila, los flavonoides (antocianinas y flavonoles) y carotenoides (Herrero y Guardia, 1992).

Existen diversos métodos que expresan el color de un objeto o una fuente de luz usando alguna clase de notación como los números (Color space). Uno de los métodos más populares de estos métodos es el “Lab color space (también referido como CIELAB), donde “L” es la luminosidad y “a” y “b” son las coordenadas de cromaticidad (tono del color) (Konica-Minolta, 1998).

La luminosidad es la cantidad de luz reflejada o transmitida dentro de un mismo tono situado entre el blanco y el negro. Es decir, sí es claro, brillante, luminoso u oscuro y se expresa en porcentaje, 0% para negro y 100% para el blanco, como se observa en la Figura 43 (Díaz-Pérez *et al.*, 2000; Konica-Minolta, 1998).

Para el caso de las coordenadas de cromaticidad, el valor positivo máximo de “a” (+60) corresponde al rojo, mientras que el valor más negativo (-60) corresponde al verde. De igual manera, el valor positivo más alto de “b” (+60) corresponde al amarillo y el valor más negativo (-60) corresponde al azul. Los puntos entre estos intervalos corresponden a saturación entre estos colores (Konica-Minolta, 1998).

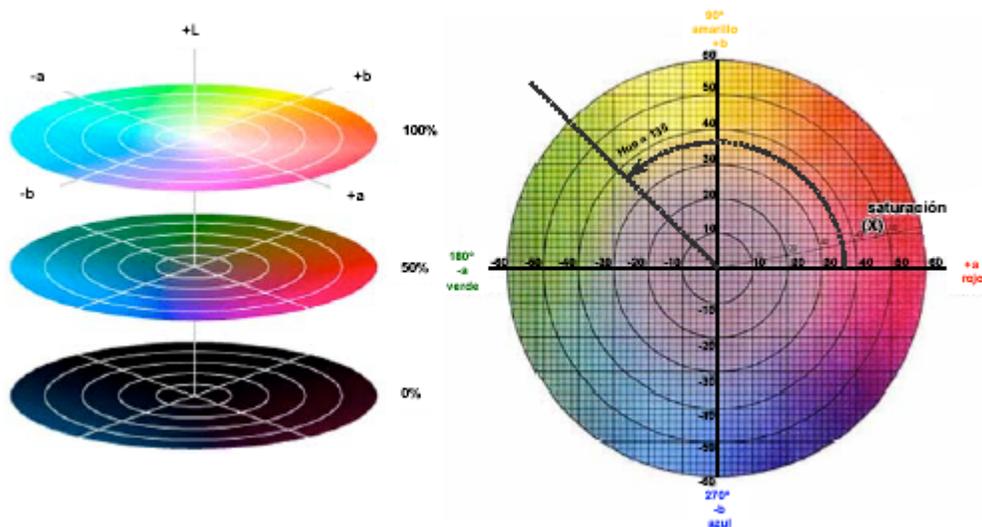


Figura 43. Diagrama de los parámetros del color: luminosidad (L), ángulo hue e índice de saturación, usados en el color postcosecha de frutos.

La lechuga es una hortaliza cuya parte comestible son las hojas que se consumen en fresco, por lo que se espera de la misma un color verde oscuro (Dumas, 2003). Valores muy bajos de “L”, así como positivos de “b” (cerca de 40) no son deseables porque indicarían color opaco y pérdida de clorofila en hojas tornándose amarillas. La pérdida de clorofila es deseable en frutas, pero no en hortalizas frescas. En cambio, esperamos valores de “a” negativos, que representen tonos verdes. El índice de saturación (croma) nos indica la pureza del color, se refiere a la proporción del tono puro predominante; por ejemplo: muy rojo o menos rojo, según la proporción de gris presente en el color, es decir, el cambio en la intensidad de color (García, 2007).

6.4.1 Luminosidad (L)

A continuación se presenta el modelo de función de respuesta que define los resultados de luminosidad obtenidos en hojas de lechuga en el experimento:

$$L = 46.751 - 0.0446 S + 0.0266 V + 0.000341 S^2 - 0.000333 V^2 + 1.447 T_1$$

(CME = 0.721; Pr. F. = 0.0016; R² = 0.44)

La solución de Steiner en ausencia de vermicomposta tiene un efecto negativo en la luminosidad a los niveles bajos de este factor, pero al nivel más alto el efecto se hace positivo (Figura 44a). Para el caso del factor extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, el comportamiento es opuesto, ya que a niveles bajos el valor de luminosidad se incrementa y a los valores altos del factor el efecto se hace negativo (Figura 44b).

La luminosidad no se ve afectada significativamente por la aplicación conjunta de solución de Steiner y extracto de vermicomposta.

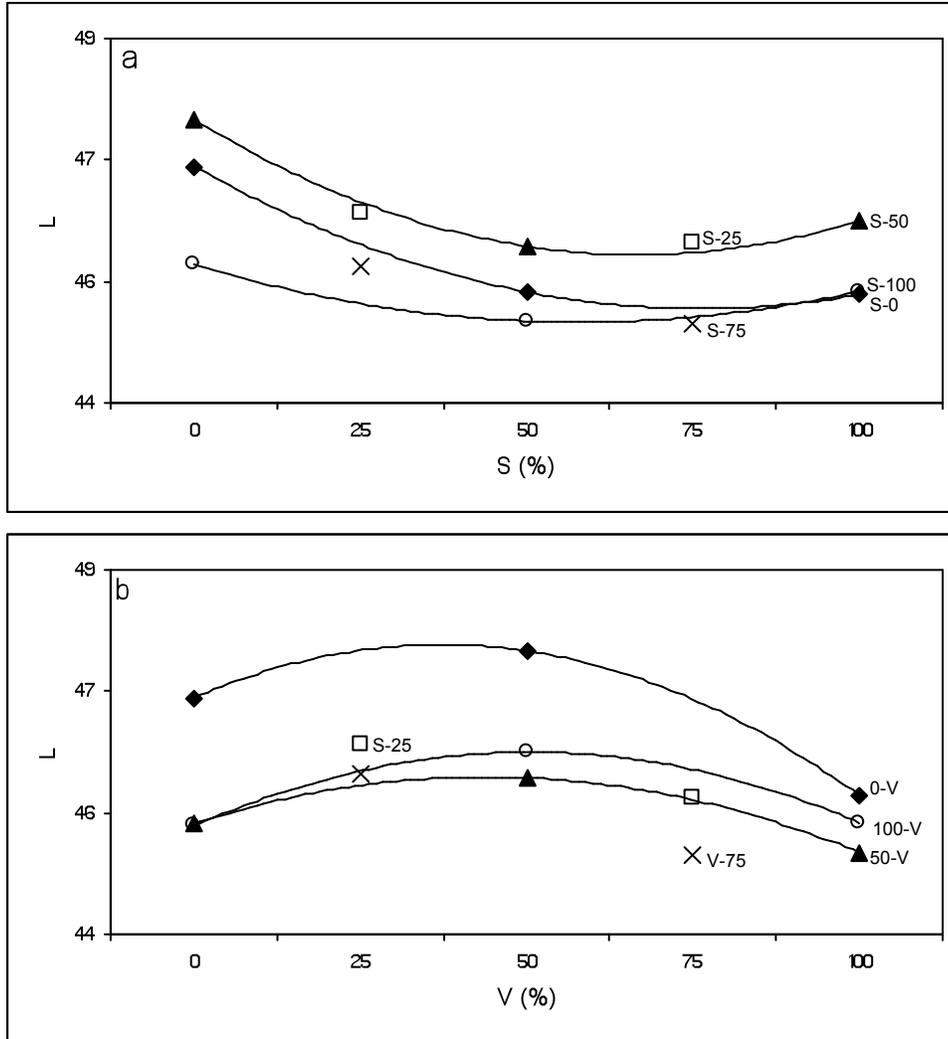


Figura 44. Respuesta de la luminosidad (L) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.4.2 Coloración rojo-verde (A)

La coloración rojo-verde (A) de las hojas de lechuga es representada por el modelo siguiente:

$$A = -11.27754 + 0.0000188 V^2 + 0.49618 T_1$$

$$(CME = 0.0577; Pr. F. = 0.0003; R^2 = 0.40)$$

La solución de Steiner aplicada en forma individual, no tuvo efecto significativo sobre la coloración rojo-verde (A) (Figura 45a). Sin embargo, el extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner incrementó el valor de esta variable conforme se incrementaba la dosis del extracto (Figura 45b). No representaron efectos significativos de interacción sobre esta variable.

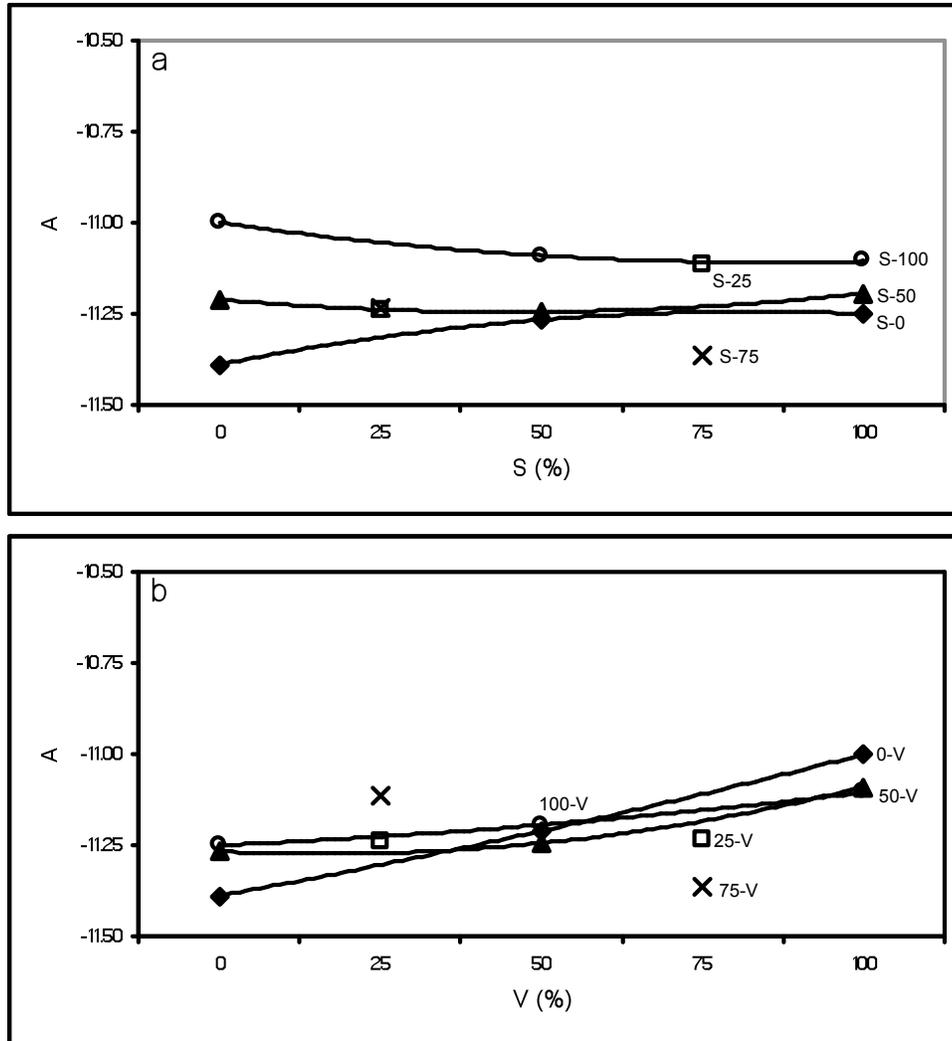


Figura 45. Respuesta de la coloración rojo-verde (A) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.4.3 Coloración amarillo-azul (B)

La coloración amarillo-azul (B) de las hojas de lechuga en el experimento es representada por el modelo siguiente:

$$B = 16.677 - 0.0134 S + 0.0128 V + 0.00012 S^2 - 0.000248 V^2$$

$$(CME = 0.365; Pr. F. = 0.0004; R^2 = 0.49)$$

La coloración amarillo-azul se vio afectada por la solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta. Las dosis bajas de solución de Steiner afectaron negativamente a esta variable y cuando se usaron las dosis elevadas el comportamiento se volvió positivo (Figura 46a). Para el caso del extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, el comportamiento fue

contrario, a dosis bajas del extracto el efecto observado fue positivo y a la dosis alta el efecto fue negativo (Figura 46b).

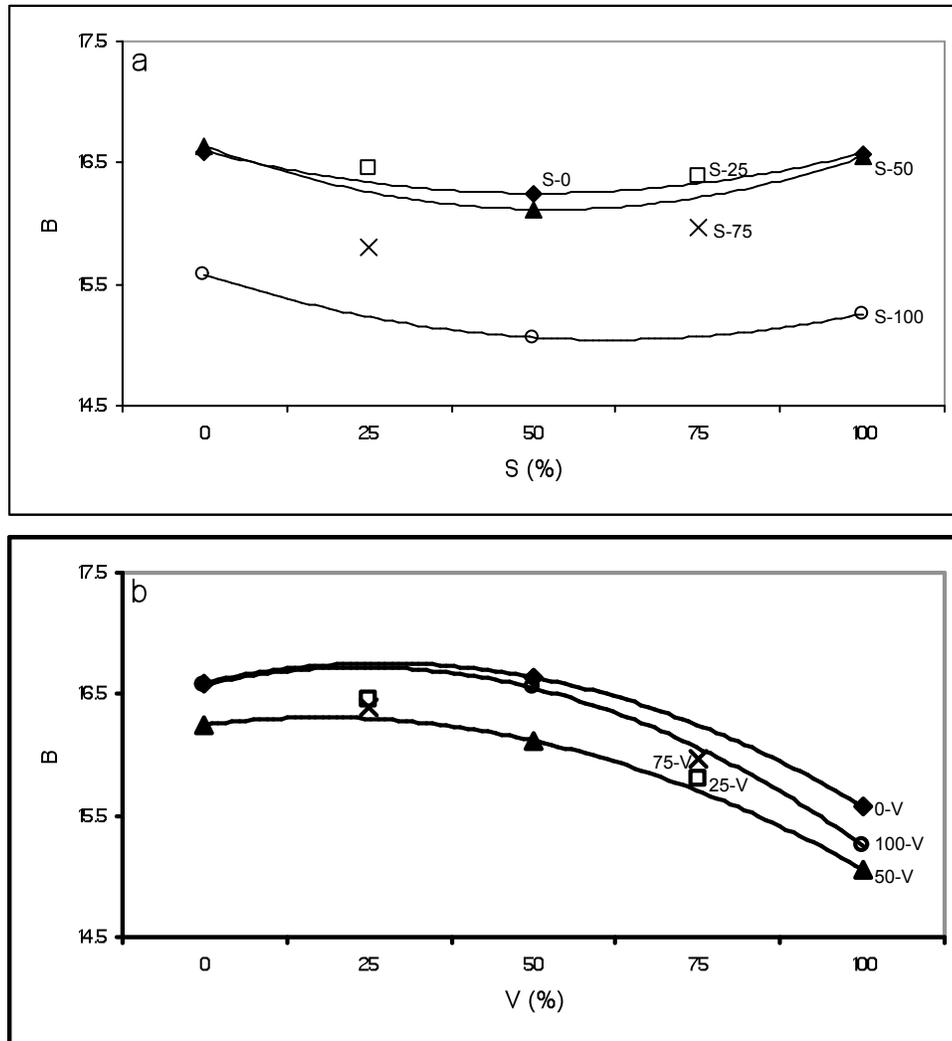


Figura 46. Respuesta de la coloración amarillo-azul (B) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.4.4 Índice de saturación o croma (CR)

El modelo de respuesta del croma de las hojas fue el siguiente:

$$CR = 20.292 - 0.0159 S + 0.000145 S^2 - 0.000127 V^2 + 0.467 T_1 + 0.677 T_2$$

(CME = 0.369; Pr. F. = 0.0001; $R^2 = 0.55$)

La solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta tiene un efecto significativo sobre el índice de saturación, siendo el efecto negativo para los primeros niveles, y positivo para los niveles altos de aplicación (Figura 47a). Por su parte el extracto de vermicomposta afecta en forma negativa los valores

del índice de saturación, siendo mayor este efecto a los niveles más altos de aplicación para este factor (Figura 47b). No se observan efectos de interacción significativos para esta variable.

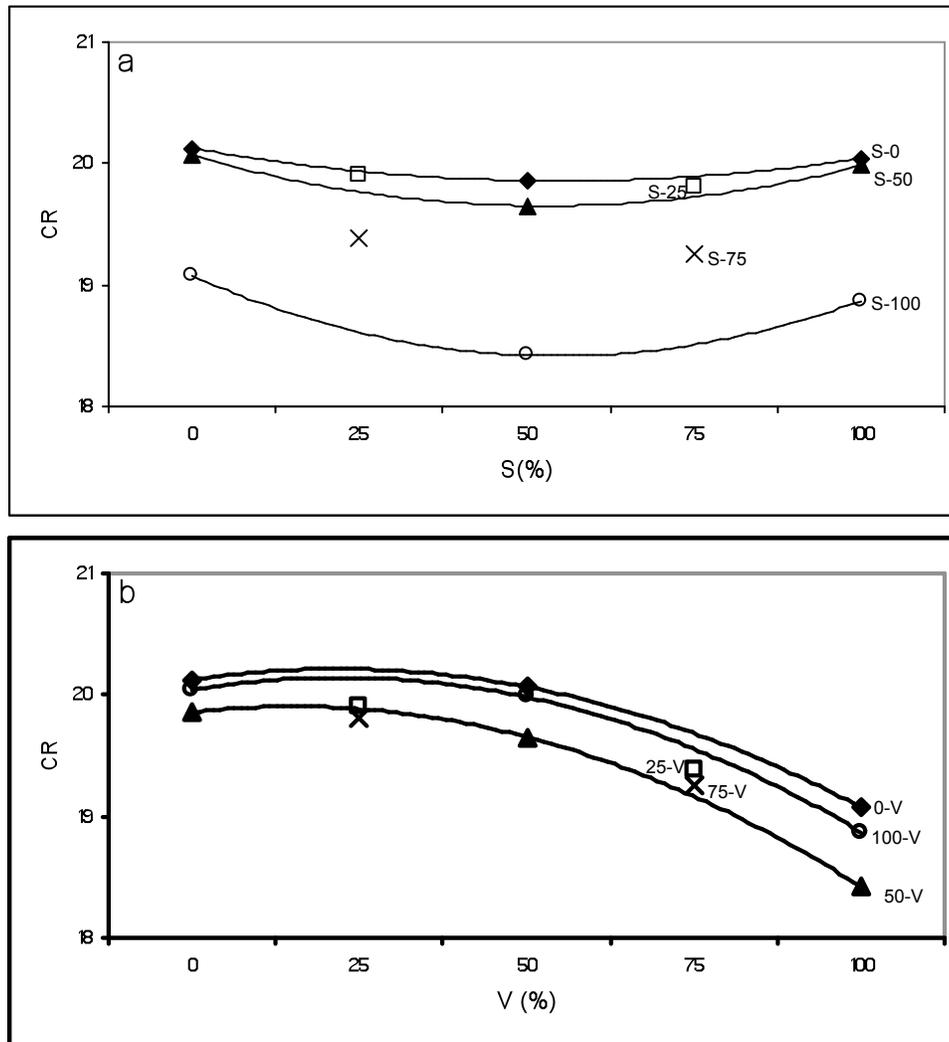


Figura 47. Respuesta del valor croma (CR) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.4.5 Resistencia al corte (RC)

La resistencia al corte en hojas de lechuga (RC) es representada por el siguiente modelo:

$$RC = 1.226 + 0.0204 S + 0.0129 V - 0.000166 S^2 - 0.000103 V^2 + 0.614 T_1$$

(CME = 0.137; Pr. F = 0.0033; R² = 0.43)

La resistencia al corte es afectada en forma significativa por la aplicación de solución de Steiner en forma aislada, el valor de resistencia se incrementa a

los primeros niveles, pero a los niveles más altos la respuesta empieza a hacerse negativa (Figura 48a). El mismo comportamiento se observa con el factor extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, incrementando a niveles bajos la resistencia al corte, pero a niveles altos la respuesta deja de ser significativa (Figura 48b). Para esta variable, no se observan efectos significativos de interacción por la aplicación combinada de solución de Steiner y extracto de vermicomposta.

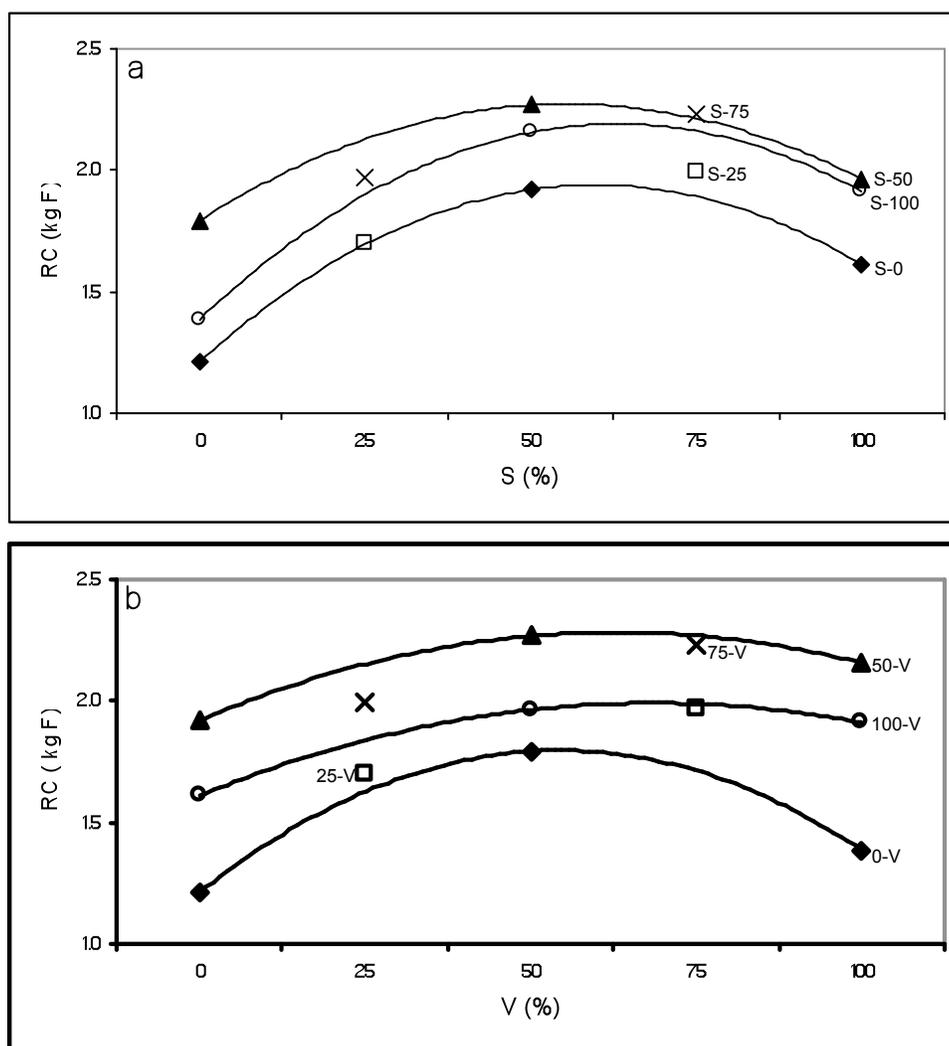


Figura 48. Respuesta de la resistencia al corte (RC) a la aplicación de solución de Steiner (S) y extracto de vermicomposta (V).

6.5. Discusión general

a. Concentración nutrimental

La aplicación de extracto de vermicomposta y solución de Steiner de manera individual o combinados tuvo efectos significativos en la concentración

nutrimental de la parte vegetativa de la lechuga. Estos efectos se presentaron de manera diferencial para macro y micronutrientes (Cuadro 15).

Cuadro 15. Signo de los efectos simples y de interacción de los factores de estudio sobre la concentración nutrimental de la parte aérea en lechuga.

Variable	Signo de la respuesta a los factores de estudio
Nitrógeno 1 (N ₁)	$N_1 = + S + V - V^2$
Nitrógeno 2 (N ₂)	$N_2 = -V^{0.5} + S^2$
Nitrógeno 3 (N ₃)	$N_3 = + VS - V^2S$
Fósforo 1 (P ₁)	$P_1 = + S + V - V^2$
Fósforo 2 (P ₂)	$P_2 = + S + V - S^2 - V^2$
Fósforo 3 (P ₃)	$P_3 = + S + V - V^2 - SV^2$
Potasio 1 (K ₁)	$K_1 = + S + V - S^2 - V^2$
Potasio 2 (K ₂)	$K_2 = + S + V - V^2$
Potasio 3 (K ₃)	$K_3 = + S + V - S^2$
Calcio 1 (Ca ₁)	$Ca_1 = -S + S^{0.5}$
Calcio 2 (Ca ₂)	$Ca_2 = + S - S^2 - SV$
Calcio 3 (Ca ₃)	$Ca_3 = + S - V$
Magnesio 1 (Mg ₁)	$Mg_1 = -S + S^{0.5}$
Magnesio 2 (Mg ₂)	$Mg_2 = + S - S^2 - SV$
Magnesio 3 (Mg ₃)	$Mg_3 = + S - V$
Boro 1 (B ₁)	$B_1 = + V^{0.5}S$
Boro 2 (B ₂)	$B_2 = + V$
Boro 3 (B ₃)	$B_3 = + V + S^2$
Manganeso 1 (Mn ₁)	$Mn_1 = + S + V$
Manganeso 2 (Mn ₂)	$Mn_2 = + S + V$
Manganeso 3 (Mn ₃)	$Mn_3 = + V + SV$
Hierro 1 (Fe ₁)	$Fe_1 = + SV - V^2S$
Hierro 2 (Fe ₂)	$Fe_2 = + S$
Hierro 3 (Fe ₃)	$Fe_3 = + V^2 + S^2V$
Zinc 1 (Zn ₁)	$Zn_1 = + S + V - S^2 - V^2$
Zinc 2 (Zn ₂)	$Zn_2 = + S + V - VS + S^2V$
Zinc 3 (Zn ₃)	$Zn_3 = + S + V$
Sodio 1 (Na ₁)	$Na_1 = -S + SV$
Sodio 2 (Na ₂)	$Na_2 = + S + V - V^2$
Sodio 3 (Na ₃)	$Na_3 = -S - V + V^{0.5}S^{0.5}$

V = Extracto de vermicomposta; S = Solución de Steiner

En el caso de los macronutrientes, se observó efecto positivo para las aplicaciones de niveles bajos de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner, incrementando las concentraciones nutrimentales de las hojas de lechuga. Con excepción del calcio y el magnesio, cuyo único efecto simple significativo se presentó en el tercer muestreo siendo negativo para ambos elementos (Cuadro 15).

En el caso del nitrógeno, fósforo y potasio el efecto positivo del extracto de vermicomposta se observó sobre todo en los primeros muestreos, siendo este efecto mayor que el efecto de la solución de Steiner. Esto coincide con resultados de varios autores que reportan que después del proceso de vermicomposteo; la mineralización del nitrógeno se incrementa y con ello el contenido de nitrógeno total (sobre todo en forma de nitrato) (Atiyeh *et al.*, 2000a, 2000b; Santamaría, 2000), además de que contienen nutrientes en formas muy fácilmente asimilable por las plantas como fósforo intercambiable y potasio (Orozco *et al.*, 1996; Albanell *et al.*, 1988) y micronutrientes, incrementando el contenido nutricional de las hojas (Atiyeh *et al.*, 2001).

Por otro lado, a niveles altos, el extracto de vermicomposta ya fuera aplicado en ausencia de solución de Steiner o en forma conjunta con este factor, el efecto se vuelve negativo; es decir, que las concentraciones de estos elementos en las hojas de lechuga ya no presentaron incrementos e incluso se registraron concentraciones menores que a niveles más bajos.

Turkmen *et al.*, (2004) y Chen y Aviad (1990) reportan que las curvas de crecimiento de plantas tratadas con sustancias húmicas, muestran incrementos progresivos conforme se aumenta la concentración de estas sustancias, pero que a los niveles más altos de aplicación la respuesta decrece. Las vermicompostas contienen una gran cantidad de sustancias húmicas, en el intervalo entre 20 y 40% (Capistrán *et al.*, 2001); por lo que la respuesta a la aplicación de extracto de vermicomposta pudiera ser explicada por estas sustancias.

En este sentido, el calcio y el magnesio son los elementos que presentaron la misma respuesta en cuanto a los efectos simples y de interacción de ambos factores (Cuadro 14), diferenciándolos sólo la magnitud. Presentando el calcio los valores mayores para los coeficientes estimados por el modelo.

En el caso de los micronutrientes (boro, manganeso, hierro y zinc) la respuesta a la aplicación de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner fue positiva en todos los casos (Cuadro 14).

Neumann y Römheld (2001) y Alcántar y Trejo-Téllez (2007), mencionan que la movilización de micronutrientes como el boro, manganeso, zinc y hierro ha sido relacionada con la acidificación de la rizósfera y la formación de complejos con ácidos húmicos y ácidos orgánicos. Experimentos en hidroponía en presencia de agentes acomplejantes revelan que la absorción por la planta está relacionada

principalmente con la actividad de iones metálicos libres en solución (Neumann y Römheld, 2001).

Así mismo, Porta *et al.*, (1999) afirma que las sustancias húmicas presentan reacciones de superficie con otros compuestos, formando complejos, ya sea en forma directa o a través de iones metálicos, principalmente con hierro, aluminio, zinc, manganeso, cobre, o níquel, por lo que son importantes en procesos de translocación, así como de inmovilización de metales tóxicos. En este sentido, la fracción húmica de bajo peso molecular, la cual tiene una alta concentración de grupos carboxilos y fenólicos, son más efectivos en la formación de complejos con iones metálicos (Weber, 1988).

Por otro lado, para el caso de los efectos de interacción entre la aplicación conjunta de los factores solución de Steiner y extracto de vermicomposta fue variable para dichos micronutrientes.

El boro y el manganeso presentaron incrementos significativos positivos con la aplicación conjunta de ambos factores. En el caso del boro, este efecto se incrementó en los niveles más altos de extracto de vermicomposta. El boro presenta afinidad para unirse a los grupos hidróxilo de los ácidos húmicos (Alcántar y Trejo-Téllez, 2007; Navarro y Navarro, 2003), por lo que es posible que a mayor cantidad del extracto de vermicomposta, se vea favorecida la absorción de este elemento por la planta.

Por su parte, los efectos de interacción para el zinc y el hierro resultaron ser negativos sobre todo a niveles altos del extracto de vermicomposta aplicado en forma conjunta con la solución de Steiner. Se observaron efectos de interacción positivos en el caso del tercer muestreo en hierro y en el segundo muestreo en zinc a los niveles más altos de la solución de Steiner aplicada conjuntamente con el extracto de vermicomposta.

Para el caso del sodio, se observó efecto significativo negativo de la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta, es decir, la aplicación individual de este factor promueve decrementos en la concentración de sodio en la planta. Para el caso de aplicaciones de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner también se observa un efecto negativo, incluso a los niveles altos de este factor; Sánchez *et al.* (2005, 2006) observaron respuesta similar al aplicar ácidos húmicos al suelo en cultivos de jitomate y vid, reduciendo efectos de salinidad por sodio. Pero por otro lado,

cuando ambos factores se aplican de manera conjunta, la concentración de sodio en la planta se incrementa observándose un efecto de interacción positivo. El sodio aunque es un elemento benéfico, en grandes concentraciones en la parte aérea de la planta puede causar desórdenes osmóticos y metabólicos, además de que puede competir por sitios de absorción con el potasio en la raíz (Alcántar y Trejo-Téllez, 2007); por lo anterior, lo deseable es que en las hojas de lechuga se presenten bajas concentraciones de sodio. En este sentido, el efecto favorable es el que se observa al aplicar solución de Steiner o extracto de vermicomposta en forma aislada; mientras que, la aplicación combinada de los dos materiales sobre esta variable no es muy conveniente, de acuerdo a los resultados experimentales.

b. Variables vegetativas

La respuesta de las variables peso de biomasa seca, área foliar, número de hojas y lectura SPAD a los factores experimentales fue similar (Cuadro 16). Los factores solución de Steiner y extracto de vermicomposta aplicados de forma individual incrementan los valores de dichas variables. Asimismo, cuando dichos factores son aplicados en forma conjunta el efecto se vuelve negativo, sobre todo a los valores más altos del factor extracto de vermicomposta. En diversos trabajos se han reportado resultados similares con el uso de vermicomposta aplicada al suelo o usada como sustrato, encontrando incrementos significativos en germinación y variables de crecimiento (peso de biomasa seca, altura de planta, área foliar, número de hojas y/o número de botones florales), en jitomate, pepino, chile, clavel, rábano y fresa al aplicar vermicomposta a dosis bajas combinado con solución nutritiva, efecto que se volvía negativo al incrementar la dosis del mismo producto (Arancon *et al.*, 2004a; Atiyeh *et al.*, 2002a, 2002b, 2001, 2000a; Buckerfield *et al.*, 1999).

La variable altura se comporta diferente, ya que la solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta a dosis bajas incrementa el valor de la variable, pero a los niveles más altos se observan decrementos. El extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner a su vez, incrementa la altura cuando se aplica a los niveles más altos usados en el presente experimento. Estos incrementos pueden ser atribuidos en parte, a los contenidos de nitrógeno en la vermicomposta (Atiyeh *et al.*, 2000a; Santamaría, 2000).

Por otro lado, se observa un efecto negativo de interacción sobre la altura al aplicar los dos factores de manera conjunta.

Cuadro 16. Signo de los efectos simples y de interacción de los factores de estudio sobre variables vegetativas en lechuga.

Variable	Signo de la respuesta a los factores de estudio
Peso de biomasa seca (PS)	$PS = +S + V - SV^2$
Área foliar (AF)	$AF = + S + V - SV^2$
Lecturas SPAD (LS)	$LS = +S + V - SV^2$
Altura (AL)	$AL = + S - S^2 + V^2 - SV$
Número de Hojas (NH)	$NH = + S + V - S^2 - V^2 - SV$

V = Extracto de vermicomposta; S = Solución de Steiner

c. Variables postcosecha

Las diferentes variables que componen la coloración como son la luminosidad, el valor de A (tonalidad rojo-verde), valor de B (tonalidad amarillo-azul) y la croma (índice de saturación del color), presentan respuestas similares a las registradas en las variables vegetativas a la aplicación de los factores de estudio. La luminosidad se ve beneficiada con la aplicación de dosis altas de solución de Steiner o dosis bajas de extracto de vermicomposta. Además la coloración rojo-verde (A) se hace positiva con la aplicación de dosis altas de extracto de vermicomposta, lo que significa que el tono verde se va perdiendo, situación contraria cuando se aplican dosis bajas de este factor. El índice de saturación del color incrementa con dosis altas de solución de Steiner o dosis bajas de extracto de vermicomposta. Tourjee *et al.* (1993), sugiere que incrementos en la intensidad del color (croma) se presentan cuando las plantas se desarrollan bajo tratamientos con alto valor de conductividad eléctrica (C. E.). García (2007), y Tadesse *et al.*, (1999), encontraron esta tendencia en pepino y pimiento morrón respectivamente. Lo anterior, eso contrario a los resultados obtenidos en esta investigación, ya que con las mayores concentraciones de extracto de vermicomposta con altas C.E., el croma se reduce.

A dosis bajas de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta la coloración disminuye, restándole calidad a la apariencia de la

lechuga. Por otro lado a los niveles más altos de este factor la calidad en la coloración se incrementa.

Las aplicaciones de extracto de vermicomposta en ausencia de solución de Steiner tienen un efecto similar a los descritos en el párrafo anterior, ya que la coloración tiene valores aceptables conforme se incrementa la dosis de este factor, pero a los niveles más altos el efecto se hace negativo, observándose decrementos en los valores de las variables de coloración.

Respecto a la resistencia al corte, la aplicación de solución de Steiner en ausencia de extracto de vermicomposta y viceversa (cada factor aplicado de forma individual) presentan el mismo comportamiento, observándose un comportamiento positivo a los niveles bajos de aplicación; mientras que a los niveles altos se vuelve negativa la respuesta a dichos factores.

Cuadro 17. Signo de los efectos simples y de interacción de los factores de estudio sobre la coloración y resistencia al corte en lechuga.

Variable	Signo de la respuesta a los factores de estudio
Luminosidad (L)	$L = -S + V + S^2 - V^2$
Rojo/Verde (A)	$A = +V^2$
Amarillo/Azul (B)	$B = -S + V + S^2 - V^2$
Resistencia al corte (RC)	$RC = +S + V - S^2 - V^2$
Índice de saturación o croma (CR)	$CR = -S + S^2 - V^2$

V = Extracto de vermicomposta
S = Solución de Steiner

De forma general, se observa que las diferentes variables nutrimentales, vegetativas y de calidad observadas presentan un comportamiento similar. Cuando se aplica extracto de vermicomposta (en ausencia o junto con la solución de Steiner) a dosis bajas la respuesta es favorable, pero cuando las dosis son altas la tendencia de esta respuesta se hace negativa.

Como se explicaba anteriormente, diversos autores observaron esta misma respuesta en otros cultivos con el uso de vermicomposta, aún cuando se aportaba la totalidad de nutrimentos a los tratamientos con vermicomposta (Arancon *et al.*, 2004a, 2004b; Atiyeh *et al.*, 2002a; 2002b; 2001; 2000a; Buckerfield *et al.*, 1999), por lo que sugieren que otros factores además de los nutrimentales deben estar involucrados.

La hipótesis más aceptada del efecto positivo de las sustancias húmicas a baja concentraciones (Atiyeh *et al.*, 2002b) se refiere por un lado a un efecto directo de naturaleza hormonal, producida por los ácidos húmicos que pueden simular modos de acción de fitohormonas o reguladores de crecimiento vegetal (Arancon *et al.*, 2004a; Atiyeh *et al.*, 2002b; Nardi *et al.*, 2002; Varanini y Pinton, 2001), o a reguladores de crecimiento vegetal adsorbidos en los humatos (Quaggiotti *et al.*, 2004; Atiyeh *et al.*, 2002b; Capistrán *et al.*, 2001; Gajalakshmi *et al.*, 2001), reguladores producidos por microorganismos asociados a las lombrices composteras (Arancon *et al.*, 2004b; Capistrán *et al.*, 2001).

Por otro lado se relaciona la respuesta positiva a un efecto indirecto, al actuar sobre el metabolismo de los microorganismos del suelo, la dinámica de absorción de nutrimentos de la solución del suelo, condiciones físicas del suelo, absorción de iones metálicos e incremento en la permeabilidad de la pared celular (Arancon *et al.*, 2004a; Atiyeh *et al.*, 2002b, 2001).

En contraste, el decremento del crecimiento y/o concentración nutrimental a niveles altos de vermicomposta es atribuido a una alta concentración de sales, pobre aereación y porosidad del medio, toxicidad inducida por metales pesados y/o presencia de sustancias fitotóxicas (Arancon *et al.*, 2004a; Atiyeh *et al.*, 2002a, 2001, 2000a).

La hipótesis del efecto directo de naturaleza hormonal pareciera estar más acorde a nuestros resultados, por el hecho de que el crecimiento de la lechuga se realizó en hidroponía y los problemas de porosidad y aereación eran mínimos (se usaron partículas de tezontle con granulometría menor a 8 mm) y hubo tratamientos que se les suministraron los requerimientos nutrimentales necesarios.

También se observaron efectos positivos en la absorción de iones metálicos y de boro, por lo que pudiera haberse dado un incremento en la permeabilidad de la pared celular. Sin embargo, esto último debiera de comprobarse experimentalmente con estudios más específicos.

En esta investigación, efectivamente los tratamientos con los niveles más altos de vermicomposta ($S_{50}V_{100}$ y $S_{100}V_{100}$) presentaron conductividades de 6.9 y 7.1 dS m⁻¹ respectivamente y el extracto de vermicomposta sin diluir de 11 dS m⁻¹, por lo que no se descarta que la C.E. tenga influencia en los efectos negativos a altas dosis de extracto de vermicomposta registrados.

VII. CONCLUSIONES

La aplicación combinada de extracto de vermicomposta y Solución de Steiner en la producción hidropónica de lechuga presenta los siguientes efectos simples significativos:

- a) Del extracto de vermicomposta
 - Incrementa los contenidos nutrimentales de nitrógeno, fósforo y potasio en hojas de lechuga, sobre todo en la etapa inicial de crecimiento de la planta y a valores mayores incluso que la aplicación de Solución de Steiner. Sin

embargo, este efecto se hace negativo a dosis altas del extracto de vermicomposta.

- Incrementa los contenidos nutrimentales de boro, manganeso, hierro, zinc y sodio.
- No presenta efectos significativos sobre la concentración nutrimental de calcio y magnesio en hojas de lechuga.
- Incrementa el valor del peso de biomasa seca, área foliar, número de hojas y lectura spad. Para el caso de la altura se observan incrementos solo al aplicar niveles altos del extracto.
- Incrementa los valores de “B” (coloración amarillo/azul), luminosidad y resistencia al corte, pero esta tendencia se hace negativa al incrementar el nivel de extracto de vermicomposta.
- El valor de “A” (coloración rojo-verde) se vuelve menos negativo conforme se incrementa la proporción de extracto de vermicomposta, es decir la lechuga se hace menos verde.
- Cromo se reduce al incrementar los niveles de extracto de vermicomposta.

b) De la Solución de Steiner

- Incrementa la concentración nutrimental de macros y micronutrientes, con excepción del sodio, el cual afecta en forma contraria.
- Incrementa la producción de biomasa seca, área foliar, altura, número de hojas y lecturas SPAD.
- Incrementa la resistencia al corte, pero este efecto se vuelve negativo a los niveles más altos de este factor.
- Reduce la luminosidad, la coloración amarilla (valor de “B”) y la saturación de color, variables que incrementan su valor conforme se incrementa el nivel de aplicación de la solución de Steiner.
- Presenta efectos no significativos en la coloración verde (valor “A”).

La aplicación combinada de extracto de vermicomposta y solución de Steiner en la producción hidropónica de lechuga presenta los siguientes efectos de interacción:

- Reduce la concentración nutrimental de nitrógeno, calcio, magnesio, boro, hierro, zinc y sodio, conforme se incrementa la dosis de extracto de vermicomposta en la solución.

- Presenta efectos no significativos en la concentración nutrimental de fósforo, potasio y manganeso en hojas de lechuga.
- Reduce los valores de peso de biomasa seca, área foliar, altura de planta, número de hojas y lecturas spad conforme se incrementa el nivel de la dosis del extracto de vermicomposta.
- Presenta efectos no significativos sobre la luminosidad, valores de “A” (coloración rojo-verde), valores de “B” (coloración amarillo-azul), croma y resistencia al corte.

VIII. RECOMENDACIONES

Ante la falta de métodos estandarizados, es necesario llevar a cabo investigaciones encaminadas a determinar los diferentes protocolos de obtención de extractos de vermicomposta, así como la relación entre cada método y las características químicas y microbiológicas del producto final.

Por otro lado es necesario definir el (los) indicador (es) más adecuados a analizar al extracto de vermicomposta que puedan ser correlacionados de una manera practica con las dosis de aplicación sin llegar a los niveles donde el efecto sobre la absorción de nutrimentos y/o el crecimiento vegetativo se vuelve negativo. Pudiendo ser la concentración de ácidos húmicos, la concentración de

ácidos fúlvicos, la relación ácidos fúlvicos/ácidos húmicos (o viceversa), la relación E4/E6, cantidad de sustancias reguladoras de crecimiento, tipo y cantidad de microorganismos, entre otros.

IX. LITERATURA CITADA

Albanell E., Plaixats, J. and Cabrero, T. 1988. Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia foetida*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes. *Biology and Fertility of Soils*. 6: 266-269.

Alcántar, G. G. y Sandoval V., M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C., Chapingo, Méx., 156 p.

Alcántar G. y Trejo-Téllez L. I. 2007. Elementos y nutrimentos. *In*: Alcantar G. y Trejo Tellez (compiladores). *Nutrición Vegetal*. Ediciones Mundi-Prensa.

- Alter, D. and Mitchell, A. 1992. Use of vermicompost extract as an aluminium inhibitor in aqueous solutions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23(3-4): 231-240.
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Atiyeh, R. and Metzger, J. D. 2004a. Effects of vermicomposts produced from food waste on the growth and yield of greenhouse peppers. *Bioresource Technology.* 93: 139-144.
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Welch, C. and Metzger, J. D. 2004b. Influences of vermicompost on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresource Technology.* 93: 145-153.
- Atiyeh, R. M., Arancon, N., Edwards, C. A. and Metzger, J. D. 2000a. Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes. *Bioresource Technology.* 75: 175-180.
- Atiyeh, R. M., Domínguez, J., Subler, S. and Edwards, C. A., 2000b. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei* Bouché) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia,* 44: 709-724.
- Atiyeh R.M., Edwards C. A., Subler S. and Metzger J. D. 2001. Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: effects on physicochemical properties and plant growth. *Bioresource Technology.* 78:11-20.
- Atiyeh, R. M., Arancon, N., Edwards, C. A. and Metzger, J. D. 2002a. The influence of earthworm-processed pig manure on the growth and productivity of marigolds. *Bioresource Technology.* 81: 103-108.
- Atiyeh, R. M., Lee, S., Edwards, C. A., Arancon, N. Q. and Metzger, J. D. 2002b. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology.* 84: 7-14.
- Barbado, J. L. 2003. Cría de lombrices. *Lombricultura.* Editorial Albatros. 1ª edición. Buenos Aires, Argentina.
- Bello, H. J. 2003. Vermicompostaje de nopal y su evaluación en la disponibilidad de fósforo en un andisol. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 95 p.
- Bollo, E. 1992. Humus de lombriz y su aplicación. *Lombricultura.* SCIC. Quito, Ecuador.

- Bollo, E. 2005. Humus de lombriz y su aplicación. Lombricultura. Lombricultura Pachamama S.A. Viña del Mar, Chile.
<http://www.ofertasagricolas.cl/articulos/articulo/161>
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *In*: C. A. Black (Ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U. S. A.
- Buckerfield, J. C., Flavel, T. C., Lee, K. E. and Webster, K. A. 1999. Vermicompost in solid and liquid forms as a plant-growth promoter. *Pedobiologia* 43: 753-759.
- Cano, R. P. y Márquez, H. C. 2004. Producción orgánica de tomate bajo invernadero.
http://www.monografias.com/trabajos16/tomate-organico/tomate_organico.shtml
- Capistrán, F., Aranda, E. y Romero, J. C. 2001. Manual de reciclaje, compostaje y lombricompostaje. Instituto de Ecología A. C. Xalapa, Veracruz., México. 150 p.
- Capulín, G. J. 1999. Evaluación del extracto líquido de estiércol bovino como insumo de nutrición vegetal en hidroponía. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 105 p.
- Capulín, G. J. 2004. Uso de extracto líquido de estiércol de bovino en la producción de hortalizas y cambios en la solubilidad nutrimental al acidularse con ácidos orgánicos e inorgánicos. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. México. 128 p.
- Chen Y. & Aviad T. 1990. Effects of humic substances on plant growth. p. 161-186. *In*: Mc Carthy P., Clapp C. E., Malcom R. L. and Bloom P. R. (Eds). Humic substances in soil and crop sciences. American Society of Agronomy.
- Díaz-Pérez, J. C., Bautista, S. and Villanueva, R. 2000. Quality changes in sapote mamey fruit during ripening and storage. *Postharvest Biol. Technol.* 18: 67-73.
- Dumas, C. L. L. 2003. Extracción de N, P, K; eficiencia de recuperación de nitrógeno, calidad y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en fertirriego. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 110 p.

- Gajalakshmi, S., Ramasamy, E. V. and Abbasi, S. A. 2001. Potential of two epigeic and two anecic earthworm species in vermicomposting of water hyacinth. *Bioresource Technology*. 76: 177-181.
- García M., S. 2007. Respuestas agronómicas y fisiológicas del pepino a diferentes concentraciones de cloruro de sodio. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. 148 p.
- Grapelli, A., Tomati, U. and Galli, E. 1985. Earthworm casting in plant propagation. *HortScience* 20: 874-876.
- Harris Moran Seed Company. 2005. Lechuga tipo orejona. Parris island cos. Hoja técnica. <http://www.harrismoran.com/mexico/products/lettuce/parrislandcos.htm>
- Herrero, A. y Guardia, J. 1992. Conservación de frutos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 217 p.
- Hoagland, D. R. and Arnon, D. I. 1950. The water-culture method for growing plant without soil. California. College of Agric. Univ. Circular 347.
- Konika-Minolta. 1998. Precise color communication. Color control from perception to instrumentation. Konica Minolta Sensing Inc. Osaka, Japan. 58 p.
- Krarup, C. y Moreira, I. 1998. Hortalizas de estación fría. Biología y diversidad cultural. P. Universidad Católica de Chile, VRA, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Santiago, Chile. http://www.puc.cl/sw_educ/hort0498 (recuperado 2 de octubre de 2006)
- Labrador, M. J. 2001. La materia orgánica en los agrosistemas. 2ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 293 p.
- Manjarrez, M. M. J., Ferrera C. R. y González Ch. M. C. 1999. Efecto de la vermicomposta y la micorriza arbuscular en el desarrollo y tasa fotosintética de chile serrano. *Terra* 17(1): 9-15.
- Martínez, C. C. 1999. Potencial de la lombricultura. Elementos básicos para su desarrollo. 2da reimpresión. México. 140 p.
- Martínez, C. C. 2000. Lombricultura, alternativa en la agricultura sustentable. pp. 135-153. *In: Lombricultura y agricultura sustentable*. Martínez C., C. y Ramírez F., L. (Compiladores). México.
- Mitchell, A. and Alter, D. 1993. Supression of labile aluminium in acid soils by the use of vermicomposta extract. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24(11-12): 1171-1181.

- Morales C. J. A. 2006. Efluentes y sustratos en el desarrollo de nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*. Wild. ex Klotzch). Tesis de Maestría. Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo. 92 p.
- Moreno-Reséndez, A., Valdés, P. M. T. y Zárata, L. T. 2005. Desarrollo de tomate en sustratos de vermicompost/arena bajo condiciones de invernadero. *Agric. Téc. (Chile)*. 65(1): 26-34.
- Moreno, R. A. y Aguilera, G. S. 2003. Efecto de la vermicomposta en chile chilaca (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de invernadero. Departamento de Suelos, Unidad Laguna, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila. México.
- http://www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort03/Cartel_01.pdf
- Muscolo, A., Bovalo, F., Gionfriddo, F. and Nardi, S. 1999. Earthworm humic matter produces auxin-like effects on *Daucus carota* cell growth and nitrate metabolism. *Soil Biology & Biochemistry*. 31(9): 1303-1311.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A. and Vianello, A. 2002. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*. 34: 1527-1536.
- Navarro, G. G. y Navarro, B. S. 2003. Química agrícola. El suelo los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. 487p.
- Neumann, G. and Römheld, V. 2001. The release of root exudates as affected by the plant's physiological status. pp. 41-93. *In*: Pinton, R., Varanini Z. and Nannipieri P. (Eds). The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface. Books in soil, plants and environment. Marcel Dekker, Inc.
- Orozco, F. H., Cegarra, J., Trujillo, L. M. and Roig, A. 1996. Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia foetida*: effects on C and N contents and the availability of nutrients. *Biology and Fertility Soils* 22: 162-166.

- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª edición. Madrid, España. pp 155-191.
- Quaggiotti S., Ruperti B., Pizzeghello D., Francioso O., Tugnoli V. And Nardi S. 2004. Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Experimental Botany*. 55 (398): 803-813.
- Quiñones, M. E. 2000. Evaluación de lombricomposta y tezontle como sustratos en jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo invernadero rústico. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco.
- Recycled Organics Unit (2003). How to Use Recycled Organics Products: A Guide on the Proper Use of Recycled Organics Products. Third edition. Recycled Organics Unit, Internet publication: <http://www.recycledorganics.com>
- Reines, A. M., Loza LI. J. A. y Contreras R., S. H. 2001. Lombricultura. Fundación Produce Jalisco-Universidad de Guadalajara. Jalisco. 33 p.
- Reyes, A. J. C., Alarcón A. y R. Ferrera-Cerrato. 1998. Endomicorriza arbuscular, bacterias y vermicomposta en plántulas de aguacate en vivero (Resultados preliminares). *In*. Memoria XI Curso Internacional de Actualización, Fruticultura Avanzada, Cultivo, Manejo y Exportación. CICTAMEX S.C. Ixtapan de la Sal, México.
- http://www.avocadosource.com/Journals/CICTAMEX/CICTAMEX_1998/cictamex_1998_12-21.pdf
- Reyes, A. J. C., Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato, R. 2001. Aplicación de vermicomposta y hongos micorrízicos en la producción de plántula de aguacate en vivero. *In*: Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín CICTAMEX S.C. Coatepec Harinas, México. 1998-2001.
- http://www.avocadosource.com/Journals/CICTAMEX/CICTAMEX_1998-2001/CICTAMEX_1998-2001_PG_080-087.pdf
- Sánchez, S. A., Juárez, M., Sánchez-Andreu, J., Jordá, J. and Bermúdez, D. 2005. Use of humic substances and amino acids to enhance iron availability for tomato plants from applications of chelate FeEDDHA. *Journal of Plant Nutrition* 2: 1877-1886.

- Sánchez, S. A., Sánchez-Andreu, J., Juárez. M., Jordá, J. and Bermúdez, D. 2006. Improvement of iron uptake in table grape by addition of humic substances. *Journal of Plant Nutrition* 29: 259-272.
- Santamaría, R. S. 2000. Escalamiento de los procesos de composteo y vermicomposteo: Aspectos biológicos y nutrimentales. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 106 p.
- Suárez, N. E. 2001. Aplicación del efluente anaerobio de estiércol bovino en el desarrollo de cempoaltxochitl (*Tagetes patula* L.) Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 88 p.
- Tadesse, T., Nichols, M. A. and Fisher, K. J. 1999. Nutrient conductivity effects on sweet pepper plants grown using a nutrient film technique 1. Yield and fruit quality. *New Zealand J. Crop Hort. Sci.* 27: 229-237.
- Tomati, U., E. Galli, R. Buffone. J. Cegarra y A. Roig. 1993. Compost in floricultura. *Acta Horticulturae* 342:175-181.
- Tourjee K. R., Harding J. and Byrne T. 1993. Colorimetric analysis of Gerbera flowers. *HortSci.* 28: 735-737.
- Trejo, T. L. I. 1995. Establecimiento del cultivo de la lombriz (*Eisenia foetida*) sobre estiércol bovino. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México. 100 p.
- Trinidad, S. A. 1999. El papel de los abonos orgánicos en la productividad de los suelos. pp 3-16. *In: 1er Simposium Internacional; Lombricultura y Abonos Orgánicos.* Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Turkmen Ö., Dursun, A., Turan, M. and Erdine, C. 2004. Calcium and humic acids affect seed germination, growth, and nutrient content of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings under saline soil conditions. *Acta Agric. Scand. Sect. B. Soil and Plant Sci.* 54: 168-174.
- Varanini, Z. and Pinton, R. 2001. Direct versus indirect effects of soil humic substances on plant growth and nutrition. pp 141-157. *In: Pinton, R., Varanini Z. and Nannipieri P. (Eds). The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface. Books in soil, plants and environment.* Marcel Dekker, Inc.

- Velasco, V. J., Ferrera C., R. Y Alamaráz, S. J. J. 2001. Vermicomposta, micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense* en tomate de cascara. Terra 19 (3): 241-248.
- Volke, H. V. 1990 Metodología estadística y económica para la generación de tecnologías en la agricultura. Serie cuadernos de Edafología No. 16. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Volke, H. V., Turrent F. A. y Castillo M. A. 2006. Diseños de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. México.
- Weber, H. J. 1988. Binding and transport of metals by humic materials. pp. 165-178. In: F.H. Frimmel and R.F. Christman (eds). Humic substance and their role in the environment. John Wiley & Sons Limited.
- Yadava, V. L. 1986. A rapid and non destructive method to determine chlorophyll in intact leaves. Hort Science 2:1449-1495.
- Yang, Ch. M., Wang, M. Ch., Lu, Y. F., Chang, I. F. and Chou, Ch. H. 2004. Humic substances affect the activity of chlrophyllase. Journal of Chemical Ecology. 30 (5): 1057-1065.