Fisiología vegetal

Artículo de investigación científica y tecnológica

Fotosíntesis y rendimiento de biomasa en ají Tabasco, rábano y maíz sometidos a agua tratada magnéticamente

Photosynthesis and biomass yield in Tabasco pepper, radish and maize subjected to magnetically treated water

Daniel Iván Ospina-Salazar,[1] Jhony Armando Benavides-Bolaños,[2*]
Orlando Zúñiga-Escobar,[3] Carlos Germán Muñoz-Perea[4]

[1] Estudiante de doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira, Colombia.
Correo: diospinas@unal.edu.co
[2] Investigador, Universidad del Valle, Departamento de Física, Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra (Ilama). Cali, Colombia.
Correo: jhony.benavides@correounivalle.edu.co
[3] Profesor y director, Universidad del Valle, Departamento de Física, Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra (Ilama). Cali, Colombia.
Correo: orlando.zuniga@correounivalle.edu.co
[4] Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira, Colombia.
Correo: cgmunozp@unal.edu.co

Editor temático: Javier Orlando Orduz Rodríguez (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica])

Fecha de recepción: 27/10/2016
Fecha de aprobación: 26/02/2018

Para citar este artículo: Ospina-Salazar, D. I., Benavides-Bolaños, J. A., Zúñiga-Escobar, O., & Muñoz-Perea, C. G. (2018). Fotosíntesis y rendimiento de biomasa en ají Tabasco, rábano y maíz sometidos a agua tratada magnéticamente. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *19*(2), 291-305.

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num2_art:537

Esta licencia permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de la obra de modo no comercial, siempre y cuando se dé el crédito y se licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

* Autor de correspondencia. Calle 13 # 100-00, Ciudadela Universitaria Meléndez, Edificio 320, Universidad del Valle. Cali, Colombia

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Resumen

En este estudio se evaluó el efecto del agua tratada magnéticamente (ATM) en parámetros fisiológicos de ají Tabasco, rábano rojo y maíz amarillo. La mitad de las plantas de las tres especies se regaron con agua normal del acueducto, y la otra con agua tratada a través de un dispositivo magnético. Se midieron la fotosíntesis, la biomasa y el contenido mineral (este último solo en frutos de ají Tabasco). Todas las especies cultivadas con ATM aumentaron su tasa fotosintética y su conductancia estomática. Los parámetros de fluorescencia, como la fluorescencia variable (F_v/F_m) y la extinción no fotoquímica, permanecieron sin cambios en las especies evaluadas. En el ají Tabasco, el agua con tratamiento favoreció un mayor rendimiento, en parámetros como biomasa aérea, frutos por planta y área foliar, incrementándose también el contenido de nitrógeno y cationes divalentes en frutos. Además, hubo una relación parcialmente positiva entre el área foliar y el rendimiento de frutos por planta ($r^2 = 0,52$ en el control y 0,30 con ATM). En contraste, en las plantas de maíz solo hubo un aumento en el peso y en los granos por mazorca, mientras que las de rábano mostraron una pérdida no significativa en la biomasa total. La mayor acumulación de biomasa observada en las plantas de ají Tabasco y maíz se atribuye a una mayor área foliar o a la asimilación de carbono. Debido a que la fluorescencia de la clorofila no se alteró, se propone que el ATM no provoca ningún cambio en el complejo de oxidación del agua del fotosistema II. Por otra parte, la falta de respuesta de algunas variables en las tres especies mostró que el ATM puede tener efectos interespecíficos. A pesar de lo anterior, esta tecnología puede ser una alternativa para mejorar el rendimiento de los cultivos, en particular en del ají Tabasco.

Palabras clave: acondicionamiento de agua, agrotecnología, biomasa, biofísica, intercambio gaseoso, biomasa seca, rendimiento del cultivo

Abstract

The aim of this study was to assess the effect of magnetically treated water (MTW) on physiological parameters of three species: Tabasco pepper, red radish and yellow maize. Half of the plants per species were irrigated with normal tap water and the other half with tap water treated with a magnetic device. Photosynthesis, biomass, and mineral content (the latter only in Tabasco pepper fruits) were measured. All the species grown under MTW increased their photosynthetic rate and stomatal conductance. Fluorescence parameters as F_v/F_m and non-photochemical quenching remained unchanged among the species tested. In Tabasco pepper, MTW produced higher yield measured as aerial biomass, fruits per plant and leaf area; moreover, nitrogen and divalent cation content in fruits increased as well. In addition, there was a partial positive relation between leaf area and fruit yield ($r^2 = 0.52$ for control and 0.30 for MTW). By contrast, there was an augment only in cob weight and grains per cob in maize plants, whereas radish plants showed a non-significant loss in total biomass. The higher biomass accumulation observed in Tabasco pepper and maize plants is attributed to a higher leaf area and/or carbon assimilation. Since chlorophyll fluorescence was unaffected, we propose that MTW does not trigger any change in the water-oxidizing complex of photosystem II (PSII). Moreover, the lack of response of several variables among the species tested showed that MTW might have interspecific effects. Despite the latter, this technology can be an alternative to improve crop yield, particularly in Tabasco pepper.

Keywords: agrotechnology, biomass, biophysics, crop yield, dry biomass, gas exchange, water conditioning

Introducción

La primera impresión que normalmente se tiene sobre el agua es que no tiene respuesta magnética alguna. Sin embargo, varias investigaciones han demostrado que sí la tiene, pero no debido a un fenómeno de alineación de electrones, como en sustancias ferromagnéticas (hierro o níquel), ya que el agua tiene una muy baja susceptibilidad magnética. En cambio, es ampliamente aceptado que la tensión superficial, la velocidad de evaporación y el agrupamiento molecular del agua se ven afectados en presencia de campos magnéticos de diferente intensidad (Chang & Weng, 2006; Otsuka & Ozeki, 2006; Pang & Deng, 2008). Se cree que estos procesos están relacionados con los enlaces de hidrógeno (Cai, Yang, He, & Zhu, 2009).

Diversos autores han propuesto que los cambios fisicoquímicos que se dan en el agua tratada magnéticamente (ATM) podrían mejorar las características de crecimiento de las plantas. Por ejemplo, han mencionado que la exposición previa del agua de riego a campos magnéticos aumenta la biomasa verde y seca, la eficiencia en el uso del agua y el contenido mineral (Abou El-Yazied, El-Gizawy, Khalf, El-Satar, & Shalaby, 2012; Grewal & Maheshwari, 2011; Hozayn, Abd El Monem, Abdelraouf, & Abdalla, 2013; Mahmood & Usman, 2014). Adicionalmente, ciertos resultados indican que la implementación del ATM puede aliviar, en algunos cultivos, el efecto nocivo de un suministro de agua limitado o de baja calidad. Ferrari et al. (2015) mencionaron que las plantas de lechuga a las que se les suministró la mitad o un cuarto del agua que se pierde por evaporación aumentaron su biomasa (en peso y longitud de la raíz) al usar ATM, mostrando un rendimiento que resultó cercano al de las plantas bien regadas. Estos resultados son consistentes con los mencionados por Aly, Thanaa, Osman y Abdelhamed (2015), quienes sugieren que el ATM podría ser tan efectiva como las sustancias antisalinas más comunes (como el ácido ascórbico) para aumentar los parámetros de crecimiento y la productividad de árboles de naranjo en condiciones desérticas.

La tasa de fotosíntesis, el contenido de clorofila y la fluorescencia son parámetros que conjuntamente indican el estado fisiológico y la salud de una planta, y cómo se ve afectada por las condiciones experimentales. Por lo tanto, son buenos predictores del desarrollo de cultivos y su productividad. Las plantas con un bajo nivel de clorofila u hojas amarillentas muestran un rendimiento cuántico menos eficiente en los fotosistemas y, por consiguiente, se inhibe la asimilación de CO_2 (Dai et al., 2009). En este sentido, Moussa (2011) demostró que el fríjol común cultivado con ATM exhibía una mayor actividad fotosintética, consecuente con un contenido total de clorofila más alto. Otros autores (El-Sayed y El-Sayed, 2014) obtuvieron datos similares, mostrando también que la aplicación de ATM causa un aumento en los carbohidratos disponibles totales en diferentes órganos de plantas de habas. No obstante, el efecto de este tratamiento en los parámetros de fluorescencia de clorofila aún no se ha estudiado a fondo. A pesar de estos últimos resultados, no existe una teoría completa y uniforme que explique los efectos del ATM en el metabolismo de las plantas. Sin embargo, no es improbable que estos efectos sean indirectos, es decir, a través de una modificación del perfil de humedad del suelo o un mejoramiento de la disponibilidad de nutrientes alrededor de las raíces, como sugieren algunos trabajos (Khoshravesh, Mostafazadeh-Fard, Mousavi, & Kiani, 2011; Maheshwari & Grewal, 2009; Noran, Shani, & Lin, 1996). Más aún, estudios biológicos *in vivo* han demostrado que la permeabilidad de los canales de iones en las membranas y en las células aumenta, involucrando también la actividad de los iones de calcio y el equilibrio de las concentraciones de iones (Smith, McLeod, Liboff, & Cooksey, 1987).

Aunque la tecnología de tratamiento magnético del agua presenta varias ventajas para mejorar la producción de los cultivos, todavía falta información sobre su efecto en procesos fisiológicos específicos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar factores como la respuesta de la fluorescencia de clorofila y los parámetros de intercambio de gases, así como la acumulación final de biomasa y el contenido mineral en tres especies de plantas de gran importancia, irrigadas con agua tratada en un dispositivo magnético comercialmente disponible. Las plantas en estudio fueron ají Tabasco (*Capsicum frutescens* L. [Solanaceae]), rábano rojo Crimson Giant (*Raphanus sativus* L. [Brassicaceae]) y maíz amarillo ICA V-305 (*Zea mays* L. [Poaceae]).

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Materiales y métodos

Localización, material vegetal y condiciones de crecimiento

El experimento se realizó en una casa de malla de 125 m^2 en la estación experimental de la Universidad del Valle, Cali, departamento del Valle del Cauca (Colombia). El sitio se ubica a una altitud de 967 m s. n. m., y tiene condiciones ambientales tropicales subhúmedas, con una temperatura promedio anual de 26 °C y una humedad relativa del 65 %. Las semillas de ají Tabasco se cultivaron en bandejas con turba durante 30 días, con el fin de obtener plántulas vigorosas y uniformes para el trasplante en macetas. Por otro lado, semillas de rábano rojo de la variedad Crimson Giant y de maíz amarillo de la variedad ICA V-305 se sembraron directamente en macetas que contenían 10 kg de suelo limo-arcilloso, previamente homogenizado y tamizado, con un pH de 6,79 y un contenido de materia orgánica de 2,57 %. Se instaló un sistema de riego por goteo, con mangueras de 5 mm conectada a un emisor por cada maceta, con un caudal de 3 L/h. El agua de riego se pasó a través del imán con un caudal de 2,8 L/min. El agua se obtuvo de la empresa de servicios municipales, con las mismas especificaciones para el consumo humano. El riego se programó de acuerdo con la evapotranspiración de referencia establecida para los cultivos evaluados.

Tratamiento magnético del agua

El tratamiento magnético del agua se efectuó usando un imán Quantum Biotek (Omni Enviro Water Systems, Australia) conectado al sistema de riego, antes de la derivación a los goteros de cada maceta. Este dispositivo es un cilindro de policarbonato de 12 centímetros de largo con un diámetro interno de una pulgada. El imán genera un campo magnético que varía de 0 a 156 mT (militeslas), que aumenta a lo largo y alrededor de la circunferencia del cilindro. Grewal y Maheshwari (2011) ofrecen más detalles sobre este dispositivo. La inducción magnética se midió con un Teslameter LD Didactic GmbH (Huerth, Alemania).

Determinación de la fluorescencia de clorofila

Se realizaron mediciones de fluorescencia de clorofila en las primeras tres hojas jóvenes completamente expandidas y expuestas al sol, una vez por semana en cada planta durante la temporada de crecimiento de cada cultivo. Estos valores se registraron usando un fluorómetro OS30p+ (Opti-Sciences Inc., EE. UU.), para mediciones adaptadas a luz y a oscuridad. La adaptación oscura se logró cubriendo las hojas con clips durante 30 minutos. Los parámetros de fluorescencia se calcularon de acuerdo con Baker (2008), de la siguiente manera:

Fluorescencia máxima de hojas adaptadas a la oscuridad	$= F_m$
Fluorescencia máxima de hojas adaptadas a la luz	$= F_m'$
Fluorescencia mínima de hojas adaptadas a la oscuridad	$= F_0$
Fluorescencia variable (F_v)	$= F_m - F_0$
Eficiencia cuántica máxima de la fotoquímica del complejo de oxidación del agua del fotosistema II (PSII)	$= F_v/F_m$
Línea base de rendimiento cuántico	$= F_0/F_m$
Extinción no fotoquímica (NPQ)	$= (F_m/F_m') - 1$

Intercambio de gases, acumulación de biomasa y composición elemental

La tasa de fotosíntesis (A), la transpiración (E) y la conductancia estomática (Gs) se midieron en las mismas tres hojas jóvenes completamente expandidas y expuestas al sol, usando un sistema fotosintético manual CI-340 (CID Bio-Science, EE. UU.). Las mediciones se realizaron entre las 11 a. m. y las 3 p. m., en condiciones de luz, humedad, concentración atmosférica de CO_2 y temperatura normales para la zona, durante la temporada de crecimiento de cada cultivo. En cada tiempo o momento de muestreo, la intensidad de la luz se registró con un sensor cuántico LI-190SA adaptado a un registrador de datos

LI-1400 (LI-COR, Inc., EE. UU.). La eficiencia de uso del agua (EUA) se calculó dividiendo la asimilación de CO_2 (A) por su correspondiente transpiración de H_2O (E).

En cuanto a la acumulación de biomasa, las plantas de rábano y maíz se cosecharon 40 y 90 días después de la siembra, respectivamente, separando los rizomas y las hojas en el caso del rábano, y el total de mazorcas, las cariópsides y la tusa en el caso del maíz. En lo que respecta al ají Tabasco, los frutos se cosecharon cuatro veces, desde el quinto hasta el octavo mes después del trasplante. Los frutos secos se enviaron a los laboratorios Agrilab en Bogotá (Colombia), para un análisis de su composición mineral. Después de esto, se separaron las partes aéreas de las plantas (tallos y hojas). Todas las muestras de las tres especies se pesaron tanto frescas como secas, midiéndose el peso seco después de secar las muestras en un horno, a 65 °C durante 72 horas. En el rábano y el ají Tabasco, el área foliar (AF) se estimó a partir del peso seco de un disco de hoja de 0,81 cm de radio, y extrapolándolo al peso seco total de las hojas. Además, la relación del área foliar (RAF) del ají Tabasco se calculó en relación con el peso seco de frutos (ecuación 1), ya que son un sumidero de fotoasimilados y las hojas son su fuente. En lo que se refiere al rábano, el cálculo se realizó teniendo en cuenta todo el peso seco de la planta (ecuación 2).

(Ecuación 1)

Relación de área foliar (RAF) para ají Tabasco
= AF/PSF (cm^2/g)

(Ecuación 2)

Relación de área foliar (RAF) para rábano
= AF/PST (cm^2/g)

Donde:

PSF = peso seco del fruto de ají Tabasco
PST = peso seco de toda la planta de rábano

Es importante tener en cuenta que el área foliar y la relación del área foliar no se calcularon para el maíz, porque los insectos dañaron muchas hojas antes de la cosecha.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se realizó con un diseño completamente aleatorizado, con 38 réplicas por tratamiento (ATM) y un control (agua no tratada) en ají Tabasco y rábano, y 21 en maíz. Cada réplica consistió en una planta en cada maceta. Los datos se analizaron con el programa estadístico IBM SPSS Statistics 22, ejecutando previamente una prueba de homogeneidad de varianzas y normalidad. También se llevó a cabo un procedimiento de modelo lineal general para mediciones repetidas de los parámetros de fluorescencia de clorofila, probando la significancia entre los sujetos y dentro de ellos. Únicamente para la medición de la biomasa final se aplicó una prueba de comparación de medias. En el análisis estadístico solo se incluyeron los datos para las variables de intercambio de gases a las mismas intensidades de luz.

Resultados y discusión

Parámetros de fluorescencia

La interacción entre las diferentes medidas de fluorescencia de clorofila de las plantas con agua tratada magnéticamente (ATM) fue consistentemente similar a la encontrada en las plantas del tratamiento control. En el maíz, la fluorescencia máxima (F_m) de las hojas adaptadas a la oscuridad fue ligeramente mayor en las plantas tratadas. En cuanto a la fluorescencia mínima (F_0) y la extinción no fotoquímica (NPQ), dentro de las tres especies todos los valores del ATM y el control fueron prácticamente los mismos. Con respecto a la eficiencia cuántica máxima de la fotoquímica del PSII (F_v/F_m), solo el rábano mostró una disminución mínima, mientras que en la línea base del rendimiento cuántico (F_0/F_m) se observó el efecto opuesto. Además, la interacción de los tres parámetros previos entre las tres especies resultó ser muy significativa (tabla 1).

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Tabla 1. Parámetros por tratamiento de fluorescencia de clorofila en ají Tabasco, rábano rojo Crimson Giant y maíz ICA V-305

Especie	Tratamiento	Parámetros de fluorescencia de clorofila				
		F_m (Ua)	F_0 (Ua)	F_v/F_m (Ua)	F_0/F_m (Ua)	NPQ
Ají Tabasco	Control	1.038,1 ± 5,090	242,7 ± 0,865	0,761 ± 0,002	0,238 ± 0,001	0,561 ± 0,032
	ATM	1.033,2 ± 5,055	242,5 ± 0,853	0,761 ± 0,002	0,238 ± 0,001	0,542 ± 0,031
Rábano	Control	988,3 ± 10,800	196,0 ± 2,184	0,800 ± 0,002	0,198 ± 0,002	0,575 ± 0,014
	ATM	976,7 ± 8,583	197,1 ± 1,602	0,797 ± 0,002	0,202 ± 0,002	0,556 ± 0,013
Maíz	Control	803,2 ± 5,847	218,1 ± 1,357	0,723 ± 0,003	0,276 ± 0,003	0,687 ± 0,011
	ATM	817,3 ± 5,895	219,2 ± 1,368	0,727 ± 0,003	0,273 ± 0,003	0,706 ± 0,011
Parámetros por tratamiento		0,758	0,579	0,791	0,788	0,823
Parámetros por especie		0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**

** $p < 0,05$. Todos los valores son medias ± error estándar de 38 plantas de ají Tabasco y de rábano, así como 21 de maíz. ATM: agua tratada magnéticamente; Ua: unidades de absorbancia; NPQ: extinción no fotoquímica.
Fuente: Elaboración propia

Autores como Baker (2008) han reconocido la emisión de fluorescencia de la clorofila *a* como un indicador confiable del estrés de la planta y el rendimiento fotosintético. En este estudio, se reportó que la interacción entre los cinco parámetros de fluorescencia medidos (F_m, F_0, F_v/F_m, F_0/F_m y NPQ) y el tratamiento con ATM no fueron estadísticamente diferentes, comparados con el control. A partir de este resultado, podemos inferir que el tratamiento implementado en este experimento no es una fuente de estrés en sí mismo, ya que los valores F_v/F_m para maíz (0,727) y rábano (0,800) estuvieron cerca de aquellos del rango normal para plantas C4 y C3 no estresadas (0,780 y 0,830, respectivamente) (Pfündel, 1998). Sin embargo, las lecturas de F_v/F_m de este estudio para ají Tabasco (0,761) fueron inferiores a las publicadas para plantas de ají con diferentes métodos de cultivo (0,809) (Del Amor, 2006). Lo anterior indica que las condiciones en la casa de malla podrían ser un tanto severas, en particular para esta especie.

A pesar de esto, la NPQ no exhibió un cambio significativo en las tres especies probadas con ATM, lo que significa que, como resultado de este tratamiento, no hubo un aumento en la extinción del exceso de luz a través de la disipación de calor, lo que sí hubiera constituido una medida de estrés. Además, previamente se ha informado que un deterioro o una promoción en el proceso de escisión del agua en el PSII deberían notarse en el rendimiento de la fluorescencia. Por ejemplo, en plantas mutantes de tabaco que carecen de un polipéptido específico en su aparato de escisión de agua en el PSII, exhiben valores de fluorescencia mínima (F_0) más altos y de fluorescencia variable (F_v) casi equivalentes a cero (Hager, Hermann, Biehler, Krieger-Liszkay, & Bock, 2002). Dado que no se observaron diferencias significativas entre el control y las plantas tratadas en los parámetros de fluorescencia, este estudio sugiere que el ATM no es metabólicamente susceptible a una división diferencial en el complejo oxidante del H_2O.

Acumulación y rendimiento de biomasa

La biomasa aérea final y el rendimiento de frutos de ají Tabasco en plantas sometidas al ATM fueron consistentemente mayores en comparación con el control. El peso fresco de frutos y el número de frutos por planta fueron mayores en las plantas tratadas en un nivel significativo. El aumento en estos parámetros fue del 27 % y del 31 %, respectivamente, mientras que el incremento en el peso seco del fruto fue del 18 % (figura 1a). Los pesos fresco y seco de hojas y tallos también aumentaron en las plantas cultivadas con ATM, pero en un nivel de significación menor, que osciló entre el 13 % para el peso fresco de las hojas y el 15 % para su peso seco, el 14 % para el peso fresco de los tallos y el 12 % para su peso seco (figura 1b). El área foliar y la relación del área foliar sufrieron un aumento (15 %) y una disminución (5,5 %), respectivamente (figuras 1c y 1d).

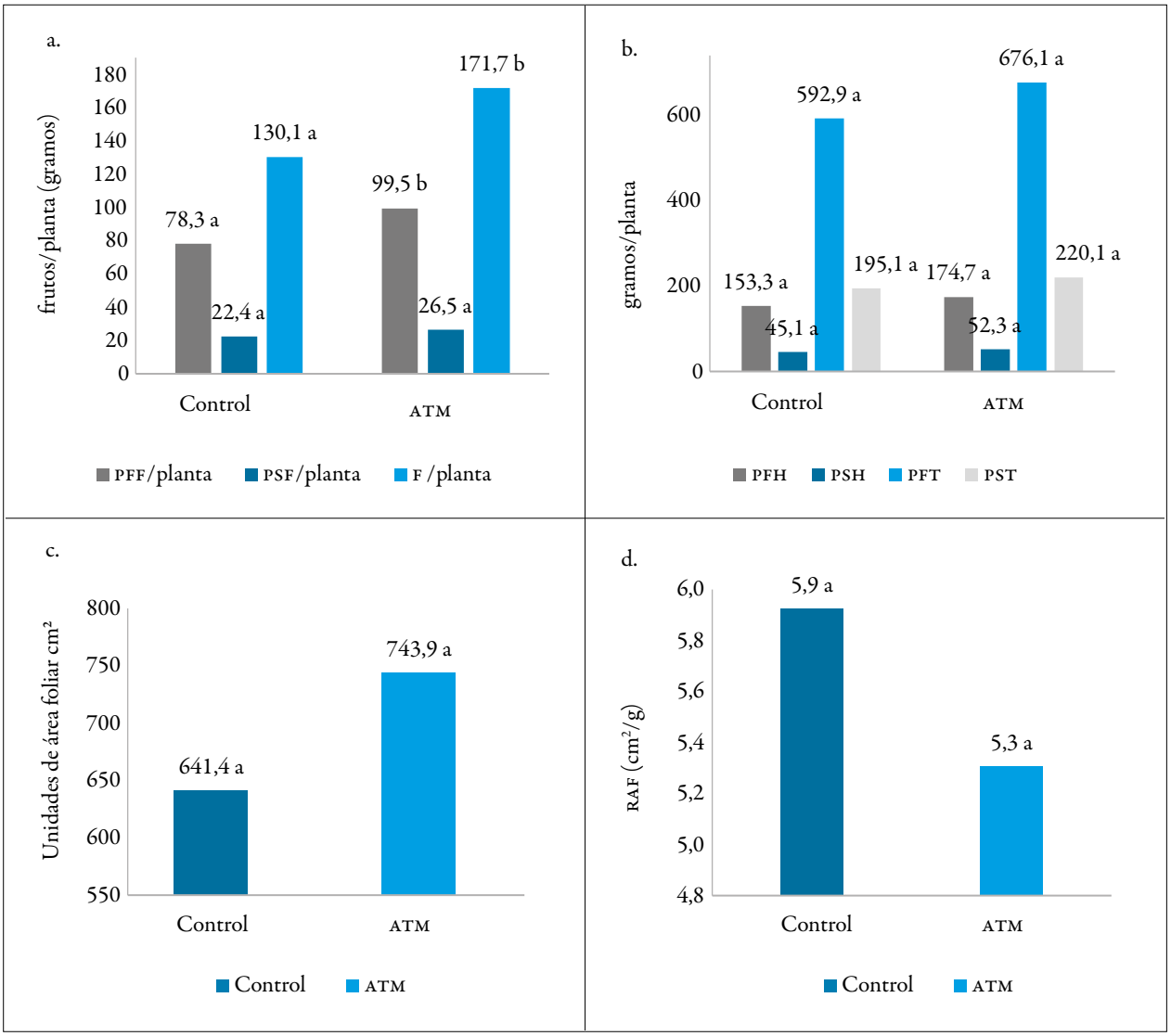

Figura 1. Acumulación de biomasa en plantas de ají Tabasco. a. Rendimiento de frutos. PFF: peso fresco de frutos (sig. = 0,034**); PSF: peso seco de frutos (sig. = 0,125); F/planta: frutos por planta (sig. = 0,018**). b. Biomasa final aérea. PFH: peso fresco de hojas (sig. = 0,274); PSH: peso seco de hojas (sig. = 0,214); PFT: peso fresco de tallos (sig. = 0,208); PST: peso seco de tallos (sig. = 0,197). c. Área foliar (AF) (sig. = 0,214). d. Relación de área foliar (RAF) (sig. = 0,352). Todos los valores son medias de 39 plantas.
Fuente: Elaboracion propia

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Por otra parte, el área foliar y el peso seco de frutos mostraron una relación positiva a partir de un modelo lineal por mínimos cuadrados (figura 2), tanto en plantas tratadas como no tratadas. Sin embargo, a pesar de la mayor área foliar observada en plantas de ají Tabasco sometidas al ATM, esta variable no explicó completamente la variación en la acumulación de biomasa seca en frutos, ya que el coeficiente de determinación (r^2) solo alcanzó el 29,89 % de la variación. En contraste, para las plantas control, este valor (52,16 %) fue de casi el doble en comparación con el encontrado en las plantas tratadas.

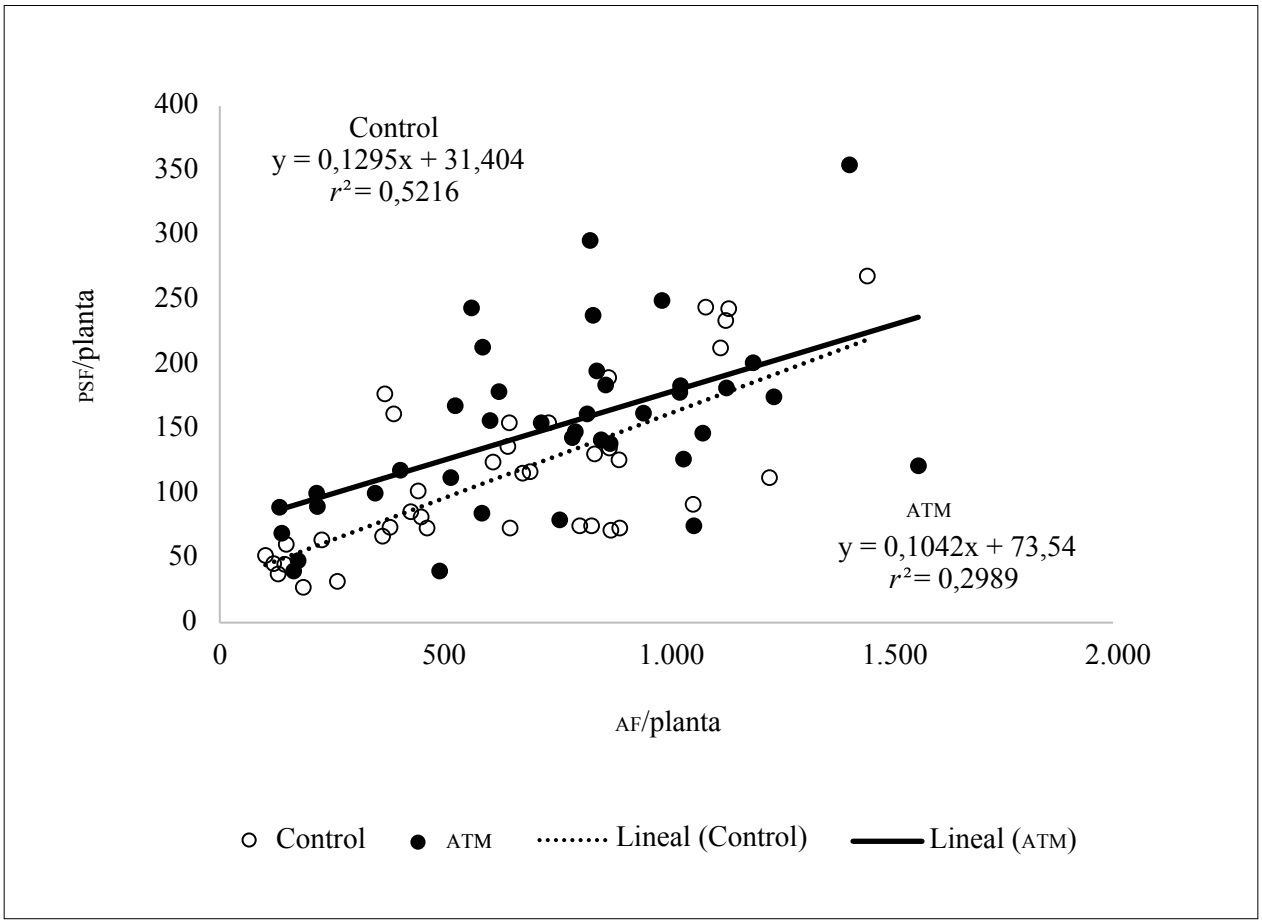

Figura 2. Variación en peso seco de frutos (PSF) por planta en relación con el área foliar (AF) en plantas de ají Tabasco.
Fuente: Elaboracion propia

El análisis de la composición de elementos en frutos secos de ají Tabasco mostró que varios nutrientes aumentaron su concentración con ATM, en comparación con el control (tabla 2). Entre ellos, el nitrógeno, el calcio, el magnesio, el azufre, el manganeso y el zinc presentaron los mayores incrementos, siendo significativos los valores del nitrógeno y el zinc. Por su parte, el potasio y el boro se mantuvieron prácticamente iguales en ambos grupos de plantas. En cuanto al fósforo, el hierro, el cobre y el sodio, experimentaron disminuciones con el ATM, pero en niveles de significancia más bajos. El aumento en el calcio y el magnesio también se observó en la saturación de estos cationes, mostrando valores más altos con el ATM, a excepción del potasio, que exhibió una saturación más baja. Todas las relaciones entre los cationes con ATM fueron mayores, así como aquellas entre N y P, y entre Ca y B. Sin embargo, la relación entre N y S fue casi la misma en los dos grupos de plantas, y aquella entre Fe y Mn mostró una reducción.

Tabla 2. Composición de elementos en frutos secos de ají Tabasco

Tratamientos		Control		ATM		
Elemento	**Unidad**	**Promedio ± DE**		**Promedio ± DE**		**Sig.**
N	%	2,343	± 0,118	2,722	± 0,162	0,083*
P		0,620	± 0,149	0,511	± 0,024	0,455
K		2,501	± 0,068	2,529	± 0,086	0,807
Ca		0,220	± 0,018	0,257	± 0,019	0,185
Mg		0,181	± 0,006	0,197	± 0,007	0,105
S		0,221	± 0,016	0,260	± 0,019	0,136
Fe	ppm	196,300	± 51,100	171,100	± 17,600	0,633
Mn		16,380	± 2,310	23,330	± 6,870	0,377
Cu		6,400	± 0,749	6,233	± 0,398	0,842
Zn		21,290	± 1,460	28,000	± 1,880	0,015**
B		31,380	± 1,820	30,000	± 1,450	0,560
Na		5,398	± 2,182	4,143	± 1,712	0,654
Saturación de K	%	71,26	± 0,700	69,10	± 0,979	0,099*
Saturación de Ca		12,16	± 0,782	13,61	± 0,851	0,234
Saturación de Mg		16,55	± 0,241	17,28	± 0,528	0,248
Ca/Mg		0,738	± 0,054	0,793	± 0,052	0,469
Ca/K		0,169	± 0,012	0,198	± 0,015	0,168
Mg/K		0,231	± 0,004	0,250	± 0,010	0,126
Ca/Mg+K		0,404	± 0,015	0,449	± 0,021	0,108
N/S		10,750	± 0,427	10,640	± 0,426	0,853
N/P		4,555	± 0,494	5,358	± 0,293	0,171
Ca/B		71,150	± 5,510	86,930	± 7,400	0,115
Fe/Mn		11,180	± 1,640	9,783	± 1,370	0,521

*$p < 0,1$; **$p < 0,05$. DE: desviación estándar. Los datos son valores medios de nueve muestras. Las unidades de concentración están en función del peso seco.
Fuente: Elaboración propia

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Por otro lado, en las plantas de rábano rojo Crimson Giant, se observó una tendencia opuesta respecto a la acumulación de biomasa. La biomasa final en hojas y tallos (incluidos los rizomas) experimentó una disminución en las plantas cultivadas con ATM. Sin embargo, esta tendencia no fue tan significativa como el aumento de la biomasa observado en las plantas de ají Tabasco (figura 3a). El área foliar y la relación del área foliar de las plantas de rábano con el agua no tratada también fueron ligeramente más altas en comparación con las plantas tratadas (figura 3b).

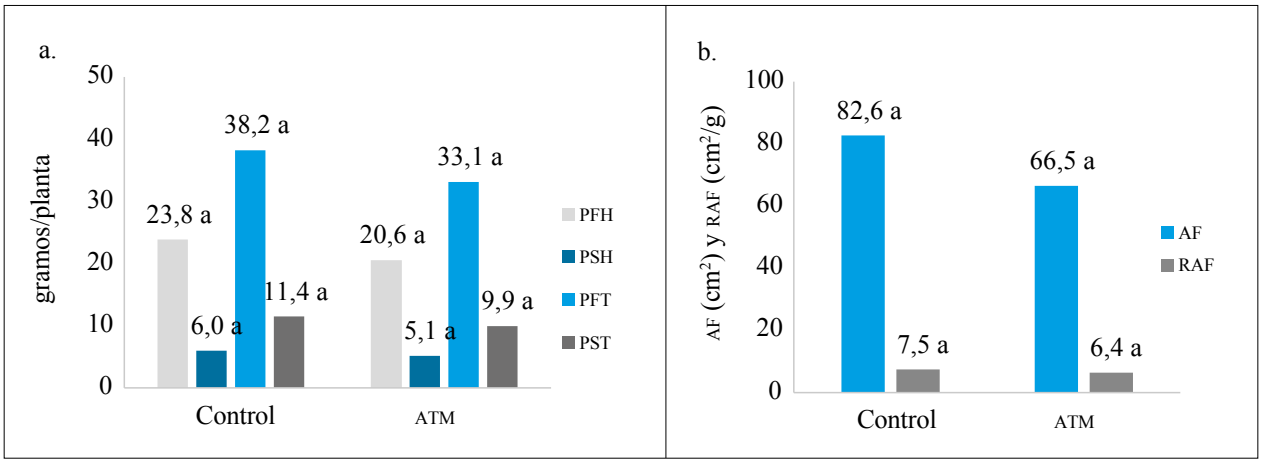

Figura 3. Acumulación de biomasa en plantas de rábano rojo Crimson Giant. a. Biomasa final total. PFH: peso fresco de hojas (sig. = 0,858); PSH: peso seco de hojas (sig. = 0,859); PFT: peso fresco de tallos (sig. = 0,863); PST: peso seco de tallos (sig. = 0,863). b. Relación del área foliar y área foliar. AF: área foliar (sig. = 0,791); RAF: relación del área foliar (sig. = 0,680). Todos los valores son medias de 39 plantas.
Fuente: Elaboracion propia

En lo que respecta al rendimiento de mazorcas de plantas de maíz ICA V-135, el ATM produjo un efecto similar al observado en aquellas de ají Tabasco, ya que el peso total de la mazorca y su número de granos se incrementaron con este tratamiento. Sin embargo, el peso de cien granos fue prácticamente igual al encontrado en las plantas de control (figura 4). El aumento en el peso y los granos por mazorca fue del 13 % y del 5,3 %, respectivamente.

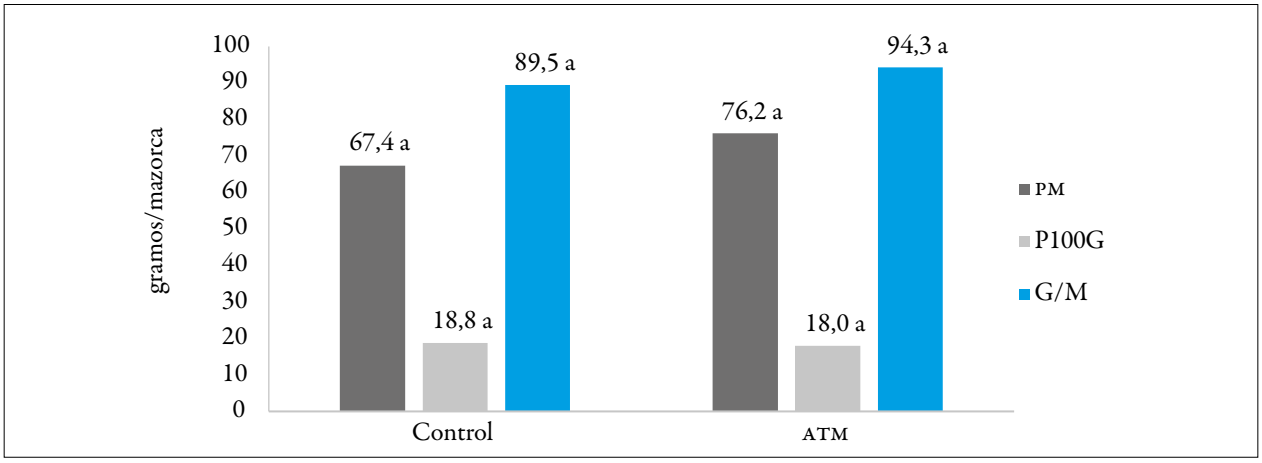

Figura 4. Cosecha de mazorcas en plantas de maíz ICA V-135. PM: peso de la mazorca (sig. = 0,127); P100G: peso de 100 granos (sig. = 0,157); G/M: granos por mazorca (sig. = 0,762). Todos los valores son medias de 21 plantas.
Fuente: Elaboracion propia

El efecto del ATM en la acumulación de biomasa solo fue consistente en plantas de ají Tabasco y maíz ICA V-135. Los mayores rendimientos de biomasa reportados en las plantas tratadas en este estudio concuerdan con los resultados obtenidos por otros autores que utilizaron el mismo dispositivo magnético en apio y guisantes (Maheshwari & Grewal, 2009). El efecto más significativo del ATM se encontró en plantas de ají Tabasco, en lo que se refiere al número y el peso fresco de frutos por planta, aunque también aumentaron los pesos fresco y seco de hojas y tallos; más aún, esto afectó a su vez al AF y a la RAF. Dado que el área foliar verde y expuesta a la luz es la fuente de fotoasimilados para toda la planta, esta característica se relaciona frecuentemente con la acumulación de biomasa en otros órganos de la planta. Autores como Graber et al. (2010) observaron esta relación en pimentón dulce cultivado en un sustrato de *biochar*. Una mayor área foliar significa más intercepción de luz, un factor muy importante, que afecta el crecimiento de la planta incluso más que la fotosíntesis neta (Kang & Van Iersel, 2004). Sin embargo, cuando se contrastó el rendimiento de frutos con el AF por regresión lineal, hubo un ajuste parcial. Este resultado evidencia que la acumulación de biomasa seca en frutos solo se correlacionó en parte con el área foliar, en particular en plantas sometidas al ATM. Esta diferencia se atribuye al efecto del tratamiento, que conduce a mecanismos fisiológicos adicionales que desencadenan esta respuesta. Por lo tanto, es posible que, no solo el AF, sino también la fotosíntesis neta, hayan contribuido a aumentar el número y el peso de frutos del ají Tabasco. Esto es consistente con los valores de la RAF más bajos encontrados en estas plantas, que a su vez fueron una consecuencia del mayor peso seco de frutos, en lugar de una disminución del área foliar. Viéndolo desde otro ángulo, esto significa que las plantas de ají Tabasco sometidas al ATM crearon más biomasa seca de frutos por unidad de AF, siempre y cuando estos fueran un sumidero de fotoasimilados.

Por el contrario, la disminución en el AF y en la RAF que se observó en las plantas de rábano rojo Crimson Giant con ATM se asoció con una menor biomasa fresca y seca en hojas y tallos, aunque se encontró que este efecto no fue significativo en un nivel razonable ($p > 0{,}680$). El patrón observado en el maíz ICA V-305 es que el peso y los granos por mazorca de las plantas tratadas fueron superiores a los de sus contrapartes del control; esto indica que el aumento en el peso de la mazorca se debió principalmente al desarrollo de más granos por unidad, en lugar de un incremento en la acumulación de biomasa en las cariópsides. Este es un hallazgo importante, ya que, en el maíz, estos parámetros son muy sensibles a la densidad de siembra, y es más probable que disminuyan cuando la población de plantas por unidad de área aumenta (Bavec & Bavec, 2002). Por lo tanto, se sugiere que, en relación con el rendimiento del maíz, podría haber una interacción positiva entre el ATM y diferentes densidades de cultivos.

Adicionalmente, los diferentes patrones en la composición de elementos en frutos del ají Tabasco indican que el ATM mejora la absorción de varios de estos, en particular N y Zn. Aunque no se realizó un análisis de capsaicina, la concentración mayor de nitrógeno podría indicar un mayor contenido de alcaloide (capsaicina) o proteínas. En el ají, la captación de cationes (K, Ca, Mg y Na) y su concentración en brotes y raíces se ve afectada por la fuente de nitrógeno y los niveles de salinidad del sustrato (Huez-López, Ulery, Samani, Picchioni, & Flynn, 2011). En el presente estudio se reporta que los porcentajes de Ca y Mg fueron siempre mayores en las plantas tratadas, y que el Na disminuyó en más del 20 %, sin ninguna adición de fertilizantes. Estos resultados son contrarios a los reportados por Maheshwari y Grewal (2009), quienes encontraron una reducción de Ca y Mg, y un aumento de Na en las vainas de guisantes, usando el mismo dispositivo magnético con agua potable. En cualquier caso, los hallazgos de esta investigación sugieren que hay una mayor absorción de cationes divalentes, como Ca, Mg y Zn (que tienen una movilidad menor que los monovalentes), a expensas del Na; esto explica por qué la saturación de K fue menor, aunque su concentración no se redujo.

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Mediciones de intercambio de gases

En las tres especies evaluadas, la tasa de fotosíntesis (A) exhibió un comportamiento incremental con el riego con ATM. Este efecto fue significativo en las plantas de maíz ICA V-305, y solo un poco mayor en el rábano rojo Crimson Giant y el ají Tabasco. Este aumento en la tasa de fotosíntesis se asoció con una mayor transpiración, particularmente en plantas de maíz ICA V-305 y ají Tabasco. De manera concomitante con estos efectos, la conductancia estomática sufrió un aumento en todas las especies en tratamiento con ATM, aunque esta respuesta no fue muy significativa. A pesar del aumento del H_2O liberado por las hojas, en las tres especies analizadas la eficiencia en el uso del agua no experimentó ninguna variación significativa en las plantas tratadas, en comparación con los controles (tabla 3).

Tabla 3. Parámetros de fluorescencia de clorofila por tratamiento en ají Tabasco, rábano rojo Crimson Giant y maíz ICA V-305

Especie	Tratamiento	Parámetros			
		A ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$)	Gs ($mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$)	E ($mmol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$)	EUA ($\mu mol\ CO_2\ mmol\ H_2O^{-1}$)
Ají Tabasco	Control	11,83 ± 0,494	0,308 ± 0,062	3,92 ± 0,123	2,90 ± 0,078
	ATM	12,21 ± 0,466	0,311 ± 0,059	4,11 ± 0,116	2,90 ± 0,073
Rábano	Control	11,79 ± 0,429	1,570 ± 0,502	3,41 ± 0,087	3,47 ± 0,101
	ATM	12,29 ± 0,517	1,600 ± 0,014	3,36 ± 0,067	3,63 ± 0,146
Maíz	Control	25,00** ± 0,019	1,600 ± 0,238	13,70** ± 0,366	1,84 ± 0,080
	ATM	31,30** ± 0,269	2,140 ± 0,289	14,80** ± 0,370	2,03 ± 0,111
Parámetros por tratamiento		0,415	0,575	0,523	0,143
Parámetros por especie		0,000**	0,000**	0,000**	0,000**

** $p < 0,05$. ATM: agua tratada magnéticamente; A: tasa fotosintética; Gs: conductancia estomática; E: transpiración; EUA: eficiencia en el uso del agua. Todos los valores son medias de 38 plantas de ají Tabasco y de rábano, y 21 de maíz.
Fuente: Elaboración propia

El aumento en la acumulación de biomasa en plantas en tratamiento con ATM podría ser consecuencia de una mayor absorción de CO_2, sobre todo en las de maíz ICA V-05. Dado que este parámetro está fuertemente correlacionado con la conductancia estomática y la transpiración, el incremento de la tasa fotosintética se atribuye a la mayor apertura estomática que se observó en esta especie. Sin embargo, la comprensión de la manera en la que el ATM provoca este efecto se basa en la interacción física entre el agua y el sistema estomático. Varios autores han informado que el ATM tiene una mayor tasa de evaporación (Guo et al., 2012; Szcześ, Chibowski, Hołysz, & Rafalski, 2011). No obstante, considerando que en las plantas de maíz ICA V-305 sometidas al ATM en este estudio también se observó una mayor transpiración de agua a vapor, se sugiere que esta fuerza de evaporación desencadena una apertura

estomática más amplia, que a su vez conduce a una mayor entrada de CO_2. Esto podría explicar por qué la eficiencia del uso del agua no disminuyó con este tratamiento y, siempre que sea concomitante con una mayor transpiración, habrá una tasa fotosintética más alta. Aun así, no se puede ignorar la posibilidad de que este tratamiento incremente la velocidad del agotamiento del agua en el suelo. La falta de respuesta al ATM de los parámetros de intercambio de gases en las plantas de rábano rojo Crimson Giant explica por qué el rendimiento de biomasa por planta no se vio afectado.

Conclusiones

Los efectos del riego con ATM en el ají Tabasco, el rábano rojo Crimson Giant y el maíz amarillo ICA V-305 no fueron consistentes entre las tres especies en lo que se refiere a la acumulación de biomasa y los parámetros fisiológicos evaluados. Con respecto a la fluorescencia de clorofila, no se observaron efectos causados por el ATM, lo que tiene dos interpretaciones. La primera es que este tratamiento no es una fuente de estrés *per se*, que pueda notarse en algún cambio en el rendimiento de fluorescencia; y la segunda, que los cambios físicos intrínsecos del ATM no producen ninguna interacción particular a nivel molecular con el complejo de oxidación del agua en el PSII, lo cual era una posible hipótesis. Sin embargo, el hecho de que en frutos de ají Tabasco y en mazorcas de maíz ICA V-305 se haya obtenido una mayor biomasa indica que una tasa de fotosíntesis más alta en las plantas de maíz y una mayor área foliar en el ají Tabasco podrían haber contribuido respectivamente a esta respuesta. A pesar de que se dio un aumento en la transpiración, la eficiencia en el uso del agua no disminuyó, debido a una mayor asimilación de CO_2. La falta de efectos significativos del ATM en el rábano rojo Crimson Giant demuestra que no todas las especies reaccionan a este tratamiento de la misma manera. No obstante, la respuesta positiva del ají Tabasco en relación con la absorción de nutrientes y el rendimiento de frutos permite proponer el riego con ATM como una técnica sencilla y de fácil implementación para mejorar su cultivo.

Descargos de responsabilidad

Este trabajo fue posible gracias a la financiación por parte del proyecto de regalías para ciencia, tecnología e innovación (CTeI) "Implementación de un sistema agroindustrial rural competitivo en una biorregión del Valle del Cauca". Los autores manifiestan no poseer ningún vínculo contractual, familiar o económico con Omni Enviro Water Systems.

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Referencias

Abou El-Yazied, A., El-Gizawy, A. M., Khalf, S. M., El-Satar, A., & Shalaby, O. A. (2012). Effect of magnetic field treatments for seeds and irrigation water as well as N, P and K levels on productivity of tomato plants. *Journal of Applied Sciences Research, 8*(4), 2088-2099. Recuperado de http://www.aensiweb.com/old/jasr/jasr/2012/2088-2099.pdf.

Aly, M. A., Thanaa, M. E., Osman, S. M., & Abdelhamed, A. A. (2015). Effect of magnetic irrigation water and some anti-salinity substances on the growth and production of Valencia orange. *Middle East Journal of Agriculture Research, 4*(1), 88-98. Recuperado de http://www.curresweb.com/mejar/mejar/2015/88-98.pdf.

Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology, 59*, 89-113. doi:10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.

Bavec, F. & Bavec, M. (2002). Effects of plant population on leaf area index, cob characteristics and grain yield of early maturing maize cultivars (FAO 100-400). *European Journal of Agronomy, 16*(2), 151-159. doi:10.1016/S1161-0301(01)00126-5.

Cai, R., Yang, H., He, J., & Zhu, W. (2009). The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *Journal of Molecular Structure, 938*(1-3), 15-19. doi:10.1016/j.molstruc.2009.08.037.

Chang, K. T. & Weng, C. I. (2006). The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *Journal of Applied Physics, 100*(4), 1-6. doi:10.1063/1.2335971.

Dai, Y., Shen, Z., Liu, Y., Wang, L., Hannaway, D., & Lu, H. (2009). Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg. *Environmental and Experimental Botany, 65*(2-3), 177-182. doi:10.1016/j.envexpbot.2008.12.008.

Del Amor, F. (2006). Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of sweet pepper plants as affected by the cultivation method. *Annals of Applied Biology, 148*(2), 133-139. doi:10.1111/j.1744-7348.2006.00048.x.

El-Sayed, H. & El-Sayed, A. (2014). Impact of magnetic water irrigation for improve the growth, chemical composition and yield production of broad bean (*Vicia faba* L.) plant. *American Journal of Experimental Agriculture, 4*(4), 476-496. Recuperado de http://www.sciencedomain.org/abstract/2942.

Ferrari, F., Almeida, L., Klar, A., Ferreira da Silva, J., Pires, C., & Ludwig, R. (2015). Response of lettuce crop to magnetically treated irrigation water and different irrigation depths. *African Journal of Agricultural Research, 10*(22), 2300-2308. Recuperado de http://www.academicjournals.org/article/article1433520416_Putti%20et%20al.pdf.

Graber, E. R., Meller-Harel, Y., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., Rav-David, D., ... Elad, Y. (2010). Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil, 337*(1), 481-496. doi:10.1007/s11104-010-0544-6.

Grewal, H. S. & Maheshwari, B. L. (2011). Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. *Bioelectromagnetics, 32*(1), 58-65. doi:10.1002/bem.20615.

Guo, Y. Z., Yin, D. C., Cao, H. L., Shi, J. Y., Zhang, C. Y., Liu, Y. M., ... Shang, P. (2012). Evaporation rate of water as a function of a magnetic field and field gradient. *International Journal of Molecular Sciences, 13*(12), 16916-16928. doi:10.3390/ijms131216916.

Hager, M., Hermann, M., Biehler, K., Krieger-Liszkay, A., & Bock, R. (2002). Lack of the small plastid-encoded PsbJ polypeptide results in a defective water-splitting apparatus of photosystem II, reduced photosystem I levels, and hypersensitivity to light. *Journal of Biological Chemistry, 277*(16), 14031-14039. doi:10.1074/jbc.M112053200.

Hozayn, M., Abd El Monem, A. A., Abdelraouf, R. E., & Abdalla, M. (2013). Do magnetic water affect water efficiency, quality and yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plant under arid regions conditions? *Journal of Agronomy, 12*(1), 1-10. doi:10.3923/ja.2013.1.10.

Huez-López, M. A., Ulery, A. L., Samani, Z., Picchioni, G., & Flynn R. P. (2011). Response of chile pepper (*Capsicum annuum* L.) to salt stress and organic and inorganic nitrogen sources: III. Ion uptake and translocation. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 14*(3), 765-776. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93921493009.

Kang, J. G. & Van Iersel, M. W. (2004). Nutrient solution concentration affects shoot: root ratio, leaf area ratio, and growth of subirrigated salvia (*Salvia splendens*). *HortScience, 39*(1), 49-54. Recuperado de http://hortsci.ashspublications.org/content/39/1/49.full.pdf+html.

Khoshravesh, M., Mostafazadeh-Fard, B., Mousavi, S. F., & Kiani, A. R. (2011). Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation. *Soil Use and Management, 27*(4), 515-522. doi:10.1111/j.1475-2743.2011.00358.x.

Maheshwari, B. L. & Grewal, H. S. (2009). Magnetic treatment of irrigation water: its effects on vegetable crop yield and water productivity. *Agricultural Water Management, 96*(8), 1229-1236. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.016.

Mahmood, S. & Usman, M. (2014). Consequences of magnetized water application on maize seed emergence in sand culture. *Journal of Agricultural Science and Technology, 16(*1), 47-55. Recuperado de http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.837.9646&rep=rep1&type=pdf.

Moussa, H. R. (2011). The impact of magnetic water application for improving common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production. *New York Science Journal, 4*(6), 15-20.

Noran, R., Shani, U., & Lin, I. (1996). The effect of irrigation with magnetically treated water on the translocation of minerals in the soil. *Magnetic and Electrical Separation, 7*(2), 109-122. Recuperado de https://www.hindawi.com/journals/psse/1996/046596/abs/.

Otsuka, I. & Ozeki, S. (2006). Does magnetic treatment of water change its properties? *The Journal of Physical Chemistry B, 110*(4), 1509-1512. doi:10.1021/jp056198x.

Pang, X. F. & Deng, B. (2008). Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 51*(11), 1621-1632. doi:10.1007/s11433-008-0182-7.

Pfündel, E. (1998). Estimating the contribution of photosystem 1 to total leaf chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis Research, 56*(2), 185-195. doi:10.1023/A:1006032804606.

Smith, S., McLeod, B. R., Liboff, A. R., & Cooksey, K. (1987). Calcium cyclotron resonance and diatom motility. *Bioelectromagnetics, 8*(3), 215-227. doi:10.1002/bem.2250080302.

Szcześ, A., Chibowski, E., Hołysz, L., & Rafalski, P. (2011). Effects of static magnetic field on water at kinetic condition. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 50(*1), 124-127. doi:10.1016/j.cep.2010.12.005.

2018 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria