

**Efeito do estresse hídrico e
variabilidade genética na
arquitetura da raiz de soja**



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 12

Efeito do estresse hídrico e variabilidade genética na arquitetura da raiz de soja

*Sergio Luiz Gonçalves
Alexandre José Cattelan
Alexandre Lima Nepomuceno
Maria Cristina Neves de Oliveira
Norman Neumaier
Renata Fuganti-Pagliarini
Leonardo Cesar Ferreira
Wellington Bruno da Silva Nascimento*

Embrapa Soja
Londrina, PR
2017

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Soja

Rod. Carlos João Strass, s/n, Acesso Orlando Amaral, Distrito de Warta
Londrina, PR, Brasil
CEP 86001-970
Caixa Postal 231
Fone: (43) 3371 6000
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Ricardo Vilela Abdelnoor*

Secretária-Executiva: *Regina Maria Villas Boas de Campos Leite*

Membros: *Alvadi Antonio Balbinot Junior, Claudine Dinali Santos Seixas, Fernando Augusto Henning, José Marcos Gontijo Mandarino, Liliane Márcia Mertz-Henning, Maria Cristina Neves de Oliveira, Norman Neumaier e Osmar Conte*

Supervisão editorial: *Vanessa Fuzinatto Dall' Agnol*

Normalização bibliográfica: *Ademir Benedito Alves de Lima*

Editoração eletrônica e capa: *Marisa Yuri Horikawa*

Foto da capa: *Sergio Luiz Gonçalves*

1ª edição

PDF digitalizado (2017).

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Efeito do estresse hídrico e variabilidade genética na arquitetura da raiz de soja
[recurso eletrônico]: / Sergio Luiz Gonçalves... [et al.]. – Londrina: Embrapa Soja, 2017.

24 p. il. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Soja, ISSN 2178-1680 ; n.12).

1.Soja-Raiz. I.Gonçalves, Sergio Luiz. II. Cattelan, Alexandre José. III. Nepomuceno, Alexandre Lima. IV.Neumaier, Norman. V.Fuganti-Pagliarini, Renata. VI.Ferreira, Leonardo Cesar. VII.Nascimento, Wellington Bruno da Silva. VIII.Título. IX.Série.

CDD 581.498 (21.ed.)

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	6
Introdução.....	7
Material e métodos.....	11
Resultados e discussão	14
Conclusões.....	19
Referências	20

Efeito do estresse hídrico e variabilidade genética na arquitetura da raiz de soja

Sergio Luiz Gonçalves¹, Alexandre José Cattelan¹, Alexandre Lima Nepomuceno¹, Maria Cristina Neves de Oliveira¹, Norman Neumaier¹, Renata Fuganti-Pagliarini², Leonardo Cesar Ferreira², Wellington Bruno da Silva Nascimento³

Resumo

Apesar de importantes, poucos estudos foram feitos sobre a arquitetura de raízes de soja em condições de campo. Os ângulos formados entre a raiz principal e as raízes laterais é um indicador da tendência de a raiz ser mais superficial ou mais profunda, sendo importantes em estudos sobre tolerância à seca. O presente trabalho avaliou tais ângulos estudando cinco diferentes genótipos, sob três diferentes regimes hídricos (irrigado, não irrigado e com estresse hídrico), em duas datas de avaliação (uma no estágio vegetativo e outra no estágio reprodutivo). Os resultados mostraram que existe diferença significativa na angulação das raízes entre os cinco genótipos estudados e que o estresse hídrico no estágio vegetativo causou uma alteração significativa nos ângulos das raízes, tornando-os mais fechados, indicando maior tendência à profundidade.

Termos para indexação: *Glycine max*, raízes, sistema radicular

¹ Pesquisador, Dr., Embrapa Soja, Londrina, PR

² Bolsista CNPq, Dr., Embrapa Soja, Londrina, PR

³ Estagiário de Agronomia, Universidade Norte do Paraná (UNOPAR), Londrina, PR

Abstract

Although important, few studies have been done on the architecture of soybean roots at the field level. The angles formed between the main root and the lateral roots are an indicator of the tendency of the root to be more superficial or deeper, being important in studies on drought tolerance. The present work evaluated these angles by studying five different genotypes, under three different water regimes (irrigated, non - irrigated and water stressed), in two evaluation dates (one in the vegetative stage and the other in the reproductive stage). The results showed that there is a significant difference in root angulation among the five studied genotypes and that water stress in the vegetative stage causes a significant change in the angles of the roots, making them more closed, indicating a greater tendency to depth.

Index terms: *Glycine max*, roots, root system

Introdução

Nos tempos atuais, as incertezas e variações climáticas estão cada vez mais claras e evidentes, trazendo à tona a vulnerabilidade das plantas aos mais variados tipos de estresses. Assim, existe uma necessidade cada vez maior de novas estratégias para a seleção e melhoramento de genótipos, adaptados aos mais diversos ambientes, notadamente aqueles sujeitos a estresses hídricos. Nas últimas décadas surgiram muitas técnicas de estudos para a tolerância à deficiência hídrica por meio de observações e estudos de órgãos situados na parte aérea das plantas, como por exemplo, as folhas. As raízes, apesar de serem os primeiros órgãos a mostrar respostas face aos estresses hídricos, por situarem-se abaixo da superfície do solo, têm tido relativamente pouca atenção, sendo pouco utilizadas em *screening* de fenotipagem, principalmente em condições de campo (FENTA et al., 2014). Porém, a eficiência da exploração do solo é função da arquitetura do sistema radicular, sendo importante o estudo de vários aspectos, incluindo ramificações e ângulos formados entre as diferentes raízes, uma vez que a absorção de água e nutrientes e a adaptação das plantas a um ambiente dependem da distribuição da raiz no solo (FITTER et al., 1991; ATTA et al., 2013). Assim é justificável o número crescente de trabalhos cujo objetivo é a busca de raízes adaptadas a diferentes tipos de ambiente (WHITE et al., 2013; GONÇALVES; LYNCH, 2014).

Na literatura, foram descritos diversos ideótipos para a arquitetura (LYNCH, 2013; WHITE et al., 2013), existindo raízes com propensão a serem mais superficiais ou mais profundas. Existem também aquelas denominadas dimórficas, que apresentam boa ramificação próximo à superfície do solo, além de ter boa profundidade (HO et al.; 2005). É importante destacar que existe variabilidade genética dos mais diferentes traços de raízes, incluindo a arquitetura, que pode mostrar variação na angulação entre a raiz principal e as raízes laterais em plantas dicotiledôneas, conferindo às raízes maior ou menor probabilidade de aprofundamento. Nas monocotiledôneas, da mesma forma, é possível determinar a angulação das raízes seminais e das raízes nodais, importantes para os estudos de estresses causados por deficiência hídrica ou nutricional. Kamoshita et al. (2008), para o arroz, mostraram que os ângulos das raízes, vindos desde a semente, podem refletir uma tendência da resposta gravitropica expressa pelo genótipo. A arquitetura da raiz está diretamente relacionada com a eficiência na absorção de nutrientes, como por exemplo, o fósforo, sendo que, em soja, as raízes superficiais são as mais eficientes, enquanto que genótipos selvagens, de raízes mais profundas são menos eficientes (JING et al., 2004). Para feijão, Ge et al. (2000), da mesma forma, estudando a absorção de fósforo, mostraram a importância do gravitropismo, sinal que direciona o crescimento da raiz para baixo e descreveram três tipos de sistemas radiculares em feijão; o superficial, o intermediário (tipo carioca) e o profundo. Miguel et al. (2013), também para feijão, mostraram que plantas com três raízes laterais iniciais nos verticilos apresentam um sistema radicular mais superficial, formando ângulos entre 10 a 45° com a linha da superfície do solo, enquanto que aquelas com apenas duas raízes laterais iniciais mostram um sistema radicular mais profundo, formando ângulos entre 60 a 85°. Outro ponto importante é que, a arquitetura da raiz também tem forte correlação com a sua profundidade. Na literatura, vários trabalhos têm mostrado a importância de a raiz ser profunda, por aumentar as chances de sobrevivência na seca (PASSIOURA, 1983; HO et al., 2005; LOPES; REINOLDS, 2010). Além disso, Kell (2011) enfatiza que além de água e nutrientes, as raízes mais profundas são importantes na incorporação do carbono

do solo, como estratégia ante aos problemas causados pelas mudanças climáticas globais. Este aspecto ganha importância considerando o que afirmou Passioura (1983), que o rendimento das plantas está relacionado com o momento em que a planta absorve água e não necessariamente com a quantidade. E que a água absorvida após o florescimento seria responsável pelo índice de colheita. Assim, a profundidade da raiz em momentos críticos, como o de enchimento de grãos, é fundamental para que a planta absorva água de camadas mais profundas do solo, o que está diretamente relacionado com a arquitetura da raiz. Isto seria interessante para espécies como a soja, que mantém o desenvolvimento da raiz após o florescimento (SIVAKUMAR et al., 1977). Este princípio foi utilizado num estudo da angulação de raízes de arroz, permitindo o melhoramento de arroz de sequeiro, pelo cruzamento de genótipos de raízes superficiais com genótipos de raízes mais profundas, possibilitando a criação de cultivares mais tolerantes à seca (UGA et al., 2013), que foram ao nível molecular para desvendar a sequência gênica responsável por esta angulação. Conclui-se que é possível que arquiteturas específicas aumentem o rendimento em regiões secas (MANSCHADI, 2006; LILLEY; KIRKEGAARD, 2011), sendo que pequenas diferenças em profundidade podem significar muito para as plantas no campo. Isto foi enfatizado por Manschadi (2006), numa estimativa, afirmando que a cada mm adicional da raiz, em profundidade, permite que a planta absorva uma quantidade adicional de água, tal que, num período crítico como o do enchimento de grãos, possibilita a produção de 55 Kg/ha adicionais para a cultura do trigo. Para a soja, a profundidade da raiz também está diretamente relacionada com a capacidade da planta absorver água, sendo que se ela não absorve água numa dada profundidade é porque a raiz não chega até ela ou existe algum outro impedimento (CORTES; SINCLAIR, 1986). Entre os poucos trabalhos feitos para a soja, está o de Fenta et al (2014), que estudaram a angulação de raízes de 3 cultivares com relação à deficiência hídrica e concluíram que existe uma variação significativa entre os genótipos, concluindo ser este um método válido e rápido na realização de pesquisas visando a tolerância à seca.

Apesar da importância, a dificuldade natural em estudos de raízes de plantas é significativa, uma vez que em trabalhos com o objetivo da realização de *screening* para a melhoria da arquitetura, sem quebrar raízes e sem perder as raízes laterais, é um desafio ainda a ser vencido pela ciência agrônômica na busca de genótipos mais eficientes em diferentes ambientes (GREGORY, 2006; MANAVALAN et al.; 2013). Os melhoristas de plantas pouco têm utilizado técnicas de seleção de plantas baseando-se nas raízes, por acreditar que certos traços possuem baixa herdabilidade e baixa expressão gênica e que existe grande variabilidade em função de diferenças de disponibilidade hídrica e diferentes tipos de solos. Então, apostam que a seleção para rendimento acaba selecionando indiretamente as melhores raízes. No entanto, apesar das dificuldades, várias tentativas e vários métodos têm sido utilizados no sentido de melhorar as raízes das plantas, inclusive muitos destacando a importância de estudos sobre os altos custos metabólicos da formação e manutenção de raízes e o que isto pode representar para a sobrevivência e a produtividade das plantas.

Como já foi destacado, poucos ensaios foram feitos para a soja com a angulação de raízes, o que daria um indicativo de sua profundidade. E pouco se sabe sobre esta angulação do sistema radicular em função de estresses ambientais, como por exemplo, a deficiência hídrica. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar a arquitetura das raízes de cinco genótipos de soja, pela determinação da angulação entre a raiz principal e as laterais, sob três diferentes regimes hídricos, em dois momentos do desenvolvimento das plantas; os estádios vegetativo e reprodutivo, nas condições de solo e clima da região norte do Paraná, Brasil.

Material e métodos

Localização

O experimento foi conduzido na safra 2014/2015, na Embrapa Soja (23°11'37" S, 51°11'03" O), a 630 metros de altitude, localizada em Londrina, Paraná, Brasil. Segundo o IBGE (1978), o local do ensaio fica numa região de clima tropical, englobada ao clima da região central do Brasil, porém com umidade superior a essa região nos meses de outono e inverno, mas ainda assim, por ser de transição climática, com algumas sub-regiões apresentando estações secas de 1 a 2 meses ou regiões subsecas nesse mesmo período.

Distribuição das plantas no campo e regimes hídricos testados

O experimento foi implantado no início de novembro de 2014 e conduzido durante a safra 2014/15. As condições de cultivo seguiram as recomendações para a cultura da soja, sendo utilizado o espaçamento de 0,5 m entre linhas. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, com fatorial na parcela e quatro blocos. Nas parcelas foram distribuídas três condições hídricas e duas datas de avaliação. A primeira ocorreu em 06 de janeiro de 2015, correspondente ao estágio vegetativo e a segunda, em 02 de fevereiro de 2015, correspondente ao estágio reprodutivo. As três condições hídricas foram correspondentes ao ambiente irrigado (água de precipitação + irrigação quando o potencial matricial da água no solo ficou entre -0,03 e -0,05 MPa), ao não-irrigado (água de precipitação) e dois ambientes mantidos sob coberturas móveis (*shelters*) programadas para fechar na ocorrência de chuva ($\pm 0,02$ mm) visando a simulação de seca e indução de déficit hídrico nas plantas, nos estádios vegetativo e reprodutivo. A área de cada sub parcela foi de 22 m² (4m x 5,5m) nas condições do tratamento irrigado e do não irrigado; e de 9 m² (1,5m x 6m) nos de estresses hídricos (coberturas móveis). No tratamento de deficiência hídrica no estágio vegetativo, a ausência de água teve início aproximadamente aos 30 dias após a semeadura (DAS), sendo que as plantas voltaram a receber água aproximadamente a partir do

estádio R2 (± 50 DAS). No tratamento de deficiência hídrica no estágio reprodutivo, as plantas deixaram de receber água do estágio R2 até a colheita. Dentro das parcelas, tanto no tratamento irrigado quanto no não irrigado e para as duas datas de avaliação, nas subparcelas, foram distribuídas sementes de duas cultivares de soja convencional, BR 16 e BRS 184, além das isolinhas Areb A e Areb B (ambas isolinhas da cultivar BR 16) e a NCED (isolinha da BRS 184). Na análise estatística deste modelo foi realizada uma análise conjunta, considerando blocos ao acaso com parcelas subdivididas, para a comparação dos três regimes hídricos e do comportamento dos 5 genótipos, para cada data avaliada (06 de janeiro, correspondendo os dados do estágio vegetativo e 02 de fevereiro correspondendo o estágio reprodutivo). Ainda dentro das parcelas, mas nos tratamentos de estresse hídrico no vegetativo e de estresse hídrico no reprodutivo, foram distribuídas, nas subparcelas, sementes das cultivares de soja convencionais BR 16 e BRS 184, além da isolinha Areb B (isolinha da cultivar BR 16) e NCED (isolinha da cultivar BRS 184). Neste caso, com a ausência da isolinha Areb A, foi realizada uma análise individualizada, considerando blocos ao acaso com parcelas subdivididas e com fatorial na parcela, para comparar os quatro genótipos restantes nas duas diferentes datas de avaliação. Em todo o delineamento plantas da cultivar de soja BRS 295RR foram utilizadas como bordadura. A temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a precipitação foram monitoradas diariamente por uma estação meteorológica localizada próximo à área experimental.

Coleta de dados

As raízes foram coletadas em 2 fases. A primeira, no estágio vegetativo, quando as plantas estavam entre V4 e V5 (FEHR; CAVINESS, 1977). Nos tratamentos para a indução do déficit hídrico os abrigos foram organizados para que o referido estresse tivesse a duração de 1 mês. Ao final deste mês foram feitas as coletas. Estas ocorreram no dia 06 de janeiro de 2015 (vegetativo) e em 02 de fevereiro também de 2015 (reprodutivo). Foram coletadas entre 5 a 7 plantas da linha central da parcela. Estas foram colocadas em um saco de papel e levadas para lavagem em água corrente. Após isto, todas as plantas

da parcela foram fotografadas com máquina fotográfica digital, sendo todas as imagens identificadas conforme o tratamento. Para a obtenção dos ângulos formados entre a raiz principal e as raízes laterais foi necessária a utilização de um software específico, a partir da imagem obtida na câmara fotográfica. Assim, as fotografias foram analisadas no software *Micro-measure*, onde foram calculados todos os ângulos das imagens, formados entre a raiz principal e as raízes laterais. Os resultados de todas as medições permitiu o cálculo dos ângulos médios entre as raízes laterais e a superfície do solo, ou entre as raízes laterais e a raiz principal, dando noção exata da tendência de a raiz ser mais superficial ou ter tendência de ser mais profunda.

Análise estatística

Foram realizadas as análises exploratórias verificando todas as pressuposições da análise de variância (ANOVA) como os testes de independência e normalidade dos erros (SHAPIRO; WILK, 1965; PARENTE, 1984), bem como os testes para avaliar a não-aditividade do modelo e a uniformidade das variâncias dos erros dos tratamentos (TUKEY, 1949; BURR; FOSTER, 1972). Atendidos estes pré-requisitos foi realizada a análise de variância (ANOVA) e o teste de comparações múltiplas das médias dos ângulos (em graus) existentes entre a raiz principal e as raízes laterais dos genótipos avaliados, pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$) (STEEL; TORRIE, 1960). As análises foram realizadas pelo software estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 2009).

Resultados e discussão

As condições meteorológicas locais e conteúdo hídrico no solo durante o período do experimento (Figura 1) foram determinados pelo método de Thornthwaite e Matter (1955) e calculadas em planilha eletrônica, conforme Rolim et al. (1998). Elas indicaram que o ano foi bastante chuvoso, tendo havido um déficit hídrico no solo apenas nos dias antecedentes à semeadura. Isto foi contornado por uma irrigação para a garantia do stand inicial do experimento. Após a emergência das plantas a distribuição hídrica ocorrida naturalmente na região não produziu uma grande deficiência hídrica, mesmo no tratamento não irrigado. Assim, naturalmente, as condições para deficiência hídrica neste tratamento não foram muito diferentes daquela do tratamento irrigado. O mesmo não aconteceu no tratamento conduzido nos abrigos, que cortou radicalmente a distribuição hídrica para as plantas nos estádios vegetativo e reprodutivo.

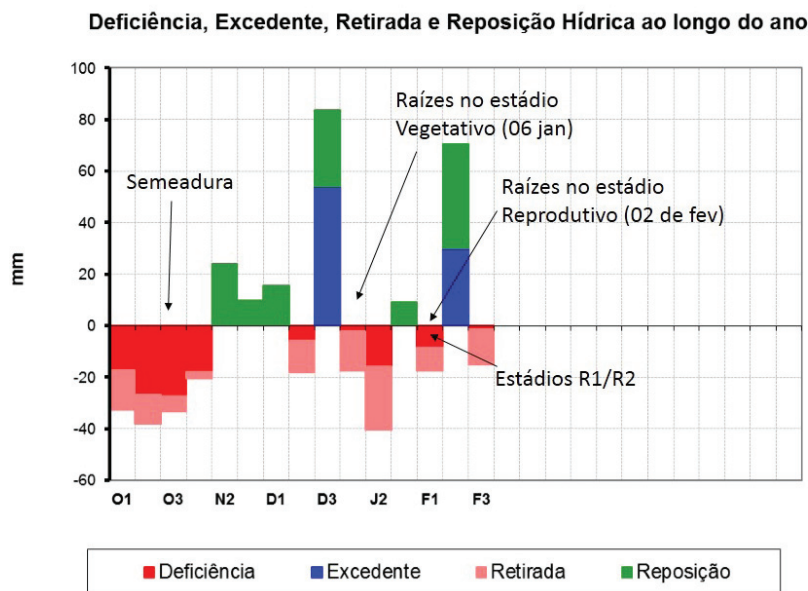


Figura 1. Condições hídricas vigentes no campo experimental durante o período da realização do ensaio, mostrando as datas de coleta de raízes nos estádios vegetativo e reprodutivo. Fonte: Adaptado de Rolim et al. (1998).

A Figura 2 sintetiza os resultados do ensaio. Na parte A (estádio vegetativo), uma primeira comparação pode ser feita (sentido vertical) entre os três tratamentos. Em função da boa ocorrência de chuvas durante o período do ensaio, no tratamento não irrigado a distribuição hídrica foi também satisfatória, não ocorrendo diferenças estatísticas significativas com o irrigado. Os dados dos 3 tratamentos mostraram que o irrigado e o não irrigado não diferiram entre si. Porém, quando comparados com o de estresse hídrico, houve diferença estatística significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$), mostrando que o estresse hídrico no estágio vegetativo provocou uma diminuição na angulação média de todas as raízes dos genótipos, tornando-as menos superficiais, numa tentativa de a raiz ficar mais profunda em busca de água. Uma segunda comparação pode ser feita sobre o comportamento dos genótipos em todos os três tratamentos. Foi possível identificar que houve uma diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$) entre eles, nos três tratamentos, sendo que a cultivar BR 16 e suas isolinhas Areb A e Areb B mostraram raízes mais superficiais, enquanto que a cultivar BRS 184 e sua isolinha NCED mostraram angulação menor nas raízes, tornando as mais profundas. Na parte B (estádio reprodutivo), na comparação entre os tratamentos (também no sentido vertical), não houve diferenças estatísticas entre eles, sendo que a angulação das raízes foi semelhante em todos eles. As diferenças de angulação entre os tratamentos irrigado e não irrigado em comparação com o tratamento de estresse no estágio reprodutivo não foram significativas, mostrando que o estresse pode ter sido tardio, não acarretando mudanças na angulação das raízes. Na comparação feita entre os genótipos, as mesmas proporções dos dados do estágio vegetativo foram mantidas também no reprodutivo. Finalmente, ainda analisando-se a Figura 2, outra comparação pode ser feita entre os estádios vegetativo e reprodutivo (sentido horizontal). Na análise estatística realizada para a comparação dos dados das duas diferentes datas (06 de janeiro e 02 de fevereiro de 2015) o resultado mais importante foi que houve diferença significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$) entre as médias dos dois regimes de estresses testados, indicando que o estresse hídrico no estágio vegetativo foi maior, sendo significativamente diferente do estresse hídrico no estágio reprodutivo.

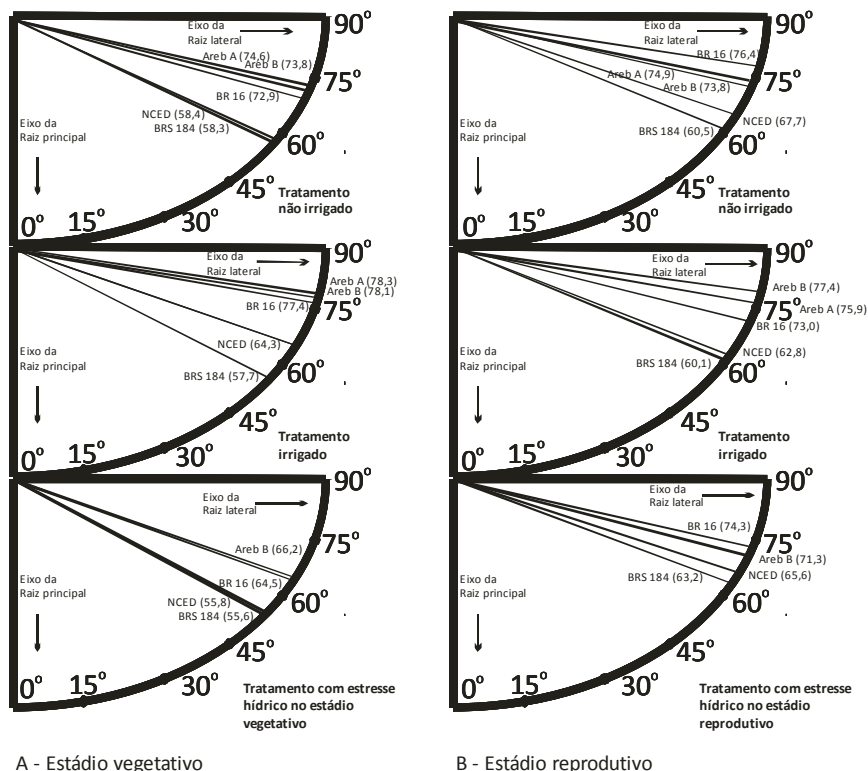


Figura 2. Ângulos médios, em graus, entre a raiz principal e as raízes laterais, nos estádios vegetativo e reprodutivo, em cinco genótipos de soja, em três diferentes regimes hídricos, durante a safra 2014/2015, em Londrina, Paraná, Brasil.

Um dos poucos trabalhos com angulação de raízes de soja é o de Fenta et al. (2014), que estudaram três genótipos, considerando três diferentes arquiteturas, tendo como referência os ângulos das raízes com relação à linha horizontal do solo, considerando superficiais aquelas raízes com ângulos entre 0 e 40°. Os ângulos obtidos neste trabalho foram determinados entre a raiz principal e as laterais da soja, que transformados e comparados com a linha horizontal do solo ficaram com valores inferiores a 40°. Portanto podem ser considerados, todos, de raízes superficiais, utilizando-se a classificação de Fenta et al. (2014). No entanto, foi possível perceber que houve diferenças signifi-

cativas entre os tratamentos do estágio vegetativo e entre os genótipos estudados, mostrando que existe uma variabilidade genética na arquitetura das raízes, e que o estresse hídrico antes do florescimento pode causar um efeito na orientação de crescimento da raiz em busca de maior profundidade. Neste trabalho, em função das dificuldades, principalmente em função da textura do solo, que é extremamente argiloso, ficou impossibilitada a medição direta e por isto não foi realizada a determinação da profundidade das raízes dos genótipos avaliados. No entanto, a angulação obtida entre as raízes laterais e a raiz principal é um indicativo útil que mostra a tendência de o genótipo ter uma raiz mais profunda ou não. Passioura (1983) relatou que existia um entendimento comum em estudos para a tolerância à seca, de que quanto mais raiz a planta possui, mais é tolerante à seca. No entanto ele questionava esta lógica, uma vez que o rendimento está muito relacionado com o momento em que a planta absorve água e não necessariamente com a quantidade. E que a água absorvida após o florescimento seria responsável por um melhor índice de colheita. Destacou que, numa situação de seca a planta tende a produzir mais raízes, gastando muitos assimilados que poderiam ser utilizados na formação de grãos, elevando a relação raiz/parte aérea e diminuindo a eficiência no uso da água. Sugeriu a redução da relação raiz/parte aérea, com a redução do tamanho da raiz, o que poderia ser útil para a tolerância à seca. Mostrou também que uma raiz com menor densidade pode levar a planta a utilizar água durante mais tempo, enquanto que uma grande densidade de raiz pode levar a planta a absorver muita água, num menor espaço de tempo, o que pode levar a planta ao déficit hídrico nos períodos subsequentes. Este raciocínio também foi descrito por Jordan e Miller (1980), afirmando que o aumento da densidade da raiz leva a um gasto energético que pode não valer a pena para a planta. Siddique et al. (1990) e Palta et al. (2011), da mesma forma, afirmaram que o trigo extrai água e produz mais, devido à redução da matéria seca da raiz, sendo que não há consenso se um grande sistema radicular seria a melhor estratégia de adaptação a ambientes com pouca água. E também Wasson et al. (2013), em projeto de melhoramento de trigo, destacaram a necessidade de seleção de plantas que consigam extrair

água das camadas mais profundas do solo e que para isto seria preciso o melhoramento buscar plantas com sistemas radiculares mais profundos, aumentar a densidade da raiz do meio para baixo, reduzir a densidade da raiz na superfície e buscar plantas com mais pelos radiculares. As raízes sendo mais profundas no momento do enchimento de grãos, proporciona a absorção de água nas camadas mais profundas do solo, onde existe um reservatório natural de umidade em camadas abaixo de 1m, conforme mostraram Jordan e Miller (1980). Isto é um diferencial importante para regiões secas ou regiões com épocas de semeadura tardias, em função de sistemas de cultivo, que levam as culturas à falta de água em momentos críticos como o florescimento e o enchimento de grãos, onde as raízes mais profundas contribuiriam para a redução de perdas de produtividade (GONÇALVES e LYNCH, 2014). Pode-se perceber, considerando o relato acima, que na seleção de genótipos com raízes melhoradas é importante considerar que, para a raiz ser profunda a densidade, principalmente próximo da superfície não deve ser grande. Além disso, nos momentos mais críticos, como o florescimento é importante que a raiz seja profunda e que, para isto, raízes com ângulos mais fechados aumentam esta probabilidade.

Dada à complexidade e dificuldades práticas, os estudos com raízes, principalmente no campo, sempre serão trabalhosos e trarão resultados muitas vezes questionáveis. Basta lembrar o que afirmou Gregory (2006), que em trabalho de campo, com raízes de 10 cm de diâmetro, seriam necessárias entre 15 a 20 amostras para a obtenção de 90% de confiabilidade ao nível de 10% ou de 60 a 90 amostras para o nível de 5% de significância estatística. No entanto, a angulação obtida entre as raízes laterais e a raiz principal é um indicativo útil que mostra a tendência de o genótipo ter uma raiz mais profunda ou não. Adicionalmente, outro ponto que pode ser considerado é que na formação de raízes é importante a redução de seus custos metabólicos (CHAPIN III, 1987; LYNCH, 2014). Neste sentido, recentes estudos mostram a importância dos pelos radiculares, que aumentam muito a área de absorção da raiz, mas são de baixo custo metabólico para a planta (BROWN et al.; 2013), existindo um efeito sinérgico entre raízes basais

e pelos radiculares em feijão (MIGUEL et al.; 2015). Assim, raízes bem formadas, porém não em excesso, mais profundas e com muitos pelos, podem ter uma área de absorção ideal e ter um custo metabolicamente melhor para as plantas, contribuindo para o aumento da tolerância à seca. As melhorias genéticas são possíveis, mesmo apesar das interações existentes com outros fatores e que devem ser consideradas como por exemplo a distribuição hídrica local, as épocas de semeadura, o manejo e a fertilidade dos solos.

Em função de todas as dificuldades em se trabalhar com raízes, novos estudos de correlações e interações entre dados de laboratório, casa de vegetação e de campo poderão ser úteis para o melhor entendimento de determinados processos e para a realização de *screening* inicial e seleção de genótipos interessantes. Também são necessários trabalhos de correlações entre as raízes e a parte aérea das plantas que poderão ser úteis para estes objetivos, a exemplo do trabalho de Mayaki et al. (1976), que correlacionaram a altura da planta com a profundidade das raízes para a cultura da soja.

Conclusões

- Há diferença significativa na angulação das raízes entre genótipos de soja;
- Um estresse hídrico no estágio vegetativo influencia significativamente o gravitropismo em plantas de soja.

Referências

ATTA, B. M.; MAHMOOD, T.; TRETHOWAN, R. M. Relationship between root morphology and grain yield of wheat in north-western NSW, Australia. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 13, p. 2108-2115, 2013.

BROWN, L. K.; GEORGE, T. S.; DUPUY, L. X.; WHITE, P. J. A conceptual model of root hair ideotypes for future agricultural environments: what combination of traits should be targeted to cope with limited P availability? **Annals of Botany**, v. 112, p. 317-330, 2013. DOI: 10.1093/aob/mcs231.

BURR, I. W.; FOSTER, L. A. **A test for equality of variances**. West Lafayette: University of Purdue, 1972. 26 p. (Mimeo series, 282).

CHAPIN III, F. S.; BLOOM, A. J.; FIEL, C. B.; WARING, R. H. Plant responses to multiple environmental factors: physiological ecology provides tools for studying how interacting environmental resources control plant growth. **BioScience**, v. 37, n. 1, p. 49-57, 1987.

CORTES, P. M.; SINCLAIR, T. R. Water relations of field-grown soybean under drought. **Crop Science**, v. 26, p. 993-998, 1986.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University. 1977. 11p. (Cooperative Extension Service, Special Report 80).

FENTA, B. A.; BEEBE, S. E.; KUNERT, K. J.; BURRIDGE, J. D.; BARLOW, K. M.; LYNCH, J. P.; FOYER, C.H. Field phenotyping of soybean roots for drought stress tolerance. **Agronomy**, v. 4, p. 418-435, 2014. DOI: 103390/agronomy4030418.

FITTER, A. H., STICKLAND, T. R., HARVEY, M. L., WILSON, G. W. Architectural analysis of plant root systems 1. Architectural correlates of exploitation efficiency. **New Phytologist**, v. 118, p. 375-382, 1991.

GE, Z.; RUBIO, G.; LYNCH, J. P. The importance of root gravitropism for inter-root competition and phosphorus acquisition efficiency: results from a geometric simulation. **Plant and Soil**, v. 218, p. 159-171, 2000.

GONÇALVES, S. L.; LYNCH, J. P. **Raízes de plantas anuais: tolerância a estresses ambientais, eficiência na absorção de nutrientes e métodos para seleção de genótipos**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 67 p. (Embrapa Soja. Documentos, 357).

GREGORY, P. **Plant roots: growth, activity and interaction with soils**. Oxford: Blackwell Publishing, 2006. 317 p.

HO, M. D.; ROSAS, J. C.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Roots architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. **Functional Plant Biology**, v. 32, p.737-748, 2005.

IBGE. **Mapa de climas do Brasil**. Brasília: IBGE, 1978. 1 mapa, color., 12 cm x 15 cm. Escala 1: 5.000.000.

JING, Z.; JIABING, F.; HONG, L.; HAI, N.; YUEMING, H.; LINJUAN, Q.; YINSAN, D.; XIAOLONG, Y. Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm. **Chinese Science Bulletin**, v. 49, n. 15, p. 1611-1620, 2004.

JORDAN, W. R.; MILLER, F. R. Genetic variability in sorghum root systems: implications for drought tolerance. In: TURNER, N. C.; KRAMER, P. J. (Ed.). **Adaptation of plants to water and high temperature stresses**. New York: Wiley Interscience, 1980. p. 383-399.

KAMOSHITA, A.; BABU, C. R. BOOPATHI, N. M.; FUKAI, S. Phenotypic and genotypic analysis of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed environments. **Field Crops Research**, v. 109, p. 1-23, 2008.

KELL, D. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. **Annals of Botany**, v. 108, p. 407-418, 2011.

LILLEY, J. M.; KIRKEGAARD, J. A. Benefits of increased soil exploration by wheat roots. **Field Crops Research**, v. 122, p. 118-130, 2011.

LOPES, M. S.; REYNOLDS, M. S. Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought wheat. **Functional Plant Biology**, v. 37, p. 147-156, 2010.

LYNCH, J. P. Root phenes that reduce the metabolic costs of soil exploration: opportunities for 21st century agriculture. **Plant, Cell & Environment**, v. 38, n. 9, p. 1775-1784, 2014. DOI: 10.1111/pce.12451.

LYNCH, J. P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize roots systems. **Annals of Botany**, v. 112, p. 347-357, 2013. DOI: 10.1093/aob/mcs293.

MANAVALAN, L. P.; GUTTIKONDA, S. K., NGUYEN, V. T., SHANNON, J. G., NGUYEN, H. T. Evaluation of diverse soybean germplasm for root growth and architecture. **Plant and Soil**, v. 330, p. 503-514, 2010. DOI: 10.1007/s11104-009-0222-8.

MANSCHADI, A. M.; CHISTOPHER, J.; de VOIL, P.; HAMMER, G. The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. **Functional Plant Biology**, v. 33, p. 823-837, 2006.

MAYAKI, W. C., TEARE, I. D., STONE, L. R. Top and root growth of irrigated and nonirrigated soybeans. **Crop Science**, v. 16, p. 92-94, 1976.

MIGUEL, A.; POSTMA, J. A.; LYNCH, J. P. Phene synergism between root hair length and basal root angle for phosphorus acquisition. **Plant Physiology**, v. 167, p. 1430-1439, 2015.

MIGUEL, A.; WIDRIG, A.; VIEIRA, R. F.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Basal root whorl number: a modulator of phosphorus acquisition in common bean (*Phaseolus vulgaris*). **Annals of Botany**, v. 112, n. 6, p. 973-82, 2013. DOI: 10.1093/aob/mct164.

PALTA, J. A.; CHEN, X.; MILROY, S. P.; REBETZKE, G. J., DRECCER, M. F.; WATT, M. Large roots systems: are they useful in adapting wheat to dry environments? **Functional Plant Biology**, v. 38, p. 347-354, 2011.

PARENTE, R. C. P. **Aspectos da análise de resíduos**. 1984. 118 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PASSIOURA, J. B. Roots and drought resistance. **Agricultural Water Management**, v. 7, p. 265-280, 1983.

ROLIM, G. S., SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide. Version 9.2. Cary: SAS Institute, 2009. 7869 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SIDDIQUE, K. H. M.; BELFORD, R. K.; TENNANT, D. Root: shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a mediterranean environment. **Plant and Soil**, v. 121, p. 89-98, 1990.

SIVAKUMAR, M. V. K.; TAYLOR, H. M.; SHAW, R. H. Top and root relations of field-grown soybeans. **Agronomy Journal**, v. 69, p. 470-473, 1977.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**: with special reference to the biological sciences. New York: McGraw-Hill, 1960. 481 p.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, Publications in Climatology, 1955. 104 p.

TUKEY, J. W. One degree of freedom for non-additivity. **Biometrics**, v. 5, p. 232-242, 1949.

UGA, Y.; SUGIMOTO, K.; OGAWA, S.; RANE, J.; ISHITANI, M.; HARA, N.; KITOMI, Y.; INUKAI, Y.; ONO, K.; KANNO, N.; INOUE, H.; TAKEHISA, H.; MOTOYAMA, R.; NAGAMURA, Y.; WU, J.; MATSUMOTO, T.; TAKAI, T.; OKUNO, K.; YANO, M. Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. **Nature Genetics**, v. 45, p. 1097-1102, 2013. DOI:10.1038/ng.2725.

WASSON, A. P.; RICHARDS, R. A.; CHATRATH, R.; MISRA, S. C.; SAIPRASAD, S. V.; TEBETZKE, G. J.; KIRKEGAARD, J. A. CHRISTOPHER, J.; WATT, M. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 9, p. 3485-98, 2012. DOI: 10.1093/jxb/ers111.

WHITE, P. J.; GEORGE, T. S.; GREGORY, P.; BENGOUGH, A. G.; HALLET, P. D.; McKENZIE, B. M. Matching roots to their environment. **Annals of Botany**, v. 112, p. 207-222, 2013. DOI: 10.1093/aob/mct123.



Soja