

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Rodrigo dos Santos Godoi

**RESPOSTA DA SOJA E DO REPOLHO À CONCENTRAÇÃO DE
NUTRIENTES E VOLUME DO MEIO RADICULAR**

Santa Maria, RS

2016

Rodrigo dos Santos Godoi

**RESPOSTA DA SOJA E DO REPOLHO À CONCENTRAÇÃO DE
NUTRIENTES E VOLUME DO MEIO RADICULAR**

**Tese apresentada ao Curso de
Doutorado do Programa de Pós-
Graduação em Agronomia da
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia.**

Orientador: Prof. Dr. Jerônimo Luiz Andriolo

Santa Maria, RS

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rodrigo dos Santos Godoi, Rodrigo dos Santos
RESPOSTA DA SOJA E DO REPOLHO À CONCENTRAÇÃO DE
NUTRIENTES E VOLUME DO MEIO RADICULAR / Rodrigo dos
Santos Rodrigo dos Santos Godoi.-2016.
74 f.; 30cm

Orientador: Jerônimo Luiz Andriolo
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Agronomia, RS, 2016

1. Glycine max 2. Brassica oleracea var. capitata 3.
adubação 4. nutrição mineral 5. crescimento radicular I.
Andriolo, Jerônimo Luiz II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Rodrigo dos Santos Godoi. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
Endereço: Rua 20 de Setembro, n. 2616, São Vicente do Sul, RS, Brasil. CEP: 97420-000
Fone (55) 32574182; Fax (0xx); End. Eletr: rodrigo.godoi@ifarroupilha.edu.br

Rodrigo dos Santos Godoi

**RESPOSTA DA SOJA E DO REPOLHO À CONCENTRAÇÃO DE
NUTRIENTES E VOLUME DO MEIO RADICULAR**

Tese apresentada ao Curso de
Doutorado do Programa de Pós-
Graduação em Agronomia da
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia.

Aprovado em 03 de março de 2016:


Jerônimo Luiz Andriolo, Dr.
(Presidente/Orientador)


Arno Bernardo Heldwein, Dr. (UFSM)


Leandro Souza da Silva, Dr. (UFSM)


Eunice Oliveira Calvete, Dr^a. (UPF)


Pedro Alexandre Varella Escostéguy, Dr. (UPF)

Santa Maria, RS
2016.

DEDICATÓRIA

A minha esposa Renata e minhas filhas Rafaela e Antonela pelo amor, carinho, compreensão, paciência e apoio incondicional, principalmente nos momentos mais difíceis da caminhada, que foi fundamental para a conclusão de mais essa etapa na minha vida.

Aos meus incansáveis pais Vicente e Vera por toda a energia dedicada, durante a minha vida, para o meu aprimoramento intelectual e profissional.

A minha querida irmã Sabrina e minha amada sobrinha Mabi por todo o incentivo e motivação a mim dedicados.

Ao meu sogro Renato e minha sogra Jane pelo incentivo e carinho dedicados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e da inteligência.

Ao meu orientador, professor Jerônimo, pela paciência e sensibilidade na arte de ensinar e educar.

Aos meus grandes AMIGOS Matheus e Eduardo, vulgo Batata e Mamite, por todo o aprendizado, dedicação, companheirismo e trabalho.

A minha vó Olga pelo carinho e incentivos.

Aos amigos do grupo de Olericultura por todo apoio e incentivo.

A TODOS os meus colegas do IFFarroupilha/SVS pela compreensão, incentivo, apoio e aprendizados.

Aos funcionários terceirizados do *Campus* de SVS pelo apoio.

A instituição de ensino Instituto Federal Farroupilha pela oportunidade, incentivo e financiamento.

A UFSM e ao PPGAGRO por todas as oportunidades e apoio a minha formação humana, intelectual e profissional.

EPIGRAFE

“ Ando devagar porque já tive pressa
E levo esse sorriso porque já chorei demais
Hoje me sinto mais forte, mais feliz, quem sabe?
Só levo a certeza de que muito pouco eu sei...”

Compositor Renato Teixeira (1992)

RESUMO

RESPOSTA DA SOJA E DO REPOLHO À CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E VOLUME DO MEIO RADICULAR

AUTOR: Rodrigo dos Santos Godoi
ORIENTADOR: Jerônimo Luiz Andriolo

Os métodos de preparo do solo com plantio direto e também com encanteiramento nas hortaliças concentram os fertilizantes na camada superficial, podem provocar compactação subsuperficial e limitar o crescimento das raízes. O objetivo desse trabalho consistiu em testar se a concentração de nutrientes pode compensar situações de restrição física ao crescimento das raízes, sem reduzir o crescimento da parte aérea e a produção de soja e repolho. Dois experimentos foram realizados no IFFarroupilha- São Vicente do Sul, RS, de 19/12/12 a 17/05/13 e de 12/12/14 a 13/03/15, respectivamente. No primeiro experimento foram construídas calhas de madeira em formato de "U" com dois compartimentos semelhantes para o crescimento das raízes. Água e nutrientes foram fornecidos a plantas de soja e de repolho pelo sistema de subirrigação, separadamente em cada um dos compartimentos. Os nutrientes foram fornecidos através de uma solução nutritiva completa (SN), nas concentrações zero (0-somente água), 50% (50) e 100% (100) da SN em cinco combinações nos dois compartimentos. Em T1, a concentração 50% foi fornecida em ambos os compartimentos da calha (50/50). Em T2, 50% em um e 100% no outro (50/100); em T3, zero (água) e 100% (0/100); em T4, zero (água) e 50% (0/50) e em T5 100% em ambos os compartimentos (100/100). No segundo experimento, plantas de soja foram cultivadas em vasos de 0,4 dm³ (V1) e 3,0 dm³ (V2) e fertirrigadas diariamente com a mesma SN do experimento anterior, na concentração normal (C2) e diluída a 20% (C1). Os resultados do primeiro experimento indicaram que o crescimento das plantas de soja até R1 foi 30% maior em plantas que receberam as combinações da SN 100/100 e 50/100, enquanto em R6 foi menor na calha 0/50. O crescimento radicular foi menor onde os nutrientes foram fornecidos em apenas um dos lados da calha. O crescimento das plantas de repolho até 62 DAP foi maior nas plantas que receberam as concentrações 0/100 e o máximo crescimento radicular foi registado na calha com nutrientes fornecidos igualmente em ambos os lados (50/50 e 100/100). No segundo experimento, houve interação entre as concentrações da SN e os volumes dos vasos no crescimento da planta, com exceção da produção de grãos, a qual não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. As plantas que mais apresentaram abortamento de vagens foram aquelas crescidas na concentração C2 em ambos os tamanhos de vasos. O número total de grãos foi maior na combinação C2V2, mas foi menor o tamanho dos grãos. Concluiu-se que o crescimento das raízes de plantas de soja e repolho é direcionado à concentração mais elevada de nutrientes no meio radicular e quando as quantidades fornecidas de nutrientes são suficientes para atingir aquelas extraídas pelas plantas, o crescimento máximo poderá ser esperado, independentemente da posição dos nutrientes no meio radicular. O confinamento das raízes das plantas de soja regularmente supridas por água e nutrientes reduz o crescimento da planta, mas não afeta de forma significativa a produção de grãos. A concentração elevada de nutrientes compensa parcialmente a redução do crescimento das raízes por efeito do confinamento.

Palavras-chave: *Glycine max*, *Brassica oleracea* var. *capitata*, adubação, nutrição mineral, crescimento radicular.

ABSTRACT

RESPONSE OF SOYBEAN AND CABBAGE TO NUTRIENT CONCENTRATION AND VOLUME OF THE ROOT MIDDLE.

AUTHOR: Rodrigo dos Santos Godoi

ADVISER: Dr. Jerônimo Luiz Andriolo

In soil preparation methods either by no till or by raised beds for vegetable crop production, root growth can be reduced by subsurface compaction and concentration of fertilizers in the surface layer. The goal of this research was to test the concentration of nutrients may offset situations of physical restriction to root growth without reducing shoot growth and production of soybean and cabbage. Two experiments were carried out at IFFarroupilha – São Vicente do Sul, RS, from December 19, 2012 from May 17, 2013 and from December 12, 2015 to March 13, 2015, respectively. In the first experiment “U” shape wooden gullies were made up with two similar compartments inside them for root growth. Water and nutrients were separately supplied to plants in each one of compartments by subirrigation. Nutrients were supplied by means of a complete nutrient solution (NS) in concentrations of zero (0-only water), 50% (50) and 100% (100) of it, in five combinations in the two compartments. In T1, 50% concentration was supplied in both gully compartments (50/50). In T2, it was 50% in one and 100% in the other compartment (50/100); in T3, zero (water) and 100 % (0/100); in T4, zero (water) and 50% (0/50) and in T5 it was 100% in both compartments (100/100). In the second experiment, soybean plants were grown in 0.4 dm³ (V1) and 3.0 dm³ (V2) pots and daily fertigated with the previous NS at its normal concentration (C2) and diluted to 20% (C1). Data of the first experiment showed that growth of soybean plants at R1 was 30% higher on plants supplied with 100/100 and 50/100 NS concentrations while at R6 it was lowest in the 0/50. Lower root growth was recorded where nutrients were supplied in only one side of gullies. Growth of cabbage plants at 62 DAP was higher on plants supplied with 0/100 and maximum root growth was recorded on gullies with nutrients supplied in both sides (50/50 and 100/100). In the second experiment, interactions were found among NS concentrations and pot volumes on plant growth, except for grain production, which did not show differences among treatments. Higher pod abortion was recorded on plants supplied with the C2 concentration, in both pot volumes. Higher number of grains was recorded on C2V2 plants, but the size of grains was lower. It was concluded that root growth of soybean and cabbage plants is directed toward the higher concentration of nutrients in the root medium and when supplied quantities of nutrients are enough to attain those extracted by plants, maximum growth might be expected, irrespective of the position of nutrients in the root medium. Root confinement of soybean plants regularly supplied with water and nutrients reduces plant growth but did not affect significantly grain production. The high nutrient concentration partially compensates the reduction on root growth by effect of confinement.

Keywords: *Glycine max*, *Brassica oleracea* var. *capitata*, fertilization, mineral nutrition, root growth.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1- Growth and production of soybean and cabbage plants under different availability and position of nutrients in the root medium

Figura 1- Diagrammatic schema of the experimental device with gullies split in two similar compartments (C1, C2), in a longitudinal (A) and transversal (B) view.....39

ARTIGO 2- Concentração de nutrientes e confinamento radicular no crescimento da planta e produção da soja

Figura 1- Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 0,4 dm³ (V1) e 3,0 dm³ (V2) na concentração baixa de solução nutritiva (C1= 20%).....59

Figura 2- Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 0,4 dm³ (V1) e 3,0 dm³ (V2) na concentração alta de solução nutritiva (C2= 100%).....60

Figura 3- Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 0,4 dm³ (V1) e concentração baixa (C1) e alta (C2) de solução nutritiva.....61

Figura 4- Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 3,0 dm³ (V2) e concentração baixa (C1) e alta (C2) de solução nutritiva.....62

LISTA DE TABELAS

- ARTIGO 1-** Growth and production of soybean and cabbage plants under different availability and position of nutrients in the root medium
- Tabela 1-** Dry mass of soybean, cv. BMX Turbo RR and cabbage, cv. TOPSEED Titan plants at R1 stage and at 62 days after sowing, respectively, supplied with three nutrient concentrations in two separate compartments for root growth. São Vicente do Sul, RS, 2013.....40
- Tabela 2-** Dry mass of soybean, cv. BMX Turbo RR and cabbage, cv. TOPSEED Titan plants at R6 stage and at 93 days after sowing, respectively, supplied with three nutrient concentrations in two separate compartments for root growth. São Vicente do Sul, RS, 2013.....41
- Tabela 3-** Root dry mass and grain production of soybean, cv. BMX Turbo RR and root dry mass and head fresh mass of cabbage, cv. TOPSEED Titan plants at R1 and R6 stages and at 62 and 93 days after sowing, respectively, supplied with three nutrient concentrations in two separate compartments for root growth. São Vicente do Sul, RS, 2013.....42
- Tabela 4-** Mean values of Electrical Conductivity (EC) and (pH) throughout the crop cycle. São Vicente do Sul, RS, 2013.....43
- ARTIGO 2-** Concentração de nutrientes e confinamento radicular no crescimento da planta e produção da soja
- Tabela 1-** Número (N) de vagens abortadas (VAb), vagens cheias (VCh), total de grãos (TG), massa seca (MS) dos grãos (G) e produção de grãos (Produção) de soja, cultivar BMX Turbo RR.....63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVO GERAL.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. A CULTURA DA SOJA.....	15
2.2. A CULTURA DO REPOLHO.....	17
2.3. SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	19
2.3.1 Sistema Plantio Direto (SPD)	19
2.3.2 Sistema de Cultivo Encanteirado de Hortaliças (SCEH)	20
2.4. RELÇÃO PARTE AÉREA-RAIZ NO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS.....	21
2.5. SISTEMA RADICULAR.....	23
ARTIGO 1: Growth and production of soybean and cabbage plants under different availability and position of nutrients in the root medium	26
Abstract.....	27
Introduction.....	28
Material and Methods.....	29
Results.....	31
Discussion.....	33
Conclusion.....	36
References.....	37
ARTIGO 2: Concentração de nutrientes e confinamento radicular no crescimento da planta e produção da soja	44
Resumo.....	45
Abstract.....	46
Introdução.....	47
Material e Métodos.....	48
Resultados.....	50
Discussão.....	52
Conclusão.....	56
Referências.....	57
3. DISCUSSÃO GERAL	64
4. CONCLUSÕES GERAIS	67
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio tem demonstrado ser um importante alicerce da economia brasileira. Um dos principais ramos desse agronegócio compreende a produção vegetal, com ênfase para a produção de grãos e hortaliças. Na safra 2013/14 foram empregados cerca de 54 milhões de hectares. Desse total, cerca de 37,1 milhões de hectares esteve sobre o sistema de plantio direto, com destaque para a cultura da soja que utilizou aproximadamente 80% dessa área. A área que compreendeu o cultivo convencional encanteirado de hortaliças foi de aproximadamente 680 mil hectares o que corresponde a, aproximadamente, 84% da área total (CONAB, 2014).

Fica evidenciado que mais da metade da produção brasileira de grãos e hortaliças é feita sob dois sistemas de produção, denominados, respectivamente, Sistema Plantio Direto (SPD) e Sistema de Cultivo Encanteirado de Hortaliças (SCEH). Tanto no SPD como no SCEH, as raízes podem ficar confinadas na camada superficial do solo, pela concentração da matéria orgânica (MO), pela localização dos nutrientes fornecidos por ocasião da adubação e pela camada de compactação subsuperficial que ocorre, principalmente, devido ao tráfego de máquinas pesadas no caso do SPD (ROSOLEM et al., 1994; MÜLLER et al., 2001; SILVA; ROSOLEM, 2002; FOLONI et al., 2006) e, pela rotina de revolvimento intensivo dos solos com enxada rotativa no caso do SCEH (PRADO et al., 2002). Nessas condições, o crescimento radicular pode ser influenciado negativamente podendo também afetar o crescimento da parte aérea e a produtividade das culturas (BAYER; BERTOL, 1999; GENRO JUNIOR et al., 2004; MARTINAZZO, 2006; SILVA et al., 2014).

No contexto do parágrafo anterior, três hipóteses podem ser sugeridas a respeito do crescimento radicular. Primeiro, a concentração dos nutrientes em um volume restrito do meio radicular afeta o crescimento das raízes, a parte aérea das plantas e a produção das culturas. Segundo, a restrição ao crescimento das raízes afeta o crescimento das raízes e da parte aérea da planta e a produção das culturas. Terceiro, em condições que restringem o crescimento das raízes, o crescimento da parte aérea da planta e a produção das culturas podem ser compensadas por uma maior concentração de nutrientes.

Estudar a resposta das raízes às situações de diferentes restrições de volumes do meio radicular associado a variações da concentração de nutrientes pode ser uma alternativa para minimizar os efeitos negativos decorrente do confinamento das raízes. Para tal, o presente trabalho propôs dois experimentos representados pelos Artigos 1 e 2, com os objetivos a seguir.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho consistiu em testar se a concentração de nutrientes pode compensar situações de restrição física ao crescimento das raízes, sem reduzir o crescimento da parte aérea e a produção da soja e do repolho. Os objetivos específicos foram:

- Testar se diferentes concentrações de nutrientes, dispostas simultaneamente no meio radicular, interferem no crescimento das raízes, no crescimento da parte aérea e na produção de populações de soja e repolho;
- Testar se duas concentrações de nutrientes distribuídas em dois volumes de meio radicular influenciam o crescimento e a produção de grãos de plantas de soja.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DA SOJA

Cultivada em todo o mundo, a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) que foi relatada e explorada há mais de cinco mil anos originou-se na China, onde teve como ancestrais espécies de plantas rasteiras que estavam presentes na costa leste do continente asiático. Na China antiga, trabalhos de domesticação e melhoramento de plantas de soja, oriundas de cruzamentos naturais entre duas espécies da cultura, contribuíram para sua evolução (EMBRAPA, 2004).

A soja expandiu-se entre o período de 200 a.C. e o século III d.C. para regiões do sul da China e sudeste da Ásia, chegando posteriormente à Coréia e Japão. No início do século XVI e final do século XV foi introduzida na Europa onde permaneceu nos jardins botânicos da Inglaterra, França e Alemanha. Nos Estados Unidos a espécie chegou em 1804, porém sua importância na produção de grãos aumentou a partir de 1941 (MORAIS; SILVA, 1996; EMBRAPA, 2004).

Em 1882, a soja foi introduzida no Brasil, via Estados Unidos, e começou a ser estudada na Escola de Agronomia da Bahia. Por volta de 1900 foram datados seus primeiros cultivos no Rio Grande do Sul, local em que a espécie encontrou condições climáticas favoráveis ao seu desenvolvimento e expansão (MIYASAKA; MEDINA, 1981).

Em relação às características botânicas, a soja é uma dicotiledônea pertencente à família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Faboideae (Papilionoideae) e gênero *Glycine* L. (SEDIYAMA; TEIXEIRA; REIS, 2005). Apresenta sistema radicular pivotante com grande número de raízes secundárias e raiz principal bem desenvolvida. Adicionalmente, suas raízes são ricas em nódulos de bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico (EMBRAPA, 2004). As plantas de soja apresentam caule herbáceo e ereto, podendo variar de 0,60 m a 1,50 m de altura. Esses caules são ramificados e os ramos formam ângulos variáveis com a haste principal. As folhas são pecioladas longas, alternadas com três folíolos de formato oval ou lanceolados. As flores da soja podem ser de coloração amarela, violácea ou branca e produzem frutos no formato de vagens achatadas nas cores amarela palha, cinza ou preta, variando de acordo com a cultivar. As sementes

podem apresentar formatos achatados, alongados ou arredondados, com suas cores e tamanhos variando de acordo com o genótipo (MISSÃO, 2006).

De acordo com dados da FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) a produção mundial de soja na safra 2013/2014 foi em torno de 276 milhões de toneladas, sendo os Estados Unidos da América o maior produtor, seguido pelo Brasil, Argentina, China e Índia, respectivamente (FAOSTAT, 2015). O Brasil, na safra 2014/2015, teve uma área de 32,093 milhões de hectares plantada com soja e produziu cerca de 96,243 milhões de toneladas, com os estados de Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul ocupando local de destaque, respectivamente, na cadeia produtiva (CONAB, 2015).

Diversos fatores podem influenciar na produtividade de soja de uma determinada área de cultivo. Sendo assim, algumas características agronômicas favoráveis ao incremento de sua produtividade são estudadas: altura da planta, altura de inserção da primeira vagem, porte ereto, resistência ao acamamento e à deiscência das vagens, haste herbácea, resistência a pragas, nematoides e doenças, qualidade da semente, teor de óleo e proteína, rendimento dos grãos, estabilidade da produção, maturação uniforme, tolerância ao alumínio e ao manganês tóxicos, capacidade para fixação de nitrogênio e período juvenil. O ciclo da cultura pode variar de 75 a 200 dias dependendo da faixa de latitude da área de cultivo. No entanto, estas características variam de acordo com os genótipos utilizados e são alteradas pelas condições do ambiente de cultivo, tais como: local, época e densidade de semeadura (MARCHIORI et al., 1999; YOKOMIZO; DUARTE; VELLO, 2000; CARVALHO et al., 2003).

De acordo com Gilioli (2000) outro fator que afeta o desenvolvimento de uma lavoura de soja é a população de plantas, sendo assim, a população de cada cultivar deve ser calculada com base nas características de ciclo biológico, altura da planta, hábito de crescimento, período juvenil e índice de acamamento. Gaudêncio (1990) relatou que o conceito de melhor população de plantas é oriundo de um alto rendimento da cultura, altura de plantas e de inserção da primeira vagem adequados à colheita mecanizada e plantas que não acamem.

Com base nas informações anteriores nota-se que as características da parte aérea da lavoura de soja influenciam diretamente em sua produtividade. Porém, outro sistema não menos importante do que a parte aérea é o sistema radicular, que também influencia as características agronômicas da cultura (SILVA et al., 2014).

Sendo assim, as características do sistema radicular da soja devem ser muito bem entendidas. Seu sistema radicular cresce quando as células do meristema sofrem divisão e alongamento, por meio da pressão de turgor nas células, que é a força direcional que se sobrepõe a qualquer resistência do meio externo (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Além disso, as raízes apresentam flexibilidade, são lubrificadas, podendo mudar sua direção para ultrapassar barreiras, como por exemplo, agregados ou estruturas mais adensadas (VEPRASKAS, 1994). Porém, de acordo com Bengough e Mullins (1990), a taxa de alongação celular nas raízes pode ser prejudicada pela compactação. De outro modo, outros fatores, tais como, temperatura, umidade, aeração e disponibilidade de nutrientes, podem inibir o crescimento do sistema radicular (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Em condições normais de cultivo o sistema radicular da soja distribui de 70 a 80% de sua massa nos primeiros 15 cm do solo (GREGORY, 1992). De acordo com Abreu et al. (2004) o desenvolvimento desse sistema ocorre através dos macroporos ou dos espaços vazios entre os agregados. Esses espaços vazios decorrentes da presença de estruturas mais frágeis, fendas, canais originados pelas raízes em decomposição e pela atividade biológica da fauna do solo são fundamentais para o aprofundamento das raízes (NEVES et al., 2003; HOLLAND, 2004). Adicionalmente, atividades como manejo do solo nas operações de preparo, rotação de culturas e descompactação influenciam diretamente nesses processos (TORRES; SARAIVA, 1999).

2.2 A CULTURA DO REPOLHO

O repolho (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.) originou-se na Costa Norte Mediterrânea, Ásia Menor e Costa Ocidental da Europa, onde era utilizado pelos egípcios. As invasões arianas que ocorreram entre 2000 e 2500 a.C. contribuíram para generalização de seu uso, sendo que gregos e romanos o cultivavam em diversas formas. Na Europa, foi introduzido provavelmente no século IX pelos povos celtas. Já no continente Americano foi trazido por volta do século XV pelos europeus (TIVELLI; PURQUERIO, 2015).

De acordo com Filgueira (2008), o melhoramento genético da cultura contribuiu para produção de cultivares que podem ser utilizadas em condições termoclimáticas diversificadas, possibilitando o plantio durante todo o ano, nas

diversas regiões produtoras. A produção mundial de repolho e outras brássicas, no ano de 2013, foi em torno de 71,436 milhões de toneladas, sendo a China o principal produtor, seguida pela Índia, Federação Russa, República da Coreia e Japão, respectivamente (FAOSTAT, 2015).

Dados referentes à produção brasileira de repolho são incipientes, o rendimento médio nacional está entre 30 e 35 t há⁻¹, podendo ocorrer picos de produção de até 55 t há⁻¹, normalmente no outono, quando as cabeças são maiores. Porém, seu cultivo apresenta grande importância, não só pelas características nutricionais (LÉDO et al., 2000; FILGUEIRA, 2008), mas também pela intensa utilização de mão-de-obra familiar em seu cultivo, podendo gerar mais renda aos pequenos agricultores (SILVA JÚNIOR; YOKOYAMA, 1988; FILGUEIRA, 2008). De acordo com Melo; Vilela (2007) cada hectare cultivado com hortaliça gera cerca de 3 a 6 empregos diretos, com a mesma proporção para os indiretos.

O repolho é dividido taxonomicamente em duas espécies, o repolho liso (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) e o crespo (*B. oleracea* L. var. *sabauda* Martens). Esta cultura é classificada conforme a forma e cor da cabeça. As formas podem ser achatadas, pontudas, redondas, ovais ou elípticas. Já as cores distinguem-se em alba (repolho verde e branco) e rubra (repolho roxo) (TIVELLI; PURQUERIO, 2015).

As características botânicas são: planta herbácea, bianual, cultivada como anual. As folhas centrais se imbricam, formando uma “cabeça” compacta que envolve a gema apical, que é a parte comestível da planta. Atinge de 0,30 a 0,60 m de altura quando finda o ciclo (FILGUEIRA, 2008). Na fase juvenil, o sistema radicular do repolho apresenta raiz axial, a partir da maturidade ocorre intensa ramificação, com raízes adventícias surgindo do colo da planta, com grande quantidade de pelos absorventes, o que contribui na capacidade de absorção da cultura. A maior quantidade de massa das raízes, 70 a 80%, localiza-se na camada de 20-30 cm da superfície do solo, no entanto, algumas podem chegar a 1,50 m de profundidade. A maior expansão das raízes ocorre horizontalmente, podendo atingir distâncias de 1,05 m (VALDEZ, 1993).

O desenvolvimento vegetativo do repolho está diretamente ligado aos fatores climáticos, edáficos e genético (clima, solo, tratos culturais e potencial genético das cultivares). A germinação das sementes e emergência da plântula ocorre entre quatro a seis dias. O crescimento inicial da plântula é lento com surgimento de poucas folhas. Logo após as primeiras folhas pecioladas o ponto de crescimento

apical intumescce e o caule torna-se mais espeço devido ao acúmulo de fotoassimilados e o número de folhas aumenta rapidamente. A altura da planta aumenta até os 60 dias após a semeadura (DAS), sendo que a formação da cabeça inicia entre 60 e 70 DAS, a partir de um rápido desenvolvimento das folhas internas. O número de folhas internas pode chegar a 30 e sua massa aumenta lentamente até, aproximadamente, 120 DAS.

A nutrição mineral pode influenciar o crescimento e a produção das plantas de cultivada de forma direta, interferindo no metabolismo da planta ou de forma indireta, causando modificações na anatomia, na morfologia, na composição química e na forma de crescimento (VOSE, 1963). Neste sentido, Avalhães et al., (2009) testou o efeito da supressão de macronutrientes em soluções nutritivas no crescimento e o desenvolvimento de plantas de repolho. Quando o nitrogênio foi omitido houve redução do crescimento da parte aérea e de raízes em relação à testemunha. Já quando o nutriente suprimido foi o fósforo houve redução no crescimento de parte aérea, porém, a massa seca de raízes não diferiu significativamente quando comparado com a testemunha. Por fim, os autores concluíram que a deficiência de um nutriente, além de promover diminuição do teor desse nutriente na parte aérea causou um desequilíbrio nos demais nutrientes que, conseqüentemente, levou a alterações na morfologia da planta traduzidas como sintomas característicos de deficiência de cada nutriente.

2.3 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

2.3.1 Sistema Plantio Direto (SPD)

No Brasil, os primeiros relatos de cultivo em SPD aconteceram na região sul, na década de 1970, com o intuito de controlar a erosão em lavouras cultivadas pela sucessão trigo/soja. Atualmente, essa prática é adotada em diversas regiões produtoras do país (LANA, et al., 2013; LIMA et al., 2015; SANTOS et al., 2015; SILVA et al., 2015).

Inúmeros benefícios são associados à adoção do SPD, principalmente, na prevenção e/ou controle de erosão, semeadura dos cultivos em épocas adequadas, reduz trânsito de máquinas na área, pode reduzir o número de terraços, melhora porosidade total do solo e possibilita maior probabilidade de incremento na

produtividade, pois melhora as condições para o desenvolvimento das plantas (PEREIRA, 1998). O SPD quando comparado ao sistema convencional de cultivo e a diferentes métodos de preparo do solo tem demonstrado ser extremamente mais eficiente (BERTOL et al., 1997; DE MARIA et al., 1999).

Apesar dos benefícios proporcionados pelo SPD às plantas nele cultivadas e ao agroecossistema como um todo, há problemas que podem prejudicar essa prática, tais como: compactação da camada subsuperficial do solo, as máquinas apresentam custos mais elevados, maior necessidade de assistência técnica especializada, sua eficiência varia de acordo com o solo e região e poucos agricultores apresentarem grau de instrução compatível com a necessidade do sistema (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). Dentre os problemas citados acima, o que afeta diretamente as culturas é a compactação subsuperficial do solo, que dependendo do seu grau de impedância pode limitar o crescimento das raízes e até impedir o seu aprofundamento no perfil do solo. Este fato gera um confinamento do sistema radicular na camada superficial do solo que pode levar a modificações na arquitetura, morfologia e funcionalidade do sistema radicular (ROSOLEM et al., 1994; MÜLLER et al., 2001; SILVA; ROSOLEM, 2002; FOLONI et al., 2006; SILVA et al., 2014).

2.3.2 Sistema de Cultivo Encanteirado de Hortaliças (SCEH)

O cultivo de repolho tradicionalmente utilizado é baseado no revolvimento do solo por aração e gradagens, normalmente seguida de encanteiramento. O preparo destes canteiros ocorre depois de diversos revolvimentos do solo, principalmente, com a utilização da enxada rotativa (FERREIRA, et al., 2009). Porém, o uso indiscriminado deste equipamento pode provocar pulverização excessiva da estrutura do solo, aceleração da mineralização da matéria orgânica, compactação na camada de solo abaixo da profundidade de ação das lâminas de corte (PRADO et al., 2002; CARDOSO, 2012).

O crescimento e desenvolvimento das raízes são afetados pelos atributos físicos do solo que influenciam diretamente na disponibilidade de água, nutrientes, trocas gasosas e a resistência do solo à penetração. Entretanto, há dificuldades de determinar os valores críticos destes atributos que limitam o crescimento e produtividade dos cultivos (GYSL, 2001; BENGOUGH et al., 2006; FREDDI et.,

2009). Santos et al. (2010) trabalhando com a cultura do café em um Latossolo Vermelho-Amarelo, observaram que a utilização da enxada rotativa para o manejo de plantas invasoras promoveu compactação do solo nas profundidades 0-0,03, 0,10-0,13 e 0,25-0,28 m.

Para Carvalho Filho et al. (2007), avaliando a mobilização de um Latossolo Vermelho distrófico, textura média, em relevo plano, em função das técnicas de preparo utilizadas, observaram que a enxada rotativa ocasionou elevado empolamento e baixo índice de rugosidade, sendo o equipamento que proporcionou a maior desagregação do solo. Também, Prevedello et al. (2014), avaliando a variação temporal e espacial da estabilidade de agregados estáveis em água e a sua relação com o conteúdo de matéria orgânica em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro sistemas de preparo para cultivo de *Eucalyptus grandis*, concluíram que o preparo com enxada rotativa foi um dos que resultaram em menor estabilidade estrutural, pela redução da porcentagem de agregados estáveis em água na classe de maior diâmetro (4,76-8,00 mm). Entretanto, o preparo com enxada rotativa foi superior ao plantio direto em relação à sobrevivência e o crescimento inicial do eucalipto.

2.4 RELAÇÃO PARTE AÉREA-RAIZ NO CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS

O termo “alometria” é empregado em fisiologia vegetal para designar o crescimento simétrico que há em alguns órgãos das plantas. Também, existe alometria entre o crescimento da parte aérea e o sistema radicular das plantas. Por exemplo, plantas que tem um vigoroso crescimento da parte aérea apresentam também um crescimento radicular intenso. No entanto, plantas selecionadas para possuírem porte pequeno, por exemplo, híbridos de milho, provavelmente terão o sistema radicular reduzido (FLOSS, 2004).

A relação entre a parte aérea e o sistema radicular inicia na embriogênese quando a primeira estrutura a emergir da semente é a radícula que tem funções iniciais de fixação da plântula e absorção de água (RAVEN, 2011), após a emergência da plântula suas estruturas aéreas entram em contato com a luz solar e essa estimula a síntese de clorofila, molécula fundamental para o processo de fotossíntese. Até o aparato fotossintético estar com autonomia para produção de

energia química Adenosina Trifosfato (ATP) são as reservas cotiledonares que sustentam o crescimento da parte aérea e radicular (TAIZ; ZIGER, 2013). A partir deste ponto o crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como, a relação parte aérea-raiz são afetados e modificados pelos fatores climáticos, edáfico e genéticos. O estudo da relação parte aérea-raiz pode fornecer informações sobre o equilíbrio entre os órgãos das plantas, devido às modificações no meio de cultivo, uma vez que indica a existência de uma interdependência entre os órgãos no balanço por nutrientes, carbono e água (BERNARDI; CARMELLO; CARVALHO, 2000).

A relação parte aérea-raiz é aumentada com a utilização de fertilizantes nitrogenados, uma vez que, o nitrogênio estimula o crescimento vegetativo, fazendo com que haja maior necessidade de alocação de carboidratos na parte aérea em detrimento da raiz (AUNG, 1974). Assim, doses elevadas de nitrogênio podem prejudicar o desenvolvimento radicular (WITT, 1997), alterando a relação parte aérea-raiz (MARSCHNER, 1995). Porém, quando o crescimento radicular é restringido, a quantidade de pelos radiculares pode ser reduzida afetando a absorção de água e nutrientes, impactando o crescimento da parte aérea, das raízes, área foliar, com possível redução na produção da cultura (ROBBINS; PHARR, 1988; IERSEL, 1997; NESMITH; DUVAL, 1998).

Toda via, quando plantas são cultivadas em solos com baixa disponibilidade de fósforo a relação parte aérea-raiz tende a diminuir. Esse fato pode ser explicado uma vez que as raízes acabam por assimilar o fósforo que está sendo transportado pelo córtex reduzindo drasticamente seu fluxo para a parte aérea da planta. Desta forma, o crescimento da parte aérea é reduzido em detrimento do crescimento maior da raiz no intuito de aumentar a área de captação de nutrientes (FERNANDEZ; SOUZA, 2006). Corroborando com o fato mencionado acima, Avalhães et al., (2009), observou que ao suprimir o macronutriente fósforo, em um trabalho com soluções nutritivas, não houve diferença no crescimento da matéria seca de raízes de repolho em relação ao tratamento testemunha (solução nutritiva completa). Porém, a massa seca da parte aérea decresceu 74,15% em relação à testemunha. Esses trabalhos demonstram que um dos fatores importantes da relação parte aérea-raiz é a disponibilidade de nutrientes no meio radicular.

2.5 SISTEMA RADICULAR

A primeira estrutura que surge no processo de germinação das sementes é a raiz (RAVEN, 2011). O sistema radicular das plantas terrestres tem como principais funções a aquisição de nutrientes e água do solo (GREGORY, 1994). Segundo Fitter (1991) a sustentação fornecida à parte aérea, bem como, o armazenamento de nutrientes, síntese de reguladores do crescimento e a propagação são funções secundárias.

Nas angiospermas, tanto na classe eudicotiledônea como nas monocotiledôneas a primeira raiz da planta é usualmente chamada de raiz primária. A raiz primária nas eudicotiledôneas, também, é chamada de raiz pivotante ou axial e crescem verticalmente para baixo, dando origem as ramificações ou raízes laterais. Esse tipo de raiz, com eixo principal mais desenvolvido, dá origem ao sistema radicular pivotante. No entanto, nas monocotiledôneas a raiz principal é rapidamente eliminada, dando origem a uma série de novas raízes adventícias, que surgem da base do caule sem distinção entre as mesmas. Essas raízes dão origem ao sistema radicular fasciculado ou “cabeleira” (RAVEN, 2011; TAIZ; ZIGER, 20013).

Quando uma planta emerge do solo e expõe seu caule e folhas a luz solar inicia o estabelecimento de uma relação entre o crescimento da parte aérea e as raízes. Dessa forma, planta em início de crescimento tem a superfície de absorção de água e sais minerais bem maiores do que a superfície fotossintética. À medida que a planta vai ficando mais velha essa diferença tende a diminuir (RAVEN, 2011).

Inúmeros fatores edáficos, podem influenciar na ralação parte aérea-raiz. No entanto, os fatores que mais podem influenciar seu crescimento são a concentração de nutrientes e o volume físico de crescimento dessas raízes. A concentração de nutrientes pode potencializar ou diminuir o crescimento radicular. Quando há excesso de nutrientes no solo, caracterizando uma situação de salinidade, o crescimento radicular é diminuído podendo culminar no colapso de suas células e morte das raízes. Esse fato pode acontecer devido ao aumento do potencial osmótico da solução do solo e diminuição do potencial hídrico dessa. Como a raiz absorve água por osmose, o aumento do potencial osmótico da solução do solo diminui a diferença dos potenciais hídricos entre essa e a do citoplasma das células radiculares fazendo com que a planta tenha dificuldade em absorver água (ALVARENGA et al., 2013). Todavia, quando as concentrações de nutrientes são

extremamente baixas a tendência é de redução do crescimento da planta como um todo. Cometti et al., (2008), testaram quatro concentrações de uma solução nutritiva no cultivo de alface. As concentrações foram 100%, 50%, 25% e 12,5%. Para a produção de massa seca de folhas não houve diferença entre as concentrações 100% e 50%, no entanto, as plantas crescidas nas concentrações 25% e 12,5% foram, respectivamente, 50% e 75% menores que as outras concentrações. Já para as raízes houve um decréscimo linear da massa seca à medida que se diminuiu a concentração da solução nutritiva.

A limitação física do crescimento radicular vem sendo estudada, principalmente, em experimentos que avaliam a compactação do solo em camadas subsuperficiais (SILVA; ROSOLEM, 2002; SILVA et al., 2014). Rosolem et al., (1994) cultivando soja até os 37 dias após a semeadura, com quatro níveis de compactação em camadas subsuperficiais, relatou que uma compactação da ordem de 0,69 Mpa, aproximadamente, 1,45 g cm³ proporcionou redução da ordem de 50% na massa seca de raízes. Müller et al., (2001) testando o efeito de plantas de cobertura e quatro níveis de compactação em subsuperfície observaram que aumentando a compactação do solo, o comprimento e a matéria seca das raízes aumentaram acima da camada compactada e diminuíram abaixo dela, concentrando o sistema radicular das plantas próximo à superfície.

As raízes apresentam grande importância no desenvolvimento e produção dos vegetais, porém são pouco estudadas quando comparadas com a parte aérea das plantas. Este fato deve-se principalmente pelas dificuldades encontradas nos métodos de avaliação (AUNG, 1974). Trabalhos com raízes foram desestimulados por muitos anos devido ao tempo gasto nas atividades de quantificação do sistema radicular e as incertezas dos resultados obtidos (ZONTA et al., 2006).

Apesar das dificuldades encontradas nas avaliações dos sistemas radiculares, estudos envolvendo distribuição, atividade e extensão do sistema radicular de plantas cultivadas são de extrema importância para o entendimento da produção agrícola. A distribuição das raízes pode variar de acordo com a idade da planta, genótipos utilizados, manejo cultural, condições fitossanitárias e características físicas e químicas do solo. Estudos referentes à forma de distribuição do sistema radicular, bem como sua qualidade e quantidade contribui para a produção vegetal, pois pode fornecer informações sobre manejo do solo, irrigação, espaçamento, localização de adubos e culturas intercalares (FRACARO; PEREIRA,

2004; ZONTA et al., 2006). Entretanto, a arquitetura, distribuição e dinâmica de crescimento do sistema radicular influenciam diretamente na relação planta-água-solo (VASCONCELOS, 2002).

Dentre as diversas práticas utilizadas para estudos com raízes encontra-se a técnica de Split Root System (SRS), ou sistema de raízes divididas. Este método permite ao pesquisador dividir o sistema radicular de uma planta em recipientes separados, com tratamentos diferentes em cada recipiente (KIRKHAM, 1983). Tem sido utilizada para estudar a influência de diferentes tratamentos de fertilização sobre o crescimento das raízes (SOARES et al., 2010). Sendo assim, Split Root System pode ter sido empregada em diferentes pesquisas (DE NISI et al., 2012; IQBAL, 2014).

Trajano et al. (2001) utilizaram a técnica SRS a fim de estudar a colonização micorrízica, a produção de matéria seca da parte aérea e de raízes e os conteúdos dos macronutrientes, exceto o N, na parte aérea de plantas de *Eucalyptus urophylla*. Tabaldi (2008) utilizou o SRS com o objetivo de investigar e comparar respostas bioquímicas e fisiológicas de clones de batata expostos em solução nutritiva contendo Al, que é um elemento que afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas. Klepker e Anghinoni (1995) utilizaram o SRS a fim de avaliar a relação entre os níveis de fósforo no solo com o crescimento do sistema radicular da cultura do milho.

Estudos envolvendo diferentes concentrações de nutrientes associadas a diferentes volumes para o crescimento radicular em dispositivos que simulem o mais próximo possível a realidade das lavouras e que garantam ao mesmo tempo confiabilidade dos dados são necessários atualmente, frente aos desafios de manejo das lavouras.

ARTIGO 1: Growth and production of soybean and cabbage plants under different nutrient concentrations disposed simultaneously in the root medium.

Growth and production of soybean and cabbage plants under different nutrient concentrations disposed simultaneously in the root medium.

Rodrigo dos Santos Godoi¹; Jerônimo Luiz Andriolo²;

Abstract

The goal of this research was to test different concentrations of nutrients disposed simultaneously in the root medium interfere with root growth, the shoot growth and production of soybean and cabbage. An experiment was conducted inside a polyethylene greenhouse from 19 December 2012 to 17 May 2013. "U" shape wooden gullies were made up with two similar compartments inside them for root growth. Water and nutrients were supplied to plants by subirrigation. Treatments were three concentrations of the nutrient solution: zero, 50% and 100%, in five combinations in the two compartments of each gully. In T1, 50% concentration was supplied in both compartments (50/50). In T2, it was 50% in one and 100% in the other compartment (50/100); in T3, water (zero concentration) and 100 % (0/100); in T4, water and 50% (0/50) and in T5 it was 100% in both compartments (100/100). Growth of soybean plants at R1 was 30% higher on plants supplied with 100/100 and 50/100 nutrient solution concentrations while at R6 it was lowest in the 0/50. Lower root growth was recorded where nutrients were supplied in only one side of gullies. Growth of cabbage plants at 62 DAP was higher on plants supplied with 0/100 and maximum root growth was recorded on gullies with nutrients supplied in both sides (50/50 and 100/100). It was concluded that root growth of soybean and cabbage plants is directed toward the higher concentration of nutrients in the root medium and when supplied quantities of nutrients are enough to attain those extracted by plants, maximum growth might be expected, irrespective of the concentration of nutrients in the root medium.

Key words: *Glycine max*, *Brassica oleracea* var. *capitata*, mineral nutrition, root growth.

¹ Instituto Federal Farroupilha, Campus de São Vicente do Sul, 97420-000, Rua 20 de Setembro, nº 2616, São Vicente do Sul, RS, Brasil. E-mail: rodrigo.godoi@iffarroupilha.edu.br .

² Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Fitotecnia, Avenida Roraima, CEP 97105 800, nº 1000, Santa Maria, RS, Brasil, E-mail: jerônimo@pq.cnpq.br.

INTRODUCTION

In current Brazilian crop production systems fertilizers are applied in the upper soil layer. Soybean, the most important annual crop, is planted mainly by no-till methods (Companhia Nacional de Abastecimento 2014) while vegetables are in raised beds made up by rotary cultivators (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária 2013). It has been demonstrated the stratification of nutrient concentration in the soil profile, organic matter, N, P and K being higher at the surface layer, and also a compacted barrier at about 10 cm depth which reduces root growth (Bayer and Bertol 1999; Genro Junior et al. 2004; Martinazzo 2006; Silva et al. 2014).

The partitioning of assimilates between shoot and roots has been considered dependent of C and N concentrations in plant tissues (Yin and Schapendonk 2004). Growth of shoot organs enhances C concentration and reduces N concentration in tissues. Roots grown to search and uptake more N to reestablish the equilibrium of concentration between C and N. When nutrient concentration in the rooting media is low, more root growth will be necessary and more carbon assimilates has to be allocated from the shoot to sustain root growth. As a consequence, final shoot growth and yield might be reduced. In the case of root growth being impaired by unfavourable soil physical conditions like compactation, nutrient uptake and shoot growth and yield might be also reduced. Using high fertilization rates to compensate poor root growth may be ascribed as a way to prevent reduction in shoot growth and yield. Nevertheless, Beulter and Centurion (2004) reported that when soil compactation was increased, soybean plants showed higher density, surface and dry mass of roots in the upper 0.05 m soil layer and yield was reduced. In lettuce plants, Cardoso et al. (2015) showed that when root growth was restricted, higher N availability was not able to compensate the reduction in shoot growth.

In plant modeling root growth has been related to nutrient uptake (Yin and Schapendonk 2004). Nevertheless, water absorption is another essential function of roots and works at a different timing scale (Yun et al. 2014). While nutrients can be uptake at low rates and stored in the plant, water has to be absorbed at variables diurnal rates. Transpiration rates during the day can rise quickly and overlap water absorption and transport from roots, leading plants to wilt. An expanded and efficient

root system may be more important for water absorption than for nutrient uptake, especially in field grown crops where soil water content may drastically change in short time periods. Reducing root growth may keep plants more exposed to water deficits and may be an undesirable consequence of high fertilization rates in a limited soil layer.

It has been reported in the literature data about the effect of nutrient concentration in root growth using the split-root method in controlled environmental conditions (Kosslar and Bem Bohlool 1984; Fernández et al. 2011; De Nisi et al. 2012; Kerbiriou et al. 2013; Iqbal 2014; Zandt et al. 2015). Nevertheless, this method can be criticized at least by its (i) artificial splitting of roots, (ii) using of only one or few plants per pot and (iii) short plant growing periods. Data from experiments conducted in conditions similar to those in the commercial production and during the whole plant growing period were not found in the literature.

The goal of this research was to test whether different concentrations of nutrients disposed simultaneously in the root medium interfere with root growth, the shoot growth and production of soybean and cabbage, with plants population similar to conventional tillage and during the whole cropping period.

MATERIAL AND METHODS

The experiment was conducted inside a polyethylene greenhouse from 19 December 2012 to 17 May 2013, at Instituto Federal Farroupilha, São Vicente, RS, Southern Brazil. The Köppen's climate classification is Cfa (Alvares et al. 2014), 1,685 mm precipitation and 19.3 °C air temperature annual averages.

The average temperature and RH in the greenhouse throughout the experimental period, were, respectively: 24.56 °C and 75.58%. Maximum values were 46.0 °C (12/30/12 at 16:20) and 100% (03/20/13 at 05:20) and minimum values were 8.7 °C (14/4/13 at 07:10) and 19.1% (04/19/13 at 14:30). The average values of electrical conductivity (EC) and (pH) were as shown in Table 4. From these data it can be stated that the experimental set-up was efficient to create distinct nutritional conditions in both sides of gullies.

a) *Experimental setup and plant material*

“U” shape wooden gullies were made up, 8.00 m length, 0.28 m height and 0.20 m width over benches at 0.60 m height from the soil surface and 3% slope. Two similar compartments were made inside gullies by placing a clapboard 0.17 m height and 8.00 m length at the middle (Figure 1). The inner surface was lined with 80 μm polyethylene film. A 0.02 m layer of basaltic gauge was placed at the bottom and covered with a $1,5 \times 10^{-3}$ m polypropylene mesh. Gullies were filled with washed sand used as rooting media. Physical characteristics were 0.00-0.03 m gauge, 1.6 kg dm^{-3} bulk density and 0.243 L dm^{-3} maximum water retention capacity. Black and white polyethylene film was used to cover the surface of gullies. Sowing was done in holes made at the middle part of the gully and the root system was kept to grow freely.

Water and nutrients were supplied to plants by subirrigation. The nutrient solution was pumped from a 500L reservoir to the upper side of each one of the two compartments inside each gully and drained off to the reservoir in a closed system. The composition of the nutrient solution was, in mmol L^{-1} : 8.69 N-NO_3^- ; 1.86 N-NH_4^+ ; $4.0 \text{ H}_2\text{PO}_4^-$; $1,0 \text{ SO}_4^{2-}$; 6.0 K^+ ; 2.0 Ca^{2+} and 1.0 de Mg^{2+} . Concentrations of micronutrients were, in mg L^{-1} : 0.03 Mo ; 0.26 B ; 0.06 Cu ; 0.50 Mn ; 0.22 Zn and 1.0 of iron in a chelated form. Electrical conductivity (EC) and pH was daily measured at the end of the two compartments inside each gully. The EC was corrected ever a 10% deviation was recorded from the original value, by adding water of aliquots of new nutrient solution and the pH by aliquots of NaOH or H_3PO_4 at 1M concentration.

As plant material was used two contrasting species. The soybean (*Glycine max*) representative of a pulse for grain production and cabbage (*Brassica oleracea* var. *Capitata*), representing a vegetable hardwood whose development period for commercial production purposes limited to the vegetative phase. The soybean cultivar used was the BMX Turbo RR and cultivate cabbage was TOPSEED Titan, F1 hybrid. Both species were sown directly into the experimental device. The sowing of both species were used three seeds per hole at a depth of 0.01 m. After the emergency was done thinning of defective seedlings attacked by pests and / or physiologically malformed, leaving only one seedling per hole. For soybeans the row spacing was 0.50 m, with 15 plants per linear meter. Already, the cabbage was 0.60 m between rows and two plants per linear meter.

b) Treatments

Treatments were three concentrations of the nutrient solution, zero, 50% and 100%, respectively, in five combinations in the two compartments of each gully, for each species separately. In T1 50% concentration was supplied in both compartments (50/50). In T2, it was 50% in one and 100% in the other compartment (50/100); in T3, water (zero concentration) and 100 % (0/100); in T4, water and 50% (0/50) and in T5 it was 100% in both compartments (100/100). It was used one gully per plot and four replications. Border plants were not used for determinations.

c) Measurements

Soybean plants were collected at R1 (beginning flowering) and R6 (full seed) developmental stages (Ritchie 1997) for determinations of dry mass (at 60°C) of leaves, pods and roots. At R9 (harvesting maturation point), stem, pods and grain dry mass was determined. Sand was washed in running water for extracting roots. Cabbage plants were collected at 62 days after planting (DAP) and 93 DAP and dry mass (at 60°C) of expanded leaves, stem, petioles, head and roots were determined, the central vein of leaves being considered as petioles. Data were submitted to ANOVA using the SISVAR software (Ferreira 2000) and means compared by the Scott-Knott test ($p > 0.05$).

RESULTS

Growth of soybean plants at R1 was 30% higher on plants supplied with 100/100 and 50/100 nutrient solution concentrations than in those with 0/100 (Table 1). In gullies with the nutrient solution supplied similarly in both sides, quantities of nutrients in 100/100 were twice than in those with 50/50 and plants increased growth 19%. However, in gullies with the nutrient solution supplied in only one side, plants fed with half quantity of nutrients in 0/50 grow 15% more than those with 0/100. When plants were fed with similar quantities of nutrients supplied only in one side (0/100) or in both sides (50/50) growth was 13.3% higher with nutrients in both sides.

Growth of roots did not differ on soybean plants supplied with twice quantity of nutrients similarly distributed (50/50 and 100/100), but shoot growth did 25% more. Supplying nutrients in only one side and reducing nutrients by half (0/50 and 0/100) increased growth of roots 24% and of stem 28%. Supplying similar quantities of nutrients only in one side (0/100) or in both sides (50/50) increased 39% root growth on later ones, while growth of leaves did not differ significantly.

Growth of cabbage at 62 DAP was 37.7% higher on plants supplied with 0/100 than in those with 0/50 (Table 1). Although plant growth increased by supplying higher nutrient quantities (50/50, 50/100 and 100/100) it was lower than on plants with 0/100. On gullies with nutrients being similarly distributed on both sides (50/50 and 100/100), growth was 11.5% higher on 100/100 ones. With similar quantities of nutrients unevenly distributed in gullies (50/50 and 0/100) growth was 17.9% higher on 0/100 ones. Growth of roots and leaves was increased by higher quantities of nutrients (50/100 and 100/100). When quantities of nutrients were reduced (0/50, 50/50 and 0/100), growth of roots, stem and leaves were higher on 0/100 plants.

At R6 stage for soybean plants (Table 2), maximum growth was recorded in 0/100, 50/50 and 50/100 gullies and the lowest in the 0/50. Maximum root growth was in 50/50 and 100/100 gullies. Although similar root growth was recorded between 50/50 and 100/100 gullies, shoot growth was 16.2% higher in 50/50 ones. Lower root growth was recorded where nutrients were supplied in only one side of gullies (0/50 and 0/100). Similar quantities of nutrients being supplied in only one side (0/100) or in both sides (50/50) increased 100 % root growth in plants with nutrients in both sides. Growth of cabbage plants in 0/50 gullies were half than that averaged on all other treatments. Maximum root growth was recorded on gullies with nutrients supplied in both sides (50/50 and 100/100).

The concentration of nutrients in both sides of gullies affected growth of soybean roots (Table 3). It was strongly reduced where nutrients were absent. In the 0/50 gullies, it reaches 44.9% at R1 and 26.6% at R6 of that recorded on the side where nutrients were supplied. In the 0/100 gullies, it was 47.9% and 16.4%, respectively. On cabbage plants it was weakly reduced in 0/50 gullies, reaching 86.3% and 78%, at 62 DAP and 93 DAP, respectively, of that recorded on the side

where nutrients were supplied. In the 0/100 gullies it was reduced in a similar way than recorded in soybean plants.

Soybean grain production at the end of the experiment was higher on plants grown in gullies at the higher nutrient concentration and evenly distributed in both sides (100/100). Nevertheless, while root growth of plants at the lower nutrient concentration distributed in only one side of gullies (0/50) was 57.7% reduced, grain production of these plants was only 14.1% reduced. Lower grain production was recorded on plants growing in 0/100, 50/50 and 50/100 gullies, irrespective of root growth and distribution in both sides of gullies. For cabbage plants, shoot fresh weight was reduced only on plants growing at the lower nutrient concentration and distributed in only one side of gullies (0/50).

DISCUSSION

a) Experimental device

Most of data reported in the literature using the split-root method were from experiments where the root system was artificially split. In an experiment to determine the effect of the position of K and the water soil content on root and shoot growth of soybean plants in a split-root system, Fernández et al. (2011) cut the root apical meristem two days after germination to stimulate the growth of lateral roots. Three days later plantlets were transferred to pots and lateral roots were manually separated and kept to grow in the two halves of pots. Such manipulation was not the normal condition of crops. In the present experiment root growth was not manipulated. Sowing was made at 0.03 m depth at the middle axis of gullies and plantlet roots grow freely in the 0.11 m layer above the clapboard dividing the gully in two compartments (Figure 1). The root "choice" for one of the two compartments was a natural plant decision, similar to that of a crop in the field. Another difference was the use of two contrasting plant populations. In fact, Rambo et al. (2002) reported different growth and yield patterns between isolated and population soybean plants. Isolated soybean plants were also used by Fernández et al. (2011) while Kerbiriou et al. (2013) used isolated lettuce plants, both without any intraspecific competition. Soybean is a Fabaceae semideterminate annual crop harvested at the end of its

developmental period while cabbage is a vegetable crop harvested during its vegetative growing period. Similar results is lacking in the literature.

b) Dry mass partitioning in soybean plants

Higher growth of soybean plants at R1 were on those supplied by 50/100 and 100/100 nutrient solution concentrations and in both compartments of gullies (Table 1). Nevertheless, this result can not be attributed to root growth, because root growth was similar between 100/100 and 50/50 and 50/100 were also similar to 0/50 plants. It is possible that a more uniform distribution and higher concentration of nutrients in the root medium was favorable for shoot growth. In the Fernández et al. (2011) experiment, root density was similar in both sides of pots with high and low K concentration, but shoot growth was higher on plants with the lower K concentration in the root medium. This discrepancy might be a consequence of cation imbalance in that experiment because only K concentration was changed, while in the present experiment the concentration of all nutrients in the nutrient solution were modified in a similar way.

In plants supplied with twice the nutrient concentration, in both (50/50 and 100/100) and in only one side of gullies (0/50 and 0/100), two distinct responses were observed. On 100/100 plants total dry mass was 19% higher than on 50/50 plants and it can be attributed to higher nutrient availability. On 0/50 and 0/100 plants with only half of the total quantity of nutrients available to each plant and only in one side, higher root growth was recorded on plants having the lower availability and only in one side (0/50). Moreover, shoot growth was higher on these plants. This result agree only partially with (Fernandez and Souza 2006), whose reported higher root growth but lower shoot growth on plants at low P availability.

On plants supplied with the same quantity of nutrients in one or in both sides of gullies (50/50 and 0/100), it was recorded that the same quantity of nutrients distributed in a higher volume of root medium increased root growth but leaf growth was not affected (Table 1). On 50/50 plants roots grow similarly in both sides reaching $3.38 \text{ g plant}^{-1}$, while on 0/100 plants root growth was 68% higher in the side supplied with nutrients but reached only $2.06 \text{ g plant}^{-1}$ (Table 3). In split-root lettuce

plants Kerbiriou et al. (2013) reported higher root length in the high N compartment, but total root growth per plant was not compared.

From R1 (beginning flowering) to R6 (full seed) growth of roots was higher on plants supplied with the same concentration of nutrients in both compartments (50/50 and 100/100) (Table 2). During this developmental stage the competition for assimilates among plant organs is increased by the sink strength of grains, but root growth seems not affected by this competition. This result is in contradiction with physiological approaches considering that during seed filling stages of annual crops growth of roots is reduced by its sink strength weaker than seeds (Yin and Schapendonk 2004; Deng et al. 2012).

c) Dry mass partitioning in cabbage plants

The lowest growth of cabbage plants was recorded on 0/50 plants and the highest on 0/100 ones (Table 1). When the same availability of nutrients in the 0/100 compartment was split in two compartments (50/50) growth of leaves, stem and roots was reduced (Table 1). In 0/50 plants roots growth was similar in both compartments at 62 and DAP and only slightly high in that with nutrients at 93 DAP (Table 3). Nevertheless, in 0/100 plants, growth of roots was clearly driven by nutrients, as reported previously by Kerbiriou et al. (2013) in lettuce plants. During the head growth period from 62 to 93 DAP, root growth was higher on plants supplied with the same nutrient concentration in both sides of gullies (50/50 and 100/100) (Table 3), as reported on soybean plants.

d) Agronomic implications

Present results showed that root growth of soybean and cabbage plants is directed toward the higher concentration of nutrients in the root medium. When supplied quantities of nutrients are enough to attain those extracted by plants, maximum growth might be expected, irrespective of the concentration of nutrients in the root medium. Nevertheless, this conclusion arises from plants fertigated several times during the day, without any restriction in water availability and absorption

(electrical conductivity of the nutrient solution was ever below the salinity level). This is not the case of plants grown in the field, especially annual crops like soybean. In this case the soil water content may decrease between rainfalls or irrigation events and plants may need an extended root system to search water to satisfy the transpiration flux, which can strongly and fastly increase during daily warmer periods. In this situation, a root system distributed across a greater volume of root medium might be a better strategy to protect crops from water deficits. It is advisable to search new fertilization management techniques and equipments to attain this goal.

CONCLUSION

The greatest growth of soybean roots occurred in the gullies with nutrient concentrations equal on both sides, irrespective of the concentration of the nutritive solution;

Every time there nutrient solution concentration difference on either side of the gullies was reduced growth of cabbage roots in relation to the gullies with uniformity nutrients concentration on both sides;

The growth of the roots of soybean plants and cabbage is directed to the higher concentration of nutrients in the root medium and when the quantities supplied nutrients are sufficient to achieve those extracted from the plants, the maximum growth may be expected regardless of the concentration of nutrients in root medium.

REFERENCES

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2014) Köppen`s climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6):711-728.
- Bayer C, Bertol I (1999) Características químicas de um cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23:687-694.
- Beulter AN, Centurion JF (2004) Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 6:581-588.
- Cardoso FL, Andriolo JL, Dal Picio M, Piccin M, Souza JM (2015) Nitrogen on growth and yield of lettuce plants grown under root confinement. *Horticultura Brasileira* 33:422-427.
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2014) Monitoring of the Brazilian grain harvest. – v.1, n. 9, (2013-2014) – Brasília, June 2014. Available in: <<http://www.conab.gov.br> > Accessed April 12, 2015.
- Deng J, Ran J, Wang Z, Fan Z, Wang G, Jia M, Liu J, Wang Y, Liu J, Brown JH (2012) Models and tests of optimal density and maximal yield for crop plants. *PNAS – Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (39):15823-15828.
- De Nisi P, Vigani G, Dell'Orto M, Zocchi G (2012) Application of the Split root technique to study iron uptake in cucumber plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 57:168-174.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Brasília: EMBRAPA – Vegetable, 2013. Available in: <http://www.embrapa.br/paginas/hortalicas_em_numeros/producao_hortalicas.pdf > Accessed April 29, 2015.
- Fernandes, MS; Souza, SR (2006) Absorção de nutrientes. In: Fernandez, MS., ed. *Nutrição Mineral de Plantas*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 115-152.
- Fernández FG, Brouder SM, Volenec JJ, Beyrouty CA, Hoyum R (2011) Soybean shoot and root response to localized water and potassium in a split-pot study. *Plant Soil* 344:197-212.
- Ferreira DF (2000) Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. I. 45ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP, Julho de 2000. p. 255-258.
- Genro Junior SA, Reinert DJ, Reichert JM (2004) Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28:477-484.
- Iqbal T (2014) A Split-root experiment shows that translocated phosphorus does not alleviate aluminium toxicity within tissue. *Plant Soil* 384:21-36.

- Kerbiriou PJ; Stomph TJ; Van Der Putten PEL; Lammerts Van Bueren ET; Struik PC (2013) Shoot growth, root growth and resource capture under limiting water and N supply for two cultivars of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plant Soil* 371:281-297.
- Kosslar R and Bem Bohloul B (1984) Suppression of nodule development of one side of a Split-Root System of soybeans caused by prior inoculation of the other side. *Plant Physiology* 75:125-130.
- Martinazzo R (2006) Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado. 2006. 69 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.
- Rambo L, Costa JA, Pires JLF, Parcianello G, Ferreira FG (2002) Rendimento de grãos da soja e seus componentes por estrato do dossel em função do arranjo de plantas e regime hídrico. *Sientia Agrícola* 2:79-85.
- Ritchie SW (1997) How a Soybean Plant Develops. Tradução de Gil Miguel de Souza Câmara. Piracicaba: potaFOS, 1997. 21 p. Special Report, n. 53. Reprinted June 1997.
- Silva FR, Albuquerque JA, Costa A (2014) Crescimento inicial da cultura da soja em latossolo bruno com diferentes graus de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38:1731-1739.
- Zandt 't D, Marié CL, Kirchgessner N, Visser EJW, Hund A (2015) High-resolution quantification of root dynamics in solit-nutrient rhizoslides reveals rapid and strong proliferation of maize roots in response to local high nitrogen. *Journal of Experimental Botany* 66 (18):5507-5517.
- Yin X, Schapendonk AHCM (2004) Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between roots and shoot in crop and grass plants. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 51 (4):407-426.
- Yun B, Pooja A, Neil ER, Craig JS, Mark CT, Han QT, Cliff T, Lina D, Pedro LR, Teva V, Sacha JM, Malcolm JB and José RD (2014) Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. *PNAS – Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (25):9319–9324.

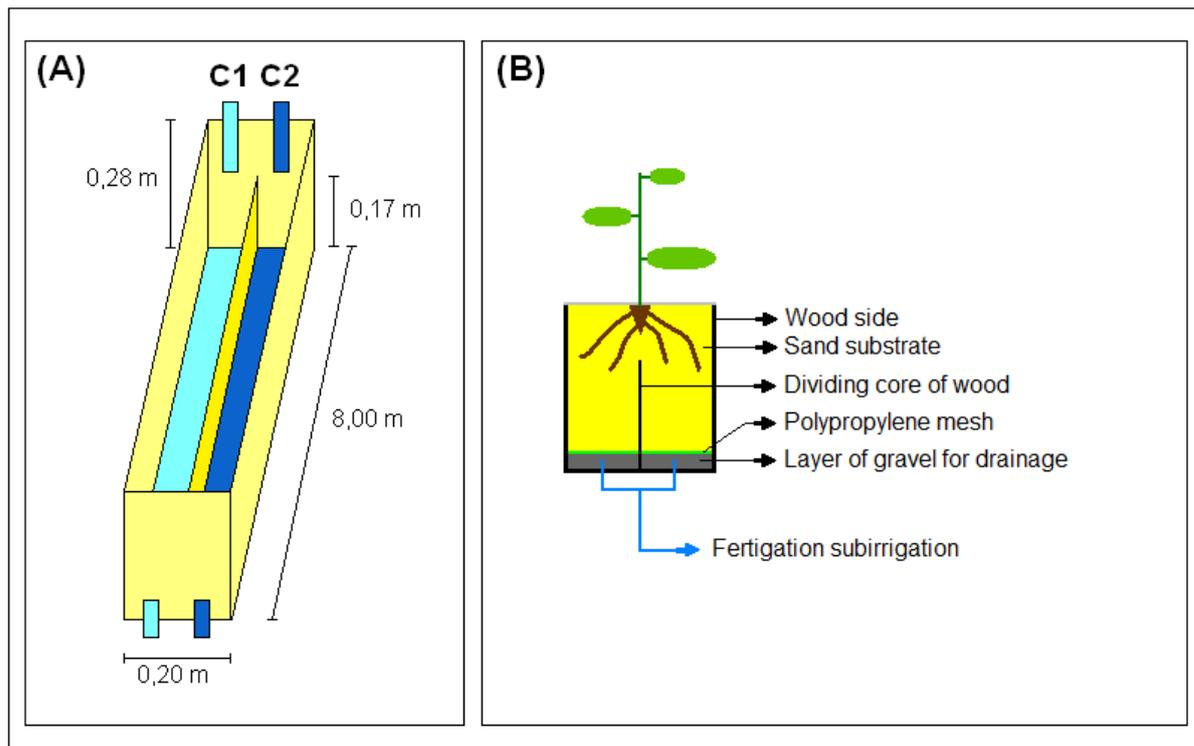


Figure 1 – Diagrammatic schema of the experimental device with gullies split in two similar compartments (C1, C2), in a longitudinal (A) and transversal (B) view.

Table 1 - Dry mass of soybean, cv. BMX Turbo RR and cabbage, cv. TOPSEED Titan plants at R1 stage and at 62 days after sowing, respectively, supplied with three nutrient concentrations in two separate compartments for root growth. São Vicente do Sul, RS, 2013.

Nutrient concentrations in C1/C2 compartments*	Soybean dry mass			
	Leaves	Stem	Roots	Total
%	-----g plant ⁻¹ -----			
0 / 50	5.78 c ¹	5.42 a	2.71 b	13.92 b
0 / 100	5.85 c	3.92 c	2.06 c	11.83 c
50 / 50	5.58 c	4.69 b	3.38 a	13.65 b
50 / 100	6.86 b	5.64 a	2.60 b	15.10 a
100 / 100	7.98 a	5.62 a	3.13 a	16.74 a
CV%	9.43	9.42	8.48	7.64
Means	6.41	5.06	2.78	14.25
Nutrient concentrations in C1/C2 compartments*	Cabbage dry mass			
	Leaves	Stem	Roots	Total
%	-----g plant ⁻¹ -----			
0 / 50	30.16 c ¹	10.13 d	7.51 b	47.80 e
0 / 100	50.13 a	17.55 a	9.02 a	76.69 a
50 / 50	38.58 b	16.30 b	8.05 b	62.93 d
50 / 100	38.35 b	18.34 a	9.50 a	66.19 c
100 / 100	48.68 a	12.81 c	9.61 a	71.09 b
CV%	3.22	4.84	6.01	2.54
Means	41.18	15.02	8.74	64.94

*C1/C2: left and right sides of gullies (see Figure 1).

¹Means followed by the same letter in the column did not differ by the Scott-Knott test at p<5%.

Table 2 - Dry mass of soybean, cv. BMX Turbo RR and cabbage, cv. TOPSEED Titan plants at R6 stage and at 93 days after sowing, respectively, supplied with three nutrient concentrations in two separate compartments for root growth. São Vicente do Sul, RS, 2013.

Nutrient concentrations in C1/C2 compartments*	Soybean dry mass				
	Stem	Pod	Roots	Total	
%	-----g plant ⁻¹ -----				
0 / 50	23.57 c ¹	25.09 c	3.10 d	51.76 c	
0 / 100	37.84 a	53.09 a	3.83 c	94.75 a	
50 / 50	25.32 c	53.25 a	7.75 a	86.32 a	
50 / 100	27.26 b	54.27 a	4.88 b	86.41 a	
100 / 100	30.33 b	35.52 b	7.33 a	73.19 b	
CV%	9.82	10.73	7.81	9.53	
Means	28.87	44.24	5.38	78.49	
Nutrient concentrations in C1/C2 compartments*	Cabbage dry mass				
	Leaves	Stem	Head	Roots	Total
%	-----g plant ⁻¹ -----				
0 / 50	45.44 b ¹	19.16 b	43.38 b	9.74 c	117.73 b
0 / 100	87.36a	33.79 a	103.06 a	16.16 b	240.37 a
50 / 50	79.98a	30.58 a	99.52 a	18.34 a	228.42 a
50 / 100	78.84a	33.26 a	92.07 a	15.72 b	219.89 a
100 / 100	88.75a	33.63 a	105.84 a	19.82 a	248.04 a
CV%	8.64	9.79	6.85	7.89	6.49
Means	76.07	30.08	88.78	16.01	210.94

*C1/C2: left and right sides of gullies (see Figure 1).

¹Means followed by the same letter in the column did not differ by the Scott-Knott test at p<5%.

Table 3 - Root dry mass and grain production of soybean, cv. BMX Turbo RR and root dry mass and head fresh mass of cabbage, cv. TOPSEED Titan plants at R1 and R6 stages and at 62 and 93 days after sowing, respectively, supplied with three nutrient concentrations in two separate compartments for root growth. São Vicente do Sul, RS, 2013.

Nutrient concentrations in C1/C2 compartments*	Soybean root dry mass		Production dry mass
	R1	R6	R9
%	-----g plant ⁻¹ -----		
0	0.84 c ¹	0.65 e	29.90 b
50	1.87 a	2.44 d	
0	0.66 c	0.54 e	25.32 c
100	1.40 b	3.29 c	
50	1.64 a	3.33 c	26.89 c
50	1.74 a	4.42 a	
50	1.21 b	2.26 d	25.32 c
100	1.39 b	2.62 d	
100	1.79 a	3.79 b	34.81 a
100	1.34 b	3.54 b	
CV%	12.80	9.43	10.75
Means	1.39	2.69	28.45
Nutrient concentrations in C1/C2 compartments*	Cabbage root dry mass		Production fresh mass
	62 DAS	93 DAS	93 DAS
%	-----g plant ⁻¹ -----		
0	3.48 d ¹	4.27 e	931.00 c
50	4.03 d	5.47 d	
0	2.38 e	1.99 f	2170.67 b
100	6.64 a	14.17 a	
50	4.15 d	10.17 b	2159.00 b
50	3.89 d	8.17 c	
50	4.22 d	7.72 c	2047.33 b
100	5.28 c	7.99 c	
100	5.97 b	13.13 a	2361.33 a
100	3.63 d	6.96 c	
CV%	10.25	9.62	16.84
Means	4.37	8.00	1933.87

*C1/C2: left and right sides of gullies (see Figure 1).

¹Means followed by the same letter in the column did not differ by the Scott-Knott test at p<5%.

Table 4 - Mean values of Electrical Conductivity (EC) and (pH) throughout the crop cycle. São Vicente do Sul, RS, 2013.

Nutrient concentrations in C1/C2 compartments*	Soybean		Cabbage	
	EC	pH	EC	pH
%	dS m ⁻¹		dS m ⁻¹	
0 / 50	0.23 / 0.93	7.51 / 6.98	0.63 / 0.90	7.20 / 6.78
0 / 100	0.38 / 1.90	7.44 / 6.71	0.62 / 1.65	7.05 / 6.28
50 / 50	0.98 / 1.06	6.84 / 7.01	0.87 / 0.88	6.54 / 6.55
50 / 100	1.24 / 1.97	7.10 / 7.11	1.07 / 1.76	6.30 / 5.98
100 / 100	2.72 / 2.66	6.87 / 6.77	1.79 / 1.83	6.03 / 5.99

*C1/C2: left and right sides of gullies (see Figure 1).

ARTIGO 2: Concentração de nutrientes e volume do meio radicular no crescimento da planta e produção da soja

Concentração de nutrientes e volume do meio radicular no crescimento da planta e produção da soja

Rodrigo dos Santos Godoi²; Jerônimo Luiz Andriolo¹;

Resumo

O objetivo deste trabalho foi testar o crescimento e a produção de grãos de plantas de soja cultivadas com dois volumes de meio radicular e duas concentrações de nutrientes. O experimento foi conduzido entre 12 de novembro de 2014 e 13 de março de 2015, no interior de uma estufa de polietileno no Instituto Federal Farroupilha - São Vicente do Sul. Plantas de soja, cv. BMX Turbo RR, foram cultivadas em vasos de 0,4 dm³ (V1) e 3,0 dm³ (V2) e fertirrigadas diariamente com uma solução nutritiva (SN) completa na concentração normal (C2) e diluída a 20% (C1), em um arranjo fatorial 2 x 2 com delineamento inteiramente casualizado e cinco repetições. Houve interação entre as concentrações da solução nutritiva e os volumes dos vasos no crescimento da planta, com exceção da produção de grãos, a qual não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. As plantas que mais apresentaram abortamento de vagens foram àquelas crescidas na concentração C2 para ambos os tamanhos de vasos. O número total de grãos foi maior na combinação C2V2, mas foi menor o tamanho dos grãos. Concluiu-se que o confinamento das raízes das plantas de soja regularmente supridas por água e nutrientes reduz o crescimento da planta, mas não afeta de forma significativa a produção de grãos. A concentração elevada de nutrientes compensa parcialmente a redução do crescimento das raízes por efeito do confinamento.

Palavras-chave: *Glycine max*, adubação, nutrição mineral, partição de massa seca.

¹ Instituto Federal Farroupilha, Campus de São Vicente do Sul, 97420-000, Rua 20 de Setembro, nº 2616, São Vicente do Sul, RS, Brasil. E-mail: rodrigo.godoi@iffarroupilha.edu.br. Autor para correspondência.

² Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Fitotecnia, Avenida Roraima, CEP 97105 800, nº 1000, Santa Maria, RS, Brasil, E-mail: jerônimo@pq.cnpq.br.

Abstract

The goal of this research was to test growth and grain production of soybean plants grown under two root medium volume and two nutrient concentration. The experiment was conducted from November 12, 2014 to March 13, 2015 inside a polyethylene greenhouse at IFF São Vicente do Sul. Soybean plants, cv. BMX Turbo RR, were grown in 3.0 dm³ (V2) and 0.4 dm³ (V1) pots and daily fertigated with a nutrient solution at 100% (C2) and 20% (C1) concentration. It was used an entirely randomized 2 x 2 factorial experimental design with five replications. Interactions among nutrient concentrations and pots volumes on plant growth were recorded, without significant effects on grain production. Higher pod absorption was recorded on plants supplied with the higher nutrient concentration (C2). Higher number of grains was recorded on C2V2 plants, but the size of grains was lower. It was concluded that root confinement of soybean plants regularly supplied with water and nutrients reduces plant growth but grain production was not significantly affected. High nutrient concentration can partially compensate the reduction on root growth by effect of root confinement.

Key words: *Glycine max.* fertilization, mineral nutrition, dry mass partitioning.

INTRODUÇÃO

O sistema de plantio direto no qual não se revolve o solo tem sido tema de pesquisas em vários países. Os benefícios principalmente na redução dos processos erosivos do solo são claramente apresentados em trabalhos que compararam esse sistema de cultivo ao sistema convencional (Bertol et al. 1997; De Maria et al. 1999). No entanto, diversos trabalhos (Rosolem et al. 1994; Müller et al. 2001; Silva and Rosolem 2002; Foloni et al. 2006; Silva et al. 2014) vêm demonstrando que uma das principais consequências do sistema de plantio direto é a formação de uma camada de compactação subsuperficial em decorrência principalmente do tráfego de máquinas pesadas. Dependendo do seu grau de impedância, a compactação pode limitar o crescimento das raízes e até impedir o seu aprofundamento no perfil do solo. Esse fato pode provocar o confinamento das raízes na camada superficial do solo, com modificações na arquitetura e na morfologia das raízes e também redução do crescimento do sistema radicular, da parte aérea e da produção de grãos.

Em plantas jovens de soja cultivadas em vasos com quatro níveis de compactação de solo Rosolem et al. (1994), observaram aos 37 dias após a emergência que a compactação diminuiu o crescimento das raízes e da parte aérea. Também observaram que, com exceção do nitrogênio, não houve grandes modificações na composição nutricional da planta de soja em função da compactação do solo. Os resultados de Silva et al. (2014), aos 60 dias após a emergência, mostraram que o aumento da compactação de uma camada intermediária no perfil do solo reduziu a macroporosidade e a porosidade de aeração e aumentou a resistência à penetração das raízes de plantas de soja. Houve redução da altura das plantas, da massa seca da parte aérea e das raízes. O crescimento das raízes concentrou-se na camada superior até o grau de 95% de compactação, com diminuição da evapotranspiração da cultura. Em plantas de inverno (ervilhaca, nabo forrageiro, tremoço branco, aveia preta e aveia branca), Müller et al. (2001) mostraram redução do crescimento radicular pela compactação subsuperficial do solo. Apenas para Aveia preta e Tremoço branco não foi observada influência na produção de massa seca da parte aérea das plantas.

Uma das conclusões desses autores foi que o confinamento do sistema radicular na camada superficial do solo provocado por restrições ao aprofundamento das raízes nas camadas inferiores deixa a planta dependente da disponibilidade de água e nutrientes na camada superficial. No entanto, esses trabalhos não separam os efeitos das condições físicas do solo decorrentes da compactação daqueles relacionados com a concentração de nutrientes e com a disponibilidade de água. Há resultados na literatura com outras espécies indicando que esses dois últimos fatores também interferem no crescimento das raízes (Yin and Schapendonk 2004; Silva et al. 2008; Kerbiriou et al. 2013; Cardoso et al. 2015). Outra limitação daqueles trabalhos é que os resultados foram obtidos durante apenas uma parte do período de crescimento e desenvolvimento das culturas. Resultados obtidos em populações de plantas cultivadas durante todo o período de crescimento e desenvolvimento não foram encontrados na literatura.

O objetivo deste trabalho foi testar o crescimento e produção de grãos de plantas de soja cultivadas com dois volumes de meio radicular e duas concentrações de nutrientes a fim de inferir se os efeitos negativos do confinamento podem ser compensados por uma maior concentração de nutrientes.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido entre 12 de novembro de 2014 e 13 de março de 2015, no interior de uma estufa de 500 m², coberta com filme de polietileno de 150 µm, no Setor de Agricultura I do *Campus* de São Vicente do Sul do Instituto Federal Farroupilha. O clima da região é subtropical úmido, do tipo Cfa, segundo Köppen e Geiger (Alvares et al. 2014), com precipitação e temperatura média anuais de 1.685 mm e 19,3 °C, respectivamente.

Como material vegetal foi utilizado plantas de soja *Glycine max*, cultivar BMX Turbo RR, ciclo superprecoce (média de 120 dias), ciclo de maturação 5,8; hábito de crescimento indeterminado (Lazarotto 2016). Sementes de soja foram inoculada com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* no dia da sementeira, realizada diretamente em vasos de polipropileno no dia 12 de novembro de 2014, com duas sementes por vaso na profundidade de 0,02 m. No dia 21 de novembro de 2014 as plântulas foram

desbastadas deixando apenas uma plântula por vaso, arranjados para uma densidade de 12,5 plantas por m².

A simulação da restrição física ao crescimento das raízes foi feita pelo confinamento em dois tamanhos de vasos com volumes de 3,0 dm³ (V2) e 0,4 dm³ (V1). Os vasos foram colocados sobre uma estrutura construída em madeira e telhas de fibrocimento a 0,50 m de altura do solo, com 3% de declividade. As telhas foram revestidas com filme plástico de 150 µm e os canais foram preenchidos com brita basáltica até formar uma superfície plana para acomodação dos vasos. Como meio de cultivo foi empregada a areia média, lavada, com densidade aparente de 1,67 kg dm⁻³ e capacidade máxima de retenção de água de 0,335 L dm⁻³, segundo metodologia descrita por ANDRIOLO (2002).

O fornecimento de água e nutrientes às plantas foi feito por meio de fitas gotejadoras, com um gotejador por vaso na vazão de 1,30 L h⁻¹, em sistema aberto de cultivo. A frequência diária das fertirrigações foi determinada com base no crescimento da planta e na demanda evapotranspiratória da atmosfera, de forma a suprir as necessidades diurnas de água das plantas, com um coeficiente de drenagem de 30% (Pardossi et al. 2011). Foram feitas três fertirrigações por dia durante 10 minutos da semeadura até o 20º dia após (DAS). Posteriormente, foram feitas sete vezes por dia durante 10 minutos, até o final do experimento. A solução nutritiva (SN) foi fornecida com a seguinte composição, em mmol L⁻¹: 8,69 de N-NO₃⁻, 1,86 de N-NH₄⁺, 4,0 de H₂PO₄⁻, 1,0 de SO₄⁻, 6,0 de K⁺, 2,0 de Ca²⁺ e 1,0 de Mg²⁺. Os micronutrientes foram fornecidos nas concentrações de, em mg L⁻¹, 0,03 de Mo; 0,26 de B; 0,06 de Cu; 0,50 de Mn; 0,22 de Zn. O ferro foi fornecido separadamente, na concentração de 1,0 mg L⁻¹ na forma quelatizada. Foi utilizado para cada concentração de solução nutritiva um reservatório de fibra de vidro, com capacidade para 2000 L. As soluções, a partir desse reservatório, foram injetadas no dispositivo supracitado por meio de motobombas elétricas de ½ CV, conectadas a mangueiras flexíveis com 0,025m de diâmetro interno. Os volumes de SN nos reservatórios principais foram completados sempre que os volumes consumidos pelas plantas atingiam 50% do volume inicial (Londero 2000). O pH foi mantido no valor obtido no momento da preparação da solução inicial, tolerando-se um desvio de 0,2 unidades, mediante adição de NaOH ou H₃PO₄ na concentração 1 molar, conforme a necessidade. A condutividade elétrica (CE) foi de 0,40 e 1,80 dS m⁻¹,

respectivamente, para a concentração 20% e 100% e foi mantida próximo ao valor inicial para cada tratamento, tolerando-se um desvio de 10%, utilizando para suas correções, água ou alíquotas de nova solução nutritiva, dependendo da necessidade.

Para as avaliações foram realizadas três coletas durante o período experimental, sendo que nas duas primeiras foram colhidas plantas inteiras, as quais foram separadas em folhas, hastes, vagens e raízes. Na última coleta, somente foram aproveitadas as sementes para determinação da produção. A primeira coleta foi realizada no estágio fenológico R1 (início do florescimento) em 04/01/2015, a segunda em R6 (pleno enchimento de grãos) em 05/02/2015 e a terceira em R9 (maturação) em 13/03/2015 (Câmara 1998a). Para a extração das raízes que cresceram em cada um dos vasos foi feita a lavagem da areia em água corrente sobre peneira de malha 0,003 m. A massa seca (MS) do material amostrado foi determinada após secagem em estufa de circulação forçada de ar a temperatura de 60°C, por 96 horas.

Os tratamentos foram arranjos em esquema fatorial 2 x 2, onde os níveis do fator principal foram os volumes V1 (0,4 dm³) e V2 (3,0 dm³) dos vasos e os níveis do fator secundário foram duas concentrações da solução nutritiva citada acima, 20% (C1) e 100% (C2), respectivamente. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com cinco repetições de uma planta. As variáveis determinadas foram submetidas à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott $p \leq 0,05$. A análise estatística foi realizada no software SISVAR (Ferreira 2000).

RESULTADOS

Houve interação entre as concentrações da solução nutritiva e os volumes dos vasos para as variáveis analisadas, com exceção da produção. Até o estágio de desenvolvimento R1, na concentração 20% (C1), as plantas de soja cresceram mais nos vasos de maior volume (V2), alcançando 21,0%, 18,2% e 20,8% acima do que nos vasos de menor volume (V1), respectivamente, para massa seca de raiz, hastes e folhas (Figura 1). No entanto, quando foram comparados os mesmos tratamentos

descritos acima, porém, na segunda data de coleta, estágio de desenvolvimento R6, a partição da matéria seca entre os órgãos foi diferente. As raízes das plantas crescidas nos vasos com V1 não mais diferiram estatisticamente das raízes crescidas nos vasos com V2. No entanto, o crescimento de nódulos foi maior nas plantas crescidas no V2 em relação àquelas do V1. O crescimento das hastes foi similar entre os dois tamanhos de vasos e houve maior crescimento de folhas e vagens nas plantas em V2, respectivamente, 15,8% e 33,2%, em relação às plantas crescidas no V1 (Figura 1).

Quando foram comparados os volumes dos vasos com a solução nutritiva mais concentrada 100% (C2) os resultados da partição da matéria seca entre os órgãos das plantas foram semelhantes aos apresentados para a C1 até o estágio de desenvolvimento R1 (Figura 2). Todavia, no estágio de desenvolvimento R6, houve maior crescimento de raízes nos vasos V1, com 15% a mais de matéria seca, em relação aos vasos V2. Porém, não houve diferença estatística no acúmulo de matéria seca de nódulos para ambos os tamanhos de vasos. O crescimento das folhas foi similar enquanto o crescimento de hastes e vagens foi maior nas plantas crescidas nos vasos V1 (Figura 2).

Embora nos vasos V2 o volume de substrato tenha sido 86,7% maior que nos vasos V1 e, portanto, a quantidade de nutrientes armazenada no meio radicular tenha sido maior, a concentração dos nutrientes em torno das raízes em ambos os vasos foi similar em V1 e V2, porque todos os vasos foram submetidos ao mesmo regime de sete fertirrigações diárias. Dessa forma, o volume de solução nutritiva retido no substrato foi renovado diariamente de forma a manter a composição da solução nutritiva sempre próxima da concentração da solução C1 ou C2 existente no respectivo reservatório de estocagem. Por isso, as diferenças no crescimento das plantas entre esses tratamentos não podem ser atribuídas a uma concentração diferente de nutrientes em torno das raízes nos dois tamanhos de vasos.

Ao comparar o efeito das concentrações da solução nutritiva C1 e C2 nas plantas crescendo nos vasos V1 (Figura 3), observou-se que a C1 aumentou aproximadamente 24% o crescimento radicular em relação a C2 até o estágio de desenvolvimento R1. Porém, esse maior crescimento de raízes na C1 não foi suficiente para proporcionar maior crescimento da parte aérea, de maneira que as

plantas crescidas nessa concentração foram as que menos acumularam matéria seca nas hastes e nas folhas. No entanto, no estágio de desenvolvimento R6, o maior acúmulo de matéria seca de raízes se deu na C2, diferindo estatisticamente da C1. Todavia a C1 estimulou o crescimento de nódulos, o qual foi 92,1% maior do que nas plantas com C2. Para a matéria seca da parte aérea as plantas crescidas com a C2 foram superiores àquelas que cresceram com a C1 em 53,7%, 50,7% e 34,6%, respectivamente, para hastes, folhas e vagens. Nesse caso, as plantas crescidas na C2 foram aproximadamente 45% maiores que aquelas crescidas na C1 (Figura 3).

Ao comparar as concentrações da SN dentro do volume de vaso V2 (Figura 4), constatou-se crescimento similar das raízes até R1 em ambas as concentrações. Todavia, quando analisado o acúmulo de matéria seca na parte aérea dessas plantas foi verificado mais que o dobro no crescimento de hastes e folhas, respectivamente, 57,4% e 54,9%, na C2. Entretanto, no estágio R6, a resposta de crescimento das raízes e dos nódulos foi semelhante ao ocorrido no V1, onde, na C1 houve menor crescimento das raízes e mais nódulos em relação às plantas crescidas na C2. O crescimento da parte aérea foi maior para hastes e folhas nas plantas crescidas na C2. Porém, para vagens as plantas nessa concentração (C2) obtiveram, em média, 19,1% a menos de acúmulo de matéria seca do que as plantas que estavam na C1 (Figura 4).

Não houve diferença significativa entre a produção de grãos (Tabela 1). As plantas que mais apresentaram abortamento de vagens foram aquelas crescidas na concentração C2 para ambos os tamanhos de vasos. Foi também nessa concentração que foi obtido o maior número de vagens cheias. Todavia, o número total de grão foi maior na combinação C2V2, aproximadamente 16,7% a mais de grãos que a média das outras combinações. No entanto, foi também na combinação C2V2 que foi obtido o menor tamanho de grãos (MSG).

DISCUSSÃO

Os vasos pequenos utilizados neste experimento representam uma condição de restrição física ao crescimento das raízes similar àquela empregada em

experimentos feitos por outros autores com compactação do solo (Silva et al. 2014; Foloni et al. 2006; Silva & Rosolem 2002; Müller et al. 2001), enquanto os vasos maiores representaram uma condição de restrição baixa ou nula. Aqueles trabalhos não separam os efeitos da restrição física ao crescimento das raízes daqueles relacionados com a diminuição na disponibilidade de água às plantas por efeito da compactação do solo. Os resultados atuais são originais porque fazem essa distinção, pois todas as plantas foram igualmente supridas por água e nutrientes durante todo o período de crescimento e desenvolvimento. O fato de o presente trabalho ter sido realizado durante todo o ciclo da planta é também uma diferença importante quando relacionado aos trabalhos mencionados acima, os quais foram todos conduzidos somente em parte da fase vegetativa das plantas. Os resultados do presente trabalho demonstram que a planta responde de forma distinta aos estímulos ambientais, inclusive a concentração de nutrientes no meio radicular, quando são desenvolvidos os órgãos drenos de fotoassimilados como as sementes.

Quando foi comparado o efeito da restrição física do vaso V1 com o efeito do vaso V2, que representa uma baixa ou nula restrição física, observou-se que tanto na C1 quanto na C2 houve maior crescimento de plantas no vaso V2, em relação ao vaso V1, com distribuição da matéria seca similar entre os órgãos dessas plantas, até o estágio R1 (Figuras 1 e 2). Esses resultados podem ser comparados aos obtidos por Silva et al. (2014), nos quais, à medida que foi aumentado o grau de compactação da camada subsuperficial do solo nos vasos foi observada redução da massa seca da parte aérea e da altura das plantas. Para o crescimento das raízes, os dados obtidos no presente experimento corroboram também aqueles encontrados por Silva & Rosolem (2002) em que aos 28 dias após a semeadura, os tratamentos que tinham menor restrição física ao crescimento das raízes foram os que apresentaram maior acúmulo de massa seca das raízes. Esses resultados podem ser atribuídos ao volume do meio radicular disponível para o crescimento das raízes. Embora a concentração dos nutrientes, fornecidos pela solução nutritiva, tenha sido a mesma em ambos os volumes de vasos, tanto na C1 quanto na C2, nos vasos V2 o volume do meio radicular foi 86,7% maior e o crescimento das raízes foram 21% e 39% maior do que nos vasos V1, respectivamente, para C1 e C2. Com um volume de meio radicular mais elevado a diminuição da disponibilidade de nutrientes em torno das raízes, em função da absorção, é mais lenta, o que pode favorecer a

absorção. Como o crescimento da parte aérea e das raízes são influenciados pelo equilíbrio entre as concentrações de carbono e de nutrientes, especialmente N (Yin & Schapendonk 2004), uma concentração mais elevada de nutrientes em torno das raízes permitiria à planta prosseguir com o crescimento da parte aérea, enquanto naquelas com concentração mais diluída a taxa de crescimento seria reduzida até que fosse restabelecida a concentração de nutrientes no interior da planta. Como o período de crescimento e desenvolvimento da planta é finito porque é determinado pela duração das fases fenológicas, qualquer redução na taxa de crescimento em qualquer dessas fases implica uma redução no crescimento total da planta ao final desse período.

O padrão de partição da massa seca observado até R1 mudou nas amostragens feitas em R6, quando surgiram outros drenos de fotoassimilados. Uma observação importante nessa fase foi o efeito das concentrações de nutrientes e dos volumes dos vasos na nodulação das raízes da soja. A C2, claramente, inibiu o crescimento de nódulos, tanto no V1 como no V2, em R6 (Figuras 3 e 4). Em termos de crescimento da parte aérea, o efeito dos nódulos foi pequeno, uma vez que tanto no vaso V1, como no V2, as plantas com maior crescimento de nódulos não foram aquelas que mais cresceram, em R6 (Figuras 3 e 4). Todavia, na C1 houve crescimento similar das raízes em ambos os volumes dos vasos em R6 (Figura 1) e o maior crescimento da parte aérea nas plantas do vaso V2 com essa concentração pode ter sido induzido pelo maior crescimento dos nódulos nessas plantas. Embora a nodulação tenha afetado o crescimento da planta, não houve diferença significativa na produção de grãos entre todos os tratamentos (Tabela 1). Resultados parecidos foram encontrados por Pivetta et al. (2011), ao avaliar o crescimento e a atividade de raízes de soja, em função do sistema de cultivo com plantas de cobertura de solo no inverno e na primavera. Esses autores observaram que os tratamentos influenciaram o crescimento e a atividade das raízes da soja, porém não foi observada influência na produtividade da cultura. Uma hipótese para os resultados apresentados neste trabalho sugere que as plantas crescidas na condição similar a uma baixa fertilidade (C1) foram beneficiadas pelo maior crescimento de nódulos nos seus sistemas radiculares, que compensaram a baixa disponibilidade de nutrientes. Essa hipótese tem sustentação na literatura, a qual confirma a capacidade dos nódulos fornecerem as quantidades de N que as plantas

de soja necessitam para seu crescimento (Hungria et al. 2006). Entretanto, no presente experimento não foi somente o N que foi reduzido em C1, mas todos os nutrientes. Por isso, levanta-se a hipótese de que a nodulação possa afetar também outros processos fisiológicos da planta, de forma similar como ocorre com as micorrizas (Elbon & Whalen 2015). Pesquisas mais aprofundada são necessárias para testar essa hipótese.

A concentração mais elevada de nutrientes no vaso maior (V2) não aumentou o crescimento da planta (V2C2, Figura 2 em R6). Pelo contrário, o maior crescimento ocorreu nas plantas em V1C2. Entretanto, em ambas as situações não houve diferença na produção de grãos (Tabela 1). Alguma limitação na disponibilidade de fotoassimilados, posterior a floração, pode ter influenciado negativamente no enchimento dos grãos das plantas no vaso V1. Essa limitação não pode ser atribuída a alguma deficiência de água e de nutrientes, pois o regime de fertirrigações foi o mesmo em todas as plantas. Provavelmente, essas diferenças se devem aos mecanismos de realocação dos assimilados da parte vegetativa para os grãos. A concentração mais elevada de nutrientes pode favorecer o crescimento vegetativo (Figuras 3 e 4 em R6), diminuindo o crescimento dos grãos e retardando a maturação. Efeito semelhante foi descrito na literatura na produção de tubérculos de batata com alta disponibilidade de nitrogênio (Andriolo et al. 2006). Isso corrobora trabalhos anteriores que indicam não haver necessidade de fornecer nutrientes durante o crescimento de plantas de soja especialmente o nitrogênio (Petter et al. 2012).

Do ponto de vista da sustentabilidade da produção agrícola, os resultados indicam que as estratégias de adubação devem combinar doses moderadas de nutrientes e condições que não limitem o crescimento das raízes no perfil do solo. Essas condições seriam favoráveis também aos processos de absorção e fluxo da água na planta. Além de não haver um aumento na produção de grãos, altas doses de fertilizantes estimulam o crescimento vegetativo, podem retardar a colheita e aumentar a incidência de doenças como a ferrugem (Pinheiro et al. 2011; Doreto et al. 2012).

CONCLUSÃO

A concentração elevada de nutrientes compensa parcialmente a redução do crescimento das raízes por efeito do confinamento, quando não houver déficit hídrico significativo.

REFERÊNCIAS

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2014) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6):711-728.
- Andriolo JL (2002) *Olericultura Geral: Princípios e Técnicas*. Santa Maria: UFSM.
- Andriolo JL, Bisognin DA, Paula AL, Paula FLM (2006) Curva crítica de diluição de nitrogênio da cultivar Asterix de batata. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7):1179-1184.
- Bertol I, Cogo NP, Levien R (1997) Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 21:409-418.
- Câmara GMS (1998) Fenologia da soja. In: CÂMARA, G.M.S. *Soja: tecnologia da produção*. Piracicaba: G.M.S. CÂMARA, 1998a. p. 26-39.
- Cardoso FL, Andriolo JL, Dal Picio M, Piccin M, Souza JM (2015) Nitrogen on growth and yield of lettuce plants grown under root confinement. *Horticultura Brasileira* 33:422-427.
- De Maria IC, Castro OM, Souza Dias H (1999) Atributos físicos do solo e crescimento radicular da soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23:703-709.
- Doreto RBS, Gavassoni WL, Silva EF, Marchetti ME, Bacchi LMA, Stefanello FF (2012) Ferrugem asiática e produtividade da soja sob doses de potássio e fungicida, na safra 2007/08. *SEMINA: Ciências Agrárias* 33 (3):941-952.
- Elbon A, Whalen JK (2015) Phosphorus supply to vegetable crops from arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Biological Agriculture & Horticulture* 31 (2):73-90.
- Ferreira DF (2000) Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: 45ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP, Julho de 2000. p. 255-258.
- Foloni JSS, Lima SL, Büll LT (2006) Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30:49-57.
- Hungria M, Franchini JC, Campo RJ, Crispino CC, Moraes JZ, Sibaldelli RNR, Mendes IC, Arihara J (2006) Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contribution of biological N₂ fixation na N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science*.
- Kerbiriou PJ, Stomph TJ, Van Der Putten PEL, Lammerts Van Bueren ET, Struik PC (2013) Shoot growth, root growth and resource capture under limiting water and N supply for two cultivars of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plant Soil* 371:281-297.

- Lazarotto. 2016. Disponível em<<http://www.lazarotto.com.br/produtos/list/tipo/soja/id/36/bmx-turbo-rr.html>> Acesso em: janeiro de 2016.
- Londero FAA (2000) Reposição de nutrientes em soluções nutritivas no cultivo hidropônico da alface. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- Müller MM, Ceccon G, Rosolem CA (2001) Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 25:531-538.
- Pardossi A, Carmassi G, Diara C, Incrocci L, Maggini R, Massa D (2011) Fertigation and substrate management in closed soilless culture. *Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie, Università di Pisa, Pisa, 2011. 64p.*
- Petter FA, Pacheco LP, Neto FA, Santos GG (2012) Respostas de cultivares de soja à adubação nitrogenada tardia em solos de cerrado. *Revista Caatinga* 25:67-72.
- Pinheiro JB, Pozza EA, Pozza AAA, Moreira AS, Alves MC (2011) Severidade da ferrugem da soja em função do suprimento de potássio e cálcio em solução nutritiva. *Revista Ceres* 58 (1):43-50.
- Pivetta LA, Castoldi G, Santos GP, Rosolem CA (2011) Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília* 46 (11):1547-1554.
- Rosolem CA, Almeida ACS, Sacramento LVS (1994) Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia, Campinas* 53 (2):256-266.
- Silva RH, Rosolem CA (2002) Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37 (6):855-860.
- Silva FR, Albuquerque JA, Costa A (2014) Crescimento inicial da cultura da soja em latossolo bruno com diferentes graus de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38:1731-1739.
- Silva PAM, Pereira GM, Reis RP, Lima LA, Taveira JH (2008) Função de resposta da alface americana aos níveis de água e adubação nitrogenada. *Ciência Agrotecnologia, Lavras* 32 (4):1266-1271.
- Yin X, Schapendonk AHCM (2004) Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between roots and shoot in crop and grass plants. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 51 (4):407-426.

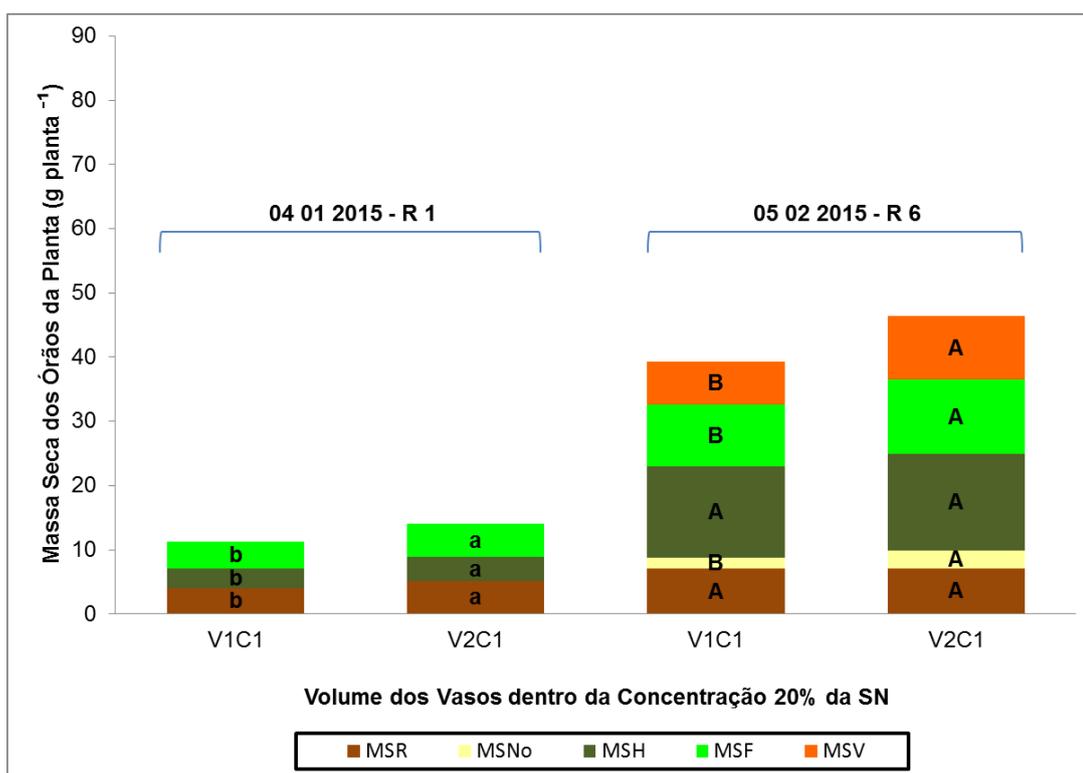


Figura 1 – Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 0,4 dm³ (V1) e 3,0 dm³ (V2) na concentração baixa de solução nutritiva (C1= 20%). (Médias seguidas de mesma letra, entre as combinações V1C1 e V2C1, minúsculas para R1 e maiúsculas para R6, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade).

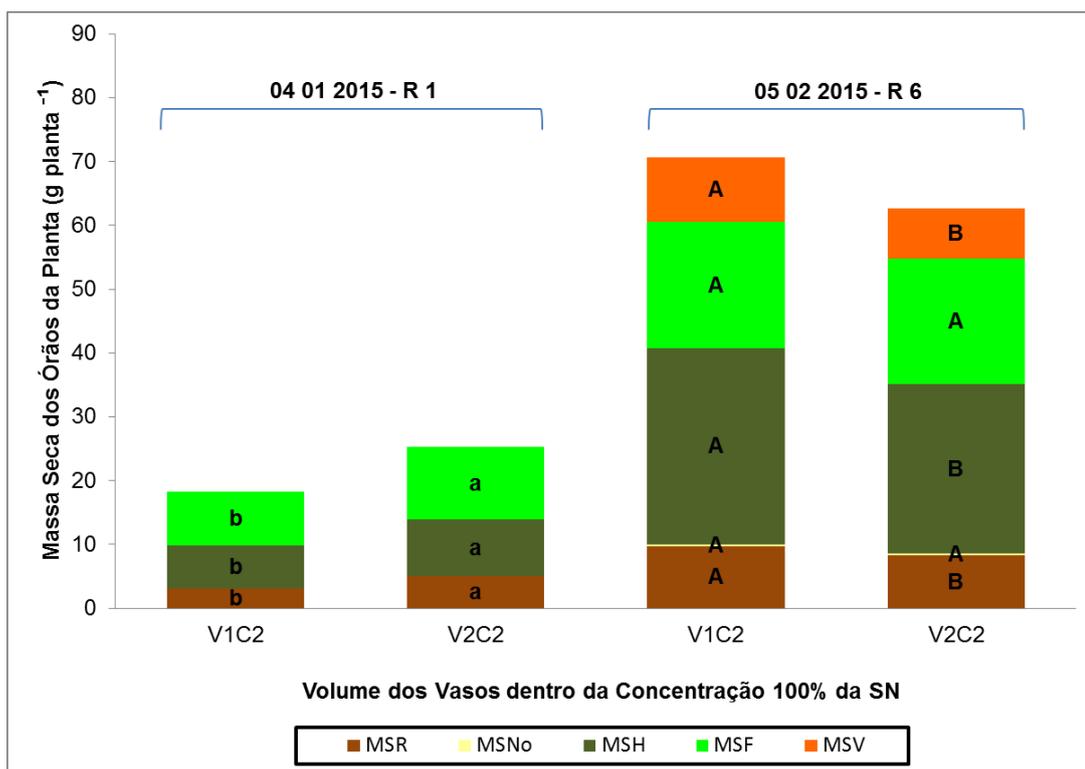


Figura 2 – Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 0,4 dm³ (V1) e 3,0 dm³ (V2) na concentração alta de solução nutritiva (C2= 100%). Médias seguidas de mesma letra, entre as combinações V1C1 e V2C1, minúsculas para R1 e maiúsculas para R6, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

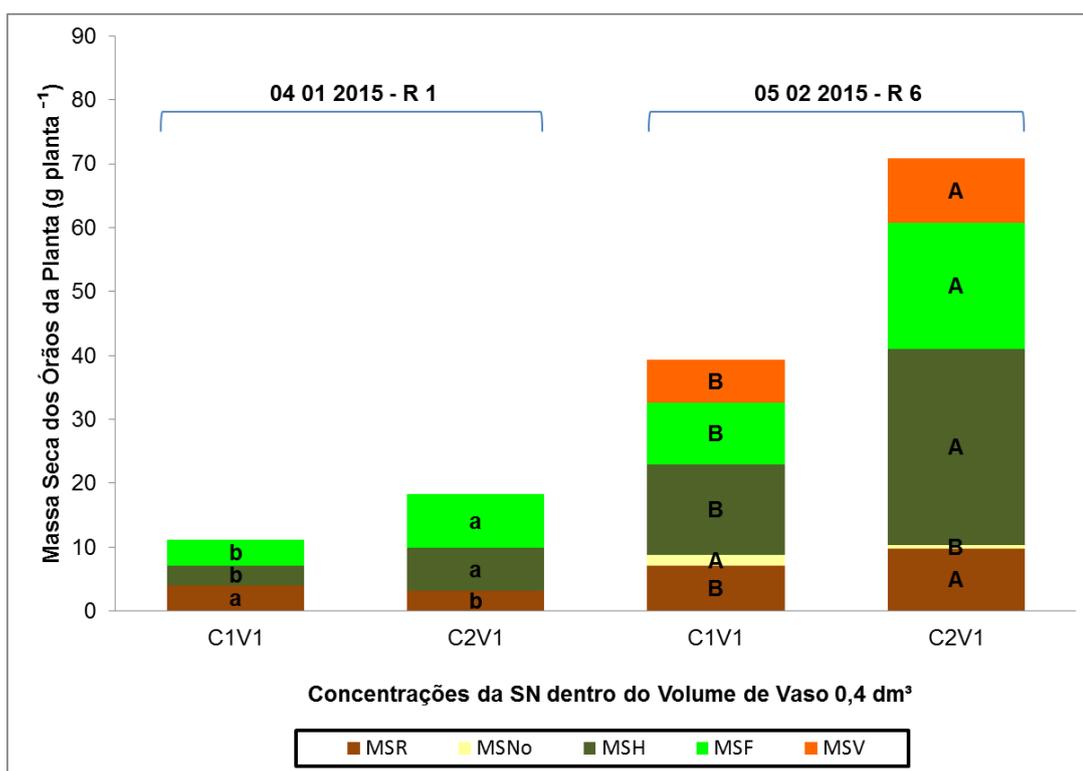


Figura 3 – Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 0,4 dm³ (V1) e concentração baixa (C1) e alta (C2) de solução nutritiva. Médias seguidas de mesma letra, entre as combinações C1 V1 e C2V1, minúsculas para R1 e maiúsculas para R6, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

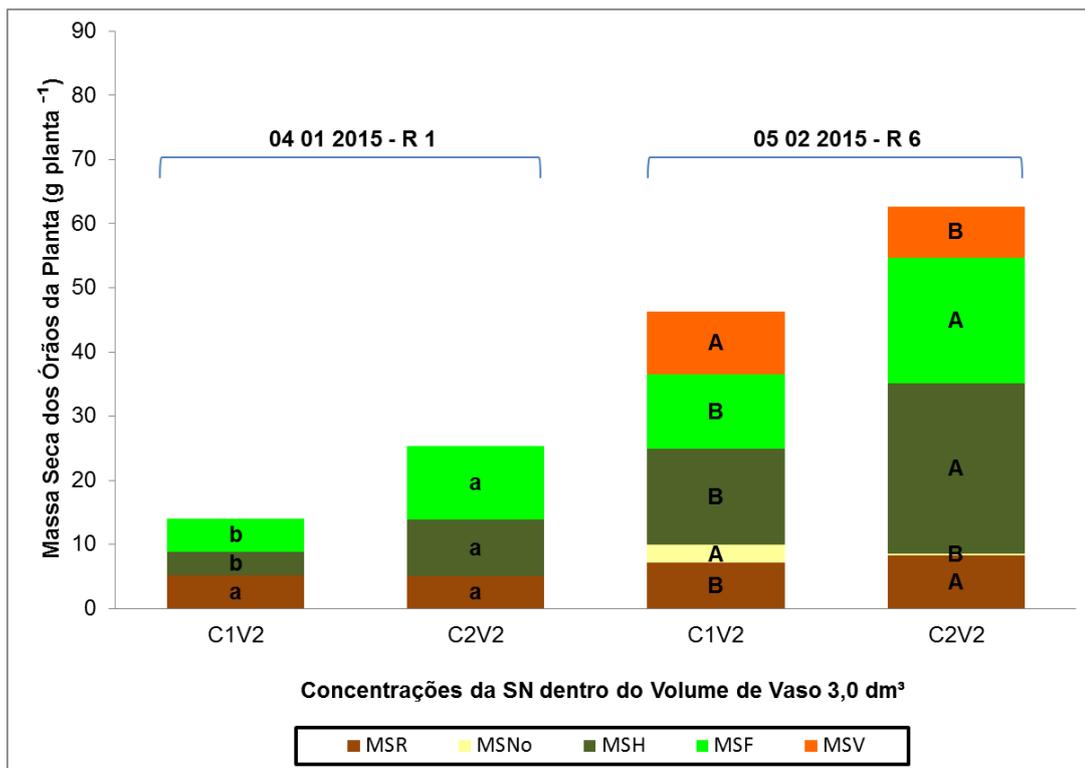


Figura 4 – Massa seca (MS) de raízes (R), nódulos (No), hastes (H), folhas (F) e vagens (V) de plantas de soja nos estádios R1 e R6 cultivadas em vasos com volume de 3,0 dm³ (V2) e concentração baixa (C1) e alta (C2) de solução nutritiva. Médias seguidas de mesma letra, entre as combinações C1 V1 e C2V1, minúsculas para R1 e maiúsculas para R6, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 1 – Número (N) de vagens abortadas (VAb), vagens cheias (VCh), total de grãos (TG), massa seca (MS) dos grãos (G) e produção de grãos (Produção) de soja, cultivar BMX Turbo RR.

Concentração x volume dos Vasos	Componentes do Rendimento				
	NVAb	NVCh	NTG	MSG	Produção
				g	g planta ⁻¹
C1V1	12 c	63 b	131 b	0,0842 a	11,03 a ^(*)
C2V1	20 b	68 a	147 a	0,0798 b	11,69 a
C1V2	07 d	54 b	127 b	0,0900 a	11,42 a
C2V2	34 a	73 a	162 a	0,0764 b	12,36 a
Média Geral	18,25	64,45	141,75	0,0826	11,62
CV%	17,69	11,25	8,60	5,98	8,74

^(*) Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade.

C1 e C2: 20% e 100% da concentração da solução nutritiva.

V1: 0,4 dm³ e V2: 3,0 dm³ de volume dos vasos.

DISCUSSÃO GERAL

Um dos pontos importantes do presente trabalho foi mostrar que plantas com hábitos de crescimento distintos, como a soja e o repolho, têm diferentes respostas de crescimento radicular à concentração e posição dos nutrientes no meio de cultivo e que essas respostas podem ser diferentes quando as plantas são submetidas a uma condição de restrição física ao crescimento das raízes. Para a soja, se a raiz estiver em uma condição de meio radicular onde a diferença de concentração de nutrientes entre dois pontos for grande, as raízes tendem a crescer na direção dos nutrientes e não aleatoriamente em qualquer direção. Essa situação foi aquela das calhas 0/100 do primeiro artigo e representa uma condição real de lavoura onde os nutrientes são aplicados na linha de semeadura em um solo de baixa fertilidade. No entanto, quando a diferença de concentração de nutrientes entre dois pontos for menor, como aquela das calhas 0/50, há um maior crescimento das raízes do que quando a diferença for grande 0/100. Isso ocorreu até a fase R1 (Tabela 3, Experimento 1). Porém, em R6 o maior crescimento radicular continua sendo direcionado para os pontos de maior concentração de nutrientes, no entanto, o maior acúmulo de massa seca de raízes se dá na condição de maior concentração de nutrientes (0/100) (Tabela 3, Experimento 1). Esse fato pode ser entendido como uma resposta de equilíbrio dinâmico entre parte aérea e raiz, já que, nessa condição experimental a parte aérea das plantas foi maior também na calha de maior concentração (Tabela 2, Experimento 1). Quando a diferença de concentração entre dois pontos for menor ou inexistente, caso das calhas 50/100, 50/50 e 100/100, predominou o crescimento radicular distribuído de forma similar entre ambos os lados das calhas (Tabela 3, Experimento 1). Essas situações podem ser comparadas a condições de solo das lavouras. Em solos de fertilidade média em que os fertilizantes forem distribuídos de maneira uniforme, pode-se esperar um crescimento mais uniforme das raízes, mesmo variando as doses aplicadas (Tabela 2, Experimento 1).

O Experimento 2 introduziu o confinamento das raízes na seqüência do experimento anterior. Na Figura 4 do Experimento 2 está descrito o crescimento das plantas de soja em R1 e R6 na condição sem restrição física ao crescimento radicular combinada com duas concentrações de nutrientes no meio de cultivo, 20% (C1V2) e 100% (C2V2) da solução nutritiva. Esses tratamentos podem ser

comparados, respectivamente, às combinações 50/50 e 100/100 das calhas do primeiro experimento. Neste caso, pode ser observada semelhança no crescimento tanto da parte aérea como de raízes nas plantas de ambos os experimentos. Até R1, não houve diferença significativa no crescimento radicular para as calhas 50/50 e 100/100 (Tabela 1, Experimento 1). No entanto, para o crescimento da parte aérea houve maior acúmulo de massa seca nas plantas crescidas na calha 100/100. Resultados idênticos são descritos na Figura 4 do Experimento 2, durante o mesmo estágio de desenvolvimento da soja. Este fato reforça o grau de confiança dos dados do presente trabalho. Quando ambas as concentrações do Experimento 2 foram fornecidas em uma condição de limitação física ao crescimento radicular (vaso de $0,4 \text{ dm}^{-3}$), tratamentos denominados C1V1 e C2V1, foi observada resposta diferente as dos tratamentos sem restrição física apenas no crescimento das raízes, onde no tratamento com a C2 as raízes cresceram menos do que no tratamento com a C1 (Figura 3, experimento 2). Se for feita uma comparação dos tratamentos com restrição física C1V1 e C2V1 (Figura 3, Experimento 2), respectivamente, aos tratamentos representados pelas calhas 0/50 e 0/100 (Tabela 3, Experimento 1), poderá ser levantada a hipótese de que quando um solo de baixa fertilidade for adubado na linha de semeadura, essa forma de adubação pode provocar uma limitação química ao crescimento das raízes de soja, semelhante às limitações físicas impostas por solos compactados. Essa hipótese tem como base a semelhança nas respostas de crescimento da soja nos tratamentos citados acima. Na Figura 3 do Experimento 2, até R1, houve maior crescimento das raízes na C1 do que na C2. Na Tabela 3 do Experimento 1, ao comparar o crescimento das raízes de soja do lado 50% da calha 0/50 com o crescimento das raízes no lado 100% da calha 0/100, poderá ser observado 25% a mais de crescimento radicular no lado de menor concentração de nutrientes. Esse resultado é semelhante ao apresentado no exemplo anterior do Experimento 2. Se as mesmas situações forem comparadas, porém, no estágio R6, será confirmado que o maior crescimento de raízes ocorreu no lado de maior concentração para ambos os experimentos, C2V1 e calha 0/100. A maior concentração de nutrientes, mesmo em situação de confinamento radicular, estimula o crescimento da parte aérea, a qual por consequência aumenta a transpiração, exigindo assim um sistema radicular mais robusto para absorver água e atender a demanda transpiratória da planta.

O repolho, hortaliça colhida ainda na fase vegetativa, apresentou resposta diferente da soja para os mesmos tratamentos. Por exemplo, até os 62 DAS houve apenas direcionamento do crescimento radicular na calha de maior diferença de concentração de nutrientes 0/100 (Tabela 3, Experimento 1). Na calha 0/50 não houve diferença significativa de crescimento das raízes em ambos os lados. Este fato foi, também, observado no momento da colheita aos 93 DAS, com uma pequena diferença no crescimento das raízes na calha 0/50 (Tabela 3, Experimento 1). Quando foi feita a comparação do crescimento radicular nas calhas com menor diferença de concentração de nutrientes entre ambos os lados, observou-se que apenas na calha 50/50 aos 62 DAS e na calha 50/100 aos 93 DAS houve crescimento similar das raízes entre um lado e o outro da calha. Para as outras calhas e épocas de avaliações o crescimento foi aleatório para um ou para outro lado das respectivas calhas. Esses resultados indicam que diferentes plantas podem apresentar respostas diferenciadas e que práticas de manejo da adubação não podem ser generalizadas.

Em um cenário de mudanças climáticas, deficiências e excessos de água são comuns, muitas vezes ambos acontecendo dentro de um mesmo período de cultivo. Em períodos em que ocorre o fenômeno El Niño é elevado o índice pluviométrico e os volumes de água no solo mantêm-se também elevados. Nesse caso, é baixa a necessidade de crescimento radicular uma vez que a água absorvida pelas raízes é facilmente repostada pelas frequentes chuvas. Nesta situação, o ideal seria fornecer os nutrientes pela adubação na linha de semeadura, pois assim, o efeito da lixiviação seria minimizado uma vez que a área de contato da água com os nutrientes seria menor. No entanto, pôde ser observado no presente trabalho que a disposição dos nutrientes em um ponto específico do solo direciona e reduz o crescimento radicular (respectivamente, Tabelas 3 e 2, Experimento 1). Assim, no caso de lavouras em crescimento em que um período com elevada disponibilidade de água seja interrompido e seguido por outro período com restrição de água, o impacto negativo sobre o crescimento e a produção poderão ser alto. A elevada disponibilidade de água combinada com a concentração dos nutrientes em um ponto restrito do solo reduz o crescimento radicular, deixando as plantas mais vulneráveis ao estresse de água. Dessa forma, é recomendável a distribuição uniforme dos fertilizantes no solo. Essa mesma conclusão aplica-se nos períodos em que ocorre o fenômeno La Niña,

quando predomina a restrição de água durante todo o período de crescimento e desenvolvimento da lavoura.

CONCLUSÃO GERAL

O crescimento das raízes de plantas de soja e repolho é direcionado à concentração mais elevada de nutrientes no meio radicular e quando as quantidades fornecidas de nutrientes são suficientes para atingir aquelas extraídas pelas plantas, o crescimento máximo poderá ser esperado, independentemente da posição dos nutrientes no meio radicular. O confinamento das raízes das plantas de soja regularmente supridas por água e nutrientes reduz o crescimento da planta, mas não afeta de forma significativa a produção de grãos. A concentração elevada de nutrientes compensa parcialmente a redução do crescimento das raízes por efeito do confinamento.

REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.

ALVARENGA, M. A. R. **Tomate: produção em campo, casa de vegetação e hidroponia**. 2. ed. rev. e ampl. – Lavras: Editora Universitária de Lavras, 2013. 455 p.

AUNG, L. H. Root-shoot relationships. In: Carson, E. W. The plant root and its environment. Proceedings of an institute sponsored by the Southern Regional Education Board, 1971, Charlottesville, Virginia. **Proceedings...** Charlottesville: The University Press of Virginia, 1974, p. 29-62.

AVALHÃES, C. C.; PRADO, R. M.; ROMUALDO, L. M.; ROZANE, D. E.; CORREIA, M. A. R. Omissão de macronutrientes no crescimento e no estado nutricional de plantas de repolho cultivado em solução nutritiva. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 25, p. 21-28, 2009)

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.687-694, 1999.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v.41, p.341-358, 1990.

BENGOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; McKENNA, S. J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p. 437-447, 2006.

BERNARDI, A. C. C.; CARMELLO, Q. A. C. C.; CARVALHO, S. A. Desenvolvimento de mudas de citros cultivadas em vaso em resposta à adubação NPK. **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 4, p. 733-738, 2000.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 409-418, 1997.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Esalq, 1997. 132p.

CARDOSO, F. L. **Nitrogênio no crescimento e produtividade de plantas de alface cultivadas em confinamento radicular**. 2012. 37 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2012.

CARVALHO, C. G. P.; ARIAS, C. A. A.; TOLEDO, J. F. F.; ALMEIDA, L. A.; KIIHL, R. A. S.; OLIVEIRA, M. F.; HIROMOTO, D. M.; TAKEDA, C. Proposta de classificação dos coeficientes de variação em relação à produtividade e altura da planta de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 187-193, 2003.

CARVALHO FILHO, A.; CENTURION, J. F.; DA SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; CARVALHO, L. C. C. Métodos de preparo do solo: Alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 229-237, 2007.

COMETTI, N. N.; MATIAS, G. C. S.; ZONTA, E.; MARY, W. FERNANDES, M. Efeito da concentração da solução nutritiva no crescimento da alface em cultivo hidropônico-sistema NFT. **Revista Horticultura Brasileira**, v. 26, p. 262-267, 2008.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento - Monitoramento da safra brasileira de grãos. – v.1, n. 9, (2013-2014) – Brasília, Junho de 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em: 12 abr. 2015.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 20 set. 2015.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular da soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 703-709, 1999.

DE NISI, P.; VIGANI, G.; DELL'ORTO, M.; ZOCCHI, G. Application of the Split root technique to study iron uptake in cucumber plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 57, p. 168-174, 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **A soja no Brasil**. Sistema de produção, n. 1. 2004. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoj/SojanoBrasil.htm>>. Acesso em: 20 set. 2015.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Plantio direto**. In: PRODUÇÃO de milho. Guaíba. Agropecuária, 2000, p. 108-116.

FAOSTAT – **FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 20 set. 2015.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: Fernandez, M. S., ed. **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-152.

FERREIRA, R. L. F.; ARAÚJO NETO, S. E.; SILVA, S. S.; ABUD, E. A.; REZENDE, M. I. F. L.; KUSDRA, J. F. Combinações entre cultivares, ambientes, preparo e cobertura do solo em características agrônômicas de alface. **Horticultura Brasileira**, v. 27, p. 383-388, 2009.

FITTER, A. H. Characteristics and functions of root systems. In: Waisel, Y., Eshel, A., Kafkafi, U. **Plant Roots: The hidden half**. New York, Marcel Dekker, 1991, p. 3-24.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura**: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 421 p, 2008.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**: o estudo do que está por trás do que se vê. Passo Fundo: UPF, 2004. 536 p.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 49-57, 2006.

FRACARO, A. A.; PEREIRA, F. M. Distribuição do sistema radicular da goiabeira 'Rica' produzida a partir de estaquia herbácea. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, p. 183-185, 2004.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho: II., intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 805-818, 2009.

GAUDÊNCIO, C.; GAZZIERO, D. L. P.; JASTER, F.; GARCIA, A.; WOBETO, C. **População de plantas de soja no sistema de semeadura direta para o centro-sul do Estado do Paraná**. Londrina: Centro Nacional de Pesquisa de Soja, 1990. (Comunicado técnico, 47).

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 477-484, 2004.

GILIOLI, J. L. **Agricultura tropical: desafios, perspectivas e soluções**. Brasília: ABCSB, 2000, 128 p.

GREGORY, P. J. **Crecimiento y funcionamiento de las raíces**. In: WILD, A. (Coord.). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. p.121-175.

GREGORY, P. J. Root growth and activity. In: **Physiology and determination of crop yield**. 1994. cap. 4, p. 65-93.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil Tillage Research**, v. 61, p. 133-142, 2001.

HOLLAND, J. M. **The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe**: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.103, p.1-25, 2004.

IERSEL, M. V. Root restriction effects on growth and developments of salvia (*Salvia splendens*). **HortScience**, v. 32, p. 1186-1190, 1997.

IQBAL, T. A Split-root experimente shows that translocated phosphorus does not alleviate aluminium toxicity within plant tissue. **Plant Soil**, v. 384, p. 21-36, 2014.

KIRKHAM, M. B. Physical model of water in a Split-root-system. **Plant and Soil**, v. 75, p. 153-168, 1983.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Crescimento radicular e aéreo do milho em vasos em função do nível de fósforo no solo e da localização do adubo fosfatado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 403-408, 1995.

LANA, M. C.; CZYCZA, R. V.; ROSSET, J. S.; FRANDOLOSO, J. F. Maize nitrogen fertilization in two crop rotation systems under no-till. **Revista Ceres**, v. 60, p. 852-862, 2013.

LÉDO, F. J. S.; SOUSA, J. A. de; SILVA, M. R. da. Avaliação de cultivares e híbridos de repolho no Estado do Acre. **Horticultura Brasileira**, v. 18, p. 138-140, 2000.

LIMA, C. L. R.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Least limiting water range and degree of compactness of soils under no-tillage. **Bioscience Journal**, v. 31, p. 1071-1080, 2015.

MARCHIORI, L. F. S.; CAMARA, G. M. S.; PEIXOTO, C. P.; MARTINS, M. C. Desempenho vegetativo de cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] em épocas normal e safrinha. **Scientia Agricola**, v. 56, p. 383-390, 1999.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants** New York: Academic Press, 1995. 889p.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 2006. 69 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2006.

MELO, P. C. T.; VILELA, N. J. **Importância da cadeia produtiva brasileira de hortaliças**. Reunião Ordinária da Câmara Setorial da Cadeia 13. Produtiva de Hortaliças/MAPA. Brasília. 11 p. 2007. Disponível em: <www.abhorticultura.com.br/downloads/cadeia_produtiva.pdf>. Acesso em: 22 set. 2012.

MISSÃO, M. R. Soja: origem, classificação, utilização e uma visão abrangente do mercado. **Maringá Management: Revista de Ciências Empresariais**, v. 3, p. 7-15, 2006.

MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. Campinas: Ed. ITAL, 1981.

MORAIS, A. A. C.; SILVA, A. L. **Soja: suas aplicações**. Rio de Janeiro: MEDSI, 1996, p. 259.

MÜLLER, M. M.; CECCON, G.; ROSOLEM, C. A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 531-538, 2001.

NESMITH, D. S.; DUVAL, J. R. The effect of container size. **Hort Technology**, v. 8, 1998.

NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; TAVARES FILHO, J.; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey oxisols in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.71, p.109-119, 2003.

PEREIRA, M. H. O sistema de plantio direto na palha 25 anos de sua adoção no Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 1998, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 1998. p.1-7.

PREVEDELLO, J.; VOGELMANN, E. S.; KAISER, D. R.; FONTANELA, E.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Agregação e matéria orgânica de um argissolo sob diferentes preparos do solo para plantio de Eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, p. 149-158, 2014.

PRADO, R de M.; ROQUE, C.G.; SOUZA, A.M. Sistemas de preparo e resistência a penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1795-1801, 2002.

RAVEN, P. H. **Biologia vegetal**. Reimpressão - Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2011.

ROBBINS, N. S.; PHARR, D. M. Effect of restricted root growth on carbohydrate metabolism and whole plant growth of *Cucumis sativus* L. **Plant Physio**, v. 87, p. 409-413, 1988.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia*, Campinas, v. 53, n. 2, p. 256-266, 1994.

SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PAIS, P. S. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes métodos de controle de plantas invasoras, na cultura cafeeira. **Coffee Science**, v. 5, p. 123-136, 2010.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; CASTRO, R. L.; VERDI, A. C.; VARGAS, A. M.; BIAZUS, V. Avaliação de trigo para grãos e duplo propósito, sob plantio direto. **Agrária – Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, p. 43-48, 2015.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; REIS, M. S. Melhoramento da Soja. In: BORÉM, A.(Ed.). **Melhoramento de Espécies Cultivadas**. 2ª Ed. Viçosa: Editora UFV, 969 p., 2005.

SILVA, F. A.; FREITAS, F. C. L.; ROCHA, P. R. R.; CUNHA, J. L. X. L.; DOMBROSKI, J. L. D.; COELHO, M. E. H.; LIMA, M. F. P. Milho para ensilagem cultivado nos sistemas de plantio direto e convencional sob efeito de veranico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, p. 327-340, 2015.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1731-1739, 2014.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 855-860, 2002.

SILVA JÚNIOR, A. A.; YOKOYAMA, S. Repolho: novas cultivares de verão. **Agropecuária Catarinense**, v. 1, p. 47-49, 1988.

SOARES, A. L.; CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; ANDRADE, D. M.; SOARES, L. H.; SILVA, J. O.; TEIXEIRA, W. F.; CANEDO, S. C. Avaliação de um sistema de raízes divididas de tomateiro cultivado em sistema hidropônico. **Cerrado Agrociências**, v. 1, p. 06-13, 2010.

TABALDI, L. A. **Avaliação bioquímica-fisiológica de clones de batata em relação ao alumínio**. 2008. 181 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TIVELLI, S. W.; PURQUERIO, L. F. V. Repolho (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.). 2015. Disponível em: <<http://www.abhorticultura.com.br/news/Default.asp?id=4198>>. Acesso em: 25 set. 2015.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa CNPSo, 1999. 58p. (Embrapa-CNPSo. Circular técnica, 23).

TRAJANO, M. A. B.; KASUYA, M. C. M.; TÓTOLA, M. R.; BORGES, A. C.; NOVAIS, R. F. Suprimento de fósforo e formação de micorrizas em mudas de eucalipto em sistema de raízes divididas. **Revista Árvore**, v. 25, p. 193-201, 2001.

VALDEZ, V. S. **Cultivo de Repollo**. Boletim Técnico n.18, Fundacion de Desarrollo Agropecuario, Inc., Nov. 1993.

VASCONCELOS, A. C. M. O sistema radicular da cana-de-açúcar e a expressão do potencial de produção. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 21, p. 20, 2002.

VEPRASKAS, M. J. **Plant response mechanisms to soil compaction**. In: WILKINSON, R.E. Plant environment interactions. New York: M. Dekker, 1994. p. 263-287.

VOSE, P. B. Differences in plant nutrition. *Herbage Abstracts*, **Farnham Royal**, v.33. p. 1-13, 1963.

ZONTA, E.; BRASIL, F. C.; GOI, S. R.; ROSA, M. M. T. **O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico**. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). *Nutrição mineral das plantas*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p 7-52.

WITT, H.H. Root growth of trees as influenced by physical and chemical soilfactors. **Acta Horticulturae**, n.450, p. 205-214, 1997.

YOKOMIZO, G. K.; DUARTE, J. B.; VELLO, N. A. Correlações fenotípicas entre tamanho de grãos e outros caracteres em topocruzamentos de soja tipo alimento com tipo grão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2235-2241, 2000.