

Efecto del vermicompost y estrés hídrico en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.): parámetros productivos y relaciones hídricas

Vermicompost and water stress effects on dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.): productive parameters and water relations

Aguilar-Benítez G^{1*}, CB Peña-Valdivia², R Castro-Rivera³, JP Lara-Ávila¹, E Cruz-Crespo⁴, AN Rojas-Velázquez¹

Resumen. Ha sido bien documentado que el vermicompost incorporado al suelo incrementa la germinación y productividad de algunos cultivos. Sin embargo, se conoce poco su efecto sobre las respuestas fisiológicas de los mismos en condiciones de déficit de humedad. El objetivo del estudio fue analizar el efecto del vermicompost y la suspensión del riego en la conductancia estomática, el intercambio de gases y el rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerante (cv. 92) y susceptible (cv. 122) a la sequía. Se cultivaron plantas sin vermicompost y con 1,5 y 3% de éste en el suelo, con riego en el ciclo completo de producción y con suspensión de riego a partir de la floración. Se registró el cambio de la humedad gravimétrica del suelo, y en la planta se estimó g_s , transpiración (E), asimilación de CO₂ (A), temperatura foliar, uso eficiente del agua (UEA) y componentes del rendimiento. El punto de marchitez permanente del suelo incrementó hasta 15%, en proporción a la adición de vermicompost. Se observó que a los 16 d sin riego, la g_s y A se redujeron totalmente, y E y UEA disminuyeron ($P \leq 0,05$) 62 y 91%, respectivamente, respecto a los tratamientos con riego. El vermicompost redujo ($P \leq 0,05$) g_s más de 30%, mientras que E se redujo un 16 y 49% con 1,5 y 3% de vermicompost, respectivamente, en relación al control. El cv 122 presentó UEA 23% menor ($P \leq 0,05$) que el cv. 92, aunque el primero mostró mayor rendimiento principalmente con el riego. El número y biomasa de semillas se incrementaron en más del 30% por efecto del vermicompost, y éste efecto se observó en las dos condiciones de riego. El vermicompost modificó algunas propiedades del suelo y al mismo tiempo causó una menor apertura estomática e incrementó el rendimiento, principalmente en condición de riego.

Palabras clave: Déficit de humedad; Estrés; Floración; Uso eficiente del agua.

Abstract. It is documented that vermicompost increases germination and productivity of crops, but little is known of its effect on plant physiological responses under soil water deficit. The aim of this study was to analyze the effect of vermicompost and irrigation interruption on stomatal conductance, gas exchange, and yield of common bean cultivars (drought tolerant -cv. 92 and drought susceptible-cv. 122). Plants were cultivated in unamended soil or soil amended with 1.5 and 3% of vermicompost, with irrigation during the whole cycle but irrigation interruption at the flowering stage. Changes in soil moisture, stomatal conductance (g_s), transpiration (E), CO₂ assimilation (A), leaf temperature, water use efficiency (WUE) and yield components were measured. The wilting point in the soil was increased to 15%, in proportion to the vermicompost addition. It was observed that at 16 days without irrigation, g_s and A were totally diminished, and E and WUE decreased ($P \leq 0.05$) 62 and 91%, respectively. Vermicompost reduced ($P \leq 0.05$) g_s by more than 30%, while E dropped 16 and 49% with 1.5 and 3% vermicompost, respectively, in comparison to the treatments without vermicompost. Cultivar 122 had 23% lower ($P \leq 0.05$) WUE than cv. 92, although cv. 122 had higher yield, mainly with irrigation during the whole cycle. The number and biomass of seed increased more than 30% as an effect of vermicompost; this effect was observed in the two irrigation conditions. Vermicompost modified some physical and chemical soil properties, as well as gravimetric soil moisture content. At the same time, there was less stomatal conductance and a greater yield, mainly with irrigation.

Keywords: Moisture deficit; Stress; Flowering; Efficient water use.

¹Instituto de Investigación de Zonas Desérticas / Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. C.P. 78377.

²Botánica. Colegio de Postgraduados. Estado de México, México. C.P. 56230.

³Instituto Politécnico Nacional CIBA Tlaxcala. Tlaxcala México. C.P. 90700.

⁴Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura, Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias, Programa de Ingeniero Agrónomo. Xalisco, Nayarit. México. C.P. 63780.

Address correspondence to: Dra. Gisela Aguilar Benítez, Fax 052 444 – 8422359, teléfono 052 444 – 8422359; e-mail: gisela.aguilar@uaslp.mx

Received 10.VIII.2015. Accepted 28.III.2016.

INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una de las leguminosas más importantes para el consumo humano en el mundo, y en muchos países en desarrollo no solo es una fuente de grano para consumo local o venta, sino también aporta alimento para los animales, y en pequeños sistemas productivos mejora la fertilidad del suelo (Ambachew et al., 2015). En México, el frijol junto con el maíz constituyen la base de la alimentación, principalmente para la población con menores ingresos. Actualmente este cultivo se destaca entre los cinco granos principales producidos a nivel nacional. En 2013, se estimó un consumo per cápita de solo 10,2 kg, lo que indicó una reducción del 45% en relación a los registros de los años sesenta (SIAP, 2013; CONAPO, 2014).

El frijol se cultiva en la mayoría de las regiones del país. Sin embargo, cerca del 90% del volumen de la producción nacional se obtiene en áreas geográficas con suelos someros, retención escasa de humedad y régimen de precipitación errático y deficiente (Barrios-Gómez et al., 2010, SIAP, 2012). En estas áreas, más de un millón de hectáreas cultivadas son expuestas a frecuentes periodos secos, y el rendimiento puede ser menor a 0,4 t/ha (Beebe et al., 2013).

La disminución del rendimiento depende de la intensidad del déficit de humedad, del cultivar y de la etapa fenológica del cultivo, aunque el estrés hídrico durante la fase reproductiva se asocia con mayores pérdidas del rendimiento (Terzi et al., 2010). Como resultado, es importante utilizar indicadores fisiológicos o moleculares del estado hídrico de la planta, relacionados con las respuestas reproductivas, para comprender los mecanismos de tolerancia al estrés hídrico y con ello acelerar el proceso de mejoramiento (Choudhury et al., 2014).

La reducción en la conductancia estomática (g_s) y la disminución de la transpiración (E), son respuestas primarias de las plantas que pueden considerarse indicadores fisiológicos cuando éstas son expuestas a una condición de pérdida progresiva de agua del suelo. Eventualmente, la asimilación de CO_2 (A) también se afecta y el rendimiento o productividad de las plantas disminuye (Liu et al., 2005; Miyashita et al., 2005; Reynolds-Henne et al., 2010).

La composición genética define las características morfológicas y adaptaciones fisiológicas de las plantas para regular g_s y E (Grzesiak et al., 1997). Por lo tanto, la selección de cultivares tolerantes al déficit hídrico constituye una estrategia para incrementar la estabilidad genética de los cultivos y disminuir las pérdidas en el rendimiento (Rodríguez, 2008). Además, el efecto del genotipo en la respuesta al estrés hídrico ha sido observado en diversos estudios (Lizana et al., 2006; Acosta-Díaz et al., 2009; Osuna-Ceja et al., 2013; Choudhury et al., 2014; Ambachew et al., 2015).

En las estrategias para reducir las pérdidas en rendimiento inducidas por el estrés hídrico, los productores de frijol incluyen prácticas agronómicas, el uso de variedades mejoradas

o una combinación de ambas (Ambachew et al., 2015). La decisión depende normalmente del costo, ya que la mayoría de los productores son de escasos recursos (Beebe et al., 2013).

El mejoramiento de las condiciones del suelo puede considerarse una buena práctica agronómica, y en este sentido, el uso del vermicompost se considera útil para mantener e incrementar las propiedades físicas y químicas del mismo, además de suponer una forma segura de manejar diversos residuos orgánicos (Atiyeh et al., 2000; Marinari et al., 2000; Sánchez et al., 2005; Tejada et al., 2009; Pathma y Sakthivel, 2012). El vermicompost ha estimulado el crecimiento y la productividad de un amplio número de plantas cultivadas como *Lycopersicon esculentum* (Tejada y Benítez, 2015), *Allium sativum* (Argüello et al., 2006), *Fragaria* y *Piper nigrum* (Arancon et al., 2004), *Zea mays* (Chandra y Bannik, 2014), *Sorghum* (Sunil et al., 2005), *Oryza sativa* (Sebastian y Prasad, 2013), *Cucumis melo* L. (Vo y Chang, 2013), *Tagetes minuta* (Chand et al., 2015), *Areca* (Sujatha y Bhat, 2013), *Petunia* (Arancon et al., 2008), *Geranium* (Kumar et al., 2014), *Medicago polymorpha* (Akhzari et al., 2015), entre otras.

En maíz (*Zea mays*), se ha comprobado que el vermicompost incrementa la concentración de pigmentos y carbohidratos solubles en la hoja, lo que se refleja en el incremento del rendimiento en grano (Tejada y Benítez, 2010). Su efecto benéfico en frijol ha sido evidenciado por Roy et al. (2010), Singh y Chauhan (2009) y Ayyobi et al. (2014), quienes registraron incrementos en la producción de biomasa y número de vainas. Beyk et al. (2015), por su parte, mostraron que el vermicompost incrementó la tasa fotosintética en la hoja y las concentraciones de potasio y calcio en hojas y raíz de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.); factores que redujeron significativamente los efectos negativos de alta salinidad en el sustrato. Sin embargo, su efecto en condiciones de déficit de humedad se conoce parcialmente.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la suspensión del riego y diferentes cantidades de vermicompost en el contenido de la humedad del suelo, respuestas fisiológicas y componentes del rendimiento de frijol susceptible y tolerante a la sequía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones generales del estudio. La investigación se desarrolló en condiciones de invernadero en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 27' N, 98° 54' O; 2220 msnm). La temperatura promedio durante el estudio fue 25 ± 3 °C y la humedad relativa fluctuó entre 47 y 65%, datos registrados con un sistema autónomo de captura de datos (data logger-HOBO U12-011). Durante el estudio la radiación fotosintéticamente activa varió entre 115 y 615 $mmoles/m^2/s$.

Material vegetal. Los cultivares evaluados fueron caracterizados como tolerante (cv. 92) y susceptible (cv. 122) a la sequía, están emparentados entre sí, su hábito de crecimiento es tipo

II, y se derivaron de familias F3 de la cruce de los progenitores AC1028 x Pinto Sierra (Ramírez y Kelly, 1998). Las semillas utilizadas fueron seleccionadas y multiplicadas en el Programa de Mejoramiento Genético de Frijol del Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad, del Colegio de Postgraduados. Éstas no presentaron diferencia en porcentaje de germinación (84,50%) y contenido de humedad (10,09%), pero las semillas del cv. 122 tuvieron peso promedio individual mayor ($0,32 \pm 0,03$ g; $P \leq 0,05$) que las del cv. 92 ($0,26 \pm 0,06$ g).

Vermicompost. Fue elaborado con residuos de cosecha de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), hojas de fresno (*Fraxinus uhdei* (Wenz) Ling.) y estiércol de bovino en proporción 40:20:40; su pH fue 7,2; el contenido de materia orgánica fue de 21,7% y conductividad eléctrica de 3,99 Ds/m.

Suelo y agua. Se obtuvo de los primeros 20 cm de profundidad de una parcela agrícola de Texcoco, México, con textura correspondiente a migajón arcillo-arenoso. El agua de riego tuvo pH 7,4 y conductividad eléctrica de 0,53 dS/m, características que la ubicaron en la clasificación de calidad aceptable de agua para riego (Ayers y Wescot, 1985).

Diseño experimental. Se utilizó un modelo completamente al azar y arreglo factorial de tratamientos con cinco repeticiones. Los factores y niveles estudiados fueron: (a) cultivar: cv. 92 y cv. 122, (b) régimen de riego: riego durante el ciclo completo (testigo con riego: TR) y suspensión de riego a partir de la floración, y (c) sustrato: suelo sin vermicompost (testigo de vermicompost) y con 1,5 y 3% de vermicompost con base en peso seco (igual a 40 y 80 ton/ha, respectivamente). Se determinó la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) de las mezclas elaboradas, por el método de la olla y la membrana de presión (Castellanos et al., 2000).

Unidades experimentales y muestreo. La unidad experimental fue una maceta con dos plantas. En macetas con 10 kg de sustrato se sembraron tres semillas de cada cultivar. Cuando la primera hoja trifoliolada estuvo totalmente expuesta se eliminó una plántula de cada maceta y se mantuvieron aquellas con altura y tamaños de hojas homogéneos. Las plantas se regaron con agua suficiente para conservar el sustrato con humedad aprovechable entre 80 y 100%, régimen que se controló con el registro gravimétrico diario de las macetas con una báscula electrónica (TOR-REY L-PCR 20 \pm 2 g). Una vez iniciada la floración (59 días después de la siembra, DDS), se suspendió el riego a la mitad del grupo de macetas de cada tratamiento y en la otra mitad el riego continuó normal.

Se eligieron al azar tres macetas por tratamiento y en cada planta se identificó la hoja de exposición más reciente, en esta hoja se realizaron las mediciones instantáneas de g_s , A, E, y temperatura de la hoja, con un sistema portátil y abierto de análisis de gases (CIRAS-1, PPSYSTEMS), entre las 14:00

y 15:00 h, cada 4 d y continuaron hasta 16 d después de la suspensión del riego. El uso eficiente del agua se estimó con la relación (A/E) (Campos et al., 2009).

Análisis estadístico. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con el procedimiento GLM de SAS, versión 9, y los supuestos del modelo de parcelas divididas, donde las combinaciones factoriales representaron al efecto de las parcelas completas y las mediciones repetidas en el tiempo representaron al efecto de las subparcelas (Kuehl, 2001). Las diferencias entre los efectos de los factores principales y sus interacciones se evaluaron con la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0,05$).

Con los datos transformados a log base 10 se realizó un análisis multivariado de componentes principales (CP), para identificar las variables que podrían estar involucradas en la respuesta de los cultivares de frijol, sensible y tolerante a la sequía, a la presencia de vermicompost y restricción de humedad en el suelo. Al análisis se incorporaron cuatro de las variables evaluadas en las hojas durante el desarrollo: g_s , A, E y EUA y tres componentes del rendimiento: número de vainas, y número de y rendimiento de semillas.

RESULTADOS

Características físicas, químicas y contenido gravimétrico de humedad en el suelo. La incorporación de vermicompost al suelo indujo cambios físicos y químicos significativos ($P \leq 0,05$) e inmediatos, dependientes de la proporción aplicada. Con 3% de vermicompost en referencia al control, se incrementaron la porosidad total del suelo en 7% y la conductividad eléctrica en 37%, y el punto de marchitez permanente se alcanzó con un contenido de humedad 15 % más alto (Tabla 1).

A pesar de que no todas las constantes de humedad del suelo fueron inmediatamente modificadas por la adición de vermicompost al suelo, la humedad gravimétrica cuantificada en las macetas mostró diferencias entre los tratamientos. Ésta fue mayor ($P \leq 0,05$) en las macetas con el cv. 92 en ambas proporciones de vermicompost (1,5 y 3%) respecto al suelo solo, y en el cv. 122 ésta respuesta se observó sólo en el tratamiento con 3% de vermicompost.

El análisis de los efectos principales de la humedad gravimétrica en las macetas indicó que la incorporación de vermicompost generó las diferencias ($P \leq 0,01$) registradas después de la suspensión del riego, principalmente después de alcanzar el PMP. Algunos autores afirman que la porosidad total y características específicas como orientación (Sasal et al., 2006), tamaño (Dikinya et al., 2007), volumen y continuidad (Gebhardt et al., 2009) de los poros influyen en la capacidad del suelo para almacenar agua. Debido a esto, el resultado observado puede estar directamente relacionado con cambios en la porosidad del suelo, la cual se incrementó a mayor cantidad de vermicompost incorporada.

Tabla 1. Características físicas y químicas, y constantes de humedad del suelo y mezclas evaluadas.**Table 1.** Physicochemical characteristics in the soil and study vermicompost mixtures.

Propiedades y constantes de humedad	Proporción de vermicompost en el suelo (%)		
	0	1,5	3,0
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,91 b	1,22 a	1,25 a
Densidad aparente (g/cm ³)	1,37 a	1,35 a	1,30 a
Materia orgánica (%)	1,57 a	1,57 a	1,66 a
pH (relación 1:2)	7,77 a	7,71 b	7,67 c
Porosidad total (%)	45,06 b	45,73 a	48,33 a
Capacidad de campo (%)	12,4 a	12,90 a	12,80 a
PMP (%)*	6,70 b	7,40 a	7,70 a
Humedad aprovechable (%)	5,60 a	5,40 a	5,10 a

*Medias dentro de las filas, seguidas con letra diferente, son estadísticamente distintas (Tukey, $P \leq 0,05$). PMP: punto de marchitez permanente. $n=3$.

Conductancia estomática. La g_s fue afectada por la incorporación de vermicompost y la suspensión de riego. Con 1,5 y 3% de vermicompost, la g_s disminuyó proporcionalmente ($P \leq 0,05$) 26 y 45% (36,15 y 61,54 mmol/m²/s), respectivamente, en relación al control. La suspensión de riego la redujo 51% (71,43 mmol/m²/s), respecto al testigo. Además, el cv. 92 presentó un valor 12% (13,15 mmol/m²/s) menor que el cv. 122 (Tabla 2).

En la condición de riego las fluctuaciones de g_s entre los 4 y 16 d después de anthesis (63 a 75 DDS) fueron diferentes entre

cultivares. A partir de los 71 DDS las diferencias de g_s fueron menores, lo que pudo deberse a que en ese periodo de estudio la radiación fotosintéticamente activa fue baja (116 mmol/m²/s) por nubosidad, y las diferencias entre los tratamientos de vermicompost y tipo de cultivar disminuyeron. Además, en el tratamiento con riego se observó que en hojas turgentes los valores de g_s fueron bajos.

Algunos autores concuerdan en que esta respuesta se relaciona principalmente con las señales bioquímicas, no hidráulicas, que la raíz envía al vástago y en menor medida con el

Tabla 2. Conductancia estomática (g_s), asimilación de CO₂ (A), transpiración (E), uso eficiente del agua (UEA) y temperatura foliar (T) en frijol susceptible (cv. 122) y tolerante (cv. 92) a sequía, cultivados en suelo sin o con vermicompost, y riego en el ciclo completo o su suspensión a partir de la anthesis.**Table 2.** Stomatal conductance (g_s), CO₂ assimilation (A), transpiration (E), water use efficiency (UEA) and leaf temperature (T) in beans susceptible (cv. 122) and tolerant (cv. 92) to drought, cultivated in soil with or without vermicompost, and irrigation or its suspension from anthesis onwards.

	g_s (mmol/m ² /s)	A (μ mol/m ² /s)	E (mmol/m ² /s)	UEA (A/E)	T (°C)
Vermicompost (%)					
0,0	137,45 a	6,41 a	3,41 a	0,0020 a	26,34 b
1,5	101,30 b	5,13 b	2,73 b	0,0020 a	26,20 b
3,0	75,91 c	4,16 c	2,26 c	0,0021 a	26,74 a
Cultivar					
cv. 92 (Tolerante)	98,00 b	5,33 a	2,64 a	0,0021 a	26,66 a
cv. 122 (Susceptible)	111,15 a	5,11 a	2,94 a	0,0018 b	26,21 b
Humedad					
Riego	139,26 a	6,79 a	3,5 a	0,0021 a	25,69 b
Suspensión	67,83 b	3,45 b	2,03 b	0,0018 b	27,21 a
Humedad x Cultivar	*	NS	*	**	*
Humedad x Vermicompost	*	NS	NS	NS	*
Cultivar x Vermicompost	*	NS	*	NS	NS

Medias con letra diferente en la misma columna son significativamente distintas (Tukey, $P \leq 0,05$). **= significancia ($P \leq 0,01$); *=significancia ($P \leq 0,05$); NS=no significancia. $n = 216$ para cultivares y humedad, y 144 para vermicompost.

potencial de agua de la hoja, lo que permite entender por qué la conductancia estomática puede disminuir aun cuando la hoja está turgente (Comstock, 2002; Aguirre-Medina et al., 2008). También es posible que el incremento de la conductividad eléctrica (Tabla 1) en el sustrato, por la adición del vermicompost, haya incrementado el potencial osmótico del suelo y disminuído la disponibilidad de agua para la planta y circunstancialmente la g_s aún con riego.

Las interacciones: humedad x cultivar, humedad x vermicompost y cultivar x vermicompost para la g_s fueron significativas ($P \leq 0,001$) (Tabla 2) y el efecto de algunas de estas interacciones se reflejó en los valores promedio por tratamientos (Fig. 1 A-B). En la condición de riego y 3% de vermicompost el cv. 122 disminuyó ($P \leq 0,05$) el valor promedio de g_s y lo igualó al testigo y al tratamiento con 1,5% de vermicompost. En cambio, el cv. 92 en suelo solo y con riego presentó el valor promedio más alto ($P \leq 0,05$) de g_s , y entre los tratamientos con 1,5 y 3% de vermicompost no hubo diferencia significativa. La g_s de ambos cultivares en condición de suspensión de riego mostró diferencias ($P \leq 0,05$) por efecto del incremento de la proporción del vermicompost (Fig. 1 A-B).

La significancia estadística de las interacciones humedad x cultivar y vermicompost x cultivar en g_s confirman que los cultivares responden diferente a la disponibilidad de humedad y a la presencia de vermicompost en el suelo; además, la significancia de la interacción humedad x vermicompost demuestra la relación directa entre ambos factores en la modificación de g_s .

Asimilación de CO₂. El vermicompost afectó ($P \leq 0,05$) negativamente A , disminuyendo en 20% ($1,28 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) y hasta 35% ($2,25 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) con 1,5 y 3,0%, respectivamente. A pesar de lo anterior, por efecto del cultivar no se observaron diferencias significativas (Tabla 2). La similitud de A entre los cultivares podría deberse a que las diferencias entre sus g_s no fueron suficientes para generar desigualdad en la fijación de CO₂, en parte por los efectos de aclimatación y compensación.

En promedio, la suspensión de riego disminuyó cerca de 50% ($P \leq 0,05$) los valores de A ($3,34 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) respecto al control, pero los cultivares reaccionaron diferente a la combinación de riego y vermicompost, ya que el vermicompost en ausencia de riego no afectó ($P > 0,05$) A del cv. 92, pero sí disminuyó la del cv. 122 (Fig. 1 C-D).

En condición de riego, ambos cultivares redujeron A significativamente (80% en promedio) entre los primeros 4 y 12 d después de anthesis (63 a 71 DDS), con un incremento posterior (75 DDS); esta respuesta no se atribuyó a los tratamientos sino a condiciones ambientales que determinaron condiciones de estrés como frío, calor y cambios de los patrones de irradiancia, que también pueden disminuir A en las plantas (Lawlor, 2009). Durante el estudio, la irradiancia y la temperatura se redujeron durante los días nublados, condición que es común en los cultivos del ciclo primavera-verano en la región en la que se desarrolló el estudio (García, 2004). La disminu-

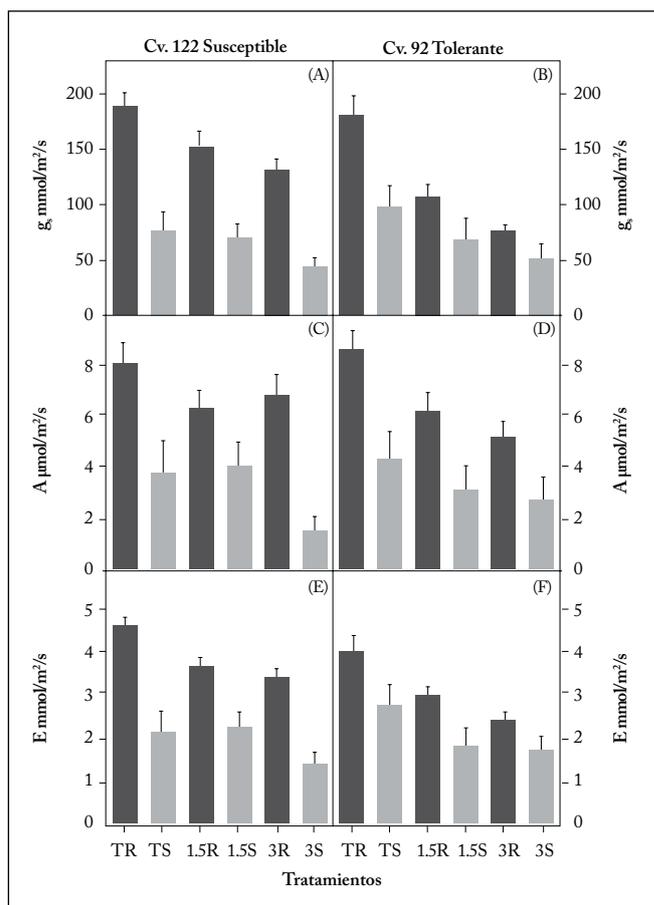


Fig. 1. Valores promedio de conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) susceptible y tolerante a sequía, cultivado en suelo solo o con diferentes porcentajes de vermicompost y riego o su suspensión a partir de la floración. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1,5% de vermicompost con riego (1,5 R) y su suspensión (1,5 S), suelo con 3% de vermicompost con riego (3 R) y suspensión (3 S). $n=36 +$ error estándar.

Fig. 1. Mean values of stomatal conductance (A-B), CO₂ assimilation (C-D) and transpiration (E-F) in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Plants were susceptible or tolerant to drought, and were cultivated in soil with or without different vermicompost percentages. Also, soil was irrigated during the whole plant growing cycle or suspended at the flowering stage. Treatments: Control with irrigation (TR), control with suspended irrigation (TS), soil with 1.5% vermicompost either with (1.5 R) or without (1.5 S) irrigation, soil with 3% vermicompost either with (3 R) or without (3 S) irrigation. $n=36 +$ S.E.

ción de A coincidió con la caída significativa de la temperatura foliar (Fig. 2 C-D).

La caída de A en ambos cultivares con la suspensión del riego fue notablemente más acelerada que con el riego constante, así, la inhibición total de A se observó con 12 d sin riego (Fig. 1 C-D).

Transpiración. En promedio, 1,5 y 3% de vermicompost disminuyeron ($P \leq 0,05$) (E) en 20 (0,68 mmol/m²/s) y 33% (1,15 mmol/m²/s), respectivamente. Aunque los cultivares tuvieron E similar entre sí ($P > 0,05$), la suspensión del riego la disminuyó hasta en 58% (1,47 mmol/m²/s), respecto al riego (Tabla 2).

En los testigos E de ambos cultivares fluctuó ampliamente, mientras que con la presencia de vermicompost tendió a ser homogénea (Fig. 2 E-F). La suspensión del riego disminuyó E totalmente desde los 8 d (67 DDS). Las interacciones hu-

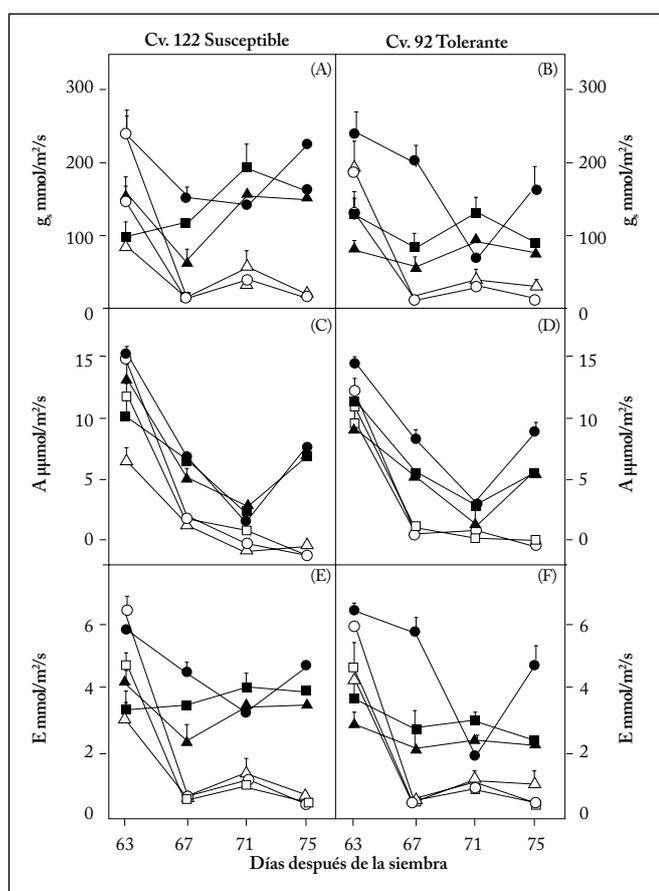


Fig. 2. Conductancia estomática (A-B), asimilación neta de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) susceptible y tolerante a sequía, cultivado con riego (símbolos llenos) o con su suspensión a partir de la antesis (símbolos vacíos), en suelo solo (●, ○), suelo con 1,5% de vermicompost (■, □) y suelo con 3% de vermicompost (▲, △). Los datos corresponden a 4, 8, 12 y 16 d después de la antesis. n=9 + error estándar.

Fig. 2. Stomatal conductance (A-B), CO₂ net assimilation (C-D) and transpiration (E-F) of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) susceptible and tolerant to drought. They were cultivated with irrigation during the whole growing cycle (black symbols) or without (white symbols) irrigation from anthesis onwards. Also, plants grew either in soil with 1.5% (■, □) or 3% (▲, △) or without (●, ○) vermicompost. Data are from 4, 8, 12 y 16 days after anthesis. n=9 + 1 S.E.

medad x cultivar y cultivar x vermicompost fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0,01$) para E (Tabla 2). La transpiración en ambos cultivares con riego descendió ($P \leq 0,05$) en los tratamientos con vermicompost, en comparación con el suelo solo, pero con la suspensión del riego el efecto se observó únicamente con la concentración mayor de vermicompost en el cv. 122 y con 1,5% de vermicompost en el cv. 92. Este resultado mostró la respuesta diferente de los cultivares a una misma condición de estrés.

Uso eficiente del agua. El vermicompost como factor principal no tuvo efecto ($P \leq 0,05$) en la reducción del UEA, pero la suspensión del riego la disminuyó en 14%. Como podría esperarse UEA del cv. 92 fue 14% mayor ($P \leq 0,05$) que el del cv. 122 (Tabla 2). El cv. tolerante a sequía presentó un UEA mayor que el susceptible al estar bajo riego y con suelo solo, pero con vermicompost se igualaron los valores entre los cultivares (Fig. 3 A-B). Cuando el riego se suspendió los valores de UEA de los cultivares no mostraron diferencias significativas con y sin vermicompost (Fig. 4 A-B). El UEA de todos los tratamientos disminuyó entre los 63 y 71 DDS, con una recuperación parcial de los tratamientos con riego a los 75 DDS. La interacción humedad x cultivar fue significativa ($P \leq 0,01$) para UEA, como consecuencia de la respuesta diferencial de los cultivares (Tabla 2).

En los valores promedio (Fig. 3 A-B) se observan respuestas diferenciales entre cultivares, ya que mientras el cv. susceptible con riego incrementó el UEA a mayor proporción de vermicompost, en el cv. tolerante no se observaron diferencias ($P \leq 0,05$).

Temperatura foliar. La temperatura foliar se incrementó un 2% ($P \leq 0,05$) en plantas creciendo con 3% de vermicompost respecto al testigo; y el cv. tolerante registró una temperatura foliar 2% mayor ($P \leq 0,05$) que el cv. susceptible (Tabla 2). Por la suspensión del riego la temperatura foliar incrementó en 6% respecto a los tratamientos con riego. Aunque, durante los 16 d de la evaluación no se mantuvieron tendencias únicas, se observó que la temperatura foliar de todos los tratamientos disminuyó dramáticamente 12 d después de la antesis (71 DDS).

También se observó que aun cuando el cv. tolerante registró un promedio de temperatura más alto que el cv. susceptible (Tabla 2), éste último mostró claramente su menor tolerancia al déficit hídrico, incrementando notoriamente la temperatura a los 16 d sin riego (Fig. 4 C-D).

La temperatura foliar permite diferenciar líneas tolerantes al déficit de humedad ya que esta es una característica fisiológica compleja determinada por factores como el movimiento de la hoja, el ángulo de exposición al sol y el número y tamaño de tricomas (Rodríguez, 2008).

Rendimiento. El rendimiento por planta se incrementó significativamente bajo las dos condiciones de humedad eva-

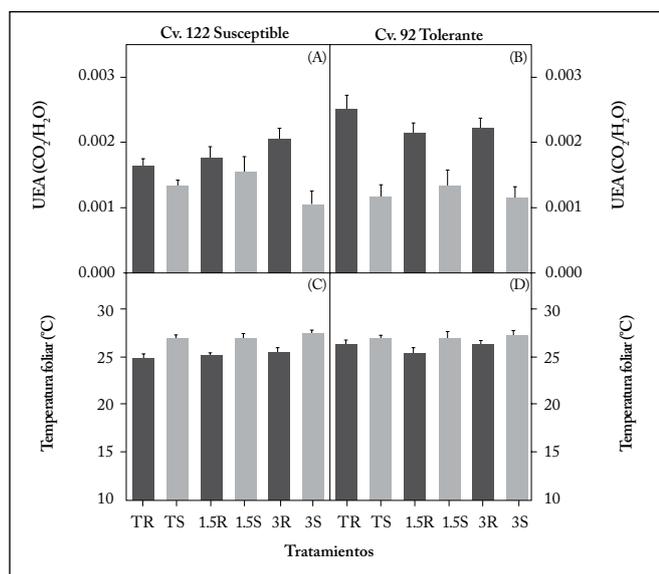


Fig. 3. Uso eficiente del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de plantas de frijol susceptible y tolerante a sequía cultivadas en invernadero en diferentes sustratos y riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la antesis. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1,5% de vermicompost con riego (1,5 R) y suspensión (1,5 S), suelo con 3% de vermicompost con riego (3 R) y su suspensión (3 S). $n=36$. **Fig. 3.** Water use efficiency (A-B) and leaf temperature (C-D) of drought susceptible and tolerant bean plants grown at the greenhouse on different substrates. Plants were either exposed to irrigation during the whole growing cycle or irrigation was suspended from anthesis onwards. Treatments: Control with irrigation (TR), control with suspended irrigation (TS), soil with 1.5% vermicompost either with (1.5 R) or without (1.5 S) irrigation, soil with 3% vermicompost either with (3 R) or without (3 S) irrigation. $n=36$.

luadas, y con las dos proporciones de vermicompost; lo que se atribuyó entre otros factores, al incremento de biomasa de estructuras que almacenan fotoasimilados antes del periodo de estrés (Aguilar et al., 2012). Con la proporción más alta de vermicompost se incrementó en 23% el número de hojas y 7% la altura del tallo que son importantes órganos de reserva de asimilados que pueden movilizarse durante el periodo de estrés hídrico. La remoción de fotosintatos al grano se ha observado en diferentes genotipos de frijol como un mecanismo de escape al efecto del déficit de humedad en el suelo (Chaves et al., 2003; Acosta-Díaz et al., 2009; Beebe et al., 2013)

DISCUSIÓN

Respuestas similares se obtuvieron en otros estudios en los que el efecto del vermicompost en las propiedades físicas y químicas del suelo fue dependiente del tipo y proporción de la materia prima con la que éste se elaboró (Azarmi et al., 2008).

La humedad en el punto de marchitez permanente se incrementó en correspondencia con la proporción de vermicom-

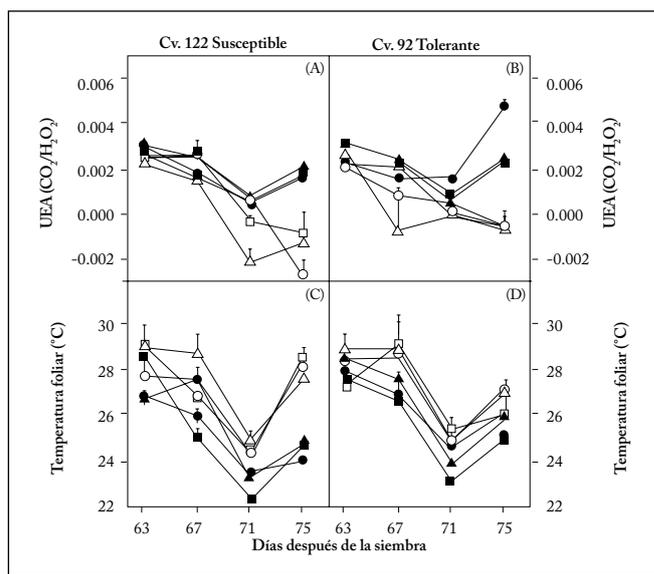


Fig. 4. Uso eficiente del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de frijol cultivado con riego (símbolos llenos) o su suspensión a partir de la antesis (símbolos vacíos), en suelo (●, ○), suelo con 1,5% de vermicompost (■, □) y suelo con 3% de vermicompost (▲, △). $n=9$ + error estándar.

Fig. 4. Water use efficiency (A-B) and leaf temperature (C-D) of bean cultivated either with irrigation during the whole growing cycle (black symbols) or without irrigation from anthesis onwards (white symbols). Plants grew either in soil with 1.5% (■, □) or 3% (▲, △) or without (●, ○) vermicompost. $n=9 + 1$ S.E.

post adicionada, de acuerdo con Foley y Cooperband (2002). Esto se debe a que los poros pequeños retienen más agua en el punto de marchitez permanente; por lo que, se puede inferir que el vermicompost promovió la formación de poros pequeños.

Las respuestas estomáticas observadas en los diferentes tiempos de toma de datos concuerdan parcialmente con lo encontrado por Reynolds-Henne et al. (2010). Estos autores mostraron que éstas son complejas debido a la alta sensibilidad de los estomas a las condiciones externas (temperatura, viento, luminosidad), lo que genera un comportamiento oscilatorio con un amplio rango de reacciones. Los mismos autores puntualizaron que las leguminosas son muy sensibles pues responden cerrando los estomas ante un estrés moderado indicando una tendencia a priorizar sus relaciones hídricas.

Las plantas C3 responden a un estrés severo disminuyendo la conductancia estomática hasta <100 mmol/m²/s, y bajo esta condición se reporta una reducción de la actividad Rubisco; mientras que la fotoinhibición permanente puede ocurrir a una $g_s <50$ mmol/m²/s (Flexas y Medrano, 2002). En el presente trabajo, la g_s llegó a valores <100 mmol/m²/s a partir del día 8 después de la suspensión del riego en los dos cultivares evaluados.

Resultados similares en los que la g_s y la E disminuyen drásticamente a partir de los primeros días de suspensión del riego fueron observados por Liu et al. (2005). Estos autores mostraron que en plantas de soja con déficit de humedad moderado en el suelo, la g_s disminuyó linealmente con el incremento de ácido abscísico en el xilema. Esto indicó que esta hormona puede ser responsable de la reducción de la g_s en fases iniciales del secado del suelo.

Con los resultados obtenidos en este trabajo, se observó que la conductividad eléctrica se incrementó 37% cuando la proporción de vermicompost fue mayor, lo que indica un incremento en la presencia de sales en el suelo (Tabla 1). También se observó que en la superficie de las macetas con mayor proporción de vermicompost se formó una costra delgada, lo que coincide con lo informado por Warman et al. (2010). Dichos autores sugieren que la formación de estas costras genera condiciones anaeróbicas que pueden resultar en la producción de sustancias fitotóxicas que potencializan el efecto detrimental de las sales solubles del sustrato. Esto explicaría parcialmente la respuesta fisiológica de las plantas con mayor proporción de vermicompost.

En este sentido, es posible que el contenido de sales, y algunas características químicas y biológicas que no se evaluaron en el vermicompost utilizado, modificaron la interacción del sistema suelo-planta, generando un efecto detrimental en la respuesta estomática e intercambio de gases en las plantas de frijol, aún en condición de riego. Más aún, este efecto se acentuó con la suspensión del riego para ambos cultivares sin

distinción del grado de tolerancia. Lo anterior concuerda con los resultados de Sio-Se et al. (2006), quienes concluyeron que la efectividad de los índices de selección en la diferenciación de cultivares resistentes a la sequía varía con la severidad del estrés llegando a ser no útiles bajo estrés severo.

Aun cuando no fue el objetivo de la presente investigación, se destaca en los resultados que las respuestas observadas en el cv. tolerante (ej., una menor conductancia estomática e igual asimilación que el cv. Susceptible) son características deseables en un material seleccionado para condiciones de déficit de humedad. Este es el resultado de la mayor flexibilidad de las líneas tolerantes para responder al estrés (Asfaw et al., 2012; Beebe et al., 2013). De acuerdo a autores como Acosta-Díaz et al. (2009), Asfaw et al. (2012), Ghanbari et al. (2013), Lizana et al. (2006) y Rosales et al. (2013), los genotipos de frijol tolerantes al déficit hídrico muestran diferentes mecanismos fisiológicos de tolerancia. Estos incluyen el cierre estomático que conlleva a una reducción en su tasa de transpiración, mecanismos eficientes de carboxilación, alta concentración de solutos en las células, y mayor movilización de sustancias de reserva a los órganos reproductivos. Esto se hace evidente en características fenotípicas y/o morfológicas visibles como ciclos productivos más cortos, tallos pequeños, menor producción de brotes y raíces muy desarrolladas.

Los resultados obtenidos muestran que el vermicompost modificó las respuestas estomáticas de las plantas de frijol expuestas a estrés hídrico sin incidir negativamente en los rendimientos obtenidos, incluso en los tratamientos con suspensión

Tabla 3. Rendimiento y sus componentes por planta, de cultivares de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivados en invernadero, en suelo con o sin vermicompost, y riego en el ciclo completo o su suspensión a partir de la floración.

Table 3. Plant yield and its determinants on drought susceptible and tolerant vean cultivars. These grew at the greenhouse in soil with or without vermicompost. Plants were either irrigated during the whole growing cycle or irrigation was suspended from the flowering stage onwards.

Factor	Vainas			Semillas		
	Totales	Normales	≥ una semilla abortada (Número)	Vanas	Totales	Biomasa (g)
Cultivar						
Susceptible (cv. 122)	12,2 a	2,8 a	5,6 b	3,3 a	31,0 a	8,3 a
Tolerante (cv. 92)	10,2 a	1,9 b	7,0 a	1,2 b	28,0 a	6,8 b
Humedad						
Riego	12,4 a	2,8 a	7,5 a	2,5 a	35,7 a	9,8 a
Suspensión de riego	9,3 b	1,8 b	5,0 b	2,0 a	23,0 b	5,2 b
Vermicompost (%)						
0,0	10,2 b	2,8 b	4,8 b	3,1 a	25,6 c	6,6 c
1,5	11,6 a	2,6 b	7,2 a	2,2 b	31,3 b	7,9 b
3,0	11,9 a	3,2 a	7,1 a	3,1 a	34,4 a	8,8 a

Valores con diferente letra en cada columna son significativamente diferentes (Tukey, $P \leq 0,05$); $n=10$. Las medias corresponden a datos de las vainas y semillas de plantas en madurez fisiológica.

de riego. Al realizar un análisis de correlación de variables de intercambio de gases y rendimiento (Tabla 4), se observan correlaciones negativas y significativas entre E y el número y peso de semillas, y entre E y A. Esto indica que a mayor transpiración A se reduce, y el peso de semillas es menor. Los efectos sinérgicos que se evidencian con las interacciones encontradas, permiten especular que en cierta combinación, la condición de humedad, el cultivar y el vermicompost pueden reducir la transpiración sin afectar negativamente la A, lo que explicaría parcialmente el resultado en rendimiento. Además, se ha encontrado que al imponer tratamientos de sequía a plantas C3, éstas generalmente disminuyen su conductancia antes de disminuir las tasas de asimilación (Schultz y Hall, 1982). Esto implica que en cultivos como el frijol, la apertura estomática no está directamente relacionada con las tasas de fotosíntesis (Lynch et al., 1992).

El análisis de CP mostró que los primeros tres CP explicaron 83% de la variabilidad total. El CP1 mostró correlación positiva mayor con g_s y E. Lo que indica que este CP estuvo relacionado principalmente con la capacidad de las plantas para regular la pérdida de humedad, es decir con las variables que describen el mantenimiento o alteración de las relaciones hídricas de la planta. EL CP2 representó principalmente la contribución de dos de los dos componentes del rendimiento, número de vainas y de semillas, y el rendimiento de semilla. El CP3 tuvo correlación negativa alta únicamente con el número de vainas. Este resultado fue sobresaliente debido a que el número de vainas fue la única variable que tuvo influencia relevante en más de un CP (Tabla 5).

La representación gráfica bidimensional de los tres CP2 y CP3 en función del CP1 mostraron la separación parcial, con una superposición de los grupos de tratamientos sin vermicompost y los que si la incluyeron (Figura no mostrada); el primero de ellos se distribuyó principalmente en el lado positivo del CP1, entre los valores 0,5 y 3. Al contrario, los

dos grupos que incluyeron vermicompost (1,5 y 3%) se distribuyeron principalmente en el lado izquierdo del CP1, entre los valores -3 y 1 del CP1. Este resultado indica que, bajo las condiciones del estudio, los cultivares de frijol, independientemente de su tolerancia a la sequía, modificaron sus características fisiológicas relacionadas con el estado hídrico de la

Tabla 5. Proporción de la varianza explicada y valores propios de los primeros tres componentes principales (PC), generados de las variables de intercambio gaseoso y dos componentes de rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivados bajo condiciones de invernadero, en suelo con y sin vermicompost, y con riego durante todo el ciclo de cultivo o suspendido durante la etapa reproductiva.

Table 5. Proportion of the explained variance and values of the first three principal components (PC). These values were generated from the gas exchange variables and two yield determinants of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Plants grew at the greenhouse in soil with or without vermicompost. Such soil was either irrigated during the whole growing cycle of it was suspended during the reproductive stage.

	PC1	PC2	PC3
Varianza	0,4666	0,7043	0,82958
g_s	0,5466	0,0047	0,1167
A	-0,3659	-0,3659	0,0298
E	0,5346	-0,0689	0,1004
UEA	0,4748	0,2337	-0,1716
Vainas (Núm.)	-0,1228	0,4978	-0,7698
Semilla (Núm.)	-0,1281	0,5357	0,3691
Semilla (g)	-0,1552	0,5213	0,4659

g_s : Conductancia estomática; A: asimilación neta de CO_2 ; E: transpiración; UEA: eficiencia en el uso de agua.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de intercambio de gases (g_s , A, E, UEA) y de rendimiento (NS= número de semillas y PS= peso de semillas).

Table 4. Pearson correlation coefficient among variables of gas exchange (g_s , A, E, UEA) and those of yield (NS= number of seeds and PS= seed weight).

	g_s	A	E	UEA	NS	PS
g_s	1,000					
A	-0,63**	1,00				
E	0,94**	-0,47**	1,00			
UEA	0,71**	-0,6**	0,75**	1,00		
NS	---	---	-0,26*	---	1,00	
PS	-0,22*	---	-0,31*	---	0,51**	1,00

** $P \leq 0,0001$; * $P \leq 0,05$; --- no significativo.

planta por la presencia del vermicompost. La representación tridimensional (Fig. 5) también mostró esa separación parcial de los dos grupos de tratamientos (círculos principalmente en la zona superior derecha, y cuadros y triángulos principalmente en las zonas izquierda e inferior de la nube de datos).

La representación bidimensional de los CP mostró además que el CP2 generó la separación parcial de otros dos grupos de tratamientos, el que tuvo riego durante el crecimiento completo (símbolos color negro) y el que se mantuvo sin él desde el inicio de la etapa reproductiva (símbolos color gris). En este caso, los tratamientos del segundo grupo se distribuyeron principalmente entre los valores -3 y 1 CP2, y los tratamientos del grupo con riego en el ciclo completo se localizaron principalmente entre los valores -1 y 3 del mismo CP. En la representación tridimensional (Fig. 5) también se observa esta distribución de los tratamientos.

La varianza mayor de las relaciones hídricas y rendimiento de las plantas fue acumulada en los primeros tres CP, 47% de la varianza. En CP1, estuvo representada principalmente por las relaciones hídricas de la planta con el ambiente que le permiten o no su desarrollo. El CP2 explicó el 23% de la varianza, que estuvo representado por la suma de todas las actividades fisiológicas de las plantas al final de su desarrollo, es decir las vainas y semillas producidas. El CP3, que acumuló 13% de la variabilidad total, indicó una característica agronómica muy relevante, sino la más relevante, de la que dependió el rendimiento: la cantidad de vainas producidas por la planta.

La representación tridimensional (Fig. 5) mostró que es posible distinguir la respuesta de los cultivares de frijol a la combinación de dos factores durante el crecimiento: la disponibilidad de humedad y la presencia de vermicompost como parte del sustrato.

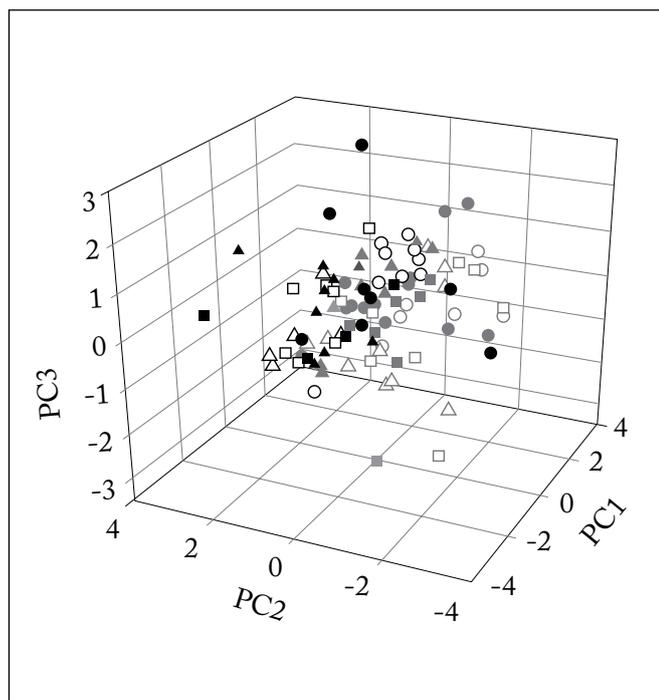


Fig. 5. Análisis de componentes principales para identificar las variables que podrían estar involucradas en la respuesta de los cultivares de frijol sensible y tolerante a la sequía, a la presencia vermicompost, y restricción de humedad del suelo. Al análisis se incorporaron variables medidas en las hojas, y componentes de rendimiento. Ver texto en Materiales y Métodos, Resultados y Discusión.

Fig. 5. Principal Component Analysis to identify variables which could be involved in the response of drought susceptible or tolerant bean cultivars, which grew either with or without vermicompost and under different levels of soil water availability. Different variables measured on leaves and yield determinants were incorporated in the analysis. See text in Materials and Methods, Results and Discussion.

CONCLUSIONES

Se observó que el vermicompost redujo los valores de g_e y A de las plantas de frijol en las dos condiciones de riego evaluadas, sin reducir el rendimiento. Con la suspensión del riego se suprimió g_e y el intercambio de gases, sin distinción de la condición de tolerancia o susceptibilidad a la sequía de los cultivares. Con las interacciones apreciadas, se hizo evidente la complejidad de las respuestas multifactoriales.

REFERENCIAS

- Acosta-Díaz, E., A.J. Acosta-Gallegos, C. Trejo-López, S.J. Padilla-Ramírez y D.M. Amador-Ramírez (2009). Adaptation traits in dry bean cultivars grown under drought stress. *Agricultura Técnica en México* 35: 416-425.
- Aguilar-Benítez, G., C.B. Peña-Valdivia, J.R. García-Nava, P. Ramírez-Vallejo, S.G. Benedicto-Valdés y J.D. Molina-Galán (2012). Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicompost y déficit de humedad en el sustrato. *Agrociencia* 46: 37-50.
- Aguirre-Medina, J.F., J. Kohashi-Shibata, J. Cadena-Iñiguez y C. Avendaño-Arrazate (2008). Tasa de secado del suelo e intercambio de gases de tres variedades de *Phaseolus vulgaris* L. *Phyton, International Journal of Experimental Botany* 77: 31-48.
- Akhzari, D., B. Attaelan, A. Arami, F. Mahmoodi y F. Aslani (2015). Effects of vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi on soil properties and growth of *Medicago polymorpha* L. *Compost Science & Utilization* 23: 142-153.
- Arancon, N.Q., C.A. Edwards, P. Bierman, C. Wech y J.D. Metzger (2004). Influences of vermicompost on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresource Technology* 93: 145-153.
- Arancon, N.Q., C.A. Edwards, A. Babenko, J. Cannon, P. Galvis y J.D. Metzger (2008). Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology* 39: 91-99.
- Asfaw, A. y M.W. Blair (2012). Quantitative trait loci for rooting patterns traits of common beans grown under drought stress versus non-stress conditions. *Molecular Breeding* 30: 681-695.
- Ayers, R.S. y D.W. Wescot (1985). Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev 1, Rome, Italy. 174 p.
- Ayyobi, H., E. Hassanpour, S. Alaqemand, S. Fathi, J.A. Olfati y G. Peyvast (2014). Vermicompost leachate and vermiwash enhance French Dwarf bean yield. *International Journal of Vegetable Science* 20: 21-27.
- Barrios-Gómez, E.J., C. López-Castañeda, J. Kohashi-Shibata, J.A. Acosta-Gallegos, S. Miranda-Colín y N. Mayek-Pérez (2010). Rendimiento de semilla y sus componentes de frijol flor de mayo en el centro de México. *Agrociencia* 44: 481-489.
- Beebe Rao, M.I., W.M. Blair y A.J. Acosta-Gallegos (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Africa Crop Science* 4: 1-20.
- Beys, K.A., P. Abrishamchi y A.M. Ganjealiland (2015). Effect of vermicompost on some morphological, physiological and biochemical traits of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*.

- Campos, H., C. Trejo, C.B. Peña-Valdivia, C. Ramírez-Ayala y P. Sánchez-García (2009). Effect of partial root zone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 120: 493-499.
- Castellanos, J.Z., B.S.X. Uvalle y S.A. Aguilar (2000). Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª ed. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Guanajuato, México. 226 p.
- Chand, S., R. Kumari y P.D. Dhar (2015). Effect of nickel and vermicompost on growth, yield, accumulation of heavy metals and essential oil of *Tagetes minuta*. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 18: 767-774.
- Chandra, S.R. y P. Banik (2014). Vermicompost and fertilizer application: Effect on productivity and profitability of baby corn (*Zea mays* L.) and soil health. *Compost Science & Utilization* 22: 83-92.
- Chaves, M.M., P.J. Maroco y S.J. Pereira (2003). Review: Understanding plant responses to drought - from genes to whole plant. *Functional Plant Biology* 30: 239-264.
- Comstock, J.P. (2002). Hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and transpiration. *Journal of Experimental Botany* 53: 195-200.
- Dikinya, O., P. Lehmann, C. Hinz y G. Aylmore (2007). Using a pore-scale model to quantify of particle re-arrangement on pore structure and hydraulic properties. *Hydrological Processes* 21: 989-997.
- Flexas, J. y H. Medrano (2002). Drought-inhibition of photosynthesis in C_3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of Botany* 89: 183-189.
- Foley, B.J. y L.R. Cooperband (2002). Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties. *Journal of Environmental Quality* 31: 2086-2095.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ª edición. Instituto de Geografía -UNAM. México, D. F. 90 p.
- Gebhardt, S., H. Fleige y R. Horn (2009). Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in North Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172: 688-695.
- Ghanbari, A.A., M.R. Shakiba, M. Toorchi y R. Choukan (2013). Morpho physiological responses of common bean leaf to water deficit stress. *European Journal of Experimental Biology* 3: 487-492.
- Grzesiak, S., M. Lijima, Y. Kono y A. Yamauchi (1997). Differences in drought tolerance between cultivars of field bean and field pea. A comparison of drought-resistant and drought-sensitive cultivars. *Acta Physiologiae Plantarum* 19: 349-357.
- Joshi, D., K.S. Hooda, J.C. Bhatt, B.L. Mina y H.S. Gupta (2009). Suppressive effects of composts on soil-borne and foliar diseases of French bean in the field in the western Indian Himalayas. *Crop Protection* 28: 608- 615.
- Kuehl, R. (2001). Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. 2ª ed. Thomson. México. 666p.
- Kumar, V.R., V.R. Swaroop, L. Rahman, A. Yadav, P.D. Dhar y A. Kaira (2014). Utilization of distillation waste based vermicompost and other organic and inorganic fertilizers on improving production potential in *Geranium* and soil health. *Communications in Soil Sciences and Plant Analysis* 45: 141-152.
- Liu, F., M.N. Andersen, S.E. Jacobsen y C.R. Jensen (2005). Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr) during progressive soil drying. *Environmental and Experimental Botany* 54: 33-40.
- Lizana, C., M. Wentworth, J.P. Martínez, D. Villegas, R. Meneses, E.H. Murchie, C. Pastenes, B. Lercari, P. Vernieri, P. Horton y M. Pinto (2006). Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress: I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany* 57: 685-697.
- Lynch, J., A. González, J. Tohme y I. García (1992). Variation in characters related to leaf photosynthesis in wild beans populations. *Crop Science* 32: 633-640.
- Marinari, S., G. Masciandaro, B. Ceccanti y S. Grego (2000). Influence of organic and mineral fertilizers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology* 72: 9-17.
- Miyashita, K., S. Tanakamaru, T. Maitani y K. Kimura (2005). Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress. *Environmental and Experimental Botany* 53: 205-214.
- Ramírez-Vallejo, P. y J.D. Kelly (1998). Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99: 127-136.
- Reynolds-Henne, C.E., A. Langenegger, J. Maní, N. Schenk, A. Zumsteg y U. Feller (2010). Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes. *Environmental and Experimental Botany* 68: 37-43.
- Rodríguez, G.M.N. (2008). Selección de líneas de frijol tolerantes a la sequía con base en respuestas de la planta al estrés hídrico. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 115 p.
- Rosales, M.A., S.M. Cuellar, M.M. De la Paz, G.J. Acosta y A.A. Covarrubias (2013). Physiological traits related to terminal drought resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 93: 324-331.
- Roy, S., K. Arunachalam, D.B. Kumar y A. Arunachalam (2010). Effects of organic amendments of soil on growth and productivity of three common crops viz. *Zea mays*, *Phaseolus vulgaris* and *Abelmoschus esculentus*. *Applied Soil Ecology* 45: 78-84.
- Sánchez, H.R., C.V.M. Ordaz, V.G.S. Benedicto, M.C.I. Hidalgo y L.D.J. Palma (2005). Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricomposto de cachaza y estiércol. *Interciencia* 30: 775-779.
- Sasal, M.C., A.E. Andriulo y M.A. Taboada (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research* 87: 9-18.
- Schurr, U., T. Gollan y E.D. Schulze (1992). Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus*. II Stomatal sensitivity to abscisic acid imported from the xylem sap. *Plant, Cell and Environment* 15: 561-567.
- Sebastian, A. y M.N. Prasad (2013). Cadmium accumulation retard activity of functional components of photo assimilation and growth of rice cultivars amended with vermicompost. *International Journal of Phytoremediation* 15: 965-978.
- Shultz, E.D. y A.E. Hall (1982). Stomatal responses, water loss and CO_2 assimilation rates on plants in contrasting environments. *Encyclopedia of Plant Physiology* 12B: 181-230.
- Singh, N.I. y J.S. Chauhan (2009). Response of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to organic manures and inorganic fertilizer on growth and yield parameters under irrigated condition. *Nature and Science* 7: 52-61.
- Sujatha, S. y R. Bhat (2013). Impact of vermicomposts and nitrogen-phosphorus-potassium application on biomass partitioning, nutrient uptake and productivity of areca nut. *Journal of Plant Nutrition* 36: 976-989.

- Sunil, K., C.R. Rawat, D. Shiva y K.R. Suchit (2005). Dry matter accumulation, nutrient uptake and changes in soil fertility status as influenced by different organic and inorganic sources of nutrients to forage sorghum (*Sorghum bicolor*). *Indian Journal of Agricultural Science* 75: 340-342.
- Sio-Se, M.A., A. Ahmadi, K. Poustini y V. Mohammadi (2006). Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research* 98: 222-229.
- Tejada, M., A.M. García-Martínez y J. Parrado (2009). Effects of a vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena* 77: 238-247.
- Tejada M. y C. Benítez (2011). Organic amendment based on vermicompost and compost: Differences on soil properties and maize yield. *Waste Management Resources* 29: 1185-1196.
- Tejada, M. y C. Benítez (2015). Application of vermicompost and compost on tomato growth in greenhouses. *Compost Science & Utilization* 23: 94-103.
- Terzi, R., A. Sağlam, N. Kutlu, H. Nar y A. Kadioğlu (2010). Impact of soil drought stress on photochemical efficiency of photosystem II and antioxidant enzyme activities of *Phaseolus vulgaris* cultivars. *Turkish Journal of Botany* 34: 1-10.
- Tharmaraj, K., P. Ganesh, K. Kolanjinathan, K. Suresh y A. Anandan (2011). Influence of vermicompost and vermiwash on physicochemical properties of rice cultivated soil. *Current Botany* 2: 18-21.
- Troeh, F.R. y L.M. Thompson (1993). *Soils and Soil Fertility*. Oxford University Press, USA. 5 Edition. 480 p.
- Vo, H.M. y C.H. Wang (2014). Physicochemical properties of vermicompost-based substrate mixtures and their effects on the nutrient uptake and growth of muskmelon (*Cucumis melo* L.) seedlings. *Biological Agriculture & Horticulture* 30: 153-163.
- Warman, P.R. y M.J. AngLopez (2010). Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium. *Bioresource Technology* 101: 4479-4483.