

FÓSFORO E FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NO  
CRESCIMENTO E NA PRODUÇÃO DE CAPSAICINOIDES EM  
PIMENTA (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*)

**JOSÉ ARMANDO PIRES PEREIRA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES  
OUTUBRO – 2015

FÓSFORO E FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NO  
CRESCIMENTO E NA PRODUÇÃO DE CAPSAICINOIDES EM  
PIMENTA (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*)

**JOSÉ ARMANDO PIRES PEREIRA**

Tese apresentada ao Centro de Ciências e  
Tecnologias Agropecuárias da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Ivo José Curcino Vieira

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
OUTUBRO – 2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA / UENF** 210/2015

Pereira, José Armando Pires

Fósforo e fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e na produção de capsaicinoides em pimenta (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*) / José Armando Pires Pereira. – 2015.

115 f. : il.

Orientador: Ivo José Curcino Vieira

Tese (Doutorado – Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2015.

Bibliografia: f. 81 – 89.

1. FMA 2. Nutrição mineral de plantas 3. Qualidade 4. Capsaicina 5. Cromatografia I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD – 635.643

FÓSFORO E FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES NO  
CRESCIMENTO E NA PRODUÇÃO DE CAPSAICINOIDES EM  
PIMENTA (*Capsicum annum* L. var. *annuum*)

**JOSÉ ARMANDO PIRES PEREIRA**

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Aprovada em 29 de outubro de 2015.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Marta Simone Mendonça Freitas (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

---

Dr<sup>a</sup>. Mírian Peixoto Soares da Silva (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

---

Prof<sup>a</sup>. Késsia Barreto Lima (D.Sc., Produção Vegetal) – FAETEC

---

Prof. Ivo José Curcino Vieira (D.Sc., Química) – UENF  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

A Deus;

À minha família por todo apoio;

A Fabiola pelo companheirismo;

Aos professores Ivo e Marta pela orientação e pelo exemplo de profissionalismo;

À professora Rosana pela disponibilização do acesso UENF 1381;

Aos técnicos José Accacio e Andréia Riter pela dedicação;

A todos os colegas da UENF, em especial a Thaisa e Lais pela prontificação;

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pela oportunidade de realização do curso;

Aos órgãos de fomento FAPERJ, CNPq e CAPES pelas verbas de subvenção concedidas.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. <i>Capsicum</i> : aspectos gerais .....	4
2.2. Capsaicinoides .....	5
2.3. Fungos micorrízicos arbusculares .....	8
2.4. Fungos micorrízicos arbusculares e fósforo .....	9
3. TRABALHOS .....	11
3.1. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on <i>Capsicum</i> spp. ....	11
3.2. Efeitos do fósforo e fungos micorrízicos arbusculares sobre o crescimento e a produção de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> .....	34
3.3. Efeitos do fósforo e dos fungos micorrízicos arbusculares sobre os atributos de qualidade de frutos de pimenteira ( <i>Capsicum annuum</i> L. var.	

<i>annuum)</i> .....	54
4. RESUMO E CONCLUSÕES .....	78
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81
6. APÊNDICES .....	90

## RESUMO

PEREIRA, José Armando Pires, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Outubro de 2015. Fósforo e fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e na produção de capsaicinoides em pimenta (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*). Orientador: Prof. Ivo José Curcino Vieira. Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Marta Simone Mendonça Freitas.

Os benefícios da inoculação micorrízica sobre o crescimento, a produtividade e a nutrição de plantas são bem documentados. No entanto, o uso de micorrizas no cultivo de pimenta e pimentão (*Capsicum* spp.) ainda é pouco explorado comparado a outras culturas de importância econômica. Os objetivos desse trabalho foram (i) avaliar os efeitos da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e doses de fósforo (P) sobre os parâmetros de crescimento e produção de frutos em pimenteira; (ii) verificar o efeito das doses de P sobre a colonização micorrízica; e (iii) avaliar os efeitos da inoculação com FMA e doses de P sobre a composição mineral e atributos de qualidade de frutos de pimenteira (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*). Foi realizado um experimento em casa de vegetação na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizada em Campos dos Goytacazes, RJ, entre os meses de setembro/2014 e fevereiro/2015. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos



casualizados, em arranjo fatorial 3x5 constituído por três tratamentos de inoculação (com *Rhizophagus clarus*, *Claroideoglossum etunicatum* e controle não inoculado) x 5 doses de fósforo (0, 25, 50, 75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>), com quatro repetições e dois vasos por unidade experimental contendo uma planta, totalizando 120 vasos. Foram determinados os parâmetros de crescimento, incluindo altura da planta, diâmetro do caule, área foliar, bem como massa fresca e seca da parte aérea e raiz. O número de frutos por planta foi contabilizado e a massa fresca dos frutos também foi determinada. Além disso, a porcentagem de colonização micorrízica foi verificada. A qualidade do fruto foi determinada pela medição do tamanho (comprimento e largura), teor de sólidos solúveis totais (SST), acidez total titulável (ATT), teor de ácido ascórbico (AA) e teores de capsaicinoides (CAP e DHC). Os frutos secos e moídos foram utilizados na determinação da composição mineral (N, P, K, Mg, Ca, S, Fe, Cu, Zn, Mn e B). As plantas inoculadas obtiveram incremento na altura (434%), diâmetro do caule (242%), área foliar (6017%), massa fresca e seca da folha (5625% e 6866%), massa fresca e seca do caule (3943% e 6014%), massa fresca e seca da raiz (4217% e 7133%), massa fresca do fruto (16%) e número de frutos/planta (149%), comparado às plantas não inoculadas. As melhores respostas foram obtidas em baixas concentrações de P no solo. As pimenteiras apresentaram uma boa dependência micorrízica. No entanto, a colonização radicular tendeu a diminuir com o aumento da disponibilidade de P no solo. Em relação à qualidade dos frutos, as plantas inoculadas mostraram um aumento nos teores de N (10%), P (17%), K (12%), Mg (33%), B (79%) e Cu (145%), bem como incremento no tamanho (18%) e teores de CAP (73%) e DHC (30%), em relação às plantas sem fungo. Por outro lado, os frutos de plantas não inoculadas apresentaram melhores teores de SST, ATT e AA. De maneira geral, a inoculação micorrízica e a aplicação de baixas doses de P é uma alternativa capaz de proporcionar um maior crescimento das plantas e produção de pimentas, bem como uma melhor condição nutricional e maior pungência dos frutos.

Palavras-chave: FMA, nutrição mineral de plantas, qualidade, capsaicina, cromatografia.

## ABSTRACT

PEREIRA, José Armando Pires, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. October, 2015. Phosphorus and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of capsaicinoids in pepper (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*). Advisor: Prof. Ivo José Curcino Viera. Co-advisor: Prof<sup>a</sup>. Marta Simone Mendonça Freitas.

The benefits of mycorrhizal inoculation on growth, yield and nutrition of plants are well-documented. However, mycorrhiza use in pepper and sweet pepper crops (*Capsicum* spp.) is still little exploited compared to other crops of economic importance. The objectives of this study were (i) to evaluate the effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and phosphorus (P) doses on growth parameters and fruit production in pepper plants; (ii) to evaluate the effect of P doses on mycorrhizal colonization; and (iii) to evaluate the effects of inoculation with AMF and P doses on mineral composition and quality attributes of fruit pepper (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*). An experiment was conducted in a greenhouse at the Universidade Estadual do Norte Fluminense, located in Campos, RJ, between the months of September/2014 and February/2015. The experiment was conducted in a randomized block design, in factorial arrangement 3x5 consisting of three inoculation treatments (with *Rhizophagus clarus*,

*Claroideoglossum etunicatum* and uninoculated control) x 5 phosphorus rates (0, 25, 50, 75 and 100 mg/dm<sup>3</sup>), with four replications and two plants per experimental unit containing a plant totaling 120 pots. The growth parameters including plant height, stem diameter, leaf area and fresh and dry weight of shoot and root were determined. The number of fruits per plant was counted and the fresh weight of fruits was also determined. Furthermore, the percentage of root colonization was observed. The fruit quality was determined by measuring the size (length and width), total soluble solids (TSS), titratable acidity (TTA), ascorbic acid (AA) and capsaicinoids content (CAP and DHC). The dried and ground fruits were used for determining the mineral composition (N, P, K, Mg, Ca, S, Fe, Cu, Zn, Mn and B). The inoculated plants obtained increase in height (434%), stem diameter (242%), leaf area (6017%), leaf fresh and dry weight (5625% and 6866%), stem fresh and dry weight (3943% and 6014%), root fresh and dry weight (4217% and 7133%), fruit fresh weight (16%) and number of fruit per plant (149%) compared to non-inoculated plants. The best responses were obtained at low concentrations of P in the soil. The pepper plants had a good mycorrhizal dependency. However, root colonization tended to decrease with increasing phosphorus availability in soil. Regarding the quality of the fruit, the inoculated plants showed an increase in N (10%), P (17%), K (12%), Mg (33%), B (79%) and Cu (145% ) contents and increase in size (18%) and CAP (73%) and DHC (30%) contents compared to plants without fungus. On the other hand, non-inoculated plants showed better fruit content of TSS, TTA and AA. In general, the mycorrhizal inoculation and application of low doses of P is an alternative to provide a greater growth of the plants and production of peppers, as well as improved nutritional status and pungency of fruits.

Keywords: AMF, mineral nutrition of plants, quality, capsaicin, chromatography.

## 1. INTRODUÇÃO

As pimenteiras (*Capsicum* spp.) representam uma das mais importantes culturas comerciais para diversos países ao redor do mundo. A produção global anual é de 31,13 milhões de toneladas, a qual a China responde por 51%, seguido por México (7,4%) e Turquia (6,9%) (FAOSTAT, 2013).

O gênero *Capsicum* pertence à família das solanáceas e compreende 36 taxa, incluindo espécies e variedades botânicas, todas nativas das regiões tropicais das Américas (Pozzobon et al., 2006). Cinco espécies (*C. annuum*, *C. frutescens*, *C. baccatum*, *C. pubescens* e *C. chinense*) são consideradas domesticadas, apresentando variada distribuição por toda América tropical (Loaiza-Figueroa et al., 1989; Perry, 2012). O gênero apresenta ampla diversidade, com variações em cor, tamanho, forma, pungência, composição nutricional e uso (Bosland e Votava, 2012). Espécies com frutos pungentes são geralmente usadas como condimento, seja fresco, seco ou extrato. Por outro lado, espécies com frutos não pungentes, comumente conhecidos como pimenta doce, são amplamente usadas como hortaliça (Pickersgill, 1991).

A pungência é um importante atributo de qualidade em pimentas e sua expressão está associada com a presença, em maior ou menor proporção, de alcaloides conhecidos como capsaicinoides (Appendino, 2008). Dentre estes, a capsaicina (CAP) e seu dihidro derivado, dihidrocapsaicina (DHC), constituem 80% do total de capsaicinoides na maioria das variedades pungentes (Kosuge e

Furuta, 1970). Os teores de CAP são normalmente maiores do que os de DHC (Antonious et al., 2009) e esses são considerados o principal parâmetro para determinar a qualidade comercial de um produto ou derivados (Frery e Frery, 2012). Os capsaicinoides estão localizados primariamente no tecido da placenta adjacente às sementes, sendo eventualmente translocados para outras partes da planta (Suzuki e Iwai, 1984). Suas concentrações dependem do genótipo, da maturidade do fruto e das condições de cultivo (Zewdie e Bosland, 2000).

Micorriza é definida como uma associação simbiótica entre certos tipos de fungos do solo e raízes de plantas. Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são de grande importância agrônômica. Eles são capazes de formar micorrizas com mais de 80% das espécies de plantas, incluindo a maioria das espécies cultivadas (Strack et al., 2003; Gosling et al., 2006). As relações micorrízicas formadas por FMA beneficiam seus hospedeiros pelo aumento da absorção de nutrientes minerais do solo, principalmente fósforo (P), bem como nitrogênio (N), potássio (K) e micronutrientes (Linderman, 1992; Perner et al., 2007). Além disso, FMA melhoram as relações hídricas, aumentam a resistência ou tolerância a estresses bióticos e abióticos e melhoram a estrutura do solo (Smith e Read, 2008).

Em solos com baixa disponibilidade de P, a aplicação de FMA representa uma importante alternativa para o aumento do crescimento das plantas. No entanto, elevadas quantidades desse nutriente podem inibir a colonização (Javot et al., 2007). Isso parece ser um fenômeno geral, embora os mecanismos regulatórios não tenham sido completamente elucidados (Smith e Read, 2008).

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse nas associações entre FMA e *Capsicum* spp. relacionado a absorção de P e água (Estrada-Luna e Davies, 2003; Sharif e Claassen, 2011), crescimento, produção e condição nutricional (Boonlue et al., 2012; Franco et al., 2013), fisiologia (Estrada-Luna et al., 2000; Demir, 2004) e tolerância a estresses bióticos (Ozgonen e Erkilic 2007; Goicoechea et al., 2010; Oyetunji e Salami 2011) e abióticos (Mena-Violante et al., 2006; Elahi et al., 2012; Beltrano et al., 2013).

Entretanto, os efeitos dos FMA sobre os atributos dos frutos de *Capsicum* spp. não têm sido amplamente reportados, assim como a influência da colonização micorrízica sobre o aumento nos teores de capsaicinoides em pimenta. A aplicação de FMA no cultivo de *Capsicum* spp. é de grande interesse

agronômico, pois promove o desenvolvimento das plantas, ciclagem de nutrientes, armazenamento de carbono, resistência a estresses e doenças, e reduz o uso de fertilizantes (Pereira et al., 2015).

Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivos: (i) avaliar os efeitos da inoculação com FMA e doses de P sobre os parâmetros de crescimento e produção de frutos de pimenteira (*C. annuum* L. var. *annuum*); (ii) verificar o efeito das doses de P sobre a colonização micorrízica; (iii) avaliar os efeitos da inoculação com FMA e doses de P sobre os parâmetros de qualidade do fruto de pimenteira (*C. annuum* L. var. *annuum*).

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. *Capsicum*: aspectos gerais

Pimenta é a denominação comum dada ao fruto de plantas pertencentes ao gênero *Capsicum* que por sua vez, integram a família das solanáceas. O gênero compreende 36 taxa, incluindo espécies e algumas variedades botânicas, todas nativas das regiões tropicais das Américas (Pozzobon et al., 2006). O gênero apresenta grande diversidade em cor, tamanho, forma, pungência, composição nutricional e uso (Bosland e Votava, 2012). A indústria de alimentos faz amplo uso de *Capsicum*, na qual os frutos têm aplicações como condimento seja na forma moída (pó) ou extrato concentrado (oleoresina) (Korel et al., 2002).

A cor de frutos imaturos varia do lilás ao roxo escuro, próximo a preto, passando por tons de verde e amarelo. Frutos maduros podem apresentar tons de amarelo, laranja e vermelho, podendo alcançar o marrom (Stommel e Albrecht, 2012). O tamanho varia de 1 cm de comprimento por 0,4 cm de largura (p. ex. pimenta malagueta), podendo chegar a 20 cm x 12 cm, encontrados nos populares pimentões. Assumem formatos igualmente variados, podendo ser alongados, arredondados, triangulares, campanulados e retangulares (Carvalho, et al., 2006).

A pungência é um parâmetro que depende da quantidade de capsaicinoides – substâncias alcaloides encontradas naturalmente em pimentas

do gênero *Capsicum* que conferem ardor característico a estes frutos – em uma dada variedade e pode ser avaliada pela escala de Unidade de Calor Scoville (SHU – Scoville Heat Units), por meio de aparelhos específicos (Othman et al., 2011). Há cinco níveis de pungência assim definidos pela escala SHU: não pungente (0-700 SHU), levemente pungente (700-3000 SHU), moderadamente pungente (3000-25000 SHU), muito pungente (25000-70000 SHU) e extremamente pungente (>80000 SHU) (Weiss, 2002). Atualmente, no entanto, este método organoléptico tem sido amplamente substituído por métodos cromatográficos, principalmente Cromatografia Líquida de Alta Eficiência, os quais são considerados mais confiáveis e precisos (Nwokem et al., 2011).

## 2.2. Capsaicinoides

A pungência é um atributo importante da qualidade das pimentas, e sua expressão está associada à presença, em maior ou menor proporção, de alcaloides conhecidos como capsaicinoides (CAPS) (Appendino, 2008). Tais compostos ocorrem como uma complexa mistura de análogos, cujo perfil está sob controle epigênico e genético. Todavia, não são bons indicadores quimiotaxonômicos para espécies de *Capsicum*, visto a sua inconsistente distribuição dentro de uma única espécie. Porém, é possível identificar grupos em cultivares de diferentes espécies, caracterizados por capsaicinoides em comum (Zewdie e Bosland, 2001).

O acúmulo de CAPS em frutos de *Capsicum* não depende apenas de fatores genéticos, mas também do estágio de desenvolvimento e condições de crescimento da planta (temperatura, luz, umidade do solo e níveis de adubação). Em geral, temperaturas elevadas e condições mais secas promovem a síntese de CAPS, o que explica a maior pungência de pimentas crescidas em áreas tropicais comparadas àquelas cultivadas em climas mais temperados ou úmidos (Sung et al., 2005).

Mais de 20 diferentes CAPS têm sido identificados em pimentas pungentes (Schweiggert et al., 2006). Os maiores constituintes desta diversidade de capsaicinoides são a capsaicina (CAP) (8-metil-N-vanilil-6-nonenamida) e seu dihidro derivado, a dihidrocapsaicina (DHC) (N-(4-hidroxi-3-metoxibenzil)-8-metilnonamida), ambos constituindo mais de 80% do total destes compostos na



maioria das variedades pungentes (Kosuge e Furuta, 1970). Outras formas, isto é, nordihidrocapsaicina, nonivamida, homocapsaicina I, homocapsaicina II, homodihidrocapsaicina I e homodihidrocapsaicina II (Figura 1) estão geralmente presentes em traços (Kozukue et al., 2005). Os teores de CAP são geralmente maiores do que de DHC (Antonious et al., 2009) e estes são considerados o principal parâmetro para determinar a qualidade comercial de um fruto ou produto derivado (Frary e Frary, 2012). Além disso, o teor total de capsaicinoides em um dado fruto está correlacionado à sua pungência (medida em Unidades de Calor Scoville – SHU) (Antonious et al., 2009).

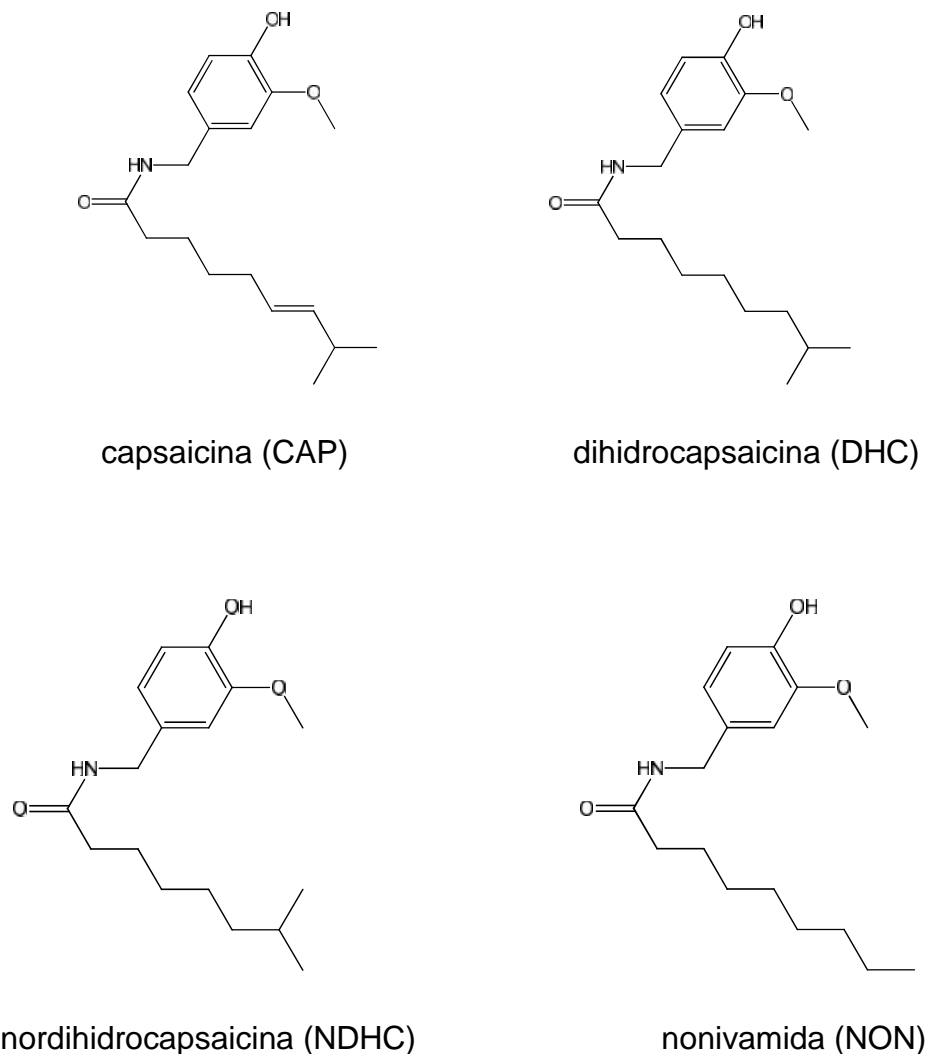
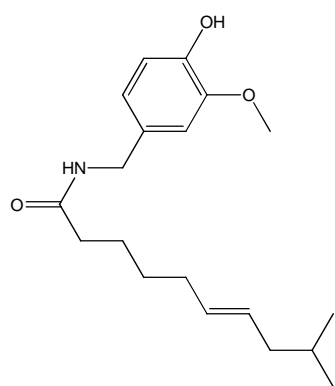
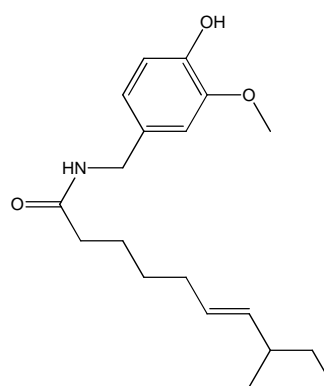


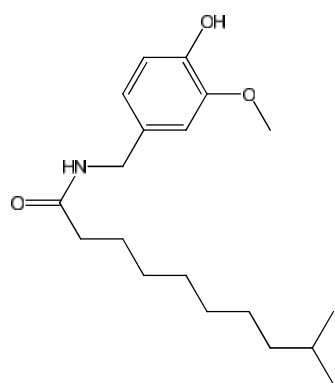
Figura1. Estruturas dos capsaicinoides comuns em pimentas (Kozukue et al., 2005).



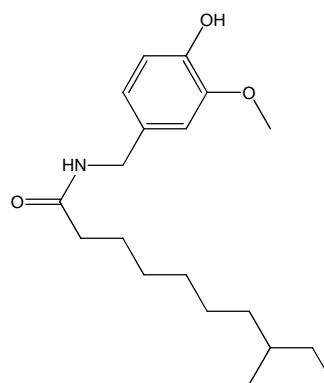
homocapsaicina I (HC-I)



homocapsaicina II (HC-II)



homodihidrocapsaicina I (HD-I)



homodihidrocapsaicina II (HD-II)

Figura1, Cont.

Em pimentas consideradas pungentes, mais de 85% dos CAPS estão localizados na placenta (único sítio de biossíntese) enquanto cerca de 6% é encontrado no pericarpo e 8% nas sementes. Além disso, a distribuição destes compostos não é uniforme no fruto como um todo, havendo um gradiente de concentração que é maior nas porções basal e apical (Estrada et al., 2002; Kozukue et al., 2005).

Observa-se uma tendência do uso de *Capsicum* na prevenção de doenças e promoção de uma vida saudável. Pesquisas recentes acerca das propriedades medicinais de pimentas mostram que os capsaicinoides, exercem múltiplos efeitos farmacológicos e fisiológicos incluindo atividades analgésicas (Knotkova et al., 2008; Wong e Gavva, 2009), anti-inflamatórias (Alves, 2006;

López et al., 2012), antioxidantes (Silva et al., 2009; Costa et al., 2010) e no auxílio do combate à obesidade (Leung, 2008; Joo et al., 2010) e câncer (Oh et al., 2008; Thoennissen et al., 2010; Yang et al., 2010). Além disso, a capsaicina tem sido empregada como princípio ativo em *sprays* defensivos (Reilly et al., 2001).

### 2.3. Fungos micorrízicos arbusculares

Micorriza é definida como uma associação entre fungos simbióticos do solo e das raízes de plantas. O tipo mais comum dentre essas associações é a estabelecida entre fungos do filo Glomeromycota, conhecidos como Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) (Schü ler et al., 2001). Dezoito gêneros de FMA têm sido reconhecidos baseados principalmente em características morfológicas de esporos assexuais. Estes gêneros (*Redeckra*, *Acaulospora*, *Pacispora*, *Diversispora*, *Scutellospora*, *Gigaspora*, *Dentiscutata*, *Cetraspora*, *Racocetra*, *Claroideoglopus*, *Glomus*, *Funneliformis*, *Septoglopus*, *Rhizophagus*, *Ambispora*, *Geosiphon*, *Archaeospora* e *Paraglopus*) incluem cerca de 230 espécies (Schü ler et al., 2001; Peterson et al., 2004; Redecker et al., 2013).

Estima-se que 80% das plantas vasculares têm a capacidade de se associarem a FMA. Registros fósseis das primeiras plantas vasculares, datados do Devoniano, mostram que associações micorrízicas arbusculares estavam presentes em raízes rudimentares, confirmando a presença desta associação mutualista a 400 milhões de anos ou mais (Taylor et al., 1995).

A relação entre plantas e FMA normalmente é descrita como mutuamente benéfica, uma vez que os fungos aumentam a absorção de nutrientes minerais do solo, principalmente nitrogênio (N) e fósforo (P), para seu hospedeiro, que em contrapartida fornece produtos do metabolismo carbônico ao fungo (Li et al., 2006; Smith e Read, 2008; Atul-Nayyar et al., 2009). Além disso, os FMA melhoram a relação planta-água e aumentam as defesas de seus hospedeiros contra fungos patogênicos, insetos herbívoros e nematoides (Smith e Read, 2008).

Embora exista alguma variação estrutural nesta categoria, a maioria dos FMA é caracterizada pela presença de hifas intrarradiculares (inter ou intracelulares), arbúsculos (hifas finamente ramificadas envolvidas na troca de

nutrientes), micélio extrarradicular (hifas que conectam a raiz ao solo) e esporos formados no micélio extrarradicular. Algumas espécies também formam estruturas intrarradiculares referidas como vesículas (porções alargadas da hifa que se enchem com lipídios), dando a este grupo seu nome original: fungos micorrízicos vesicular-arbusculares (Peterson et al., 2004).

O estabelecimento da simbiose envolve uma sequência de eventos morfogênicos representados por: germinação do esporo e crescimento pré-simbiótico do micélio, diferenciação e ramificação das hifas na presença de raízes hospedeiras, formação de apressório, colonização da raiz, desenvolvimento do arbúsculo, crescimento do micélio extrarradicular e produção de esporo (Giovannetti et al., 2010).

A colonização de raízes por FMA pode dar-se a partir de três fontes de inóculo no solo: esporos, fragmentos de raízes infectadas e hifas – coletivamente chamados de propágulos (Smith e Read, 2008). Os sinais moleculares que promovem a quebra da dormência dos esporos e ativam seu ciclo celular ainda são pouco conhecidos (Harrison, 2005), embora o estopim da germinação em gêneros e espécies de FMA tenha sido investigado sob diferentes condições ambientais (Giovannetti et al., 2010). De fato, os esporos de muitas espécies de FMA germinam sob adequadas condições físicas, químicas e microbiológicas (Giovannetti et al., 2010). Alguns estudos sugerem que moléculas sinalizadoras exsudadas pelas raízes da planta, como flavonoides (Harrison, 2005) e estrigolactonas (Akiyama et al., 2010), ou mesmo compostos voláteis como CO<sub>2</sub> (Bécard e Piché, 1989), podem atuar como estimulantes para o estabelecimento da simbiose através da germinação dos esporos e ramificação das hifas.

#### 2.4. Fungos micorrízicos arbusculares e fósforo

Os efeitos das micorrizas arbusculares sobre a absorção do P têm sido extensivamente estudados e comprovados por diversos pesquisadores. As possíveis explicações para o sucesso dos FMA na aquisição e subsequente melhoria da nutrição fosfatada por parte de seus hospedeiros é bem descrita por Smith e Read (2008). As hifas dos FMA são as principais responsáveis pelo papel da associação micorrízica sobre a nutrição fosfatada, já que elas absorvem o P da solução do solo e o translocam para as raízes em uma velocidade superior à

difusão deste elemento através do solo, sendo capazes de transpor as zonas de depleção de P que se formam em volta das raízes. Além disso, o menor diâmetro das hifas permite uma maior exploração do volume de solo (Smith e Read, 2008).

O fósforo é o mais importante nutriente inorgânico que afeta o desenvolvimento do FMA, regulando principalmente a taxa de crescimento fúngico intrarradicular. Normalmente, altas concentrações de P inibem a colonização das raízes, enquanto baixas concentrações favorecem a colonização intrarradicular (Kiriachek et al., 2009). Isso parece ser um fenômeno comum, embora os mecanismos regulatórios desse processo não tenham sido completamente elucidados (Smith e Read 2008).

Sharif e Claassen (2011) observaram que em baixa disponibilidade de P no solo, a associação com FMA aumentou significativamente a produção de *Capsicum annuum* L. e isso foi relacionado ao aumento da absorção de P na planta. Além disso, os resultados mostraram que as hifas são mais eficientes na absorção de P do que a superfície das raízes em solos com baixos níveis de P.

A absorção de P tem relação direta com o crescimento da planta, sendo que quando este atinge concentrações próximas da adequada, a colonização das raízes é inibida por mecanismos autorregulatórios da simbiose, tornando as micorrizas arbusculares desnecessárias e incompatíveis com as condições de excesso de nutrientes no solo (Javot et al. 2007). Uma hipótese de que a alta disponibilidade de P reduz a extensão da simbiose, é seu efeito negativo sobre a produção de estrigolactonas nas raízes (Bouwmeester et al., 2007; Yoneyama et al., 2007).

### 3. TRABALHOS

#### 3.1. EFFECTS OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON *Capsicum* spp.

## CROPS AND SOILS REVIEW

# Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on *Capsicum* spp.

J. A. P. PEREIRA<sup>1\*</sup>, I. J. C. VIEIRA<sup>2</sup>, M. S. M. FREITAS<sup>1</sup>, C. L. PRINS<sup>1</sup>, M. A. MARTINS<sup>1</sup> AND R. RODRIGUES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CCTA, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, UENF, Campos dos Goytacazes 28013-602, RJ, Brazil

<sup>2</sup> CCT, Centro de Ciência e Tecnologia, UENF, Campos dos Goytacazes 28013-602, RJ, Brazil

(Received 6 August 2014; revised 31 May 2015; accepted 1 July 2015)

### SUMMARY

The benefits of mycorrhizal inoculation on growth, yield and nutrition of plants are well documented. However, mycorrhiza use in pepper and sweet pepper crops (*Capsicum* spp.) is still rarely exploited compared to other crops of economic importance. The current paper reviews the main aspects of the association between arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and plants of pepper and sweet pepper. It includes topics about the effects of AM fungi on nutrition, growth and yield in *Capsicum* spp., paying particular attention to AM fungi–pathogen interactions, responses to some environmental stresses, as well as biochemical and physiological aspects of AM fungi–plant interaction in *Capsicum annuum* L.

### INTRODUCTION

Pepper and sweet pepper (*Capsicum* spp.) have global economic importance, being grown in 116 countries spread over all continents. The Asian continent covers 0.59 of the total area under cultivation in the world, with the main growing areas located in China (672 330 ha), Indonesia (237 520 ha) and South Korea (49 976 ha). Africa comes next with 0.19 of the planet's cultivated land (FAOSTAT 2010). The annual global production is 31.13 million t, of which China accounts for 0.51, followed by Mexico (0.074), Turkey (0.069) and Indonesia (0.055) (FAOSTAT 2013).

The *Capsicum* genus belongs to the Solanaceae family and comprises 36 taxa, including species and some botanical varieties, all of them native to tropical regions of the Americas (Pozzobon *et al.* 2006). Five species of pepper (*Capsicum annuum*, *Capsicum frutescens*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum pubescens* and *Capsicum chinense*) are considered domesticated, showing varied distribution throughout tropical America (Loaiza-Figueroa *et al.* 1989; Perry 2012). This genus shows great diversity in colour, size, shape, pungency and use of its fruits (Bosland 1992) which impart colour, aroma and flavour to various foods (Korel *et al.* 2002). In addition, the fruit is an

excellent source of vitamins A and C (Miean & Mohamed 2001), and possess medicinal properties (Knotkova *et al.* 2008; Leung 2008; Oh *et al.* 2008; Silva *et al.* 2009; Wong & Gavva 2009; Costa *et al.* 2010; Joo *et al.* 2010; Thoennissen *et al.* 2010; Yang *et al.* 2010; López *et al.* 2012).

Like other species of plants that are able to establish a symbiotic association with soil fungi, when the soil has low nutrient availability roots of *Capsicum* spp. typically form arbuscular mycorrhizae (Davies *et al.* 1992).

Mycorrhiza is defined as a non-pathogenic symbiotic association between certain types of soil fungi and plant roots. The arbuscular mycorrhizal (AM) fungi are of agronomic importance. They are capable of forming mycorrhizae with >0.80 of plant species, including most of the cultivated species (Strack *et al.* 2003; Gosling *et al.* 2006). The AM fungi fall within the Phylum Glomeromycota, represented by 18 genera recognized mainly by the morphological characteristics of asexual spores. These genera include *Redeckra*, *Acaulospora*, *Pacispora*, *Scutellospora*, *Gigaspora*, *Dentiscutata*, *Cetraspora*, *Racocetra*, *Claroideoglossum*, *Glomus*, *Funneliformis*, *Septoglossum*, *Rhizophagus*, *Sclerocystis*, *Ambispora*, *Geosiphon*, *Archaeospora* and *Paraglossum*, which currently comprise about 230 species (Schüßler *et al.* 2001; Peterson *et al.* 2004; Redecker *et al.* 2013). Intensive field research carried out in the Colombian Amazon

\* To whom all correspondence should be addressed. Email: jappwar@hotmail.com

(Cardona *et al.* 2008), Shandong Province, China (Chen *et al.* 2012) and West of Rajasthan, India (Vyas & Vyas 2012) showed a high diversity of AM fungi in rhizosphere of *Capsicum* spp. *Glomus* occurred most frequently among the genera, followed by *Acaulospora*, *Gigaspora* and *Scutellospora*.

Mycorrhizal relationships formed by AM fungi benefit their hosts by increasing the absorption of soil mineral nutrients, particularly phosphorus (P) as well as nitrogen (N), potassium (K) and micronutrients (Linderman 1992; Perner *et al.* 2007). In addition to these benefits, AM fungi improve plant–water relations, increase resistance or tolerance to biotic and abiotic stresses and improve soil structure (Smith & Read 2008).

The first to establish the benefits of AM fungi in plants of the genus *Capsicum* were Hirrel & Gerdemann (1980), who observed that bell pepper plants inoculated with AM fungi could be more tolerant to salt stress than non-inoculated plants. Two years later, Bagyaraj & Sreeramulu (1982) confirmed the benefits of pre-inoculation with AM fungi on height, dry weight and yield of hot peppers transplanted into the field.

In recent years, there has been a growing interest in the associations between AM fungi and *Capsicum* spp. related to P and water absorption (Estrada-Luna & Davies 2003; Sharif & Claassen 2011), growth, yield, nutritional status (Boonlue *et al.* 2012; Franco *et al.* 2013), physiology (Estrada-Luna *et al.* 2000; Demir 2004) and tolerance to biotic (Ozgonen & Erkilic 2007; Goicoechea *et al.* 2010; Oyetunji & Salami 2011) and abiotic stresses (Mena-Violante *et al.* 2006; Elahi *et al.* 2012; Beltrano *et al.* 2013). In view of this interest, a bibliographical search on the relationship between AM fungi and *Capsicum* spp. resulted in 60 published works involving 33 taxa of *Capsicum*, including crops and botanical varieties and the effects of mycorrhizal associations on these species (Table 1). Thus, the current review summarizes the effects of AM fungi on nutrition, growth and yield in *Capsicum* spp., paying particular attention to AM fungi–pathogen interactions, in response to some environmental stresses, as well as biochemical and physiological aspects of AM fungi–plant interactions in *C. annuum* L.

#### EFFECTS OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON NUTRITION, GROWTH AND YIELD IN *CAPSICUM* SPP.

The symbiotic association of roots with AM fungi is a widespread strategy by which plants facilitate the

acquisition of mineral elements from the soil. This association basically happens in two phases: extra-radical, in which hyphal contact with the root cortex of the host plant occurs; and intra-radical, with the development of intra-radical hyphae and specialized structures called arbuscules (finely branched hyphae involved in nutrient exchange) (Peterson *et al.* 2004; Smith & Read 2008; Giovannetti *et al.* 2010). Extra-radical mycelia continue to extend into the soil which encourages further exploration, transferring water and minerals back to the plant roots (Franken 2010).

In the mycorrhizal association, the fungus enhances the acquisition of soil mineral nutrients, particularly P and N, as well as K, sulphur (S), magnesium (Mg), copper (Cu), zinc (Zn) and iron (Fe) by the host plant, which in turn provides products from carbon metabolism to the fungus (Linderman 1992; Caris *et al.* 1998; Allen & Shachar-Hill 2009).

The effects of AM fungi on the absorption of P have been studied extensively and supported by several researchers. Possible explanations for the success of AM fungi on the acquisition and subsequent phosphate nutrition improvement in their hosts are well described by Smith & Read (2008). The AM hyphae absorb P from soil solution and transfer it to the roots at a speed higher than the diffusion of this element by the soil. Hyphae are able to transpose the P depletion regions that form around the roots. In addition, the smaller hyphal diameter allows greater exploration of the soil volume (Smith & Read 2008).

Several experiments have demonstrated the absorption, transport and transfer of P and N in various plant–AM fungi relations under different environmental conditions (Hattingh *et al.* 1973; Ames *et al.* 1983; George *et al.* 1992; Smith *et al.* 2000; Wang *et al.* 2002). Other studies have also confirmed the absorption of Zn (Bürkert & Robson 1994; Jansa *et al.* 2003), S (Rhodes & Gerdemann 1978; Allen & Shachar-Hill 2009) and Fe (Caris *et al.* 1998) via AM fungi. In addition, an increase in the absorption of Cu by mycorrhizal plants has often been observed (Li *et al.* 1991; Lee & George 2005).

In *Capsicum*, arbuscular mycorrhizae represent an alternative way to obtain improvements in growth and development. The main benefits of mycorrhizal inoculation in pepper and sweet pepper plants include improvement in seedling growth (Davies & Linderman 1991); economy in phosphate fertilization (Bagyaraj & Sreeramulu 1982); increased seedling survival and development (Estrada-Luna *et al.* 2000;



Table 1. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) and plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) on Capsicum spp.

Host species	AM fungi/PGPMs	Effect	Reference
<i>Capsicum annuum</i> L. cvar Jwala	<i>Glomus fasciculatus</i> , local isolate I <sub>4</sub> <sup>a</sup> , local isolate I <sub>6</sub> , local isolate I <sub>14</sub> ; <i>G. fasciculatum</i> , <i>Trichoderma viride</i> <sup>b</sup> , <i>Trichoderma harzianum</i> <sup>b</sup>	Enhancement of growth, development, yield and improvement in P and Zn content; Enhancement of growth and biomass	Bagyaraj & Sreeramulu 1982; Sarwade et al. 2011
<i>C. annuum</i> L. cvar Byadagi	<i>G. fasciculatum</i> <sup>a</sup> , <i>Glomus albidum</i> , <i>Glomus macrocarpum</i> , local isolate I <sub>14</sub> ; <i>G. fasciculatum</i> , <i>Gigaspora margarita</i> , <i>Acaulospora laevis</i> , <i>Sclerocystis dussii</i> , <i>G. macrocarpum</i> <sup>a</sup> ; <i>G. fasciculatum</i> , <i>G. macrocarpum</i> <sup>a</sup>	Enhancement of growth, development, yield and improvement in P and Zn content; Enhancement of growth and biomass, yield; improvement in P, Zn, Cu, Mn and Fe levels	Sreeramulu & Bagyaraj 1986; Sreenivasa 1992; Sreenivasa et al. 1993
<i>C. annuum</i> L.	Mixed ( <i>Acaulospora bireticulate</i> , <i>Acaulospora spinosa</i> , <i>Gigaspora decipiens</i> , <i>Glomus deserticola</i> , <i>Scutellospora percisa</i> ); <i>Glomus intraradices</i> ; <i>G. intraradices</i> <sup>a</sup> , <i>Glomus</i> 'AZ 112'; <i>G. intraradices</i> , <i>G. margarita</i> ; <i>G. macrocarpum</i> ; Mixed ( <i>Acaulospora longula</i> , <i>Glomus clarum</i> , <i>G. intraradices</i> ), <i>Methylobacterium oryzae</i> <sup>b</sup> ; Commercial product containing three species of <i>Glomus</i> ; <i>Glomus mosseae</i> ; <i>G. intraradices</i> <sup>a</sup> , <i>Azotobacter</i> spp. <sup>b</sup>	Enhancement of growth, biomass and improvement in P level; Enhancement of growth, biomass and improvement in N and P levels; Enhancement of biomass and improvement in P levels; Enhancement of biomass; Enhancement of biomass, yield and improvement in P level; Enhancement of growth, biomass and improvement in N, P, K, Zn, Fe and Cu levels; Enhancement of yield; Enhancement of growth and improvement in P level; Enhancement of growth and biomass	Mun et al. 1990; Kim et al. 2002; Martin & Stutz 2004; Sensoy et al. 2007; Faisal et al. 2010; Kim et al. 2010; Marihal et al. 2011; Sharif & Claassen 2011; Tallapragada et al. 2011
<i>C. annuum</i> L. cvar Early Bountiful	<i>G. deserticola</i>	Enhancement of growth, development, and nutrition; Resistance to water stress	Davies & Linderman 1991; Davies et al. 1992, 1993
<i>C. annuum</i> L. cvar San Luis	<i>G. intraradices</i> ; <i>G. fasciculatum</i> <sup>a</sup> , Mixed ( <i>G. albidum</i> , <i>Glomus claroides</i> , <i>Glomus diphanum</i> ); Not reported; <i>G. fasciculatum</i> , Mixed <sup>a</sup> ( <i>G. albidum</i> , <i>G. claroides</i> , <i>G. diphanum</i> ); Mixed ( <i>G. albidum</i> , <i>G. claroides</i> , <i>G. diphanum</i> ); <i>G. fasciculatum</i> , Mixed ( <i>Glomus constrictum</i> , <i>Glomus geosporum</i> , <i>G. fasciculatum</i> , <i>Glomus tortuosum</i> ), Mixed <sup>a</sup> ( <i>Glomus aggregatum</i> , <i>G. deserticola</i> , <i>G. geosporum</i> , <i>Glomus microaggregatum</i> , <i>Sclerocystis coremioides</i> )	Enhancement of growth, development e gas exchange; Enhancement of growth, development and in Fe, Mn, Zn and Cu levels; Enhancement of growth, nutrition and physiology; Resistance to water stress; Enhancement of growth, nutrition, physiology and resistance to water stress; Resistance to water stress	Aguilera-Gómez et al. 1999; Davies et al. 2000, 2002; Estrada-Luna et al. 2000; Estrada-Luna & Davies 2003; Mena-Violante et al. 2006
<i>C. annuum</i> L. cvar Pant-C-1	Mixed ( <i>Glomus</i> spp., <i>Gigaspora</i> spp., <i>Scutellospora</i> spp.), <i>G. intraradices</i> <sup>a</sup>	Enhancement of biomass, yield and P level	Gaur et al. 1998

Table 1. (Cont.)

Host species	AM fungi/PGPMs	Effect	Reference
<i>C. annuum</i> L. cvar Camelot	<i>G. intraradices</i> , Mixed <sup>a</sup> ( <i>G. mosseae</i> , <i>Glomus etunicatum</i> , <i>Glomus rosea</i> )	Enhancement of yield	Douds & Reider 2003
<i>C. annuum</i> L. cvar Ancho, <i>C. annuum</i> L. cvar Mirasol	Mixed <sup>a</sup> ( <i>G. albidum</i> , <i>G. claroides</i> , <i>Glomus diaphanum</i> ), <i>G. etunicatum</i> , <i>G. intraradices</i> <sup>a</sup>	Enhancement of growth, biomass and yield	García 2003
<i>C. annuum</i> L. cvar Californian miracle	Mixed ( <i>G. mosseae</i> , <i>G. fasciculatum</i> , <i>G. etunicatum</i> , <i>G. intraradices</i> , <i>Scutellospora</i> sp.)	Enhancement of growth, biomass and yield	Regvar et al. 2003
<i>C. annuum</i> L. cvar Cetinel-150	<i>G. intraradices</i>	Enhancement of growth, physiology and in P level	Demir 2004
<i>C. annuum</i> L. cvar Jupiter	Mixed ( <i>G. aggregatum</i> , <i>G. intraradices</i> , <i>G. mosseae</i> )	Without any specific improvement	Russo 2006; Russo & Perkins-Veazie 2010
<i>Capsicum chinense</i> Jacquin	Commercial product containing strains of AM fungi, <i>Azospirillum brasiliense</i> <sup>b</sup> , <i>Azobacter chroococcum</i> <sup>b</sup>	Enhancement of growth and nutrition	Constantino et al. 2008
<i>C. annuum</i> L. cvar Cacho de Cabra	<i>Glomus claroideum</i> <sup>a</sup> , Mixed (native AM fungi); <i>G. intraradices</i> , <i>G. claroideum</i> <sup>a</sup>	Enhancement of growth, biomass and in P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Cu and Zn contents; Enhancement of yield and fruit quality	Castillo et al. 2009a, b
<i>C. annuum</i> L. cvar Mirasol, <i>C. annuum</i> L. cvar Puya	Mixed ( <i>G. intraradices</i> , <i>A. brasiliense</i> <sup>b</sup> )	Enhancement of growth, biomass and yield	González et al. 2010
<i>C. annuum</i> L. cvar Demre Sivrisi	<i>G. mosseae</i> , <i>G. clarum</i> , <i>Glomus caledonium</i> , <i>G. intraradices</i> , <i>G. etunicatum</i>	Enhancement of biomass and in P and Zn content	Ortas et al. 2011
<i>C. annuum</i> L. cvar Guajillo	Mixed ( <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>G. albidum</i> , <i>Claroideoglomus claroideum</i> , <i>Rhizophagus diaphanus</i> , <i>A. laevis</i> , <i>Glomus</i> sp., <i>Funneliformis geosporum</i> , <i>Glomus sinuosum</i> )	Enhancement of yield and in N, P and Ca content	L.G.L. Santoyo, personal communication 2011
<i>Capsicum frutescens</i> L.	<i>Acaulospora denticulata</i> , <i>Gigaspora albida</i> , <i>G. geosporum</i> , <i>Scutellospora coralloidea</i> <sup>a</sup> , <i>Scutellospora scutata</i> ; Mixed (native AM fungi)	Enhancement of biomass and in P and N levels; Tolerance to As-induced toxicity	Dai et al. 2011; Elahi et al. 2012
<i>C. frutescens</i> L. cvar Hua Rua	<i>Acaulospora foveata</i> , <i>Acaulospora appendicula</i> , <i>A. denticulata</i> , <i>Glomus dimorphicum</i> , <i>Glomus tenerum</i> , <i>G. clarum</i> <sup>a</sup> , <i>Glomus globiferum</i>	Enhancement of growth, biomass and yield and in P, N and K levels	Boonlue et al. 2012
Híbrido cvar Valeria	<i>R. intraradices</i>	Enhancement of fruit quality and in N, P, Fe and Zn levels	Franco et al. 2013
<i>C. annuum</i> L. var. California Wonder	<i>G. mosseae</i> , <i>A. laevis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> <sup>b</sup>	Enhancement of growth, development and yield, and in N and P levels	Tanwar et al. 2013

<i>C. annuum</i> L. cvar California Wonder	<i>G. fasciculatus</i> <sup>a</sup> , <i>G. margarita</i>	Tolerance to salt stress	Hirrel & Gerdemann 1980
<i>C. annuum</i> L. cvar Demre	<i>G. intraradices</i> <sup>a</sup> , <i>G. margarita</i>	Tolerance to salt stress	Türkmen <i>et al.</i> 2005, 2008
<i>C. annuum</i> L. cvar 11B 14	<i>G. clarum</i>	Tolerance to salt stress	Kaya <i>et al.</i> 2009
<i>C. annuum</i> L. var. aviculare	<i>G. intraradices</i>	Tolerance to salt stress	Rueda-Puente <i>et al.</i> 2010
<i>C. annuum</i> L. cvar PKM <sub>1</sub>	<i>G. intraradices</i>	Tolerance to salt stress	Selvakumar & Thamizhiniyan 2011
<i>C. annuum</i> L. cvar Cumaovasi	<i>G. mosseae</i> , <i>G. intraradices</i> <sup>a</sup>	Tolerance to salt stress	Çekiç <i>et al.</i> 2012
<i>C. annuum</i> L. cvar Piquillo	<i>G. mosseae</i> , <i>G. intraradices</i> , <i>G. deserticola</i> <sup>a</sup> ; <i>G. deserticola</i> ; <i>G. deserticola</i>	Reduction of deleterious effects of <i>Verticillium dahliae</i>	Garmendia <i>et al.</i> 2004a, b, 2004c, 2006
<i>C. annuum</i> L. cvar Charleston Bagci	<i>G. mosseae</i> <sup>a</sup> , <i>G. etunicatum</i> , <i>G. fasciculatum</i> , <i>G. margarita</i>	Reduction of deleterious effects of <i>Phytophthora capsici</i>	Ozgonen & Erkilic 2007; Ozgonen <i>et al.</i> 2009
<i>C. annuum</i> L. cvar Ancho	<i>G. fasciculatum</i>	Reduction of deleterious effects of <i>P. capsici</i>	Alejo-Iturvide <i>et al.</i> 2008
<i>C. annuum</i> L. cvar Kandil	<i>G. intraradices</i>	Reduction of deleterious effects of <i>P. capsici</i>	Cimen <i>et al.</i> 2009
<i>C. annuum</i> L. cvar NHU-2C	<i>G. mosseae</i>	Reduction of deleterious effects of <i>Fusarium oxysporum</i>	Oyetunji & Salami 2011
<i>C. annuum</i> L. cvar Zhongjiao 105	<i>G. mosseae</i>	Reduction in copper-induced oxidative stress	Latef 2011
<i>C. annuum</i> L. cvar California Wonder 300	<i>G. mosseae</i> , <i>G. intraradices</i> <sup>a</sup> ; <i>G. intraradices</i>	Tolerance to Cr-induced toxicity; Tolerance to salt stress	Ruscitti <i>et al.</i> 2011; Beltrano <i>et al.</i> 2013

<sup>a</sup> Mycorrhizal inoculum with best response.

<sup>b</sup> Plant growth-promoting microorganisms used in co-inoculation with AM fungi.

Estrada-Luna & Davies 2003); increased resistance or tolerance to pathogens (Garmendia *et al.* 2004a; Alejo-Iturvide *et al.* 2008); increased resistance or tolerance to abiotic stresses (Mena-Violante *et al.* 2006; Kaya *et al.* 2009; Ruscitti *et al.* 2011); early flowering and fruiting (Castillo *et al.* 2009a; Ortas *et al.* 2011) and increased fruit yield and quality (Castillo *et al.* 2009b; Franco *et al.* 2013).

Several studies have reported the effects of AM fungi on development and nutritional status of peppers. Most of the results have shown significant improvements in yield, growth and nutrition of plants grown conventionally and organically.

#### Improved pepper plant nutrition

Seedlings pre-inoculated with AM fungi under field conditions presented a significant increase in growth (39%), flowering (46%), yield (39%) and contents of P (62%) and Zn (65%) (Bagyaraj & Sreeramulu 1982; Sreeramulu & Bagyaraj 1986). Regvar *et al.* (2003) reported improved pepper plant nutrition and yield of fruit under both field cultivation and in greenhouse experiments. Under greenhouse conditions an increase in plant height (19%), plant biomass (38%) and fruit yield per plant (82%) was reported. Under field cultivation, increases of 9, 47 and 78% in plant height, plant biomass and fruit yield per plant, respectively, were recorded. Inoculated bell pepper plants were found to be more developed and taller compared to non-inoculated plants (Mun *et al.* 1990): the authors found, after 7 weeks, an increase in the shoot area from 9 cm in control plants to 19 cm in the most effective mycorrhizal treatment which, according to them, was due to an increase of P in the vegetable tissue.

Sreenivasa (1992) observed that pepper plants inoculated with AM fungi had an increase of 73% in their dry biomass as well as in the mass (64%) of the green fruits from the cultivar Byadagi. In addition, mycorrhizal inoculation increased absorption of P, Zn, Cu, Mn and Fe. Similar results for both growth and nutrient uptake were obtained by Sreenivasa *et al.* (1993) using half of the recommended dose of superphosphate for the crop: according to the authors, the increased levels of nutrients in inoculated plants led to improved growth and yield of the crop.

Increased levels of P and Zn in shoot biomass were also observed by Ortas *et al.* (2011). In addition, plants flowered 16 days earlier when compared to the control treatment. In fact, mycorrhizal inoculation

accelerates plant development, so mycorrhized plants display early maturation. Phosphate transport to the roots via mycorrhizal hyphae can be a thousand times faster than by diffusion in soil (Bielecki 1973) and contributes up to 0.75 of total P absorbed by the plant (Kothari *et al.* 1990). Sensoy *et al.* (2007) reported greater dry mass of root and shoot area in *C. annuum* L., however AM fungi did not significantly increase P levels due to adequate levels of P in the growing medium. Also, Douds & Reider (2003) reported an improvement of 34% in fruit yield, even in soils with high levels of P.

Davies *et al.* (2000) reported that the improvement in growth and development of plants under P stress conditions (using two different P levels: 11 and 22  $\mu\text{g P/ml}$ ) can be attributed to increased absorption of Fe, Mn, Zn and Cu. The plants had, respectively, an increase of 30, 33, 33 and 25% of these elements. These elements play key roles in the photosynthetic process; therefore high levels of these elements in plant tissue can promote a greater photosynthetic rate with consequent improvement in plant growth and development (Marschner 2012). In relation to micronutrient levels, mycorrhized sweet pepper plants (*C. annuum* L. cvar Early Bountiful) showed an increase of boron (B) in foliar tissue, but a decrease of molybdenum (Mo), Cu and Zn contents with increased P fertilization (Davies & Linderman 1991). The potential cause is due to reduced AM colonization, which can directly affect Zn absorption (Ryan *et al.* 2008).

Bagyaraj & Sreeramulu (1982) concluded that it is possible to reduce the application of phosphate fertilizers by 50% through inoculation with an efficient strain of AM fungus, as they found an increase of 39% in fruit yield using half the recommended P level for the crop. Due to the fact that the availability of P is one of the main limiting factors for plant growth and yield, AM fungi present great potential as a biological input to agriculture, contributing significantly to a reduction in phosphate fertilizers not only in *Capsicum* cultivation, but also in other crops of economic importance.

#### Improved pepper fruit yield and quality

In general, inoculation with AM fungi promotes an increase in yield of chilli (*C. annuum* L.) grown under field conditions (Marihal *et al.* 2011). An increase in micronutrient absorption was reported by Castillo *et al.* (2009a), finding that plants presented a

significant increase in levels of Mn (59%), Cu (98%) and Zn (87%): they found that mycorrhizal inoculation was positive for chilli pepper crops (cvar Cacho de Cabra), obtaining better-developed plants with improvements in fruit quality, especially related to fresh mass which had an increase of 55%. The yield of fruits of *C. annuum* L. and two of its cultivars (Ancho and Mirasol) was positively affected by AM fungi in experiments performed by Faisal *et al.* (2010) and García (2003), respectively. These authors reported significant increases in the number of fruits, c. 47 and 46%, respectively. Franco *et al.* (2013) reported increased levels of N, P, Fe and Zn in shoot area and improvement in fruit quality: according to these authors, the impact of mycorrhizal inoculation on fruit quality may be closely related to better nutritional condition of the plant caused by AM fungus.

Sharif & Claassen (2011) observed that in low P supply the association with AM fungus increased the production of *C. annuum* L. significantly and this was related to an increased absorption of P. In addition, their results showed that hyphae are more efficient in absorbing P than the root surface in soils with low levels of P.

#### Arbuscular mycorrhizal fungi effect in organic agricultural systems

Although there is little information about the beneficial role of mycorrhizal association in pepper species grown in soils subjected to organic manure, favourable results have been shown in some studies. Gaur *et al.* (1998) showed that mycorrhizal inoculation increased the fresh mass of fruits from 17 g in control plants to 37 g in the most effective mycorrhizal treatment. In turn, Dai *et al.* (2011) reported a significant increase in root (20%) and shoot (14%) dry mass, as well as in N (12%) and P (12%) levels in the shoot. These responses increased significantly due to the amendment of soil with organic manure. Maximum root infection was seen at 100% of the recommended dose of organic manure application in soil. Indeed, organic manure improves vegetable biomass (Ibrahim *et al.* 2008) and can enhance mycorrhizal infectivity in soil and extra-radical hyphal proliferation (St. John *et al.* 1983; Joner & Jakobsen 1995). In addition, Boonlue *et al.* (2012) observed that mycorrhizal inoculation in organic systems increased growth parameters, including shoot height (41%), stem diameter (39%), fresh mass of shoots (85%) and roots (77%), dry mass

of shoots (87%) and roots (77%), number of flowers per plant (100%), number of fruits per plant (100%) and uptake of N (66%), P (68%) and K (68%) compared with non-inoculated plants.

#### No arbuscular mycorrhizal fungi effect

The positive effects of AM fungi on the production of sweet peppers have been observed in different studies, although some AM fungal species such as *Glomus aggregatum*, *G. intraradices* and *G. mosseae* have provided little effect on growth, yield and nutrition of plants whether grown conventionally or organically (Russo 2006; Russo & Perkins-Veazie 2010). L.G.L. Santoyo, personal communication 2011 reported significant effects on the number of leaves, branches, fruits, dry mass of fruits, and contents of N, P and Ca. However, significant effects of mycorrhizal inoculation on height, dry mass of shoot and levels of K, Mg and Zn in the cultivar Guajillo were not found compared to non-inoculated plants. Therefore, the hypothesis sustained by L.G.L. Santoyo, personal communication 2011 that AM fungi improves nutritional status, growth and yield of cvar Guajillo can only be partly accepted, since the inoculation increased only a few variables.

#### ENVIRONMENTAL FACTORS THAT INFLUENCE MYCORRHIZAL COLONIZATION

Most plants are capable of forming AM symbiosis, although in many cases adverse growing conditions may prevent the establishment of this association. In fact, the soil system provides a constantly changing environment for moisture, pH, temperature and nutrient availability.

Arbuscular mycorrhiza formation, function and extent are clearly influenced by nutrient availability (particularly P) in soil, as reported in several studies. Faisal *et al.* (2010) reported an increase in P content of plant shoots, which increased with increases in the levels of inoculum. According to Smith & Read (2008) inoculum density can correlate positively with the percentage of mycorrhizal colonization of roots, resulting in increased acquisition of P by the mycelial network. It is worth noting, however, that high concentrations (non-stress conditions) of P can inhibit root colonization, whereas low P concentrations (stress conditions) favour intra-radical colonization (Kiriachek *et al.* 2009). This seems to be a



general phenomenon, although the regulatory mechanisms of this process have not been completely elucidated (Smith & Read 2008). The P uptake is directly related to plant growth and when it reaches adequate concentration levels in the soil, i.e., the plant is not under nutritional stress conditions, AM colonization is inhibited by autoregulatory mechanisms of symbiosis, making AM fungi unnecessary and incompatible with non-stress conditions (Javot *et al.* 2007).

Another important factor that may influence the extent of mycorrhizal colonization is temperature. Martin & Stutz (2004) observed that at moderate temperatures (20.7–25.4 °C) mycorrhized pepper plants showed improvements in shoot dry mass and concentrations of P. These effects were reduced at elevated temperature (32.1–38 °C). Warm soil conditions, therefore, surely alter AM fungal activity. Root colonization by AM fungi often decreases when the temperature exceeds 30 °C (Bowen 1987), and soil temperatures >40 °C are generally lethal to AM fungi (Bendavid-Val *et al.* 1997). In turn, Kim *et al.* (2002) observed that inoculum storage at low temperatures (4 °C) increased colonization of roots and as a result increased the growth and absorption of N and P in hot pepper plants (*C. annuum* L.) as compared with freshly prepared soil inoculum. It is likely that dormancy is broken by low temperature, promoting high activity of spores and propagules. However, the effects of temperature on the rate and extent of colonization is complex and may vary with both the fungus and the plant (Smith & Read 2008).

#### SYNERGISTIC EFFECTS OF CO-INOCULATION WITH PLANT GROWTH-PROMOTING MICROORGANISMS AND AM FUNGI ON GROWTH AND NUTRITION OF *CAPSICUM* SPP.

Certain microorganisms can stimulate root growth considerably and are often referred to as plant growth-promoting microorganisms (PGPMs). These microorganisms influence root growth primarily by improving nutrient availability, producing phytohormones and inhibiting pathogens (Lugtenberg *et al.* 1991; Dutta & Podile 2010). Many of these are diazotrophic bacteria (e.g., *Azospirillum*, *Azobacter* or *Pseudomonas* spp.) and improve the absorption of N (Rodrigues *et al.* 2008), while others increase the availability of P by their solubilization (Wahid & Mehana 2000). In addition, PGPMs can stimulate root colonization by AM fungi, thereby increasing nutrient absorption by the plant (Dwivedi *et al.* 2009).

Among PGPMs, plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) along with AM fungi have been recognized for their potential use in agriculture (Azcón 2000; Lucy *et al.* 2004). Some studies (Table 1) state that co-inoculation with PGPR and AM fungi can produce positive synergistic effects on growth and nutrition of *C. chinense* Jacquin and *C. annuum* L. in greenhouse and field conditions (Constantino *et al.* 2008; Tallapragada *et al.* 2011). Favourable results for the application of AM fungus and *Azospirillum brasiliense* in pepper crops (*C. annuum* L.) were demonstrated by González *et al.* (2010). Significant differences were observed in growth, vigour, number of fruits, fruit colour, root and shoot dry mass. On the other hand, co-inoculation with *Methylobacterium* strains and AM fungi increased the levels of N, P, K, Zn and Fe in the roots and shoots, and Cu in the shoot, as well as growth parameters, including length and biomass of plants, and chlorophyll levels in red peppers (Kim *et al.* 2010). The increase in plant growth parameters and nutrient uptake has been attributed to the stimulatory effect of beneficial bacteria on multiplication, spore germination and establishment of AM fungi. In general, mycorrhizal inoculation increased the proportion of mycorrhizal root colonization as well as spore numbers in the root zone soil compared to non-inoculated plants. The increase in chlorophyll content is an important response to mycorrhizal association and has been reported in other studies involving pepper and sweet pepper plants (Estrada-Luna *et al.* 2000; Kim *et al.* 2002; Estrada-Luna & Davies 2003; García 2003; Demir 2004; Kaya *et al.* 2009; Latef 2011; Selvakumar & Thamizhiniyan 2011; Çekiç *et al.* 2012; Elahi *et al.* 2012; Beltrano *et al.* 2013; Franco *et al.* 2013). The increase of chlorophyll content in inoculated plants can be attributed to good uptake of N reported in these studies. In addition, the increase in chlorophyll contents, especially chlorophyll *a*, is directly related to the plant's photosynthetic efficiency, and subsequently to its development.

Tanwar *et al.* (2013) also documented that the presence of PGPR (*Pseudomonas fluorescens*) in mycorrhizal inoculum can synergistically increase growth (64%), photosynthetic rate (75%), yield (100%) and levels of N (37%) and P (52%) as well as leading to early flowering (28 days) in bell pepper (*C. annuum* L. var. California Wonder). In addition, the inoculation of AM fungi along with *P. fluorescens* achieved maximum root colonization (increase of 88%). These results suggest that selected PGPR and AM fungi

could be co-inoculated to optimize the formation and functioning of the AM symbiosis.

Although strains of *Trichoderma* are biological control agents, acting against pathogenic fungi, they can colonize plant roots to stimulate growth (Benítez *et al.* 2004). Effects on the increase in growth parameters due to synergistic interactions between AM fungus and *Trichoderma* spp. in chilli (*C. annuum* L. cvar Jwala) were reported by Sarwade *et al.* (2011): their study showed that co-inoculation with AM fungus and *Trichoderma* spp. increased number of leaves (58%), stem diameter (22%), shoot length (39%), number of branches (80%), fresh mass of shoots (69%) and roots (83%), root length (30%), dry mass of shoots (86%) and roots (90%) and AM fungi root colonization (40%) as compared to AM fungi-inoculated plants.

#### ARBUSCULAR MYCORRHIZAL INFLUENCE ON *CAPSICUM ANNUUM* L.: RESPONSE TO WATER AND SALT STRESS

An emerging factor capable of impacting pepper and sweet pepper crops and agriculture in general, is the salinity of the soil and water (Niu 2012). There is no doubt that AM colonization assists with the water balance of plants (Augé 2001). Some of the mechanisms that may be involved in the increased resistance of mycorrhized plants to water stress include the greater absorption of water promoted by extra-radical hyphae (Hardie 1985); regulation of stomatal conductance by hormonal signals (Allen *et al.* 1982); increase in hydraulic conductivity of the roots (Safir *et al.* 1972) or by lowered leaf osmotic potential for greater turgor (Augé *et al.* 1986).

As with other aspects of mycorrhized plant physiology, it is relevant to distinguish direct effects of fungal colonization from indirect effects resulting from changes in the size of the plant or phosphate supplementation (Smith & Read 2008). According to Fitter (1988), AM fungi influence on plant–water relations can be a secondary consequence of phosphate nutrition, although such effects are inconsistent. Davies *et al.* (1992, 1993) found that the resistance of bell pepper plants (c. 7 weeks old) subjected to water stress conditions was not associated with the nutritional condition and size of the plant. Mycorrhized plants resisted stress and kept relatively high levels of water potential, turgor potential, relative water content, transpiration flux and net photosynthetic flux. The possible mechanism related to this resistance to water

stress was the development of extra-radical hyphae that favoured a better exploration of the soil, keeping soil–root contact and consequently, root–water linkages in the soil.

The selection of AM fungi able to improve the hydric condition of peppers (cvar San Luis) is an important factor for the success of this crop under water-limiting conditions: Davies *et al.* 2002 claim that AM fungi can be potentially incorporated into pepper seedling transplantation systems, with the aim of improving the absorption of P and promoting resistance to water stress. The positive effects of AM symbiosis on San Luis crops were demonstrated clearly by Mena-Violante *et al.* (2006), who found improvements in growth, development and quality of the fruit of peppers grown under water stress. In addition, their study showed that AM fungi inoculation can mitigate the adverse effects of water stress, restoring fruit quality parameters at levels similar to those of non-stress-treated plants.

Soil salinity is a limiting factor in growth, yield and quality for most non-halophytic plants (Rozema & Flowers 2008). High levels of salt in the soil can have negative effects on emergence and establishment of seedlings (Niu *et al.* 2010), roots and shoots (Niu & Cabrera 2010), membrane permeability, water exchange activity, ionic balance, photosynthesis and stomatal conductance (Shannon & Grieve 1998; Navarro *et al.* 2003; Cabañero *et al.* 2004; Munns & Tester 2008). However, biological strategies such as AM symbiosis have been used successfully in horticulture to relieve the deleterious effects of salt on various crops, such as cucumber and zucchini (Rosendahl & Rosendahl 1991; Colla *et al.* 2008). Many researchers report that AM fungi could improve plants' ability to manage salt stress (Ruiz-Lozano *et al.* 1996; Jahromi *et al.* 2008) by improving nutrient absorption (Cantrell & Linderman 2001), maintaining ionic balance (Giri *et al.* 2007), protecting enzyme activity and facilitating water absorption (Colla *et al.* 2008). However, the mechanisms by which AM fungi influence the metabolism of host plant under salt stress are not clear (Kaya *et al.* 2009; Çekiç *et al.* 2012).

Studies have classified pepper as moderately sensitive to salt stress (Maas & Hoffman 1977; Pasternak & Malach 1994), although some cultivars such as Sonar and Lamuyo can present tolerance to this kind of stress (Chartzoulakis & Klapaki 2000).

The advantages of mycorrhizal inoculation in bell pepper crops in saline soils were first reported by

Hirrel & Gerdemann (1980). Other studies have shown that AM fungi inoculation can positively affect growth parameters of peppers, such as shoot height, root length and diameter of the stem as well as nutrient acquisition of plants grown under moderate salinity (Türkmen *et al.* 2008). It has been noted that the humic acid application triggered and increased the positive effects of AM fungi inoculation, promoting much more growth in bell pepper plants grown under salt stress and increased root and shoot nutrient levels (Türkmen *et al.* 2005). In addition, Beltrano *et al.* (2013) observed that AM fungi positively affected growth of bell pepper plants, improving dry mass of root, shoot and leaf area, at all the experimental levels of salinity (0, 50, 100 and 200 mM NaCl).

The enhancement of nutritional status apparently plays a role in mitigation of salt stress in pepper plants due to improvement in dry mass of shoot, which provide a 'dilution effect' of the sodium (Na) (Kaya *et al.* 2009). In addition, Al-Karaki (2006) noted a high retention of Na in the roots, without transportation to the shoot in inoculated plants, suggesting that Na could be retained in intra-radical hyphae or compartmentalized in vacuoles of root cells. Other authors propose that AM fungi exclude Na by discrimination during their absorption from the soil or transfer to plants (Hammer *et al.* 2011). Therefore, although mycorrhizal inoculation has discrete effects on reducing the content of Na in the plant, it seems sufficient to restore the growth process at approximate levels to those of plants not under stress (Kaya *et al.* 2009).

In studies involving pepper plants (var. *aviculare*) under salt stress, AM fungi positively influenced germination, plant height, root length and biomass production (Rueda-Puente *et al.* 2010). In addition, plants of the cultivar PKM<sub>1</sub> showed better growth when mycorrhized due to increased P content in plant tissue (Selvakumar & Thamizhiniyan 2011). However, it is important to note that the improvement of growth and consequent salinity tolerance of mycorrhized plants seems to be independent of the concentration of P in the growth medium (Ruiz-Lozano *et al.* 1996; Feng *et al.* 2002).

#### METAL STRESS TOLERANCE IN MYCORRHIZED PLANTS OF *CAPSICUM* SPP.

Several studies have shown that AM fungi play a role in plant protection against deleterious effects of excessive amounts of metal (Dueck *et al.* 1986; Gonzalez-

Chavez *et al.* 2002), mainly linked to metal tolerance mechanisms in fungi (Gaur & Adholeya 2004). Elahi *et al.* (2012) demonstrated that mycorrhizal inoculation not only mitigated the toxicity in soil amended with 10 ppm arsenic (As) solution, but also increased growth and nutrient uptake in chilli (*C. frutescens* L.). Other studies report that AM fungi isolated from As-contaminated soil were able to confer greater resistance to arsenate in velvet grass, suppressing As uptake (Gonzalez-Chavez *et al.* 2002). On the other hand, Latef (2011) observed that AM fungus was able to maintain an effective symbiosis with pepper plants (*C. annuum* L. cvar Zhongjiao 105) in Cu-contaminated soils, improving plant growth under these conditions. Latef (2011) suggested that this is probably due to the reduction of Cu-induced oxidative stress and reduced accumulation of this metal in plant tissues. Copper immobilization by extra-radical hyphae can contribute to prevention of Cu transfer to plant tissues, so that the AM fungus acts as a biological barrier. This is supported by studies that report the high capacity of the mycorrhizal mycelium to bind with metals (Joner *et al.* 2000; Toler *et al.* 2005). Because of the lower sensitivity of fungal hyphae to metals compared with plant roots (Leyval & Joner 2001), a functional symbiosis with metal-tolerant strains of AM fungi can provide plants with a survival strategy to cope with metal stress while still maintaining an adequate supply of nutrients such as P and N, through hyphal active absorption (Gaur & Adholeya 2004), thus contributing to the improvement of plant performance in metal-contaminated soils.

#### INTERACTIONS BETWEEN ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI AND PATHOGENIC FUNGI IN *CAPSICUM ANNUUM* L.

Arbuscular mycorrhizal symbiosis imparts notable changes in host plant physiology, which have an impact on the plant response to biotic stresses (Pozo *et al.* 2010). In fact, some mechanisms may be involved in bio-protection by AM fungi against soil pathogens. In this sense, the improvement of plant nutritional condition could be highlighted, especially P (Azcón-Aguilar *et al.* 2002). However, tolerance or resistance to pathogen attack cannot be regarded as a mere consequence of phosphate nutrition improvement (Trotta *et al.* 1996; Fritz *et al.* 2006; Liu *et al.* 2007). Other mechanisms may be involved in plant defence during AM symbiosis such as, for example,



differential regulation of chitinases and  $\beta$ -1,3-glucanase isoforms as a result of hormone changes and/or synthesis of specific elicitor/suppressor molecules (Lambais 2000). In addition, the efficiency of response to biotic stresses depends on the involved AM fungus, as well as on the substrate and host plant (Azcón-Aguilar & Barea 1996; Linderman 2000).

Some studies have demonstrated the effectiveness of AM fungi as a bio-protectant in *C. annuum* L. Garmendia *et al.* (2004a) showed that mycorrhizal inoculation has been effective in reducing disease severity caused by *Verticillium dahliae* in pepper (cvar Piquillo). The plants associated with AM fungi exhibited greater yield than non-inoculated ones despite the lower P fertilization applied to the mycorrhizal treatment. The maintenance of specific P uptake rate could have contributed towards diminishing the deleterious effect of *V. dahliae* on yield in plants associated with AM fungus. Also, Garmendia *et al.* (2004b) observed that the effectiveness of AM fungi as a bio-protector against *Verticillium* wilt was influenced by the phenology of the plant at the time of pathogen attack. The highest efficacy of AM interaction occurred when *V. dahliae* was inoculated during the vegetative stage of plants (Garmendia *et al.* 2004b). In addition, P content in leaves of plants associated with AM fungi were lower than those found in non-inoculated plants, reinforcing the hypothesis that the mechanism involved in mycorrhized plant response to pathogenic fungus is independent of phosphate nutrition (Garmendia *et al.* 2004c).

The reduction in disease severity caused by *Phytophthora capsici* in pepper (cvar Charleston Bagci) was reported by Ozgonen & Erkilic (2007). All AM fungi tested increased shoot height by 23.4–31.7% and fresh and dry weights of shoots and roots of plants were enhanced by AM symbiosis compared to non-inoculated plants in pot experiments. Under greenhouse conditions AM fungi increased yield by 22%. Also, AM association reduced disease severity by 91.7, 43 and 57.2% under pot, greenhouse and field conditions, respectively. Mycorrhizal inoculation not only inhibited *Phytophthora* wilt caused by *P. capsici*, but also increased yield of pepper plants (cvar Kandil) grown in the field (Cimen *et al.* 2009). The highest yields were obtained in plots that received a 'solarization + AM fungi' treatment (solarization is a non-chemical method for controlling soil-borne pests using high temperatures produced using solar energy), in which the lowest incidence of the disease was registered. Lower yields and the highest incidence of

disease were observed in control plots without solarization and without AM fungi. Solarization decreases crown rot disease caused by *P. capsici* (Yücel 1995) through thermal inactivation, which is the most serious disease affecting pepper cultivation in Turkey. However, the destruction of beneficial organisms such as AM fungus may also occur, thereby reducing the positive effects of solarization (Schreiner *et al.* 2001). Earlier studies suggested that eradication or reduction of the mycorrhizal population in soil by solarization could be recovered by artificial inoculation of AM fungi, so could induce better root growth (Afek *et al.* 1991) and result in an increment in yield of pepper (Ortas *et al.* 2003). Together, the application of solarization and AM fungi in plots infested with *P. capsici* increased plant yield by c. 43% compared with plots without the treatment in the presence of the pathogen (Cimen *et al.* 2009).

Oyetunji & Salami (2011) showed that the incidence of *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* was visibly reduced in bell pepper plants (cvar NHU-2C) inoculated with AM fungus. All the plants survived and achieved better development compared to those of other treatments. On a microscopic level, mycorrhizal inoculation promotes an increase in cell-wall thickness of root cells, thus forming a barrier to pathogen attack. This contributed to the reduction in disease severity in mycorrhized plants (Oyetunji & Salami 2011).

Peroxidase (POX) production, which plays an important role in forming secondary cell walls and in their suberization, can contribute to a greater resistance to subsequent invaders. Mycorrhizal inoculation influence on the levels of this enzyme in *C. annuum* L. was demonstrated in various studies as can be seen in the following topic.

#### ARBUSCULAR MYCORRHIZAL INFLUENCE ON *CAPSICUM ANNUUM* L.: PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL ASPECTS

Physiological and biochemical plant responses to salt and water stresses

In plant tissue, reactive oxygen species (ROS) such as hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ), superoxide ( $O_2^-$ ) or hydroxyl radicals ( $OH^-$ ) are continuously formed in the cytosol, chloroplasts and mitochondria by a range of metabolic processes. Reactive oxygen species not only play a key role in translating signals, but can

also cause damage to cells, for example by peroxidation of membranes, protein degradation and DNA mutation. Plants therefore 'kidnap' excessive amounts of ROS by enzymes such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPx) (McCord 2000). However, both biotic and abiotic stresses can produce changes in free radical kidnapper enzymes (Mittler 2002).

Salt and water stresses can cause a rapid increase in free radical concentration in plant cells (Moran *et al.* 1994; Fadzilla *et al.* 1997; Mittler 2002), which seems to be due to a limitation of carbon dioxide reduction by the Calvin cycle during the period of osmotic stress. Also, deficiency or high amounts of mineral elements in plant tissue can induce oxidative stress in plants (Marschner 2012). Reactive oxygen species and free radicals bind to sulph-hydril groups of membrane proteins or increase their lipid peroxidation. In this way, Liu *et al.* (2004) showed that Cu excess can cause damage to cell membranes. In order to overcome the harmful effects of free radicals, plants exposed to high levels of Cu show an increase in antioxidant responses (Gratão *et al.* 2008) which result from the activity of enzymes such as SOD, CAT, ascorbate peroxidase (APx) and glutathione reductase (GR) (Schützendübel & Polle 2002).

Some studies have shown that root colonization of *C. annuum* L. can relieve the damage caused by oxidative stress in plants under different environmental conditions. Latef (2011) reported that pepper plants (cvar Zhongjiao 105) exposed to high levels of Cu demonstrated reduced oxidative stress and lipid peroxidation when colonized by AM fungus. The results showed an increase in the enzyme activity of SOD, CAT, APx and GR, which can be a manifestation of the beginning of antioxidant defence (Márquez-García & Córdoba 2010). The percentage increase in SOD, CAT, APx and GT, due to mycorrhizal inoculation, was 20, 50, 16 and 29%, compared with non-inoculated plants. Similarly, Çekiç *et al.* (2012) found an increase in the activity of SOD, CAT and APx in mycorrhized plants under salt stress, although an improvement in GR activity was not observed. Çekiç *et al.* (2012) also reported lower lipid peroxidation, evidenced by low content of malondialdehyde in inoculated plants.

Plants under stress conditions change their metabolism in response to environmental adversities. The accumulation of proline, an  $\alpha$ -amino acid, due to increased synthesis and decreased degradation under a variety of stress conditions, such as salt,

water and metal-induced oxidative stress, has been documented in many plants (Kishor *et al.* 2005). The role of AM symbiosis in proline metabolism has been investigated in several studies involving plants under different stress conditions, although contradictory results have been obtained (Ruiz-Lozano *et al.* 1995, 1996; Goicoechea *et al.* 1998). Some studies have shown a reduction in proline levels in mycorrhized pepper (cvar 11B14) and chilli plants (cvar PKM<sub>1</sub>) under salt stress (Kaya *et al.* 2009; Selvakumar & Thamizhiniyan 2011). Conversely, Beltrano *et al.* (2013) demonstrate proline accumulation in pepper plants (cvar California Wonder 300) grown in the presence or absence of AM fungus and at all levels of salt stress: they observed that under low supply of P and at all salinity levels, leaves of mycorrhized plants accumulated more proline when compared with non-inoculated plants, while roots of mycorrhized plants accumulated more proline only at high levels of salt stress. Similarly, Ruscitti *et al.* (2011) showed that in plant roots of cvar California Wonder 300 inoculated with AM fungi, proline concentration decreased with increasing concentration of chromium (Cr), while it increased in leaves.

Mycorrhizal inoculation has been suggested as a method for increasing plant resistance to water stress (Augé 2001). Among these, the maintenance of physiological parameters of plants subjected to drought has been highlighted by several works on *C. annuum* L. Davies *et al.* (2002) observed that a small number of mycorrhized pepper plants (cvar San Luis) with visible wilting during a water stress peak correlated with higher water potential of the leaves of these plants; however, they found that P content in plant tissue was not a contributing factor to the resistance to water stress. Some authors suggest that the resistance of pepper plants (cvar Early Bountiful) subjected to drought is explained by the extensive network of extra-radical hyphae that favour a greater extraction of water in soils with low water potential, maintaining physiological parameters in the plant (Davies *et al.* 1992, 1993). The beneficial effects of AM symbiosis on plant physiology, especially related to better water use, were observed in pepper plants (cvar Piquillo) submitted to biotic stress (Garmendia *et al.* 2004c).

Davies *et al.* (1993) demonstrated that mycorrhized bell pepper plants (cvar Early Bountiful) are able to regulate their stomata more rapidly and demonstrate higher photosynthetic rates compared to non-inoculated plants during the period of adaptation to

water stress. As a consequence, improvements in growth and development, as well as increases in nutrient absorption capacity were observed. Similar results were obtained by Estrada-Luna *et al.* (2000) and Estrada-Luna & Davies (2003), who found that mycorrhizal inoculation of pepper plants (cvar San Luis) promoted better responses to water deficit during the cycles of water restriction, as well as increased physiological performance and growth after the adaptation of plants to water stress conditions. The results showed lower levels of abscisic acid (ABA) in the roots and stems of mycorrhized plants. This corresponded with high transpiration, stomatal conductance, and relative water content, indicating that plants were not under water stress. In addition, the improvement in plant growth can be partly attributed to the increase of the levels of N, P and K and their influence on net photosynthesis.

#### Physiological and biochemical responses to disease

Garmendia *et al.* (2004c) observed that although mycorrhized plants developed symptoms of the disease caused by *V. dahliae*, they exhibited more balanced activities of the enzymes SOD, CAT and guaiacol peroxidase during the first month after pathogen inoculation. This could contribute towards slowing the development of disease symptoms and maintain controlled photosynthetic rates for longer (Garmendia *et al.* 2004b) in mycorrhized plants. Alejo-Iturvide *et al.* (2008) noted that mycorrhizal inoculation seems to have a positive influence on resistance of chilli plants (cvar Ancho), as necrotic lesions caused by *P. capsici* were reduced by 25% compared with non-inoculated infected plants. Although both treatments showed increased activity of SOD and POX, this was best regulated by mycorrhized plants, since the changes in their activities were less varied compared to the variations found in non-inoculated plants. In addition, non-inoculated plants showed greater accumulation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> than those treated with AM fungus. According to Alejo-Iturvide *et al.* (2008), this observation suggests the existence of a local and systemic signalling process in plants colonized by AM fungus, possibly preceded by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> activity transfer to adjacent cells and also through distant sites. Pozo *et al.* (2002) demonstrated that mycorrhizal inoculation of tomato plants induced a local and systemic resistance to *Phytophthora parasitica* and was effective in reducing the symptoms produced by this pathogen.

Evidence suggests that the induction/suppression of plant defence mechanisms in the early stages of AM colonization plays a key role in the establishment of mycorrhizal association (García-Garrido & Ocampo 2002; Yuan *et al.* 2007). In the host, the differential expression of several genes involved in plant defence against pathogen attack, which is evaluated based on enzymatic activities, accumulation of protein and/or RNA messengers, has been observed during the development of AM fungi and may play a key role in controlling intra-radical colonization (Lambais 2000).

Reactive oxygen species accumulation, activation of phenylpropanoid metabolism and the accumulation of specific isoforms of hydrolytic enzymes such as chitinases and glucanases, have been reported in colonized roots of tomato (García-Garrido & Ocampo 2002; Pozo *et al.* 2002). Ozgonen *et al.* (2009) demonstrated that mycorrhizal inoculation of pepper plants (cvar Charleston Bagci) infected by *P. capsici* induced a significant increase in activity of  $\beta$ -1,3-glucanase and chitinase compared with non-inoculated plants. In all treatments, the  $\beta$ -1,3-glucanase and chitinase activities were maximum 6 days after inoculation, decreasing at the initial and final assessments 3 and 9 days after inoculation, respectively. The levels of both,  $\beta$ -1,3-glucanase and chitinase enzymes in control plants ranged from 0 to 3  $\mu$  kat/mg of protein. The level of  $\beta$ -1,3-glucanase enzyme was higher in *P. capsici* infected plants (19  $\mu$  kat/mg of protein) and those with combined inoculation of AM fungi and *P. capsici* treatments (19–25  $\mu$  kat/mg of protein), as compared to that at the single mycorrhizal treatments (10–16  $\mu$  kat/mg of protein) 6 days after inoculation. Similarly, chitinase activity was higher in *P. capsici* infected plants (11  $\mu$  kat/mg of protein) and those with combined inoculation of AM fungi and *P. capsici* treatments (9–14  $\mu$  kat/mg of protein), as compared to that at the single mycorrhizal treatments (5–7  $\mu$  kat/mg of protein) 6 days after inoculation. Ozgonen *et al.* (2009) also found an increase in the amount of phenolic compounds, which were highest in plants with combined inoculation of AM fungi and *P. capsici* treatments. Some of these compounds were identified as: caffeic acid, *trans*-coumaryl, capsaicin (CAP), *p*-aminobenzaldehyde, aspartic acid, chlorogenic acid, glutamic acid, linoleic acid, *cis*-feruloyl acid, stearic acid, capsicoside and F1 compound.

Phytoalexin production during the early stages of colonization could provide pepper plants (cvar Charleston Bagci) with a defence against *P. capsici*.

Ozgonen & Erkilic (2007) noted that infected plants inoculated with AM fungi showed improvement in capsidiol content, which may have had an influence on plant response against the pathogen.

Garmendia *et al.* (2006) also reported that pepper root colonization (cvar Piquillo) by AM fungi induced the appearance of new isoforms of acid chitinases, SOD and at early stages, POXs. In addition, infection with *V. dahliae* slightly increased the activity of both phenylalanine ammonia-lyase and POX only in mycorrhized roots. These observations suggest a role of AM fungi in biochemical-protection of plants against *Verticillium* wilt in pepper.

Garmendia *et al.* (2004b) showed that the association with AM fungi reduced the deleterious effects on plant hydric condition caused by *Verticillium* wilt. The results showed that AM inoculation maintained leaf water content for longer and delayed development of disease symptoms such as decreased photosynthesis in plants inoculated with the pathogen. According to Garmendia *et al.* (2004b), these benefits to the physiology of the plant promoted improvements in its yield.

#### Physiological and biochemical response to arbuscular mycorrhizal fungi in terms of improved plant health

Phosphorus plays an important role in the energy metabolism of cells during photosynthesis (Marschner 2012). Studies show that AM fungi can facilitate an increased P absorption in pepper plants and partially reduce the effects of low P supply in the soil, thereby improving photosynthetic rate, stomatal conductance and gas exchange of plants (Aguilera-Gómez *et al.* 1999). Mycorrhizal inoculation has also been shown to positively affect the levels of carotenoids in some cases (Tallapragada *et al.* 2011; Çekiç *et al.* 2012).

Aguilera-Gómez *et al.* (1999) showed that mycorrhizal association not only relieved P-stress, but also increased reproductive growth of pepper plants (cvar San Luis) grown in greater availability of P (44 g P/m<sup>3</sup>) by 450%. Additionally, photosynthetic rate and P levels in plant tissue were higher in mycorrhized plants cultivated on high levels of P. Demir (2004) found that the concentration of P was positively correlated to the levels of chlorophyll (*a*, *b* and *a + b*) and sugars (fructose,  $\alpha$ -glucose and  $\beta$ -glucose) and that this had positively affected the physiological performance in pepper plants (cvar Cetinel-150). Arbuscular mycorrhizal fungi may function as a metabolic

reservoir causing basi-petal mobilization of photosynthates to roots, thus providing a stimulus for higher photosynthetic activity (Bielecki 1973). Tanwar *et al.* (2013) demonstrated that in low doses of P, co-inoculation with PGPB and AM fungi increased the levels of chlorophyll *a* and *b* in bell pepper var. California Wonder, resulting in an increase in photosynthetic rate, and suggest that this may be due to absorption of more nutrients and an increased gas exchange by improvement of stomatal conductance.

#### Physiology and biochemistry: hormonal responses to arbuscular mycorrhizal fungi colonization

Arbuscular mycorrhizal fungi play a role in hormonal balance during the adaptation of plants to adverse conditions, which can regulate its performance. Several studies have demonstrated the role of AM fungi in phytohormone level changes during symbiosis, including cytokinins, gibberellins, ethylene, ABA, salicylic acid and jasmonates (Hause *et al.* 2007). In *Capsicum* sp., the AM fungi effect on the development of pepper plants showed a positive correlation with the concentration of different growth regulators during phenological stages of the plant (García 2003). According to García (2003), the concentrations of indoleacetic acid (IAA) and gibberellic acid (AG3) in the shoot were higher in AM fungi colonized plants compared with non-inoculated ones. Also, adenine concentration (6-aminopurine) in roots showed higher values. There was also an increase of 10% in the total chlorophyll content and 20% in the total protein levels, which may have a direct effect on production and quality of fruit, as well as levels of plant growth promoters. Improvements in cytokinin and gibberellin levels have been demonstrated in plants inoculated with AM fungi (Allen *et al.* 1980, 1982). Increases in such hormones, particularly cytokinins, could elevate photosynthetic rates by stomatal opening, influencing the transport of ions and regulating the levels of chlorophyll (Allen *et al.* 1980, 1982). Goicoechea *et al.* (1997) showed that there is a positive correlation between cytokinin increase and the rate of gas exchange, stomatal conductance and transpiration. Moreover, evidence suggests that ABA could also play a role in plant stomatal control (Zhang *et al.* 1987), which reinforces the results found by Estrada-Luna *et al.* (2000) and Estrada-Luna & Davies (2003). Therefore, maintaining hormone levels in mycorrhized plant contributes to improved photosynthesis, promoting plant development and yield.



### Physiological and biochemical response of fruit to arbuscular mycorrhizal fungi colonization

The effect of AM symbiosis on the quality attributes of fruits of *Capsicum* spp. has not been widely reported. Castillo *et al.* (2009a, b) showed a slight increase in ascorbic acid concentration in fruits of colonized plants; however, no significant differences were found for total titratable acidity (% of citric acid) and total soluble solids (°Brix). Under drought conditions, Mena-Violante *et al.* (2006) found that the inoculation of pepper plants (cvar San Luis) promoted significant improvements in various fruit quality parameters, such as pigment concentration. Chlorophyll content in fruit of mycorrhized plants under water stress were similar to those found in non-inoculated plants that were not subjected to drought. In addition, the levels of carotenes and xanthophylls in the fruit were 1.4 times higher in AM inoculated plants subjected to drought compared to that in non-inoculated plants not exposed to drought. This could be attributed to a mycorrhizal inoculation effect on the process of fruit maturation (Castillo *et al.* 2009a) and changes in the concentration of photosynthetic pigments during symbiosis (Demir 2004).

Pungency is an important quality attribute in peppers, and its expression is associated with the presence, in a greater or lesser proportion, of alkaloids known as capsaicinoids (Appendino 2008). Among these, CAP and its dihydro derivative (dihydrocapsaicin (DHC)) constitute >0.80 of the total capsaicinoids in most of the pungent varieties (Kosuge & Furuta 1970). The levels of CAP are usually higher than DHC (Antonious *et al.* 2009) and these are considered the main parameter to determine the commercial quality of a product or derivatives (Frery & Frery 2012). In terms of improved quality attributes, no research has been conducted on the role of AM colonization on capsaicinoid levels in pepper.

The association with AM fungi promotes physiological and biochemical changes in plants, activating diverse metabolic pathways that can result in an increase of secondary compounds (Rojas-Andrade *et al.* 2003; Strack & Fester 2006; Carlsen *et al.* 2008). Therefore, the use of AM fungi seems to be a plausible strategy to obtain increases in certain compounds of interest.

### CONCLUSION

The role of AM fungi on the acquisition of P by the host plant is undoubtedly notable, although the

mechanisms that control this process are still being elucidated by several researchers. As this mutual relationship is compatible with almost 0.90 of vascular plant species, and considering the function of this symbiosis on plant development, nutrient cycle, carbon storage, disease and stress resistance and the reduced use of fertilizers, AM fungi could be an important alternative to current agricultural practices that strive to be sustainable. Therefore, the potential of this symbiosis with *Capsicum* spp. is of inestimable value.

Large-scale application of AM fungi in crops of economic importance, such as pepper and sweet pepper, is still a challenge due to the obligatory nature of the symbiosis, which requires the presence of a host for production.

Thus, AM fungi are important components of agricultural production and, if managed properly, can substantially contribute to the sustainability of agricultural systems. In addition, the development of techniques that aim to understand the mechanisms that control AM formation may contribute towards the effective large-scale application of AM fungi in agriculture.

The authors are grateful to Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) for grants and a research fellowship, to Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) for research fellowships.

### REFERENCES

- AFEK, U., MENGE, J. A. & JOHNSON, E. L. V. (1991). Interaction among mycorrhizae, soil solarization, metalaxyl and plants in the field. *Plant Disease* **75**, 665–671.
- AGUILERA-GÓMEZ, L., DAVIES, F. T. Jr., OLALDE-PORTUGAL, V., DURAY, S. A. & PHAVAPHUTANON, L. (1999). Influence of phosphorus and endomycorrhiza (*Glomus intraradices*) on gas exchange and plant growth of chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis). *Photosynthetica* **36**, 441–449.
- ALEJO-ITURVIDE, F., MÁRQUEZ-LUCIO, M. A., MORALES-RAMÍREZ, I., VÁZQUEZ-GARCIDUEÑAS, M. S. & OLALDE-PORTUGAL, V. (2008). Mycorrhizal protection of chili plants challenged by *Phytophthora capsici*. *European Journal of Plant Pathology* **120**, 13–20.
- AL-KARAKI, G. N. (2006). Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Scientia Horticulturae* **109**, 1–7.

- ALLEN, J.W. & SHACHAR-HILL, Y. (2009). Sulfur transfer through an arbuscular mycorrhiza. *Plant Physiology* **149**, 549–560.
- ALLEN, M.F., MOORE, T.S. Jr. & CHRISTENSEN, M. (1980). Phytohormone changes in *Bouteloua gracilis* infected by vesicular-arbuscular mycorrhizae: cytokinin increases in the host plant. *Canadian Journal of Botany* **58**, 371–374.
- ALLEN, M.F., MOORE, T.S. Jr. & CHRISTENSEN, M. (1982). Phytohormone changes in *Bouteloua gracilis* infected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. II. Altered levels of gibberellin-like substances and abscisic acid in the host plant. *Canadian Journal of Botany* **60**, 468–471.
- AMES, R.N., REID, C.P.P., PORTER, L.K. & CAMBARDELLA, C. (1983). Hyphal uptake and transport of nitrogen from two <sup>15</sup>N-labeled sources by *Glomus mosseae*, a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist* **95**, 381–396.
- ANTONIOUS, G.F., BERKE, T. & JARRET, R.L. (2009). Pungency in *Capsicum chinense*: Variation among countries of origin. *Journal of Environmental Science and Health B: Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Wastes* **44**, 179–184.
- APPENDINO, G. (2008). Capsaicin and capsaicinoids. In *Modern Alkaloids: Structure, Isolation, Synthesis and Biology* (Eds E. Fattorusso & O. Tagliatela-Scafati), pp. 73–109. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- AUGÉ, R.M. (2001). Water relations, drought and VA mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* **11**, 3–42.
- AUGÉ, R.M., SCHEKEL, K.A. & WAMPLE, R.L. (1986). Osmotic adjustment in leaves of VA mycorrhizal and non-mycorrhizal rose plants in response to drought stress. *Plant Physiology* **82**, 765–770.
- AZCÓN, R. (2000). Papel de la simbiosis micorrízica y su interacción con otros microorganismos rizosféricos en el crecimiento vegetal y sostenibilidad agrícola. In *Ecología, Fisiología y Biotecnología de la Micorriza Arbuscular* (Eds A. Alarcón & R. Ferrera-Cerrato), pp. 1–15. Mexico: Mundi Prensa.
- AZCÓN-AGUILAR, C. & BAREA, J.M. (1996). Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens. An overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza* **6**, 457–464.
- AZCÓN-AGUILAR, C., JAIZME-VEJA, M.C. & CALVET, C. (2002). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi for bioremediation. In *Mycorrhizal Technology in Agriculture: From Genes to Bioproducts* (Eds S. Gianinazzi, H. Schüepp, J.M. Barea & K. Haselwandter), pp. 187–197. Berlin: Birkhäuser Verlag.
- BAGYARAJ, D.J. & SREERAMULU, K.R. (1982). Preinoculation with VA mycorrhiza improves growth and yield of chili transplanted in the field and saves phosphatic fertilizer. *Plant and Soil* **69**, 375–381.
- BELTRANO, J., RUSCITTI, M., ARANGO, M.C. & RONCO, M. (2013). Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and P levels. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **13**, 123–141.
- BENDAVID-VAL, R., RABINOWITZ, H.D., KATAN, J. & KAPULNIK, Y. (1997). Viability of VA-mycorrhizal fungi following soil solarization and fumigation. *Plant and Soil* **195**, 185–193.
- BENÍTEZ, T., RINCÓN, A.M., LIMÓN, M.C. & CODÓN, A.C. (2004). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology* **7**, 249–260.
- BIELESKI, R.L. (1973). Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annual Review of Plant Physiology* **24**, 225–252.
- BOONLUE, S., SURAPAT, W., PUKAHUTA, C., SUWANARIT, P., SUWANARIT, A. & MORINAGA, T. (2012). Diversity and efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from organic chili (*Capsicum frutescens*) farms. *Mycoscience* **53**, 10–16.
- BOSLAND, P.W. (1992). Chillies: a diverse crop. *HortTechnology* **2**, 6–10.
- BOWEN, G.D. (1987). The biology and physiology of infection and its development. In *Ecophysiology of VA Mycorrhizal Plants* (Ed. G.R. Safir), pp. 27–57. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- BÜRKERT, B. & ROBSON, A. (1994). <sup>65</sup>Zn uptake in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) by 3 vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in a root-free sandy soil. *Soil Biology and Biochemistry* **26**, 1117–1124.
- CABAÑERO, F.J., MARTÍNEZ, V. & CARVAJAL, M. (2004). Does calcium determine water uptake under saline conditions in pepper plants, or is it water flux, which determines calcium uptake? *Plant Science* **166**, 443–450.
- CANTRELL, I.C. & LINDERMAN, R.G. (2001). Preinoculation of lettuce and onion with VA mycorrhizal fungi reduces deleterious effects of soil salinity. *Plant and Soil* **233**, 269–281.
- CARDONA, G., PEÑA-VEGAS, C.P. & ARCOS, A. (2008). Ocurrencia de hongos formadores de micorriza arbuscular asociados a ají (*Capsicum* sp.) en la Amazonia colombiana. *Agronomía Colombiana* **26**, 459–470.
- CARIS, C., HÖRDT, W., HAWKINS, H.J., RÖMHELD, V. & GEORGE, E. (1998). Studies of iron transport by arbuscular mycorrhizal hyphae from soil to peanut and sorghum plants. *Mycorrhiza* **8**, 35–39.
- CARLSEN, S.C.K., UNDERSTRUP, A., FOMSGAARD, I.S., MORTENSEN, A.G. & RAVNSKOV, S. (2008). Flavonoids in roots of white clover: interaction of arbuscular mycorrhizal fungi and a pathogenic fungus. *Plant and Soil* **302**, 33–43.
- CASTILLO, C.G., ORTIZ, C.A., BORIE, F.R. & RUBIO, R.E. (2009a). Respuesta de ají (*Capsicum annum* L.) cv. 'Cacho de Cabra' a la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *Información Tecnológica* **20**, 3–14.
- CASTILLO, C.G., SOTOMAYOR, L., ORTIZ, C.A., LEONELLI, G., BORIE, F.R. & RUBIO, R.E. (2009b). Effect of arbuscular mycorrhizal fungus on an ecological crop of chili peppers (*Capsicum annum* L.). *Chilean Journal of Agricultural Research* **69**, 79–87.
- ÇEKİÇ, F.O., UNYAYAR, S. & ORTAS, I. (2012). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on biochemical parameters in *Capsicum annum* grown under long term salt stress. *Turkish Journal of Botany* **36**, 63–72.
- CHARTZOULAKIS, K. & KLAPAKI, G. (2000). Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during

- different growth stages. *Scientia Horticulturae* **86**, 247–260.
- CHEN, K., LIU, W., GUO, S., LIU, R. & LI, M. (2012). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in continuous cropping soils used for pepper production. *African Journal of Microbiology Research* **6**, 2469–2474.
- CIMEN, I., PIRINC, V., SAGIR, A., AKPINAR, C. & GUZEL, S. (2009). Effects of solarization and vesicular arbuscular mycorrhizal fungus (VAM) on phytophthora blight (*Phytophthora capsici* leonian) and yield in pepper. *African Journal of Biotechnology* **8**, 4884–4894.
- COLLA, G., ROUPHAEL, Y., CARDARELLI, M., TULLIO, M., RIVERA, C. M. & REA, E. (2008). Alleviation of salt stress by arbuscular mycorrhizal in zucchini plants grown at low and high phosphorus concentration. *Biology and Fertility of Soils* **44**, 501–509.
- CONSTANTINO, M., GÓMEZ-ÁLVAREZ, R., ÁLVAREZ-SOLÍS, J. D., GEISSEN, V., HUERTA, E. & BARBA, E. (2008). Effect of inoculation with rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of *Capsicum chinense* Jacquin. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* **109**, 169–180.
- COSTA, L. M., MOURA, N. F., MARANGONI, C., MENDES, C. E. & TEIXEIRA, A. O. (2010). Atividade antioxidante de pimentas do gênero *Capsicum*. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* **30**, 51–59.
- DAI, O., SINGH, R. K. & NIMASOW, G. (2011). Effect of arbuscular mycorrhizal (AM) inoculation on growth of chili plant in organic manure amended soil. *African Journal of Microbiology Research* **5**, 5004–5012.
- DAVIES, F. T. Jr. & LINDERMAN, R. G. (1991). Short term effects of phosphorus and VA-mycorrhizal fungi on nutrition, growth and development of *Capsicum annuum* L. *Scientia Horticulturae* **45**, 333–338.
- DAVIES, F. T. Jr., POTTER, J. R. & LINDERMAN, R. G. (1992). Mycorrhiza and repeated drought exposure affect drought resistance and extraradical hyphae development of pepper plants independent of plant size and nutrient content. *Journal of Plant Physiology* **139**, 289–294.
- DAVIES, F. T. Jr., POTTER, J. R. & LINDERMAN, R. G. (1993). Drought resistance of mycorrhizal pepper plants independent of leaf P concentration – response in gas exchange and water relations. *Physiologia Plantarum* **87**, 45–53.
- DAVIES, F. T. Jr., OLALDE-PORTUGAL, V., ALVARADO, M. J., ESCAMILLA, H. M., FERRERA-CERRATO, R. C. & ESPINOSA, J. I. (2000). Alleviating phosphorus stress of chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. 'San Luis') by arbuscular mycorrhizal inoculation. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **75**, 655–661.
- DAVIES, F. T. Jr., OLALDE-PORTUGAL, V., AGUILERA-GÓMEZ, L., ALVARADO, M. J., FERRERA-CERRATO, R. C. & BOUTTON, T. W. (2002). Alleviation of drought stress of chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. *Scientia Horticulturae* **92**, 347–359.
- DEMIR, S. (2004). Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. *Turkish Journal of Biology* **28**, 85–90.
- DOUDS, D. D. Jr. & REIDER, C. (2003). Inoculation with mycorrhizal fungi increases the yield of green peppers in a high P soil. *Biological Agriculture & Horticulture: an International Journal for Sustainable Production Systems* **21**, 91–102.
- DUECK, T. A., VISSER, P., ERNST, W. H. O. & SCHAT, H. (1986). Vesicular-arbuscular mycorrhizae decrease zinc-toxicity to grasses growing in zinc-polluted soil. *Soil Biology and Biochemistry* **18**, 331–333.
- DUTTA, S. & PODILE, A. R. (2010). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): the bugs to debug the root zone. *Critical Reviews in Microbiology* **36**, 232–244.
- DWIVEDI, D., JOHRI, B. N., INEICHEN, K., WRAY, V. & WIEMKEN, A. (2009). Impact of antifungals producing rhizobacteria on the performance of *Vigna radiata* in the presence of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* **19**, 559–570.
- ELAHI, F. E., MRIDHA, M. A. U. & AMINUZZAMAN, F. M. (2012). Role of AM fungi on plant growth, nutrient uptake arsenic toxicity and chlorophyll content of chili grown in arsenic amended soil. *Bangladesh Journal of Agricultural Research* **37**, 635–644.
- ESTRADA-LUNA, A. A. & DAVIES, F. T. Jr. (2003). Arbuscular mycorrhizal fungi influence water relations, gas exchange, abscisic acid and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum*) plantlets during acclimatization and post-acclimatization. *Journal of Plant Physiology* **160**, 1073–1083.
- ESTRADA-LUNA, A. A., DAVIES, F. T. Jr. & EGILLA, J. N. (2000). Mycorrhizal enhancement of the physiology and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) plantlets during acclimatization and post-acclimatization. *Hortscience* **35**, 426.
- FADZILLA, N. M., FINCH, R. P. & BURDON, R. H. (1997). Salinity, oxidative stress and antioxidant responses in shoot cultures of rice. *Journal of Experimental Botany* **48**, 325–331.
- FAISAL, M., AHMAD, T. & SRIVASTAVA, N. K. (2010). Influence of different levels of *Glomus macrocarpum* on growth and yield of chilli (*Capsicum annuum* L.). *Indian Journal of Scientific Research* **1**, 97–99.
- FAO (2010). *FAOSTAT*, Rome: FAO. Available from: <http://faostat3.fao.org/home/index.html> (accessed 10 November 2012).
- FAO (2013). *FAOSTAT*, Rome: FAO. Available from: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> (accessed 6 May 2015).
- FENG, G., ZHANG, F. S., LI, X. L., TIAN, C. Y., TANG, C. & RENGEL, Z. (2002). Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots. *Mycorrhiza* **12**, 185–190.
- FITTER, A. H. (1988). Water relations of red clover *Trifolium pratense* L. as affected by VA mycorrhizal infection and phosphorus supply before and during drought. *Journal of Experimental Botany* **39**, 595–603.
- FRANCO, A. D., CARRILLO, M. A., CHAIREZ, F. O. & CABRERA, O. G. (2013). Plant nutrition and fruit quality of pepper associated with arbuscular mycorrhizal in greenhouse. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **4**, 315–321.
- FRANKEN, P. (2010). Molecular-physiological aspects of the AM symbiosis post penetration. In *Arbuscular*

- Mycorrhizas: Physiology and Function* (Eds H. Koltai & Y. Kapulnik), pp. 93–116. New York: Springer.
- FRARY, A. & FRARY, A. (2012). Physiology of metabolites. In *Peppers: Botany, Production and Uses* (Ed. V. M. Russo), pp. 176–188. Wallingford, UK: CABI.
- FRITZ, M., JAKOBSEN, I., LYNKJAER, M. F., THORDAL-CHRISTENSEN, H. & PONS-KUEHNEMANN, J. (2006). Arbuscular mycorrhiza reduces susceptibility of tomato to *Alternaria solani*. *Mycorrhiza* **16**, 413–419.
- GARCÍA, F. R. (2003). *Concentración de reguladores del desarrollo vegetal inducida por hongos endomicorrízicos en dos cultivares de chile (Capsicum annuum L.)*. PhD thesis, Universidad de Colima, Mexico.
- GARCÍA-GARRIDO, J. M. & OCAMPO, J. A. (2002). Regulation of the plant defence response in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Journal of Experimental Botany* **53**, 1377–1386.
- GARMENDIA, I., GOICOECHEA, N. & AGUIRREOLEA, J. (2004a). Effectiveness of three *Glomus* species in protecting pepper (*Capsicum annuum* L.) against verticillium wilt. *Biological Control* **31**, 296–305.
- GARMENDIA, I., GOICOECHEA, N. & AGUIRREOLEA, J. (2004b). Plant phenology influences the effect of mycorrhizal fungi on the development of *Verticillium*-induced wilt in pepper. *European Journal of Plant Pathology* **110**, 227–238.
- GARMENDIA, I., GOICOECHEA, N. & AGUIRREOLEA, J. (2004c). Antioxidant metabolism in asymptomatic leaves of *Verticillium*-infected pepper associated with an arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Phytopathology* **152**, 593–599.
- GARMENDIA, I., AGUIRREOLEA, J. & GOICOECHEA, N. (2006). Defence-related enzymes in pepper roots during interactions with arbuscular mycorrhizal fungi and/or *Verticillium dahliae*. *BioControl* **51**, 293–310.
- GAUR, A. & ADHOLEYA, A. (2004). Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science* **86**, 528–534.
- GAUR, A., ADHOLEYA, A. & MUKERJI, K. G. (1998). A comparison of AM fungi inoculants using *Capsicum* and *Polianthes* in marginal soil amended with organic matter. *Mycorrhiza* **7**, 307–312.
- GEORGE, E., HÄUSSLER, K. U., VETTERLEIN, D., GORGUS, E. & MARSCHNER, H. (1992). Water and nutrient translocation by hyphae of *Glomus mosseae*. *Canadian Journal of Botany* **70**, 2130–2137.
- GIOVANNETTI, M., AVIO, L. & SBRANA, C. (2010). Fungal spore germination and pre-symbiotic mycelial growth: physiological and genetic aspects. In *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function* (Eds H. Koltai & Y. Kapulnik), pp. 3–32. New York: Springer.
- GIRI, B., KAPOOR, R. & MUKERJI, K. G. (2007). Improved tolerance of *Acacia nilotica* to salt stress by arbuscular mycorrhiza, *Glomus fasciculatum*, may be partly related to elevated K/Na ratios in root and shoot tissues. *Microbial Ecology* **54**, 753–760.
- GOICOECHEA, N., ANTOLÍN, M. C. & SÁNCHEZ-DÍAZ, M. (1997). Gas exchange related the hormone balance in mycorrhizal or fixing alfalfa subjected to drought. *Physiologia Plantarum* **100**, 989–997.
- GOICOECHEA, N., SZALAI, G., ANTOLÍN, M. C., SÁNCHEZ-DÍAZ, M. & PALDI, E. (1998). Influence of arbuscular mycorrhizae and *Rhizobium* on free polyamines and proline levels in water-stressed alfalfa. *Journal of Plant Physiology* **153**, 706–711.
- GOICOECHEA, N., GARMENDIA, I., SÁNCHEZ-DÍAZ, M. & AGUIRREOLEA, J. (2010). Review. Arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) as bioprotector agents against wilt induced by *Verticillium* spp. in pepper. *Spanish Journal of Agricultural Research* **8**, S25–S42.
- GONZALEZ-CHAVEZ, C., HARRIS, P. J., DODD, J. & MEHARG, A. A. (2002). Arbuscular mycorrhizal fungi confer enhanced arsenate resistance on *Holcus lanatus*. *New Phytologist* **155**, 163–171.
- GONZÁLEZ, C. A. L., NAVARRO, D. O. L., HERRERA, A. L., FLORES, M. L., LOZANO, A. G. B., MEJÍA, J. J. A. & LLAMAS, J. J. L. (2010). Evaluación de biofertilizantes em cultivos de chile (*Capsicum annuum* L.) en el estado de Zacatecas. In *Memorias Primer Foro para Productores de Chile* (Eds A. L. Herrera, A. G. B. Lozano & M. R. Hernández), pp. 204–217. Zacatecas, Mexico: Consejo Estatal de Productores de Chile.
- GOSLING, P., HODGE, A., GOODLASS, G. & BENDING, G. D. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **113**, 17–35.
- GRATÃO, P. L., MONTEIRO, C. C., ANTUNES, A. M., PERES, L. E. P. & AZEVEDO, R. A. (2008). Acquired tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Micro-Tom) plants to cadmium-induced stress. *Annals of Applied Biology* **153**, 321–333.
- HAMMER, E. C., NASR, H., PALLON, J., OLSSON, P. A. & WALLANDER, H. (2011). Elemental composition of arbuscular mycorrhizal fungi at high salinity. *Mycorrhiza* **21**, 117–129.
- HARDIE, K. (1985). The effect of removal of extraradical hyphae on water uptake by vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *New Phytologist* **101**, 677–684.
- HATTINGH, M. J., GRAY, L. E. & GERDEMANN, J. W. (1973). Uptake and translocation of <sup>32</sup>P-labeled phosphate to onion roots by endomycorrhizal fungi. *Soil Science* **116**, 383–387.
- HAUSE, B., MROSK, C., ISAYENKOV, S. & STRACK, D. (2007). Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions. *Phytochemistry* **68**, 101–110.
- HIRREL, M. C. & GERDEMANN, J. W. (1980). Improved growth of onion and bell pepper in saline soils by two vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science Society of America Journal* **44**, 654–655.
- IBRAHIM, M., HASSAN, A. U., IQBAL, M. & VALEEM, E. E. (2008). Response of wheat growth and yield to various levels of compost and organic manure. *Pakistan Journal of Botany* **40**, 2135–2141.
- JAHROMI, F., AROCA, R., PORCEL, R. & RUIZ-LOZANO, J. M. (2008). Influence of salinity on the in vitro development of *Glomus intraradices* and on the in vivo physiological and molecular responses of mycorrhizal lettuce plants. *Microbial Ecology* **55**, 45–53.
- JANSA, J., MOZAFAR, A. & FROSSARD, E. (2003). Long-distance transport of P and Zn through the hyphae of an arbuscular



- mycorrhizal fungus in symbiosis with maize. *Agronomie* **23**, 481–488.
- JAVOT, H., PUMPLIN, N. & HARRISON, M. J. (2007). Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell & Environment* **30**, 310–322.
- JONER, E. J. & JAKOBSEN, I. (1995). Growth and extracellular phosphatase activity of arbuscular mycorrhizal hyphae as influenced by soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* **27**, 1153–1159.
- JONER, E. J., BRIONES, R. & LEYVAL, C. (2000). Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. *Plant and Soil* **226**, 227–234.
- JOO, J. I., KIM, D. H., CHOI, J. W. & YUN, J. W. (2010). Proteomic analysis for antiobesity potential of capsaicin on white adipose tissue in rats fed with a high fat diet. *Journal of Proteome Research* **9**, 2977–2987.
- KAYA, C., ASHRAF, M., SONMEZ, O., AYDEMIR, S., TUNA, A. L. & CULLU, M. A. (2009). The influence of arbuscular mycorrhizal colonisation on key growth parameters and fruit yield of pepper plants grown at high salinity. *Scientia Horticulturae* **121**, 1–6.
- KIM, K. Y., CHO, Y. S., SOHN, B. K., PARK, R. D., SHIM, J. H., JUNG, S. J., KIM, Y. W. & SEONG, K. Y. (2002). Cold-storage of mixed inoculum of *Glomus intraradices* enhances root colonization, phosphorus status and growth of hot pepper. *Plant and Soil* **238**, 267–272.
- KIM, K., YIM, W., TRIVEDI, P., MADHAIYAN, M., BORUAH, H. P. D., ISLAM, M. R., LEE, G. & SA, T. (2010). Synergistic effects of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi and *Methylobacterium oryzae* strains on growth and nutrient uptake of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plant and Soil* **327**, 429–440.
- KIRIACHEK, S. G., AZEVEDO, L. C. B., PERES, L. E. P. & LAMBAIS, M. R. (2009). Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **33**, 1–16.
- KISHOR, P. B. K., SANGAM, S., AMRUTHA, R. N., LAXMI, P. S., NAIDU, K. R., RAO, K. R. S. S., RAO, S., REDDY, K. J., THERIAPPAN, P. & SREENIVASULU, N. (2005). Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science* **88**, 424–438.
- KNOTKOVA, H., PAPPAGALLO, M. & SZALLASI, A. (2008). Capsaicin (TRPV1 Agonist) therapy for pain relief: farewell or revival? *Clinical Journal of Pain* **24**, 142–154.
- KOREL, F., BAĞDATLIOĞLU, N., BALABAN, M. Ö. & HISIL, Y. (2002). Ground red peppers: capsaicinoids content, Scoville scores, and discrimination by an electronic nose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **50**, 3257–3261.
- KOSUGE, S. & FURUTA, M. (1970). Studies on the pungent principle of *Capsicum*. Part XIV chemical constitution of the pungent principle. *Agricultural and Biological Chemistry* **34**, 248–256.
- KOTHARI, S. K., MARSCHNER, H. & GEORGE, E. (1990). Effect of VA mycorrhizal fungi and rhizosphere microorganisms on root and shoot morphology, growth and water relations in maize. *New Phytologist* **116**, 303–311.
- LAMBAIS, M. R. (2000). Regulation of plant defense-related genes in arbuscular mycorrhizae. In *Current Advances in Mycorrhizae Research* (Eds G. K. Podila & D. D. Douds, Jr.), pp. 46–60. St. Paul, MN, USA: American Phytopathological Society Press.
- LATEF, A. A. H. A. (2011). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and copper on growth, accumulation of osmolyte, mineral nutrition and antioxidant enzyme activity of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Mycorrhiza* **21**, 495–503.
- LEE, Y. J. & GEORGE, E. (2005). Contribution of mycorrhizal hyphae to the uptake of metal cations by cucumber plants at two levels of phosphorus supply. *Plant and Soil* **278**, 361–370.
- LEUNG, F. W. (2008). Capsaicin-sensitive intestinal mucosal afferent mechanism and body fat distribution. *Life Sciences* **83**, 1–5.
- LEYVAL, C. & JONER, E. J. (2001). Bioavailability of heavy metals in the mycorrhizosphere. In *Trace Metals in the Rhizosphere* (Eds R. G. Gobran, W. W. Wenzel & E. Lombi), pp. 165–185. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- LI, X. L., MARSCHNER, H. & GEORGE, E. (1991). Acquisition of phosphorus and copper by VA-mycorrhizal hyphae and root-to-shoot transport in white clover. *Plant and Soil* **136**, 49–57.
- LINDERMAN, R. G. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhizae and soil microbial interactions. In *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture* (Eds G. J. Bethlenfalvai & R. G. Linderman), pp. 45–70. ASA Special Publication 54. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy.
- LINDERMAN, R. G. (2000). Effects of mycorrhizas on plant tolerance to diseases. In *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function* (Eds Y. Kapulnik & D. D. Douds, Jr.), pp. 345–365. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- LIU, J., XIONG, Z. T., LI, T. Y. & HUANG, H. (2004). Bioaccumulation and ecophysiological responses to copper stress in two populations of *Rumex dentatus* L. from Cu contaminated and non-contaminated sites. *Environmental and Experimental Botany* **52**, 43–51.
- LIU, J., MALDONADO-MENDOZA, I., LOPEZ-MEYER, M., CHEUNG, F., TOWN, C. D. & HARRISON, M. J. (2007). Arbuscular mycorrhizal symbiosis is accompanied by local and systemic alterations in gene expression and an increase in disease resistance in the shoots. *The Plant Journal* **50**, 529–544.
- LOAIZA-FIGUEROA, F., RITLAND, K., CANCINO, J. A. L. & TANKSLEY, S. D. (1989). Patterns of genetic variation of the genus *Capsicum* (*Solanaceae*) in Mexico. *Plant Systematics and Evolution* **165**, 159–188.
- LÓPEZ, P., GORZALCZANY, S., ACEVEDO, C., ALONSO, R. & FERRARO, G. (2012). Chemical study anti-inflammatory activity of *Capsicum chacoense* and *C. baccatum*. *Revista Brasileira de Farmacognosia* **22**, 455–458.
- LUCY, M., REED, E. & GLICK, B. R. (2004). Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek* **86**, 1–25.
- LUGTENBERG, B. J. J., DE WEGER, L. A. & BENNETT, J. W. (1991). Microbial stimulation of plant growth and protection from disease. *Current Opinion in Biotechnology* **2**, 457–464.
- MAAS, E. V. & HOFFMAN, G. J. (1977). Crop salt tolerance – current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* **103**, 115–134.

- MARIHAL, A. K., PRADEEP, S. M. & JAGADEESH, K. S. (2011). Effect of commercial mycorrhizal inoculant on growth and yield of chilli (*Capsicum annum* L.) in field conditions. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* **24**, 589–590.
- MÁRQUEZ-GARCÍA, B. & CÓRDOBA, F. (2010). Antioxidative system in wild populations of *Erica andevalensis*. *Environmental and Experimental Botany* **68**, 58–65.
- MARSCHNER, P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. London: Academic Press.
- MARTIN, C. A. & STUTZ, J. C. (2004). Interactive effects of temperature and arbuscular mycorrhizal fungi on growth, P uptake and root respiration of *Capsicum annum* L. *Mycorrhiza* **14**, 241–244.
- MCCORD, J. M. (2000). The evolution of free radicals and oxidative stress. *The American Journal of Medicine* **108**, 652–659.
- MENA-VIOLANTE, H. G., OCAMPO-JIMÉNEZ, O., DENDOOVEN, L., MARTÍNEZ-SOTO, G., GONZÁLEZ-CASTAÑEDA, J., DAVIES, F. T. Jr. & OLALDE-PORTUGAL, V. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile ancho (*Capsicum annum* L. cv San Luis) plants exposed to drought. *Mycorrhiza* **16**, 261–267.
- MIEAN, K. H. & MOHAMED, S. (2001). Flavonoid (myricetin, quercetin, kaempferol, luteolin, and apigenin) content of edible tropical plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **49**, 3106–3112.
- MITTLER, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science* **7**, 405–410.
- MORAN, J. F., BECANA, M., ITURBE-ORMAETXE, I., FRECHILLA, S., KLUCAS, R. V. & APARICIO-TEJO, P. (1994). Drought induces oxidative stress in pea plants. *Planta* **194**, 346–352.
- MUN, H. T., KIM, C. K. & CHOE, D. M. (1990). Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizae on the growth of bell pepper and corn seedlings. *The Korean Journal of Ecology* **13**, 1–8.
- MUNNS, R. & TESTER, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* **59**, 651–681.
- NAVARRO, J. M., GARRIDO, C., MARTÍNEZ, V. & CARVAJAL, M. (2003). Water relations and xylem transport of nutrients in pepper plants grown under two different salts stress regimes. *Plant Growth Regulation* **41**, 237–245.
- NIU, G. H. (2012). Salt tolerance in pepper (*Capsicum* spp.). In *Peppers: Botany, Production and Uses* (Ed. V. M. Russo), pp. 150–164. Wallingford: CABI.
- NIU, G. & CABRERA, R. I. (2010). Growth and physiological responses of landscape plants to saline water irrigation: a review. *HortScience* **45**, 1605–1609.
- NIU, G., RODRIGUEZ, D. S., CABRERA, R., JIFON, J., LESKOVAR, D. & CROSBY, K. (2010). Salinity and soil type effects on emergence and growth of pepper seedlings. *HortScience* **45**, 1265–1269.
- OH, H. S., KIM, Y. S., LIM, S. C., HOU, Y. F., CHANG, I. Y. & YOU, H. J. (2008). Dihydrocapsaicin (DHC), a saturated structural analog of capsaicin, induces autophagy in human cancer cells in a catalase-regulated manner. *Autophagy* **4**, 1009–1019.
- ORTAS, I., SARI, N. & AKPINAR, Ç. (2003). Effect of mycorrhizal inoculation and soil fumigation on the yield and nutrient uptake of some solanaceas crops (tomato, eggplant and pepper) under field conditions. *Agricoltura Mediterranea* **133**, 249–258.
- ORTAS, I., SARI, N., AKPINAR, Ç. & YETISIR, H. (2011). Screening mycorrhiza species for plant growth, P and Zn uptake in pepper seedling grown under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae* **128**, 92–98.
- OYETUNJI, O. J. & SALAMI, A. O. (2011). Study on the control of *Fusarium* wilt in the stems of mycorrhizal and trichoderma inoculated pepper (*Capsicum annum* L.). *Journal of Applied Biosciences* **45**, 3071–3080.
- OZGONEN, H. & ERKILIC, A. (2007). Growth enhancement and *Phytophthora* blight (*Phytophthora capsici* Leonian) control by arbuscular mycorrhizal fungal inoculation in pepper. *Crop Protection* **26**, 1682–1688.
- OZGONEN, H., YARDIMCI, N. & KILIC, H. C. (2009). Induction of phenolic compounds and pathogenesis-related proteins by mycorrhizal fungal inoculations against *Phytophthora capsici* Leonian in pepper. *Pakistan Journal of Biological Sciences* **12**, 1181–1187.
- PASTERNAK, D. & MALACH, Y. D. (1994). Crop irrigation with saline water. In *Handbook of Plant and Crop Stress* (Ed. M. Pessarakli), pp. 599–622. New York: Marcel Dekker.
- PERNER, H., SCHWARZ, D., BRUNS, C., MADER, P. & GEORGE, E. (2007). Effect of arbuscular mycorrhizal colonization and two levels of compost supply on nutrient uptake and flowering of pelargonium plants. *Mycorrhiza* **17**, 469–474.
- PERRY, L. (2012). Ethnobotany. In *Peppers: Botany, Production and Uses* (Ed. V. M. Russo), pp. 1–13. Wallingford: CABI.
- PETERSON, R. L., MASSICOTTE, H. B. & MELVILLE, L. H. (2004). *Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology*. Ottawa: National Research Council of Canada.
- POZO, M. J., CORDIER, C., DUMAS-GAUDOT, E., GIANINAZZI, S., BAREA, J. M. & AZCÓN-AGUILAR, C. (2002). Localized versus systemic effect of arbuscular mycorrhizal fungi on defence responses to *Phytophthora* infection in tomato plants. *Journal of Experimental Botany* **53**, 525–534.
- POZO, M. J., JUNG, S. C., LÓPEZ-RÁEZ, J. A. & AZCÓN-AGUILAR, C. (2010). Impact of arbuscular mycorrhizal symbiosis on plant response to biotic stress: the role of plant defence mechanisms. In *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function* (Eds H. Koltai & Y. Kapulnik), pp. 193–207. New York: Springer.
- POZZOBON, M. T., SCHIFINO-WITTMANN, M. T. & BIANCHETTI, L. B. (2006). Chromosome numbers in wild and semidomesticated Brazilian *Capsicum* L. (Solanaceae) species: do  $x = 12$  and  $x = 13$  represent two evolutionary lines? *Botanical Journal of the Linnean Society* **151**, 259–269.
- REDECKER, D., SCHÜBLER, A., STOCKINGER, H., STÜRMER, S. L., MORTON, J. B. & WALKER, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomeromycota*). *Mycorrhiza* **23**, 515–531.
- REGVAR, M., VOGEL-MIKUŠ, K. & ŠEVERKAR, T. (2003). Effect of AM fungi inoculum from field isolates on the yield of green pepper, parsley, carrot, and tomato. *Folia Geobotanica* **38**, 223–234.
- RHODES, L. H. & GERDEMANN, J. W. (1978). Hyphal translocation and uptake of sulfur by vesicular arbuscular

- mycorrhizae of onion. *Soil Biology and Biochemistry* **10**, 355–360.
- RODRIGUES, E. P., RODRIGUES, L. S., OLIVEIRA, A. L. M., BALDANI, V. L. D., TEIXEIRA, K. R. S., URQUIAGA, S. & REIS, V. M. (2008). *Azospirillum amazonense* inoculation: effects on growth, yield and N<sub>2</sub> fixation of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil* **302**, 249–261.
- ROJAS-ANDRADE, R., CERDA-GARCÍA-ROJAS, C. M., FRÍAZ-HERNÁNDEZ, J. T., DENDOOVEN, L., OLALDE-PORTUGAL, V. & RAMOS-VALDIVIA, A. C. (2003). Changes in the concentration of trigonelline in a semi-arid leguminous plant (*Prosopis laevigata*) induced by an arbuscular mycorrhizal fungus during the presymbiotic phase. *Mycorrhiza* **13**, 49–52.
- ROSEND AHL, C. N. & ROSENDAHL, S. (1991). Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.) on the response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to salt stress. *Environmental and Experimental Botany* **31**, 313–318.
- ROZEMA, J. & FLOWERS, T. (2008). Crops for a salinized world. *Science* **322**, 1478–1480.
- RUEDA-PUENTE, E. O., MURILLO-AMADOR, B., CASTELLANOS-CERVANTES, T., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L., TARAZÓN-HERRERA, M. A., MEDINA, S. M. & BARRERA, L. E. G. (2010). Effects of plant growth promoting bacteria and mycorrhizal on *Capsicum annuum* L. var. *aviculare* ([Dierbach] D'Arcy and Eshbaugh) germination under stressing abiotic conditions. *Plant Physiology and Biochemistry* **48**, 724–730.
- RUIZ-LOZANO, J. M., AZCÓN, R. & GÓMEZ, M. (1995). Effects of arbuscular-mycorrhizal *Glomus* species on drought tolerance: physiological and nutritional plant responses. *Applied and Environmental Microbiology* **61**, 456–460.
- RUIZ-LOZANO, J. M., AZCON, R. & GOMEZ, M. (1996). Alleviation of salt stress by arbuscular mycorrhizal *Glomus* species in *Lactuca sativa* plants. *Physiologia Plantarum* **98**, 767–772.
- RUSCITTI, M., ARANGO, M., RONCO, M. & BELTRANO, J. (2011). Inoculation with mycorrhizal fungi modifies proline metabolism and increases chromium tolerance in pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Brazilian Journal of Plant Physiology* **23**, 15–25.
- RUSO, V. M. (2006). Biological amendment, fertilizer rate, and irrigation frequency for organic bell pepper transplant production. *HortScience* **41**, 1402–1407.
- RUSO, V. M. & PERKINS-VEAZIE, P. (2010). Yield and nutrient content of bell pepper pods from plants developed from seedlings inoculated, or not, with microorganisms. *HortScience* **45**, 352–358.
- RYAN, M. H., MCINERNEY, J. K., RECORD, I. R. & ANGUS, J. F. (2008). Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **88**, 1208–1216.
- SAFIR, G. R., BOYER, J. S. & GERDEMANN, J. W. (1972). Nutrient status and mycorrhizal enhancement of water transport in soybean. *Plant Physiology* **49**, 700–703.
- SARWADE, P. P., CHANDANSHIVE, S. S., KANADE, M. B., AMBUSE, M. G. & BHALE, U. N. (2011). Growth effect of *Capsicum annum* var. Jwala plants inoculated with *Glomus fasciculatum* and *Trichoderma* species. *International Multidisciplinary Research Journal* **1** (12), 13–16.
- SCHREINER, P. R., IVORS, K. L. & PINKERTON, J. N. (2001). Soil solarization reduces arbuscular mycorrhizal fungi as a consequence of weed suppression. *Mycorrhiza* **11**, 273–277.
- SCHÜTZENDÜBEL, A. & POLLE, A. (2002). Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of Experimental Botany* **53**, 1351–1365.
- SCHÜBLER, A., SHWARZOTT, D. & WALKER, C. (2001). A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research* **105**, 1413–1421.
- SELVAKUMAR, G. & THAMIZHINIYAN, P. (2011). The effect of the arbuscular mycorrhizal (AM) fungus *Glomus intraradices* on the growth and yield of chilli (*Capsicum annuum* L.) under salinity stress. *World Applied Sciences Journal* **14**, 1209–1214.
- SENSOY, S., DEMIR, S., TÜRKMEN, O., ERDINC, C. & SAVUR, O. B. (2007). Responses of some different pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes to inoculation with two different arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientia Horticulturae* **113**, 92–95.
- SHANNON, M. C. & GRIEVE, C. M. (1998). Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae* **78**, 5–38.
- SHARIF, M. & CLAASSEN, N. (2011). Action mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in phosphorus uptake by *Capsicum annuum* L. *Pedosphere* **21**, 502–511.
- SILVA, D. J. F., SCHERER, B. S., ALVES, M. K. & OLIVEIRA, J. R. (2009). Determinação do potencial antioxidante do extrato filtrado de *Capsicum baccatum* (pimenta dedo-de-moça) através do método DPPH. In *Anais do X Salão de Iniciação Científica – PUCRS*, pp. 56–58. Rio Grande do Sul: EDIPUCRS.
- SMITH, S. E. & READ, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. London: Academic Press.
- SMITH, F. A., JAKOBSEN, I. & SMITH, S. E. (2000). Spatial differences in acquisition of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Medicago truncatula*. *New Phytologist* **147**, 357–366.
- SREENIVASA, M. N. (1992). Selection of an efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus for chilli (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae* **50**, 53–58.
- SREENIVASA, M. N., KRISHNARAJ, P. U., GANGADHARA, G. A. & MANJUNATHAIAH, H. M. (1993). Response of chilli (*Capsicum annuum* L.) to the inoculation of an efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *Scientia Horticulturae* **53**, 45–52.
- SREERAMULU, K. R. & BAGYARAJ, D. J. (1986). Field response of chilli to VA mycorrhiza on black clayey soil. *Plant and Soil* **93**, 299–302.
- ST JOHN, T. V., COLEMAN, D. C. & REID, C. P. P. (1983). Association of vesicular-arbuscular mycorrhizal hyphae with soil organic particles. *Ecology* **64**, 957–959.
- STRACK, D. & FESTER, T. (2006). Isoprenoid metabolism and plastid reorganization in arbuscular mycorrhizal roots. *New Phytologist* **172**, 22–34.
- STRACK, D., FESTER, T., HAUSE, B., SCHLIEMANN, W. & WATER, M. H. (2003). Review paper: Arbuscular mycorrhiza: biological, chemical and molecular aspects. *Journal of Chemical Ecology* **29**, 1955–1979.

- TALLAPRAGADA, P., RAJIV, R., ANJANAPPA, V., SARDESAI, S., SELVARAJ, S. & KHAN, S. (2011). Comparing the potential of spent mycelium substrate of *Pleurotus florida* with bio-fertilizers to enhance growth of *Capsicum annuum*. *Asian Journal of Plant Science and Research* **1**, 76–86.
- TANWAR, A., AGGARWAL, A., KADIAN, N. & GUPTA, A. (2013). Arbuscular mycorrhizal inoculation and super phosphate application influence plant growth and yield of *Capsicum annuum*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **13**, 55–66.
- THOENNISSEN, N. H., O'KELLY, J., LU, D., IWANSKI, G. B., LA, D. T., ABBASSI, S., LEITER, A., KARLAN, B., MEHTA, R. & KOEFFLER, H. P. (2010). Capsaicin causes cell-cycle arrest and apoptosis in ER-positive and -negative breast cancer cells by modulating the EGFR/HER-2 pathway. *Oncogene* **29**, 285–296.
- TOLER, H. D., MORTON, J. B. & CUMMING, J. R. (2005). Growth and metal accumulation of mycorrhizal shorgum exposed to elevated copper and zinc. *Water, Air, and Soil Pollution* **164**, 155–172.
- TROTTA, A., VARESE, G. C., GNAVI, E., FUSCONI, A., SAMPÒ, S. & BERTA, G. (1996). Interactions between the soilborne root pathogen *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* in tomato plants. *Plant and Soil* **185**, 199–209.
- TÜRKMEN, O., DEMİR, S., SENSOY, S. & DURSUN, A. (2005). Effects of arbuscular mycorrhizal fungus and humic acid on the seedling development and nutrient content of pepper grown under saline soil conditions. *Journal of Biological Sciences* **5**, 568–574.
- TÜRKMEN, O., SENSOY, S., DEMİR, S. & ERDINC, C. (2008). Effects of two different AM fungi species on growth and nutrient content of pepper seedlings grown under moderate salt stress. *African Journal of Biotechnology* **7**, 392–396.
- VYAS, M. & VYAS, A. (2012). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with rhizosphere of *Capsicum annuum* in Western Rajasthan. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences* **2**, 256–262.
- WAHID, O. A. A. & MEHANA, T. A. (2000). Impact of phosphate-solubilizing fungi on the yield and phosphorus uptake by wheat and faba bean plants. *Microbiological Research* **155**, 221–227.
- WANG, B., FUNAKOSHI, D. M., DALPÉ, Y. & HAMEL, C. (2002). Phosphorus-32 absorption and translocation to host plants by arbuscular mycorrhizal fungi at low root-zone temperature. *Mycorrhiza* **12**, 93–96.
- WONG, G. Y. & GAVVA, N. R. (2009). Therapeutic potential of vanilloid receptor TRPV1 agonists and antagonists: Recent advances and setbacks. *Brain Research Reviews* **60**, 267–277.
- YANG, Z. H., WANG, X. H., WANG, H. P., HU, L. Q., ZHENG, X. M. & LI, S. W. (2010). Capsaicin mediates cell death in bladder cancer T<sub>24</sub> cells through reactive oxygen species production and mitochondrial depolarization. *Urology* **75**, 735–741.
- YUAN, Z-L., DAI, C-C. & CHEN, L-Q. (2007). Regulation and accumulation of secondary metabolites in plant–fungus symbiotic system. *African Journal of Biotechnology* **6**, 1266–1271.
- YÜCEL, S. (1995). A study on soil solarization and combined with fumigant application to control *Phytophthora crown blight* (*Phytophthora capsici* Leonian) on peppers in the East Mediterranean region of Turkey. *Crop Protection* **14**, 653–655.
- ZHANG, J., SCHURR, U. & DAVIES, W. J. (1987). Control of stomatal behavior by abscisic acid which apparently originates in the roots. *Journal of Experimental Botany* **38**, 1174–1181.

### 3.2. EFEITOS DO FÓSFORO E FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES SOBRE O CRESCIMENTO E A PRODUÇÃO DE *Capsicum annuum* L. var. *annuum*

Resumo - Foi realizado um experimento em casa de vegetação para avaliar os efeitos da aplicação de fósforo (P) e inoculação micorrízica sobre o crescimento e a produção de frutos de pimenteira (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*). As plantas foram cultivadas em vasos contendo solo e areia (2:1) e inoculadas ou não com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (*Rhizophagus clarus* e *Claroideoglossum etunicatum*). Cinco doses de P (0, 25, 50, 75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>) com e sem inoculação micorrízica foram aplicadas. Após 150 dias, a altura e o diâmetro das plantas inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram um aumento de 434% e 242%, na dose 0 mg/dm<sup>3</sup>, e 78% e 44%, na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente, comparado ao tratamento sem inoculação em cada dose. Também houve um incremento de 6017%, 5625% e 6866% na área foliar, massa fresca e seca da folha, respectivamente, de plantas cultivadas na dose 0 mg/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *R. clarus*. Além disso, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 275% e 287% na área foliar e massa fresca da folha de plantas cultivadas na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, comparado às plantas sem inoculação. A inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 3943% e 6014% na massa fresca e seca do caule, respectivamente, na dose 0 mg/dm<sup>3</sup> em relação às plantas não inoculadas. Enquanto na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, as plantas inoculadas com *R. clarus* obtiveram um incremento de 93% e 108% na massa fresca e seca do caule, respectivamente. Além disso, a inoculação com *C. etunicatum*

proporcionou um aumento de 4217% e 7133% na massa fresca e seca da raiz de plantas cultivadas na dose 0 mg/dm<sup>3</sup>, comparado às plantas sem inoculação. Enquanto na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, as plantas inoculadas com *R. clarus* obtiveram um incremento de 47% e 96% na massa fresca e seca da raiz, respectivamente. A inoculação com *R. clarus* mostrou-se mais eficiente na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, apresentando um aumento de 149% no número de frutos por planta, comparado ao tratamento sem fungo. Além disso, a inoculação com *R. clarus* foi 25% maior do que a inoculação com *C. etunicatum* para a porcentagem de colonização micorrízica, na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>. É importante ressaltar que a colonização radicular de plantas inoculadas com *R. clarus* tendeu a diminuir com o aumento da concentração de P no solo. De maneira geral, a utilização tanto de *R. clarus* como *C. etunicatum* associada à aplicação de 0 a 25 mg P/dm<sup>3</sup> no solo, promoveu um bom desempenho no que se refere ao crescimento de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* cultivadas em vaso e em casa de vegetação. Do ponto de vista da produção de frutos, a inoculação com *R. clarus* em solos com aplicação de 25 mg P/dm<sup>3</sup>, é mais recomendável para a cultura.

Palavras-chave: Pimenteira, colonização micorrízica, *R. clarus*, *C. etunicatum*.

#### EFFECTS OF PHOSPHORUS AND ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON GROWTH AND YIELD OF *Capsicum annuum* L. var. *annuum*

Abstract - An experiment was conducted under greenhouse conditions to evaluate the effects of the application of phosphorus (P) and mycorrhizal inoculation on growth and fruit yield of pepper (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*). The plants were grown in pots containing soil and sand (2:1) and inoculated or not with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) (*Rhizophagus clarus* and *Claroideoglossum etunicatum*). Five doses of P (0, 25, 50, 75 and 100 mg/dm<sup>3</sup>) with and without mycorrhizal inoculation have been applied. After 150 days, the height and diameter of plants inoculated with *C. etunicatum* increased by 434% and 242%, at the dose 0 mg/dm<sup>3</sup>, and 78% and 44% at the dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, respectively,

compared to without inoculation treatment at each dose. There was also an increase of 6017%, 5625% and 6866% in leaf area, leaf fresh and dry weight, respectively, of plants grown at the dose 0 mg/dm<sup>3</sup> and inoculated with *R. clarus*. Moreover, inoculation with *C. etunicatum* provided an increase of 275% and 287% in leaf area and leaf fresh weight of plants grown at the dose 25 mg/dm<sup>3</sup> compared to plants without inoculation. Inoculation with *C. etunicatum* provided an increase of 3943% and 6014% in stem fresh and dry weight, respectively, at the dose 0 mg/dm<sup>3</sup> compared to non-inoculated plants. While at the dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, plants inoculated with *R. clarus* obtained an increase of 93% and 108% in stem fresh and dry weight, respectively. Moreover, inoculation with *C. etunicatum* provided an increase of 4217% and 7133% in root fresh and dry weight of plants grown at the dose 0 mg/dm<sup>3</sup> compared to plants without inoculation. While at the dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, plants inoculated with *R. clarus* obtained an increase of 47% and 96% in root fresh and dry weight, respectively. Inoculation with *R. clarus* was more effective at the dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, which provided an increase of 149% in the number of fruits per plant, compared to treatment without fungus. Moreover, inoculation with *R. clarus* was 25% higher than inoculation with *C. etunicatum* for percentage root colonization, at the dose 25 mg/dm<sup>3</sup>. It is noteworthy that the root colonization of plants inoculated with *R. clarus* tended to decrease with increasing concentration of P in the soil. In general, the use of both *R. clarus* and *C. etunicatum* associated with application of 0 to 25 mg P/dm<sup>3</sup> in the soil, promoted a good performance of *Capsicum annuum* L. var. *annuum* related to growth and yield under greenhouse condition. Regarding to fruit yield, inoculation with *R. clarus* in soils with application of 25 mg P/dm<sup>3</sup> is most recommended for the crop.

Keywords: Pepper plant, mycorrhizal colonization, *R. clarus*, *C. etunicatum*.

## INTRODUÇÃO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) estão associados a raízes de mais de 80% das espécies de plantas terrestres no planeta. Esta relação ecológica entre fungos do solo e raízes de plantas, ocorre desde regiões polares

até os trópicos e em regiões úmidas a áridas (Schü ler et al. 2001). O principal benefício promovido pelos fungos às plantas inclui o aumento na absorção de nutrientes, especialmente o fósforo (P) (Linderman 1992). Além disso, FMA melhoram as relações hídricas, aumentam a resistência ou tolerância a estresses bióticos e abióticos (Smith & Read 2008), e melhoram a estrutura e contribuem para fertilidade do solo (Wright & Upadhyaya 1998).

A relação entre plantas e FMA normalmente é descrita como mutuamente benéfica, onde ocorre um fluxo de carbono para o fungo, enquanto nutrientes inorgânicos movem-se para a planta (Smith & Read 2008). As hifas dos FMA são as principais responsáveis pelo papel da associação micorrízica sobre a nutrição fosfatada, já que elas absorvem o P da solução do solo e o translocam para as raízes em uma velocidade superior à difusão deste elemento através do solo, sendo capazes de transpor as zonas de depleção de P que se formam em volta das raízes. Ainda, o menor diâmetro das hifas permite uma maior exploração do volume de solo (Smith & Read, 2008).

O fósforo tem grande importância no desenvolvimento do FMA, regulando principalmente a taxa de crescimento fúngico intrarradicular. Normalmente, altas concentrações de P inibem a colonização das raízes, enquanto baixas concentrações favorecem a colonização intrarradicular (Kiriachek et al. 2009). Isso parece ser um fenômeno comum, embora os mecanismos regulatórios desse processo não tenham sido completamente elucidados (Smith & Read 2008).

Assim como outras espécies de plantas que são capazes de estabelecer uma associação simbiótica com fungos do solo, quando o solo tem baixa disponibilidade de nutrientes, raízes de *Capsicum* spp. tipicamente formam micorrizas arbusculares (Davies Jr et al. 1992). Logo, a atividade simbiótica que os FMA apresentam pode constituir em uma importante alternativa para o aumento da produtividade da cultura.

O gênero *Capsicum* pertence à família das solanáceas e compreende 36 taxa, incluindo espécies e variedades botânicas, todas nativas das regiões tropicais das Américas (Pozzobon et al. 2006). Cinco espécies (*C. annuum*, *C. frutescens*, *C. baccatum*, *C. pubescens* e *C. chinense*) são consideradas domesticadas, apresentando variada distribuição por toda América tropical (Loaiza-Figueroa et al. 1989; Perry 2012).



Atualmente, há um crescente interesse nas associações entre FMA e *Capsicum* spp. relacionado à absorção de P (Sharif & Claassen 2011), ao crescimento, à produção e à condição nutricional (Boonlue et al. 2012; Franco et al. 2013). Diante disso, os objetivos desse trabalho foram (i) avaliar os efeitos da inoculação com FMA e doses de P sobre os parâmetros de crescimento e produção de frutos em pimenteira (*C. annum* L. var. *annuum*); e (ii) verificar o efeito das doses de P sobre a colonização micorrízica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Implantação do experimento

O estudo foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizada em Campos dos Goytacazes, RJ (21°45'14" Sul, 41°19'26" Oeste), entre os meses de setembro/2014 e fevereiro/2015. As temperaturas mínima e máxima registradas durante a condução do experimento foram em média 24°C e 34°C, respectivamente. As umidades relativas do ar mínima e máxima registradas durante a condução do experimento foram em média 52% e 84%, respectivamente (Figura 1).

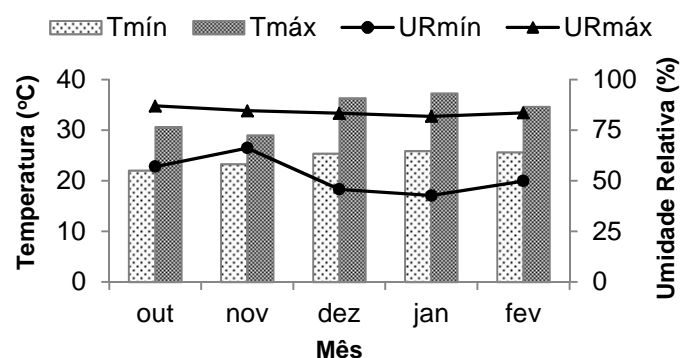


Figura 1. Temperatura ambiente média (mínima e máxima) e umidade relativa média (mínima e máxima) na casa de vegetação durante a condução do experimento.

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 3x5 constituído por três tratamentos de inoculação (com *R.*

*clarus*, *C. etunicatum* e controle não inoculado) x 5 doses de fósforo (0, 25, 50, 75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>), com quatro repetições e dois vasos por unidade experimental contendo uma planta, totalizando 120 vasos.

O solo utilizado para o experimento foi coletado na profundidade de 0–20 cm, peneirado em malha de 2 mm, misturado com areia na proporção de 2:1 (v/v) e esterilizado em autoclave por duas vezes a 121°C por 1 h. As características químicas do solo após esterilização foram: pH (H<sub>2</sub>O)= 4,3; S-SO<sub>4</sub>= 17,7 mg/dm<sup>3</sup>; P= 8,5 mg/dm<sup>3</sup>; K= 2,7 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Ca= 5,6 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Mg= 7,5 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Al= 3,8 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; H+Al= 27,4 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Na= 0,9 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; C= 10,9 g/dm<sup>3</sup>; MO=18,8 g/dm<sup>3</sup>; CTC= 44,3 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; SB= 16,8 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Fe= 103,7 mg/dm<sup>3</sup>; Cu= 0,2 mg/dm<sup>3</sup>; Zn= 2,4 mg/dm<sup>3</sup>; Mn= 22,3 mg/dm<sup>3</sup> e B= 0,6 mg/dm<sup>3</sup>.

A calagem foi necessária para correção da acidez do solo, obtendo-se pH (H<sub>2</sub>O)= 6,1. Cinco doses de P (0, 25, 50, 75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>) foram aplicadas no solo, conforme Santoyo (2011) com adaptações, utilizando-se como fonte KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> e NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O. Além disso, os teores de K foram corrigidos para todos os tratamentos, com a fonte KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, e na dose 0 mg/dm<sup>3</sup> de P, a fonte utilizada foi o K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Após correções, o solo foi distribuído em vasos com capacidade para 5 dm<sup>3</sup>, umidecido e incubado por um período de 30 dias. Em seguida, foi realizada a análise de P disponível no solo com o extrator Mehlich-1, obtendo-se os seguintes valores: 8, 14, 19, 29 e 44 mg/dm<sup>3</sup> correspondentes, respectivamente, às doses de P aplicadas (0, 25, 50, 75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>). Vale ressaltar que durante a condução do experimento foram realizadas aplicações quinzenais de inseticida (Evidence<sup>®</sup>) e acaricida (Vertimec<sup>®</sup>) por um período de 60 dias a partir da data de emergência das plântulas. Ao término das aplicações para controle de pragas, aplicações semanais com solução nutritiva completa (isenta de P) foram realizadas em todos os vasos do experimento até finalização do mesmo.

Isolados de *Rhizophagus clarus* Nicolson & Schenck e *Claroideoglossum etunicatum* Becker & Gerd provenientes do Banco de Inóculo do Setor de Microbiologia da UENF/Laboratório de Microbiologia do Solo, foram multiplicados durante três meses em casa de vegetação em associação com milho (*Zea mays*). Durante a semeadura do experimento, 120 cm<sup>3</sup> de inóculo contendo propágulos (esporos, fragmentos de raízes infectadas e hifas) de cada espécie de fungo foi aplicado a uma profundidade de 2–3 cm nos vasos contendo as doses de P. A quantidade de esporos em cada inóculo foi de 1890/50 mL de solo e 5370/50 mL

de solo para *R. clarus* e *C. etunicatum*, respectivamente.

Os frutos maduros de *Capsicum annum* L. var. *annuum* (acesso UENF 1381) foram colhidos na Estação Experimental de Campos/PESAGRO-RIO, localizada em Campos dos Goytacazes, RJ, e foram devidamente despolidos e as sementes postas a secar à temperatura ambiente por 24 h e semeadas no dia seguinte. Foram semeadas 10 sementes por vaso que passaram a ser irrigadas diariamente. Ao atingirem quatro pares de folhas definitivas, aos 40 dias após a semeadura, as plântulas mais vigorosas foram selecionadas e as demais desbastadas, restando uma planta por vaso.

### Avaliações biométricas

Aos 150 dias após a semeadura, as plantas foram desbastadas na altura do colo do caule para avaliação dos seguintes parâmetros de crescimento: altura da planta (determinada a partir da região do colo até o ápice foliar, com o auxílio de uma régua milimetrada), diâmetro do caule (na região do colo, com o auxílio de um paquímetro digital), área foliar (obtida no integrador de área foliar LI-COR® modelo LI 3100) e massa fresca e seca da parte aérea e raiz. O número de frutos por planta foi contabilizado a partir de 90 dias após a semeadura até a finalização do experimento. A cada colheita, os frutos foram pesados em balança digital com precisão de quatro casas decimais para obtenção da massa fresca.

Após determinação da massa fresca, a parte aérea e raiz foram colocadas individualmente em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada a 65°C por 48 h. A massa seca das amostras foi obtida usando uma balança digital com precisão de quatro casas decimais.

Vale salientar que antes do procedimento de secagem, as raízes foram lavadas e uma amostra de 3 g de raízes finas foi armazenada em etanol 50% para subsequente determinação da porcentagem de colonização micorrízica, seguindo metodologia descrita por Grace & Stribley (1991). As raízes foram colocadas em KOH 10% por 10 min a 90°C em banho-maria. Em seguida, as raízes foram lavadas com água destilada e colocadas em água oxigenada alcalina (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) por 30 min e lavadas com água destilada subsequentemente. As amostras de raízes foram então colocadas em ácido clorídrico 5% por 5 min e em seguida, em azul de tripano 0,05% por 10 min a 80°C. Após coloração, os segmentos de

raízes foram levados ao microscópio óptico para observação da presença de estruturas pertinentes aos FMA.

### Análise estatística

Os dados experimentais obtidos foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o programa SANEST (Zonta et al. 1984). Utilizou-se análise de regressão polinomial para os dados quantitativos e o teste de Tukey em 5% de probabilidade para os dados qualitativos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Efeitos sobre o crescimento

De acordo com a Tabela 1, a altura e o diâmetro das pimenteiras aos 150 dias após a semeadura não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos avaliados nesse estudo nas doses 50, 75 e 100 mg P/dm<sup>3</sup>. Na dose 0 mg P/dm<sup>3</sup>, as plantas inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram um incremento na altura e diâmetro de 434% e 242%, respectivamente, comparado às plantas do tratamento sem fungo. No entanto, não houve diferença significativa para estes parâmetros entre as plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus*. Similarmente, as plantas cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram um incremento na altura e diâmetro de 78% e 44%, respectivamente, comparado às plantas do tratamento sem fungo cultivadas na mesma dose. Nesse caso, também não houve diferença significativa entre as plantas dos tratamentos com fungos.

A área foliar de plantas inoculadas com *R. clarus* obteve um incremento de 6017%, 64% e 36% nas doses 0, 50 e 75 mg P/dm<sup>3</sup>, respectivamente, comparado às plantas dos tratamentos controle sem FMA (Tabela 1). Plantas cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram um incremento na área foliar de 275%, comparado às plantas do tratamento sem fungo. Contudo, vale ressaltar que não houve diferença significativa entre os tratamentos de inoculação dentro de cada dose supracitada. Além disso, na dose

100 mg P/dm<sup>3</sup> não houve diferença significativa entre plantas inoculadas e não inoculadas para a área foliar.

Tabela 1. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre o crescimento de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Doses de P	FMA	Altura (cm)	Diâmetro (mm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	10,30 b	1,72 b	5,94 b
	<i>C. etunicatum</i>	55,00 a	5,89 a	315,03 a
	<i>R. clarus</i>	52,12 a	5,86 a	363,36 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	33,83 b	4,39 b	103,98 b
	<i>C. etunicatum</i>	60,37 a	6,31 a	390,24 a
	<i>R. clarus</i>	55,87 a	6,12 a	367,34 a
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	57,00 a	5,95 a	236,70 b
	<i>C. etunicatum</i>	59,62 a	6,49 a	330,98 a
	<i>R. clarus</i>	52,62 a	5,98 a	387,52 a
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	59,62 a	6,23 a	288,43 b
	<i>C. etunicatum</i>	61,12 a	6,41 a	349,07 ab
	<i>R. clarus</i>	57,25 a	5,85 a	393,69 a
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	58,37 a	6,58 a	297,36 a
	<i>C. etunicatum</i>	62,37 a	6,57 a	323,61 a
	<i>R. clarus</i>	60,00 a	6,25 a	360,75 a
CV (%)		8,5	6,5	13,2

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Embora não tenha havido um inóculo micorrízico com melhor resposta para os parâmetros avaliados, é notável que a inoculação micorrízica foi mais eficiente quando os níveis de fósforo no solo foram mais baixos. De fato, a resposta da planta hospedeira à colonização micorrízica parece ser melhor quando a concentração de P na rizosfera é menor, ou seja, a baixa concentração de P favorece a colonização intrarradicular (Kiriachek et al. 2009), aumentando os benefícios causados pela associação micorrízica. Em baixos teores de P (11 mg/dm<sup>3</sup>), Davies et al. (2000) relataram um aumento de 44% na área foliar de pimenteira (*C. annuum* L. 'San Luis') inoculadas comparado ao tratamento controle. Sreenivasa et al. (1993) constataram que é possível reduzir a adubação fosfatada de pimenteira (*C. annuum* L. 'Byadagi') em 50% quando as plantas são colonizadas por FMA. Além disso, Santoyo (2011) relatou que existe um efeito positivo entre a inoculação com FMA e baixas doses de fósforo no crescimento de pimenta Guajillo (*C. annuum* L.).

## Efeitos sobre a massa fresca e seca

Em relação à massa fresca da folha (Tabela 2), plantas inoculadas com *R. clarus* mostraram um aumento de 5625%, 49%, 38% e 30% comparado às plantas não inoculadas, nas doses 0, 50, 75 e 100 mg P/dm<sup>3</sup>, respectivamente. Plantas cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram um incremento na massa fresca da folha de 287%, comparado às plantas do tratamento sem fungo na mesma dose. Contudo, não houve diferença significativa entre os tratamentos de inoculação dentro de cada dose supracitada.

Nas doses 50 e 100 mg P/dm<sup>3</sup>, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas e não inoculadas para a variável massa fresca do caule. Por outro lado, a inoculação micorrízica *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 3943% na massa fresca do caule de plantas cultivadas na dose 0 mg de P/dm<sup>3</sup>, comparado às plantas do tratamento controle sem FMA na mesma dose. Além disso, plantas cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *R. clarus* obtiveram um incremento de 93% na massa fresca do caule comparado às plantas sem fungo. Entretanto, não houve diferença significativa entre as plantas dos tratamentos com fungos para este parâmetro em ambas as doses.

Na dose 75 mg P/dm<sup>3</sup>, plantas cultivadas sem FMA obtiveram incrementos de 30% e 40% na massa fresca e massa seca do caule, respectivamente, comparado às plantas inoculadas com *R. clarus* na mesma dose. Já a massa fresca da raiz de plantas não inoculadas obteve um incremento de 119% e 49% na dose 75 mg P/dm<sup>3</sup> comparado às plantas inoculadas com *R. clarus* e *C. etunicatum*, respectivamente (Tabela 2; Figura 3). Por outro lado, as plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus* cultivadas nas doses 0 e 25 mg P/dm<sup>3</sup> de solo, respectivamente, apresentaram um aumento de 4217% e 47% na massa fresca da raiz comparado ao tratamento sem fungo, porém não houve diferença significativa entre os tratamentos de inoculação nas respectivas doses.

Tabela 2. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre a massa fresca e seca de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*).

Doses de P	FMA	MF folha (g)	MF caule (g)	MF raiz (g)	MS folha (g)	MS caule (g)	MS raiz (g)
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,16 b	0,35 b	0,23 b	0,03 b	0,07 b	0,03 b
	<i>C. etunicatum</i>	7,54 a	14,15 a	9,93 a	1,73 a	4,28 a	2,17 a
	<i>R. clarus</i>	9,16 a	13,53 a	7,69 a	2,09 a	4,08 a	1,94 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	2,36 b	8,32 b	5,81 b	0,48 b	2,34 b	1,06 b
	<i>C. etunicatum</i>	9,13 a	14,60 a	8,48 a	2,01 a	4,66 a	2,04 a
	<i>R. clarus</i>	8,90 a	16,07 a	8,57 a	2,06 a	4,87 a	2,08 a
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	6,33 b	16,42 a	10,88 a	1,46 b	5,18 a	2,17 a
	<i>C. etunicatum</i>	8,57 a	15,56 a	11,01 a	2,02 a	4,80 a	2,23 a
	<i>R. clarus</i>	9,44 a	14,11 a	8,24 b	2,14 a	4,29 a	1,82 a
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	6,80 b	19,81 a	16,94 a	1,71 a	6,28 a	2,18 a
	<i>C. etunicatum</i>	8,74 a	18,02 ab	11,38 b	2,10 a	5,66 a	2,53 a
	<i>R. clarus</i>	9,36 a	15,23 b	7,74 c	2,00 a	4,49 b	2,03 a
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	7,35 b	17,92 a	9,60 a	1,82 b	5,38 a	2,48 a
	<i>C. etunicatum</i>	8,17 ab	17,62 a	10,68 a	2,34 a	5,66 a	2,46 a
	<i>R. clarus</i>	9,53 a	17,74 a	10,35 a	2,10 ab	5,24 a	2,17 a
CV (%)		13,8	13,7	16,6	16,2	13,4	18,6

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

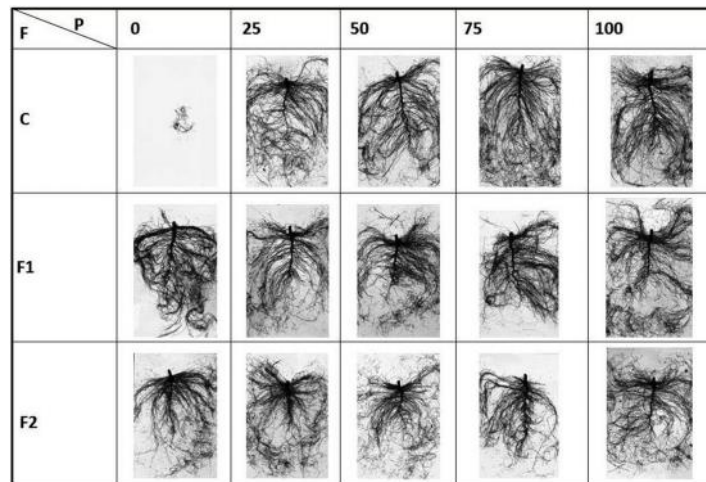


Figura 3. Visão geral das raízes frescas obtida por escaneamento digital. C (tratamento controle sem FMA); F1 (*C. etunicatum*) e F2 (*R. clarus*).

Em relação à massa seca da folha (Tabela 2), as plantas inoculadas com *R. clarus* obtiveram um incremento de 6866%, 329% e 46% nas doses 0, 25 e 50 mg P/dm<sup>3</sup>, respectivamente, comparado às plantas do tratamento controle. No entanto, não houve diferença significativa entre as plantas do tratamento com FMA nas respectivas doses. Além disso, não houve diferença significativa entre plantas inoculadas e não inoculadas para o parâmetro massa seca da folha na dose 75 mg P/dm<sup>3</sup>. Com a inoculação com *C. etunicatum* foi observado um aumento de 28% na massa seca da folha na dose 100 mg P/dm<sup>3</sup> comparado ao tratamento controle, porém não houve diferença significativa comparado à inoculação com *R. clarus*.

A massa seca do caule de plantas inoculadas com *C. etunicatum* teve um aumento de 6014% na dose 0 mg P/dm<sup>3</sup> comparado ao tratamento controle, enquanto em plantas cultivadas na dose 25 mg de P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *R. clarus* foi observado um aumento de 108% comparado às plantas não inoculadas na mesma dose. Contudo, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas dentro de cada dose supracitada. Além disso, a massa seca do caule não apresentou diferença significativa em nenhum dos tratamentos avaliados nas doses 50 e 100 mg P/dm<sup>3</sup> (Tabela 2). A massa seca da raiz de plantas inoculadas com *C. etunicatum* teve um aumento de 7133% na dose 0 mg P/dm<sup>3</sup> comparado ao tratamento controle, enquanto em plantas cultivadas na dose 25 mg de P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *R. clarus* foi observado um aumento de 96% comparado às plantas não inoculadas na mesma dose. Porém, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas dentro de cada dose. Por outro lado, não houve



diferença significativa entre as plantas dos tratamentos de inoculação e sem fungo nas doses 50, 75 e 100 mg P/dm<sup>3</sup> para o parâmetro massa seca da raiz (Tabela 2).

O fósforo é um elemento essencial para o desenvolvimento das plantas, porém é frequentemente um limitador do crescimento devido à sua baixa solubilidade e mobilidade no solo (Balzergue et al. 2011). A melhoria nos parâmetros de crescimento pode estar intimamente relacionada à melhor condição nutricional das plantas causadas pelo FMA. Por exemplo, Estrada-Luna & Davies (2003) atribuíram ao aumento dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) e à influência desses elementos na fotossíntese, o melhor crescimento observado em pimenteiras (*C. annuum* L. 'San Luis') inoculadas comparado às plantas sem inoculação. Boonlue et al. (2012) demonstraram que pimenteiras (*Capsicum frutescens* L. 'Hua Rua') inoculadas com *R. clarus* tiveram incremento na massa fresca da parte aérea (574%) e raiz (343%), bem como na massa seca da parte aérea (660%) e raiz (334%) comparado às plantas não inoculadas. É importante notar que esses autores reportaram um aumento na absorção de N (193%), P (210%) e K (210%) que pode estar relacionado ao melhor crescimento observado em plantas inoculadas.

De maneira geral, a inoculação micorrízica favoreceu um maior crescimento da parte aérea em condições de baixa concentração de P no solo. Tal fato, pode ser atribuído a um melhor aproveitamento dos nutrientes pelas raízes colonizadas, uma vez que as hifas são capazes de transpor as zonas de depleção de P e permitem uma maior exploração do volume de solo (Smith & Read 2008). A baixa disponibilidade de P também pode contribuir para mudanças na morfologia das raízes, inibindo seu crescimento primário e promovendo o crescimento de raízes laterais e pelos radiculares, os quais promovem a aquisição de P pelas plantas (Niu et al. 2013). O maior crescimento das raízes observado nesse estudo pode estar relacionado à baixa disponibilidade de P no solo e/ou aos efeitos positivos da simbiose.

#### Efeitos sobre a produção de frutos

O número de frutos por planta não apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados nas doses 0, 50 e 75 mg P/dm<sup>3</sup> (Tabela 3). A inoculação

com *R. clarus* mostrou-se mais eficiente para essa variável na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup>, proporcionando um aumento de 149% comparado ao tratamento sem fungo. Em contrapartida, as plantas sem inoculação micorrízica que receberam dose 100 mg P/dm<sup>3</sup> de solo mostraram um aumento de 24% na produção de frutos comparado a plantas inoculadas com *R. clarus*, no entanto não houve diferença significativa comparado à inoculação com *C. etunicatum*.

Os efeitos positivos das micorrizas arbusculares sobre a produção de pimentas têm sido constatados em diferentes estudos. Regvar et al. (2003) reportaram melhoria na produção de frutos em pimenteiras (*C. annuum* L. 'Californian miracle') cultivadas tanto em condições de campo como em casa de vegetação. Em condições de casa de vegetação, o número de frutos por planta aumentou 115% nos tratamentos com FMA comparado ao controle. Em condições de campo, plantas colonizadas também apresentaram um grande aumento (108%) no número de frutos por planta comparado às plantas não inoculadas.

Tabela 3. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre a produção de frutos em pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*).

Doses de P	FMA	Nº de frutos/planta	MF fruto (g)
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	—	—
	<i>C. etunicatum</i>	15,25 a	2,24 a
	<i>R. clarus</i>	13,50 a	2,16 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	7,00 c	2,13 b
	<i>C. etunicatum</i>	11,75 b	2,47 a
	<i>R. clarus</i>	17,45 a	2,16 b
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	13,75 a	1,92 c
	<i>C. etunicatum</i>	12,75 a	2,39 a
	<i>R. clarus</i>	13,50 a	2,13 b
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	15,50 a	2,53 a
	<i>C. etunicatum</i>	15,75 a	2,29 b
	<i>R. clarus</i>	13,25 a	2,12 c
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	17,75 a	2,66 a
	<i>C. etunicatum</i>	16,75 ab	2,32 b
	<i>R. clarus</i>	14,25 b	2,19 c
CV (%)		14,1	3,05

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

\* (—) Os parâmetros não foram avaliados por falta de frutos.

A produção de frutos de *C. annuum* L. e duas de suas cultivares (Ancho e Mirasol) foram afetadas positivamente por FMA em experimentos conduzidos por Faisal et al. (2010) e García (2003), respectivamente. Esses autores reportaram um aumento no número de frutos de 89% e 46%, respectivamente, comparado às plantas sem inoculação micorrízica.

Sharif & Claassen (2011) observaram que em baixo suprimento de P a associação com FMA aumentou a produção de *C. annuum* L. e isso foi relacionado a um aumento na absorção de P. Além disso, seus resultados mostraram que as hifas são mais eficientes na absorção de P do que a superfície das raízes em solos com baixos níveis de P.

De acordo com a Tabela 3, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 16% e 24% na massa fresca dos frutos nas doses 25 e 50 mg P/dm<sup>3</sup> comparado ao tratamento sem fungo. Por outro lado, o tratamento controle apresentou maior massa fresca do fruto nas doses 75 e 100 mg P/dm<sup>3</sup>. O incremento relativo para a massa fresca dos frutos encontrado nesse estudo foi inferior ao observado por Castillo et al. (2009), os quais reportaram um aumento de 124% na massa fresca dos frutos de pimenteira (*C. annuum* L. 'Cacho de Cabra') inoculadas com *Claroideoglossum claroideum* comparado às plantas sem inoculação.

#### Efeitos sobre a colonização micorrízica

Em pimenteiras cultivadas sem inoculação micorrízica, não foi observada a presença de estruturas pertinentes aos FMA nas raízes coletadas em todas as doses de P avaliadas. Na dose 0 e 75 mg P/dm<sup>3</sup> não houve diferença significativa entre os tratamentos de inoculação, embora no primeiro caso os valores encontrados foram maiores (Tabela 4). Nas doses 25, 50 e 100 a inoculação com *R. clarus* foi superior 25%, 25% e 22%, respectivamente, comparado à inoculação com *C. etunicatum*.

Tabela 4. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre a colonização micorrízica em pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*).

Doses de P	FMA	Colonização micorrízica (%)
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,0 b
	<i>C. etunicatum</i>	73,5 a
	<i>R. clarus</i>	78,5 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,0 c
	<i>C. etunicatum</i>	53,5 b
	<i>R. clarus</i>	71,0 a
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,0 c
	<i>C. etunicatum</i>	61,0 b
	<i>R. clarus</i>	81,0 a
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,0 b
	<i>C. etunicatum</i>	51,0 a
	<i>R. clarus</i>	58,5 a
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,0 c
	<i>C. etunicatum</i>	53,5 b
	<i>R. clarus</i>	68,5 a
CV (%)		16,7

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Diversos estudos têm demonstrado uma boa dependência micorrízica de *Capsicum* spp. (Pereira et al. 2015). No entanto, é relevante notar que as respostas do hospedeiro à inoculação dependem de fatores, por vezes, não claros, mas também de fatores edafoclimáticos, além de espécies, cultivares, variedades botânicas e FMA utilizados. A inoculação com *R. clarus* tem se mostrado eficiente no crescimento, na produção e na nutrição de *C. frutescens* L. 'Hua Rua' (Boonlue et al. 2012), bem como na tolerância ao estresse salino de *C. annuum* L. '11B14'. Por outro lado, no trabalho de revisão realizado por Pereira et al. (2015) acerca dos efeitos dos FMA sobre *Capsicum* spp., nenhum estudo listado reportou *C. etunicatum* como o inóculo mais eficiente.

É interessante observar (Tabela 4) que nas maiores doses de P (75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>) a porcentagem de colonização micorrízica de *R. clarus* tendeu a diminuir. O efeito do P sobre a colonização intrarradicular tem sido estudado por diversos autores, porém os mecanismos que controlam a taxa de colonização nas raízes ainda não são claros (Smith & Read 2008).

## CONCLUSÕES

A utilização de fungos micorrízicos arbusculares no cultivo de *Capsicum* spp. é uma alternativa capaz de proporcionar um maior crescimento das plantas e produção de frutos. Além disso, a utilização de FMA pode contribuir para a economia de adubos fosfatados, uma vez que as melhores respostas foram obtidas nas menores doses de P. De maneira geral, a utilização tanto de *R. clarus* como *C. etunicatum* associada à aplicação de 0 a 25 mg P/dm<sup>3</sup> no solo, promoveu um bom desempenho no que se refere ao crescimento de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* cultivadas em vaso e em casa de vegetação. Do ponto de vista da produção de frutos, a inoculação com *R. clarus* em solos com aplicação de 25 mg P/dm<sup>3</sup>, é mais recomendável para a cultura.

## REFERÊNCIAS

- BALZERGUE, C., PUECH-PAGÈS, V., BÉCARD, G. & ROCHANGE, S. F. (2011). The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signaling events. *Journal of Experimental Botany* **62**, 1049–1060.
- BOONLUE, S., SURAPAT, W., PUKAHUTA, C., SUWANARIT, P., SUWANARIT, A. & MORINAGA, T. (2012). Diversity and efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from organic chili (*Capsicum frutescens*) farms. *Mycoscience* **53**, 10–16.
- CASTILLO, C. G., ORTIZ, C. A., BORIE, F. R. & RUBIO, R. E. (2009). Respuesta de ají (*Capsicum annuum* L.) cv. 'Cacho de Cabra' a la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *Información Tecnológica* **20**, 3–14.
- DAVIES JR, F. T., POTTER, J. R. & LINDERMAN, R. G. (1992). Mycorrhiza and repeated drought exposure affect drought resistance and extraradical hyphae development of pepper plants independent of plant size and nutrient content. *Journal of Plant Physiology* **139**, 289–294.

- DAVIES, F. T. Jr., OLALDE-PORTUGAL, V., ALVARADO, M. J., ESCAMILLA, H. M., FERRERA-CERRATO, R. C. & ESPINOSA, J. I. (2000). Alleviating phosphorus stress of chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. 'San Luis') by arbuscular mycorrhizal inoculation. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **75**, 655–661.
- ESTRADA-LUNA, A. A., DAVIES, F. T. Jr. (2003). Arbuscular mycorrhizal fungi influence water relation abscisic acid and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum*) plantlets during acclimatization and post-acclimatization. *Journal of Plant Physiology* **160**, 1073–1083.
- FAISAL, M., AHMAD, T. & SRIVASTAVA, N. K. (2010). Influence of different levels of *Glomus macrocarpum* on growth and yield of chilli (*Capsicum annuum* L.). *Indian Journal of Scientific Research* **1**, 97–99.
- FRANCO, A. D., CARRILLO, M. A., CHAIREZ, F. O. & CABRERA, O. G. (2013). Plant nutrition and fruit quality of pepper associated with arbuscular mycorrhizal in greenhouse. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **4**, 315–321.
- GARCÍA, F. R. (2003). *Concentración de reguladores del desarrollo vegetal inducida por hongos endomicorrízicos en dos cultivares de chile (Capsicum annuum L.)*. PhD thesis, Universidad de Colima, Mexico.
- GRACE, C., STRIBLEY, D. P. (1991). A safer procedure for routine staining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research* **95**, 1160–1162.
- JACKSON, M. L. (1965). *Soil chemical analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- KIRIACHEK, S. G., AZEVEDO, L. C. B., PERES, L. E. P. & LAMBAIS, M. R. (2009). Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **33**, 1–16.

- LINDERMAN, R. G. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhizae and soil microbial interactions. In *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture* (Eds G. J. Bethlenfalvay & R. G. Linderman), pp. 45–70. ASA Special Publication 54. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy.
- LOAIZA-FIGUEROA, F., RITLAND, K., CANCINO, J. A. L. & TANKSLEY, S. D. (1989). Patterns of genetic variation of the genus *Capsicum* (*Solanaceae*) in Mexico. *Plant Systematics and Evolution* **165**, 159–188.
- NIU, Y. F., CHAI, R. S., JIN, G. L., WANG, H., TANG, C. X. & ZHANG, Y. S. (2013). Responses of root architecture development to low phosphorus availability: a review. *Annals of Botany* **112**, 391–408.
- PEREIRA, J. A. P., VIEIRA, I. J. C., FREITAS, M. S. M., PRINS, C. L., MARTINS, M. A. & RODRIGUES, R. (2015). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on *Capsicum* spp. *Journal of Agricultural Science* doi: 10.1017/S0021859615000714.
- PERRY, L. (2012). Ethnobotany. In *Peppers: Botany, Production and Uses* (Ed. V. M. Russo), pp. 1–13. Wallingford: CABI.
- PETERS, J. B. (2005). *Wisconsin Procedures for Soil Testing, Plant Analysis and Feed & Forage Analysis: Plant Analysis*. Department of Soil Science, College of Agriculture and Life Sciences, University of Wisconsin-Extension, Madison, WI. <[http://uwlab.soils.wisc.edu/files/procedures/plant\\_icp.pdf](http://uwlab.soils.wisc.edu/files/procedures/plant_icp.pdf)> Acesso em: 20/02/2014.
- POZZOBON, M. T., SCHIFINO-WITTMANN, M. T. & BIANCHETTI, L. B. (2006). Chromosome numbers in wild and semidomesticated Brazilian *Capsicum* L. (*Solanaceae*) species: do  $x = 12$  and  $x = 13$  represent two evolutionary lines? *Botanical Journal of the Linnean Society* **151**, 259–269.
- REGVAR, M., VOGEL-MIKUŠ, K. & ŠEVERKAR, T. (2003). Effect of AM fungi

inoculum from field isolates on the yield of green pepper, parsley, carrot, and tomato. *Folia Geobotanica* **38**, 223–234.

SANTOYO, L. G. L. (2011). *Fertilización fosfatada en chile guajillo (Capsicum annuum L.) y su interacción con hongos micorrízicos arbusculares*. Dissertation, Colegio de Postgraduados, Mexico.

SCHÜLER, A., SHWARZOTT, D. & WALKER, C. (2001). A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research* **105**, 1413–1421.

SHARIF, M. & CLAASSEN, N. (2011). Action mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in phosphorus uptake by *Capsicum annuum* L. *Pedosphere* **21**, 502–511.

SMITH, S. E. & READ, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. London: Academic Press.

SREENIVASA, M. N., KRISHNARAJ, P. U., GANGADHARA, G. A. & MANJUNATHAIAH, H. M. (1993). Response of chilli (*Capsicum annuum* L.) to the inoculation of an efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *Scientia Horticulturae* **53**, 45–52.

WRIGHT, S. F. & UPADHYAYA, A. (1998). A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* **198**, 97–107.

ZONTA, E. P., MACHADO, A. A., SILVEIRA JUNIOR, P. (1984). *Sistema de análises estatísticas para microcomputadores (SANEST)*. Pelotas: UFP.



### 3.3. EFEITOS DO FÓSFORO E DOS FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES SOBRE OS ATRIBUTOS DE QUALIDADE DE FRUTOS DE PIMENTEIRA (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*)

Resumo - A relação simbiótica estabelecida entre FMA e plantas representa uma importante alternativa para a produtividade hortícola. Dentre os benefícios da associação FMA-planta, estão a promoção do crescimento e a maior nutrição mineral da planta. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a composição mineral e os atributos de qualidade dos frutos de pimenteira (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*) em consequência da inoculação micorrízica e aplicação de doses de fósforo (P). O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 3x5 constituído por três tratamentos de inoculação (com *R. clarus*, *C. etunicatum* e controle não inoculado) x 5 doses de P (0, 25, 50, 75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>), com quatro repetições. A qualidade do fruto foi determinada pela medição do tamanho (comprimento e largura), teor de sólidos solúveis totais (SST), acidez total titulável (ATT), teor de ácido ascórbico (AA) e teores de capsaicinoides (CAP e DHC). Na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup>, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 18% no comprimento dos frutos comparado ao tratamento sem inoculação. Os frutos de plantas cultivadas na dose 25 mg/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *C. etunicatum* mostraram um aumento nos teores de K (12%), Mg (33%) e B (79%) comparado ao controle. Na dose 75 mg/dm<sup>3</sup>, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 17% no teor de P em frutos de plantas inoculadas comparado ao tratamento sem FMA.

Além disso, a inoculação com *R. clarus* proporcionou um aumento nos teores de N (10%) e Cu (145%) nas doses 100 e 50 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente, comparado ao tratamento controle. Por outro lado, os frutos de plantas sem inoculação apresentaram maiores teores de Mn (38%) e Fe (55%) comparado aos tratamentos de inoculação com *C. etunicatum* e *R. clarus* nas doses 75 e 25 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente. Além disso, os teores de SST e ATT nos frutos de plantas do tratamento controle, tiveram um aumento de 26% e 70%, respectivamente, comparado à inoculação com *C. etunicatum*. Similarmente, o teor de AA foi 39% maior nos frutos de plantas não inoculadas comparado ao tratamento de inoculação com *R. clarus*. Os teores de CAP e DHC foram influenciados pela inoculação com *R. clarus* na dose 75 mg/dm<sup>3</sup>. Nesse caso, houve um aumento de 73% e 30% nos teores de CAP e DHC, respectivamente. Portanto, a inoculação micorrízica de pimenteiras é uma alternativa para se obter frutos com melhores condições nutricionais e maior pungência. Contudo, esta associação mutualista pode ter efeito antagônico em outros parâmetros de qualidade, prejudicando aspectos sensoriais do fruto, tais como sabor e aroma.

Palavras-chave: Pimenta, composição mineral, capsaicina, CLAE.

#### EFFECTS OF PHOSPHORUS AND ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON QUALITY ATTRIBUTES OF CHILLI (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*) FRUITS

Abstract - The symbiotic relationship established between AMF and plants represent an important alternative for horticultural productivity. Among the benefits of the FMA-plant association are the promotion of growth and the better mineral nutrition of the plant. This study aimed to evaluate the mineral composition and quality attributes of the chilli (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*) fruits as a result of mycorrhizal inoculation and application of doses of phosphorus (P). The experiment was conducted in a randomized block design, in factorial arrangement 3x5 consisting of three inoculation treatments (with *R. clarus*, *C. etunicatum* and

uninoculated control) x 5 doses of P (0, 25, 50, 75 and 100 mg/dm<sup>3</sup>), with four replications. The fruit quality was determined by measuring the size (length and width), total soluble solids (TSS), titratable acidity (TTA), ascorbic acid (AA) and capsaicinoids content (CAP and DHC). At the dose 25 mg P/dm<sup>3</sup> inoculation with *C. etunicatum* provided an increase of 18% in fruit length compared to treatment without inoculation. The fruits of plants grown at the dose 25 mg/dm<sup>3</sup> and inoculated with *C. etunicatum* showed an increase in K (12%), Mg (33%) and B (79%) contents compared to the control. At the dose 75 mg/dm<sup>3</sup>, inoculation with *C. etunicatum* provided an increase of 17% in the P content in fruits of plants inoculated compared to treatment without AMF. Moreover, inoculation with *R. clarus* provided an increase in N (10%) and Cu (145%) contents at the doses 50 and 100 mg/dm<sup>3</sup>, respectively, compared to control. On the other hand, the fruits of uninoculated plants had higher Mn (38%) and Fe (55%) contents compared to inoculation treatments with *R. clarus* and *C. etunicatum* at the doses 75 and 25 mg/dm<sup>3</sup>, respectively. Furthermore, the TSS and TTA in control fruit plants, increased by 26% and 70%, respectively, compared to inoculation with *C. etunicatum*. Similarly, the AA content was 39% higher in uninoculated fruit plants compared to treatment with *R. clarus* inoculation. The CAP and DHC contents were influenced by inoculation with *R. clarus* at the dose 75 mg/dm<sup>3</sup>. In this case, there was an increase of 73% and 30% in the CAP and DHC contents, respectively. Therefore, the mycorrhizal inoculation of pepper is an alternative to yield fruits with better nutritional conditions and higher pungency. However, this mutual association may have antagonistic effect on other quality parameters, damaging sensory aspects of the fruit, such as flavor and aroma.

Keywords: Pepper fruit, mineral composition, capsaicin, HPLC.

## INTRODUÇÃO

As pimentas e os pimentões (*Capsicum* spp.) destacam-se entre as solanáceas pelo seu consumo e importância econômica em diversos países ao redor do mundo. A produção global anual é de 31,13 milhões de toneladas, a qual

a China responde por 51%, seguido por México (7,4%) e Turquia (6,9%) (FAOSTAT 2013).

Os frutos de *Capsicum* spp. têm sido amplamente utilizados em todo o mundo devido a seu intrínseco valor sensorial: cor, pungência e aroma. A cor, *flavor* e valor nutritivo das pimentas podem ser atribuídos a um conjunto de diferentes metabólitos. Os carotenoides são responsáveis pela mudança de cor dos frutos durante o amadurecimento; e uma mistura de ácidos orgânicos e capsaicinoides produz sua pungência característica. Além disso, as pimentas são excelentes fontes de vitamina A e C, e compostos fenólicos (p.ex. flavonoides), que funcionam como agentes antioxidantes (Frary & Frary 2012).

A pungência é um importante atributo de qualidade em pimentas e sua expressão está associada com a presença, em maior ou menor proporção, de alcaloides conhecidos como capsaicinoides (Appendino 2008). Dentre estes, a capsaicina (CAP) e seu dihidro derivado, dihidrocapsaicina (DHC), constituem 80% do total de capsaicinoides na maioria das variedades pungentes (Kosuge & Furuta 1970). Os teores de CAP são normalmente maiores do que os de DHC (Antonious et al. 2009) e esses são considerados os principais parâmetros para determinar a qualidade comercial de um produto ou derivados (Frary & Frary 2012).

Micorriza arbuscular é uma das mais difundidas associações micorrízicas entre fungos do solo e plantas superiores, incluindo a maioria das espécies cultivadas (Strack et al. 2003; Gosling et al. 2006). As micorrizas arbusculares têm importância agrônômica devido à sua grande capacidade de aumentar o crescimento e a produção das plantas em determinadas condições. A principal razão para esse aumento é a capacidade das plantas em associação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) de absorver certos nutrientes, tal como o fósforo (P), de forma eficiente (Smith & Read 2008).

O P é um importante nutriente inorgânico que afeta o desenvolvimento do FMA, regulando principalmente a taxa de crescimento fúngico intrarradicular. Normalmente, altas concentrações de P inibem a colonização das raízes, enquanto baixas concentrações favorecem a colonização intrarradicular (Kiriachek et al. 2009). Isso parece ser um fenômeno geral, embora os mecanismos regulatórios desse processo não tenham sido completamente elucidados (Smith & Read 2008).

As plantas necessitam de uma quantidade relativamente grande de P para biossíntese de metabólitos primários e secundários, visto o essencial papel deste elemento na constituição de ácidos nucleicos, fosfolipídios e metabolismo energético das células (Marschner 2012). Como resultado da associação simbiótica entre FMA e planta hospedeira, o aumento dos teores de P pode afetar alguns parâmetros fisiológicos da pimenta (Demir 2004). Portanto, a atividade simbiótica que os FMA apresentam pode constituir uma importante alternativa para a melhoria de certos atributos de qualidade e produtividade da cultura.

Os efeitos da micorriza arbuscular sobre os atributos de qualidade dos frutos de *Capsicum* spp. não têm sido amplamente reportados. Alguns autores têm demonstrado um aumento na concentração de ácido ascórbico (Castillo et al. 2009 a, b) e pigmentos (Mena-Violante et al. 2006) em frutos de plantas colonizadas. Por outro lado, nenhuma pesquisa tem sido conduzida acerca da influência da colonização micorrízica sobre o aumento nos teores de capsaicinoides em pimenta. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos da inoculação com FMA e doses de P sobre a composição mineral e os atributos de qualidade de frutos de pimenteira (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*).

## MATERIAL E MÉTODOS

### Implantação do experimento

O estudo foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizada em Campos dos Goytacazes, RJ (21°45'14" Sul, 41°19'26" Oeste), entre os meses de setembro/2014 e fevereiro/2015. As temperaturas mínima e máxima registradas durante a condução do experimento foram em média 24°C e 34°C, respectivamente. As umidades relativas do ar mínima e máxima registradas durante a condução do experimento foram em média 52% e 84%, respectivamente.

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 3x5 constituído por três tratamentos de inoculação (com *R. clarus*, *C. etunicatum* e controle não inoculado) x 5 doses de fósforo (0, 25, 50, 75

e  $100 \text{ mg/dm}^3$ ), com quatro repetições e dois vasos por unidade experimental contendo uma planta, totalizando 120 vasos.

O solo utilizado para o experimento foi coletado na profundidade de 0–20 cm, peneirado em malha de 2 mm, misturado com areia na proporção de 2:1 (v/v) e esterilizado em autoclave por duas vezes a  $121^\circ\text{C}$  por 1 h. As características químicas do solo após esterilização foram: pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )= 4,3; S- $\text{SO}_4$ =  $17,7 \text{ mg/dm}^3$ ; P=  $8,5 \text{ mg/dm}^3$ ; K=  $2,7 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; Ca=  $5,6 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; Mg=  $7,5 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; Al=  $3,8 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; H+Al=  $27,4 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; Na=  $0,9 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; C=  $10,9 \text{ g/dm}^3$ ; MO=  $18,8 \text{ g/dm}^3$ ; CTC=  $44,3 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; SB=  $16,8 \text{ mmol}_\text{c}/\text{dm}^3$ ; Fe=  $103,7 \text{ mg/dm}^3$ ; Cu=  $0,2 \text{ mg/dm}^3$ ; Zn=  $2,4 \text{ mg/dm}^3$ ; Mn=  $22,3 \text{ mg/dm}^3$  e B=  $0,6 \text{ mg/dm}^3$ .

A calagem foi necessária para correção da acidez do solo, obtendo-se pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )= 6,1. Cinco doses de P (0, 25, 50, 75 e  $100 \text{ mg/dm}^3$ ) foram aplicadas no solo, conforme Santoyo (2011) com adaptações, utilizando-se como fonte  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  e  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Além disso, os teores de K foram corrigidos para todos os tratamentos, com a fonte  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , e na dose  $0 \text{ mg/dm}^3$  de P, a fonte utilizada foi o  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Após correções, o solo foi distribuído em vasos com capacidade para  $5 \text{ dm}^3$ , umedecido e incubado por um período de 30 dias. Em seguida, foi realizada a análise de P disponível no solo com o extrator Mehlich-1, obtendo-se os seguintes valores: 8, 14, 19, 29 e  $44 \text{ mg/dm}^3$  correspondentes, respectivamente, às doses de P aplicadas (0, 25, 50, 75 e  $100 \text{ mg/dm}^3$ ). Vale ressaltar que durante a condução do experimento foram realizadas aplicações quinzenais de inseticida (Evidence<sup>®</sup>) e acaricida (Vertimec<sup>®</sup>) por um período de 60 dias a partir da data de emergência das plântulas. Ao término das aplicações para controle de pragas, aplicações semanais com solução nutritiva completa (isenta de P) foram realizadas em todos os vasos do experimento até finalização do mesmo.

Isolados de *Rhizophagus clarus* Nicolson & Schenck e *Claroideoglossum etunicatum* Becker & Gerd provenientes do Banco de Inóculo do Setor de Microbiologia da UENF/Laboratório de Microbiologia do Solo, foram multiplicados durante três meses em casa de vegetação em associação com milho (*Zea mays*). Durante a semeadura do experimento,  $120 \text{ cm}^3$  de inóculo contendo propágulos (esporos, fragmentos de raízes infectadas e hifas) de cada espécie de fungo foi aplicado a uma profundidade de 2–3 cm nos vasos contendo as doses de P. A quantidade de esporos em cada inóculo foi de 1890/50 mL de solo e 5370/50 mL de solo para *R. clarus* e *C. etunicatum*, respectivamente.

Os frutos maduros de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* (acesso UENF 1381) foram colhidos na Estação Experimental de Campos/PESAGRO-RIO, localizada em Campos dos Goytacazes, RJ, e foram devidamente despolidos e as sementes postas a secar à temperatura ambiente por 24 h e semeadas no dia seguinte. Foram semeadas 10 sementes por vaso que passaram a ser irrigadas diariamente. Ao atingirem quatro pares de folhas definitivas, aos 40 dias após a semeadura, as plântulas mais vigorosas foram selecionadas e as demais desbastadas, restando uma planta por vaso.

#### Análises de qualidade de frutos

A colheita dos frutos foi realizada semanalmente a partir de 90 dias após a semeadura, totalizando cinco colheitas. Foram determinados o comprimento longitudinal (sem pedicelo) e diâmetro equatorial dos frutos imediatamente após a colheita. Os frutos frescos foram utilizados na determinação de teor de sólidos solúveis totais (SST), acidez total titulável (ATT) e ácido ascórbico (AA). Em seguida, os frutos foram colocados em sacos de papel e submetidos à secagem em estufa de circulação forçada a 65°C por 48 h. Após secagem, o material foi triturado em moinho tipo Willey com peneira de 20 mesh e em seguida, acondicionado em recipientes plásticos hermeticamente fechados. Os frutos secos e moídos foram utilizados na determinação da composição mineral (N, P, K, Mg, Ca, S, Fe, Cu, Zn, Mn e B), bem como na determinação dos teores de capsaicinoides (CAP e DHC).

#### Determinação da composição mineral

Para a determinação dos teores de N, o material vegetal foi submetido à digestão sulfúrica, no qual o nitrogênio foi determinado pelo método de Nessler (Jackson 1965). Os outros nutrientes P, K, Mg, Ca, S, Fe, Cu, Zn, Mn e B foram determinados por ICP-OES, após digestão com HNO<sub>3</sub> concentrado e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em sistema de digestão aberta. Condições do ICP: gás plasma 8,0 L/min, gás auxiliar 0,7 L/min e gás carreador 0,55 L/min (Peters 2005).

## Determinação SST, ATT e AA

O teor de sólidos solúveis (SST, °Brix) foi determinado a partir do sumo de frutos frescos sem pedicelo, com o auxílio de refratômetro digital portátil (Atago PAL-1).

A acidez total titulável (ATT) foi determinada a partir de 10 mL de suco, usando o indicador fenolftaleína, seguido por titulação com NaOH 0,1 N e expressa em % de ácido cítrico  $\{ATT=(Vol\ de\ NaOH\ x\ normalidade\ (0,1\ N)\ x\ 0,064\ x\ 100)/peso\ da\ amostra\ em\ g\}$  e o ácido ascórbico (AA) foi obtido pela titulação com 2,6 diclorofenol-indofenol e expresso em mg de ácido ascórbico por 100 g de pimenta  $\{AA=(Vol\ de\ DCFI - Branco)\ x\ Fator\ x\ 100/peso\ da\ amostra\ em\ g\}$ .

## Extração e quantificação de capsaicinoides

A extração foi procedida a partir de frutos previamente secos seguindo o método proposto por Collins et al. (1995) com algumas modificações. Aproximadamente 5 g de frutos secos foram moídos usando moinho tipo Willey com peneira de 20 mesh. Então, transferidos para um frasco de vidro contendo metanol e mantidos à temperatura ambiente (25°C) por nove dias. O sobrenadante de cada amostra foi filtrado e mantido a 25°C até total evaporação do álcool. O extrato bruto foi estocado a 5°C até a análise.

A quantificação dos capsaicinoides foi realizada através do método de padrão externo utilizando curva de calibração (6,25, 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 ppm) e os resultados foram expressos em mg/g de massa seca (MS). Foram injetados manualmente 20 µL de amostra em coluna NST C18 - 254605 (250 mm x 4,6 mm x 5 µm) instalada em cromatógrafo líquido Shimadzu Prominence UFLC acoplado a um detector UV-visível arranjo de diodos SPD M20A. A eluição foi realizada em modo isocrático com acetonitrila/água (60:40 v/v) a uma vazão de 1,5 mL/min.



## Análise estatística

Os dados experimentais obtidos foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o programa SANEST (Zonta et al. 1984). Utilizou-se análise de regressão polinomial para os dados quantitativos e o teste de Tukey em 5% de probabilidade para os dados qualitativos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Efeitos sobre o tamanho dos frutos

Em relação ao tamanho dos frutos, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas e não inoculadas para a variável comprimento nas doses 0, 75 e 100 mg P/dm<sup>3</sup>. Por outro lado, as plantas inoculadas com *C. etunicatum* que receberam doses de 25 e 50 mg P/dm<sup>3</sup> de solo mostraram um aumento de 18% e 13%, respectivamente, no comprimento dos frutos comparado ao tratamento sem inoculação. Porém, não houve diferença significativa entre os frutos de plantas inoculadas nas respectivas doses. Quanto à variável diâmetro, nenhum tratamento apresentou diferença estatística em nível de significância 0,05 de probabilidade (Tabela 1).

Mena-Violante et al. (2006) reportaram um aumento de 13% na largura de frutos de pimenteiras (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) não submetidas a estresse hídrico e inoculadas com *Rhizophagus fasciculatus*. A inoculação micorrízica também proporcionou um aumento de 15% no comprimento dos frutos comparado ao tratamento sem inoculação. De acordo com Franco et al. (2013), o impacto da inoculação micorrízica sobre a qualidade do fruto pode estar estreitamente relacionado à melhor condição nutricional da planta causada pelo FMA. De fato, durante a associação micorrízica, o fungo melhora a aquisição de nutrientes minerais do solo, particularmente P e N, que podem influenciar no tamanho de frutos de *Capsicum* (Roy et al. 2011).

Tabela 1. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre o tamanho de frutos de pimenteira (*C. annuum* L. var. *annuum*).

Doses de P	FMA	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	—	—
	<i>C. etunicatum</i>	29,30 a	13,14 a
	<i>R. clarus</i>	28,45 a	13,90 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	25,93 b	12,41 a
	<i>C. etunicatum</i>	30,57 a	13,57 a
	<i>R. clarus</i>	28,75 ab	13,54 a
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	26,95 b	12,96 a
	<i>C. etunicatum</i>	30,48 a	13,41 a
	<i>R. clarus</i>	28,72 ab	13,32 a
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	27,71 a	12,96 a
	<i>C. etunicatum</i>	28,75 a	13,24 a
	<i>R. clarus</i>	30,54 a	13,48 a
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	28,08 a	13,02 a
	<i>C. etunicatum</i>	30,48 a	13,80 a
	<i>R. clarus</i>	28,63 a	13,18 a
CV (%)		7,6	5,4

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

\* (—) Os parâmetros não foram avaliados por falta de frutos.

#### Efeitos sobre a nutrição dos frutos

Em relação aos teores de macronutrientes nas pimentas, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas e não inoculadas para o teor de N nas doses de 0 a 75 mg P/dm<sup>3</sup>. Por outro lado, as plantas cultivadas na dose 100 mg P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *R. clarus* apresentaram aumento de 10% nos teores de N comparado ao tratamento sem fungo na mesma dose. Porém, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas dentro da dose citada. Para o teor de P, a inoculação com *C. etunicatum* foi mais eficiente em plantas que receberam 75 mg P/dm<sup>3</sup>. Nesse caso, houve um aumento de 17% no teor de P comparado a plantas não inoculadas. Em plantas cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup>, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 12% nos teores de K comparado ao tratamento sem fungo (Tabela 2).

Tabela 2. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre a nutrição de frutos de pimenteira (*C. annuum* L. var. *annuum*).

Doses de P	FMA	N (g/Kg)	P (g/Kg)	K (g/Kg)	Mg (g/Kg)	Ca (g/Kg)	S (g/Kg)	Fe (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	B (mg/Kg)
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>C. etunicatum</i>	17,81 a	3,28 b	24,57 a	2,07 a	1,08 a	2,22 a	77,37 a	9,53 a	37,65 a	30,02 a	30,72 a
	<i>R. clarus</i>	17,51 a	3,79 a	23,57 a	2,07 a	1,11 a	2,06 b	45,95 b	10,65 a	34,93 a	27,66 a	30,87 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	16,98 a	2,58 b	22,86 b	1,65 b	1,31 a	2,01 a	86,75 a	4,13 b	36,62 ab	35,12 a	16,67 b
	<i>C. etunicatum</i>	17,88 a	4,23 a	25,63 a	2,19 a	1,41 a	2,14 a	66,32 b	8,78 a	40,22 a	29,41 a	29,88 a
	<i>R. clarus</i>	16,93 a	3,97 a	23,52 b	2,08 a	1,08 b	2,07 a	55,98 b	9,97 a	33,46 b	31,76 a	20,05 ab
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	16,94 a	3,81 b	25,05 a	1,89 b	1,36 a	1,98 a	74,00 ab	4,88 c	40,03 a	28,32 a	19,22 a
	<i>C. etunicatum</i>	17,60 a	4,27 a	24,87 a	2,12 a	1,24 a	2,09 a	81,25 a	8,96 b	38,60 a	29,46 a	25,33 a
	<i>R. clarus</i>	17,29 a	4,06 ab	23,50 a	2,15 a	1,19 a	2,06 a	64,50 b	11,97 a	40,53 a	28,18 a	25,46 a
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	16,06 a	3,86 b	24,57 a	2,05 ab	1,30 ab	2,04 ab	60,25 ab	4,59 b	37,47 ab	37,42 a	23,11 a
	<i>C. etunicatum</i>	17,18 a	4,51 a	24,26 a	2,17 a	1,37 a	2,08 a	64,00 a	9,27 a	39,93 a	27,16 b	27,36 a
	<i>R. clarus</i>	15,94 a	3,97 b	23,16 a	1,99 b	1,16 b	1,90 b	47,58 b	9,35 a	32,37 b	29,41 ab	20,60 a
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	15,99 b	4,25 a	24,37 a	1,99 b	1,37 a	2,04 a	75,62 a	3,93 b	36,68 a	31,68 a	22,91 a
	<i>C. etunicatum</i>	17,34 a	4,54 a	25,16 a	2,22 a	1,19 ab	2,10 a	62,07 ab	8,35 a	37,96 a	32,88 a	23,93 a
	<i>R. clarus</i>	17,61 a	4,51 a	24,21 a	2,29 a	1,15 b	2,09 a	52,90 b	9,97 a	35,81 a	34,55 a	27,70 a
CV (%)		4,7	6,7	4,1	5,4	10,3	4,9	14,2	16,2	10,6	19,1	27,1

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

\* (—) Os parâmetros não foram avaliados por falta de frutos.

Em relação ao teor de Mg, plantas cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *C. etunicatum* tiveram um aumento de 33% comparado ao tratamento controle, enquanto em plantas cultivadas nas doses 50 e 100 mg de P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *R. clarus* foi observado um aumento de 14% e 15%, respectivamente, comparado às plantas não inoculadas nas respectivas doses (Tabela 2). Contudo, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas dentro de cada dose supracitada. Nas doses 25, 75 e 100 mg P/dm<sup>3</sup> *C. etunicatum* foi mais eficiente na absorção de Ca do que *R. clarus*, no entanto não houve diferença significativa comparado ao tratamento sem inoculação micorrízica em cada dose. Para o teor de S, a inoculação com *C. etunicatum* foi mais eficiente em plantas que receberam dose 0 mg P/dm<sup>3</sup>, proporcionando um aumento de 8% comparado à inoculação com *R. clarus*.

Em relação aos teores de micronutrientes nos frutos, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas e não inoculadas para os teores de Zn, Mn e B nas doses 50 e 100 mg P/dm<sup>3</sup> (Tabela 2). Em plantas cultivadas nas doses 25 e 75 mg P/dm<sup>3</sup>, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou uma melhor absorção de Zn comparado à inoculação com *R. clarus*, porém não houve diferença significativa comparado às plantas do tratamento controle nas respectivas doses. Em relação à absorção de Mn, as plantas do tratamento controle sem FMA, cultivadas na dose 75 mg P/dm<sup>3</sup>, obtiveram um incremento de 38% comparado às plantas inoculadas com *C. etunicatum* na mesma dose. Por outro lado, *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 79% na absorção de B nas plantas cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup>, porém não houve diferença significativa comparado às plantas inoculadas com *R. clarus*.

Para o teor de Fe nos frutos, as plantas não inoculadas e cultivadas na dose 25mg P/dm<sup>3</sup> obtiveram melhor resposta comparado às plantas com FMA. Nesse caso, houve um aumento de 31% e 55% no teor de Fe comparado a plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus*, respectivamente (Tabela 2). Por outro lado, a absorção de Cu foi melhor em plantas inoculadas com *R. clarus* na dose 50 mg P/dm<sup>3</sup>, sendo observado um aumento de 145% comparado ao tratamento sem inoculação micorrízica.

São raros os trabalhos que reportam sobre os efeitos das micorrizas arbusculares sobre o teor de macro e micronutrientes em frutos. Por outro lado, há diversos estudos que demonstram uma grande translocação de nutrientes das

raízes para a parte aérea em plantas de pimenta colonizadas (Sreenivasa et al. 1993; Davies et al. 2000; Ortas et al. 2011).

No presente estudo os teores de K e Mg foram maiores em frutos de plantas colonizadas cultivadas sob baixa concentração de P no solo. É importante ressaltar que durante a associação micorrízica, o P desempenha papel fundamental no controle da simbiose (Smith & Read 2008). Além disso, uma vez estabelecida a relação fungo-planta, a absorção de P é claramente influenciada pela rede micelial (Smith & Read 2008). O alto teor de P no tecido vegetal pode apresentar efeitos sinérgicos e antagônicos relacionados à absorção de outros elementos minerais. O P influencia positivamente a concentração de N, K, Ca e Mg na planta, enquanto está correlacionado negativamente com os teores de Fe, Zn e Mn (Gunes et al. 1998). Portanto, o papel dos FMA sobre a absorção de P pode estar relacionado com os teores de outros elementos minerais encontrados nesse estudo.

O boro (B) está envolvido na síntese da parede celular, na integridade da membrana plasmática e em atividades metabólicas da planta (Marschener 2012; Taiz & Zeiger 2013). Isto faz do B um elemento de grande importância no que diz respeito à qualidade do fruto. No presente estudo a inoculação micorrízica proporcionou um aumento no teor desse mineral, o qual pode repercutir na qualidade visual do fruto (Figura 1). Davies & Linderman (1991) reportaram um aumento de B no tecido foliar de plantas da cultivar 'Early Bountiful' (*C. annuum* L.) sujeitas à colonização micorrízica. Porém, os autores observaram uma diminuição no teor de cobre (Cu) com o aumento da fertilização fosfatada. O que não foi observado nesse trabalho, onde o teor de Cu foi influenciado positivamente pelo tratamento de inoculação em dose média de P.



Figura 1. Aspecto dos frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) cultivadas na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *C. etunicatum*, aos 120 dias após a sementeira.

## Efeitos sobre os parâmetros de qualidade

Em relação ao teor de sólidos solúveis (SST) nas pimentas, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus*, cultivadas nas doses 0, 25 e 75 mg P/dm<sup>3</sup>, bem como não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas e não inoculadas na dose 50 mg P/dm<sup>3</sup> (Tabela 3). Por outro lado, na dose 75 mg P/dm<sup>3</sup> o tratamento controle apresentou um aumento de 26% e 13% comparado aos tratamentos de inoculação com *C. etunicatum* e *R. clarus*, respectivamente. Similarmente, na dose 100 mg P/dm<sup>3</sup> os frutos de plantas não inoculadas apresentaram aumento de 40% no SST comparado à inoculação com *R. clarus*, porém não houve diferença significativa comparado à inoculação com *C. etunicatum*.

Para o parâmetro acidez total titulável (ATT), não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus*, cultivadas nas doses 0 e 25 mg P/dm<sup>3</sup>, bem como não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas e não inoculadas nas doses 50 e 75 mg P/dm<sup>3</sup>. Na dose 100 mg P/dm<sup>3</sup>, os frutos de plantas cultivadas sem inoculação micorrízica apresentaram aumento de 70% e 31% na ATT comparado aos tratamentos de inoculação com *C. etunicatum* e *R. clarus*, respectivamente.

Tabela 3. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre os parâmetros de qualidade de frutos de pimenteira (*C. annuum* L. var. *annuum*).

Doses de P	FMA	SST (°Brix)	ATT (% ác. cítrico)	AA (mg/100 g)
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	—	—	—
	<i>C. etunicatum</i>	18,55 a	1,28 a	231,54 a
	<i>R. clarus</i>	16,52 a	1,34 a	270,42 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	—	—	—
	<i>C. etunicatum</i>	16,35 a	1,36 a	269,79 a
	<i>R. clarus</i>	16,47 a	1,33 a	242,21 a
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	16,85 a	1,49 a	304,52 a
	<i>C. etunicatum</i>	16,47 a	1,55 a	237,75 ab
	<i>R. clarus</i>	16,05 a	1,47 a	218,64 b
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	19,32 a	1,31 a	239,40 a
	<i>C. etunicatum</i>	15,35 b	1,36 a	235,22 a
	<i>R. clarus</i>	17,05 b	1,35 a	257,03 a
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	20,10 a	1,85 a	284,08 a
	<i>C. etunicatum</i>	18,20 a	1,09 b	264,51 a
	<i>R. clarus</i>	14,37 b	1,41 b	238,37 a
CV (%)		8,6	17,6	21,3

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

\* (—) Os parâmetros não foram avaliados por falta de frutos.

O teor de sólidos solúveis é uma das principais características dos frutos no que diz respeito ao sabor, visto que é nesta fração que se encontram os açúcares e os ácidos. Este teor é também indicador da qualidade dos frutos e dos seus subprodutos. Quanto maior for o teor de sólidos solúveis, maior será o rendimento industrial (Guimarães et al. 2007). Outro parâmetro como a acidez titulável também é utilizado para indicar a qualidade dos frutos e reflete o estágio de maturação dos mesmos (Santana et al. 2004).

Diversos estudos têm demonstrado os efeitos positivos das micorrizas arbusculares sobre o crescimento e a produção de pimenta. No entanto, é importante salientar que esses incrementos podem afetar negativamente a qualidade dos frutos (Stevens & Rudich 1978), uma vez que podem agir como dreno, competindo por carboidratos (Delgado et al. 2004). Além disso, a presença de fungos em raízes colonoizadas pode aumentar a atividade metabólica das células arbusculadas levando ao aumento da remoção de açúcares da parte aérea para as raízes (Bielecki 1973; Kaschuk et al. 2009).

No presente estudo, as plantas inoculadas cultivadas em solos com baixa disponibilidade de P, tiveram um melhor crescimento comparado às plantas sem fungo. Além disso, foi observado uma elevada taxa de colonização micorrízica dentre as plantas inoculadas. Isso pode ter contribuído para a diminuição do SST e ATT nos tratamentos de inoculação.

De acordo com a Tabela 3, as plantas cultivadas nas doses 0 e 25 mg P/dm<sup>3</sup> não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos de inoculação com *C. etunicatum* e *R. clarus* quanto ao teor de ácido ascórbico (AA) nos frutos. Além disso, não houve diferença significativa entre as plantas inoculadas e não inoculadas nas doses 75 e 100 mg P/dm<sup>3</sup> para este parâmetro. É interessante observar que na dose 50 mg P/dm<sup>3</sup> houve um aumento de 39% no teor de AA nos frutos de plantas não inoculadas comparado aos frutos de plantas inoculadas com *R. clarus*, porém não houve diferença significativa comparado à inoculação com *C. etunicatum*.

Por outro lado, Castillo et al. (2009 a, b) reportaram um pequeno aumento na concentração de AA nos frutos de plantas colonizadas por FMA. Entretanto, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos de inoculação e controle para ATT e SST.

A vitamina C é um dos componentes nutricionais de maior importância, sendo utilizada como índice de qualidade dos alimentos (Chitarra & Chitarra 2005). Sua concentração em frutas e vegetais pode ser influenciada por diversos fatores, tais como diferenças genotípicas, condições climáticas, práticas culturais, maturidade, métodos de colheita e procedimentos de manuseio pós-colheita (Lee & Kader 2000). Assim como SST e ATT, os teores de ácido ascórbico nos tratamentos de inoculação podem ter sido afetados negativamente pelo maior crescimento vegetativo e produção de frutos observado nas plantas colonizadas. Nessas condições, há uma limitação na capacidade fisiológica da planta em fornecer matéria-prima em quantidade adequada ao suprimento de elevadas produções e a manutenção da qualidade do fruto (Stevens & Rudich 1978; Caliman 2003). Além disso, um elevado crescimento vegetativo pode agir como dreno, favorecendo um atraso no amadurecimento dos frutos (Delgado *et al.* 2004), e conseqüentemente, uma diminuição no teor de AA, já que o grau de amadurecimento dos frutos de pimenta possui estreita relação com os teores de ácido ascórbico, sendo estes menores nos primeiros estádios de maturação atingindo o valor máximo em frutos totalmente maduros (Kumar & Tata 2009).

Em relação ao teor de capsaicina (CAP) nos frutos, as plantas do tratamento controle cultivadas na dose 50 mg P/dm<sup>3</sup>, apresentaram frutos com maior valor comparado aos tratamentos de inoculação (Tabela 4). Nesse caso, houve um aumento de 88% e 35% no teor de CAP comparado aos tratamentos de inoculação com *C. etunicatum* e *R. clarus*, respectivamente. Por outro lado, os frutos de plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus* cultivadas na dose 75 mg P/dm<sup>3</sup> de solo, apresentaram aumento de 43% e 73% no teor de CAP comparado ao tratamento sem fungo, porém não houve diferença significativa entre os tratamentos de inoculação na respectiva dose. Já em 0 mg P/dm<sup>3</sup> de solo, os frutos de plantas inoculadas com *R. clarus* aumentaram em 37% o teor de CAP comparado aos frutos de plantas inoculadas com *C. etunicatum*. Nas doses 25 e 100 mg P/dm<sup>3</sup> não houve diferença significativa entre frutos de plantas inoculadas e não inoculadas para o teor de CAP.

Para o teor de dihidrocapsaicina (DHC) nos frutos, as plantas do tratamento sem fungo apresentaram um aumento de 63% e 53% na dose 50 mg P/dm<sup>3</sup> comparado às plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus*, respectivamente (Tabela 4). Já na dose 100 mg P/dm<sup>3</sup>, os frutos das plantas não



inoculadas apresentaram teor de DHC 31% e 41% maior comparado aos tratamentos de inoculação com *C. etunicatum* e *R. clarus*, respectivamente. Por outro lado, os frutos de plantas inoculadas com *C. etunicatum* e *R. clarus* cultivadas na dose 75 mg P/dm<sup>3</sup> de solo, apresentaram ambos um aumento de 30% no teor de DHC comparado ao tratamento sem fungo, porém não houve diferença significativa entre os tratamentos de inoculação na respectiva dose. Na dose 0 mg P/dm<sup>3</sup>, a inoculação com *R. clarus* aumentou em 63% o teor de DHC nos frutos comparado à inoculação com *C. etunicatum*, e na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup>, não houve diferença significativa entre os frutos de plantas inoculadas e não inoculadas para o teor de DHC.

Tabela 4. Efeitos de doses de fósforo e inoculação com FMA sobre os teores de capsaicinoides em frutos de pimenteira (*C. annuum* L. var. *annuum*).

Doses de P	FMA	CAP (mg/g de MS)	DHC (mg/g de MS)
0 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	—	—
	<i>C. etunicatum</i>	0,275 b	0,297 b
	<i>R. clarus</i>	0,377 a	0,485 a
25 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,280 a	0,290 a
	<i>C. etunicatum</i>	0,367 a	0,365 a
	<i>R. clarus</i>	0,310 a	0,300 a
50 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,395 a	0,475 a
	<i>C. etunicatum</i>	0,210 b	0,292 b
	<i>R. clarus</i>	0,292 b	0,310 b
75 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,270 b	0,312 b
	<i>C. etunicatum</i>	0,387 a	0,405 a
	<i>R. clarus</i>	0,467 a	0,407 a
100 mg/dm <sup>3</sup>	Sem fungo	0,357 a	0,460 a
	<i>C. etunicatum</i>	0,330 a	0,350 b
	<i>R. clarus</i>	0,392 a	0,325 b
CV (%)		17,8	13,9

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

\* (—) Os parâmetros não foram avaliados por falta de frutos.

A presença de capsaicina, o princípio ativo da pungência das pimentas, é restrito a frutos de cultivares picantes. Esse composto, o qual é produzido na placenta do fruto, requer 3 mol de nitrogênio (N) para ser formado. Portanto, a disponibilidade de N pode afetar a pungência da pimenta pelo seu teor nos tecidos do fruto (Monforte-González et al. 2010). Por outro lado, o potássio (K) também pode afetar indiretamente a pungência da pimenta devido ao seu efeito positivo

no desenvolvimento do fruto (Johnson & Decoteau 1996). Além disso, Saga (1972) reportou um aumento no teor de capsaicina nos frutos relacionado com a aplicação de fósforo. Ele constatou que o teor de capsaicina em frutos de pimenta vermelha (*C. annuum* L.) foi muito baixo em vasos sem a aplicação de P. O aumento desses elementos nos frutos de plantas colonizadas observado nesse estudo, pode ser um importante fator para o incremento dos teores de capsaicinoides em *C. annuum* L. var. *annuum*.

Também, a associação com FMA promove mudanças bioquímicas e fisiológicas nas plantas, ativando diversas rotas metabólicas que podem resultar em um aumento de compostos secundários (Rojas-Andrade et al. 2003; Strack & Fester 2006; Carlsen et al. 2008). Portanto, o aumento dos teores de capsaicinoides reportados nesse trabalho pode estar relacionado a uma maior síntese devido às alterações na capacidade fisiológica do hospedeiro durante a simbiose.

## CONCLUSÕES

Os resultados encontrados nesse estudo mostram que a inoculação micorrízica influenciou positivamente a composição mineral das pimentas, aumentando os teores de N, P, K, Mg, B e Cu. O tamanho dos frutos e os teores de capsaicinoides também foram influenciados pelos tratamentos de inoculação. No entanto, os parâmetros SST, ATT e AA foram melhores nos tratamentos sem FMA. Portanto, a inoculação micorrízica de pimenteiras é uma alternativa para se obter frutos com melhores condições nutricionais e maior pungência. Contudo, esta associação mutualista pode ter efeito antagônico em outros parâmetros de qualidade, prejudicando aspectos sensoriais do fruto, tais como sabor e aroma.

## REFERÊNCIAS

ANTONIOUS, G. F., BERKE, T. & JARRET, R. L. (2009). Pungency in *Capsicum chinense*: Variation among countries of origin. *Journal of Environmental Science and Health B: Pesticides, Food Contaminants and Agricultural*

*Wastes* **44**, 179–184.

- APPENDINO, G. (2008). Capsaicin and capsaicinoids. In *Modern Alkaloids: Structure, Isolation, Synthesis and Biology* (Eds E. Fattorusso & O. Taglialatela-Scafati), pp. 73–109. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- BIELESKI, R. L. (1973). Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annual Review of Plant Physiology* **24**, 225–252.
- CALIMAN, F. R. B. (2003). *Produção e qualidade de frutos de genótipos de tomateiro em ambiente protegido e no campo*. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.
- CARLSEN, S. C. K., UNDERSTRUP, A., FOMSGAARD, I. S., MORTENSEN, A. G. & RAVNSKOV, S. (2008). Flavonoids in roots of white clover: interaction of arbuscular mycorrhizal fungi and a pathogenic fungus. *Plant and Soil* **302**, 33–43.
- CASTILLO, C. G., ORTIZ, C. A., BORIE, F. R. & RUBIO, R. E. (2009a). Respuesta de ají (*Capsicum annuum* L.) cv. “Cacho de Cabra” a la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *Información Tecnológica* **20**, 3–14.
- CASTILLO, C. G., SOTOMAYOR, L., ORTIZ, C. A., LEONELLI, G., BORIE, F. R. & RUBIO, R. E. (2009b). Effect of arbuscular mycorrhizal fungin on an ecological crop of chili peppers (*Capsicum annuum* L.). *Chilean Journal of Agricultural Research* **69**, 79–87.
- CHITARRA, A. B. & CHITARRA, M. (2005). *Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio*. Lavras: UFLA.
- COLLINS, M. D., WASMUND, L. M. & BOSLAND, P.W. (1995). Improved method for quantifying capsaicinoids in *Capsicum* using high-performance liquid chromatography. *HortScience* **30**, 137–139.

- DAVIES, F. T. Jr. & LINDERMAN, R. G. (1991). Short term effects of phosphorus and VA-mycorrhizal fungi on nutrition, growth and development of *Capsicum annuum* L. *Scientia Horticulturae* **45**, 333–338.
- DAVIES, F. T. Jr., OLALDE-PORTUGAL, V., ALVARADO, M. J., ESCAMILLA, H. M., FERRERA-CERRATO, R. C. & ESPINOSA, J. I. (2000). Alleviating phosphorus stress of chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. 'San Luis') by arbuscular mycorrhizal inoculation. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **75**, 655–661.
- DELGADO, R., MARTIN, P., ÁLAMO, M. & GONZÁLEZ, M. R. (2004). Changes in the phenolic composition of grape berries during ripening in relation to vineyard nitrogen and potassium fertilization rates. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **84**, 623–630.
- DEMIR, S. (2004). Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. *Turkish Journal of Biology* **28**, 85–90.
- FAO (2013). *FAOSTAT*. Rome: FAO. Available online at: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> (accessed 6 May 2015).
- FRANCO, A. D., CARRILLO, M. A., CHAIREZ, F. O. & CABRERA, O. G. (2013). Plant nutrition and fruit quality of pepper associated with arbuscular mycorrhizal in greenhouse. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **4**, 315–321.
- FRARY, A. & FRARY, A. (2012). Physiology of metabolites. In *Peppers: Botany, Production and Uses* (Ed. V. M. Russo), pp. 176–188. Wallingford, UK: CABI.
- GOSLING, P., HODGE, A., GOODLASS, G. & BENDING, G. D. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **113**, 17–35.

- GUIMARÃES, M. A., SILVA, D. J. H., FONTES, P. C. R., CALIMAN, F. R. B., LOOS, R. A. & STRINGHETA, P. C. (2007). Produção e sabor dos frutos de tomateiro submetidos a poda apical e de cachos florais. *Horticultura Brasileira* **25**, 265–269.
- GUNES, A., ALPASLAN, M. & INAL, A. (1998). Critical nutrient concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrients of NFT-grown young tomato plants. *Journal of Plant Nutrition* **21**, 2035–2047.
- JACKSON, M. L. (1965). *Soil chemical analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- JOHNSON, C. D. & DECOTEAU, D. R. (1996). Nitrogen and potassium fertility affects jalapeño pepper plant growth, pod yield, and pungency. *HortScience* **31**, 1119–1123.
- KASCHUK, G., KUYPER, T. W., LEFFELAAR, P. A., HUNGRIA, M. & GILLER, K. E. (2009). Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses? *Soil, Biology and Biochemistry* **41**, 1233–1244.
- KIRIACHEK, S. G., AZEVEDO, L. C. B., PERES, L. E. P. & LAMBAIS, M. R. (2009). Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **33**, 1–16.
- KOSUGE, S. & FURUTA, M. (1970). Studies on the pungent principle of *Capsicum*. Part XIV chemical constitution of the pungent principle. *Agricultural and Biological Chemistry* **34**, 248–256.
- KUMAR, O. A. & TATA, S. S. (2009). Ascorbic Acid Contents in Chili Peppers (*Capsicum* L.). *Notulae Scientia Biologicae* **1**, 50–52.
- LEE, S. K. & KADER, A. A. (2000). Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology* **20**, 207–220.

- MARSCHNER, P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. London: Academic Press.
- MENA-VIOLANTE, H. G., OCAMPO-JIMÉNEZ, O., DENDOOVEN, L., MARTÍNEZ-SOTO, G., GONZÁLEZ-CASTAÑEDA, J., DAVIES JR, F. T. & OLALDE-PORTUGAL, V. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile ancho (*Capsicum annum* L. cv San Luis) plants exposed to drought. *Mycorrhiza* **16**, 261–267.
- MONFORTE-GONZÁLEZ, M., GUZMÁN-ANTONIO, A., UUH-CHIM, F. & VÁZQUES-FLOTA, F. (2010). Capsaicin accumulation is related to nitrate content in placentas of habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* **90**, 764–768.
- ORTAS, I., SARI, N., AKPINAR, Ç. & YETISIR, H. (2011). Screening mycorrhiza species for plant growth, P and Zn uptake in pepper seedling grown under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae* **128**, 92–98.
- PETERS, J. B. (2005). *Wisconsin Procedures for Soil Testing, Plant Analysis and Feed & Forage Analysis: Plant Analysis*. Department of Soil Science, College of Agriculture and Life Sciences, University of Wisconsin-Extension, Madison, WI. <[http://uwlab.soils.wisc.edu/files/procedures/plant\\_icp.pdf](http://uwlab.soils.wisc.edu/files/procedures/plant_icp.pdf)> Acceso em: 20/02/2014.
- ROJAS-ANDRADE, R., CERDA-GARCÍA-ROJAS, C. M., FRÍAZ-HERNÁNDEZ, J. T., DENDOOVEN, L., OLALDE-PORTUGAL, V. & RAMOS-VALDIVIA, A. C. (2003). Changes in the concentration of trigonelline in a semi-arid leguminous plant (*Prosopis laevigata*) induced by an arbuscular mycorrhizal fungus during the presymbiotic phase. *Mycorrhiza* **13**, 49–52.
- ROY, S. S., KHAN, M. S. I. & PALL, K. K. (2011). Nitrogen and phosphorus efficiency on the fruit size and yield of *Capsicum*. *Journal of Experimental Sciences* **2**, 32–37.

- SAGA, K. (1972). Studies on the pungency of red pepper (*Capsicum annuum*) fruit: the effect of mineral nutrition, with special reference to phosphorus nutrition. *Bulletin of the Faculty of Agriculture Hirosaki University* **18**, 96–106.
- SANTANA, L. R. R., MATSUURA, F. C. A. U. & CARDOSO, R. L. (2004). Genótipos melhorados de mamão (*Carica papaya* L.): Avaliação sensorial e físico-química dos frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* **24**, 217–222.
- SANTOYO, L. G. L. (2011). *Fertilización fosfatada en chile guajillo (Capsicum annuum L.) y su interacción con hongos micorrízicos arbusculares*. Dissertation, Colegio de Postgraduados, Mexico.
- SMITH, S. E. & READ, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. London: Academic Press.
- SREENIVASA, M. N., KRISHNARAJ, P. U., GANGADHARA, G. A. & MANJUNATHAIAH, H. M. (1993). Response of chilli (*Capsicum annuum* L.) to the inoculation of an efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *Scientia Horticulturae* **53**, 45–52.
- STRACK, D., FESTER, T., HAUSE, B., SCHLIEMANN, W. & WATER, M. H. (2003). Review paper: Arbuscular mycorrhiza: biological, chemical and molecular aspects. *Journal of Chemical Ecology* **29**, 1955–1979.
- STRACK, D. & FESTER, T. (2006). Isoprenoid metabolism and plastid reorganization in arbuscular mycorrhizal roots. *New Phytologist* **172**, 22–34.
- STEVENS, M. A. & RUDICH, J. (1978). Genetic potential for overcoming physiological limitations on adaptability yield, and quality in the tomato. *HortScience* **13**, 673–678.

TAIZ, L. & ZEIGER, E. (2013). *Plant Physiology*. Artmed.

ZONTA, E. P., MACHADO, A. A., SILVEIRA JUNIOR, P. (1984). *Sistema de análises estatísticas para microcomputadores (SANEST)*. Pelotas: UFP.



#### 4. RESUMO E CONCLUSÕES

Os benefícios da inoculação micorrízica sobre o crescimento, a produtividade e a nutrição de plantas é bem documentado. No entanto, o uso de micorrizas no cultivo de pimenta e pimentão (*Capsicum* spp.) ainda é pouco explorado comparado a outras culturas de importância econômica. Os objetivos desse trabalho foram (i) avaliar os efeitos da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e doses de fósforo (P) sobre os parâmetros de crescimento e produção de frutos em pimenteira; (ii) verificar o efeito das doses de P sobre a colonização micorrízica; e (iii) avaliar os efeitos da inoculação com FMA e doses de P sobre a composição mineral e os atributos de qualidade de frutos de pimenteira (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*). Foi realizado um experimento em casa de vegetação na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, localizada em Campos dos Goytacazes, RJ, entre os meses de setembro/2014 e fevereiro/2015. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 3x5 constituído por três tratamentos de inoculação (com *Rhizophagus clarus*, *Claroideoglomus etunicatum* e controle não inoculado) x 5 doses de fósforo (0, 25, 50, 75 e 100 mg/dm<sup>3</sup>), com quatro repetições e dois vasos por unidade experimental contendo uma planta, totalizando 120 vasos. Após 150 dias, a altura e o diâmetro das plantas inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram um aumento de 434% e 242%, na dose 0 mg/dm<sup>3</sup>, e 78% e 44%, na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente, comparado

ao tratamento sem inoculação em cada dose. Também houve um incremento de 6017%, 5625% e 6866% na área foliar, massa fresca e seca da folha, respectivamente, de plantas cultivadas na dose 0 mg/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *R. clarus*. Além disso, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 275% e 287% na área foliar e massa fresca da folha de plantas cultivadas na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, comparado às plantas sem inoculação. A inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 3943% e 6014% na massa fresca e seca do caule, respectivamente, na dose 0 mg/dm<sup>3</sup> em relação às plantas não inoculadas. Enquanto na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, as plantas inoculadas com *R. clarus* obtiveram um incremento de 93% e 108% na massa fresca e seca do caule, respectivamente. Além disso, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 4217% e 7133% na massa fresca e seca da raiz de plantas cultivadas na dose 0 mg/dm<sup>3</sup>, comparado às plantas sem inoculação. Enquanto na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, as plantas inoculadas com *R. clarus* obtiveram um incremento de 47% e 96% na massa fresca e seca da raiz, respectivamente. A inoculação com *R. clarus* mostrou-se mais eficiente na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>, apresentando um aumento de 149% no número de frutos por planta, comparado ao tratamento sem fungo. Além disso, a inoculação com *R. clarus* foi 25% maior do que a inoculação com *C. etunicatum* para a porcentagem de colonização micorrízica, na dose 25 mg/dm<sup>3</sup>. Na dose 25 mg P/dm<sup>3</sup>, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 18% no comprimento dos frutos comparado ao tratamento sem inoculação. Os frutos de plantas cultivadas na dose 25 mg/dm<sup>3</sup> e inoculadas com *C. etunicatum* mostraram um aumento nos teores de K (12%), Mg (33%) e B (79%) comparado ao controle. Na dose 75 mg/dm<sup>3</sup>, a inoculação com *C. etunicatum* proporcionou um aumento de 17% no teor de P em frutos de plantas inoculadas comparado ao tratamento sem FMA. Além disso, a inoculação com *R. clarus* proporcionou um aumento nos teores de N (10%) e Cu (145%) nas doses 100 e 50 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente, comparado ao tratamento controle. Além disso, os teores de SST e ATT nos frutos de plantas do tratamento controle, tiveram um aumento de 26% e 70%, respectivamente, comparado à inoculação com *C. etunicatum*. Similarmente, o teor de AA foi 39% maior nos frutos de plantas não inoculadas comparado ao tratamento de inoculação com *R. clarus*. Os teores de CAP e DHC foram influenciados pela inoculação com *R. clarus* na dose 75 mg/dm<sup>3</sup>. Nesse caso, houve um aumento de

73% e 30% nos teores de CAP e DHC, respectivamente. De maneira geral, a utilização tanto de *R. clarus* como *C. etunicatum* associada à aplicação de 0 a 25 mg P/dm<sup>3</sup> no solo, promoveu um bom desempenho no que se refere ao crescimento de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* cultivadas em vaso e em casa de vegetação. Do ponto de vista da produção de frutos, a inoculação com *R. clarus* em solos com aplicação de 25 mg P/dm<sup>3</sup>, é mais recomendável para a cultura. Além disso, a inoculação micorrízica de pimenteiras é uma alternativa para se obter frutos com melhores condições nutricionais e maior pungência. Contudo, esta associação mutualista pode ter efeito antagônico em outros parâmetros de qualidade, prejudicando aspectos sensoriais do fruto, tais como sabor e aroma.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akiyama, K., Ogasawara, S., Ito, S., Hayashi, H. (2010) Structural requirements of strigolactones for hyphal branching in AM fungi. *Plant & Cell Physiology*, 51 (7): 1104-1117.
- Alves, M.K. (2006) *Avaliação Antiinflamatória e Antidislipidêmica de Capsicum baccatum var. pendulum L. (Solanaceae) – pimenta dedo-de-moça*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 30 p.
- Antonious, G.F., Berke, T., Jarret, R.L. (2009) Pungency in *Capsicum chinense*: Variation among countries of origin. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 44 (2): 179-184.
- Appendino, G. (2008) Capsaicin and Capsaicinoids. *In*: Fattorusso, E., Taglialatela-Scafati, O. (eds) *Modern Alkaloids: Structure, Isolation, Synthesis and Biology*. WILEY-VCH, p. 73-109.
- Atul-Nayyar, A., Hamel, C., Hanson, K., Germida, J. (2009) The arbuscular mycorrhizal symbiosis links N mineralization to plant demand. *Mycorrhiza*, 19 (4): 239-246.

- Bécard, G., Piché, Y. (1989) Fungal growth stimulation by CO<sub>2</sub> and root exudates in vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Applied and Environmental Microbiology*, 55: 2320-2325.
- Beltrano, J., Ruscitti, M., Arango, M.C., Ronco, M. (2013) Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and P levels. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13: 123-141.
- Boonlue, S., Surapat, W., Pukahuta, C., Suwanarit, P., Suwanarit, A., Morinaga, T. (2012) Diversity and efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from organic chili (*Capsicum frutescens*) farms. *Mycoscience*, 53: 10-16.
- Bosland, P.W., Votava, E.J. (2012) *Peppers: vegetable and spice Capsicums*. Wallingford: CABI, 248 p.
- Bouwmeester, H.J., Roux, C., Lopez-Raez, J.A., Bécard, G. (2007) Rhizosphere communication of plants, parasitic plants and AM fungi. *Trends in Plant Science*, 12 (5): 224-230.
- Carvalho, S.I.C., Bianchetti, L.B., Ribeiro, C.S.C., Lopes, C.A. (2006) *Pimentas do gênero Capsicum no Brasil*. Embrapa Hortaliças, 27p.
- Costa, L.M., Moura, N.F., Marangoni, C., Mendes, C.E., Teixeira, A.O. (2010) Atividade antioxidante de pimentas do gênero *Capsicum*. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30 (1): 51-59.
- Demir, S. (2004) Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. *Turkish Journal of Biology*, 28: 85-90.
- Elahi, F.E., Mridha, M.A.U., Aminuzzaman, F.M. (2012) Role of AM fungi on plant growth, nutrient uptake arsenic toxicity and chlorophyll content of chili grown in arsenic amended soil. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 37: 635-644.

- Estrada, B., Bernal, M.A., Diaz, J., Pomar, F., Merino, F. (2002) Capsaicinoids in vegetative organs of *Capsicum annuum* L. in relation to fruiting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (5): 1188-1191.
- Estrada-Luna, A.A., Davies, F.T. Jr. (2003) Arbuscular mycorrhizal fungi influence water relations, gas exchange, abscisic acid and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum*) plantlets during acclimatization and post-acclimatization. *Journal of Plant Physiology*, 160: 1073-1083.
- Estrada-Luna, A.A., Davies, F.T. Jr., Egilla, J.N. (2000) Mycorrhizal enhancement of the physiology and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) plantlets during acclimatization and post-acclimatization. *Hortscience*, 35: 426.
- FAO (2013). FAOSTAT, Rome: FAO: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> em 06/05/2015.
- Franco, A.D., Carrillo, M.A., Chairez, F.O., Cabrera, O.G. (2013) Plant nutrition and fruit quality of pepper associated with arbuscular mycorrhizal in greenhouse. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4: 315-321.
- Frary, A., Frary, A. (2012) Physiology of metabolites. In: Russo, V.M. (ed) *Peppers: botany, production and uses*. CABI, p. 176-188.
- Giovannetti, M., Avio, L., Sbrana, C. (2010) Fungal spore germination and pre-symbiotic mycelial growth – Physiological and genetic aspects. In: Koltai, H., Kapulnik, Y. (eds) *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Second Edition. Springer, p. 3-32.
- Goicoechea, N., Garmendia, I., Sánchez-Díaz, M., Aguirreolea, J. (2010) Review. Arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) as bioprotector agents against wilt induced by *Verticillium* spp. in pepper. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: S25-S42.

- Gosling, P., Hodge, A., Goodlass, G., Bending, G.D. (2006) Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113: 17-35.
- Harrison, M.J. (2005) Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Annual Review of Microbiology*, 59: 19-42.
- Javot, H., Pumplin, N., Harrison, M.J. (2007) Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell & Environment*, 30: 310-322.
- Joo, J.I., Kim, D.H., Choi, J.W., Yun, J.W. (2010) Proteomic analysis for antiobesity potential of capsaicin on white adipose tissue in rats fed with a high fat diet. *Journal of Proteome Research*, 9 (6): 2977-2987.
- Kiriacheck, S.G., Azevedo, L.C.B., Peres, L.E.P., Lambais, M.R. (2009) Regulação do desenvolvimento de micorrizas arbusculares. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33 (1): 1-16.
- Knotkova, H., Pappagallo, M., Szallasi, A. (2008) Capsaicin (TRPV1 agonist) therapy for pain relief: farewell or revival? *Clinical Journal of Pain*, 24 (2): 142-154.
- Korel, F., Ba datlio lu, N., Balaban, M.Ö., Hisil, Y. (2002) Ground red peppers: Capsaicinoids content, scoville scores, and discrimination by an electronic nose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (11): 3257-3261.
- Kosuge, S., Furuta, M. (1970) Studies on the pungent principle of *Capsicum* Part XIV Chemical constitution of the pungent principle. *Agricultural and Biological Chemistry*, 34 (2): 248-256.
- Kozukue, N., Han J.S., Kozukue, E., Lee S.J., Kim J.A., Lee K.R., Levin, C.E., Friedman, M. (2005) Analysis of eight capsaicinoids in peppers and pepper-containing foods by High-Performance Liquid Chromatography

- and Liquid Chromatography-Mass Spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (23): 9172-9181.
- Leung, F.W. (2008) Capsaicin-sensitive intestinal mucosal afferent mechanism and body fat distribution. *Life Sciences*, 83 (1-2): 1-5.
- Li, H., Smith, S.E., Holloway, R.E., Zhu, Y., Smith, F.A. (2006) Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorus uptake by wheat grown in a phosphorus-fixing soil even in the absence of positive growth responses. *New Phytologist*, 172 (3): 536-543.
- Linderman, R.G. (1992) Vesicular-arbuscular mycorrhizae and soil microbial interactions. In: Bethlenfalvay, G.J., Linderman, R.G. (eds) *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. ASA Special Publication 54. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, p. 45-70.
- Loaiza-Figueroa, F., Ritland, K., Cancino, J.A.L., Tanksley, S.D. (1989) Patterns of genetic variation of the genus *Capsicum* (*Solanaceae*) in Mexico. *Plant, Systematics and Evolution*, 165 (3-4): 159-188.
- López, P., Gorzalczany, S., Acevedo, C., Alonso, R., Ferraro, G. (2012) Chemical study anti-inflammatory activity of *Capsicum chacoense* and *C. baccatum*. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 22 (2): 455-458.
- Mena-Violante, H.G., Ocampo-Jiménez, O., Dendooven, L., Martínez-Soto, G., González-Castañeda, J., Davies, F.T. Jr., Olade-Portugal, V. (2006) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile ancho (*Capsicum annuum* L. cv San Luis) plants exposed to drought. *Mycorrhiza*, 16: 261-267.
- Nwokem, C.O., Nwokem, N.C., Usman, Y.O., Odjobo, B.O., Ocholi, O.J., Yebpella, G.G., Batari, M.L. (2011) Determination of capsaicin content in various parts of some peppers grown in Nigeria. *Continental Journal of Agronomy*, 5 (1): 6-10.



- Oh, H.S., Kim, Y.S., Lim, S.C., Hou, Y.F., Chang, I.Y., You, H.J. (2008) Dihydrocapsaicin (DHC), a saturated structural analog of capsaicin, induces autophagy in human cancer cells in a catalase-regulated manner. *Autophagy*, 4 (8): 1009-1019.
- Othman, Z.A.A., Ahmed, Y.B.H., Habila, M.A., Ghafar, A.A. (2011) Determination of Capsaicin and Dihydrocapsaicin in *Capsicum* Fruits Samples using High Performance Liquid Chromatography. *Molecules*, 16 (10): 8919-8929.
- Ozgonen, H., Erkilic, A. (2007) Growth enhancement and Phytophthora blight (*Phytophthora capsici* Leonian) control by arbuscular mycorrhizal fungal inoculation in pepper. *Crop Protection*, 26: 1682-1688.
- Oyetunji, O.J., Salami, A.O. (2011) Study on the control of *Fusarium* wilt in the stems of mycorrhizal and trichoderma inoculated pepper (*Capsicum annum* L.). *Journal of Applied Biosciences*, 45: 3071-3080.
- Pereira, J.A.P., Vieira, I.J.C., Freitas, M.S.M., Prins, C.L., Martins, M.A., Rodrigues, R. (2015) Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on *Capsicum* spp. *Journal of Agricultural Science*, x: 1-22.
- Perner, H., Schwarz, D., Bruns, C., Mader, P., George, E. (2007) Effect of arbuscular mycorrhizal colonization and two levels of compost supply on nutrient uptake and flowering of pelargonium plants. *Mycorrhiza*, 17: 469-474.
- Perry, L. (2012) Ethnobotany. In: Russo, V.M. (ed) *Peppers: botany, production and uses*. CABI, p. 1-13.
- Peterson, R.L., Massicotte, H.B., Melville, L.H. (2004) *Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology*. National Research Council of Canada, 173p.

- Pickersgill, B. (1991) Cytogenetics and evolution of *Capsicum* L. In: Tsuchiya, T., Gupta, P.K. (eds) *Chromosome engineering in plants: genetics, breeding, evolution, Part B*. Elsevier: Amsterdam, p. 139-160.
- Pozzobon, M.T., Schifino-Wittmann, M.T., Bianchetti, L.B. (2006) Chromosome numbers in wild and semidomesticated Brazilian *Capsicum* L. (Solanaceae) species: do  $x = 12$  and  $x = 13$  represent two evolutionary lines? *Botanical Journal of the Linnean Society*, 151 (2): 259-269.
- Redecker, D., Schü ler, A., Stockinger, H., Stürmer, S.L., Morton, J.B., Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23: 515-531.
- Reilly, C.A., Crouch, D.J., Yost, G.S., Fatah, A.A. (2001) Determination of capsaicin, dihydrocapsaicin, and nonivamide in self-defense weapons by liquid chromatography-mass spectrometry and liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography*, 912 (2): 259-267.
- Schü ler, A., Shwarzott, D., Walker, C. (2001) A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research*, 105 (12): 1413-1421.
- Schweiggert, U., Carle, R., Schieber, A. (2006) Characterization of major and minor capsaicinoids and related compounds in chili pods (*Capsicum frutescens* L.) by high-performance liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 557 (1-2): 236-244.
- Sharif, M., Claassen, N. (2011) Action mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in phosphorus uptake by *Capsicum annuum* L. *Pedosphere*, 21: 502-511.
- Silva, D.J.F., Scherer, B.S., Alves, M.K., Oliveira, J.R. (2009) Determinação do potencial antioxidante do extrato filtrado de *Capscium baccatum* (pimenta

dedo-de-moça) através do método DPPH. *Anais do X Salão de Iniciação Científica – PUCRS*, Rio Grande do Sul, p. 56-58.

Smith, S.E., Read, D.J. (2008) *Mycorrhizal Symbiosis*. Third Edition. Academic Press, 787p.

Stommel, J.R., Albrecht, E. (2012) Genetics. *In: Russo, V.M. (ed) Peppers: botany, production and uses*. CABI, p. 29-56.

Strack, D., Fester, T., Hause, B., Schliemann, W., Water, M.H. (2003) Review paper: Arbuscular mycorrhiza: biological, chemical and molecular aspects. *Journal of Chemical Ecology*, 29: 1955-1979.

Sung, Y., Chang, Y.Y., Ting, N.L. (2005) Capsaicin biosynthesis in water-stressed hot pepper fruits. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 46(1): 35-42.

Suzuki, T., Iwai, K. (1984) Constituents of red pepper species: chemistry, biochemistry, pharmacology, and food science of the pungent principle of *Capsicum* species. *In: Brossi, A. (ed) The Alkaloids: Chemistry and Pharmacology. Vol. 23*. Academic Press, p. 227-299.

Taylor, T.N., Remy, W., Hass, H., Kerp, H. (1995) Fossil arbuscular mycorrhizae from the early Devonian. *Mycologia*, 87 (4): 560-573.

Thoennissen, N.H., O'Kelly, J., Lu, D., Iwanski, G.B., La, D.T., Abbassi, S., Leiter, A., Karlan, B., Mehta, R., Koeffler, H.P. (2010) Capsaicin causes cell-cycle arrest and apoptosis in ER-positive and -negative breast cancer cells by modulating the EGFR/HER-2 pathway. *Oncogene*, 29 (2): 285-296.

Weiss, E.A. (2002) *Spice Crops*. CABI Publishing International, 411p.

Wong, G.Y., Gavva, N.R. (2009) Therapeutic potential of vanilloid receptor TRPV1 agonists and antagonists: Recent advances and setbacks. *Brain Research Reviews*, 60 (1): 267-277.

- Yang, Z.H., Wang, X.H., Wang, H.P., Hu, L.Q., Zheng, X.M. (2010) Capsaicin mediates cell death in bladder cancer T24 cells through reactive oxygen species production and mitochondrial depolarization. *Urology*, 75 (3): 735-741.
- Yoneyama, K., Yoneyama, K., Takeuchi, Y., Sekimoto, H. (2007) Phosphorus deficiency in red clover promotes exudation of orobanchol, the signal for mycorrhizal symbiosis and germination stimulant for root parasites. *Planta*, 225 (4): 1031-1038.
- Zewdie, Y., Bosland, P.W. (2001) Capsaicinoid profiles are not good chemotaxonomic indicators for *Capsicum* species. *Biochemical Systematics and Ecology*, 29 (2): 161-169.
- Zewdie, Y., Bosland, P.W. (2000) Evaluation of genotype, environment, and genotype-by-environment interaction for capsaicinoids in *Capsicum annum* L. *Euphytica*, 111(3): 185-190.

## 6. APÊNDICES

Tabela 1A. Quadro de Anova da variável altura de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	856,2419	285,4139	13,7979	0,00002**
Fungo	2	2713,3138	1356,6569	65,5856	0,00001**
Fósforo	4	3662,7378	915,6844	44,2674	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	4071,2324	508,9040	24,6022	0,00001**
Resíduo	42	868,7822	20,6852		
Total	59	12172,3083			

Média geral = 53,0339.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 2A. Quadro de Anova da variável diâmetro de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	2,4376	0,8125	5,7128	0,00259**
Fungo	2	20,2416	10,1208	71,1561	0,00001**
Fósforo	4	29,3287	7,3321	51,5502	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	36,2271	4,5283	31,8376	0,00001**
Resíduo	42	5,9738	0,1422		
Total	59	94,2089			

Média geral = 5,777.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 3A. Quadro de Anova da variável área foliar de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	1595,4726	531,8242	0,3349	0,80244 <sup>ns</sup>
Fungo	2	403698,4034	201849,2017	127,1153	0,00001**
Fósforo	4	99849,901	24962,4752	15,7202	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	176450,9729	22056,3716	13,8901	0,00001**
Resíduo	42	66692,7126	1587,9217		
Total	59	748287,4626			

Média geral = 300,9384.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 4A. Quadro de Anova da variável massa fresca da folha de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	2,4621	0,8207	0,7687	0,52078 <sup>ns</sup>
Fungo	2	248,5275	124,2637	116,3874	0,00001**
Fósforo	4	68,9444	17,2361	16,1436	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	98,5506	12,3188	11,5380	0,00001**
Resíduo	42	44,8423	1,0676		
Total	59	463,327			

Média geral = 7,4394.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 5A. Quadro de Anova da variável massa fresca do caule de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	161,6330	53,8776	13,3046	0,00003**
Fungo	2	132,2928	66,1464	16,3343	0,00004**
Fósforo	4	603,4362	150,8590	37,2533	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	543,1191	67,8898	16,7648	0,00001**
Resíduo	42	170,0811	4,0495		
Total	59	1610,5623			

Média geral = 14,6347.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 6A. Quadro de Anova da variável massa fresca da raiz de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	46,3033	15,4344	6,6493	0,00118**
Fungo	2	38,6363	19,3181	8,3225	0,00121**
Fósforo	4	272,7978	68,1994	29,3811	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	381,3420	47,6677	20,5358	0,00001**
Resíduo	42	97,4903	2,3211		
Total	59	836,57			

Média geral = 9,172.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 7A. Quadro de Anova da variável massa seca da folha de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,3077	0,1025	1,2744	0,29499 <sup>ns</sup>
Fungo	2	12,3013	6,1506	76,4009	0,00001**
Fósforo	4	5,2246	1,3061	16,2245	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	5,8032	0,7254	9,0106	0,00001**
Resíduo	42	3,3812	0,0805		
Total	59	27,0183			

Média geral = 1,744.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 8A. Quadro de Anova da variável massa seca do caule de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	14,0546	4,6848	12,8407	0,00003**
Fungo	2	13,8874	6,9437	19,0319	0,00002**
Fósforo	4	60,3321	15,0830	41,3407	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	55,7147	6,9643	19,0884	0,00001**
Resíduo	42	15,3235	0,3648		
Total	59	159,3125			

Média geral = 4,4896.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 9A. Quadro de Anova da variável massa seca da raiz de pimenteiros (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	2,4249	0,8083	6,0180	0,00199**
Fungo	2	5,0507	2,5253	18,8017	0,00002**
Fósforo	4	7,8303	1,9575	14,5746	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	9,8916	1,2364	9,2056	0,00001**
Resíduo	42	5,6412	0,1343		
Total	59	30,839			

Média geral = 1,9638.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.



Tabela 10A. Quadro de Anova da variável número de frutos por planta de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	27,4000	9,1333	2,5728	0,06569 <sup>ns</sup>
Fungo	2	158,7000	79,3500	22,3521	0,00001**
Fósforo	4	285,4333	71,3583	20,1009	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	599,9666	74,9958	21,1256	0,00001**
Resíduo	42	149,1000	3,5500		
Total	59	1220,6			

Média geral = 13,3.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 11A. Quadro de Anova da variável massa fresca dos frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,0423	0,0141	3,1868	0,03272*
Fungo	2	0,9086	0,4543	102,4743	0,00001**
Fósforo	4	2,5542	0,6385	144,0350	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	4,5156	0,5644	127,3200	0,00001**
Resíduo	42	0,1862	0,0044		
Total	59	8,2070			

Média geral = 2,1848.

\*Significativo em 5% pelo teste F.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 12A. Quadro de Anova da variável colonização micorrízica de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 150 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	213,3333	71,1111	1,3353	0,27500 <sup>ns</sup>
Fungo	2	56303,3333	28151,6666	528,6304	0,00001**
Fósforo	4	1523,3333	380,8333	7,1513	0,00033**
Fungo x Fósforo	8	1096,6666	137,0833	2,5741	0,02185*
Resíduo	42	2236,6666	53,2539		
Total	59	61373,3333			

Média geral = 43,6666.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*Significativo em 5% pelo teste F.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 13A. Quadro de Anova da variável comprimento dos frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	64,5370	21,5123	5,0920	0,00456**
Fungo	2	764,9785	382,4892	90,5355	0,00001**
Fósforo	4	819,6568	204,9142	48,5034	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	1406,4641	175,8080	41,6139	0,00001**
Resíduo	42	177,4392	4,2247		
Total	59	3233,0757			

Média geral = 26,9614.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 14A. Quadro de Anova da variável diâmetro dos frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	7,6534	2,5511	5,5962	0,00287**
Fungo	2	118,9921	59,496	130,5117	0,00001**
Fósforo	4	145,8189	36,4547	79,9677	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	306,3675	38,2959	84,0066	0,00001**
Resíduo	42	19,1464	0,4558		
Total	59	597,9785			

Média geral = 12,4668.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 15A. Quadro de Anova da variável teor de N em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,9270	0,3090	0,5281	0,66945 <sup>ns</sup>
Fungo	2	228,3489	114,1744	195,1249	0,00001**
Fósforo	4	266,2489	66,5622	113,7553	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	616,6831	77,0853	131,7394	0,00001**
Resíduo	42	24,5756	0,5851		
Total	59	1136,7838			

Média geral = 15,9395.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 16A. Quadro de Anova da variável teor de P em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,2400	0,0800	1,2892	0,28999 <sup>ns</sup>
Fungo	2	19,7376	9,8688	159,0025	0,00001**
Fósforo	4	31,8431	7,9607	128,2610	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	22,0577	2,7572	44,4233	0,00001**
Resíduo	42	2,6068	0,0620		
Total	59	76,4854			

Média geral = 3,7138.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 17A. Quadro de Anova da variável teor de K em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	19,2709	6,4236	7,2769	0,00073**
Fungo	2	334,1331	167,0665	189,2582	0,00001**
Fósforo	4	651,5089	162,8772	184,5125	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	1242,5189	155,3148	175,9456	0,00001**
Resíduo	42	37,0752	0,8827		
Total	59	2284,5073			

Média geral = 22,6233.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 18A. Quadro de Anova da variável teor de Mg em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,0249	0,0083	0,7461	0,53356 <sup>ns</sup>
Fungo	2	5,1187	2,5593	229,8348	0,00001**
Fósforo	4	4,7888	1,1972	107,5101	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	7,3853	0,9231	82,9020	0,00001**
Resíduo	42	0,4677	0,0111		
Total	59	17,7855			

Média geral = 1,9315.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 19A. Quadro de Anova da variável teor de Ca em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,0609	0,0203	1,4146	0,25098 <sup>ns</sup>
Fungo	2	0,3843	0,1921	13,3873	0,00011**
Fósforo	4	2,7077	0,6769	47,1555	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	3,3364	0,4170	29,0517	0,00001**
Resíduo	42	0,6029	0,0143		
Total	59	7,0923			

Média geral = 1,1573.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 20A. Quadro de Anova da variável teor de S em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,1061	0,0353	3,8612	0,01567*
Fungo	2	2,9724	1,4862	162,2003	0,00001**
Fósforo	4	3,7731	0,9432	102,9473	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	9,4592	1,1824	129,0439	0,00001**
Resíduo	42	0,3848	0,0091		
Total	59	16,6957			

Média geral = 1,9275.

\*Significativo em 5% pelo teste F.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 21A. Quadro de Anova da variável teor de Fe em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	161,6748	53,8916	0,7166	0,55068 <sup>ns</sup>
Fungo	2	2910,4693	1455,2346	19,3496	0,00002**
Fósforo	4	7697,663	1924,4157	25,5881	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	13366,2707	1670,7838	22,2157	0,00001**
Resíduo	42	3158,7090	75,2073		
Total	59	27294,7869			

Média geral = 60,9716.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 22A. Quadro de Anova da variável teor de Cu em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	3,2282	1,0760	0,6981	0,56160 <sup>ns</sup>
Fungo	2	528,0091	264,0045	171,2783	0,00001**
Fósforo	4	21,8247	5,4561	3,5398	0,01404*
Fungo x Fósforo	8	61,2461	7,6557	4,9668	0,00039**
Resíduo	42	64,7378	1,5413		
Total	59	679,0462			

Média geral = 7,625.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*Significativo em 5% pelo teste F.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 23A. Quadro de Anova da variável teor de Zn em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	73,7661	24,5887	1,7944	0,16171 <sup>ns</sup>
Fungo	2	769,5612	384,7806	28,0804	0,00001**
Fósforo	4	1774,7352	443,6838	32,3790	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	2985,8403	373,2300	27,2374	0,00001**
Resíduo	42	575,5188	13,7028		
Total	59	6179,4218			

Média geral = 34,8216.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 24A. Quadro de Anova da variável teor de Mn em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	114,9644	38,3214	1,2519	0,30272 <sup>ns</sup>
Fungo	2	169,8442	84,9221	2,7743	0,07220 <sup>ns</sup>
Fósforo	4	1522,7298	380,6824	12,4362	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	2379,0561	297,3801	9,7149	0,00001**
Resíduo	42	1285,6524	30,6107		
Total	59	5472,2471			

Média geral = 28,8725.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 25A. Quadro de Anova da variável teor de B em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	92,6441	30,8813	0,7966	0,50540 <sup>ns</sup>
Fungo	2	1345,9476	672,9738	17,3591	0,00003**
Fósforo	4	128,4801	32,1200	0,8285	0,51640 <sup>ns</sup>
Fungo x Fósforo	8	1806,8115	225,8514	5,8258	0,00013**
Resíduo	42	1628,2439	38,7677		
Total	59	5002,1273			

Média geral = 22,9241.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 26A. Quadro de Anova da variável teor de sólidos solúveis em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	1,2258	0,4086	0,2475	0,86342 <sup>ns</sup>
Fungo	2	380,3373	190,1686	115,1679	0,00001**
Fósforo	4	490,3960	122,5990	74,2471	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	1267,5110	158,4388	95,9520	0,00001**
Resíduo	42	69,3516	1,6512		
Total	59	2208,8218			

Média geral = 14,7783.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 27A. Quadro de Anova da variável acidez total titulável em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,0449	0,0149	0,3272	0,80787 <sup>ns</sup>
Fungo	2	2,4557	1,2278	26,7975	0,00001**
Fósforo	4	4,5127	1,1281	24,6215	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	8,1686	1,0210	22,2843	0,00001**
Resíduo	42	1,9244	0,0458		
Total	59	17,1066			

Média geral = 1,216.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 28A. Quadro de Anova da variável teor de ácido ascórbico em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	3193,0423	1064,3474	0,4851	0,69839 <sup>ns</sup>
Fungo	2	87428,8196	43714,4098	19,9243	0,00001**
Fósforo	4	104415,8507	26103,9626	11,8977	0,00002**
Fungo x Fósforo	8	281410,0000	35176,2500	16,0327	0,00001**
Resíduo	42	92149,1388	2194,0271		
Total	59				

Média geral = 219,569.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 29A. Quadro de Anova da variável nível de capsaicina em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,0105	0,0035	1,1126	0,35512 <sup>ns</sup>
Fungo	2	0,1155	0,0577	18,2780	0,00002**
Fósforo	4	0,1847	0,0461	14,6104	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	0,3606	0,0450	14,2593	0,00001**
Resíduo	42	0,1327	0,0031		
Total	59	0,8042			

Média geral = 0,3141.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

Tabela 30A. Quadro de Anova da variável nível de dihidrocapsaicina em frutos de pimenteiras (*C. annuum* L. var. *annuum*) aos 120 dias após a semeadura.

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Bloco	3	0,0092	0,0030	1,3772	0,26204 <sup>ns</sup>
Fungo	2	0,0340	0,0170	7,6385	0,00182**
Fósforo	4	0,1174	0,0293	13,1727	0,00001**
Fungo x Fósforo	8	0,6035	0,0754	33,8567	0,00001**
Resíduo	42	0,0935	0,0022		
Total	59	0,8578			

Média geral = 0,3383.

<sup>ns</sup>Não significativo.

\*\*Significativo em 1% pelo teste F.

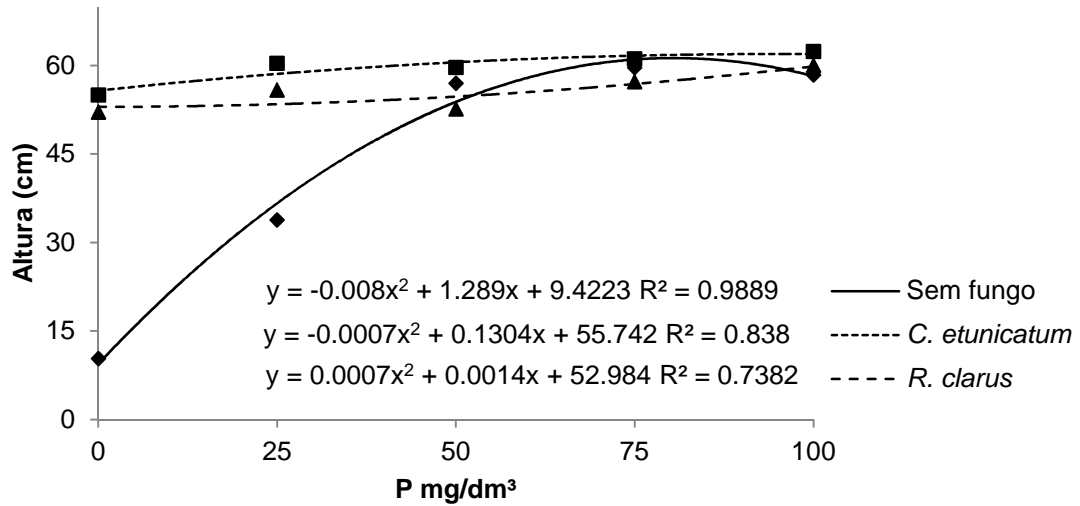


Figura 1A. Altura de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.

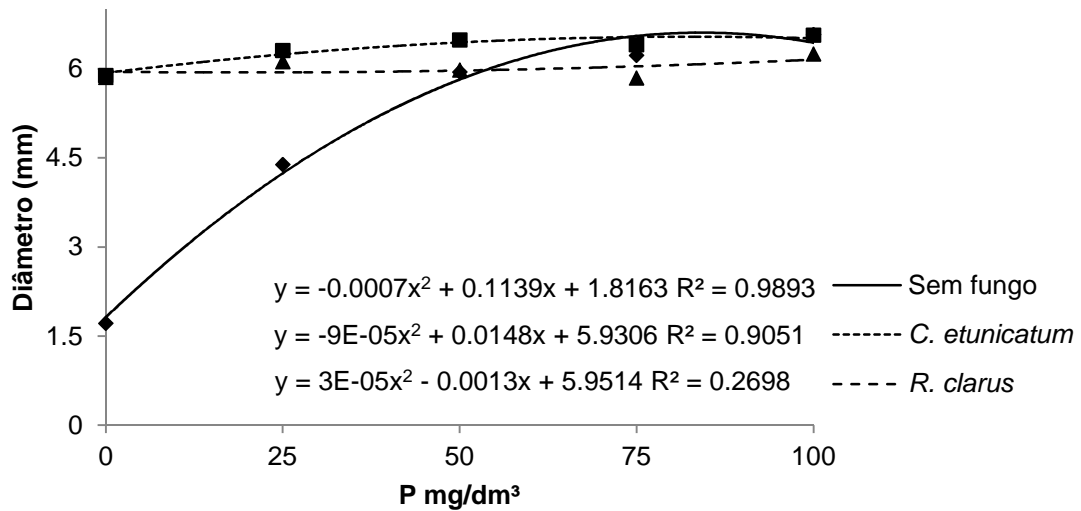


Figura 2A. Diâmetro de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.



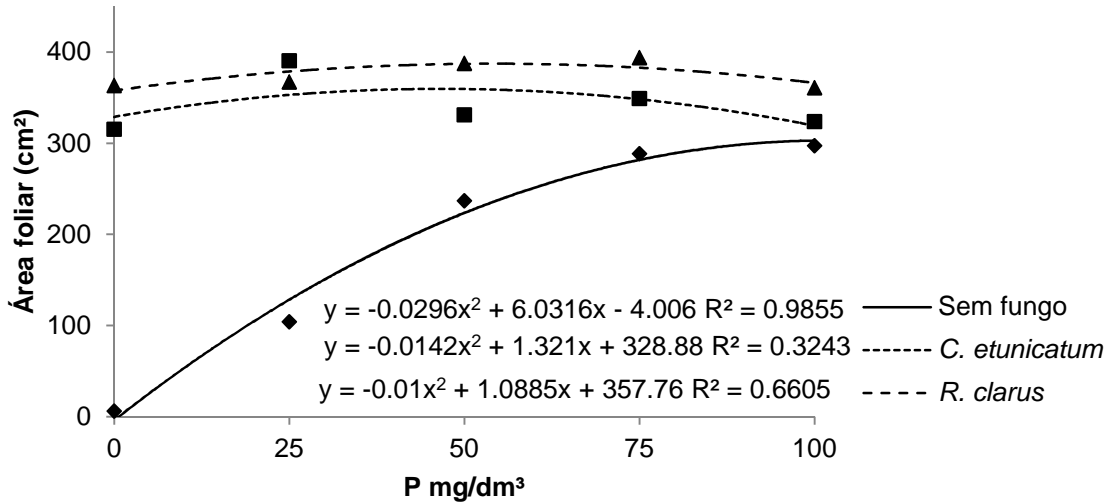


Figura 3A. Área foliar de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.

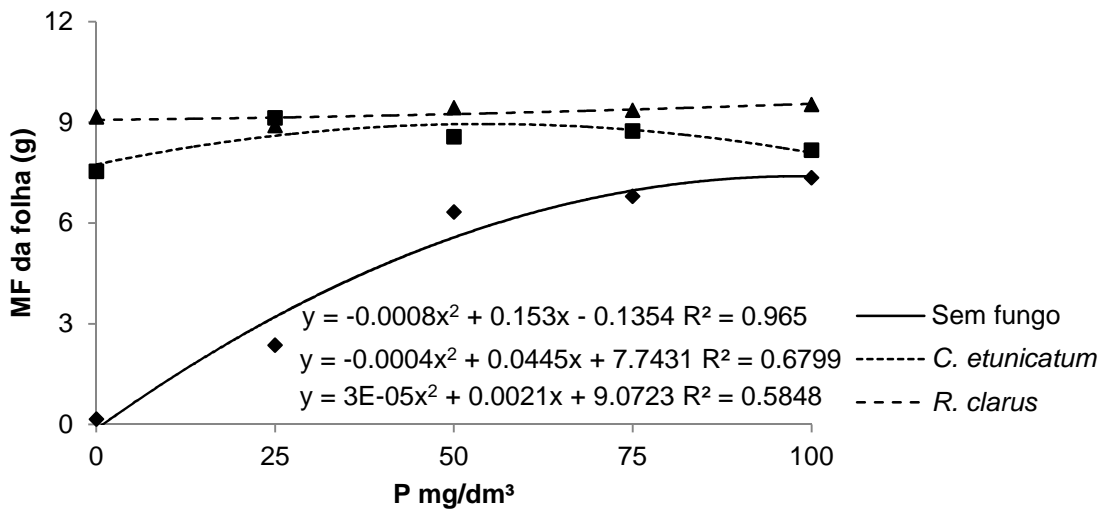


Figura 4A. Massa fresca da folha de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.

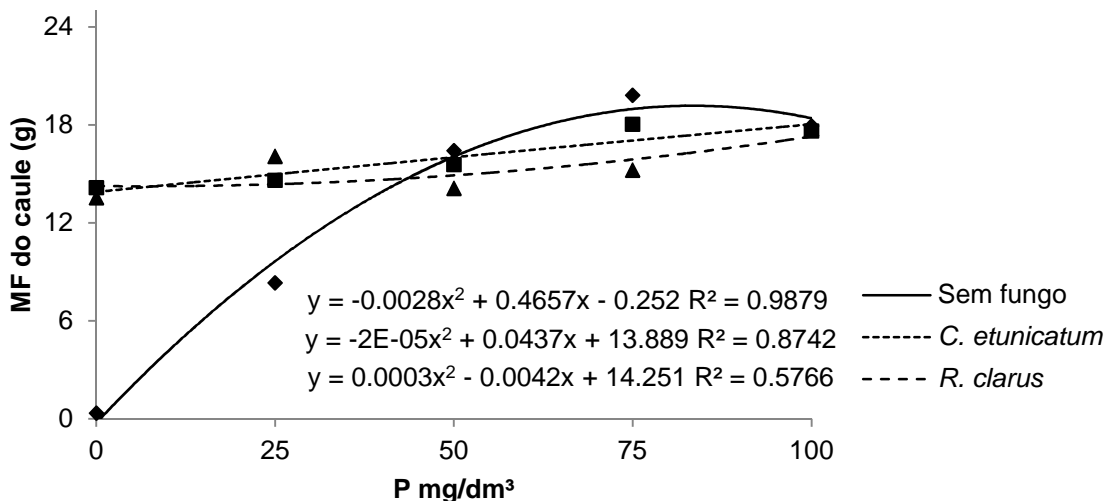


Figura 5A. Massa fresca do caule de pimentei ras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semente adura.

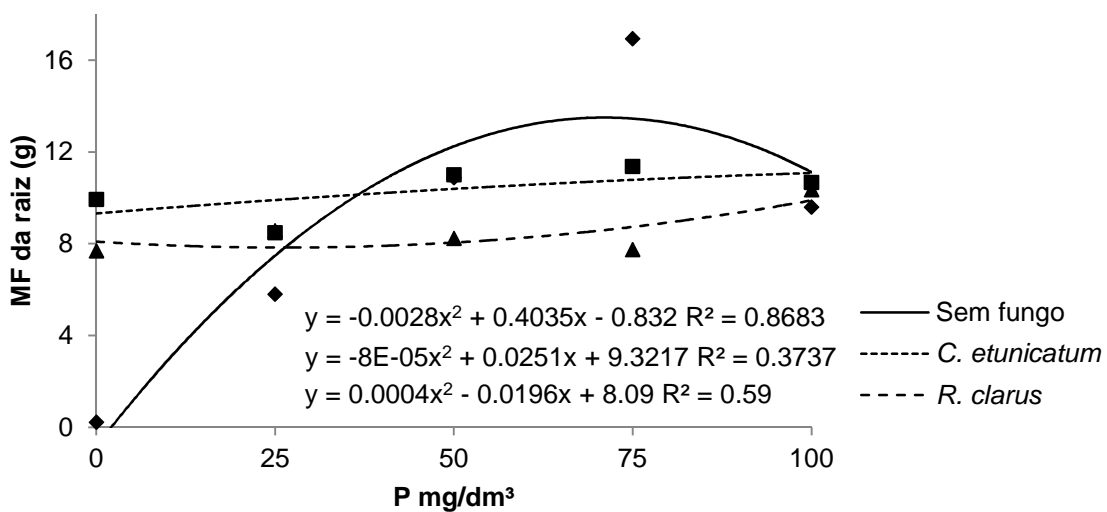


Figura 6A. Massa fresca da raiz de pimentei ras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semente adura.

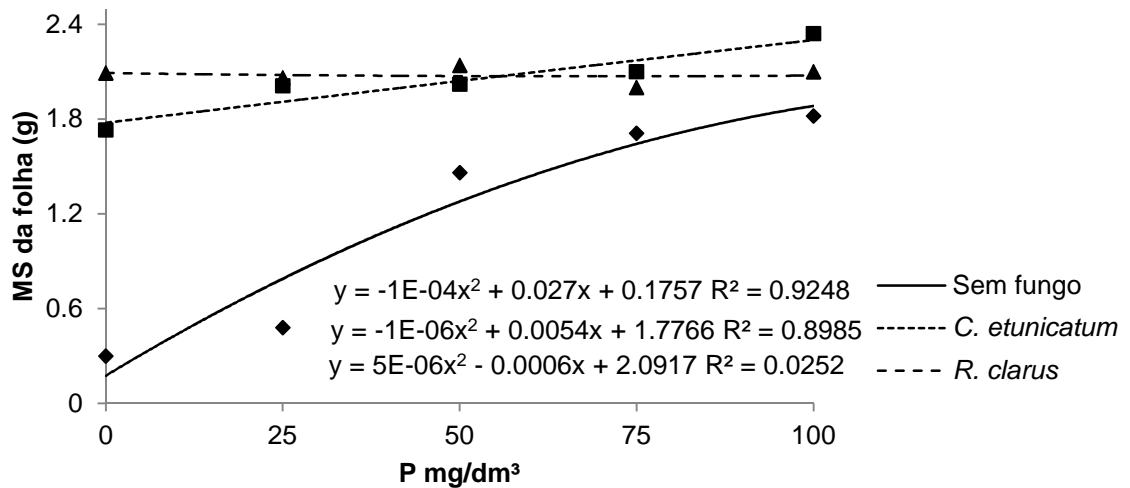


Figura 7A. Massa seca da folha de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.

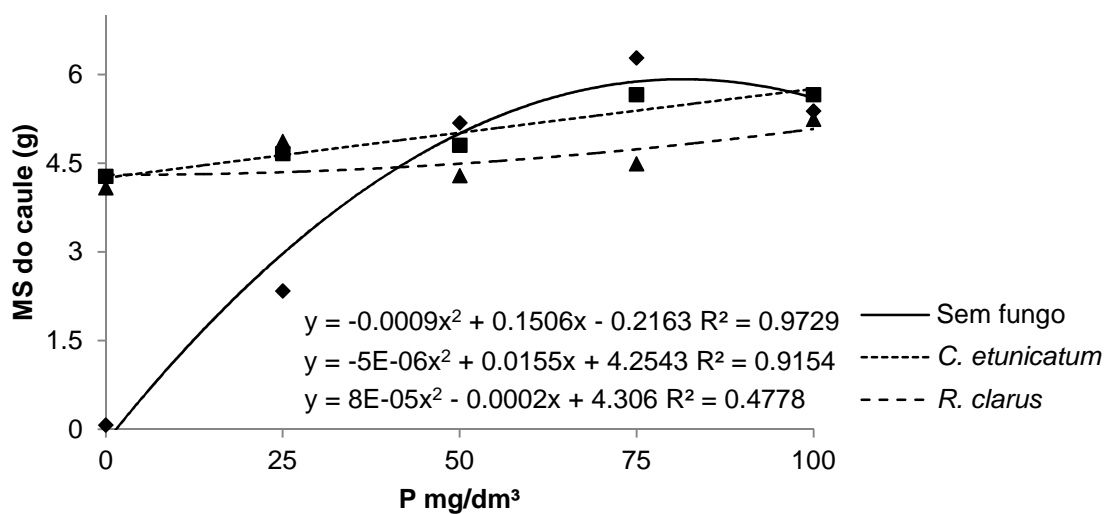


Figura 8A. Massa seca do caule de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.

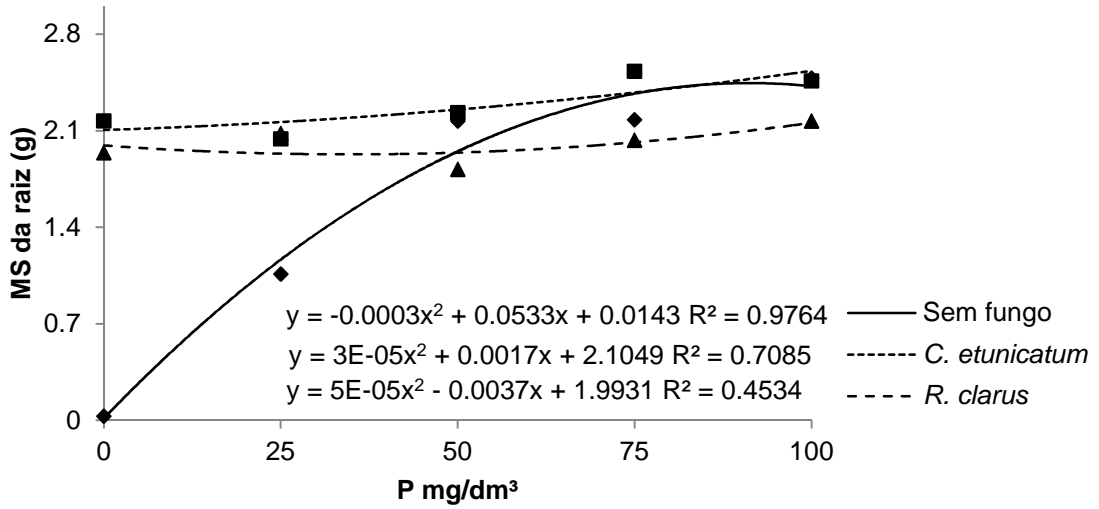


Figura 9A. Massa seca da raiz de plantas de pimenteiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.

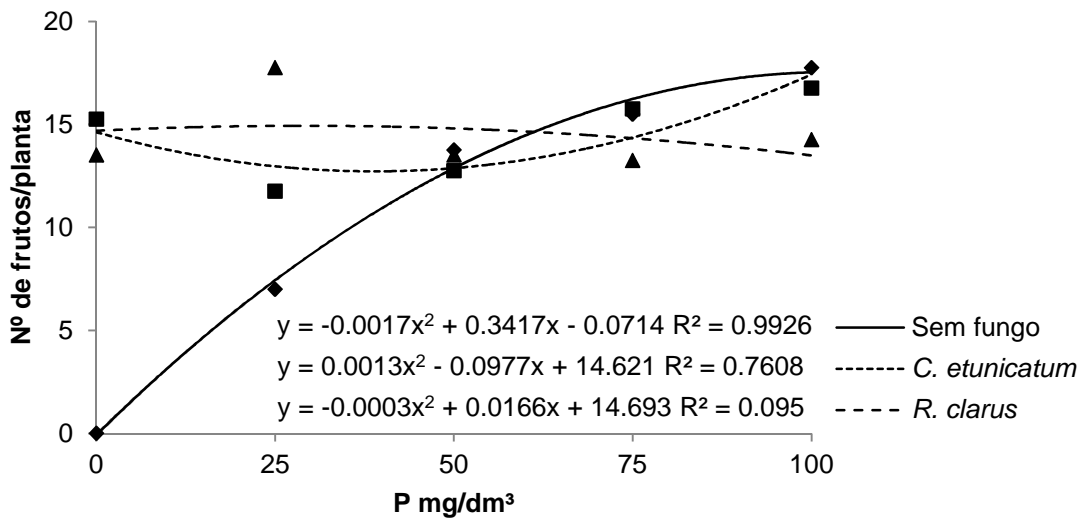


Figura 10A. Número de frutos por planta de pimenteiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 150 dias após a semeadura.

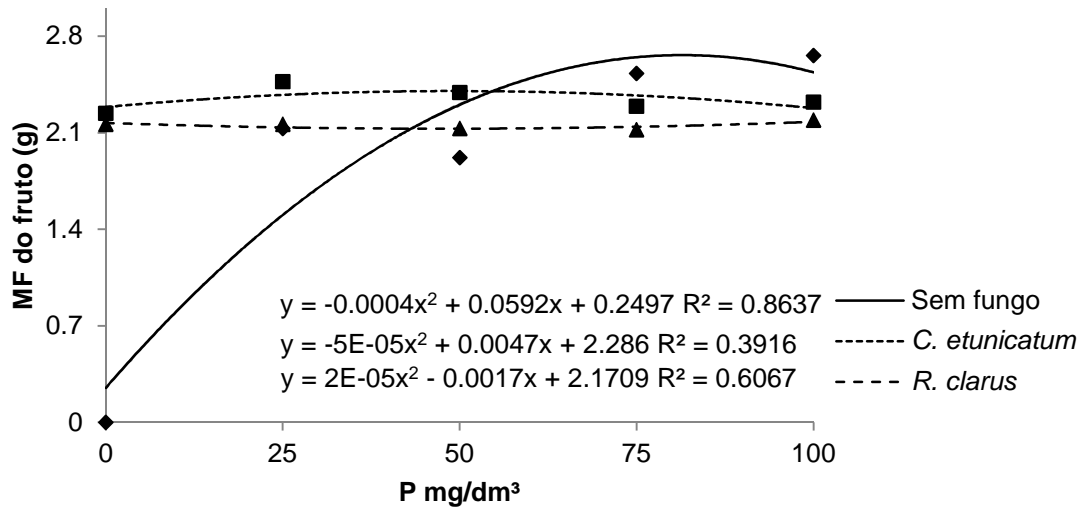


Figura 11A. Massa fresca dos frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

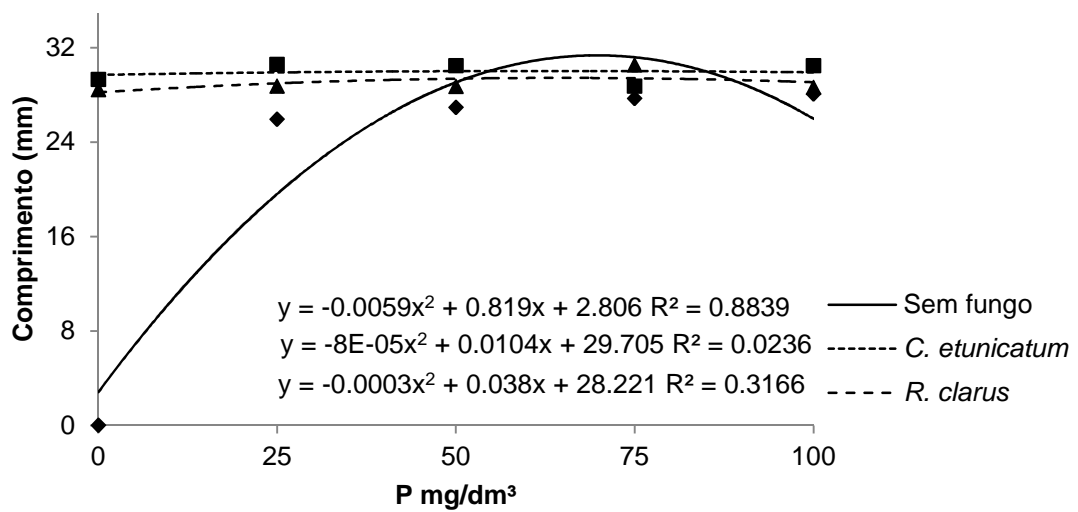


Figura 12A. Comprimento dos frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

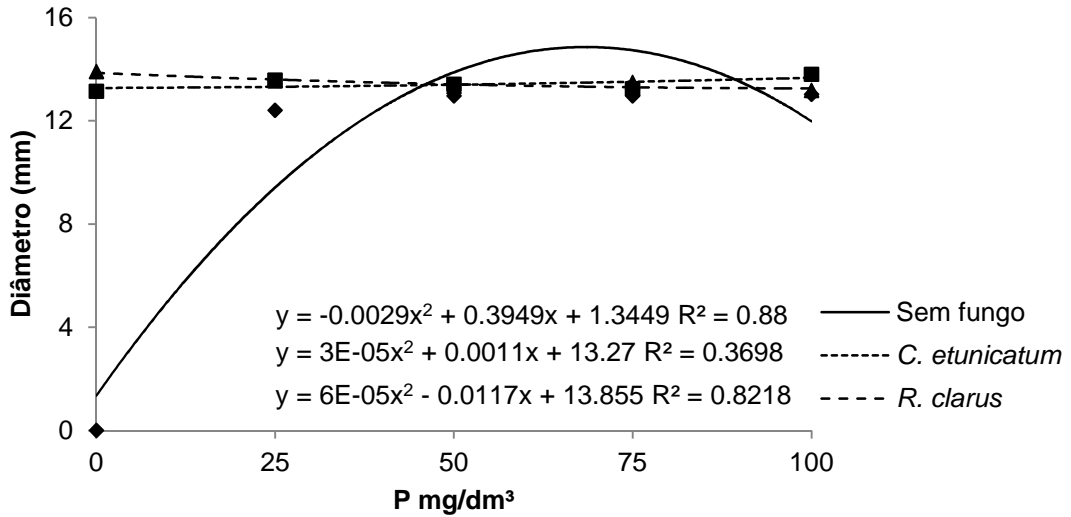


Figura 13A. Diâmetro dos frutos de pimenteiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

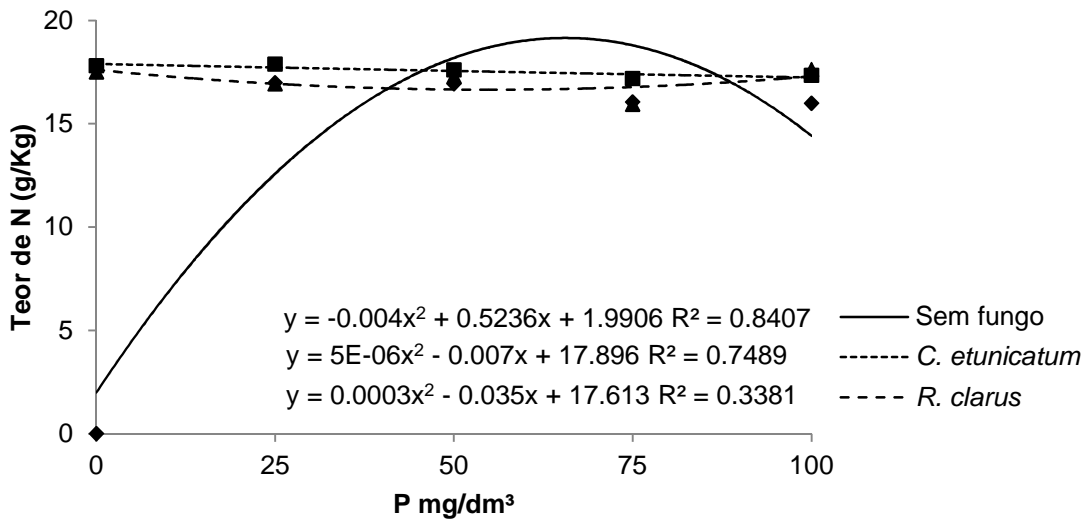


Figura 14A. Teor de N em frutos de pimenteiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

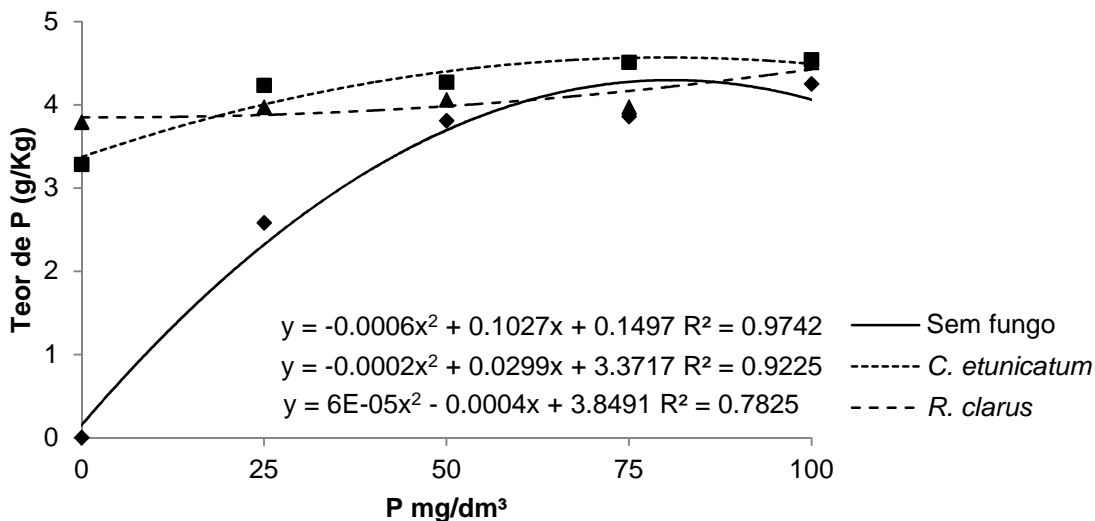


Figura 15A. Teor de P em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

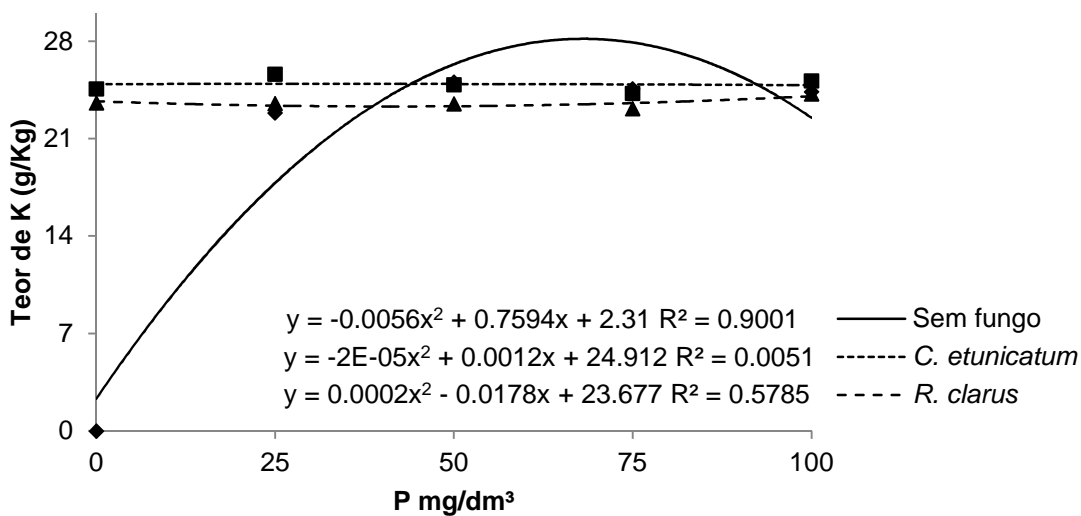


Figura 16A. Teor de K em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

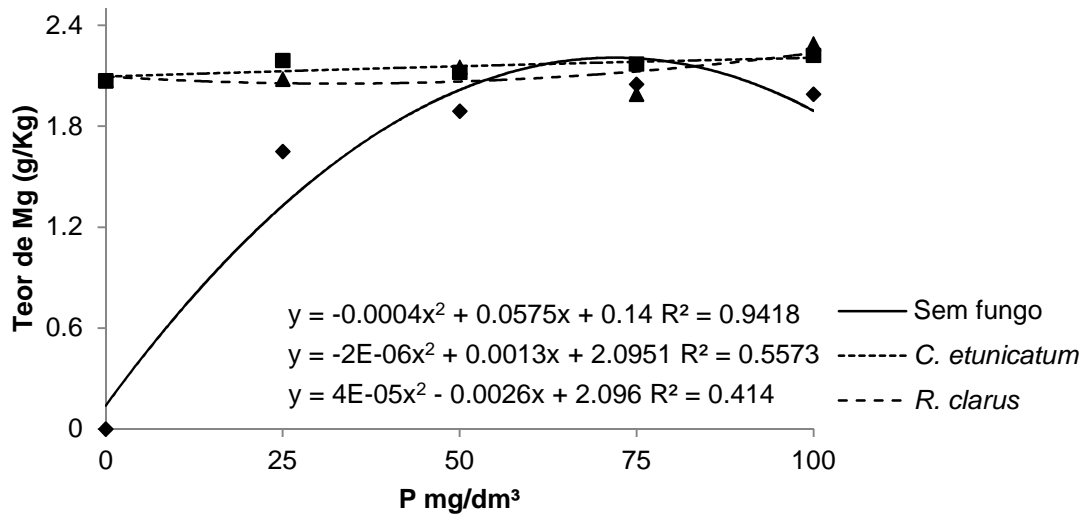


Figura 17A. Teor de Mg em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a sementeira.

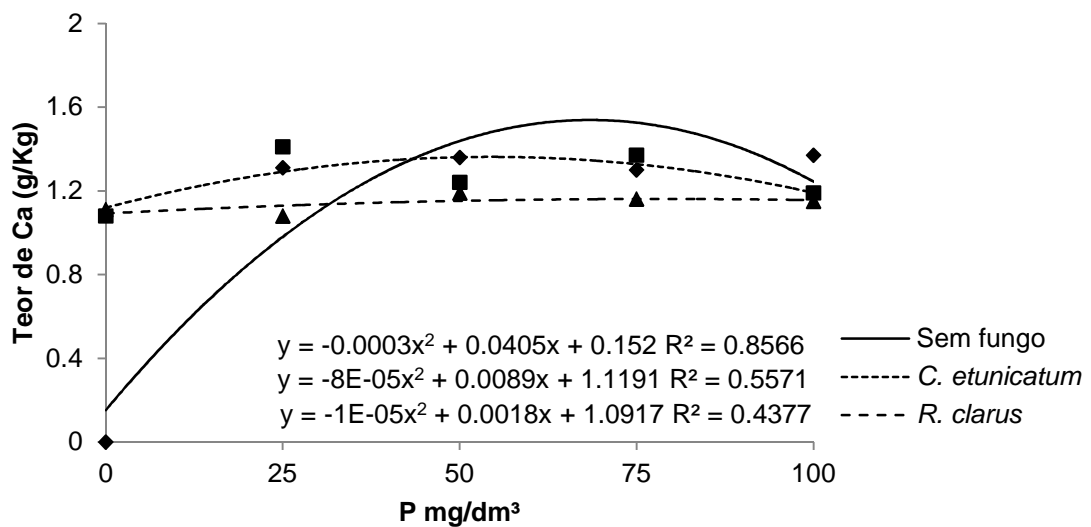


Figura 18A. Teor de Ca em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a sementeira.



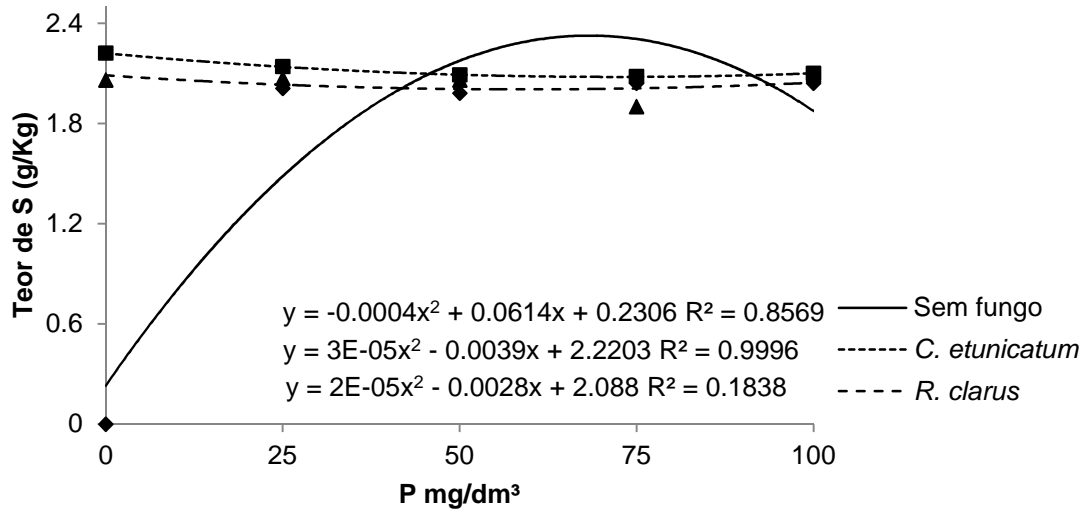


Figura 19A. Teor de S em frutos de pimenteiiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a sementeira.

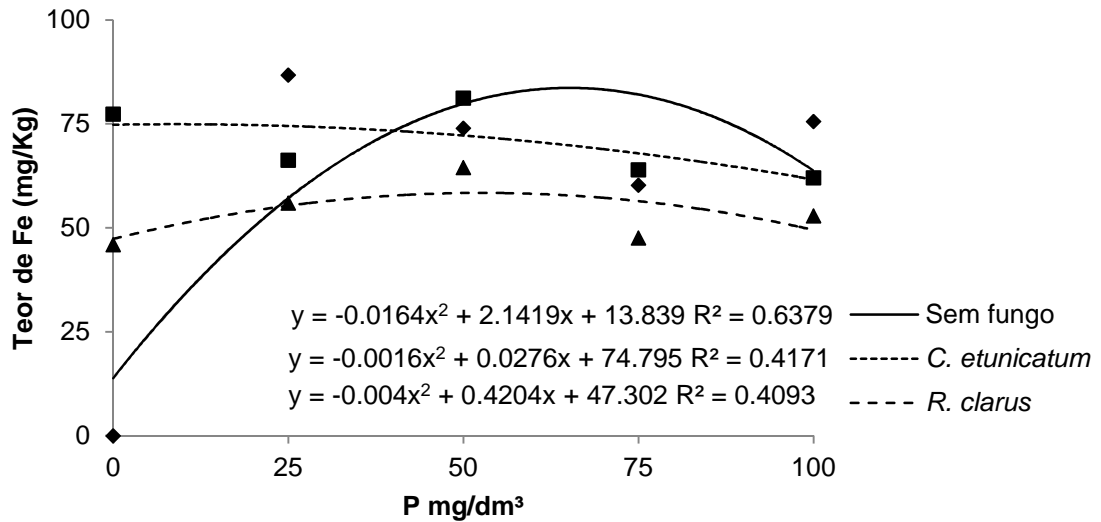


Figura 20A. Teor de Fe em frutos de pimenteiiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a sementeira.

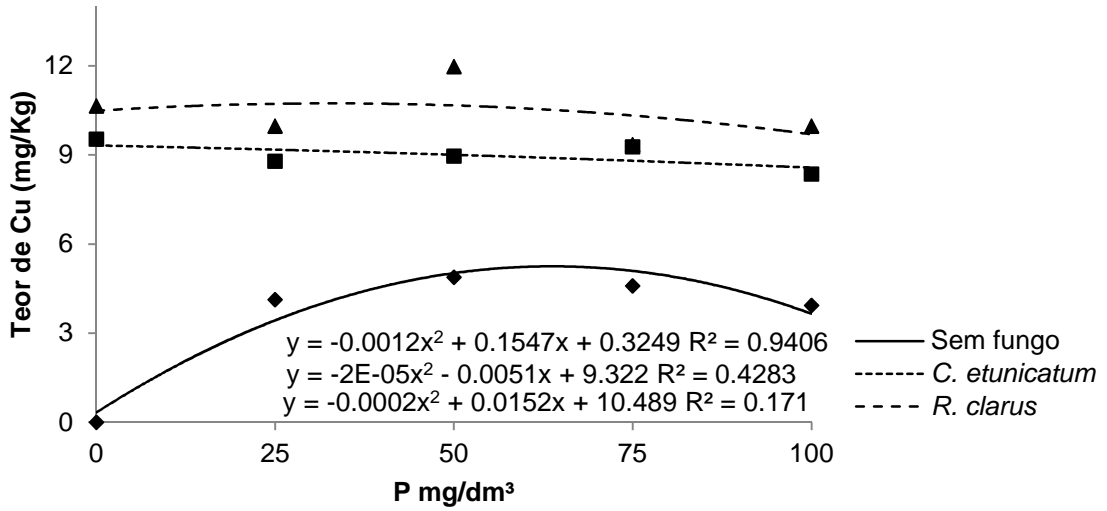


Figura 21A. Teor de Cu em frutos de pimenteiiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a sementeira.

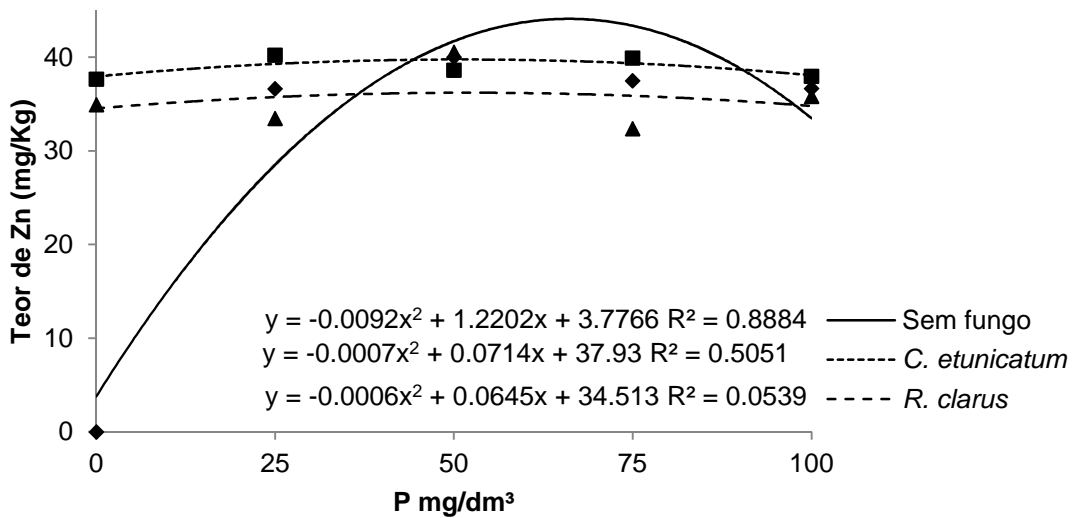


Figura 22A. Teor de Zn em frutos de pimenteiiras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a sementeira.

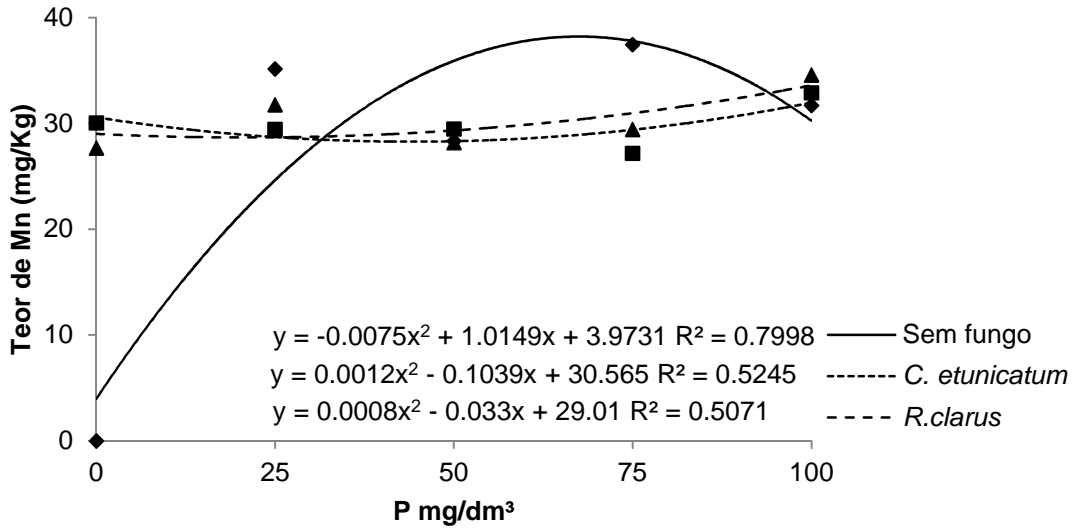


Figura 23A. Teor de Mn em frutos de pimentei­ras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e aduba­ção fosfatada aos 120 dias após a sementeira.

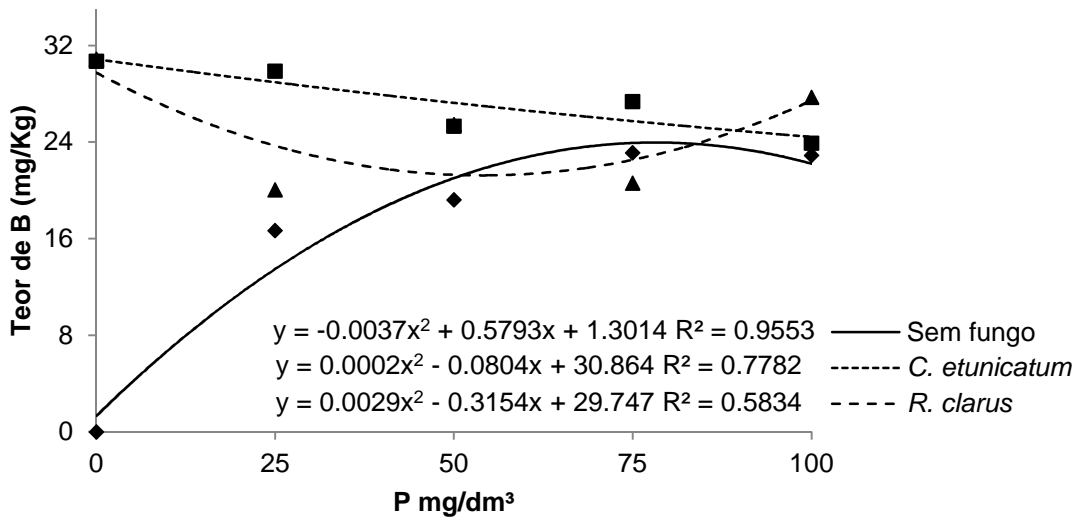


Figura 24A. Teor de B em frutos de pimentei­ras em função dos fungos micorrízicos arbusculares e aduba­ção fosfatada aos 120 dias após a sementeira.

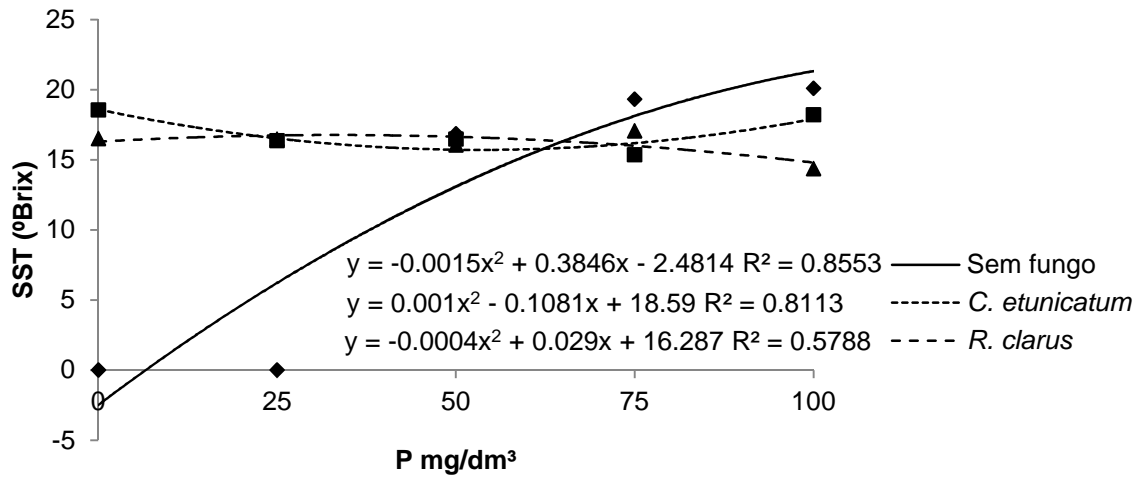


Figura 25A. Teor de sólidos solúveis em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

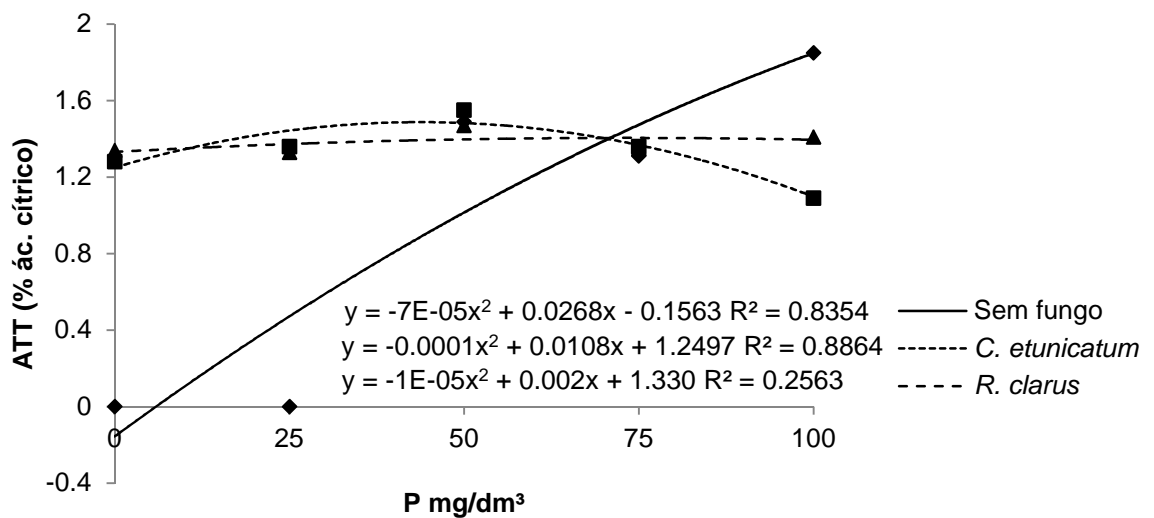


Figura 26A. Acidez total titulável em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

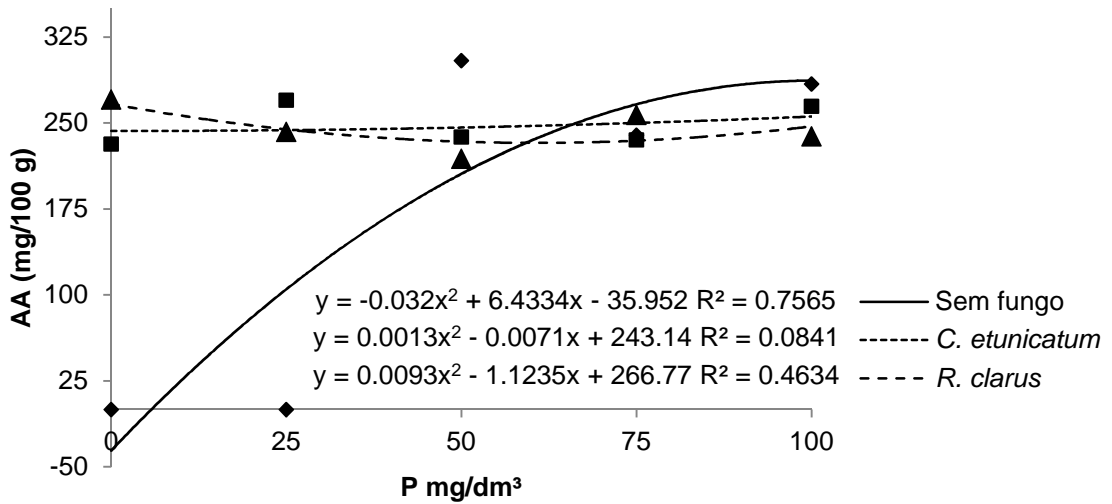


Figura 27A. Teor de ácido ascórbico em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

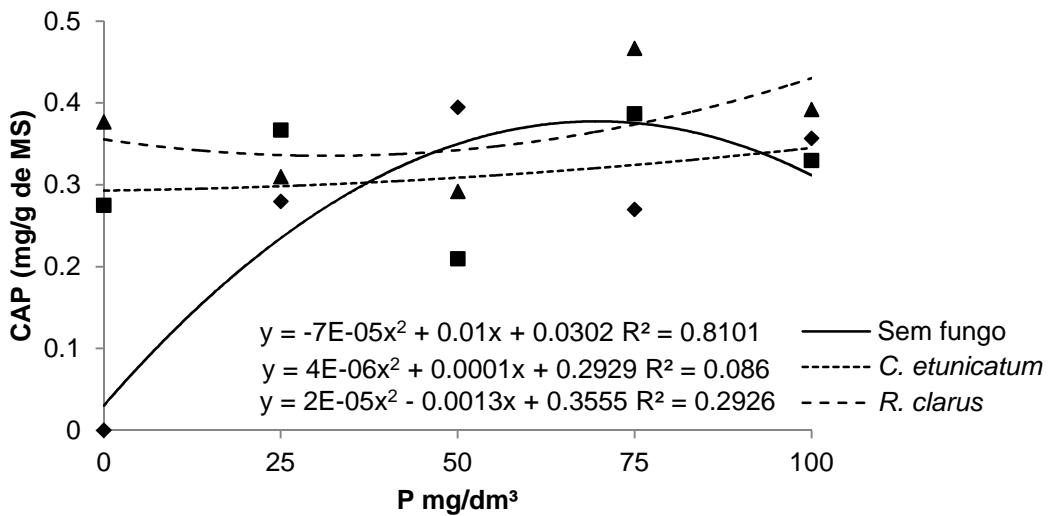


Figura 28A. Teor de capsaicina em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.

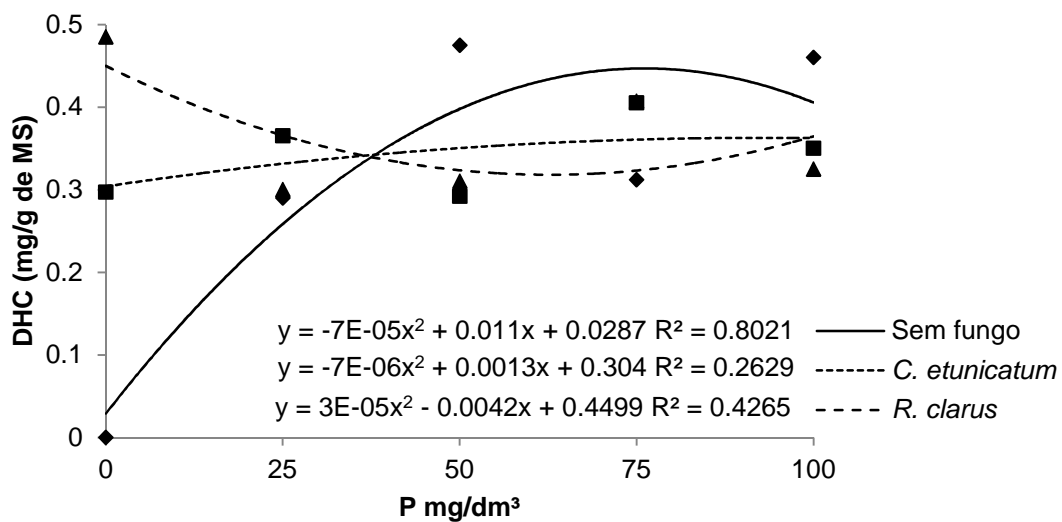


Figura 29A. Teor de dihidrocapsaicina em frutos de pimenteiros em função dos fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada aos 120 dias após a semeadura.