



Soja

Manejo para alta
produtividade de grãos

André Luís Thomas & José Antonio Costa
Organizadores



Porto Alegre
2010

SOJA

Manejo para alta
produtividade de grãos

© dos autores
1ª edição: 2010

Editoração eletrônica e capa: Rafael Marczal de Lima
Fotos da capa: Dirceu Gassen
Impressão e fotolitos: Evangraf Ltda.

Pedidos desta publicação:
– andrethomas20@hotmail.com, thomaspl@ufrgs.br
– jamayerc@gmail.com, jamc@ufrgs.br

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

CIP - Catalogação Internacional na Publicação

S683 Soja : manejo para alta produtividade de grãos / organizadores
 AndréLuís Thomas, José Antonio Costa. – Porto Alegre : Evangraf,
 2010. 248 p. : il.; 23 cm.

Inclui referências.

ISBN 978-85-7727-226-6

1. Soja - Manejo. 2. Soja - Produtividade. 3. Produtividade
agrícola. 4. Cultivos agrícolas - Rendimento. 5. Solos - Manejo. 6.
Fertilidade do solo. I. Thomas, André Luís. II. Costa, José Antonio.

CDU 633:34
CDD 633.34

(Bibliotecária responsável: Sabrina Leal Araujo – CRB 10/1507)

SOJA

Manejo para alta produtividade de grãos

André Luís Thomas & José Antonio Costa
Organizadores



Porto Alegre
2 0 1 0

Sumário

Apresentação	11
Desenvolvimento da planta de soja e o potencial de rendimento de grãos	13
<i>André Luís Thomas & José Antonio Costa</i>	
1. Desenvolvimento da planta de soja	13
2. Componentes do rendimento de grãos	22
3. Extração de nutrientes pela planta e rendimento de grãos ...	24
4. Considerações finais	29
5. Referências	30
Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto	35
<i>Telmo J.C. Amado; Jairo A. Schleindwein & Jackson E. Fiorin</i>	
1. Introdução	35
2. Manejo da Fertilidade do Solo	37
3. Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo	39
4. Dinâmica do Nitrogênio	43
4.1. Nitrogênio na soja	43
4.2. Nitrogênio no solo e a fixação biológica de nitrogênio ..	44
4.3. Respostas da soja à adubação nitrogenada e a outras fontes de nitrogênio	47
5. Dinâmica do fósforo	53
5.1. Fósforo na soja	53
5.2. Fósforo no solo	54
5.3. Respostas da soja à adubação fosfatada	59
6. Dinâmica do Potássio	67

6.1. Potássio na soja	67
6.2. Potássio no solo	69
6.3. Resposta da soja à adubação potássica	71
7. Macronutrientes secundários	81
7.1. Cálcio, Magnésio e Enxofre na soja	81
7.2. Cálcio, Magnésio e Enxofre no solo	81
7.3. Respostas da soja a aplicação de Ca, Mg e S	83
8. Micronutrientes	84
8.1. Micronutrientes na soja	84
8.2. Micronutrientes no solo	86
8.3. Respostas da soja à adubação com micronutrientes	87
9. Dinâmica do pH do solo	89
10. Considerações Finais	96
11. Referências	97
Fixação biológica do nitrogênio na soja	113
<i>André Luís Thomas & José Antonio Costa</i>	
1. Formação dos nódulos nas raízes: estabelecimento da simbiose	114
2. Fatores ambientais que interferem na nodulação e na fixação biológica do N ₂	115
3. Importância da inoculação anual na cultura da soja	116
4. Utilização de fertilizantes nitrogenados na cultura da soja ..	118
5. Balanço de nitrogênio no solo na cultura da soja	118
6. Fixação biológica de N ₂ em soja transgênica resistente ao glifosate	120
7. Considerações finais	122
8. Referências	123
Estabelecimento da lavoura de soja	127
<i>André Luís Thomas, José Antonio Costa & João Leonardo Fernandes Pires</i>	
1. Escolha de cultivares	127

2. Época de semeadura	130
3. Distribuição espacial das plantas na lavoura	133
4. Referências	137

Estresse hídrico em soja: impacto no potencial de rendimento de grãos	141
--	-----

André Luís Thomas & José Antonio Costa

1. Deficiência hídrica	142
1.1. Germinação da semente e emergência da plântula	142
1.2. Fase vegetativa	143
1.3. Fase Reprodutiva	147
1.3.1. Florescimento	148
1.3.2. Formação dos legumes	149
1.3.3. Enchimento dos grãos	150
1.3.4. Potencial de rendimento, rendimento de grãos e seus componentes	151
1.4. Estratégias para amenizar as perdas do potencial de rendimento de grãos devido à deficiência hídrica ..	155
2. Excesso hídrico	157
2.1. Soja em solos de várzea	157
2.2. Solos de várzea	158
2.3. Efeito do excesso hídrico sobre o desenvolvimento da planta e do potencial de rendimento de grãos	162
2.4. Estratégias para minimizar os efeitos do excesso de água no solo sobre o potencial de rendimento de grãos ..	166
3. Referências	166

Agricultura de precisão aplicada ao manejo do solo na cultura da soja	177
--	-----

Telmo J. C. Amado & Antônio L. Santi

1. Introdução	177
2. Avaliações do potencial produtivo do solo	179
2.1. Mapeamento da produtividade das culturas	180
2.1.1. Ferramentas básicas para a coleta de dados	180

2.1.2. Uso de marcadores durante a operação de colheita ...	182
2.1.3. Variabilidade de rendimentos em lavouras do Rio Grande do Sul	183
2.1.4. Rendimentos máximos de soja em áreas de agricultura de precisão	187
2.2. Mapeamento dos atributos químicos do solo	188
2.2.1. Amostragem do solo e o diagnóstico da variabilidade química	188
3. O manejo da variabilidade química do solo	192
3.1. Ferramentas auxiliares na aplicação de insumos	192
3.2. Aplicações em taxa variada de insumos	194
4. Atributos físicos do solo.....	197
5. Considerações Finais	203
6. Referências	204

Monitoramento de lavouras - Opção de manejo para altos rendimentos de soja	209
--	-----

José Antonio Costa & André Luís Thomas

1. Introdução	210
2. Amostragem	211
2.1. Quando Amostrar	211
2.2. Como Amostrar	211
3. Estádios vegetativos	213
3.1. Caracterização dos estádios vegetativos	213
3.1.1. Monitoramento no período vegetativo ou pré-florescimento	215
4. Caracterização dos estádios reprodutivos	217
4.1. Monitoramento no florescimento (R2)	219
4.2. Monitoramento no início da formação de legumes (R3) ...	221
4.3. Monitoramento na formação de legumes (R4)	222
4.4. Monitoramento no início do enchimento de grãos (R5) ...	223
4.5. Monitoramento no máximo volume de grãos (R6)	225
4.6. Monitoramento na maturação fisiológica (R7)	227

4.7. Monitoramento na maturação de colheita (R8)	228
4.8. Quantificação de nós férteis e retenção de estruturas reprodutivas	230
5. Interpretação dos resultados obtidos para o vigor e o desenvolvimento das plantas	232
5.1 Desenvolvimento vegetativo	232
5.2. Retenção de estruturas reprodutivas	233
5.2.1. Retenção de flores	234
5.2.2. Retenção de legumes	234
5.2.3. Enchimento de grãos	235
6. Obtenção de gráficos e cálculo de parâmetros de desenvolvimento	235
7. Potencial de rendimento	239
8. Referências	242

Apresentação

Este livro contempla as últimas tecnologias consolidadas para alcançar alta produtividade ou rendimento elevado de grãos em soja. Ao fazer essa afirmativa, surge a pergunta: o que significa “rendimento elevado”? Para respondê-la, é necessário estabelecer alguns parâmetros. O maior rendimento de grãos de soja já alcançado, e documentado, foi conseguido nos Estados Unidos da América do Norte, em 2007, de 10423 kg/ha, média de uma área de 16 hectares. No Brasil, foi registrado, no mesmo ano, o rendimento de 6192 kg/ha, numa área demonstrativa em Caçapava do Sul, RS. Em contraste, o rendimento médio de lavoura no Brasil varia de 2300 a 2600 kg/ha, embora agricultores tecnificados atinjam 4000 kg/ha.

Estes números representam o potencial de rendimento da soja na atualidade, que pode ser definido como “a expressão da interação genótipo e ambiente sob condições limitantes, ou seja, é o potencial de rendimento de um determinado ambiente de cultivo”. É importante conhecer o potencial de rendimento para estabelecer a comparação entre onde estamos e aonde podemos chegar. Este conhecimento nos permite traçar metas para que o mesmo seja alcançado. Como o potencial é variável de acordo com a região e a disponibilidade dos fatores de produção, a sua determinação estabelece inclusive o grau de sucesso de empreendimentos.

Para atingir o rendimento potencial, em cada lavoura e em cada safra, é necessária a maximização dos fatores bióticos e abióticos em cada ambiente de produção. O grau em que a melhoria desses fatores múltiplos é possível ou economicamente viável irá determinar qual fração do rendimento potencial será atingida. Entretanto, a minimização dos fatores limitantes do rendimento requer injeção contínua de inovações tecnológicas.

Dentro desse enfoque, pesquisadores aliaram dados de seus trabalhos com informações disponíveis na literatura para discutir a influ-

ência do desenvolvimento da planta, do manejo do solo, da fixação biológica de nitrogênio, do estabelecimento da lavoura, do estresse hídrico, da agricultura de precisão e do monitoramento da lavoura sobre o potencial de rendimento de grãos de soja.

Este livro, com certeza, contribuirá para que agricultores, estudantes e técnicos possam compreender melhor a dinâmica e a interação dos principais fatores de manejo que interferem no rendimento potencial de grãos em soja.

Desenvolvimento da planta de soja e o potencial de rendimento de grãos

André Luís Thomas¹ & José Antonio Costa²

O potencial de rendimento de uma lavoura de soja expressa a interação entre o genótipo e o ambiente. As condições ambientais impõem restrições ao potencial genético das cultivares de modo que o resultado é o potencial produtivo do local, na estação de crescimento considerada.

A obtenção de lavouras de soja de alto potencial de rendimento depende, primeiramente, do conhecimento detalhado do crescimento e do desenvolvimento da cultura, das suas exigências edafo-climáticas e nutricionais, do potencial genético das cultivares utilizadas em diferentes situações de cultivo para maximizar o rendimento. Assim, objetiva-se nesse capítulo abordar os principais aspectos relativos ao crescimento e ao desenvolvimento da cultura da soja que devem ser levados em consideração para manejá-la com eficiência e obter rendimentos elevados.

1. Desenvolvimento da planta de soja

A semente de soja é composta de três partes principais: o tegumento, os cotilédones e o eixo embrionário (Figura 1). O tegumento controla a entrada da água na semente e protege o embrião contra

¹ Professor da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Caixa Postal 15100, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

² Professor Titular Aposentado da Faculdade de Agronomia da UFRGS. E-mail: jamc@ufrgs.br

patógenos. Os cotilédones chegam a representar 90% do peso da semente, são as reservas das mesmas e são constituídos de proteínas ($\pm 40\%$), carboidratos ($\pm 25\%$), óleos ($\pm 20\%$), fibras ($\pm 5\%$) e minerais ($\pm 5\%$) (Tesar, 1984). O eixo embrionário é constituído por duas folhas unifolioladas e tecidos meristemáticos apical (originará a parte aérea da planta) e radicular (originará as raízes da planta).

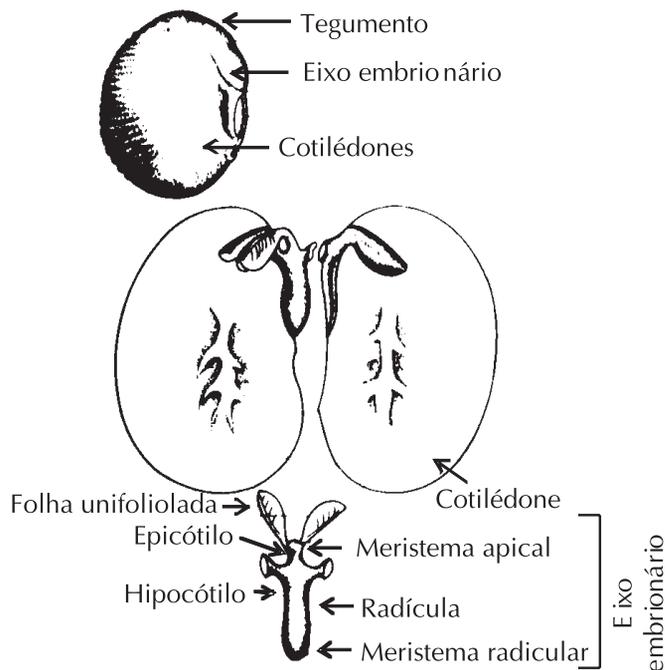


Figura 1. Partes da semente de soja.

A semente de soja necessita absorver água no volume correspondente a 50% de seu peso para iniciar o processo de germinação. A embebição é o processo que inicia a germinação. É o primeiro evento chave que modifica a semente, que se constituía de um organismo com pequena quantidade de umidade, quiescente e dormente, para reiniciar o crescimento do eixo embrionário. Consequentemente, deve ocorrer uma transição ordenada de aumento da hidratação, ativação de enzimas, desdobramento de produtos de reserva e reinício do desenvolvimento da plântula

(Wilcox,1987). A embebição não é meramente um fenômeno físico, incontrollável; a integridade da semente e a temperatura do solo apresentam grande influência sobre o processo.

O estabelecimento da plântula de soja no solo ocorre pelo aumento de volume e diferenciação celular do eixo embrionário. As reservas cotiledonares (proteínas, carboidratos e óleos) são transformadas em compostos mais simples (aminoácidos e açúcares) e energia, utilizados no desenvolvimento da plântula.

A germinação é epígea, ou seja, os cotilédones são levantados pelo hipocótilo para cima da superfície do solo. A emergência ocorre de 7 a 10 dias após a semeadura, dependendo do vigor da semente, profundidade de semeadura, umidade, textura e temperatura do solo. As reservas e nutrientes dos cotilédones suprem as necessidades metabólicas da plântula por 7-10 dias após a emergência. Durante esse período, os cotilédones perdem 70% de seu peso e a supressão de um cotilédone tem pouco efeito sobre a taxa de crescimento da plântula, mas poderá afetar o rendimento de grãos se o período de crescimento vegetativo não permitir a recuperação da planta. Durante a emergência da plântula ocorre o desenvolvimento do sistema radicular seminal, o desenrolamento das folhas primárias (seminais, com disposição oposta no caule) e o desenvolvimento do meristema apical que dará origem à parte aérea. A partir desse ponto, então, a planta passa a absorver nutrientes do solo através das raízes e a produzir fotoassimilados pelas folhas.

A fase de estabelecimento das plantas na lavoura é importante para a obtenção de rendimentos elevados de grãos, pois determinará o número de plantas e a sua distribuição na área, o que influenciará na estatura da planta, no desenvolvimento de ramos, no manejo de plantas daninhas e de doenças. A uniformidade da população de plantas evitará o aparecimento de plantas dominadas que desequilibram a competição intraespecífica e contribuem para diminuição do rendimento da lavoura (Pires, 2002).

A utilização de semente de soja de alta qualidade, de origem conhecida, associada a boas práticas de semeadura, assegura o estabelecimento de população de plantas vigorosas, em número adequado e distribuídas uniformemente, o que é a base para o sucesso da lavoura, contribuindo para que a cultivar expresse o seu potencial de rendimento (Krzyzanowski et al., 2008a). Sementes de vigor médio

ou baixo e/ou deterioradas, resultam em plântulas sem vigor, com pouca ou nenhuma possibilidade de se estabelecerem competitivamente no campo. A qualidade de sementes tem sido atribuída a sua pureza física, ao elevado potencial genético, a alta germinação e vigor, a ausência de danos mecânicos, a boa sanidade e a uniformidade de tamanho (França Neto et al., 1997; França Neto et al., 2007; Krzyzanowski et al., 2008b).

As cultivares modernas de soja têm apresentado alta produtividade em populações de 180 a 250 mil plantas/hectare. Mas, para que essas populações possam ser obtidas com segurança, se requer o uso de sementes de alta qualidade, além de precisão na distribuição das sementes na fileira de semeadura (Krzyzanowski et al., 2008b).

Para estabelecer lavouras com menor população de plantas, se requer, além do tratamento com fungicidas, sementes de alta qualidade fisiológica e sanitária, classificadas por tamanho e por densidade, para atingir alto grau de plantabilidade (distribuição precisa da semente quanto a quantidade e distância entre as mesmas, com o uso de semeadoras com boa precisão de distribuição). A população ideal de plantas é precursora de alta produtividade, se os demais fatores de produção estiverem disponíveis satisfatoriamente. Densidades elevadas resultam em acamamento de plantas, o que interfere negativamente na produção. Densidades muito baixas permitem alta concorrência das plantas daninhas, que se beneficiam dos fertilizantes colocados no solo (Krzyzanowski et al., 2008b).

O uso de sementes de alto vigor proporciona acréscimos superiores a 35% no rendimento, em relação ao uso de sementes de baixo vigor, e o aumento na proporção das plantas provenientes das sementes de alto vigor na comunidade proporciona acréscimo linear no rendimento de soja (Kolchinski et al., 2005).

A implantação da lavoura de soja com sementes de alta qualidade, aliada ao tratamento da semente com a mistura de fungicidas de contato e sistêmico, elimina os riscos do replantio, que se constitui na mais desastrosa das práticas agrícolas, por impor uma série de restrições tecnológicas que resultam na baixa rentabilidade do empreendimento, tais como: a) custo adicional com a aquisição de novas sementes; como essa aquisição é realizada com a safra em curso, na maioria das vezes os lotes de melhor qualidade já foram comercializados, portanto, o risco de se adquirir lotes de qualidade

inferior é grande; b) na maioria das vezes não se consegue adquirir sementes da mesma cultivar, tendo que se optar por aquelas que estiverem disponíveis no mercado, o que poderá não atender às expectativas de produtividade; c) a nova época de semeadura poderá ocorrer fora do período ideal, o que prejudica a produtividade da cultura, pois, quanto mais se atrasa a semeadura, mais os índices de produtividade decrescem, podendo ainda favorecer o surgimento de doenças tardias, como a ferrugem; d) outro aspecto importante a considerar é a perda da eficiência dos herbicidas previamente aplicados, pois decisões terão que ser tomadas quanto a utilização ou não de outros herbicidas por ocasião do replantio; e) a perda e lixiviação de fertilizantes, com destaque para o potássio, poderá vir a ocorrer em função do regime mais intenso de chuvas; f) a somatória desses fatores culminará em menores produtividades e rendimento da soja (Krzyzanowski et al., 2008b).

Feita a inoculação das sementes com *Bradyrhizobium* na semeadura, os nódulos podem ser visualizados logo após a emergência da plântula. Entretanto, eles serão efetivos na fixação biológica de nitrogênio de 10 a 14 dias após esse estágio. Não é necessário aplicar fertilizantes nitrogenados para auxiliar o estabelecimento (“arranque”) inicial da planta, porque haverá efeito prejudicial sobre a nodulação. As exigências nutricionais são pequenas nessa fase e o N mineral do solo é capaz de suprir as necessidades da plântula entre o exaurimento das reservas cotiledonares e o início da fixação simbiótica. No entanto, doses baixas de até 20 kg/ha de N, presentes em determinadas formulações de adubos, podem ser utilizadas sem prejuízo à fixação simbiótica (Reunião, 2009).

O crescimento vegetativo da planta ocorre com a emissão de folhas trifolioladas, com disposição alternada ao longo do caule, perfazendo em torno de 16 a 20 nós com folhas trifolioladas, sob condições edafo-climáticas adequadas ao crescimento. Na inserção (axila) do pecíolo de cada folha com o caule há uma gema axilar meristemática. Sua presença também ocorre nas axilas dos cotilédones e das folhas primárias com o caule. A gema axilar pode ficar dormente ou originar estruturas vegetativas (ramos) ou reprodutivas (flores, legumes e grãos), dotando a planta de soja de grande plasticidade morfológica. O número de ramos aumenta com a diminuição da população de plantas e com o aumento do espaçamento entre filas. Os

ramos possuem as mesmas estruturas vegetativas e reprodutivas que o caule (Mundstock & Thomas, 2005).

As gemas axilares, das folhas uni e trifolioladas e dos cotilédones, proporcionam à planta de soja grande capacidade de regeneração. Se o ápice do caule for danificado ou quebrado, as gemas axilares remanescentes não terão mais o efeito inibitório da dominância apical e produzirão ramos. Caso o dano ou quebra da planta ocorra abaixo do nó cotiledonar, ela morrerá, pois não há gemas axilares capazes de regenerar a planta abaixo desse nó. O meristema apical do caule apresenta dominância sobre as gemas axilares durante a fase vegetativa de crescimento (Mundstock & Thomas, 2005).

O desenvolvimento vegetativo da planta de soja é muito importante para o rendimento de grãos, sendo necessário um período de 50 a 55 dias para que a planta esteja morfológicamente preparada, em número de nós no caule e de ramos, para produzir alto rendimento. Durante a fase vegetativa, além da formação do aparato fotossintético, é determinado o número potencial de locais com gemas meristemáticas onde poderá ocorrer o desenvolvimento de estruturas reprodutivas (Costa & Marchezan, 1982), ou seja, o número de nós da planta, que é o somatório dos nós do caule e dos ramos. Portanto, é essencial que se faça o controle adequado de plantas daninhas, insetos pragas e moléstias para o rendimento de grãos não ser afetado pela diminuição do desenvolvimento vegetativo das plantas.

Caso a semeadura seja realizada na época recomendada preferencial, em que está presente a combinação adequada de fotoperíodo, temperatura e disponibilidade hídrica, a planta se desenvolverá normalmente, com o balanço correto entre a duração das etapas vegetativa e reprodutiva. Semeadura realizada antecipadamente à época recomendada, devido à grande duração do período vegetativo, resultará em plantas com excessivo desenvolvimento, estatura elevada e muitos ramos, o que determinará em acamamento e baixo rendimento. Se a época de semeadura for após a época recomendada, o período vegetativo terá duração insuficiente, a planta apresentará baixa estatura, menor número de ramos e os ramos com poucos nós. Se a essas condições for acrescentada a ocorrência de alta temperatura e deficiência hídrica, o efeito negativo é potencializado, e o rendimento de grãos será muito baixo.

Após a indução ao florescimento, que se dá pela combinação entre fotoperíodo e temperatura, a soja inicia o período reprodutivo. Nas variedades de hábito determinado, praticamente cessa a emissão de nós no caule e se acelera o desenvolvimento dos ramos, que aumentam em número e tamanho. Já as variedades de hábito indeterminado continuam a formar nós no caule por mais tempo e desenvolvem poucos ramos (Costa, 1996). Por ocasião do início do florescimento (R1), o acúmulo de 200 g de matéria seca (MS) na parte aérea por metro quadrado é um indicador positivo para alto rendimento da lavoura (Figura 2) (Board & Modali, 2005).

O número total de flores está positivamente associado ao número de nós produzidos pela planta (nós do caule + nós dos ramos), o que interfere diretamente no rendimento de grãos. Por sua vez, o número de flores apresenta a mesma associação com o número de legumes e de grãos (Board & Modali, 2005).

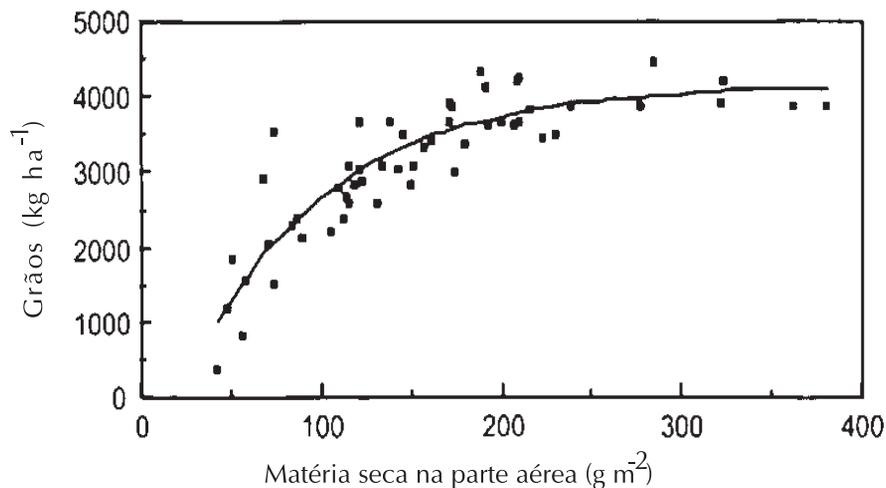


Figura 2. Relação entre matéria seca na parte aérea de plantas de soja no florescimento e o rendimento de grãos.

Fonte: Board & Modali, 2005.

A formação, fixação e desenvolvimento de legumes apresentam papel primordial no incremento do rendimento de grãos, pois determinam o número total de legumes por área, sendo esse o componente mais maleável na composição do rendimento. Nesse estágio ocor-

re rápido crescimento do legume, que atinge cerca de 80% de seu tamanho final, e marca o início do enchimento de grão.

No enchimento de grãos inicia o período de rápido acúmulo de matéria seca e nutrientes nos mesmos, em função da planta atingir o máximo índice de área foliar, desenvolvimento de raízes e fixação de nitrogênio. A existência de acúmulo de 600 g de matéria seca por metro quadrado por ocasião do início de enchimento de grãos é outro indicador de que a lavoura está apta a produzir alto rendimento de grãos (Figura 3) (Board & Modali, 2005). Também acelera-se a redistribuição de nutrientes, carboidratos e compostos nitrogenados provenientes da remobilização das folhas, ramos e caule para os grãos. No final desse estágio, as folhas começam a amarelar e a cair, inicialmente na parte inferior da planta.

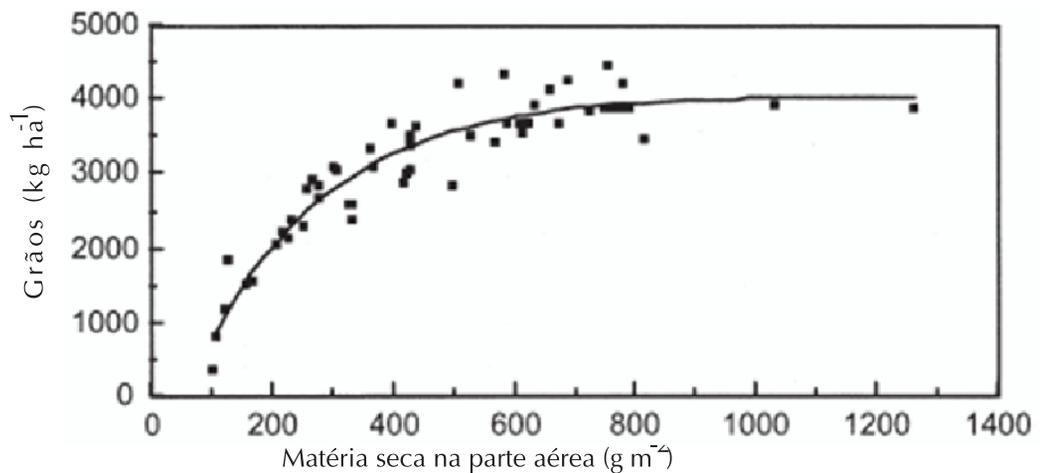


Figura 3. Relação entre matéria seca na parte aérea de soja no início do enchimento de grãos e o rendimento de grãos.

Fonte: Board & Modali, 2005.

A área foliar das plantas deve ser de 3,5 a 4,5 m² para cada m² de área de solo durante o período de enchimento de grãos, para evitar perda de rendimento, proporcionando uma interceptação de cerca de 95% da radiação solar (Board & Harville, 1992). O efeito principal do desfolhamento no rendimento é causado pelo decréscimo na interceptação da radiação solar pelo dossel, o que diminui a atividade fotossintética do mesmo. Isso diminui a taxa de crescimento da

cultura (habilidade da cultura produzir matéria seca) e resulta em perda de rendimento.

O efeito do desfolhamento no rendimento é marcadamente diferente em relação ao estágio de desenvolvimento e ao nível de dano. Na fase vegetativa tolera-se até 30% de desfolhamento, enquanto na fase reprodutiva esse nível diminui para 15% (Reunião, 2009). O desfolhamento no início do enchimento de grãos tem maior efeito negativo no rendimento. O crescimento de folhas termina neste período e o potencial de recuperação é muito limitado, comparado com períodos anteriores. Além disso, o número de legumes e de sementes por área ainda estão sendo determinados. Assim, redução significativa na área foliar e na interceptação de radiação no começo do enchimento de grãos podem resultar numa drástica redução no rendimento pela diminuição do número de legumes, bem como pelo decréscimo no número e tamanho das sementes (Parcianello et al., 2004). Este é o motivo pelo qual os sojicultores são alertados para proteger suas lavouras com fungicidas quando a soja se encontra nos estádios reprodutivos iniciais e o risco de ocorrência de ferrugem é alto.

Quando o início do enchimento de grãos (R5) é alcançado, o peso seco vegetativo se aproxima do máximo e o número final de legumes e sementes está determinado. O índice de área foliar também atinge o nível máximo em R5. Este nível é mantido, mesmo com pequeno desfolhamento, a não ser que algum estresse ocorra durante o período de R5 a R7 (maturação fisiológica). A tolerância da soja ao desfolhamento diminui à medida que o período de enchimento de grãos avança. Finalmente, a senescência normal da planta resulta em rápido desfolhamento mais ou menos na última semana do período de enchimento de grãos.

A maturação fisiológica ocorre quando termina o acúmulo de matéria seca no grão, estabelecendo o rendimento. Neste estágio o grão perde a coloração verde, apresenta em torno de 40 a 50% de umidade e contém todas as estruturas para originar uma nova planta. A partir daí todas as folhas caem, o caule, ramos, legumes e grãos perdem umidade, atingem a coloração característica de estrutura madura de cada cultivar.

A dessecação da soja é uma prática que pode ser utilizada somente em área de produção de grãos, com o objetivo de controlar as plantas daninhas ou uniformizar as plantas com problemas de haste

verde/retenção foliar. Sendo necessária a dessecação em pré-colheita, é importante observar a época apropriada para executá-la. Aplicações realizadas antes da cultura atingir a maturação fisiológica provocam perdas no rendimento. Para evitar que ocorram resíduos no grão colhido, deve observar-se o período de carência entre a aplicação do produto e a colheita. A dessecação em pré-colheita de campos de sementes de soja convencional (não RR) com glifosate não deve ser realizada, uma vez que essa prática acarreta redução de qualidade de semente, diminuindo seu vigor e germinação, devido ao não desenvolvimento das radículas secundárias das plântulas (Tecnologias, 2008).

A maturação de colheita ocorre quando os grãos apresentam menos de 15% de umidade. A soja, quando colhida com teor de umidade entre 13% e 15%, tem minimizados os problemas de danos mecânicos e perdas na colheita. Sementes colhidas com teor de umidade superior a 15% estão sujeitas a maior incidência de danos mecânicos latentes e, quando colhidas com teor abaixo de 12%, estão suscetíveis ao dano mecânico imediato (Reunião, 2009).

2. Componentes do rendimento de grãos

Os componentes primários do rendimento da soja compreendem o número de plantas por área, o número de legumes por planta (ou área), o número de grãos por legume e o peso do grão. Dentre os componentes citados, o número de plantas por área é o que apresenta maior possibilidade de controle.

O número de legumes por planta ou área é considerado o componente do rendimento mais importante quando se buscam aumentos no potencial de rendimento. Isto se deve à grande variação desse componente, o que garante parte da plasticidade fenotípica da soja. A quantidade de legumes é dependente da quantidade de flores produzidas e fixadas durante o período reprodutivo da cultura. A planta de soja produz botões florais em abundância, mas o abortamento dos ovários é muito elevado. O abortamento de flores varia de 40 a 80% em condições normais de lavoura; a abscisão de legumes recém-formados ocorre, na sua maior parte, com o avanço da floração. Portanto, o número de legumes é, primariamente, determinado nos primeiros estádios de desenvolvimento dos legumes (dentro de cinco dias após a antese).

O número de grãos por legume, dentre os demais componentes, é o que apresenta menor variação. Isso foi evidenciado em vários trabalhos, o que demonstra uma uniformidade do melhoramento na busca de plantas com produção de, em média, dois grãos por legume. No entanto, existe variabilidade entre cultivares para produção de legumes com 1, 2 e 3 grãos. Raras vezes são observados legumes com 4 grãos.

O peso do grão representa o tamanho do grão e, portanto, apresenta valor característico de cada cultivar (grãos maiores ou menores). Isto não impede que ele varie de acordo com as condições ambientais e de manejo às quais a cultura seja submetida. O peso de cada grão é o produto da taxa e da duração do período de enchimento de grão; é, normalmente, determinado após a fixação do número de legumes. Tanto do ponto de vista fisiológico (Egli, 2006) como da perspectiva evolucionista (Sadras, 2007), há convergência na identificação do papel-chave do tamanho do grão na determinação do seu número por área. Quanto maior o tamanho, menor o número de grãos por área, embora se possa obter elevados rendimentos tanto com cultivares que apresentam grãos grandes (18g para 100 grãos) como pequenos (12g para 100 grãos). Entretanto, há uma alta relação entre o rendimento e o número de grãos por área, como mostra a Figura 4 (Board & Maricherla, 2008).

Além dos componentes primários do rendimento, a soja apresenta uma série de componentes secundários, que envolvem desde características morfológicas e anatômicas, como distribuição de vasos condutores, número de nós, ramificações, até características fisiológicas, como taxa fotossintética e respiração de crescimento. No entanto, os componentes secundários acabam tendo efeito sobre os componentes primários, podendo ser medidos indiretamente através destes últimos (Pires et al., 2005).

Estresses, como deficiência hídrica, desfolhamento e incidência de moléstias foliares, aumentam a taxa de abortamento de legumes ou diminuem o tamanho dos grãos ou ambos, dependendo da época de ocorrência do estresse. Quando o estresse ocorre durante o florescimento e o início do desenvolvimento dos legumes, o número de legumes é reduzido. Quando o estresse ocorre durante o enchimento de grãos, o tamanho do grão é diminuído e o número de legumes permanece praticamente o mesmo (Boote et al., 1994).

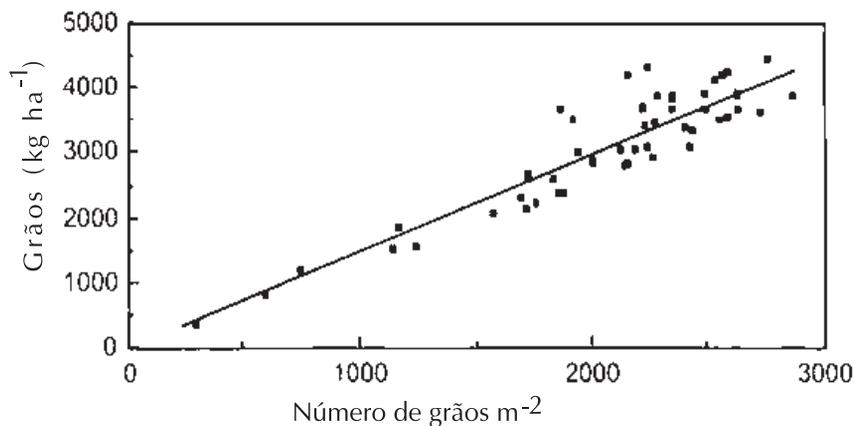


Figura 4. Relação entre o número de grãos por área e o rendimento de grãos em soja. Fonte: Board & Maricherla, 2008.

A deficiência hídrica é o fator mais limitante da produtividade da soja no mundo. O rendimento é significativamente afetado, particularmente quando o estresse hídrico ocorre durante o florescimento e no início da expansão dos legumes. A perda ocorre, principalmente, pelo aumento da taxa de aborto de legumes (o estágio crítico ocorre de 3 a 5 dias após a antese), resultando em menor número de grãos por unidade de área. As limitações ao rendimento são, muitas vezes, atribuídas a restrições na fonte (menor área foliar para realizar fotossíntese) ou na demanda (menor número de legumes por área) (Ahsley & Ethridge, 1978; Boerma & Ahsley, 1982).

3. Extração de nutrientes pela planta e rendimento de grãos

A quantidade de nutrientes extraída pela soja é função da matéria seca total produzida. A matéria seca acumulada, por sua vez, se a quantidade de nutrientes for adequada, é dependente das condições meteorológicas ocorrentes durante o ciclo de desenvolvimento, principalmente precipitação e temperatura. Entende-se que, além das condições químicas, as condições físicas do solo devem ser favoráveis para o desenvolvimento das plantas.

Os dados de acúmulo de matéria seca (Figura 5) e nutrientes através do tempo mostram que, na fase inicial de desenvolvimento, a velocidade de acúmulo é baixa, aumentando progressivamente com o tempo, atingindo o máximo entre o florescimento e o início do enchimento dos grãos (R5). O acúmulo de matéria seca nos grãos inicia em R5 e continua na mesma proporção até a maturação fisiológica (R7). A taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos durante este período varia de 70 a 100 kg/ha/dia.

Não só a quantidade total retirada é importante, como também a velocidade com que a matéria seca é acumulada e os nutrientes absorvidos, por dar uma indicação da forma na qual os nutrientes devem ser fornecidos (disponibilidade) e dos estádios críticos de desenvolvimento da planta nos quais a absorção ocorre com maior intensidade.

Altos rendimentos são obtidos quando as condições ambientais são favoráveis em todos os estádios de desenvolvimento. Condições desfavoráveis nos estádios iniciais limitam o tamanho das folhas, ou seja, o aparato fotossintético. Em estádios mais avançados, particularmente nos reprodutivos, pode resultar em redução no número de flores, no número de legumes, no número de grãos por legume e no tamanho dos grãos.

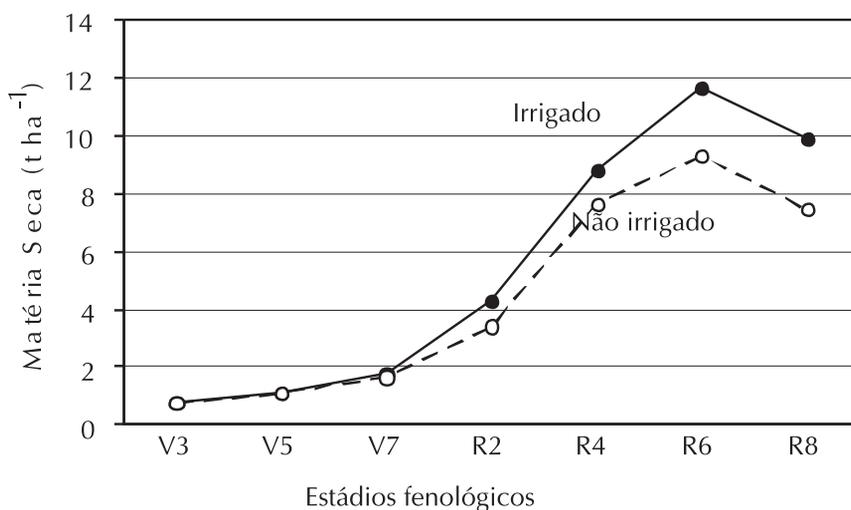


Figura 5. Matéria seca na parte aérea, em dois regimes hídricos, na média de duas cultivares de soja e três espaçamentos entre fileiras.

Fonte: Maehler, 2000.

A maior parte do nitrogênio, fósforo, potássio, molibdênio, zinco, enxofre e cobre absorvidos pela planta é translocada da parte vegetativa para os grãos, enquanto cálcio, magnésio, boro, ferro e manganês permanecem nos restos de cultura (Tabelas 1 e 2).

Como a quantidade de nitrogênio removida é apreciável, torna-se importante proporcionar as melhores condições possíveis para que a simbiose entre a bactéria e a planta de soja funcione no máximo do seu potencial, fornecendo grande parte do nitrogênio que a planta necessita para a produção de rendimentos elevados (Johnston & Milford, 2009).

A obtenção de rendimentos altos requer nutrição mineral adequada. Mas, apenas adequar a nutrição mineral não é suficiente. É necessário também que outros fatores de crescimento sejam supridos numa combinação apropriada.

Tabela 1. Quantidades estimadas de nitrogênio, fósforo e potássio extraídas pela soja.

Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)	Quantidades na parte aérea da planta (caule, folhas e grãos)			Quantidades de nutrientes nos grãos		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
 Kg ha ⁻¹ Kg ha ⁻¹		
2000	166	28	70	112	20	38
3000	247	42	110	163	32	59
4000	324	58	164	215	43	89
5000	403	71	205	268	52	111

Fonte: Adaptado de Borkert, 1986.

Tabela 2. Quantidades estimadas de cálcio, magnésio e enxofre extraídas pela soja.

Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)	Quantidades na parte aérea da planta (caule, folhas e grãos)			Quantidades de nutrientes nos grãos		
	Ca	Mg	S	Ca	Mg	S
 Kg ha ⁻¹ Kg ha ⁻¹		
2000	18	7	19	3,9	3,0	6,4
3000	23	13	24	5,0	5,3	8,0
4000	28	18	37	6,2	7,2	12,2
5000	34	22	47	7,5	8,8	15,4

Fonte: Adaptado de Borkert, 1986.

Do ponto de vista fisiológico, as deficiências de nutrientes resultam, primeiramente, na inibição do crescimento ou da utilização dos produtos formados na fotossíntese.

As plantas que sofrem de deficiência de nutrientes, por um dia ou mesmo parte de um dia, durante período crítico do desenvolvimento, não podem ser classificadas como adequadamente nutridas. Portanto, o conhecimento das necessidades diárias de nutrientes para a planta de soja é fundamental para proceder uma adubação racional.

A absorção de nutrientes dissolvidos na solução do solo vai variar em função das condições meteorológicas, da cultivar e do nível de fertilidade. A quantidade de nutrientes necessária, no início do crescimento, é pouca, porque a demanda pelas plantas é pequena. No entanto, alta concentração de nutrientes na rizosfera, nessa ocasião, é importante no desenvolvimento inicial, determinando o tamanho das primeiras folhas, possibilitando desenvolvimento inicial rápido da planta. Por outro lado, uma planta bem nutrida se torna mais resistente ao ataque de insetos e moléstias nessa fase crítica, particularmente em relação ao potássio.

As plantas podem nutrir-se e crescer somente com a umidade do solo acima do ponto de murcha. À medida que o teor de umidade do solo se aproxima do mesmo, vai diminuindo a eficiência da planta quanto à absorção. Assim, os teores de umidade mais próximos da capacidade de campo são os mais favoráveis à nutrição das plantas (Floss, 2004).

A absorção dos nutrientes aumenta com a elevação da temperatura até um ótimo, em geral na ordem de 35 a 40 °C, além da qual decresce, e, por fim, em consequência principalmente das alterações sofridas pelas enzimas envolvidas no processo de absorção, cessa.

Como a absorção pelas raízes não é um processo meramente passivo, de simples difusão osmótica, mas requer energia para a sua total realização, e, como essa energia procede da respiração, é fundamental a presença de oxigênio em quantidades adequadas no solo, o que só ocorre onde não existe compactação excessiva.

A luz é outro fator que influencia a absorção dos minerais. O efeito direto é o de promover a formação dos carboidratos utilizados na respiração, que é o processo fornecedor de energia para aquele fenômeno. Indiretamente, a intensidade luminosa influi na absorção de elementos minerais, através da maior atividade fotossintética, que

resulta em maior acúmulo de matéria seca pela planta e, conseqüentemente, maior necessidade de elementos minerais.

A extração de nitrogênio, fósforo e potássio se faz em taxa relativamente constante, da floração até o máximo volume dos grãos. As plantas que estão nutridas adequadamente podem retirar quantidade maior de nutrientes do que necessitam para utilização imediata. Estes nutrientes são armazenados em tecidos mais velhos, para serem redistribuídos para tecidos com maior demanda, em períodos em que a extração não satisfaz as necessidades imediatas. Todos os nutrientes minerais são translocados, em graus diferentes, durante o crescimento e desenvolvimento da planta. A maior porção do nitrogênio e fósforo e parte do potássio são translocados de diferentes partes da planta para os grãos.

Quando o solo não apresenta condições de suprir as necessidades das plantas em nutrientes, deve-se fazer adubação para complementar a disponibilidade. A retirada dos nutrientes adicionados não é um processo eficiente. Em boas condições, o aproveitamento do fósforo varia de 5 a 20%. Para o potássio, o aproveitamento é de 30 a 60%. Os micronutrientes tem aproveitamento da ordem de 0,01 a 5%. Ocasionalmente, a retirada poderá ser maior e, em outros casos, em condições limitantes, o aproveitamento poderá cair abaixo do valor mínimo.

No solo existem componentes vivos e mortos que competem pelo adubo aplicado. A parte viva, composta pela microflora e pela microfauna, compete com as plantas pelos nutrientes. No entanto, o que é usado por esses microrganismos volta ao solo, quando eles morrem. As frações argila e matéria orgânica também competem com as plantas. O que é fixado por estas frações raramente se torna disponível para as plantas, a menos que as condições de ambiente do solo mudem.

Na maturação os grãos contêm, aproximadamente, 75% do nitrogênio e do fósforo e 60% do potássio absorvidos pela planta. Esta retirada, relativamente elevada, de nutrientes contidos nos grãos, deve ser levada em conta no manejo da fertilidade do solo.

4. Considerações finais

Tudo começa com a semente. A boa semente. A semente de qualidade. A semente é a síntese dos últimos avanços tecnológicos existentes para originar plantas de alto potencial de rendimento.

Estas sementes devem ser colocadas num solo com ambiente favorável, que se constitui de disponibilidade hídrica adequada, temperatura favorável, nutrientes disponíveis em quantidades suficientes e presença de microflora e microfauna amigáveis. Essa semente absorve água, que vai solubilizar as enzimas e iniciar o processo de germinação. Após algum tempo, que será variável de acordo com a temperatura do solo, originará, através da emergência, uma planta vigorosa.

Se a semeadura for realizada na época recomendada preferencial, em que está presente a combinação adequada de fotoperíodo, temperatura e disponibilidade hídrica, a planta se desenvolverá normalmente, com o balanço correto entre a duração das etapas vegetativa e reprodutiva.

Durante a etapa vegetativa, a planta formará estrutura adequada de caule e ramos para, primeiramente, originar área foliar suficiente para interceptar a radiação incidente, número suficiente de ramos necessários para o surgimento de locais de aparecimento das estruturas reprodutivas, os nós. O sucesso da fixação dessas estruturas, flores, legumes e grãos, resultará em alto rendimento de grãos.

Semeadura realizada antecipadamente à época recomendada, devido à grande duração do período vegetativo, resultará em plantas com excessivo desenvolvimento, estatura elevada e muitos ramos, o que determinará acamamento e baixo rendimento. Se a época de semeadura for após a época recomendada, o período vegetativo terá duração insuficiente, a planta apresentará baixa estatura, menor número de ramos e os ramos com poucos nós. Se a essas condições for acrescentada a ocorrência de alta temperatura e deficiência hídrica, o efeito negativo é potencializado, e o rendimento de grãos será muito baixo.

Quando são usadas variedades “piratas”, não adaptadas nem testadas nas condições brasileiras, razão pela qual não se conhece o seu comportamento e potencial de rendimento, pode haver sérios prejuízos para o produtor.

O alcance do rendimento potencial só será possível no sistema de produção que começa com o plantio direto de qualidade. Esse inicia com a correção das condições físicas e químicas do solo com insumos de qualidade, e manutenção dessas condições, para produzir palhada, que vai funcionar como proteção do solo da radiação que destrói a microvida. Além disso, vai ajudar a conservar a umidade no solo por mais tempo, permitindo que as plantas mantenham seu turgor e possam, assim, alcançar o tamanho potencial de células, caule, folhas e ramos, produzir e fixar o maior número possível de flores, legumes e grãos. A microflora e microfauna também serão beneficiadas pela maior disponibilidade hídrica do solo.

A palha também funcionará como herbicida, não permitindo ou minimizando a infestação por plantas daninhas. Vai recompor a matéria orgânica e fornecer nutrientes para a solução do solo.

Partindo dessa base qualificada, empregam-se outras práticas de manejo recomendadas, como inoculação das sementes com produto de qualidade e em quantidade suficiente, em uma forma de aplicação que preserve as bactérias, como a inoculação no sulco; uso de semeadeira de precisão, para que as sementes sejam colocadas uniformemente nas fileiras, não permitindo a existência de plantas “dominadas”, que além de produzirem muito pouco, funcionam como invasoras para as plantas normais. As recomendações atuais de diminuição da população de plantas para, praticamente, a metade do anteriormente recomendado (250 a 300 mil plantas por hectare), exigem uniformidade de distribuição das plantas na área para a obtenção de alto rendimento. Resultados de pesquisa também têm mostrado que a diminuição do espaçamento entre fileiras, na maioria das vezes e para muitas cultivares, tem levado ao aumento de rendimento.

5. Referências

AHSLEY, D.A.; ETHRIDGE, W.J. Irrigations effects on vegetative and reproductive development of three soybean cultivars. *Agronomy Journal*, v.70, p.467-471, 1978.

- BOARD, J.E.; HARVILLE, B.G. Explanations for greater light interception in narrow-vs.-wide-row soybean. *Crop Science*, v.32, p. 198-202, 1992.
- BOARD, J.E.; MARICHERLA, D. Explanation for decreased harvest index with increased yield in soybean. *Crop Science*, v.48, 1995-2002, 2008.
- BOARD, J.E.; MODALI, H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybeans. *Crop Science*, v. 45, 1790-1799. 2005.
- BOERMA, H.R.; ASHLEY, D.A. Irrigation, row spacing, and genotype effects on late and ultra-late planted soybeans. *Agronomy Journal*, v.74, p.995-999, 1982.
- BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, TR; PAULSEN, G.M. (EDS.). *Physiology and determination of crop yield*. Madison: American Society of Agronomy. 1994. 601 p.
- BORKERT, C.M. Extração de nutrientes pela soja. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 14., 1986, Chapecó. *Anais...* Chapecó: EMPASC/EMBRAPA-CNPSO, p.164-5.
- COSTA, J.A. Cultura da soja. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996, 233 p.
- COSTA, J.A.; MARCHEZAN, E. *Características dos estádios de desenvolvimento da soja*. Campinas: Fundação Cargil, 1982. 30p.
- EGLI, D.B. The role of the seed in the determination of yield of grain crops. *Australian Journal of Agriculture Research*, v. 57, p.1237-1247, 2006.
- FLOSS, E.L. *Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo que está por trás do que se vê*. Passo Fundo: UPF, 2004.
- FRANÇA NETO, J.B.; KRZYZANOWSKI, F.C.; PADUA, G.P.; COSTA, N.P.; HENNING, A.A. *Tecnologia da produção de sementes de soja de alta qualidade*. Londrina:EMBRAPA-CNPSO, 2007. 12 p. (EMBRAPA – CNPSO. Circular Técnica, 40).
- FRANÇA NETO, J.B.; MANDARINO, J.M.G.; ROCKENBACH, S.R.; CARVALHO, P.G.B.; SAKAMOTO, M.M.Y.; ZORATO, M.F.; KRZYZANOWSKI, F.C. Efeito do enrugamento da semente de soja causado por estresses térmico e hídrico durante a fase de enchimento de grãos sobre a qualidade do grão de soja. In: *Resultados de pesquisa da EMBRAPA-SOJA 1993/95*. Londrina: EMBRAPA SOJA, 1997, p.129-130. (EMBRAPA CNPSO. Documentos, 100).
- JOHNSTON, A.E.; MILFORD, G.F.J. *Potassium and nitrogen interactions in crops*. Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire AL52JG. 2009. 8p. Potash Development Association. Disponível em: <http://www.pda.org.uk/notes/tn19.asp?p=y>. Acesso em 05 out 2009.

KOLCHINSKI, E.M.; SCHUCH, L.O.B.; PESKE, S.T.; Vigor de sementes e competição intra-específica em soja. *Ciência Rural*, v. 35. n.6. p. 1248-1256, 2005.

KRZYZANOWSKI, F.C.; FRANÇA NETO, J.B.; HENNING, A.A.; COSTA, N.P. *O controle de qualidade agregando valor à semente de soja*. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 2008a. 11 p. (EMBRAPA-CNPSo. Circular Técnica, 54).

KRZYZANOWSKI, F.C.; NETO, J.B.; HENNING, A.A.; COSTA, N.P. *A semente de soja como tecnologia e base para altas produtividades*. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 2008b. 8 p. (EMBRAPA-CNPSo. Circular Técnica, 55).

MAEHLER, A.R. *Crescimento e rendimento de duas cultivares de soja em resposta ao arranjo de plantas e regime hídrico*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, 2000. 107p.

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. *Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos*. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 31 p.

PARCIANELLO, G.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F., RAMBO, L.; SAGIN, K. Tolerância da soja ao desfolhamento afetada pela redução do espaçamento entre fileiras. *Ciência Rural*, v. 34, n. 2, p. 257-364, 2004.

PIRES, J.L.F.; CUNHA, J.R. da; THOMAS, A.L. Fatores promotores de rendimento em modelos de produção para a soja. In: SANTOS, HP dos.; FONRANELI, R.S.; SPERA, S.T.; PIRES, J.L.; TOMM, G.O. (Ed.) *Eficiência de soja cultivada em modelos de produção sob sistema plantio direto*. EMBRAPA Trigo, Passo Fundo, RS. 2005. 248 p.

PIRES, J.L.F. *Estimativa do potencial produtivo da soja e variabilidade espacial de área de produção*. Tese (Doutorado – Plantas de Lavoura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, 2002. 136p.

REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 37., 2009, Porto Alegre. *Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2009/2010*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 144p.

SADRAS, V.O. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Research*, v.100, p.125-138, 2007.

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE SOJA – REGIÃO CENTRAL DO BRASIL – 2009 E 2010. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados : Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 262p.

TESAR, M.B. (Ed.). *Physiological basis of crop growth and development*. Madison: American Society of Agronomy, 1984. 341 p.

WILCOX, J.R. (Ed.). *Soybeans: improvement, production, and uses, 2nd ed.* Agronomy Monograph no. 16. Madison: American Society of Agronomy, 1987. 888 p.

Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto

*Telmo J.C. Amado¹; Jairo A. Schleindwein²
& Jackson E. Fiorin³*

1. Introdução

A obtenção de elevados rendimentos é o resultado de uma complexa interação de fatores de clima, planta e solo. Neste capítulo a ênfase será dada às condições de solo que devem ser alcançadas para que, quando os demais fatores climáticos e de manejo da cultura sejam atendidos, possa haver a obtenção de elevados rendimentos.

Uma das críticas frequentes feita ao manejo do solo nas últimas quatro décadas é relativa à ênfase dada aos atributos químicos do solo que determinam a sua fertilidade e a nutrição das plantas, relegando ao segundo plano os atributos físicos e biológicos do solo, também importantes para a obtenção de elevados rendimentos. Tal percepção, em solos tropicais e subtropicais intemperizados, inicialmente justificava-se, pois muitos destes solos eram originalmente ácidos e com baixa fertilidade natural, apresentando por outro lado, elevada profundidade de perfil, estoque de matéria orgânica do solo (MOS)

¹ Professor Associado, Bolsista do CNPq. Departamento de Solos, UFSM, Santa Maria-RS, CEP 97119-900. E-mail: tamado@smail.ufsm.br

² Professor Adjunto da UNIR. E-mail: jairojas@terra.com.br

³ Pesquisador Dr. da Fundacep. E-mail: jackson@fundacep.com.br

semelhante às condições naturais (mata ou campo) e favoráveis condições físicas do solo. Com isto, as primeiras limitações à obtenção de elevados rendimentos a serem superadas foram a acidez e a baixa fertilidade, expressas principalmente pela baixa disponibilidade de fósforo. Porém, à medida que estes solos foram cultivados, especialmente sob preparo convencional, verificou-se que a melhoria das condições de fertilidade, via aplicação de insumos, não foi acompanhada pela manutenção da qualidade das propriedades físicas e biológicas do solo. Em consequência, verificou-se o gradual decréscimo do potencial produtivo do solo como resultado da degradação associada à erosão hídrica, anulando parcialmente as melhorias genéticas e de manejo da cultura. O decréscimo do teor de matéria orgânica do solo (MOS) foi o indicador mais sensível desta alteração no potencial produtivo do solo. Estima-se que, historicamente, sob preparo convencional, houve um decréscimo de 30 a 50% do estoque de matéria orgânica dos solos agrícolas (Schlesinger, 1985). Este decréscimo diminuiu o potencial produtivo dos solos comprometendo os rendimentos alcançados.

Atualmente, trata-se por qualidade do solo a interação de atributos químicos, físicos e biológicos que permitem que o solo atue como um regulador ambiental, ainda promova a sanidade de plantas e animais e mantenha a produtividade biológica (Doran & Parkin, 1994; Vezzani, 2001). A expansão do sistema plantio direto, a partir da década de 90, tem proporcionado o controle da erosão e a recuperação gradual do estoque de MOS.

À medida que ocorre a recuperação do teor de MOS verifica-se um gradual incremento da capacidade produtiva do solo. Este fato está associado à melhoria da fertilidade, com substancial aumento da capacidade de troca de cátions (CTC), e da melhoria da estrutura do solo, pelo incremento da agregação, com reflexo positivo na infiltração e armazenamento da água. Além disto, a atividade biológica também é favorecida pela recuperação do teor de MOS, incrementando a ciclagem de nutrientes. Vezzani (2001) e Conceição et al. (2005) propõem que, de acordo com o manejo do solo adotado, diferentes níveis hierárquicos de qualidade são alcançados. Neste enfoque, o solo é entendido como um sistema aberto, sujeito a transformações de acordo com o fluxo de energia e matéria a que está submetido. Práticas de manejo, como a mínima perturbação, elevada adição de

resíduos vegetais, permanente cobertura e elevada taxa de fotossíntese, favorecem a organização do sistema solo e, conseqüentemente, a melhoria da sua qualidade. No nível mais elevado de qualidade do solo, propriedades emergentes, tais como resistência à erosão, alta infiltração e armazenamento de água, ciclagem de nutrientes, intensa atividade biológica, resiliência e macroagregação, se manifestam (Mielniczuk et al., 2003). Pelo exposto, constata-se que, para obtenção e manutenção de elevados rendimentos, há necessidade de que o solo também apresente elevada qualidade, expressa pela interação de atributos físicos, químicos e biológicos.

A elevada qualidade do solo proporcionará condições para que a planta possa utilizar de forma eficiente os recursos disponíveis (radiação solar, nutrientes, água, etc), transformando-os em alto rendimento. A expansão do sistema plantio direto na cultura da soja, que atinge aproximadamente 80% da área cultivada no RS, tem possibilitado a gradual melhoria da qualidade do solo. Esse fator, aliado ao aprimoramento das práticas de manejo, vem proporcionando o incremento da produtividade da cultura (Tabela 1). A instabilidade climática a que o RS está sujeito faz com que haja uma alternância acentuada de rendimentos, resultando em baixa média de rendimentos. A produtividade média do RS é 52% inferior à do MT, estado com maior rendimento nacional. Porém, quando se analisam os dez municípios tradicionais de ambos os estados, num período de dez anos, a média do RS passa a ser 28% inferior à do MT. Analisando apenas o ano de maior rendimento nestes mesmos municípios, verifica-se inclusive que o RS tem rendimento médio 6% superior ao MT. Os resultados apresentados sugerem que as diferenças de rendimento entre os estados estão mais associadas a fatores climáticos do que a qualidade do solo ou a práticas de manejo adotado.

2. Manejo da Fertilidade do Solo

O sistema plantio direto induziu profundas mudanças nos atributos químicos do solo e na dinâmica de nutrientes, exigindo a utilização de novos procedimentos e técnicas de manejo em relação às que-las adotadas anteriormente sob sistema convencional (Schlindwein, 1999). Os três principais requisitos da agricultura conservacionista são:

mínima mobilização, permanente cobertura do solo e rotação de culturas (Derpsch & Benites, 2004). Estes princípios podem ser plenamente atendidos pelo sistema plantio direto com rotação de culturas. Seguindo estes princípios de manejo, a aplicação de corretivos e fertilizantes deve ser feita, preferencialmente, a lanço sobre a superfície do solo, ou no sulco próximo a fileira de semeadura das culturas, ou ainda em subsuperfície, porém sempre atendendo ao pré-requisito de mínima mobilização do solo. A prática de incorporação de corretivos e fertilizantes através de implementos como o arado e grade de disco, que promovem inversão e homogeneização de camadas de solo, deveria ser restrita ao momento da implantação do sistema, e, mesmo assim, somente quando os atributos físicos, como compactação e baixa taxa de infiltração, ou químicos, como toxidez de alumínio ou baixa disponibilidade de P, assim o requererem. Esta recomendação deve-se a que os efeitos negativos do preparo com inversão de camadas do solo, como o decréscimo da MOS e da agregação, podem se manifestar por vários anos após a sua prática.

Tabela 1. Rendimento médio da soja no Brasil, nos estados do RS, MT e municípios tradicionais nesses estados, médias de 10 e de 5 anos, e ano de maior rendimento médio.

Local	Média de 10 anos	Média de 5 anos	Maior Rendimento
	----- kg ha ¹ -----		
Brasil	2424	2558	2802 (2003) ¹
RS	1846	1939	2667 (2003) ¹
MT	2810	2965	3060 (2002) ¹
10 municípios no RS ²	2230	2394	3266
10 municípios no MT ²	2861	3032	3087
20 municípios no RS ²	2204	2353	3146
20 municípios no MT ²	2832	2889	3081

¹ Ano de maior rendimento médio no Brasil e nos Estados do RS e MT.

² Municípios tradicionais produtores de soja com os maiores rendimentos. Fonte: Adaptado de IBGE, 2005.

As fertilizações superficiais ou subsuperficiais, ao longo dos anos, acrescidas das deposições superficiais de resíduos (palhada) induzem à formação de gradiente vertical de atributos químicos (Eltz et al., 1989; Schindwein & Anghinoni, 2000). Sidiras & Pavan (1985) observaram

que, sob sistema plantio direto, os valores de pH, Ca + Mg trocáveis, K trocável e P extraível, além da MOS, aumentaram na camada superficial (0-10 cm) quando comparados às demais camadas de solo. Este fato, diferencia, acentuadamente, o sistema plantio direto do sistema de preparo convencional.

3. Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo

A dinâmica da MOS sob sistema de cultivos tem sido considerada como o indicador mais sensível de alteração da qualidade do solo (Conceição et al., 2005; Garcia, 2002). Este fato deve-se à participação da MOS em numerosas propriedades do solo, como físicas (densidade, retenção de água, permeabilidade, capacidade de disponibilidade de água, agregação, resistência à compactação, calor e temperatura), químicas (reserva de nutrientes, pH, capacidade de troca de cátions, capacidade tampão, formação de quelatos), biológicas (biomassa microbiana, atividade biológica, biofrações lábeis de nutrientes) e ecológicas (biodiversidade, sequestro de carbono, resiliência e formação de complexos organo-metálicos que reduzem a atividade de elementos chenobióticos) (Garcia, 2003; Amado & Costa, 2004).

O sistema plantio direto tem se mostrado o mais eficiente em promover o incremento do estoque de MOS. Este resultado está relacionado à redução na taxa de oxidação biológica devido à combinação dos seguintes fatores: redução da temperatura do solo, menor oxigenação e menor perturbação do solo, preservação e incremento da agregação, que tem sido considerada como um dos principais mecanismos de proteção do carbono adicionado ao solo (Amado et al., 2005). Além dos mecanismos de proteção e estabilização da MOS, deve-se destacar a importância da adição de elevada e diversificada quantidade de resíduos vegetais, através de um programa de rotação de culturas. Portanto, a dinâmica da MOS é determinada por um balanço entre perdas, que podem ser diminuídas pela adoção do sistema plantio direto, e ganhos, que podem ser incrementados pela rotação de culturas.

A soja apresenta limitado aporte quantitativo de resíduos culturais ao solo. Além disto, possui relação C/N baixa, fato que favorece a rápida decomposição. Assim, essa leguminosa, quando utilizada em

monocultivo ou com grande frequência no programa de rotação de culturas, pode promover inclusive o decréscimo do estoque de MOS, mesmo sob sistema plantio direto (Havlin et al., 1990; Garcia, 2003). Este efeito pode, no entanto, ser contrabalanceado pela utilização de culturas de inverno, como aveia preta, azevém, centeio e trigo, ou pela rotação de culturas no verão, como milho ou sorgo. De fato, tem se observado que, em rotação de culturas, a soja aporta nitrogênio oriundo da fixação biológica, promovendo incremento na produção de matéria seca das culturas em sucessão, o que resulta em expressivos ganhos no estoque de MOS. Campos (2004), em experimento de longa duração conduzido em Cruz Alta (RS), observou que os maiores incrementos de MOS foram obtidos sob sistema plantio direto com a soja inserida num programa de rotação de culturas (Figura 1).

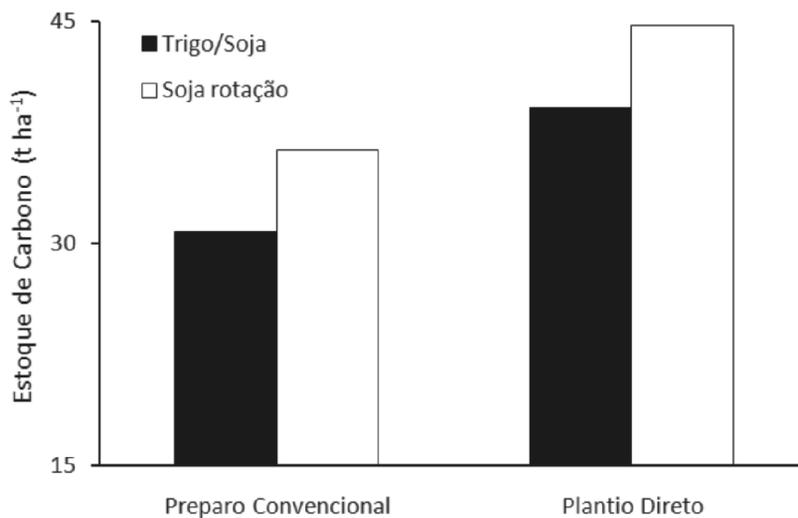


Figura 1. Estoque de carbono no solo, principal constituinte da matéria orgânica, sob sistemas de cultivo.

Fonte: Adaptado de Campos, 2004.

A utilização de pastagens em um sistema de rotação com a cultura da soja também é eficiente estratégia de incremento da MOS. No cerrado brasileiro, sistemas como o Santa-Fé e o Barreirão, que utilizam forrageiras (*Brachiaria* spp. e *Panicum* spp.) na entressafra da soja ou do milho, têm se mostrado eficientes em recuperar o estoque de MOS (Kluthcouski et al., 2000). Deve-se destacar que o carbono adi-

cionado pelas raízes é quase duas vezes mais efetivo em formar MOS do que o adicionado pela parte aérea das culturas (Mielniczuk et al., 2003). As pastagens por alocarem a maior parte dos fotossintetizados nas raízes, as quais desempenham papel fundamental na agregação e, conseqüentemente, na proteção do carbono adicionado, proporcionam maiores teores de MOS. Os exsudatos das raízes, que podem aportar até 30% do carbono presente na matéria seca, também são importante fonte de carbono ao solo, ainda pouco estudados (Sá et al., 2004).

A MOS é um reservatório de vários nutrientes essenciais para as plantas. Durante a fase de implantação do sistema plantio direto, a MOS poderá atuar inclusive como um dreno de nutrientes. Por outro lado, em plantio direto consolidado a MOS será uma fonte de nutrientes para as plantas. Um solo com 3% de MOS na camada de 0-20 cm possui, aproximadamente, 3000 a 3600 kg ha⁻¹ de N, 270 a 360 kg ha⁻¹ de P e 270 a 360 kg ha⁻¹ de S (Garcia, 2003). No entanto, esta reserva de nutrientes não está prontamente disponível para as plantas, pois depende do processo de decomposição da MOS. Este processo ocorre em intensidade variável, dependendo das condições climáticas (temperatura e umidade) e sistema de manejo adotado, porém representa um importante complemento a outras fontes de fertilização, como a mineral. Principalmente porque, diferente da maioria dos fertilizantes minerais, é capaz de suprir de forma gradual e equilibrada muitos macro e micronutrientes.

Vários trabalhos têm demonstrado que a MOS é a principal responsável pela CTC de solos tropicais e subtropicais. A MOS contém 58% de carbono, que é seu principal componente. Bayer & Mielniczuk (1997) encontraram uma relação linear positiva entre o carbono total no solo e a CTC. Além disto, Bayer (1996) e Sá (1993) também encontraram uma relação linear entre quantidade de resíduos adicionados ao solo e o teor de carbono orgânico total sob sistema plantio direto. Portanto, em solos ácidos, além do manejo químico do solo através da calagem, visando elevar o pH e a CTC, deve-se buscar a gradativa elevação da CTC via incremento da MOS, que pode ser obtida através de elevadas adições de resíduos culturais e mínima mobilização. O incremento da CTC do solo reduz as perdas de nutrientes por lixiviação e, conseqüentemente, aumenta a eficiência das fertilizações minerais.

Pontelli (2006), utilizando as ferramentas da agricultura de precisão sob sistema plantio direto constatou que a MOS, na camada de 0 a 10 cm, foi o atributo de solo que melhor se correlacionou com o rendimento de soja, com valores variando de 0,32 a 0,48. O autor estabeleceu de forma preliminar a relação entre o teor de MOS e o rendimento de soja, com base em mapas de rendimento obtidos em anos normais de precipitação (2002 e 2003) sob Latossolo Vermelho distrófico típico em Palmeira das Missões (RS) (Figura 2). O teor crítico (90% do rendimento relativo (RR)) foi de 3,2%, e o teor de 4,1 % correspondeu à máxima eficiência técnica (MET) (100% do RR). Os valores apresentados servem como uma referência e necessitam ser confirmados por uma base maior de dados, uma vez que níveis críticos de teor de MOS são de difícil determinação, devido à sua natureza não uniforme e às múltiplas funções desempenhadas por ela no solo (Carter, 2001). No entanto, o valor de MOS que maximizou os rendimentos de soja em Palmeira das Missões foi semelhante ao encontrado sob condição de campo nativo.

O aporte de nitrogênio (N) tem se constituído em importante estratégia para o aumento da MOS. Com o aumento da disponibilidade de N, verifica-se um incremento da produção de biomassa das gramíneas, e mesmo de crucíferas, como o nabo forrageiro, cultivadas em rotação com a soja, resultando em maiores taxas de incremento da MOS. Outro fator a ser considerado é que a relação C/N da MOS está na faixa de 10 a 13:1, portanto para cada 1 t ha⁻¹ de incremento de carbono no solo sob sistema plantio direto, há uma demanda de 100 kg ha⁻¹ de N. Como os microrganismos são mais eficientes que as plantas em absorver o N do solo, é comum verificar déficit inicial de N sob sistema plantio direto. No entanto, este efeito é temporário; com o tempo de adoção do sistema plantio direto a disponibilidade de N aumenta (Sá, 1993). A utilização de adubação mineral nitrogenada ou orgânica em culturas utilizadas no programa de rotação com a soja, como milho, trigo e aveia, tem se mostrado eficiente estratégia para aumentar o estoque de MOS (Studdert & Echeverria, 2002; Garcia, 2003). Alternativamente, pode-se incrementar, na fase de implantação do sistema plantio direto, a participação de leguminosas no programa de rotação, como a ervilhaca, tremoço e ervilha forrageira, cultivadas em consórcio ou isoladas.

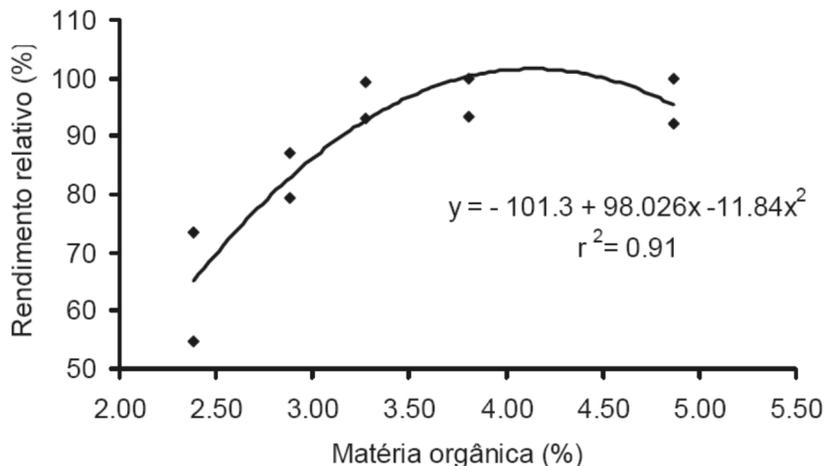


Figura 2. Relação entre o teor de matéria orgânica do solo, na camada 0-10 cm, e o rendimento de soja nos anos de 2002 e 2003. Palmeira das Missões, RS. Fonte: Pontelli, 2006.

4. Dinâmica do Nitrogênio

4.1. Nitrogênio na soja

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pela soja, podendo ser suprido pelo N mineral do solo, a partir da decomposição da MOS, pela associação simbiótica da leguminosa com bactérias das espécies *Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii*, e por adubos nitrogenados minerais e orgânicos. A decomposição dos resíduos da cultura antecessora constitui outra fonte de N à soja, porém sua contribuição imediata é limitada, quando forem utilizadas gramíneas (Fiorin et al., 1998; Klarmann, 2004).

A soja, além de apresentar elevada demanda de N durante o seu ciclo, tem elevada exportação quando da colheita, alcançando até 84% do total absorvido (Bataglia & Mascarenhas, 1977). Sfredo (1986) verificou que a fase crítica para suprimento do N à cultura ocorre a partir dos 40 dias após a emergência (DAE), prolongando-se até o máximo acúmulo de matéria seca, que em geral verifica-se entre os 80 e 92 DAE. Lamond & Wesley (2001) constataram que a demanda

por N na soja atinge o pico máximo entre os estádios de início de florescimento (R1) e máximo volume de grãos (R6).

O N é um elemento muito móvel na planta, sua redistribuição ocorre das partes mais velhas para as mais novas, que se encontram em fase de crescimento. Maehler et al. (2003) relataram intensa realocação de reservas durante o período de enchimento de grãos da soja, aumentando o teor de N nos grãos em detrimento das folhas.

4.2. Nitrogênio no solo e a fixação biológica de nitrogênio

Segundo Hungria et al. (2000), a soja necessita de 80 kg de N para a produção de 1 tonelada de grãos. Assim, para alcançar um rendimento de 4000 kg ha⁻¹, a soja necessita absorver, aproximadamente, 320 kg ha⁻¹ de N, com uma exportação média de 240 kg ha⁻¹ (Cordeiro, 1977; Hungria et al., 2000; Garcia, 2003b). Estima-se que entre 65 e 85% desta elevada demanda seja suprida pela fixação biológica de nitrogênio (FBN), e os restantes 15 a 35% pelo solo, através da decomposição da MOS. Portanto, o incremento do suprimento de N do solo também é importante estratégia para alcançar elevados rendimentos de soja, podendo ser obtido via elevação gradual do teor de MOS.

Costa (2002), fazendo uma análise do potencial de rendimento da soja, quando em condições de umidade adequada, afirmou que um dos fatores que mais influenciaram a obtenção de altas produtividades foi a disponibilidade de N. A soja, especialmente, quando alcança elevados rendimentos, pode inclusive apresentar um balanço negativo de N, ou seja, o aporte de N via FBN ficaria aquém da quantidade exportada pelos grãos (Alves et al., 2000). Para Klarmann (2004), as variedades modernas, com altas produtividades e índices de colheita, estão mais sujeitas a este balanço negativo de N. Este quadro será agravado se as demais culturas cultivadas em sucessão também apresentarem elevada demanda de N, como é o caso do trigo, aveia, milho, milheto e sorgo, geralmente utilizadas em rotação com a soja. Neste contexto, o déficit será incrementado e poderá ocorrer gradual esgotamento das reservas de N do solo, especialmente as mais lábeis. Por outro lado, isto constitui um estímulo natural à eficiência da FBN, visando compensar o decréscimo de suprimento de N do solo. Po-

rém, por se tratar de um processo biológico sujeito há muitas interações ambientais e de manejo da lavoura, nem sempre se verifica este processo compensatório teorizado.

A FBN na cultura da soja, quando eficiente, segundo Vargas et al. (1982), pode atender até a produtividade de 4000 kg ha⁻¹, sem a necessidade de adição de fertilizantes nitrogenados. Com isto, destaca-se a importância, para a nutrição da soja, de uma inoculação eficiente visando favorecer a atividade do rizóbio e a FBN.

A eficiência da FBN depende ainda das condições físico-químicas do solo, como acidez, umidade, temperatura, presença de teores adequados de nutrientes e da própria viabilidade do rizóbio (Tanaka & Mascarenhas, 2000; Klarmann, 2004). Voss & Sidiras (1985) constataram que a soja no sistema plantio direto apresentou maior peso de nódulos do que no preparo convencional, atribuindo esse resultado à diferença de temperatura do solo observada entre os dois sistemas de preparo. Assim, em condições tropicais e subtropicais, o sistema plantio direto, por manter resíduos na superfície do solo, proporciona condições térmicas mais favoráveis à FBN.

Tanaka (2003) e Helyar & Porter (2002) constataram que, em solos ácidos, com presença de Al e Mn disponível no complexo de troca, a FBN pode ser comprometida e, conseqüentemente, também o suprimento de N, a síntese de proteínas e a produção de grãos da soja. A acidez do solo, além de reduzir a nodulação e a FBN, pode diminuir a taxa de decomposição da matéria orgânica.

A eficiência do processo de FBN pode ser avaliada a campo pela presença de nódulos graúdos, rugosos, de coloração interna avermelhada presente nas raízes primárias, antes da floração plena – R2 (Tanaka & Mascarenhas, 2000). Ao longo dos estádios vegetativos de desenvolvimento da soja, o número de nódulos aumenta e, conseqüentemente, a taxa de fixação do N₂. Por volta do estágio R2, a taxa de fixação do N₂ incrementa significativamente, atingindo seu pico no estágio R5.5 (enchimento de grãos) e, a seguir decresce rapidamente (Potafós, 2003). Para Vargas & Hungria (1997), o processo de FBN atinge seu ponto máximo no estágio de florescimento pleno, mas pode haver um prolongamento até o período de enchimento dos legumes, tendo início, então, o declínio na atividade da nitrogenase. Na época do florescimento, uma planta de soja, adequadamente nodulada, deve apresentar, a campo, entre 15 e 30 nódulos e/ou 100

a 200 mg de nódulos secos. Bohrer & Hungria (1997) concluíram que o número de nódulos não apresentou boa correlação com o N total acumulado na parte aérea da soja, sugerindo que a massa nodular seria um melhor indicador da eficiência da FBN.

De acordo com Franco & Neves (1992), o crescimento dos nódulos é mais sensível ao excesso de N do que a atividade da nitrogenase, principal enzima responsável pela FBN. Segundo Gassen (2002), elevados teores de nitrato no sulco de semeadura podem inibir o desenvolvimento de rizóbio nas raízes de soja. A deposição de fertilizantes muito próximos ou no mesmo sulco das sementes também pode prejudicar a FBN, dada à susceptibilidade da soja, em particular das bactérias simbiotes, aos efeitos de salinidade e pH, induzidos pela dissolução destes insumos (Garcia, 2003). O tratamento de sementes com fungicida também pode ter efeito sobre a eficiência da atividade das bactérias simbiotes. Alguns fungicidas recomendados ao tratamento das sementes da soja (Campos & Hungria, 2000) e mesmo os micronutrientes (Boletim de Pesquisa de Soja, 2005), quando aplicados juntamente com os inoculantes, podem reduzir a eficiência da FBN. Segundo as indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC (Reunião..., 2005), havendo necessidade de efetuar a aplicação de fungicida via tratamento de sementes, é sugerido escolher entre os seguintes princípios ativos: carbendazin+captan, carbendazin+thiram, carboxin+thiram ou difenoconazol+thiram, por serem menos prejudiciais ao rizóbio. Por outro lado, o possível efeito de alguns herbicidas, aplicados na cultura da soja ou em outras culturas utilizadas no programa de rotação, sobre as bactérias simbiotes ainda é um assunto que necessita maior investigação.

Alguns cuidados básicos que devem ser observados durante a inoculação das sementes de soja (Reunião..., 2005) são: (a) usar inoculantes cuja eficiência agrônômica tenha sido comprovada; (b) usar a quantidade de inoculante indicada pelo fabricante de modo a atingir uma quantidade mínima de 600.000 células viáveis de *Bradyrhizobium* por semente; (c) em áreas de primeiro ano de cultivo usar o dobro dessa quantidade; (d) misturar de forma uniforme o inoculante com as sementes e deixar secar à sombra, efetuando a semeadura no mesmo dia; (e) usar somente inoculantes que estejam dentro do prazo de validade; (f) certificar-se de que o produto foi conservado em condições satisfatórias; (g) quando da aplicação conjunta

com fungicidas, estes produtos devem ser aplicados antes do inoculante. (h) o volume final de solução de produtos a utilizar (fungicida, micronutrientes e inoculantes) não deve ser superior a 600 ml/100 kg de semente.

4.3. Respostas da soja à adubação nitrogenada e a outras fontes de nitrogênio

Análises de tecido foliar da soja em sucessão a aveia, nas regiões do Alto Uruguai e Missões do RS, indicaram teores de N inferiores aos níveis considerados suficientes (Pavinato, 2002; Klarmann, 2004). Os teores foliares suficientes de N para soja seriam segundo a Comissão... (2004), na faixa de 4,5 a 5,5%. Assim, em situações em que a simbiose for ineficiente, ou o teor de MOS for muito baixo ou, ainda, em situações de expectativa de elevada produtividade, tem se avaliado a complementação da nutrição da soja com a adubação mineral. Embora o tema seja polêmico, pesquisas têm sido realizadas no Brasil e em outros países, grandes produtores de soja, como Estados Unidos e Argentina. Alguns resultados demonstraram resposta positiva no rendimento de soja à suplementação de N mineral, assim como há também muitos resultados em que não houve resposta ou até mesmo houve decréscimo no rendimento. Com isto, generalizações a respeito do tema ficam comprometidas. Hungria et al. (1997) e Mercante et al. (2002) não encontraram vantagens na fertilização com N mineral na soja, mesmo em lavouras de alta produtividade. Estes autores destacaram a importância da inoculação, especialmente nos primeiros anos de plantio direto, sustentando que, quando ela for adequada, não há necessidade de complementação de adubação mineral. Vários autores reiteraram a vantagem econômica da FBN sobre a fertilização nitrogenada mineral (Mascarenhas, 1967; Hungria et al., 1998 e 2000).

Novo et al. (1999), por outro lado, concluíram que apenas a FBN não foi suficiente para maximizar o rendimento de soja, destacando a necessidade de complementação com adubação mineral. Neste caso, embora a adubação nitrogenada tenha prejudicado a nodulação em seis de oito ensaios, ela aumentou o teor de N acumulado na fitomassa e a produtividade de grãos em três dos locais estudados. Nestes casos, a dose de 50 kg ha⁻¹ de N promoveu incrementos de 22 a 47% no rendimento da soja.

A utilização de pequenas doses de N mineral na semeadura da soja, segundo Sfredo (1986), auxiliaria no “arranque inicial” da cultura, uma vez que, até significativa quantidade de N ser aportada pela FBN, pode transcorrer de 15 a 35 dias DAE. Atualmente, por questões comerciais muitos sojicultores têm utilizado fórmulas de fertilizantes com concentrações de N variando de 3 a 5%. No entanto, a recomendação é que não sejam aplicados mais do que 20 kg ha⁻¹ de N na semeadura (Reunião..., 2005). Klarmann (2004) observou que o número de nódulos e a massa nodular da soja foram reduzidos quando da utilização da adubação nitrogenada mineral (Tabela 2). Considerando que a massa nodular ideal está na faixa de 100 a 200 mg planta⁻¹, observou-se que este valor foi obtido somente na ausência de adubação nitrogenada. Portanto, verificou-se, na nutrição da soja, uma substituição indesejada do N fixado biologicamente pelo N do fertilizante, fato que implica aumento do custo de produção e tem consequências negativas em termos de balanço energético e de proteção do ambiente.

Tabela 2. Efeito de doses de N aplicados na soja sobre o número de nódulos, na média de três sistemas de rotação/sucessão de culturas.

Dose de N mineral	Número de nódulos planta	Massa de nódulos
kg ha ⁻¹		mg planta ⁻¹
0	56,0 a ¹	183 a
30 ²	28,4 b	90 b
90 ³	33,5 b	94 b

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si.

² Dose aplicada na semeadura, fonte nitrato de amônio.

³ Dose parcelada 30 kg ha⁻¹ na semeadura e 60 kg ha⁻¹ no pleno florescimento, Fonte nitrato de amônio.

Fonte: Klarmann, 2004.

A aplicação de N mineral na fase reprodutiva da soja também tem sido avaliada como uma alternativa de complemento a FBN, uma vez que neste estágio ocorre diminuição acentuada na atividade do rizóbio. Além disto, teoriza-se que o fornecimento de N na fase reprodutiva possa se refletir, além de incremento no rendimento, na melhoria da qualidade dos grãos, devido à elevação da concentração de proteínas e ao incremento do vigor das sementes. Klarmann (2004), investigando o efeito de doses de N em três sistemas de culti-

vo de soja, somente encontrou resposta positiva a essa fertilização no sistema ervilhaca/soja (Tabela 3). Neste sistema de cultivo, o incremento de 16% no rendimento de soja devido à adubação nitrogenada foi associado ao incremento de 9% no número de legumes por planta. Por outro lado, a adubação nitrogenada na soja não teve efeito sobre o teor de proteína bruta, vigor de sementes e poder germinativo. Independente da dose de adubação nitrogenada, a soja após ervilhaca apresentou maior rendimento que os demais sistemas de cultivo (Tabela 3). Klarmann (2004) associou este resultado aos incrementos de N na fitomassa, do número de nódulos, da massa nodular, da produção de matéria seca, e ao maior número de legumes e de grãos por planta observados neste sistema de cultivo.

Tabela 3. Efeito de doses de nitrogênio mineral e sistemas de cultivo no rendimento de soja.

Doses de N kg ha ⁻¹	Sistema de cultivo		
	Aveia(trigo)/ soja(milho)	Aveia(trigo)/ Soja	Ervilhaca/Soja
0	a 2619 B ¹	a 2583 B	b 2933 A
30 ²	a 2486 B	b 2002 C	b 3039 A
90 ³	a 2711 B	a 2436 B	a 3408 A

¹ Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si.

² Dose aplicada na semeadura, fonte nitrato de amônio.

³ Dose parcelada 30 kg ha⁻¹ na semeadura e 60 kg ha⁻¹ no pleno florescimento, fonte nitrato de amônio.

Fonte: Klarmann, 2004.

Klarmann (2004) sustentou que a soja após ervilhaca, apresentou maior rendimento de grãos, expressando a melhoria da qualidade do solo induzida por esta cultura de cobertura. Analisando as condições de solo após quatro anos de cultivo do sistema ervilhaca/soja, constatou aumento no teor de MOS, decréscimo no teor de alumínio e incrementos nos teores de cálcio e magnésio e no pH, em relação ao sistema aveia/soja. A quantidade de nitrogênio total, na camada de 0-20 cm, no sistema ervilhaca/soja foi 1300 kg ha⁻¹ superior à do sistema aveia/soja. Miyazawa et al. (1993) avaliaram o efeito de vinte espécies de plantas para adubação verde sobre o pH e o Al do solo.

Os resíduos de leguminosas, entre elas a ervilhaca, foram, em geral, os mais eficientes na neutralização de H^+ do Al no solo. Helyar (1991) e Schlindwein et al. (2004) relataram que as leguminosas, e também o nabo forrageiro, por absorverem maior quantidade de cátions (Ca, Mg e K), excretam, via sistema radicular, ânions orgânicos e, principalmente, hidroxilas (OH^-), para manter o potencial eletroquímico das células. Com isto, a FBN da soja pode ser favorecida indiretamente, quando da utilização de leguminosas como cultura de cobertura antecedente.

Na interpretação dos resultados positivos do sistema de cultivo ervilhaca/soja, deve-se considerar que, no experimento apresentado, não foi verificado incremento de doenças ou pragas em relação ao sistema aveia/soja. O uso prolongado deste sistema de sucessão de leguminosas, sem rotação, pode favorecer a ocorrência de patógenos na soja e comprometer os resultados apresentados. Porém, resultados obtidos no campo experimental da Coopermil de Santa Rosa⁴, avaliando durante quatro anos a produtividade de soja obtida após o cultivo de diferentes espécies de inverno, expressaram aumento no rendimento da soja em sucessão à ervilhaca, em relação ao obtido após gramíneas (aveia e trigo). O incremento de rendimento foi variável em função do ano, porém, em 2000 a soja após ervilhaca alcançou o rendimento de 4260 kg ha^{-1} , sendo 37% superior à soja após aveia preta. Resultados semelhantes foram relatados por produtores de soja da região das Missões do RS, onde a ervilhaca apresenta vigoroso crescimento.

De acordo com Alves et al. (2000), a introdução de leguminosas como cultura de cobertura, no programa de rotação, seria a forma mais eficiente de aumentar o estoque de N no solo, com o fim de contrabalançar as elevadas exportações deste nutriente pela soja. Estudos conduzidos por Heinzmann (1985), avaliando o efeito de coberturas verdes de inverno sobre o teor de nitrato no solo ($N-NO_3^-$), constatou que, 54 dias após o manejo, os teores de $N-NO_3^-$ no solo aumentaram na profundidade de 0-90 cm. Parte deste acúmulo de nitrato no solo foi atribuído ao “priming effect”, que corresponde ao aumento da taxa de decomposição de frações lábeis da MO do solo pela adição de N.

⁴ Comunicação pessoal do Eng. Agr. Sérgio Schneider – Coopermil, 2002.

Tanaka & Mascarenhas (2000), avaliando o desempenho da soja cultivada em sucessão a diferentes espécies de verão, obtiveram maiores rendimentos após a crotalária (*Crotalaria juncea*). Os autores atribuíram o resultado ao incremento no número de nódulos da soja, quando comparado ao sistema em monocultivo da oleaginosa. Resultados que se assemelham aos encontrados por Klarmann (2004).

Ao avaliar os efeitos de plantas de cobertura num sistema de rotação de culturas de grãos, Fiorin et al. (2004) observaram que a crotalária juncea, como planta de cobertura de verão cultivada na resteva do milho, antes do trigo no inverno, apresentou um residual suficiente para interferir de maneira significativa nos rendimentos de grãos de soja, cultivado após o trigo, num período de aproximadamente 9 a 15 meses depois. Os autores atribuíram este efeito à alta produção de massa seca, ciclagem e/ou fixação de nutrientes e a uma decomposição mais lenta dos seus restos culturais, estatisticamente diferentes, quando comparadas a outras espécies.

Os resultados anteriormente relatados contrastam com os de Holtz & Sá (1995), para os quais a relação C/N ideal para anteceder a cultura da soja deveria ser maior que 25, de modo a propiciar uma cobertura morta estável, que favoreça a formação de nódulos radiculares e a FBN. Os autores relataram que, pelo fato da aveia preta ter relação C/N ampla, a cultura da soja cultivada em sucessão tem apresentado maior rendimento. Derpsch et al. (1985), avaliando os efeitos residuais de diferentes espécies de cobertura de inverno, concluíram que o maior rendimento de soja foi verificado após a aveia preta, sendo 48,8% superior ao obtido sobre a ervilhaca. Convém destacar que neste caso os tetos de rendimento foram inferiores a 3000 kg ha⁻¹. O fator que mais influenciou este resultado foi a manutenção da umidade no solo associado à elevada produção de matéria seca, proporcionada pela gramínea antecessora à soja.

Considerando a estratégia de adubação do sistema, como tem sido preconizado para o sistema plantio direto consolidado, que considera a necessidade nutricional do conjunto de culturas utilizadas no programa de rotação, e não a de uma cultura isolada, pode-se também investigar a melhoria do balanço de N em outras culturas utilizadas na rotação, que não a soja. Com isto, poderia ser alcançado o objetivo de incremento na disponibilidade de N sem prejuízo à eficiência da FBN. Neste contexto, Oliveira & Balbino (1995), cita-

dos por Vitti & Trevisan (2000), constataram que a adubação nitrogenada no trigo favoreceu o incremento de rendimento de soja cultivada em sucessão (Tabela 4). A uréia aplicada no trigo apresentou incrementos de rendimentos na soja, média de três safras, variando de 16 a 18%, dependendo da dose aplicada. Em adição, o sulfato de amônio apresentou incrementos no rendimento de 30 a 51%, devendo-se neste caso considerar, além do N, o fornecimento de enxofre, que também é importante na nutrição da soja.

Pelo exposto, constata-se que o adequado suprimento de N é essencial para alcançar elevados rendimentos de soja. O incremento do suprimento de N para a soja é complexo, porém pode ser alcançado por uma estratégia combinada de incremento das diferentes fontes de N. Inicialmente, a prioridade deve ser dada ao incremento da eficiência da FBN, porém a esta estratégia deve se associar a elevação do teor de MOS, fonte primária deste nutriente. A participação de leguminosas, como coberturas do solo no programa de rotação de culturas da soja, tem se mostrado uma estratégia eficiente de melhoria do estoque de nitrogênio total do solo, da matéria orgânica, da qualidade do solo, da nodulação e da FBN, com reflexos positivos na nutrição e no rendimento de grãos da soja, embora os aspectos fitossanitários não devam ser negligenciados.

Tabela 4. Efeito da adubação nitrogenada na cultura do trigo sobre o rendimento de soja cultivada em sucessão.

Adubação nitrogenada em cobertura no trigo ¹		Rendimento de soja ²	
Fonte	Dose de N	Absoluto	Relativo
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%
Testemunha	0	2706	100
Uréia	50	3144	116
Uréia	100	3187	118
Sulfato de amônio	50	3904	130
Sulfato de amônio	100	4360	151

¹ Adubação de base 300 kg ha⁻¹ da fórmula 0-20-20.

² Média de três anos.

Fonte: Oliveira & Balbino (1993, 1994 e 1995), adaptado de Vitti & Trevisan, 2000.

A adubação mineral nitrogenada na soja requer cuidados especiais visando não prejudicar a FBN. A resposta positiva no rendimento da soja pode, provavelmente, estar associada às situações em que a simbiose e/ou a contribuição das outras fontes de N forem ineficientes. Porém, a utilização de N em culturas antecessoras, de forma antecipada, ou ainda na fase reprodutiva da soja, pode ser estratégia complementar, merecendo investigação quando da busca de elevados rendimentos de soja.

5. Dinâmica do fósforo

5.1. Fósforo na soja

Embora dentre os três macronutrientes primários o fósforo (P) seja o menos extraído pela soja, normalmente ele é o que apresenta maior limitação à obtenção de elevados rendimentos, seja pelo baixo teor no solo, seja pela sua dinâmica complexa em solos tropicais e subtropicais (Vitti & Trevisan, 2000). Rheinheimer et al. (2001) constataram que 79% das amostras de solo analisadas pelos laboratórios integrantes da ROLAS (Rede oficial de laboratórios de análises de solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina) possuíam teores de P abaixo do suficiente. Schlindwein (2003) sustentou que o manejo deficiente da fertilidade do solo é umas das razões que explicariam o ainda baixo rendimento da soja (média de 1969 kg ha⁻¹ nas safras 2000 e 2001) mesmo em anos com precipitações adequadas no RS.

O P é essencial para a divisão celular, especialmente no crescimento dos ápices (parte aérea e sistema radicular), na reprodução e no metabolismo vegetal (fotossíntese, respiração e síntese de compostos). A deficiência de P no solo diminui o crescimento das plantas e o potencial de rendimento nos estádios reprodutivos iniciais, como o florescimento, pela menor produção e maior aborto de flores. Além disto, posteriormente, a deficiência de P se manifesta na menor formação e retenção de legumes, o que resulta em decréscimo no rendimento de soja (Vitti & Trevisan, 2000). Além disto, a deficiência de P pode induzir menor desenvolvimento radicular e comprometer a FBN.

Se no solo o P é pouco móvel, nas plantas a sua mobilidade é grande, deslocando-se facilmente em direção aos tecidos mais novos

e, posteriormente, às sementes, que apresentam a maior concentração do nutriente. Os teores adequados de P nas folhas de soja estão entre 0,26 e 0,5% da massa seca (Raij et al., 1997; Comissão..., 2004), enquanto que a exportação pelos grãos é equivalente a 14 kg de P_2O_5 por tonelada de grãos produzidos (Comissão..., 2004).

5.2. Fósforo no solo

O P é o macronutriente com menor mobilidade no perfil do solo, podendo, através de migração, formar um gradiente de concentração em uma distância de apenas 3 cm no período de 121 dias (Souza & Wolkweiss, 1987). A migração no solo foi maior a partir dos maiores grânulos de P (maior concentração) e a velocidade foi proporcional à solubilidade dos compostos de P, porém não diferindo muito entre os períodos de 21 e 121 dias, desde que o solo tenha boa umidade. A migração de P, teoricamente, deve ser intensificada sob sistema plantio direto. Neste sistema, o fósforo pode ser mobilizado no perfil através do transporte por minhocas, corós e pela erosão vertical nas rachaduras do solo e galerias de origem biológica. Porém, normalmente, o P permanece muito próximo do local onde é depositado o fertilizante, uma vez que é pouco transportado no perfil pelo fluxo de água.

Entre os nutrientes, o P apresenta a maior variabilidade na concentração, tanto vertical quanto horizontal, no perfil do solo sob sistema plantio direto. A variabilidade horizontal é resultado de fertilizações no sulco de semeadura. Silva (2002) encontrou variabilidade de aproximadamente 85% no teor de P quando comparou a amostragem de solo na fileira e entre fileiras de semeadura (Tabela 5). A adubação em sulco é, especialmente, indicada quando o teor de P no solo for baixo, situação comum na fase inicial de adoção do sistema plantio direto, sob solos tropicais e subtropicais. Neste caso, a colocação de fosfato solúvel próximo à fileira de semeadura pode aumentar a eficiência de uso pelas plantas, devido a menor adsorção aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, comumente presentes em solos intemperizados e com pH baixo. A adubação em sulco também pode favorecer o efeito residual do P aplicado (Souza & Volkweiss, 1987; Westfall et al., 1991; Kray et al., 1998), fato relevante durante a fase de construção de teores de P no solo.

A elevada variabilidade horizontal observada sob sistema plantio direto com histórico de adubação em sulco demanda um maior número de amostras de solo para que a disponibilidade de P seja corretamente avaliada, especialmente se o trado for o instrumento amostrador. Neste caso o volume de solo coletado será reduzido, aumentando a probabilidade de erro. Anghinoni (1999), em função das razões supracitadas, sugeriu amostragem de solo composta de 10 a 15 subamostras para formar uma amostra representativa sob sistema plantio direto. Alternativamente, a Comissão ... (1995) sugeriu a coleta de uma secção transversal às fileiras de semeadura, com espessura de 3 a 5 cm, na largura entre fileiras da cultura precedente. De qualquer forma, enfatiza-se que a amostragem é crítica para avaliação da disponibilidade de P sob sistema plantio direto, como pode ser constatado na Tabela 5.

Tabela 5. Variabilidade dos teores de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1, sob sistema plantio direto.

Profundidade de amostragem	Locais de amostragem			Coeficiente de variação
	Fileira	Entre fileiras	Mistura	
cm	----- g dm ⁻³ -----			%
0 - 10	27 a ¹	3 b	13 b	84,7
10 - 20	3 a	1 b	2 ab	31,4
0 - 20	14 a	2 b	6 b	77,1

¹ Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si.
Fonte: Silva, 2002.

No sistema plantio direto com rotação, o cultivo de sucessivas culturas com diferentes espaçamentos, que muitas vezes possuem fileira de semeadura não coincidente, induz a que a variabilidade horizontal seja maior na fase inicial e diminua com o tempo de adoção do sistema (Anghinoni & Salet, 1998). Entre as alternativas de redução da variabilidade horizontal de P, destacam-se a adubação a lanço ou a adubação em sulco na cultura de menor espaçamento, como o trigo (17 cm). Quando os teores de P no solo encontram-se de médios a elevados, a adubação a lanço tem apresentado eficiência semelhante à em sulco (Kleper & Anghinoni, 1996; Wiethölter et al., 1998; Ceretta & Pavinato, 2003).

A variabilidade vertical do P, sob sistema plantio direto, pode ser ainda maior que a anteriormente apresentada para a variabilidade horizontal. Assim, a variabilidade vertical do P está relacionada à fertilização superficial ou subsuperficial, à deposição superficial dos resíduos das culturas e à pequena mobilidade deste nutriente no perfil. Moschler et al. (1975) destacam ainda que o mínimo revolvimento do solo, característico dos sistemas conservacionistas, resulta em menor exposição do P aos sítios de adsorção. Com isto, a disponibilidade de P às plantas aumenta sob sistema plantio direto. A variabilidade vertical é agravada com o tempo de adoção do sistema plantio direto (Schlindwein & Anghinoni, 2000). Vários autores constataram que a maior concentração de P sob sistema plantio direto ocorre principalmente nos primeiros 5 cm, ou no máximo até 10 cm, quando forem utilizadas semeadoras com haste sulcadora (facão) (Muzilli, 1983; Sá, 1983; Sidiras & Pavan, 1985; Eltz et al., 1989). Assim, geralmente verifica-se sob sistema plantio direto drástica redução no teor de P em profundidades superiores aos 10 cm, conforme apresentado na Tabela 5. A concentração superficial de P, em caso de déficits hídricos frequentes, pode resultar em menor aproveitamento pelas plantas, uma vez que o principal mecanismo de suprimento deste nutriente (difusão) às plantas é muito influenciado pela umidade do solo. Em adição ressalta-se que a camada superficial do solo, onde se encontra concentrado o P, é a mais sujeita a variações no teor de umidade ao longo do ciclo da soja. Este fato enfatiza a importância da manutenção de uma adequada quantidade de resíduos (palhada) sob a superfície do solo, especialmente nos estádios iniciais da soja, visando conservar a umidade do solo e, conseqüentemente, favorecer a absorção de P. A concentração superficial de P e outros nutrientes também pode induzir à concentração superficial do sistema radicular, tornado a planta mais susceptível ao estresse hídrico.

A decomposição lenta e gradual dos resíduos vegetais mantidos sobre a superfície do solo no sistema plantio direto favorece a acumulação de formas orgânicas de P (P_o), menos susceptíveis às reações de adsorção (Sá, 1999; Lopes et al., 2004). Cantarella et al. (1992) estimaram que de 50 a 75% do P total no horizonte superficial, sob este sistema conservacionista, encontrava-se na forma orgânica. Sá (1999), anteriormente, constatou, em um Latossolo Amarelo distrófico típico, que, aproximadamente, 70% do P encontrava-se na forma orgânica. Argu-

mentou que, sob sistema plantio direto consolidado, este compartimento de P é muito importante para reabastecimento do íon fosfato na solução do solo, de onde as plantas o absorvem. No entanto, destaca-se que o aproveitamento do P_0 é dependente da conversão a formas inorgânicas (P_i), através do processo de mineralização, mediado pela atividade biológica do solo. Assim, as plantas absorvem todo o P necessário para o seu desenvolvimento da solução do solo nas formas de íons $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-} . O fósforo na solução (P-solução) mantém um equilíbrio com o P na fase sólida (P-sólido), embora se deva destacar que a quantidade de P-solução é muito menor que a de P-sólido. Vargas et al. (1987) encontraram concentração de P na solução do solo de 0,35 e 0,25 mg L⁻¹ antes e depois do cultivo, respectivamente, em solo com teor original de fósforo de 32,9 mg kg⁻¹, determinado por Mehlich-1. Assim, características do solo como pH e teor de óxidos e argila que afetam o equilíbrio P-solução: o P-sólido tem fundamental importância para a nutrição das plantas (Anghinoni & Bissani, 2004).

O estoque de P_0 aumenta com o teor de MOS e com o tempo de adoção do sistema plantio direto (Cantarella et al., 1992; Sá, 1999). Como o P_0 é adsorvido preferencialmente em relação ao P_i , ele tem um efeito indireto de aumento da disponibilidade de P_i às plantas no sistema plantio direto consolidado (Cantarella et al., 1992).

Na condição original de solos intemperizados, predominantes no cerrado brasileiro, o P associado a compostos orgânicos, geralmente, representa somente 25 a 35% do P total, situação esta acompanhada por baixos teores de P disponíveis para as plantas, em função do caráter-dreno predominar sobre o caráter-fonte. Como resultado deste contexto, observa-se, frequentemente, a deficiência nutricional das plantas em P, que são menos competitivas que os ávidos sítios do solo. Este contexto é alterado sob sistema plantio direto. Assim, teoriza-se que, na fase inicial do sistema plantio direto (cinco primeiros anos), o P seja imobilizado em compartimentos da MOS, à semelhança do que se verifica com o N (Novais & Smyth, 1999; Oliveira et al., 2002; Lopes et al., 2004). Com a gradual recuperação do estoque de MOS sob sistema plantio direto consolidado, verifica-se incremento da concentração do P_0 em relação ao P total. Com isto, há possibilidade de um uso mais efetivo dos fertilizantes fosfatados. Este fato pode ser atribuído a um efeito combinado do bloqueio de sítios inorgânicos de adsorção de P por moléculas orgânicas, da satu-

ração desses sítios em função de sucessivas aplicações superficiais de fertilizantes, das adições continuadas de resíduos vegetais e, finalmente, dos incrementos das percentagens de P-lábil e P associado à biomassa microbiana (Selles et al., 1997; Oliveira et al., 2002; Lopes et al., 2004).

A maior atividade microbiana na camada superficial do solo sob sistema plantio direto pode proporcionar incremento na disponibilidade de P às plantas, já que o nutriente assimilado na biomassa microbiana não está sujeito à adsorção aos colóides (Conte, 2001). Em longo prazo de adoção no sistema plantio direto, dependendo da intensidade dos processos supracitados, pode-se esperar que a mesma dose de fertilizante vá propiciar maiores rendimentos ou a obtenção do mesmo rendimento com uma dose menor de fertilizantes fosfatados (Lopes et al., 2004).

Cubilla (2005) investigando a construção de níveis de P no solo com adubação a lanço, no sistema plantio direto, observou maior efeito do teor inicial e do histórico de adubação fosfatada do que propriamente da textura. Assim, em solos com histórico de adubação fosfatada foram necessários em média 18,6 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para elevar 1 mg dm⁻³ de P no solo. Neste caso, o efeito da textura foi pequeno. Exemplificando: em solos com 250 a 400 g kg⁻¹ de argila, foram necessários 18,3 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para elevar 1 mg dm⁻³ de P, e, em solos com 410 a 600 g kg⁻¹ de argila, foram necessários 18,9 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Já para solos sem ou com menor histórico de adubação, foi necessário aplicar em média 35,3 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para elevar 1 mg dm⁻³. Neste caso, nos solos com maior teor de argila foi necessário aplicar 31,5% a mais de P₂O₅ do que em solos com menor teor de argila. Desta forma, teoriza-se que, em solos com histórico de adubação e não revolvimento, há uma saturação dos sítios de adsorção na camada superficial, resultando em menor efeito da textura na disponibilidade de P, assim como menor quantidade de fertilizante seria requerida para construção dos níveis deste nutriente.

Schlindwein (2003) estimou que a necessidade de P₂O₅, para elevar o fósforo em 1 mg kg⁻¹ de solo, foi de 31,1; 11,5 e 8,2 kg na camada de 0-20 cm e de 17,2; 8,9 e 5,1 kg na camada de 0-10 cm, para as classes de argila >550, 550-410 e 400-110 g kg⁻¹ de solo, respectivamente. Portanto, Schlindwein (2003) destacou que, se a profundidade de referência sob sistema plantio direto for 0 a 10 cm, menor quantidade de fertilizante fosfatado será requerida para a construção dos teores deste nutriente, em

relação à recomendada para a camada de 0 a 20 cm sob sistema preparo convencional. A Comissão ... (2004) sugeriu que para os solos da classe 1 ($>600 \text{ g kg}^{-1}$ de argila) seriam necessários 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 para elevar 1 mg dm^{-3} de P no solo; para a classe 2 (410 a 600 g kg^{-1} de argila) seriam necessários 20 kg ha^{-1} de P_2O_5 ; para a classe 3 (210 a 400 g kg^{-1} de argila) seriam necessários 15 kg ha^{-1} de P_2O_5 e para a classe 4 ($<200 \text{ g kg}^{-1}$ de argila) seriam necessários $8,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 . Pelo exposto, constata-se certa discrepância entre os valores propostos pela Comissão ... (2004) e os encontrados por Schlindwein (2003) e Cubilla (2005), sugerindo a necessidade de investigar com maior detalhamento o efeito de histórico de fertilização e tempo de adoção do sistema plantio direto, assim como a profundidade a ser corrigida.

Os resultados encontrados por Cubilla (2005) sugerem que, na fase inicial de adoção do sistema plantio direto, a construção de níveis de P exige maior quantidade de fertilizante fosfatado. Porém, com o transcorrer dos anos de fertilização e de adoção do sistema, verifica-se a saturação dos sítios localizados na camada superficial, permitindo que a construção dos níveis ocorra de forma mais intensa e rápida. Rheinheimer & Anghinoni (2001) sugerem que, após a saturação dos sítios mais ávidos, o P remanescente será redistribuído em frações com menor energia de retenção e por isto de maior capacidade de desorção, aumentando a disponibilidade de P. Este processo intensifica-se na medida em que é reduzida a mobilização do solo. Além dos aspectos inerentes à química do solo, não devem ser desconsiderados outros relacionados à atividade biológica, ciclagem de nutrientes e de redução de perdas de P verificados sob sistema plantio direto. Este fato é particularmente relevante para os agricultores com limitada capacidade de investimento, como na maioria dos países tropicais, pois, para saturar os sítios da camada mobilizada sob preparo convencional de solos oxídicos, seria necessária uma quantidade muitas vezes superior à do sistema plantio direto (Schlindwein, 2003; Cubilla, 2005).

5.3. Respostas da soja à adubação fosfatada

Trabalhos de pesquisa sobre a interação fertilização fosfatada e calagem têm demonstrado que o corretivo aumenta o aproveitamento do P pela soja sob preparo convencional, com reflexos positivos no

rendimento de grãos (Abrão & Grimm, 1975; Scherer, 1998). O efeito interativo da calagem-fósforo também foi investigado no sistema plantio direto, havendo, em geral, maior resposta da soja a doses de P do que à calagem, porém também sendo verificada interação positiva, principalmente, nas doses mais baixas do fertilizante (Nicolodi et al., 2002; Nolla 2003). Um dos principais efeitos da calagem em solos ácidos é o aumento da disponibilidade de P para as plantas, devido aos seguintes fatores: a) eliminação do alumínio trocável, que ocasiona danos ao desenvolvimento radicular da soja, b) aumento da atividade microbiana, que promove maior mineralização do P_0 , c) aumento da concentração de OH^- , que pode deslocar parte do P adsorvido na superfície dos minerais para a solução do solo (Nolla, 2003; Anghinoni & Bissani, 2004; Cubilla, 2005).

Sá (1999), investigando lavouras com 13 anos de adoção do sistema plantio direto (SPD), encontrou resposta à adubação fosfatada, aplicada no sulco próximo à fileira de semeadura, na faixa de 30 a 60 $kg\ ha^{-1}$. Nestas lavouras, o rendimento de soja foi ligeiramente inferior a 3000 $kg\ ha^{-1}$. Kochhann (1991), no Planalto do RS sob plantio direto, encontrou resposta variando de 20 a 40 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , porém os rendimentos de soja foram próximos a 2000 $kg\ ha^{-1}$. Ainda no Planalto do RS, Pötter (1999) encontrou respostas à adição de P_2O_5 até 90 $kg\ ha^{-1}$ aplicado no sulco (rendimento de grãos de 3182 $kg\ ha^{-1}$) em parcelas que haviam recebido previamente 40 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 incorporado antes da implantação do SPD.

Em experimentos de calibração sob sistema plantio direto, Schindwein & Gianello (2005) constataram que, em média, no RS, a máxima eficiência econômica (MEE) situar-se-ia em 78 $kg\ ha^{-1}$ e a máxima eficiência técnica (MET) em 121 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 com rendimento de soja próximo a 3000 $kg\ ha^{-1}$. Deve-se destacar que o nível de fertilidade dos solos deste estudo (16 avaliações em 10 diferentes solos) era médio, pois o rendimento obtido nas parcelas testemunhas (sem P) foi de, aproximadamente, 2400 $kg\ ha^{-1}$, portanto, superior ao rendimento médio estadual de soja.

Cubilla (2005), realizando calibração de P sob plantio direto no Paraguai, encontrou, para os solos com teor inicial muito baixo, baixo e médio (4 diferentes solos e 10 avaliações), que a dose de MEE foi de 118 $kg\ ha^{-1}$ com rendimento de 2416 $kg\ ha^{-1}$ e a dose de MET foi de 167 $kg\ ha^{-1}$ com rendimento de 2684 $kg\ ha^{-1}$. Destaca-se que o rendi-

mento das parcelas testemunhas no experimento conduzido por Cubilla (2005) foi inferior ao encontrado por Schlindwein (2003), justificando os maiores valores de MEE e MET. Desta forma, destaca-se que dois aspectos a serem considerados na probabilidade de resposta a adubação fosfatada são o teor inicial de P no solo e a produtividade a ser alcançada. Na província de Alto Paraná, uma das regiões mais produtivas do Paraguai, dois experimentos conduzidos sob plantio direto evidenciaram elevada resposta à adubação fosfatada. No experimento conduzido em Alto Paraná 1, encontrou-se MEE de 156 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com rendimento de 3749 kg ha⁻¹ e, em Alto Paraná 2, encontrou-se MEE de 179 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com rendimento de 4.119 kg ha⁻¹ (Figura 3).

Cooper (2003) sugere que, para rendimentos máximos de soja nos Estados Unidos, a dose de fósforo anual deveria ser em torno de 200 kg ha⁻¹. Deve-se destacar que, no experimento de calibração conduzido por Cubilla (2005), o nível de fertilidade inicial era considerado médio (7,6 mg dm⁻³ P com teor de argila de 450 g kg⁻¹), e a adubação aplicada a lanço. A eficiência do P aplicado a lanço, nestes experimentos, variou de 10,56 a 8,15 kg de soja produzida/kg de P₂O₅ aplicado, sendo semelhante à encontrada em outros experimentos com adubações em sulco. Pötter (1999) encontrou resposta de produtividade da soja de 9,2 e 9,9 kg por kg de P₂O₅ aplicado no sulco (doses: 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹). Já Schlindwein (2003) encontrou aumento médio de 7,2 kg de soja por kg de P₂O₅ aplicado no SPD.

A maioria dos experimentos de calibração foi conduzida sob sistema convencional e com um interstício de tempo no qual houve mudanças no potencial produtivo das variedades de soja utilizadas e aprimoramento nas práticas de manejo das lavouras (Schlindwein, 2003). Os recentes e poucos experimentos de calibração sob sistema plantio direto têm indicado que os níveis críticos de P seriam superiores aos anteriormente propostos sob sistema preparo convencional. Cubilla (2005) encontrou, para solos com classe textural de argila de 210 a 400 g kg⁻¹ o teor crítico de 15 mg dm⁻³, e para a classe de argila de 410 a 600 g kg⁻¹, o teor crítico de 12 mg dm⁻³ de P determinado pelo método Mehlich 1 e na profundidade de 0-10 cm (Figura 4). No Estado do Mato Grosso pesquisas conduzidas pela Fundação MT (Boletim de Pesquisa de Soja, 2005) determinaram, para as classes de argila de 210 a 400 g kg⁻¹, 410 a 600 e 610 a 800 g kg⁻¹, os teores críticos de 18, 12 e 6 mg dm⁻³, respectivamente, de P determinado

pele método Mehlich 1. Portanto, há semelhança entre os teores críticos encontrados por estes dois trabalhos de pesquisa.

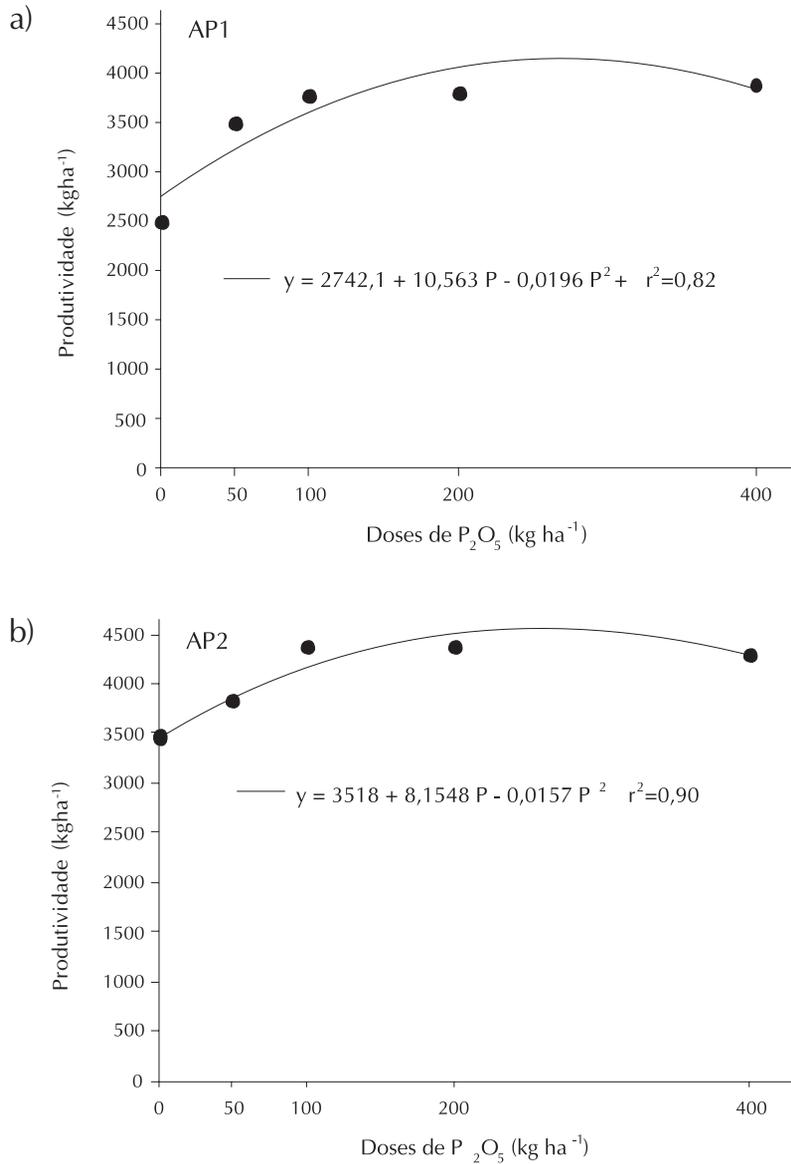


Figura 3. Rendimento de soja em função de doses de fósforo (fonte super triplo) aplicado a lanço sob sistema plantio direto em a) Alto Paraná 1 – AP1 e b) Alto Paraná 2 – AP2. Paraguai.

Fonte: Cubilla, 2005.

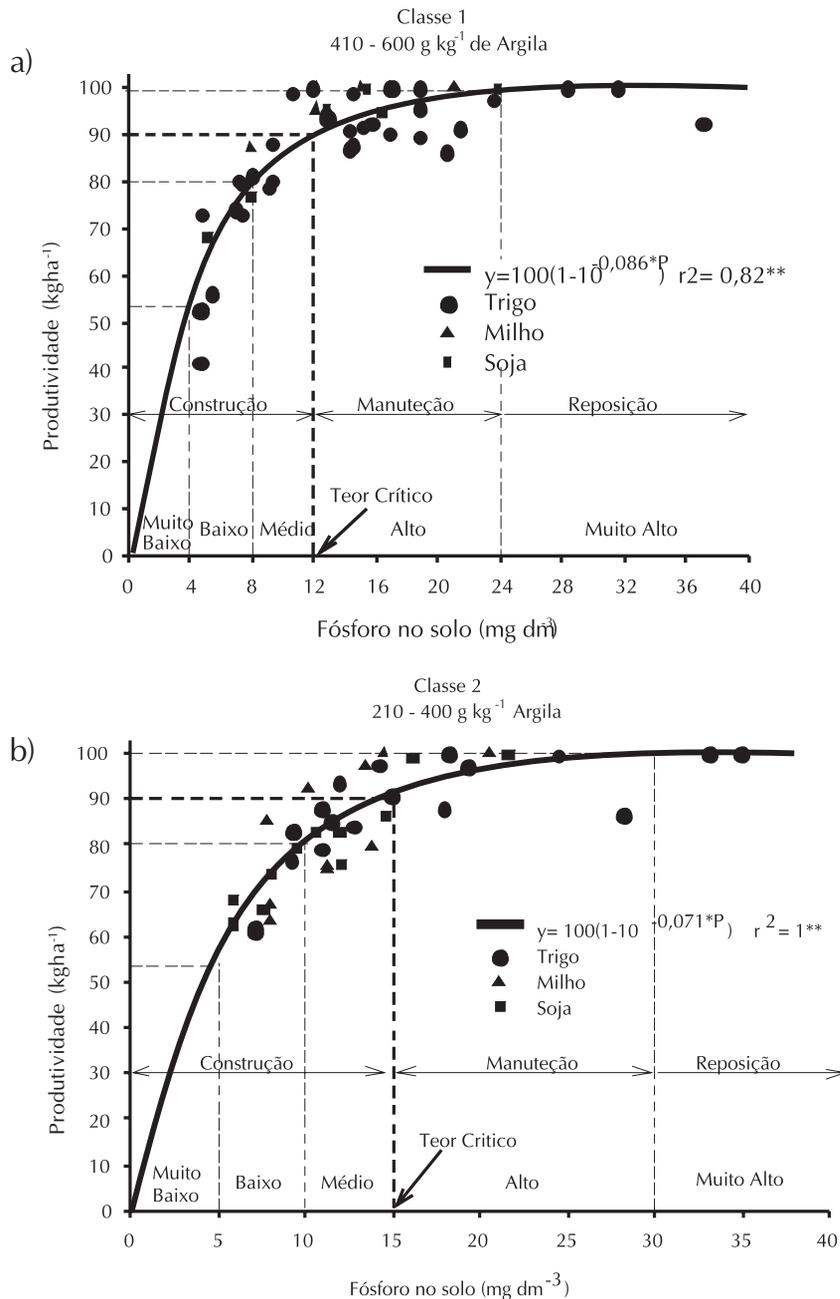


Figura 4. Rendimento relativo de trigo, milho e soja cultivados, no sistema de plantio direto, em solos com teores de fósforo determinados pelo método Mehlich-1, na camada de solo de 0-10 cm. a) classe textural de argila 410-600 g kg⁻¹, b) classe textural de argila 210-400 g kg⁻¹. Paraguai. ** significativo p < 0,01.

Fonte: Cubilla, 2005.

Por outro lado, Schlindwein (2003), investigando experimentos sob sistema plantio direto no RS, encontrou teores críticos de P no solo ainda maiores que os anteriores, estimando em 30, 21 e 12 mg dm⁻³, respectivamente, para as classes texturais de argila de 110-400, 410-550 e >550 g kg⁻¹, determinados pelo mesmo método anterior e na camada de 0-10 cm (Figura 5). Na camada de 0-20 cm, Schlindwein (2003) encontrou nível crítico ajustado de 21, 15 e 7,5 mg kg⁻¹ de solo, nas classes de argila 110-400, 410-550 e >550 g kg⁻¹, respectivamente. Nestes experimentos deve-se destacar que não foram utilizados fosfatos naturais como fonte de fósforo, fato que poderia superestimar a disponibilidade quando analisados pelo Mehlich 1.

Na Argentina, resultados de uma rede de experimentos componentes do projeto INTA Fertilizar encontraram que o teor crítico de P extraído pelo Bray foi de 12 a 14 mg dm⁻³. À medida que o teor de P foi inferior a 12, obteve-se eficiência de uso igual ou superior a 11 kg soja por kg P aplicado, valor de retorno econômico com base na relação de preço produto/insumo vigente à época da pesquisa (Figura 6) (Garcia, 2002). A Comissão (2004), com base em experimentos conduzidos entre 1969 e 1980, sugeriu o nível crítico de 12 mg dm⁻³ para a classe textural de 210 a 400 g kg⁻¹, o nível crítico de 9 mg dm⁻³ para a classe de 410 a 600 g kg⁻¹ e o nível crítico de 6 mg dm⁻³ para a classe > 600 g kg⁻¹, para o Mehlich 1 e profundidade de 0-10 cm (Figura 7). Os teores críticos de P maiores sob sistema plantio direto verificados nos estudos de calibração realizados por Schlindwein (2003), Boletim de Pesquisa de Soja (2005) e Cubilla (2005) podem ser atribuídos às melhorias nas práticas de manejo do solo, ao melhoramento genético e/ou à seleção de cultivares visando a aumentos de produtividade e ainda concentração superficial de P no sistema plantio direto combinado com amostragem de 0-10 cm.

Schlindwein & Anghinoni (2000) constataram que a concentração de P foi, aproximadamente, 50% maior na camada de 0-10 cm do que na camada de 0-20 cm, resultado este confirmado, posteriormente, por Schlindwein (2003). Portanto, cuidado especial deve ser considerado quando da comparação de experimentos de calibração conduzidos sob sistema convencional com amostragem de 0-20 cm com experimentos sob sistema plantio direto com amostragem de 0-10 cm. Assim, devido à concentração de P e a amostragem superficial do solo sob sistema plantio direto é esperado que o teor crítico seja

mais elevado do que o observado sob o preparo convencional, com distribuição uniforme e amostragem mais profunda, embora o nível de fertilidade possa ser semelhante entre os sistemas de preparo assim como os rendimentos obtidos.

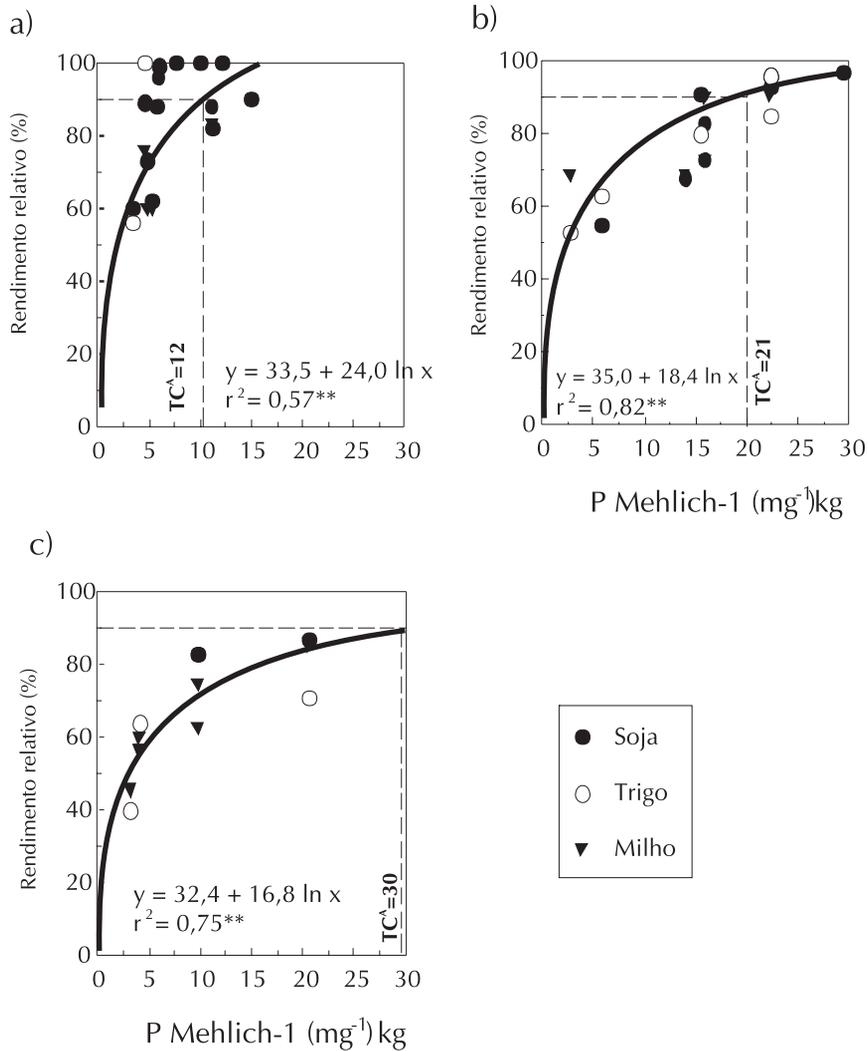


Figura 5. Rendimento relativo de soja, trigo e milho cultivados, no sistema de plantio direto no RS, em solos com teores de fósforo determinados pelo método Mehlich-1, na camada de solo de 0-10 cm. a) classe textural de argila >550 g kg⁻¹ (direita), b) classe textural de argila 410-550 g kg⁻¹ (esquerda), c) classe textural de argila 210-400 g kg⁻¹. ** significativo p < 0,01. Fonte: Schlindwein, 2003.

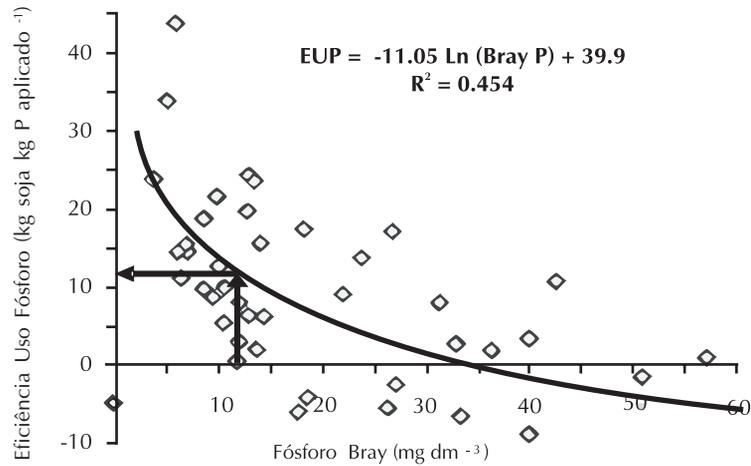


Figura 6. Eficiência de uso de fósforo (EUP) na soja em função do teor de P, extraído pelo Bray, em 47 parcelas do INTA, Projeto INTA Fertilizar, e Faculdade de Agronomia (UBA).
Fonte: Adaptado de Garcia, 2002.

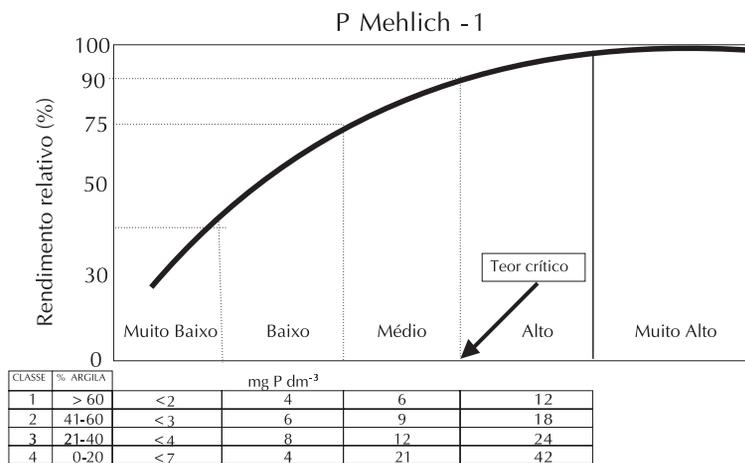


Figura 7. Rendimento relativo de culturas e teores de P no solo de acordo com a classe textural.
Fonte: Comissão ..., 2004.

As doses de P_2O_5 recomendadas para a soja, em média, aumentaram nas recomendações da Comissão... (2004). Porém, ao longo dos anos das recomendações, a partir das calibrações na década de 1960, as doses eram baixas (Universidade, 1968), aumentaram nas recomendações de Mielniczuk et al. (1969) e também nas recomendações de Universidade (1973) e Tabelas (1976), permanecendo assim até 1986 (Manual..., 1981). Nas recomendações de Siqueira et al. (1987) e Comissão... (1989 e 1995), as doses de P_2O_5 , de maneira geral, diminuíram, especialmente nas faixas de maior fertilidade e voltaram a aumentar nas recomendações da Comissão... (2004).

Estas maiores doses recomendadas, a partir da Comissão (2004), devem aumentar a fertilidade do solo e, possivelmente, possibilitar a obtenção de maiores rendimentos da soja. No manejo da adubação fosfatada, faz-se necessário considerar a exportação na colheita, que foi estimada em 14 kg de P_2O_5 por tonelada colhida (Comissão, 2004) e de 10,1 kg de P_2O_5 por tonelada (COAMO/CODETEC, 1998; EMBRAPA, 2002). Assim, quando os teores de P no solo estiverem altos é possível utilizar a exportação como critério de reposição do nutriente. A este valor pode-se acrescentar 20 a 30%, a título de possíveis perdas (Comissão..., 2004; Cubilla, 2005). Por outro lado, quando os teores de P estiverem abaixo do teor crítico, faz-se necessário construir a fertilidade utilizando doses superiores à exportação acrescidas das perdas do sistema.

6. Dinâmica do Potássio

6.1. Potássio na soja

O potássio (K) é um macronutriente demandado em quantidades elevadas pela soja. Os teores de K nos tecidos desta cultura situam-se entre 1,7 e 2,5% da matéria seca das folhas (Raij et al., 1997). Esse nutriente apresenta elevada mobilidade na planta com acúmulo e redistribuição via xilema e floema.

O K, embora não faça parte da estrutura da planta, é o cátion com maior abundância no citoplasma e nos cloroplastos, exercendo funções reguladoras muito importantes. Ele é necessário, por exemplo, para ativar mais de 50 enzimas. Também está relacionado ao

processo fotossintético em vários níveis; participa da síntese do ATP (adenosina trifosfato – unidade de armazenamento e transporte de energia na forma química); afeta a taxa de assimilação do CO₂ e a manutenção do turgor das células-guarda, as quais controlam a abertura e o fechamento dos estômatos, que regulam ainda a taxa de transpiração das plantas (Wendling, 2004).

A adequada nutrição das plantas com K tem sido frequentemente relacionada com a sua sanidade. Especificamente para a soja, especula-se que a adubação potássica associada à utilização de fungicidas, possa contribuir para maior sanidade da cultura (Comissão ..., 2005). Fato semelhante ao que ocorre na cultura do arroz, em que a disponibilidade de K pode contribuir para a redução da incidência de brusone (Fageria, 1984). Este nutriente tem sido associado ao fortalecimento da parede celular com lignina e ao estímulo a absorção de silício, com reflexos positivos na resistência de plantas a doenças e ao acamamento. O K também pode aumentar a resistência das plantas a situações de deficiência hídrica, pois auxiliaria na conservação da água nas folhas e no desenvolvimento radicular.

Rheinheimer et al. (2001), em levantamento da situação de fertilidade dos solos do RS, constataram que 1,3% das análises se encontravam na classe limitante (< 21 mg dm⁻³), 10,7% estavam na classe muito baixa (21 a 40 mg dm⁻³), 14,9% na classe baixa (41 a 60 mg dm⁻³), 14,4% na classe média (61 a 80 mg dm⁻³), 22,6% na classe suficiente (81 a 120 mg dm⁻³) e 36,1% na classe alta (> 120 mg dm⁻³). Desta forma, os autores concluíram que 58,7% das amostras analisadas no RS se encontrariam acima do teor crítico de K, estabelecido em > 80 mg dm⁻³, na recomendação de adubação vigente na época do trabalho (Comissão ..., 1995). Brunetto et al. (2005) sustentaram que, considerando o atual nível crítico de K de 60 mg dm⁻³, válido para a maioria dos solos do RS, 73,1% das amostras analisadas no RS estariam acima deste nível. Com base nestes levantamentos da situação de fertilidade dos solos do RS, Ceretta & Pavinato (2003) concluíram que a probabilidade de resposta à adubação potássica é menor do que à fosfatada.

A principal consequência da deficiência de K é a redução da taxa de crescimento das plantas, antes mesmo do aparecimento de sintomas visuais. O K, devido à mobilidade nas plantas, apresenta redistribuição de folhas velhas para folhas mais novas (Wendling,

2004). Assim, os sintomas de deficiências de K na soja são facilmente visualizados pelas manchas amareladas nas bordas das folhas mais velhas, maturação desuniforme, retenção foliar, legumes verdes e chochos, grãos pequenos, enrugados e deformados (Borket et al., 2004).

6.2. Potássio no solo

O K ocorre no solo em duas formas: como componente da fase sólida, que pode perfazer 95% do total, e como íon K^+ na fase líquida (solução do solo). O K na fase sólida faz parte da estrutura de minerais primários (feldspatos e micas) e de minerais secundários (ilitas, argilominerais interestratificados e vermiculitas) ou está adsorvido na superfície de troca de argilominerais e de compostos orgânicos. No processo de intemperização dos feldspatos potássicos e das micas, o K é liberado da estrutura destes minerais para a solução do solo (Mielniczuk, 1982). Em solos muito intemperizados das regiões tropicais, como, por exemplo, os latossolos do Cerrado, as reservas de K dos minerais já podem ter sido esgotadas. Por outro lado, em solos menos desenvolvidos, os minerais, juntamente com o K trocável presente nas superfícies dos argilominerais, podem ser importante fonte deste nutriente para as plantas, uma vez que os minerais primários, através da dissolução, mantêm o equilíbrio de K entre a fase sólida e a solução do solo. As plantas absorvem o K da solução do solo, principalmente, por difusão e fluxo de massa, ambos os mecanismos de suprimento de nutrientes muito influenciados pela umidade do solo.

O K, na forma trocável ou disponível para as plantas, está ligado à fase sólida do solo por ligações fracas e, por isto, pode ser facilmente quantificado pelos métodos de análise de solo (Mehlich-1, Mehlich-3, Resina, Bray e Olsen). O K trocável normalmente se correlaciona de forma significativa com parâmetros de plantas (Oliveira, 1970; Mielniczuk & Selbach, 1978; Nachtigall & Wahl, 1991).

O K apresenta mobilidade no solo, podendo ser redistribuído no perfil pelo fluxo de água (mobilidade vertical) e por absorção e reciclagem pelas plantas (mobilidade horizontal), uma vez que é um nutriente necessário em grandes quantidades, especialmente naquelas de alta produção de massa verde. Assim, a variabilidade vertical e horizontal dos teores K normalmente é menor do que a do P (Anghinoni & Salet, 1998; Schindwein & Anghinoni, 1999 e 2000).

No caso do K, a variabilidade horizontal não deve ser atribuída exclusivamente à deposição do fertilizante próximo à fileira de semeadura. Kepler & Anghinoni (1995) relataram, mesmo sob aplicação a lanço, alta concentração de K próximo à fileira de semeadura e, ao mesmo tempo, diminuição da concentração do nutriente entre as fileiras. Os autores atribuíram esses resultados a grande absorção do K pelas plantas e posterior lavagem da parte aérea pela água das chuvas e/ou exsudação radicular, concentrando o nutriente, desta forma, próximo das plantas. Os autores concluem que a variabilidade horizontal do K foi muito influenciada pela lavagem da parte aérea das plantas, especialmente na cultura do milho.

Quanto à variabilidade vertical, o K, diferentemente do P, dilui-se parcialmente na água e é transportado para camadas de solo mais profundas. No entanto, devido ao intenso processo de ciclagem, a maior quantidade de K em solos sob sistema plantio direto também se encontra na camada de 0 a 5 cm, alcançando, em algumas situações, ainda a camada de 5 a 15 cm, apresentando, a partir de então, pequena variação no perfil (Eltz et al., 1989; Silva, 2002). A contínua deposição de resíduos na superfície do solo sob sistema plantio direto, aliada às reduções das perdas por erosão e lixiviação, explica a maior concentração de K próximo à superfície do solo. E ainda, com o incremento do carbono orgânico do solo verifica-se o incremento da CTC na camada superficial. Com isto há maior retenção do K no complexo de troca, diminuindo os riscos de lixiviação (Bayer, 1996; Sá, 2001).

Silva (2002) observou maior variação de K no local de amostragem (variabilidade horizontal) do que em profundidade (variabilidade vertical) (Tabela 6). Neste caso, deve-se destacar que, na implantação do experimento, os fertilizantes foram aplicados a lanço e, posteriormente, incorporados com gradagem, com o objetivo de promover a distribuição horizontal e vertical. Apesar disto, em curto espaço de tempo foi observada maior concentração de K próximo à fileira de semeadura, confirmando que as plantas desempenham papel importante na variabilidade espacial do potássio. Schlindwein & Anghinoni (2000), em experimentos de longa duração sob sistema plantio direto, verificaram o aumento de K na camada 0-10 cm em relação a 0-20 cm de profundidade, em torno de 30%, semelhante ao verificado na amostragem entre fileiras e inferior às amostragens em fileira e mistura.

Tabela 6. Variabilidade horizontal e vertical de potássio no sistema plantio direto.

Profundidade de amostragem	Locais de amostragem		
	Fileira	Entre fileiras	Mistura
cm	----- mmolc dm ⁻³ -----		
0 - 10	3,5 a ¹	2,3 c	3,2 ab
10 - 20	3,2 a	2,6 b	2,9 b
0 - 20	2,3 a	1,8 c	2,2 bc

¹ Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si.
Fonte: Silva, 2002.

Pelo exposto, destaca-se que os cuidados de amostragem de solo necessários para avaliar corretamente a variabilidade espacial do P sob sistema plantio direto atendem também aos requerimentos do K, que apresenta menor variabilidade do que aquele nutriente.

6.3. Resposta da soja à adubação potássica

A exportação de K nos grãos quantificada na forma de K₂O é muito maior na soja (20 kg t⁻¹) do que em outras culturas, como o trigo e o milho (6 kg t⁻¹) (Comissão..., 2004). Assim, para obter altos rendimentos e manter a fertilidade do solo, em sistemas de cultura com predomínio da soja, deve-se prever a adequada fertilização com K, pois este nutriente é necessário e exportado em grandes quantidades por esta oleaginosa. Historicamente, no RS a cultura da soja, através das colheitas, tem sido a principal exportadora de K do solo, porém, com o avanço dos ganhos de rendimento nesta cultura, este fato tem se agravado ao longo dos últimos anos (Figura 8).

Apesar do exposto anteriormente, estudos conduzidos no Sul do Brasil têm demonstrado pequenas respostas à aplicação de K. Estes resultados podem ser interpretados com base na capacidade das reservas de K do solo de manter o equilíbrio com a solução do solo, atendendo às necessidades das plantas (Oliveira et al., 1971; Meurer & Anghinoni, 1993; Silva et al., 1995; Meurer et al., 1996; Castilhos & Meurer, 2002; Melo et al., 2004; Brunetto et al., 2005). Entretanto, são escassos os estudos em campo com experimentos de longa duração que estabeleçam o nível crítico e a resposta das culturas à adição de K sob sistema plantio direto (Brunetto et al., 2005).

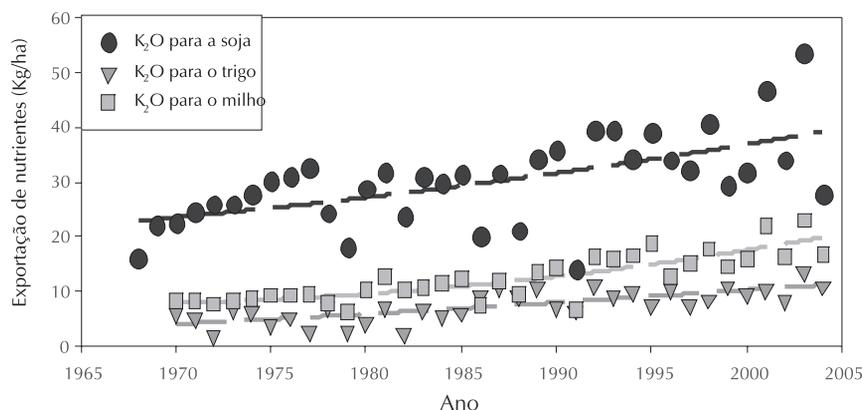


Figura 8. Exportação média de K₂O pela soja, trigo e milho ao longo dos anos, com base na exportação estimada pela Comissão... (2004) e na produtividade média do RS. Fonte: Emater, 1998; Emater, 2005; IBGE, 2005.

Wendling (2005), em experimentos de calibração sob sistema plantio direto conduzido no Paraguai, também encontrou limitada resposta à adubação potássica. O autor atribui o resultado à origem dos solos investigados ser de derrame basáltico, ao curto histórico de uso agrícola e ao alto teor de argila. Vidor et al. (1973), anteriormente, também não encontraram, em alguns solos do RS, resposta de produtividade da soja à aplicação de K, notadamente quando os teores deste nutriente no solo estavam acima de 80 mg dm⁻³. Brunetto et al. (2002) não encontraram respostas à aplicação de K na soja em solos do planalto do RS quando o teor no solo foi superior a 50 mg dm⁻³. Brunetto et al. (2005), em um Argissolo com argila 110 g kg⁻¹, concluíram que, com doses anuais de 40 a 50 kg ha⁻¹ de K, foi possível obter o rendimento máximo das principais culturas de grãos. Os mesmos autores explicaram que devido à fração argila deste solo apresentar ilita, mineral rico em K, e K em formas não trocáveis foi possível obter elevados rendimentos com baixas doses de fertilizantes. Ressalta-se que este resultado pode não se repetir em solos com diferente mineralogia. Outro fator a ser considerado é o efeito da rotação de culturas utilizada nestes experimentos. Assim, a alternância da soja, que possui elevada demanda e exportação de K, com culturas com baixa demanda e exportação, e, portanto, com elevada capacidade de ciclagem, contribui para o aumento da eficiência da fertilização. Neste caso, a demanda da soja pode estar sendo suprida pelo residual da adubação utilizada em outras culturas, como milho, sorgo, trigo e aveia.

Em estudos de calibração de teor de K no solo com o rendimento, encontrou-se nível crítico para a soja, de 40 e 63 mg kg⁻¹, respectivamente, para solos do PR (Borkert et al., 1993) e SC (Scherer, 1998). Recentemente, para várias culturas no sistema plantio direto, sob solo com textura superficial arenosa na Depressão Central do RS, o nível crítico de K encontrado foi de 42 mg kg⁻¹, para a camada de 0-10 cm (Brunetto et al., 2005). Saliencia-se que foi utilizado apenas um solo em cada um dos estudos.

Sch lindwein (2003) realizou um trabalho de calibração dos teores de K no solo sob sistema plantio direto, em 17 locais cultivados com soja, trigo e milho no RS, e encontrou nível crítico maior do que o atualmente recomendado (Comissão..., 2004) (Figura 9). Neste caso, o teor crítico obtido de 120 mg kg⁻¹ de K, na camada de 0-20 cm, foi muito maior do que o relatado nos trabalhos de Borkert et al. (1993), Scherer (1998), e Brunetto et al. (2002 e 2005). Também foi o dobro do valor 60 mg kg⁻¹ obtido em outras calibrações (Boletim de Pesquisa de Soja, 2005) e utilizado como teor crítico até 1986 e proposto, a partir de 2004, para a maioria dos solos agrícolas no RS (Mielniczuk et al., 1969; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Comissão..., 2004). Ainda é maior do que o nível crítico de 80 mg kg⁻¹ utilizado nas recomendações anteriores de Siqueira et al. (1987) e Comissão... (1989 e 1995). Wendling (2005), em estudo de calibração no Paraguai, relatou um teor crítico de K determinado pelo Mehlich 1 de 74 mg dm⁻³, enquanto a MET foi obtida com o teor de 150 mg dm⁻³, para a camada de 0 a 10 cm de profundidade (Figura 10). Sch lindwein (2003) destacou a importância da profundidade de amostragem na definição do teor crítico de K. Assim, o autor encontrou, sob sistema plantio direto, teor crítico na camada 0-10 cm em torno de 50% superior ao da camada de 0-20 cm (Figura 9).

Segundo Comissão... (2004), para o RS e SC, o teor crítico de K se encontraria entre 45 a 90 mg dm⁻³, dependendo da CTC dos solos. Assim, para CTC < 5; 5,1 a 15; e > 15 cmol_c dm⁻³, os teores críticos seriam de 45, 60 e 90 mg dm⁻³, respectivamente, utilizando a solução extratora Mehlich 1 (Figura 11). Sch lindwein (2003), na calibração dos métodos Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina, sob sistema plantio direto no RS, encontrou um teor crítico de K semelhante para os diferentes extratores testados.

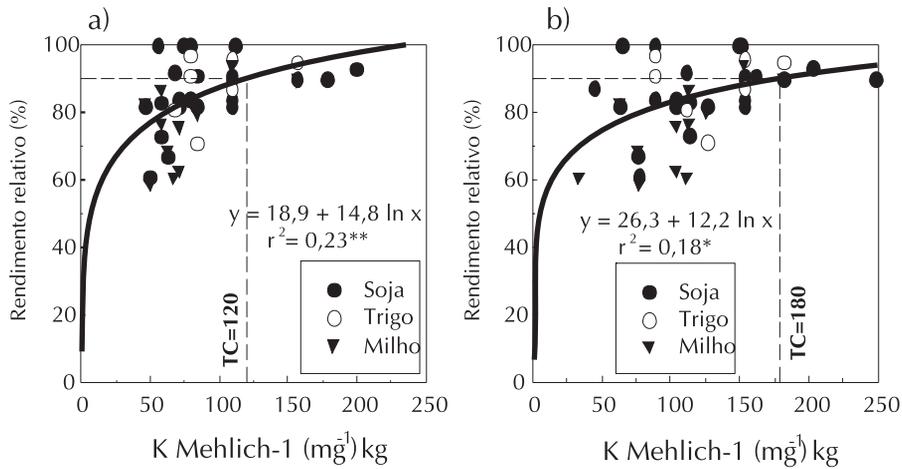


Figura 9. Rendimento relativo de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de potássio Mehlich-1, em 17 diferentes locais do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20 cm, b) 0-10 cm.

** Significativo ($P < 0,01$), * Significativo ($P < 0,05$).

Fonte: Schlindwein, 2003.

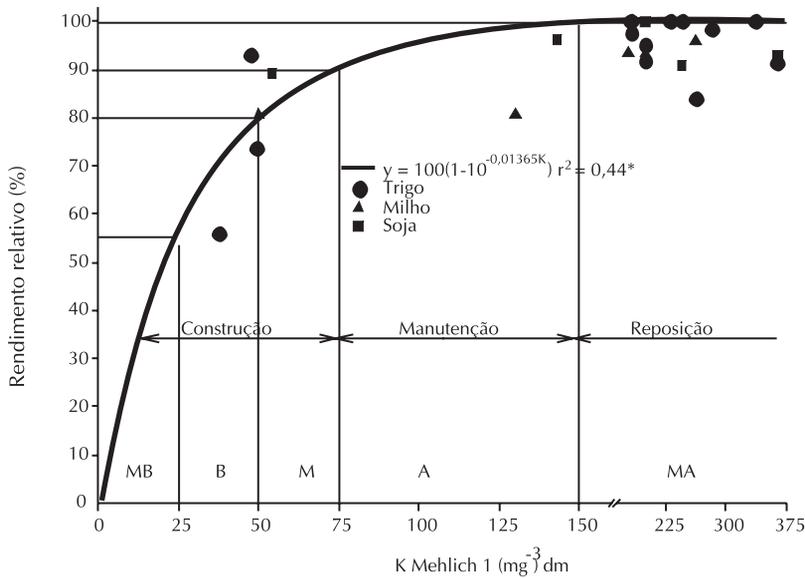


Figura 10. Relação entre K extraído pela solução Mehlich 1 e o rendimento relativo obtido com trigo, milho e soja sob plantio direto, Paraguai, 2005.

** Significativo ($P < 0,01$). MB= muito baixo, B= baixo, M= médio, A= alto, MA= muito alto.

Fonte: Wendling, 2005.

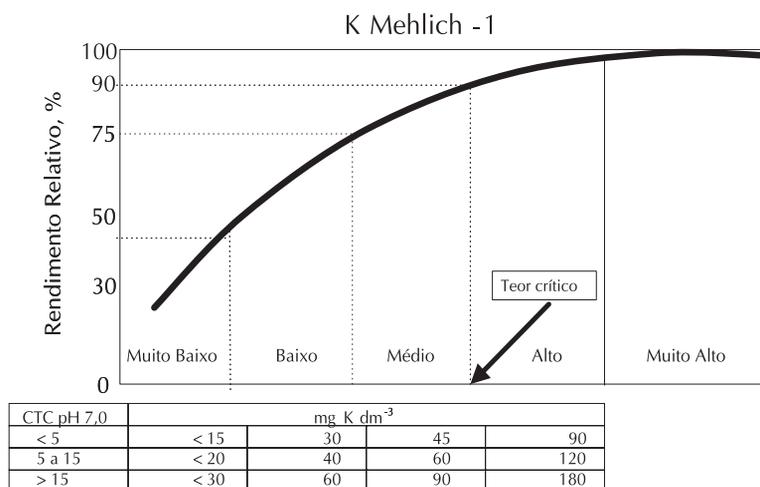


Figura 11. Rendimento relativo e teores de potássio para solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Fonte: Comissão ..., 2004.

Schlindwein (2003) e Schlindwein & Gianello (2004) criticaram o nível de suficiência e, por consequência, as faixas de fertilidade propostas para o K no RS, por ter sido a calibração deste nutriente feita com base no sistema preparo convencional e, atualmente, a maior parte da área de cultivo da soja encontrar-se sob sistema plantio direto. Entre as principais alterações verificadas, destacam-se: a amostragem de solo, que passou a ser feita na camada de solo de maior concentração de K (0 a 10 cm); e as culturas apresentarem atualmente um maior rendimento, necessitando de mais nutrientes para seu crescimento. No trabalho de calibração de K realizado por Schlindwein (2003) além do maior teor crítico encontrado, as faixas de fertilidade foram mais amplas, e, em média, as doses de K para soja foram maiores do que as recomendadas pela Comissão... (2004).

A partir de 1987, as tabelas de recomendação de adubação de K, em média, mantiveram aproximadamente as mesmas doses propostas nas tabelas da Universidade...(1973) ou aumentaram apenas nas faixas de maior fertilidade, como observado nas recomendações de Siqueira et al. (1987) e da Comissão... (1989 e 1995) visando à reposição de nutrientes para soja, trigo e milho com rendimentos acima das atuais médias estaduais. Essas doses mais altas de K não foram suficientes para elevar a fertilidade do solo até o teor crítico no perío-

do de três cultivos, conforme a filosofia de recomendação de adubação, porém os teores de K no solo têm aumentado nos últimos anos. De acordo com os levantamentos de fertilidade realizados em 1981 e em 1988, houve uma tendência de diminuição de 49,3 para 45,9 %, as análises de solo com teores de K acima de 80 mg kg⁻¹ de solo (Tedesco et al., 1984; Drescher et al., 1995). Com recomendações de doses de K maiores a partir de 1987, o percentual de amostras de solo com teores acima de 80 mg kg⁻¹ aumentou para 58,7% em 2000, revertendo a tendência anteriormente apresentada (Rheinheimer et al., 2001). Deve-se considerar, no entanto, que, nesse período, houve alteração no processo de amostragem do solo passando, de 0-17/20 cm para 0-10 cm de profundidade, e ocorreu redução de perdas de solo e nutrientes por erosão devido à adoção do sistema plantio direto (Bertol et al., 1997; Seganfredo et al., 1997).

Nas recomendações da Comissão... (2004), atualmente vigentes, as doses de K são recomendadas tanto para correção da fertilidade (quando o teor está abaixo do crítico) quanto para atender à necessidade da cultura (baseado no rendimento esperado) e, de maneira geral, são maiores para a soja e o milho e menores para o trigo, quando comparadas com as recomendações anteriores da Comissão... (1994). As baixas doses de K recomendadas para a soja ao longo do tempo podem estar entre as causas dos baixos rendimentos médios desta cultura no RS. As maiores doses de K recomendadas para a soja, a partir de 2004, devem propiciar aumentos de rendimento e também dos teores desse nutriente no solo.

Ao comparar a produtividade da soja de 28 safras em 17 locais no RS, Schlindwein (2003) observou grande variabilidade de rendimentos, tanto na ausência do fertilizante potássico, como no aumento do rendimento por kg de K₂O adicionado ao solo. Estes resultados estão associados às diferenças nas características químicas e mineralógicas dos solos estudados, à eficiência de utilização do fertilizante, ao clima e ao manejo. Podem depender também do modo de adubação e das doses utilizadas, que influenciam o efeito residual. No tratamento testemunha (ausência de K₂O), o rendimento médio encontrado por Schlindwein (2003) foi de 2345 kg ha⁻¹, valor superior à média estadual no interstício de 2000 a 2004 (1939 kg ha⁻¹, IBGE, 2005), e o aumento de rendimento foi de 4,32 kg de soja por kg de K₂O adicionado ao solo, valor inferior aos aproximadamente 18 kg

de soja por kg de K_2O anteriormente obtidos por Scherer (1998) e Brunetto et al. (2005). O trigo e o milho tiveram aumentos de rendimento de grãos de 15,58 e 40,21 kg por kg de K_2O adicionado ao solo, respectivamente.

Quando Schlindwein (2003) selecionou somente os experimentos que apresentaram funções quadráticas de resposta à adição de K_2O , a dose de MET da soja foi de 182 kg ha^{-1} de K_2O e o rendimento de grãos estimado para esta dose foi de 2705 kg ha^{-1} , enquanto que o rendimento de MEE da soja foi de 120 kg ha^{-1} de K_2O e o rendimento estimado para esta dose foi de 2631 kg ha^{-1} . Estudos realizados anteriormente por Borkert et al. (1993) determinaram que a dose de MEE para a soja cultivada sob sistema convencional no Paraná, em um solo com baixos teores de potássio, foi de 126 kg ha^{-1} , enquanto que a dose de MET foi de 200 kg ha^{-1} , para rendimentos semelhantes aos encontrados por Schlindwein (2003). No trabalho de Borkert et al. (1993), as doses entre 40 a 80 kg ha^{-1} de K_2O proporcionaram elevadas produções de soja, mas o aumento dos teores de K_2O no solo somente foi alcançado com doses maiores do que 80 kg ha^{-1} , semelhante aos resultados obtidos por Scherer (1998).

Nos estudos de calibração de Schlindwein (2003) e Borkert (1993), o rendimento de MEE da soja foi de 97,3 e 99,2% da MET, respectivamente. Historicamente, as doses de K_2O sugeridas para as adubações consideraram um rendimento de 90% da MET, mantendo, desta forma, uma margem de segurança para eventuais variações nas relações de preços da soja e do insumo. Isto significa que os agricultores podem estar adubando a menos do que as doses de MEE (com base na relação preço da soja/ custo do fertilizante potássico). Esta reflexão é importante especialmente para aqueles produtores que objetivam alcançar elevados rendimentos.

As doses de K, como as de P, podem variar muito em função da eficiência das plantas na utilização dos fertilizantes. Além do modo de aplicação e das fontes, a eficiência depende também dos demais fatores de produção, como solo, cultura, clima e manejo (Fitss, 1959). Além disso, a dose de MEE varia com a alteração de preços dos fertilizantes e dos insumos, a qual, por sua vez, é influenciada pelo custo de transporte, época do ano de aquisição do produto, entre outros.

No sistema plantio direto, a fertilização potássica é aplicada basicamente de duas formas. A primeira e mais tradicional é no momento

da semente, em que geralmente o fertilizante é depositado preferencialmente abaixo e ao lado da posição da semente no solo, visando minimizar o efeito salino. A segunda forma é feita a lanço na superfície do solo nas mais diferentes épocas do ano. A eficiência desses sistemas de fertilização tem-se mostrado semelhante, quando o solo apresenta K acima do teor crítico (Wiethölter, 1996; Pöttker, 1999; Ceretta & Pavinato, 2003; Pavinato, 2004; Broch & Chueri, 2005). Em solos arenosos, a aplicação a lanço apresenta a vantagem de diminuir os riscos de lixiviação, porém, neste caso, cuidados especiais devem ser tomados para a distribuição uniforme de fertilizante (Comissão..., 2004). Este aspecto deve ser ressaltado, pois em muitas situações de campo a diferença de produtividade não está associada ao produto que foi utilizado ou mesmo à quantidade planejada e sim à qualidade da aplicação (Comissão..., 2004). Entre as vantagens da aplicação de K a lanço (antes ou após o plantio), destacam-se: o menor risco de efeito salino sobre as sementes e raízes de soja, rapidez da sementeira, melhor distribuição da mão de obra, e maior flexibilidade de fórmulas de P ajustadas à necessidade a ser aplicado no sulco (Broch & Chueiri, 2005). Para solos argilosos do planalto do RS, a aplicação antecipada na cultura de inverno tem se mostrado eficiente estratégia de suprimento de K para soja. Os agricultores Cornelis Souillje, em Carazinho, e Ulfried Arns⁵, em Cruz Alta, utilizam há mais de 20 anos a adubação anual de P e K a lanço, nos meses de abril e maio, nas culturas de cobertura do solo, obtendo rendimentos elevados de soja (Broch & Chueiri, 2005). Assim fica possível fazer a adubação do sistema e não mais de cada cultura individualmente. Por outro lado, quando o solo apresenta teores de K abaixo do teor crítico, aumenta a probabilidade de resposta das culturas para a aplicação em sulco, criando uma zona de alta concentração do elemento próximo à raiz, fato que favorece a absorção (Ceretta & Pavinato, 2003).

Kluthcouski & Stone (2003) destacaram os efeitos negativos de fertilizantes e corretivos sobre as sementes e raízes de soja. Os autores constataram que o cloreto de potássio apresentou o mais elevado efeito salino (Tabela 7). Este efeito será maior sobre as plantas de soja em anos secos (Mallarino, 1997). Kluthcouski (1998) sustentou que o efeito salino do cloreto de potássio sobre as raízes de soja e, principalmen-

⁵ Comunicação pessoal em 2003.

te, do feijão pode favorecer a ocorrência de doenças do sistema radicular (*Fusarium* sp. e *Rhizoctonia* sp.). O autor constatou que a aplicação de 65 kg ha⁻¹ de K₂O próximo à fileira de semeadura reduziu o estande final de plantas de soja em 12%. Para amenizar o problema, Kluthcouski & Stone (2003) sugeriram desalinhar o mecanismo sulcador da semeadora, em pelo menos 5 cm, em relação ao alinhamento das sementes; alternativamente, aprofundar o máximo possível a colocação do fertilizante, distanciando em aproximadamente 5 cm o fertilizante das sementes, e utilizar, preferencialmente, sulcadores providos de haste (facão). O assunto é complexo, para a maioria dos autores não deveriam ser aplicados mais do que 50 kg ha⁻¹ de K₂O próximo à fileira de semeadura da soja, sendo recomendando para doses maiores a aplicação a lanço (Gassen, 2002; Comissão... 2004).

Tabela 7. Efeito salino dos principais fertilizantes e corretivos.

Fertilizante/corretivo	Índice Salino
Nitrato de sódio	100
Amônia anidra	47,1
Nitrato de amônio	104,7
Nitrato de cálcio	52,5
Fosfato monoamônico	34,2
Fosfato diamônico	29,9
Superfosfato simples	7,8
Superfosfato triplo	10,1
Calcário calcítico	4,7
Calcário dolomítico	0,8
Uréia	75,4
Sulfato de amônio	69
Cloreto de potássio	116,3
Nitrato de potássio	73,6
Sulfato de potássio	46,1

Fonte: Knott (1957), adaptado de Kluthcouski & Stone, 2003.

Para solos arenosos (< 20 % de argila) e com baixa CTC, a aplicação poderia ser parcelada: uma parte na semeadura e o restante em cobertura até 30 dias após a semeadura. Alternativamente, poder-se-ia utilizar fertilizantes com menor concentração de K (Zancanaro et al., 2002; Wendling, 2005). Portanto, no manejo da adubação potássica em solos arenosos, deve-se considerar o risco de perdas por lixiviação (Sanzonowicz & Mielniczuk, 1985). Neste caso, a utilização de culturas de cobertura na entressafra da soja também é uma estratégia de redução da lixiviação (Comissão..., 2004). As culturas de cobertura, tais como o nabo forrageiro e o milheto, podem desempenhar importante papel na reciclagem de K, pela absorção deste nutriente de camadas mais profundas de solo e a sua deposição, através dos resíduos, na superfície (Rossato, 2004).

Em solos muito argilosos ou com alta capacidade de troca de cátions, o K é um elemento com limitada mobilidade vertical no solo. Nestas situações, a perda por lixiviação é reduzida, sendo observada a criação de teores altos, e mesmo muito altos, do nutriente no solo, com a sucessão de adubações. Este fato deve ser observado, pois o excesso de K no solo pode ocasionar menor absorção de cálcio e magnésio devido ao desequilíbrio na relação entre cátions no solo. No SPD com rotação de culturas e aplicação de alta tecnologia, é comum observar-se o incremento dos teores de K no solo já nos primeiros anos de adoção do sistema.

Wendling (2005) ressalta a importância de observar o momento de amostragem do solo para avaliar corretamente a disponibilidade de K, especialmente em sistemas com rotação de culturas. Este fato deve-se à elevada absorção de K pelas plantas, verificando-se em muitas situações consumo de luxo. Em condições de altas produtividades as plantas de milho ou de nabo forrageiro podem absorver mais de 250 kg ha⁻¹ de K (Rossato, 2004). A velocidade de ciclagem do K absorvido pela planta depende da cultura. Assim, Wendling (2005) observou que o teor de K no solo após o cultivo de milho foi menor que o teor após a soja. O autor atribui o fato à menor relação C/N da soja e a forma de colheita da leguminosa, que deixa o resíduo em contato direto com o solo, favorecendo a rápida ciclagem. Por outro lado, a dinâmica de liberação do K de resíduos do milho foi mais lenta. Raij (1981) também alertou sobre cuidados que devem ser observados na interpretação das análises de solo quanto ao K, que pode

apresentar valores mais baixos quando a área encontra-se sob desenvolvimento vegetal.

Wendling (2005) determinou que seriam necessários, aproximadamente, 5 kg ha⁻¹ de K₂O para elevar 1 mg dm⁻³ do teor de K no solo sob sistema plantio direto no Paraguai.

7. Macronutrientes secundários

7.1. Cálcio, Magnésio e Enxofre na soja

O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) são absorvidos pelas plantas na forma iônica Ca²⁺ e Mg²⁺. O enxofre (S) é absorvido principalmente na forma de sulfato (SO₄²⁻), porém, no caso específico deste último nutriente as plantas também podem absorvê-lo via foliar, na forma gasosa (SO₂).

No solo, Ca, Mg e S têm mobilidade intermediária a do P (pouco móvel) e a do N (muito móvel). Entre os macronutrientes secundários, o S apresenta maior mobilidade no solo. Nas plantas é o Mg que tem a maior mobilidade, enquanto o S tem pequena mobilidade. Com isto, em caso de deficiência, verificam-se sintomas de deficiência (amarelecimento) nas folhas mais novas. O Ca, por sua vez, é praticamente imóvel nas plantas, deslocando-se preferencialmente pelo xilema dos ápices radiculares aos pontos de crescimento na parte aérea.

Nas plantas os três nutrientes fazem parte das proteínas, porém o Ca também tem funções importantes na formação das paredes celulares, na formação dos frutos e na ativação de inúmeros processos fisiológicos. O Mg também tem funções na ativação de processos fisiológicos e na fotossíntese. A faixa de suficiência no tecido foliar de soja seria 0,4 a 2,0% para o Ca, 0,3 a 1,0% para o Mg e 0,21 a 0,4% para o S (Comissão..., 2004).

7.2. Cálcio, Magnésio e Enxofre no solo

O Ca e Mg no solo se encontram predominantemente na forma iônica (Ca²⁺, Mg²⁺), presentes na forma trocável da fase sólida dos solos ácidos de clima tropical e subtropical ou presentes na solução do solo em pequenas quantidades, mas que estão em equilíbrio rápido com a fase sólida do solo. Ambos são supridos para as plantas em mais de 90% por fluxo de massa.

Em solos com pH > 5,5, recomendado pela Comissão... (2004), normalmente os teores trocáveis de Ca e Mg estão acima dos teores críticos de 4 e 1 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente (Raij et al., 1997; Comissão..., 2004).

A interpretação da relação Ca/Mg, por vezes, é polêmica, dependendo da filosofia de adubação adotada: a dos níveis de suficiência, que é a mais aceita e utilizada nas recomendações em nível nacional e internacional, e a das relações entre os cátions trocáveis, que busca uma relação ideal entre Ca, Mg, K e H. A grande maioria das pesquisas tem demonstrado que as relações Ca/Mg presentes nos solos não têm influência sobre o rendimento das culturas, desde que os teores desses nutrientes estejam acima dos níveis críticos (EMBRAPA, 1981; Ritchey & Souza, 1982; Serafini, 1991; Oliveira, 1993; Quaggio, 2000). Na Tabela 8, observa-se que a concentração de Ca e Mg nas folhas são proporcionais à relação presente no tratamento, entretanto, os rendimentos de soja não foram significativamente afetados pelas diferentes relações Ca/Mg. Isto pode estar associado a grande amplitude dos teores ideais destes nutrientes nas folhas. No entanto, ressalta-se que os rendimentos obtidos não foram elevados.

Quaggio (2000), revisando mais de 20 artigos científicos, também chegou à conclusão de que as relações Ca e Mg somente afetam significativamente os rendimentos das culturas quando os teores estão abaixo dos níveis críticos, ou para relações extremamente diferentes da geralmente encontrada nos solos agrícolas. Isto ocorre, por exemplo, com teor de Mg duas vezes superior ao do Ca ou teor de Ca mais de 20 vezes superior ao do Mg.

Ao contrário do Ca e Mg, o S tem um comportamento muito complexo no solo, combinando-se facilmente a outros compostos, como C, H e O, e passando de estágios de redução a oxidação e vice-versa, dependendo de umidade e pH do solo. A principal fonte de S no solo para as plantas é a MOS.

Tabela 8. Rendimento de grãos e teor de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas folhas de soja sob diferentes relações destes nutrientes no solo.

Relação Ca/Mg no solo	Rendimento de grãos	Ca nas folhas	Mg nas folhas
	--- kg ha ⁻¹ ---	----- % -----	
3:1	2292 a	0,67	0,35
1:3	2238 ab	0,42	0,53
1:1	2177 ab	0,55	0,45
6:1	2129 ab	0,75	0,33
35:1	2079 ab	0,90	0,25 ¹
1:0	1977 ab	0,93	0,20 ¹
70:1	1864 b	0,88	0,21 ¹
0:1	45 c	0,25 ¹	0,72

¹ Valores que indicam deficiência.

Fonte: Embrapa, 1981.

O teor crítico de S para a obtenção de elevados rendimentos de soja é de 10 mg kg⁻¹ (Comissão..., 2004), destacando-se que a grande maioria dos solos no RS apresenta teores acima deste valor, especialmente na camada de 0-20 cm. As maiores deficiências de S ocorrem em solos arenosos, nos quais este nutriente pode ter sido lixiviado, em solos com baixos teores de MO e em solos distantes de cidades e indústrias onde ocorre queima de combustíveis fósseis (derivados do petróleo). As principais fontes de S, além da atmosfera, segundo O Boletim de Pesquisa de Soja (2005), são: enxofre elementar (95 a 98% de S), gesso agrícola (13 a 15% de S), superfosfato simples (8 a 12% de S), sulfato de amônio (22 a 24% de S), sulfato de potássio (15 a 17% de S), sulfato de potássio e magnésio (20 a 24% de S). Os fungicidas são fontes de S com concentração variável.

7.3. Respostas da soja a aplicação de Ca, Mg e S

A principal fonte de Ca e Mg é o calcário agrícola, que possui soma de óxidos (CaO + MgO) mínima de 38%. Assim, quando se utiliza o calcário como corretivo da acidez do solo, adicionam-se Ca e Mg em quantidades suficientes para altos rendimentos de soja. Este fato pode ser constatado pelas respostas da soja em função saturação de bases, composta em grande parte por Ca e Mg, e apresentada no

item dinâmica do pH (Figuras 12 e 13b). Na Tabela 9, observa-se que a soja apresentou rendimentos semelhantes quando se adicionou calcário calcítico (MgO < 5%) ou dolomítico (MgO > 5%), havendo resposta positiva à dose aplicada, independente do corretivo utilizado (Quaggio, 2000).

A resposta da soja a adição de gesso, fonte de S, na maioria dos solos do RS e SC tem sido baixa (Ernani et al., 1992; Ernani, 1993). No entanto, Nuerberg et al. (2002), em ano de estiagem, encontrou resposta positiva da soja a adição de gesso, atribuindo o resultado a maior aprofundamento do sistema radicular. Considerando a frequência de ocorrência de déficits hídricos durante o ciclo da soja no RS, o estímulo químico ao aprofundamento do sistema radicular sob sistema plantio direto torna-se um tema de pesquisa relevante. Nos solos arenosos do cerrado brasileiro, tem se verificado resposta positiva da soja à aplicação de até 30 kg ha⁻¹ de S, tendo como fonte o superfosfato simples e o gesso (Boletim Técnico da Soja, 2005).

Tabela 9. Resposta da soja à aplicação de doses de calcário calcítico e dolomítico.

Calcário dolomítico	Calcário calcítico (t ha ⁻¹)					Média
	0	1	2	3	4	
t ha ⁻¹	----- Rendimento de grãos kg ha ⁻¹ -----					
0	2173	2038	2441	2226	2340	2243
1	2248	2631	2402	2569	2544	2478
2	2350	2246	2402	2673	3005	2535
3	2381	2173	2392	2537	2714	2439
4	2641	2808	3006	2860	2964	2855
Média	2359	2379	2528	2573	2713	2510

Fonte: Quaggio, 2000.

8. Micronutrientes

8.1. Micronutrientes na soja

Na cultura da soja, por desenvolver associação simbiótica com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, a necessidade de alguns

micronutrientes pode ser ainda mais importante do que em outras culturas, pois eles são essenciais para a fixação biológica do nitrogênio.

No sistema enzimático denominado nitrogenase verifica-se a participação de ferro (Fe), manganês (Mn) e molibdênio (Mo). O Mo exerce, nas plantas, importante papel nas reações de transferência de elétrons. Ainda participa como cofator das enzimas nitrogenase, redutase do nitrato e oxidase do sulfato e na formação da proteína Mo-Fe-S (Martens & Westermann, 1991). O cobalto (Co) é outro micronutriente essencial na fixação biológica do N.

Desse modo, a deficiência de Mo no solo poderá reduzir a síntese da enzima nitrogenase, com conseqüente diminuição da FBN e, portanto, do rendimento da soja. Além disso, quando ocorre baixa disponibilidade de molibdênio no solo, este é redistribuído das folhas para os nódulos, aumentando a deficiência na planta (Salisbury & Ross, 1991).

O boro (B) é essencial na divisão e desenvolvimento das células, sendo mais acentuada a sua ação sobre as gemas e pontas das raízes. Sob condições de deficiência deste nutriente, verificam-se prejuízos a germinação dos grãos de pólen, crescimento do tubo polínico, florescimento, retenção da floração e, conseqüentemente, a formação das sementes. O B atua também na formação da parede celular, no processo da síntese de proteínas, no aumento do teor de clorofila, na integridade da membrana plasmática, no metabolismo fenólico, na lignificação, na formação dos nódulos das leguminosas, no crescimento dos ramos e frutos e é ativador da fosforilase do amido.

O manganês (Mn) atua no sistema enzimático de várias reações metabólicas importantes, como a conversão de N-nitrato para aminoácidos e proteínas. Participa diretamente na fotossíntese ajudando na síntese de clorofila, acelera a germinação e a maturidade e aumenta a disponibilidade de fósforo e cálcio. Bioquimicamente, forma, juntamente com o magnésio, as pontes entre o ATP e as enzimas transferidoras de grupos, além de agir no ciclo dos ácidos tricarbóxicos. Ainda tem participação no desdobramento da molécula de água e na evolução do oxigênio no sistema fotossintético.

O cobre (Cu) compõe enzimas que participam da fotossíntese (sem a sua presença não ocorrerão a formação da clorofila nem a transformação de água + gás carbônico + luz em açúcar, respiração, distribuição de carboidratos, redução e fixação de nitrogênio, metabolismo de

proteínas e da parede celular. O cobre atua ainda na permeabilidade dos vasos do xilema à água. A produção de DNA e RNA é controlada pelo cobre, e a sua deficiência severa inibe a reprodução das plantas (o pólen é estéril e a produção de sementes é reduzida). O acúmulo do Cu se dá nas raízes. Este micronutriente, em geral, possui pouca mobilidade nas plantas, podendo sair das folhas velhas para as mais novas. A mobilidade deste elemento na planta está sob a dependência do teor no tecido, pois plantas bem nutridas apresentam mobilidade do cobre até os grãos, enquanto nas deficientes o movimento é mais difícil (Lopes, 2000).

O zinco (Zn) atua em muitos sistemas enzimáticos das plantas, na multiplicação e crescimento das células, na absorção de nutrientes, no processo de fotossíntese e ainda aumenta o teor de proteína nos grãos. A resposta a este micronutriente irá depender das características genéticas das culturas. O milho responde muito bem ao Zn; a cevada, a soja e o trigo, moderadamente.

As exigências nutricionais para a produção de 1 tonelada de grãos de soja, segundo a Embrapa (1993), são de 5 g de Mo, 2 g de B, 30 g de Mn, 10 g de Cu, 40 g de Zn. Enquanto, a faixa de suficiência no tecido foliar de soja seria de 1,0 a 5,0 mg kg⁻¹ para Mo, 21 a 55 mg kg⁻¹ para B, 20 a 100 mg kg⁻¹ para Mn, 10 a 30 mg kg⁻¹ para Cu, 20 a 50 mg kg⁻¹ para Zn (Comissão..., 2004).

8.2. Micronutrientes no solo

O conhecimento dos fatores que afetam a ocorrência, reação e movimento no solo é relevante para analisar o comportamento dos micronutrientes no sistema solo-planta e, conseqüentemente, a sua disponibilidade para as plantas (Camargo, 1988). A ocorrência de micronutrientes está muito relacionada ao material de origem dos solos, e é um fator determinante na disponibilidade. Solos derivados de basalto, como a maioria do Planalto do RS, têm em geral maior disponibilidade de micronutrientes do que solos derivados de sedimentos arenosos, como alguns da Fronteira Oeste e Depressão Central do RS.

Os micronutrientes são de natureza essencialmente inorgânica, e sua disponibilidade pode variar muito, em função das reações que ocorrem com os componentes orgânicos e inorgânicos do solo, as quais controlam sua disponibilidade. Desta maneira, a capacidade do solo

em reter e/ou disponibilizar micronutrientes para as plantas, quer sejam da sua reserva natural, quer aplicados via adubação, depende das suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Dentre os atributos de solo que mais influenciam a disponibilidade de micronutrientes, destacam-se: a textura, o pH, a umidade, o teor de matéria orgânica e de óxidos de ferro e alumínio (Camargo, 1988; Bataglia, 1988).

A influência da acidez do solo na disponibilidade dos micronutrientes é apresentada na Figura 12 (item dinâmica do pH). A calagem tem se mostrado eficiente em aumentar a disponibilidade de Mo à soja. Por outro lado, a diminuição da disponibilidade de Fe, Cu, Mn, Zn e B pela calagem ocorre, mas só é crítica quando o pH se eleva acima de 6,5 ou quando os solos são derivados de material de origem sedimentar.

A análise de solo é a principal ferramenta para avaliar a fertilidade do solo. Entretanto, devido aos poucos trabalhos de pesquisa de longa duração visando à calibração de teores de micronutrientes no solo e resposta das culturas, não é conveniente manejar a adubação somente com base na análise do solo. Apesar disto, a interpretação dos teores de micronutrientes no solo deve servir de base para tomada de decisão de ações corretivas.

8.3. Respostas da soja à adubação com micronutrientes

A resposta da soja à micronutrientes está associada às condições em que os estudos são desenvolvidos. Não é tarefa simples a análise comparativa dos resultados obtidos em diferentes experimentos testando fontes, doses e formas de aplicação de micronutrientes na soja. Muitos dos trabalhos publicados não descrevem o histórico de área, que pode influenciar a magnitude das respostas. Dessa forma, no RS os resultados são controversos, dificultando conclusões consistentes sobre a eficiência da adubação com micronutrientes.

Segundo a Comissão... (2004), as informações de pesquisas realizadas nos últimos anos indicam que a maioria dos solos no RS e SC apresenta disponibilidade adequada de micronutrientes (Zn, Cu, B, Mn e Mo), não tendo havido incremento no rendimento com a sua aplicação, apesar de, às vezes, as plantas apresentarem melhor aspecto visual, que, no entanto, não se traduz em aumento de rendimento das culturas. Em adição, deve ser considerado que a maioria

dos fertilizantes fosfatados e o calcário apresentam alguns desses nutrientes em sua composição. Por essa razão, a aplicação de micronutrientes só deveria ser feita se a análise de solo acrescida da análise de tecido foliar indicasse deficiência.

Atualmente, o único micronutriente que possui recomendação oficial de adubação pela pesquisa do RS e SC é o molibdênio em soja. Existem condições do solo que aumentam a probabilidade de resposta ao Mo. Assim, a aplicação Mo na soja, segundo as indicações técnicas para a cultura no RS e SC 2005/2006 (Reunião..., 2005), é recomendada para solos com pH em água inferior a 5,5 e/ou quando as plantas de soja apresentarem deficiência de N no início do seu desenvolvimento, resultante da baixa eficiência da FBN.

Com o objetivo de investigar a eficiência da adubação com micronutrientes, foi realizado um trabalho de pesquisa envolvendo a Embrapa-Trigo (Passo Fundo, RS), a Fundacep Fecotrigo (Cruz Alta, RS) e a FAPA (Guarapuava, PR). O estudo foi feito em uma rede de experimentos, em diferentes locais, solos e em situações de lavouras de produtores, sendo avaliado por 3 anos o efeito da aplicação de Zn, Cu, B e Mn, no sulco de semeadura do trigo e seu efeito residual na soja e milho. De uma maneira geral, os resultados obtidos, na maioria dos locais, culturas e anos avaliados, não mostraram efeito significativo da utilização destes micronutrientes. As eventuais respostas positivas da aplicação de micronutrientes estiveram mais relacionadas ao manejo indevido de certos insumos, como o calcário, por exemplo, do que associados à deficiência no solo.

Além da capacidade do solo em suprir os micronutrientes, uma nutrição adequada da soja dependerá de interações destes com alguns macronutrientes. Essas interações podem ocorrer tanto no solo como dentro da planta, onde ocorre uma influência ou ação mútua de um elemento sobre outro. A resposta diferencial de dois nutrientes combinados pode produzir um efeito de sinergismo ou de antagonismo. Este último fato é muito importante, quando da busca de elevados rendimentos na soja, pois a utilização de elevadas doses de fertilizantes e corretivos, pode criar situações de resposta a alguns micronutrientes. Por exemplo, o aumento exagerado nos teores de fósforo na camada superficial pode incrementar a probabilidade de resposta a Zn, devido à interação negativa (antagonismo) de P-Zn.

No sistema plantio direto estabelecido, a limitada resposta a calagem tem levado muitos produtores a passar muitos anos sem aplicação do corretivo. Segundo Lopes et al. (2004), nesta situação é de se esperar maior disponibilidade de Zn, Cu, Fe, Mn e B e intensificação das deficiências de Mo. Por outro lado, nas áreas que receberam calagem superficial com doses superiores a 3 t ha⁻¹, a elevação do pH que ocorre nos primeiros centímetros da superfície do solo pode inverter a tendência anteriormente apresentada.

O aumento no teor de matéria orgânica, com o passar dos anos de adoção do sistema plantio direto, exerce efeito no aumento da disponibilidade de vários micronutrientes, porém também pode diminuir a disponibilidade de alguns poucos micronutrientes, como o cobre, por formar complexos organo-metálicos estáveis.

A desejável situação de elevados rendimentos de soja, que induz a exportações sucessivas de micronutrientes, notadamente em solos de textura arenosa e baixo teor de matéria orgânica, portanto com menor capacidade de suprimento, aumenta a probabilidade de resposta à aplicação de alguns micronutrientes. Muitos agricultores que tradicionalmente obtêm elevados rendimentos têm aplicado micronutrientes nas sementes de soja de forma preventiva. A utilização de sistemas de culturas, que incluam culturas de cobertura, com sistema radicular robusto, pode contribuir na reciclagem de micronutrientes atendendo parcialmente à demanda da soja.

Com base no exposto, a decisão de aplicação de micronutrientes na cultura da soja no Sul do Brasil deve ser baseada em resultados de análise do solo, de tecido foliar, da observação de sintomas visuais de deficiência ou de toxidez, e, finalmente, do histórico de rendimento da área.

9. Dinâmica do pH do solo

A acidez do solo pode se constituir em fator de limitação da produtividade da soja, notadamente quando o pH baixo estiver associado à presença de alumínio e/ou manganês, em teores capazes de provocar distúrbios fisiológicos nas plantas. Isto, associado a menor CTC, menor atividade biológica, menor disponibilidade de muitos nutrien-

tes, menor aproveitamento dos fertilizantes aplicados, verificados sob solos ácidos, pode comprometer o rendimento da soja.

As principais causas químicas da acidez do solo são: a água da chuva (dissociação do ácido carbônico – H_2CO_3), a decomposição de materiais orgânicos (dissociação de prótons de grupamentos carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica e de resíduos culturais), elevada adição de fertilizantes nitrogenados (uréia e sulfato de amônio) associados a perdas por lixiviação de N e de cátions, como cálcio, potássio e magnésio.

A influência da acidez do solo na disponibilidade dos principais nutrientes pode ser constatada na Figura 12. Nesta figura verifica-se que, em solos muito ácidos, é reduzida a disponibilidade da maioria dos nutrientes, com exceção dos micronutrientes Fe, Cu, Mn e Zn, e, por outro lado, é alta a disponibilidade de alumínio.

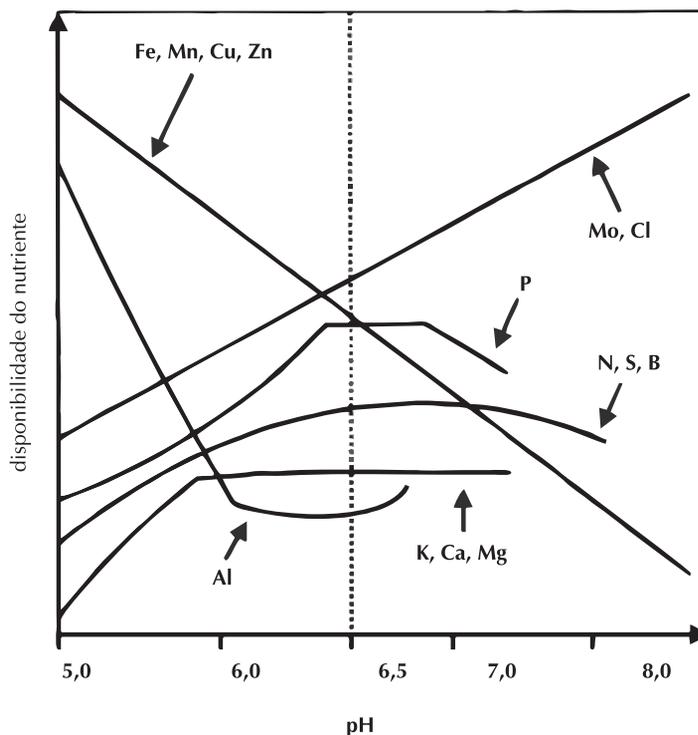


Figura 12. Disponibilidade de nutrientes de acordo com o pH do solo.
Fonte: Malavolta, 1981.

O alumínio estará na solução do solo, disponível para ser absorvido pelas raízes das plantas quando o pH do solo for inferior a 5,5. O principal efeito deste elemento tóxico é a diminuição da expansão da parede celular das raízes, sintoma visualizado pelo menor crescimento e engrossamento das raízes, resultando em limitada capacidade de absorção de água e nutrientes. O alumínio também é fonte de acidez no solo.

Quanto menor for o pH do solo, menor será a capacidade de troca de cátions, pois se verifica diminuição nas cargas negativas na superfície das argilas, nas quais nutrientes como K, Ca e Mg se encontram adsorvidos, mantendo equilíbrio com a solução do solo. Outro frequente problema de disponibilidade de nutrientes em solos ácidos é com o fósforo e o molibdênio, pela sua alta capacidade de adsorção aos óxidos de ferro e alumínio, que são mais reativos em menor pH. Os fertilizantes, geralmente, também têm menor aproveitamento quando o solo for ácido, pela menor CTC e elevada adsorção de P aos óxidos.

Neste contexto, a correção da acidez do solo objetiva elevar o pH do solo, proporcionando às plantas um ambiente de crescimento radicular adequado, diminuindo a atividade de elementos potencialmente tóxicos (alumínio e manganês) e/ou favorecendo a disponibilidade de elementos essenciais às plantas (Comissão..., 2004).

O modelo utilizado para a recomendação de calagem compõe-se de duas etapas. A primeira refere-se à tomada de decisão para a calagem, isto é, da aplicação ou não de calcário. Para isso, utilizam-se índices de acidez do solo (pH, V%, Al e %Al), e, dentro desses índices, são estipulados valores referenciais predeterminados. Esses valores são baseados, de forma geral, no máximo rendimento econômico das culturas, de modo que rendimentos inferiores indicam a necessidade de calagem. A segunda etapa refere-se à recomendação da dose de corretivo a ser utilizada para atingir o valor de referência.

No sistema plantio direto consolidado, a manutenção do solo constantemente coberto por plantas, com adição frequente de resíduos orgânicos, altera a dinâmica do alumínio e a disponibilidade de nutrientes, resultando, geralmente, em menor quantidade de corretivo para se obter elevado rendimento de soja. Vários são os mecanismos propostos para explicar a menor necessidade de calcário sob sistema plantio direto. Entre eles destaca-se a complexação de alumínio pelos ácidos

orgânicos do solo provenientes da decomposição da matéria orgânica e da exudação pelas raízes das plantas (Miyazawa et al., 1993; Salet, 1998; Franchini et al., 1999). E ainda, a capacidade dos ácidos orgânicos em complexar o alumínio depende do tipo e quantidade dos grupos funcionais (OH^- ou COOH^-) de superfície na cadeia carboxílica. O processo de reacidificação do solo sob sistema plantio direto também é mais lento do que sob preparo convencional.

A interação do calcário com P foi investigada, anteriormente, por Vidor (1972) e, posteriormente, por Nolla (2003), que verificaram diminuição da acidez e do alumínio tóxico quando foram aplicadas altas doses de fósforo. Este fato está associado à formação de precipitados de $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$, devido à elevada afinidade entre o P e o Al, reduzindo a atividade do alumínio na solução do solo.

No sistema de preparo convencional, o programa de Adubação e Calagem do RS e SC (Comissão..., 1994) recomendava a elevação do pH a 6,0, incorporando o calcário a 20 cm de profundidade no solo. Já no sistema plantio direto, a aplicação superficial de calcário tem se mostrado eficiente, proporcionando rendimentos semelhantes aos obtidos com a incorporação no sistema convencional (Cassol, 1995; Santos, 1997; Amaral, 1998). Mesmo em solos com baixo pH no sistema plantio direto estabelecido tem se observado elevados rendimento das culturas (Oliveira & Pavan, 1996; Pöttker & Ben, 1998). Assim, neste sistema tem se obtido rendimentos elevados com apenas 25 a 50% da dose de corretivo anteriormente recomendada sob sistema convencional. Na Tabela 10 observam-se a eficiência do calcário aplicado na superfície do solo no sistema plantio direto e a obtenção de rendimentos satisfatórios, mesmo com doses reduzidas do corretivo.

O não revolvimento do solo no sistema plantio direto causa uma “frente de acidificação” em função da decomposição dos resíduos do material orgânico e das reações dos fertilizantes nitrogenados, diminuindo o pH do solo (Eckert, 1991; Paiva et al., 1996; Anghinoni & Salet, 1998). Por outro lado, quando se aplica calcário em doses maiores do que as necessárias para neutralizar essa frente de acidificação, ocorre uma elevação do pH (Cassol, 1995; Amaral, 1998; Pöttker & Ben, 1998), formando um gradiente de alcalinização no perfil do solo, que alcança normalmente pequenas profundidades. O corretivo irá

alcançar profundidades maiores quando as partículas de calcário deslocarem-se no perfil por fissuras do solo, canalículos deixados por raízes e por galerias de macro e mesofauna (Gassen & Kochhann, 1998; Wiethölter et al., 1998; Petreire, 1998, Amaral, 2002).

Tabela 10. Rendimento médio de grãos da sequência de culturas soja, trigo, milho, aveia preta, soja, cevada e soja cultivados no sistema plantio direto, com diferentes doses de calcário, incorporado e aplicado em superfície.

Tratamento	Solo		Média ³
	LVdt ¹	LVaft ²	
	----- kg ha ⁻¹ -----		
Testemunha sem calcário	2174	2926	2550
1 SMP incorporado	2857	3439	3148
1 SPM em superfície	2819	3450	3134
1/2 SPM em superfície	2756	3448	3102
1/4 SPM em superfície	2626	3340	2983
1/8 SPM em superfície	2535	3290	2912
1/16 SPM em superfície	2524	3210	2862
Média	2612	3300	2956

¹ Latossolo Vermelho distrófico típico, 1SMP = 10,7 t ha⁻¹ de calcário, cultivado no SPD desde 1990.

² Latossolo Vermelho aluminoférrico, 1 SMP = 7,2 t ha⁻¹ de calcário, cultivado no SPD desde 1984.

³ Valores médios de sete cultivos em cada solo. Em ambos os experimentos o calcário foi aplicado em 1983.

Fonte: Pöttker et al., 1998.

Estudos conduzidos sob sistema plantio direto no sul do Brasil indicaram que a profundidade de influência do calcário aplicado em superfície, nos parâmetros de acidez do solo (aumento de pH, redução dos teores e da saturação do alumínio, aumento dos teores de cálcio e magnésio e, por consequência, da saturação de bases) foi influenciada pela dose, tempo de aplicação, tipo e manejo de solo. Assim, a profundidade de influência do calcário foi de apenas 2,5 cm, 12 meses após a aplicação em um Argissolo Vermelho Distrófico (Cassol, 1995), e até 5 cm com uma reaplicação (após 48 meses da primeira aplicação) (Amaral, 1998). Em um Argissolo Vermelho-Amarelo, 18 meses após a aplicação do calcário a influência foi um pouco

mais profunda, alcançando até 10 cm. (Santos, 1997). Mielniczuk et al. (1995) encontraram efeito a uma profundidade ainda maior (17,5 cm), após duas aplicações de 2 t ha⁻¹ de calcário (36 e 72 meses) em um Argissolo Vermelho Distrófico. Já em Latossolo Vermelho típico e Latossolo Vermelho Distroférico, 36 meses após a aplicação do calcário foi notado efeito na camada até 5 cm e, com menor intensidade, na de 5-10 cm (Pöttker & Ben, 1998). Porém, em um Latossolo, após a aplicação de uma dose alta (13 t ha⁻¹) de calcário tipo filler, o efeito foi até 20 cm de profundidade. Em um Latossolo Vermelho típico, Petrere (1998) encontrou efeito até 22,5 cm, 48 meses após a aplicação de 6 t ha⁻¹. Oliveira & Pavan (1996), em um Latossolo Vermelho típico, encontraram, surpreendentemente, efeito na profundidade de 20-40 cm, 32 meses após a aplicação superficial do calcário. Portanto, apesar da baixa solubilidade do calcário, em vários trabalhos verificou-se a eficiência das aplicações superficiais sob sistema plantio direto.

Os resultados obtidos por Nicolodi (2003) e Nolla (2003) embasam as recomendações da Comissão... (2004), que determinou o pH crítico, para a tomada de decisão da correção sob sistema plantio direto consolidado, de 5,5, e a saturação de bases em 65% (Figura 13 e Tabela 11). Desta forma, uma menor dose de calcário passou a ser recomendada para o sistema plantio direto estabelecido, principalmente devido à menor toxidez de Al e às baixas respostas das plantas.

O trabalho de Nicolodi (2003) foi realizado no Planalto Médio do RS, nos municípios de Cruz Alta, Ibirubá e Não-Me-Toque, em seis lavouras comerciais conduzidas em sistema plantio direto consolidado. Cada lavoura previamente selecionada foi conduzida conforme metodologia do produtor, e, no estágio de florescimento da soja, 20 pontos amostrais, de aproximadamente 1,0 m, foram selecionados com base em aspectos visuais, variando do menor ao maior potencial de rendimento. Nestes pontos, após a colheita, foram avaliados os teores dos nutrientes nos tecidos foliares, rendimento de grãos e atributos químicos de solo. O rendimento médio geral e máximo da soja nessas áreas foi de 3,4 e 4,5 t ha⁻¹, respectivamente.

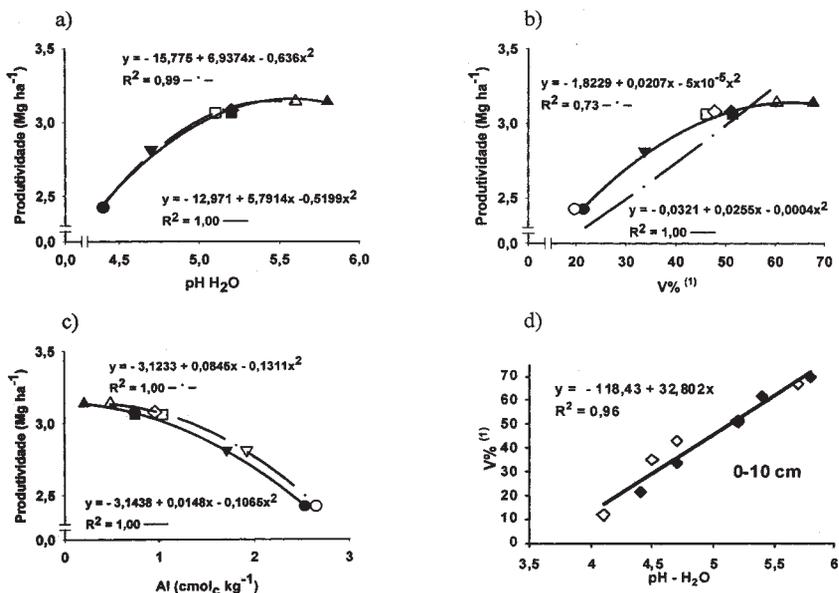


Figura 13. Relação entre a produtividade da soja e o pH-H₂O (a), saturação de bases - V (b) Al trocável (c) e entre V e pH em água (d); nas camadas de 0-10 (—) e 0-15 cm (---) de um Latossolo Vermelho aluminoférrico típico cultivado por oito anos no sistema plantio direto, após a aplicação de calcário em área de lavoura convencional no município de Sarandi, RS.

Fonte: Nolla, 2003.

Tabela 11. Valores de referência para os diferentes índices de recomendação de calagem (camada 0-10 cm), baseados no máximo rendimento de grãos de soja, de dois experimentos de um Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, cultivado por 8 anos no sistema plantio direto, proveniente de lavoura cultivada (Sarandi, RS) e de campo nativo (Marau, RS) após a aplicação de calcário.

Condição	pH	pH	Al	Al	Al/ Ca+Mg	V ¹	V ²	V ³
	H ₂ O	CaCl ₂	(cmolckg ⁻¹)	%		%	%	%
Lavoura	5,6	4,7	0,29	3	0,02	64	69	50
Campo nativo	5,3	4,5	0,47	3	0,03	60	57	49
Média	5,5	4,6	0,38	3	0,03	62	63	50

¹ V%: acidez potencial determinada pela extração com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹.

² V%: acidez potencial estimada pela equação proposta por Escosteguy & Bissani, 1999.

³ V%: acidez potencial estimada pela equação proposta por Kaminski et al., 2001.

Fonte: Nolla, 2003.

Em algumas áreas sob sistema plantio direto, onde a dose e a frequência de aplicação de calcário não têm sido feitas com base na análise de solo, e sim na experiência adquirida sob sistema convencional, tem se verificado valores de pH em água acima dos recomendados. Este fato pode resultar em deficiência de alguns micronutrientes e decréscimos no rendimento de soja, como constatado por Pontelli (2006), em Palmeira das Missões, RS (Figura 14).

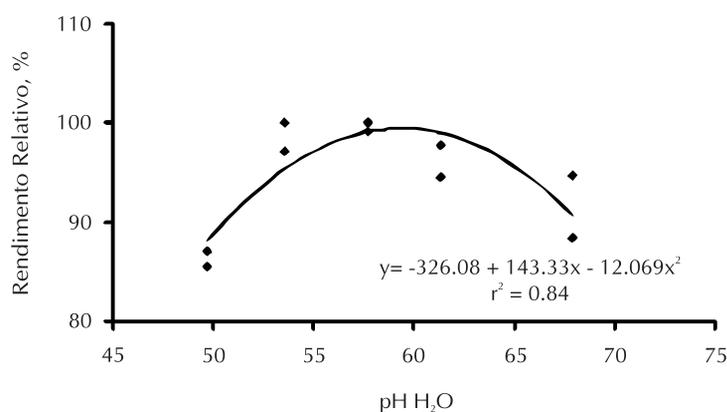


Figura 14. Relação do pH com o rendimento relativo de grãos de soja utilizando as ferramentas de agricultura de precisão em lavoura de plantio direto estabelecido. Palmeira das Missões,RS.

Fonte: Pontelli, 2006 .

10. Considerações Finais

A obtenção de elevados rendimentos da soja é uma necessidade em função dos altos custos de produção e da crescente competitividade a que todos os produtores estão sujeitos, em consequência do processo de globalização característico da sociedade moderna. No entanto, a obtenção e, mais importante, a manutenção de elevados rendimentos são resultados de uma complexa interação de fatores de clima, planta e solo.

O solo deve ser entendido como um sistema aberto, com fluxos de energia e matéria variável em função do tempo e do manejo adotado. Assim, de acordo com o histórico de manejo, o solo alcança diferentes níveis de qualidade. Para manter altos rendimentos, é necessário que o solo apresente elevada qualidade. No entanto, o pro-

cesso de evolução da qualidade do solo é gradual e dependente da ação das plantas e da atividade biológica. Neste contexto, a fertilidade é importante para maximizar a fotossíntese e, conseqüentemente, o aporte de carbono ao solo. A recuperação do estoque de matéria orgânica tem sido frequentemente relacionada ao incremento da capacidade produtiva dos solos agrícolas. Os sistemas de manejo de solo que promovem o mínimo revolvimento e elevada cobertura do solo durante o ano são os mais eficazes na melhoria da qualidade deste recurso natural. No sistema plantio direto, a rotação de culturas e o uso de culturas de cobertura são essenciais para alcançar elevados rendimentos de soja. Os teores de nutrientes no solo, visando à obtenção de elevados rendimentos, devem estar na faixa entre a máxima eficiência econômica e a máxima eficiência técnica. No entanto, estes parâmetros, nos experimentos de calibração da fertilidade sob sistema plantio direto, têm sido variáveis, de acordo com o tipo de solo e manejo da cultura da soja. Considerando os efeitos de concentração de nutrientes e amostragem superficial, os teores críticos de fósforo e potássio no solo devem ser superiores aos propostos sob sistema convencional. E ainda, a maior variabilidade horizontal e vertical de nutrientes sob sistema plantio direto, demanda maior intensidade na amostragem de solo. A elevada demanda de nitrogênio, quando da obtenção de elevados rendimentos de soja, requer cuidados especiais visando à eficiência da fixação biológica. A utilização da análise de tecido foliar pode ser uma alternativa complementar para a avaliação nutricional da soja e mesmo da fertilidade do solo.

A manutenção de elevados rendimentos de soja requer pelo menos a reposição quantitativa dos nutrientes exportados na colheita, fato nem sempre observado pelos agricultores.

11. Referências

ABRÃO, J.J.R.; GRIMM, S.S. Avaliação do efeito residual da calagem e da adubação fosfatada num Oxissolo, durante três anos de cultivos. *Agronomia Sulriograndense*, v.11, p.105-127, 1975.

ALVES, B.J.R. Transformação do nitrogênio em rotações de culturas sob sistema plantio direto. In: WORKSHOP NITROGÊNIO NA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA. 2000, Dourados. *Anais...* Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2000. p.9-31.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B.C.; VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *Journal Environment Quality*, v. 35, p.1599-1607, 2006.

AMADO, T.J.C.; COSTA, C.N. Solos sob sistema plantio direto pode atuar como importante tampão ambiental. *Direto no Cerrado*, Brasília, p.16-17. 2004

AMARAL, A.S. *Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície*. 2002. 106f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

_____. *Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado*. 1998. 102f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ANGHINONI, I. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. *Anais...* Planaltina: Embrapa Cerrados; Brasília, DF: Universidade de Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999, (CD-ROM).

ANGHINONI, I.; SALET, L.R. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N.J. (Ed.). *Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto*. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.27-52.

ANGHINONI, I.; BISSANI, C.A. Fósforo e adubos fosfatados. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (eds). *Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas*. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.117-137.

BATAGLIA, O. C.; MASCARENHAS, H.A.A. *Absorção de nutrientes pela soja*. IAC, 1977. 36p. (Boletim Técnico n.41).

BATAGLIA, O.C. Micronutrientes: disponibilidade e interações. In: BORKERT, C.M. & LANTMANN, A.F. (ed.). *Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira*. Londrina: EMBRAPA-CNPSO/IAPAR/SBCS, 1988. p. 121-132.

BAYER, C. *Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos*. 1996. 240f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, p.105-112. 1997.

- 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.
- BOHNEN, H. Acidez do solo: Origem e correção. In: KAMINSKI, J. (Coord.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas: Núcleo Regional Sul, 2000. p.9-19. (Boletim Técnico, 4).
- BOHRER, T.R.J.; HUNGRIA, M. *Avaliação de cultivares de soja quanto à fixação biológica do nitrogênio*. Disponível em: <<http://www.cnpq.br>>. Acesso em: 28 set.2003.
- BOLETIM DE PESQUISA DE SOJA – 2005. Nutrição e adubação. In: SUZUKI, S; YUYAMA, M.M.; CAMACHO, S.A. (Ed.). Rondonópolis: Fundação MT, 2005. p.189-221. (Boletim Técnico, 9).
- BORKERT, C.M.; SFREDO, G.J.; SILVA, D.N. Calibração de potássio trocável para a soja em Latossolo Roxo distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.17, p.223-226, 1993.
- BORKERT, C.M.; YORINORI, J.T.; CORREIA-FERREIRA, B.S.; ALMEIDA, A.M.R.; FERREIRA, L.P.; SFREDO, G.J. Seja o doutor da sua soja. Piracicaba: POTAFOS, *Informações Agronômicas*, n.66, junho 1994, 17p.
- BROCH, D.L.; CHUEIRI, W. A. *Estratégia de adubação: cultura da soja cultivada sob sistema de plantio direto*. Maracajú: Fundação MS-MANAH, 2005. 53 p.
- BRUNETTO, G.; GATIBONI, L.C.; RHEINHEIMER, D.S.; SAGGIN, A.; KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.565-571, 2005.
- BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; SAGGIN, A.; CASALI, C.A.; SANA, R.S.; CORSINI, A.L.M. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em solos do Rio Grande do Sul. In: FERTIBIO 2002, Rio de Janeiro, 2002. *Anais...* Rio de Janeiro, 2002. (CD-ROM)
- CAMARGO, O.A. Micronutrientes no solo. In: BORKERT, C.M. & LANTMANN, A.F. (ed.). *Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira*. Londrina: EMBRAPA-CNPSO/IAPAR/SBCS, 1988. p. 103-120.
- CAMPO, R.J.; HUNGRIA, M. *Compatibilidade de uso de inoculantes e fungicidas no tratamento de sementes de soja*. Londrina: Embrapa Soja, Londrina-PR, 2000. 32p. (Circular n.26, novembro/2000).
- CAMPOS, B.C. *Dinâmica do carbono em sistemas de manejo do solo e culturas*. 2004. 57f. Prova de Qualificação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

- CANTARELLA, H.; ABREU, C.A.; BERTON, R.S. Fornecimento de nutrientes pela matéria orgânica do solo. In: GUERRINI, I.A.; BULL, T. (Ed.) *Encontro sobre material orgânica do solo*. Jaboticabal: UNESP, 1992. p.63-122.
- CARTER, M.R. Organic matter and sustainability. In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D.; WATSON, C.A. (eds). *Sustainable management of soil organic matter*. CAB International, 2001. p.9-22.
- CASSOL, L.C. *Características físicas e químicas do solo e rendimento de culturas após a reaplicação de calcário, com e sem incorporação, em sistemas de preparo*. 1995. 97f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- CASTILHOS, R.M.V.; MEURER, E.J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.977-982, 2002.
- CERETTA, C.A.; PAVINATO, P.S. Adubação em linha ou a lança no plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 6. Ibiruba, 2003. *Trabalhos Publicados*. Passo Fundo:Aldeia Norte Editora, 2003. p.23-35.
- COAMO/CODETEC. *Fertilidade do solo e nutrição de plantas*. Campo Mourão/Cascavel, 1998.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. *Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 10. ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2004. 400p.
- _____. *Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 2. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1989. 128p.
- _____. *Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1995. 224p.
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J.; MIELNICKUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 777-788, 2005.
- CONTE, E. *Atividade de fosfatase ácida e formas de acumulação de fósforo em solo no sistema plantio direto*. 2001. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COOPER, R.L. Pesquisa sobre produtividade máxima da soja nos EUA. Piracicaba: POTAFOS, *Informações Agronômicas*, n.101, 2003. p.1-6.

- CORDEIRO, D.S. *Efeito de adubação NPK na absorção, translocação e extração de nutrientes pela soja (Glycine max L. Merrill)*. Escola Superior Agronomia Luiz de Queirós, Piracicaba, 1977. 143p. (Tese de Doutorado)
- COSTA, J. A. Rendimento da soja: chegamos ao máximo? Piracicaba: POTAFOS, *Informações Agronômicas*, n.99, 2002. p.1-6.
- CUBILLA ANDRADA, M.M. *Calibração visando recomendações de fertilização fosfatada para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai*. 2005. 160f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- DERPSCH, R.; BENITES, J. Agricultura Conservacionista no Mundo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., 2004, Santa Maria. *Resumos...* Santa Maria:Universidade Federal de Santa Maríá, RS, Brasil, 2004. (CD Rom)
- DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F.X. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.20, p.761-773, 1985.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (eds) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madisson:ASA/SSSA, 1994. p.3-21.
- DRESCHER, M.; BISSANI, C.A.; GIASSON, E. et al. *Avaliação da fertilidade dos solos do estado do Rio Grande do Sul e necessidades de adubos e corretivos*. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 24p. (Boletim Técnico, 7).
- ECKERT, D.J. Chemical attributes of soils subjected to no-till cropping with rye cover crop. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.77, p.789-792, 1991.
- ELTZ, F.L.P.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um latossolo bruno álico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.13, p.259-267, 1989.
- EMATER/RS. *Área plantada e rendimento das principais culturas*, Porto Alegre: Emater/RS-DEPLAN/DIDOC, 1998 (Tabelas não publicadas).
- _____. *Resultados das safras desde 1941: consulta das médias estaduais*. Disponível em <<http://www.emater.tche.br>>. Acesso em 20 de agosto de 2005.
- EMBRAPA-CPAC. *Relatório Técnico Anual*. Planaltina, 1981, v.5. 190p.
- EMBRAPA-SOJA. *Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 2002/03*. Londrina: Embrapa Soja, 2002.

ERNANI, P.R. *Uso de gesso agrícola nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Florianópolis: SBCS-Núcleo Regional Sul/UEDESC-CAV, 1993. 15p. (Boletim Técnico, 1).

ERNANI, P.R.; CASSOL, P.C.; PERUZZO, G. Eficiência agrônômica do gesso agrícola no Sul do Brasil. In: Seminário sobre uso do gesso na agricultura, 2, 1992, Uberaba, MG. *Anais...* São Paulo: Instituto Brasileiro do Fosfato, 1992. p.263-276.

ERNANI, P.R.; FIGUEIREDO, O.R.A.; BECEGATO, V.; ALMEIDA, J.A. Decréscimo da retenção de fósforo no solo pelo aumento do pH. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.159-162, 1996.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; BISSANI, C.A. Estimativa de H+Al pelo pH SMP em solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.175-179, 1999.

FAGERIA, N.K. *Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz*. Rio de Janeiro: Campus/Embrapa, 1984. 341p.

FIORIN, J.E.; CANAL, I.N.; CAMPOS, B.C.; PETRERE, C. Fertilidade do Solo. In: FUNDACEP FECOTRIGO. *A soja em rotação de culturas no plantio direto*. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 1998. p.35-96.

FIORIN, J.R.; PETRERE, C.; GNATTA, V. Efeito de plantas de cobertura de inverno e de verão no sistema de produção de grãos a longo prazo no sistema plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., 2004, Santa Maria. *Resumos...* Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2004. (CD Rom)

FITTS, J.W. Research + extension = bigger farmer profit. *Plant Food Riew Journal*, v.5, p.10-12, 1959.

FRANCHINI, J.C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.533-542, 1999.

FRANCO, A.A.; NEVES, M.C.P. Fatores limitantes à fixação biológica de nitrogênio. In: CARDOSO, E.J.N.B.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (Eds.) *Microbiologia do solo*. SBCS:Campinas, 1992, p.219-230.

GARCIA, F.O. Agricultura sustentable y materia orgânica del suelo: siembra directa, rotaciones y fertilidade. In: CONGRESSO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO, 3, 2003. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: INPOFOS, 2003. (CD ROM)

_____. Phosphorus use efficiency in field crops of the Pampas (Argentina). Focus on efficient use of nutrients, PPI and PPIC Agronomic Research Bulletin. 2002.

- GARCÍA, F.O.; FABRIZZI, K.P. Dinámica del nitrógeno en ecosistemas agrícolas: Efectos de la siembra directa. In:ROSSELLO R.D. (ed.). *Siembra directa en el Cono Sur*. Montevideo, Uruguay:PROCISUR (INIAs, IICA), 2001. p.299-322.
- GASSEN, D. N. *Informativo Técnico Cooplantio*. Passo Fundo : Aldeia Norte, 2002. 150p.
- GASSEN, D.N.; KOCHHANN, R.A. Benefícios da fauna do solo de plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (Ed.). *Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto*. Lages:Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.151-160.
- GOEDERT, W.J.; LOBATO, E.; LOURENÇO, S. Nutrient use efficiency in Brazilian acid soils: Nutrient management and plant efficiency. In: MONIZ, A.C.; FURLANI, A.M.C.; SCHAFFERT, R.E. et al. *Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production*. Campinas:Brazilian Soil Science Society, 1997. p.97-104.
- HAVLIN, J.L.; KISSEL, D.; MADDUX, L.; CLAASSEN, M.; LONG, J. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.54, p.448-452, 1990.
- HEINZMANN, F.X. Resíduos culturais de inverno e assimilação de nitrogênio por culturas de verão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.20, p.1021-1030, 1985.
- HELYAR, K.R. The management of acid soils. In: WRIGHT, R.J.; BALIGAR, V.C.; MURRÁN, R.P. *Plant-soil interaction at low pH*. Dordrecht, Kluwer Academic, 1991. p.365-382.
- HELYAR, K.R.; PORTER, W.M. Soil acidification its measurement and the processes involved. In:ROBSON, A.D. (ed.). *Soil acidity and plant growth*. Sydney, Austrália: Academic Press, 1989. p.65-82.
- HOLTZ, G.P.; SÁ, J.C.M.. Resíduos culturais: reciclagem de nutrientes e impacto na fertilidade do solo. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1995. *Anais...* Castro:Fundação ABC, 1995, p.14-30.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. Fixação biológica do nitrogênio com a cultura da soja. In: WORKSHOP NITROGÊNIO NA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA. 2000, Dourados. *Anais...* Dourados:Embrapa Agropecuária Oeste, 2000. p.51-75.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; VARGAS, M.A.T.; et al. Fixação biológica de nitrogênio em leguminosas de grãos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 22, 1988. *Resumo...* Caxambu:1998. p.29-30.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M.A.T.; CAMPO, R.J.; GALERANI, P.R. *Adubação nitrogenada na soja*. Londrina: EMBRAPA, 1997. 4p. (Comunicado Técnico, 57)

IBGE. SIDRA – *Banco de dados agregados*. Disponível na Internet: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>> Acesso em 20 de agosto de 2005.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; BARTZ, H.R.; GATIBONI, L.C.; BISSANI, C.A.; ESCOSTEGUY, P.A.V. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e SC. In: Reunião Anual da Rede Oficial de Laboratórios de Análises de Solo e de Tecido Vegetal dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, 33, 2001. *Ata...* Frederico Westphalen, 2001. p.21-26.

KLARMANN, P.A. *Influência de plantas de cobertura de inverno na disponibilidade de N, fixação biológica e rendimento da soja sob sistema plantio direto*. 2004. 142f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

KLEPER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.19, p.395-401, 1995.

_____. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos de solo. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.2, p.79-86, 1996.

KLUTHCOUSKI, J.; FANCELLI, A.L. DOURADO-NETO, D. et al. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. *Scientia Agricola*, v.57, p.97-104, 2000.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F. *Efeitos nocivos do manejo inadequado da adubação no crescimento radicular das culturas anuais, com ênfase no potássio*. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 19p.

KOCHHANN, R. *Avaliação da eficiência da adubação fosfatada em plantio direto*. EMBRAPA-CNPT: Passo Fundo, 1991. 39 p.

KRAY, C.H.; SALET, R.L.; ANGHINONI, I. *Variabilidade horizontal e amostragem dirigida do solo no sistema plantio direto*. Porto Alegre: Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1998. 6p. (Relatório de Pesquisa).

LAMOND, R.E.; WESLEY, T.L. In season fertilization for high yield soybean production. *Better Crops with Plant Food*, n.2, p.6-7, 2001.

LOPES, A.S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. *Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo*. São Paulo, SP: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 115p.

- MAEHLER, A.R.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F. et al. Qualidade de grãos de duas cultivares de soja em função da disponibilidade de água no solo e arranjo de plantas. *Ciência Rural*, v.33, p.213-218, 2003.
- MALAVOLTA, E. *Manual de química agrícola - adubos e adubação*. 3.ed. São Paulo, Ceres, 1981. 596p.
- MALLARINO, A.P. Manejo de fósforo e potássio y starters para maiz y soya en siembra directa. In: CONGRESSO NACIONAL DE AAPRESID, 5., 1997, Mar del Plata. *Conferências...* Mar del Plata:AAPRESID, 1997. p.11-19.
- MARTENS, D.C.; WESTERMANN, D.T. Fertilizer applications for correcting micronutrients deficiencies. In: MORTVED, J.J. et al. (Ed.). *Micronutrients in agriculture*. Madison, 1991, p. 549-592.
- MANUAL de adubação e calagem para cultivos agrícolas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Trigo e Soja*, v.56, p.1-34, 1981.
- MASCARENHAS, H.A.A.; MIYASAKA, S.; SORDI, G.; et al. Efeito da inoculação das sementes com rhizobium e da subsequente "peletização" com pasta de carbonato de cálcio na ausência e na presença da calagem e da adubação nitrogenada. *Bragantia*, v.26, p.143-153, 1967.
- MELO, G.W.; MEURER, E.J.; PINTO, L.F.S. Fontes de potássio em solos distroférricos caulíníticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.:597-603, 2004.
- MERCANTE, F.M.; OTSUBO, A.A.; STAUT, L.A. Eficiência da fixação biológica de N₂ por estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*/B. *elkanii* e da adubação nitrogenada na cultura da soja em Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA E MERCOSOJA, 2, 2002. Londrina. *Anais...* Londrina: Embrapa, 2002. p.219.
- MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.17, p.375-382, 1993.
- MEURER, E.J.; KAMPF, N.; ANGHINONI, I. Fontes potenciais de potássio em alguns solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.41-47, 1996.
- MIELNICKZUK, J. *O potássio no solo*. Piracicaba:POTAFOS, 1982. (Boletim técnico, 2)
- MIELNICKZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. *Tópicos em Ciência do Solo – Vol. 3* (2003), SBCS:Viçosa, 2003. p.209-248.

- MIELNICZUK, J.; BURLE, M.L.; FERNANDES, S.V.; et al. Eficiência da aplicação do calcário em sistemas de cultura e preparos de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25. 1995, Viçosa, MG. *Resultados expandidos...* Viçosa: SBCS, 1995. v.4, p.1448-1450.
- MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; BOHNEN, H. *Recomendações de adubo e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS, 1969. 36p. (Boletim Técnico, 2).
- MIELNICZUK, J.; SELBACH, P.A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.2, p.115-120, 1978.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito do material vegetal na acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.17, p.411-416, 1993.
- MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.16, p.55-59, 1992.
- MOSCHLER, W.W.; MARTENS, D.C.; SHEAR, G.M. Residual fertility in soils continuously field cropped to corn by conventional tillage and no-tillage methods. *Agronomy Journal*, v.67, p.45-48, 1975.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.7, p.95-102, 1983.
- NACHTIGALL, G.R.; VAHL, L.C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, p.37-42, 1991.
- NICOLODI, M. *Indicadores para a tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto*. 2003. 102f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- NOLLA, A. *Crítérios para a calagem no sistema plantio direto*. 2003. 168f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- NOVO, M.C.S.S.; TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A.; BORTOLETTO, N.; GALLO, P.B.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; VARGAS, A.A.T. Nitrogênio e potás-

sio na fixação simbiótica de N₂ por soja cultivada no inverno. Piracicaba. *Scientia Agrícola*, v.56, n.1, p.143-155, 1999.

NUERBERG, N.J.; RECH, T.D.; BASSO, T.D. *Usos do gesso agrícola* Florianópolis: EPAGRI, 2002, 31 p. *Boletim técnico*, 122.

OLIVEIRA, E.F.; BALBINO, L.C. *Efeito de fontes e doses de nitrogênio aplicadas em cobertura nas culturas de milho, trigo e algodão*. Cascavel: SN-Centro/OCEPAR. (Relatórios Técnicos, 1992, 1993 e 1995).

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. *Soil & Tillage Research*, v.38, p.47-57, 1996.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (eds). *Tópicos em Ciência do Solo– Vol. 2 (2002)*, SBCS:Viçosa, 2002. p.393-486.

OLIVEIRA, V. de. *Formas de potássio em 21 solos do Rio Grande do Sul e sua capacidade de suprir potássio às plantas*. 1970. 91f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1970.

OLIVEIRA, V.; LUDWICK, A.E.; BEATTY, M.T. Potassium removed from some Southern Brazilian soils by exhaustive cropping and chemical extraction methods. *Soil Science Society of American Proceedings*, v.35, p.763-767, 1971.

PAIVA, P.J.R.; VALE, F.R.; FURTINI NETO, A.E. et al. Acidificação de um latossolo roxo do estado do Paraná sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.20-71, 1996.

PAVINATO, A. Produção da soja da Agropecuária SLC. In: SIMPÓSIO SOBRE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 3, 2002, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Potafós, 2002.

PAVINATO, P. S. *Adubação em sistemas de culturas com milho em condições de sequeiro ou irrigado por aspersão*. 2004. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PETRERE, C. *Calagem na superfície do solo no sistema plantio direto em campo nativo*. 1998. 108f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

PONTELLI, C.B. *Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas da agricultura de precisão*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. 117p. (Dissertação de Mestrado)

POTAFOS. *Como a planta de soja cresce*. Disponível em: <http://www.potafos.org/>. Acesso em: 10 set.2003.

PÖTTKER, D. *Aplicação de fósforo no sistema plantio direto*. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 1999. 32p. (Boletim de Pesquisa, 2).

PÖTTKER, D.; AMBROSI, I.; BEN, J.R. et al. *Calagem em plantio direto*. Passo Fundo: Embrapa-CNPT/Projeto Metas, 1998. 40p.

PÖTTKER, D.; BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.675-684, 1998.

QUAGGIO, J.A. *Acidez e calagem em solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2000. 111p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. *Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. 2ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico, 100).

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL. (33.: 2005: Passo Fundo). *Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina 2005/2006*. Passo Fundo: FAMV, 2005. 157p.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, p. 151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; et al. *Situação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul*. Santa Maria: Departamento de Solos da UFSM, 2001. 41p. (Boletim Técnico, 2).

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G. Acidez do solo e sua correção. In: Simpósio sobre o Cerrado, 6, 1992, Brasília. 1992.

ROSSATO, R.R. *Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo sob plantio direto*. 2004. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SÁ, J. C. M. *Manejo da fertilidade do solo no plantio direto*. Castro: Fundação ABC, 1993. 96 p.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (eds.). *Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. Viçosa: SBCS, Lavras: UFLA/DCS, 1999. p.267-319.

_____. Evolução da matéria orgânica do solo no sistema plantio direto. In: Curso sobre aspectos básicos de fertilidade do solo em plantio direto, 4, 2001. Passo Fundo. *Resumo de palestras...* Passo Fundo, 2001. p.5-20.

- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E.; BUCKNER, J.; FURNARI, A.; SÁ, M.F.M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENSKE-FILHO, S.P.; PAULLETTI, V.; NETO, M.S. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. *Revista Plantio Direto*, v.84, p.45-61, 2004.
- SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. *Plants Physiology*. Wadsworth Pub, 1992, 682 p.
- SALET, R. *Toxidez de alumínio no sistema plantio direto*. 1998. 117f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- SANTOS, E.J.S. *Aplicação de calcário em solos arenosos sob sistema plantio direto e campo nativo*. 1997. 67f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.
- SANZONOWICZ, C.; MIELNICZUK, J. Distribuição do potássio no perfil de um solo, influenciado pela planta, fontes e métodos de aplicação de adubos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.9, p.45-50, 1985.
- SCHERER, E.E. Resposta da soja à adubação potássica em latossolo húmico distrófico num período de doze anos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.49-55, 1998.
- SCHLESINGER, W.H. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: TRABALHA, J.R.; REICHELE, D.E. (eds.). *The changing carbon cycle: A global analysis*. New York, 1985. p.194-220.
- SCHLINDWEIN, J.A. *Calibração de métodos de determinação de fósforo e potássio do solo sob sistema plantio direto*. 2003. 169f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. *Ciência Rural*, v.30, p.611-617, 2000.
- SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Doses de máxima eficiência econômica de fósforo e potássio para as culturas cultivadas no sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*, v.85, p.20-25. 2005.
- _____. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendações de fertilizantes para as culturas sob sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*, v.79, p.12-15, 2004.
- SCHLINDWEIN, J.A.; NOLLA, A.; ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Redução da toxidez de alumínio em raízes de soja por culturas antecessoras no sistema plantio direto. *Revista Brasileira Agrocência*, v.9, 2003. (Nota Técnica)

SEGANFREDO, M.L.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.21, p.287-291, 1997.

SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Tillage Research*, v.44, p.23-34, 1997.

SERAFINI, F. *Calagem de um podzólico vermelho amarelo com proporções variáveis de carbonatos de cálcio e magnésio*. 1991 . 81f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

SFREDO, G. J. *Soja: nutrição mineral, adubação e calagem*. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1986. 51p. (Documentos, 17)

SFREDO, G.J.; PANIZZI, M.C.C. *Importância da adubação e da nutrição na qualidade da soja*. Londrina:EMBRAPA-CNPSo, 1990. 57p. (Documentos, 40)

SIDIRAS, N.; PAVAN, M. A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.9, p.249-254, 1985.

SILVA, D.N.; MEURER, E.J.; KAMPF, N.; BORKERT, C.M. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.19, p.433-439, 1995.

SILVA, M.L.de S. Sistema de amostragem do solo e avaliação da disponibilidade de fósforo na fase da implantação do plantio direto. 2002. 97f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração: solos e nutrição de plantas, ESALQ/USP, Piracicaba, 2002.

SIQUEIRA, O.J.F.; SCHERER, E.E.; TASSINARI, G.; ANGHINONI, I.; PATELLA, J.F.; TEDESCO, M.J.; MILAN, P.A.; ERNANI, P.R. *Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1987. 100p.

SOUZA , D.M.G.; VOLKWEISS, S.J. Relações de superfosfato triplo em grânulos com solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.1, p.133-140, 1987.

STUDDERT, G.; ECHEVERRIA, H. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. In: JORNADA DE ACTUALIZACIÓN TÉCNICA PARA PROFESIONALES FERTILIDAD, 2002. Buenos Aires. Buenos Aires:INPOFOS Cono Sur. 2002. 52p.

TABELAS de adubação corretiva e adubação de manutenção para solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Trigo e Soja*, v.10, p.15-23, 1976.

- TANAKA, R. T. *Caracterização de alguns genótipos de soja, feijão e adubos verdes ao complexo acidez do solo sob casa de vegetação*. Campinas, Instituto Agrônomo, 2003.(Projeto Pesquisa)
- TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H.A.A. Nutrição mineral e adubação da soja. In:ENCONTRO PAULISTA DE SOJA, 2, 2000, Campinas. *Anais...* Campinas: CATI, 2000. p.73-105.
- TEDESCO, M.J. GOEPFERT, C.F.; LANZER, E. et al. Avaliação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul. *Agronomia Sulriograndense*, v.20, p.179-184, 1984.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Faculdade de Agronomia. Departamento de Solos. *Tabelas de adubação corretiva e adubação de manutenção para os solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Porto Alegre, 1973. 11p. (Boletim Técnico).
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Laboratório de Solos dos Cursos de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia e Veterinária. *Recomendações de adubação*. Porto Alegre, 1968. 3p. (mimeografado).
- VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. *Biologia dos Solos dos Cerrados*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. 524p.
- VARGAS, R.M.B.; MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.7, p.143-148, 1983.
- VEZZANI, F. M. *Qualidade do sistema solo na produção agrícola. 2001.Tese de doutorado*. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- VIDOR, C.; FREIRE, J.R.J. Efeito da calagem e da adubação fosfatada sobre a fixação simbiótica do nitrogênio pela soja. *Agronomia Sul Riograndense*, v.8, p.181-190, 1972.
- VIDOR, C.; FREIRE, J.R.J.; GONÇALVES, H.M.; GOMES, J.E.; GUTERRES, J.P.; GONÇALVES, J. Análise de um grupo de experimentos de adubação com fósforo, potássio e calcário em *Glycine max* (L) Merrill. *Agronomia Sul Riograndense*, v.9, p.33-39, 1973.
- VITTI, G. C.; TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja. Piracicaba: POTAFOS, *Informações Agrônomicas*, n.90, 2000. p.1-16.
- VOSS, M.; SIDIRAS, N. Nodulação da soja em plantio direto em comparação com plantio convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.20, n.7, p.775-782, 1985.

WENDLING, A. *Recomendação de nitrogênio e potássio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai*. Santa Maria, 2005. 160f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

WESTFALL D.G.; KITCHEN, M.R.; HAVLIN, J.L. Soil sampling guidelines for band applied phosphorus. *Better Crops Plant Food*, v.75, p.24-28, 1991.

WIETHÖLTER, S. *Adubação nitrogenada no sistema plantio direto*. Passo Fundo, 1996. 43p. (Apostila)

WIETHÖLTER, S. Uso dos teores de potássio e de argila do solo na recomendação de potássio para a cultura do trigo. In: Reunião Sul-Brasileira de Ciência do solo, 1, Manejo de solo em sistemas conservacionistas, 1996, Lages. *Resumos expandidos...* Lages: SBCS-NRS, 1996. p.108-109.

WIETHÖLTER, S.; BEN, J.R.; KOCHHANN, R.; et al. Fósforo e potássio no solo no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (ed.). *Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto*. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.121-149.

ZANCANARO, L.; TESSARO, L.C.; HILLESHEIM, J. Adubação fosfatada e potássica da soja no cerrado. Piracicaba: POTAFOS, *Informações Agronômicas*, n. 98, 2002. p.1-5.

Fixação biológica do nitrogênio na soja

André Luís Thomas¹ & José Antonio Costa²

A cultura da soja necessita de grande quantidade de nitrogênio (N) para se desenvolver e, conseqüentemente, produzir bons rendimentos de grãos porque esses possuem aproximadamente 40% de proteína. Estima-se que 80 kg de N sejam necessários para produzir 1000 kg de grãos de soja, sendo que este N pode ser suprido pelo solo, por fertilizantes nitrogenados e pela fixação biológica ou simbiótica do N₂ presente no ar do solo (Hungria et al., 1994; Hungria et al., 2001).

A soja é uma leguminosa originária da China que pode se associar a algumas bactérias, como *Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii*, formando nódulos, onde ocorre o processo de fixação biológica do N₂. Como a soja é uma cultura que foi introduzida no País, originalmente os solos não possuíam bactérias capazes de nodular de modo eficaz a planta. Assim, na fase inicial de expansão da cultura, foram importadas e testadas estirpes nas condições edafoclimáticas e nas cultivares nacionais. Nessa avaliação foram identificadas as estirpes com melhor desempenho que passaram a ser recomendadas para o uso em inoculantes comerciais (Hungria, 2006).

A inoculação com a bactéria ou a existência no solo de alta população de estirpe eficiente não são garantias da ocorrência de nodulação adequada e funcionamento da simbiose. Esse funcionamento dependerá da interação de uma série de fatores, envolvendo a

¹ Professor da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Caixa Postal 15100, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

² Professor Titular Aposentado da Faculdade de Agronomia da UFRGS. E-mail: jamc@ufrgs.br

planta, a bactéria e o ambiente. No Brasil estima-se que a fixação biológica do N_2 contribua de 70% a 94% do nitrogênio necessário ao desenvolvimento e rendimento da cultura da soja (Hungria et al., 1994; Alves et al., 2003, Hungria et al., 2005a e 2005b), o restante é suprido pelo solo. Entretanto, fatores adversos, como acidez, deficiência de macro e micronutrientes, temperatura elevada e baixa disponibilidade de água no solo, reduzem acentuadamente a fixação biológica.

A eficiência do processo de fixação biológica do nitrogênio conseguido pela pesquisa é, sem dúvida, o principal fator que torna a soja produzida no País altamente competitiva no mercado internacional. Isso ocorre porque não existe necessidade de aplicar fertilizantes nitrogenados, como uréia e sulfato de amônio, que são derivados do petróleo e elevam o custo de produção.

1. Formação dos nódulos nas raízes: estabelecimento da simbiose

A formação de nódulos nas raízes da planta de soja é necessária para que o processo de fixação biológica do N_2 ocorra. A nodulação é uma resposta da planta hospedeira ao estímulo das bactérias *Bradyrhizobium japonicum* e *B. elkanii*. O processo de formação dos nódulos pode ser, simplificada, dividido nas seguintes fases:

1. Atraídos pelas secreções dos pêlos radiculares, os bradirizóbios se multiplicam e produzem um sinal (fator de nodulação) que é o responsável, entre outras coisas, pelo reconhecimento entre a bactéria e a planta hospedeira e pela indução de intensa divisão celular na raiz.
2. Havendo compatibilidade entre o bradirizóbio e a planta, os pêlos enrolam-se envolvendo grupos de bactérias. Em seguida, as bactérias degradam uma porção da parede celular do pêlo, invadindo-o. Forma-se, então, o cordão de infecção que cresce em direção às células em divisão no córtex da raiz, ocorrendo a invasão das mesmas para formar o nódulo. O nódulo está ligado à raiz e, conseqüentemente, à planta através dos feixes vasculares (xilema e floema).

3. Caso a bactéria seja de uma estirpe eficiente, tem início no nódulo a simbiose bradirizóbio/planta. A planta fornece carboidratos, provenientes da fotossíntese, às células das bactérias, um tanto diferenciadas, que passam a ser chamadas de bacteróides. Esses microrganismos fixam o nitrogênio (N_2) do ar do solo, através da enzima nitrogenase, que o transforma em amônia (NH_3), sendo esse posteriormente incorporado em aminoácidos (glutamina, asparagina,...) e esses são transformados em ureídeos (alantoína e ácido alantóico). Os compostos nitrogenados (aminoácidos e ureídeos) são os principais produtos exportados dos nódulos à parte aérea da planta de soja. Quando o processo de fixação está ocorrendo, os nódulos apresentam coloração avermelhada no seu interior, em função da atividade da leghemoglobina, que é o pigmento que controla o nível de oxigênio no nódulo.

Convém salientar que uma estirpe de bradirizóbio pode ser infectiva, mas não efetiva, ou seja, ocorre a formação do nódulo sem haver a efetiva fixação do N_2 . Nesse caso, o nódulo apresenta coloração verde.

2. Fatores ambientais que interferem na nodulação e na fixação biológica do N_2

A nodulação e a efetividade da fixação biológica dependem de uma série de fatores envolvendo a planta, a bactéria e o ambiente, em que a temperatura, a umidade e a acidez no solo por ocasião da semeadura, bem como o suprimento adequado de água e dos demais nutrientes necessários ao desenvolvimento da planta, são essenciais.

Temperatura do solo acima de 37-39 °C já é alta para *Bradyrhizobium* porque reduz a população dessas bactérias no solo. A temperatura elevada do solo afeta a troca de sinais entre a planta hospedeira e as bactérias; inibe a formação de pêlos radiculares e, conseqüentemente, reduz os locais de nodulação; diminui a aderência das bactérias aos pêlos radiculares e o processo de infecção das raízes pelas bactérias. Além de afetar a formação do nódulo, a temperatura elevada do solo diminui a fixação de N_2 porque reduz a atividade de várias enzimas, principalmente a nitrogenase, que são essenciais à funcionalidade do nódulo. Altas temperaturas também aceleram a senescência dos nódulos (Hungria &

Vargas, 2000). Em função disto, é fundamental a presença de uma boa palhada sobre o solo para amenizar os efeitos prejudiciais da temperatura sobre a fixação biológica de N_2 .

A acidez do solo prejudica diretamente o processo de infecção das raízes pelas bactérias, porque diminui a atividade de enzimas que atuam na quebra da parede celular e também diminui a sobrevivência das bactérias no solo. A acidez está diretamente relacionada com a toxidez de alumínio e de manganês no solo, com a deficiência de macronutrientes (fósforo e cálcio) e de micronutrientes (molibdênio, enxofre, boro e zinco) que inibem a formação e a atividade dos nódulos (Hungria et al., 1994). Essas condições adversas ao estabelecimento do processo de fixação biológica também são prejudiciais ao crescimento radicular da planta de soja, o que afetará o desenvolvimento e rendimento da cultura. Então, práticas culturais que visam melhorar a fertilidade e corrigir a acidez do solo irão beneficiar a simbiose bradirizóbio/planta de soja e, conseqüentemente, o rendimento de grãos.

A deficiência hídrica reduz o desenvolvimento da planta e dos nódulos, sendo uma das principais causas da baixa nodulação em plantas de soja. A falta de água diminui a sobrevivência das bactérias, a formação e a longevidade dos nódulos, bem como a funcionalidade dos mesmos. A seca diminui a atividade de fixação do N_2 pelos bacterióides, e, após a passagem do estresse, a recuperação não será total, sendo que, em casos mais severos, a atividade pode ser afetada de forma irreversível. Já a planta de soja tem seu desenvolvimento afetado pela menor disponibilidade de nutrientes na solução do solo, de água para transpiração e, conseqüentemente, apresenta menor atividade fotossintética. Portanto, com a deficiência hídrica, a planta fornece menos fotoassimilados aos nódulos, e esses disponibilizam menos compostos nitrogenados à planta, sendo assim o processo simbiótico de fixação de N_2 e o rendimento de grãos ficam afetados (Serraj et al., 1999; King & Purcell, 2005; Manavalan et al., 2009). Convém salientar que, normalmente, a deficiência hídrica vem acompanhada de temperaturas elevadas, o que prejudica ainda mais a simbiose.

3. Importância da inoculação anual na cultura da soja

A maioria dos solos cultivados com soja já apresenta populações estabelecidas de bradirizóbio que foram introduzidas por

inoculações anteriores (Hungria, 2006). Essa situação, junto com a obtenção de rendimentos satisfatórios de grãos, leva alguns técnicos e agricultores a acreditar que não é necessário fazer a inoculação anual (reinoculação) na cultura da soja. Entretanto, as bactérias provenientes da inoculação que sobrevivem no solo adaptam-se a variações ambientais anuais locais, tornam-se mais rústicas e perdem efetividade na fixação de N_2 .

O bradirizóbio estabelecido no solo compete com o bradirizóbio inoculado por sítios de nodulação. A inoculação não proporciona a totalidade de nódulos formados nas raízes de soja, mesmo usando-se estirpes competitivas por sítios de nodulação. E um dos motivos para isso é que as raízes, à medida que crescem, afastam-se do ponto de inoculação e são infectadas pela população de *Bradyrhizobium* residente que está distribuída mais amplamente no solo. Por isso, em solo com população estabelecida de *Bradyrhizobium* as respostas à inoculação são pouco frequentes, como mostra a Tabela 1 (Voss, 2001).

No Brasil tem se obtido aumentos médios de 4,5 % (Alves et al., 2003) a 8,0% (Hungria, 2006) no rendimento de grãos de soja com a prática da reinoculação em experimentos realizados em áreas já cultivadas com a cultura. Em lavoura, incrementos de rendimento dessa magnitude muitas vezes passam despercebidos ou são mascarados por outros fatores adversos ao desenvolvimento e ao rendimento da lavoura, tais como fertilidade e acidez do solo inadequadas, deficiência hídrica, incidência de moléstias, de insetos pragas e de plantas daninhas.

Tabela 1. Efeito da inoculação e da adubação nitrogenada sobre o rendimento de grãos de soja em uma área com mais de cinco anos de semeadura direta.

Tratamento	Rendimento de grãos (kg/ha)
Testemunha sem inoculação	3291 ²
Testemunha sem inoculação e com 158 kg/ha de N ¹	3682
Testemunha sem inoculação e com 158 kg/ha de N ¹	3390
Inoculante comercial turfa	3472

¹ N aplicado na base e em mais três adubações de cobertura.

² Não houve diferença estatística.

Fonte: Adaptado de Voss, 2001.

4. Utilização de fertilizantes nitrogenados na cultura da soja

A utilização de fertilizantes nitrogenados não proporciona aumento no rendimento de grãos na cultura da soja no Brasil. As necessidades de nitrogênio das plantas para alcançar o rendimento potencial máximo de grãos são supridas principalmente pela simbiose com o bradirizóbio e pelo N mineral do solo.

A aplicação de adubo nitrogenado, seja em uma única aplicação (Tabela 2), seja em diversas fases do crescimento da planta (Tabela 1), em doses de até 328 kg de N/ha (Voss, 2001), não traz aumento no rendimento de grãos de soja, eleva os custos de produção e inibe a fixação biológica de N_2 (Tabela 3). No entanto, se fórmulas de adubo que contêm nitrogênio forem mais econômicas do que fórmulas sem nitrogênio, mas com o mesmo teor de P_2O_5 e K_2O , elas poderão ser usadas, desde que não sejam aplicados mais do que 20 kg de N/ha (Reunião, 2009).

A utilização de adubo nitrogenado após um período de deficiência hídrica para as plantas se recuperarem do estresse também não proporciona aumento no rendimento de grãos, tendo em vista que o fator limitante ao desenvolvimento das plantas é a falta de água e suas consequências, como menor disponibilidade dos demais nutrientes na solução do solo, diminuição da fotossíntese, aumento da respiração, diminuição da fixação de N_2 , entre outros fatores.

5. Balanço de nitrogênio no solo na cultura da soja

No Brasil a produtividade de grãos de soja tem alcançado de 3500 a 4000 kg/ha em lavouras tecnificadas e de 5000 a 6000 kg/ha em experimentos (Pires et al., 2005; Rosinha et al., 2007) utilizando somente a fixação biológica de N_2 . Como os grãos de soja apresentam aproximadamente 40% de proteína, de 200 a 300 kg de N/ha são removidos da lavoura pelos grãos. Assim, muitas vezes, há o questionamento sobre que parte do N exportado através dos grãos vem do solo, uma vez que a soja não consegue fixar biologicamente todo o nitrogênio para seu desenvolvimento e rendimento, apresentando, portanto, balanço negativo de nitrogênio no solo durante seu cultivo.

Tabela 2. Efeito de doses de nitrogênio aplicadas na semeadura e no florescimento sobre o rendimento de grãos de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium*.

Níveis de N (kg/ha)	Rendimento de grãos	
	N aplicado na semeadura ¹	N aplicado no florescimento ²
	----- kg ha-----	
0	3292 *	2620*
8	3053	2795
16	3100	2635
32	3330	2695
64	3117	2710
128	3147	2905

* Não houve diferença estatística.

¹ Barni et al., 1977.

² Barni et al., 1978.

Quando a fixação biológica contribui com mais de 80% do N para o desenvolvimento das plantas de soja, o balanço de N para o solo é positivo ou próximo a neutralidade (Alves et al., 2006). Isso só ressalta a importância de proporcionar as condições adequadas na lavoura para que a simbiose bradirizóbio/planta de soja seja eficiente.

Tabela 3. Rendimento de grãos e contribuição percentual do nitrogênio (N) total nos grãos proveniente do adubo, do solo e da fixação biológica (FB), em função da aplicação de doses de nitrogênio no florescimento.

Nitrogênio kg/ha	Contribuição percentual do N nos grãos			Grãos kg/ha
	Adubo	Solo	FB	
0	0	34	66	2920*
45	8	27	65	2787
89	14	27	58	2913
134	24	26	50	3113

* Não houve diferença estatística.

Fonte: Deibert et al., 1979.

Nesse contexto, a adoção da semeadura direta ajuda a melhorar as condições de estabelecimento e funcionalidade dos nódulos, bem como o desenvolvimento das plantas, contribuindo para um balanço positivo de N no solo com o passar dos anos, como demonstra a Tabela 4.

Tabela 4. Balanço do nitrogênio (N) na cultura da soja, em cultivo de primeiro ou de quinto ano em cultivo convencional (CC) ou semeadura direta (SD).

Sistema de cultivo	N da fixação biológica	N exportado nos grãos	Balanço
	----- kg/ha -----		
1º ano - CC	134	126	8
1º ano - SD	110	112	-2
5º ano - CC	123	138	-15
5º ano - SD	134	126	8

Fonte: Adaptado de Miranda & Macedo, 2001.

6. Fixação biológica de N₂ em soja transgênica resistente ao glifosate

O glifosate é um herbicida não seletivo, com ação sistêmica e de aplicação pós-emergência que controla grande número de espécies de plantas daninhas. Ele inibe a enzima 5-enol-piruvil-shiquimato fosfato sintase (EPSPS) que é necessária à síntese de aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano) essenciais ao desenvolvimento de plantas e de microrganismos. Enquanto as cultivares transgênicas de soja possuem a enzima resistente ao glifosate, a principal bactéria (*Bradyrhizobium japonicum*) fixadora de nitrogênio em soja não apresenta essa enzima com resistência (King et al., 2001; Heatherlynet al., 2003; Reddy & Zablutowicz, 2003; Zablutowicz & Reddy, 2004).

Ao aplicar-se o glifosate nas folhas das plantas de soja ele é absorvido e translocado através do floema para todos os pontos de crescimento da planta, num caminho similar aos açúcares da fotossíntese, respondendo à relação fonte/demanda de fotoassimilados da planta. Como a degradação do glifosate nas plantas de soja é muito lenta, a

demanda metabólica forte por fotoassimilados, proporcionada pelo desenvolvimento e funcionalidade dos nódulos das raízes de soja, pode proporcionar o acúmulo do herbicida nos mesmos (Zablotowicz & Reddy, 2004). Com o acúmulo de glifosate nos nódulos pode haver um aumento na concentração de shiquimato e de certos ácidos benzóicos que podem inibir o crescimento da planta. Esses efeitos são acompanhados pela inibição ao crescimento e/ou morte do *Bradyrhizobium*, dependendo da concentração de glifosate (Hernandez et al., 1999).

Os resultados de pesquisas em laboratório do efeito da aplicação de glifosate sobre o crescimento e a atividade de *Bradyrhizobium* muitas vezes são contraditórios, apresentando ou não influência sobre as bactérias. Isso ocorre porque existe diferença na tolerância ao glifosate entre as estirpes de *Bradyrhizobium*; as doses aplicadas nos ensaios em laboratório vão desde as utilizadas na lavoura até as muitas vezes superiores a essas, não considerando a quantidade de glifosate que realmente é translocada aos nódulos; além do que existe diferença de toxicidade entre os sais de glifosate e os adjuvantes utilizados nas formulações comerciais do herbicida (Santos et al., 2003; Santos et al., 2004; Zablotowicz & Reddy, 2004; Cerdeira & Duke, 2006, Maly et al., 2006).

As aplicações de diferentes sais de glifosate sobre a soja resistente a este herbicida, realizadas nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (plantas com até 4 folhas trifolioladas desenvolvidas, período em que a espécie é mais sensível ao glifosate) têm demonstrado redução de 21 a 28% na massa fresca de nódulos e de 8 a 10% na quantidade de leghemoglobina dos nódulos, sugerindo que o glifosate inibe o desenvolvimento e não a formação dos nódulos (Reddy & Zablotowicz, 2003).

Dependendo das condições ambientais de aplicação, da formulação do sal de glifosate utilizada e de sua dose, a pulverização de glifosate nos estádios iniciais de desenvolvimento de plantas de soja resistentes ao herbicida pode ocasionar injúrias visíveis (amarelecimento, pequenas manchas e necroses) às plantas dois dias após a aplicação, proporcionando diminuição na matéria seca das raízes e da parte aérea, e diminuição da quantidade de nitrogênio na biomassa (Reddy & Zablotowicz, 2003; Zablotowicz & Reddy, 2004). Isto demonstra que a nodulação e a atividade de fixação de nitrogê-

nio são mais sensíveis ao glifosate nos estádios iniciais de desenvolvimento da planta de soja. Entretanto, as plantas têm potencial para se recuperar completamente do estresse ocasionado pela aplicação do glifosate. Caso as condições de desenvolvimento (fertilidade do solo, disponibilidade hídrica,...) sejam favoráveis à cultura, os vestígios da fitotoxicidade desaparecem duas a três semanas depois da aplicação (Reddy & Zablotowicz, 2003; Zablotowicz & Reddy, 2004). Porém fica a dúvida do que realmente pode afetar a fixação biológica de N_2 nos estádios iniciais de desenvolvimento da soja, pois a fixação pode ser afetada indiretamente pela fitotoxicidade provocada pela formulação ou sal de glifosate aplicado, pela ação direta do glifosate sobre as bactérias de *Bradyrhizobium* ou pela interação dos dois efeitos.

Foram observados efeitos deletérios do glifosate sobre as bactérias de *Bradyrhizobium*, com inibição dos processos de nodulação e/ou fixação de nitrogênio em soja resistente ao herbicida. Entretanto, experimentos em condições de campo com genótipos de soja resistentes ao glifosate proporcionaram rendimentos de 6000 kg de grãos/ha (Rosinha, et al., 2007), demonstrando que no campo os efeitos da fitotoxicidade do glifosate são inexistentes ou passageiros e não há evidências de que o rendimento de grãos de soja seja afetado (Zablotowicz & Reddy, 2004; Cerdeira & Duke, 2006).

7. Considerações finais

Em um mundo globalizado, onde a competitividade exige alta produtividade de grãos, com custos reduzidos, a eficiência do processo de fixação biológica de N_2 em soja, desenvolvida pela pesquisa e disponibilizada aos agricultores, ajudou o País a tornar-se um dos maiores produtores e exportadores mundiais dessa leguminosa. A utilização de fertilizantes nitrogenados elevaria os custos de produção, além de aumentar os riscos de contaminação ambiental das águas subterrâneas por nitrato que é tóxico ao ser humano.

A inoculação da soja com *Bradyrhizobium* é uma prática de fácil execução e de baixo custo, que tem sua eficiência comprovada quando o agricultor adota algumas práticas de manejo recomendadas à lavoura, tais como inoculação anual das sementes ou do solo, correção da acidez e da fertilidade do solo, aplicação da adubação

necessária à cultura e manutenção de uma boa cobertura de palha no sistema de semeadura direta.

8. Referências

- ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. *Plant and Soil*, v.252, p.1-9, 2003.
- ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F.M.; HECKLER, J.C.; MACEDO, R.A.T.de; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio em soja, milho e algodão. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.41, p.449-456, 2006.
- BARNI, N.A.; GOMES, J.E.S.; GONÇALVES, J.C. Resposta da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) à adubação nitrogenada no florescimento. *Agronomia sulriograndense*, v. 14, p.243-250, 1978.
- BARNI, N.A.; KOLLING, J.; MINOR, H.C. Efeitos de níveis de nitrogênio sobre o rendimento de grãos, nodulação e características agronômicas da soja (*Glycine Max* (L) Merr.). *Agronomia sulriograndense*, v. 13, p.93-104, 1977.
- CERDEIRA, A.L.; DUKE, S.O. The current status and environmental impacts of glyphosate-resistant crops: A review. *Journal of Environmental Quality*, v.35, p.1633-1658, 2006.
- DEIBERT, E.J.; BIJERIEGO, M.; OLSON, R.A. Utilization of 15N fertilizer by nodulating and non-nodulating soybean isolines. *Agronomy Journal*, v.71, p.717-723, 1979.
- HEATHERLY, L.G; SPURLOCK, S.R.; REDDY, K.N. Influence of early-season nitrogen and weed management on irrigated and nonirrigated glyphosate-resistant and susceptible soybean. *Agronomy Journal*, v.95, p.446-453, 2003.
- HERNANDEZ, A.; GARCIA-PLAZAOLA, J.I.; BECERRIL, J.M. Glyphosate effects on phenolic metabolism of nodulated soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v.47, p.2920-2925, 1999.
- HUNGRIA, M. A importância da fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja: uma história de sucesso na América do Sul. In: Libro de Conferencias plenárias, foros, workshops. 3º Congresso de Soja do Mercosur. Rosário, Argentina – 27 a 30 julho de 2006. p.336-338, 2006.
- HUNGRIA, M., LOUREIRO, M.F., MENDES, I.C., CAMPO, R.J.; GRAHAM, P.H. Inoculant preparation, production and application. In: *Nitrogen fixation research: Agriculture, Forestry, Ecology and the environment*. D.Werner (Ed.) Springer, 2005b. 347p.

- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. *Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja*. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 48p.
- HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; GRAHAM, P. H. The importance of nitrogen fixation to the soybean cropping system in South America. In: *Nitrogen fixation research: Agriculture, Forestry, Ecology and the environment*. D. Werner (Ed.). Springer, 2005a. 347p.
- HUNGRIA, M.; VARGAS, M.A.T. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research*, v.65, p.151-164, 2000.
- HUNGRIA, M.; VARGAS, M.A.T; SUHET, A.R.; PERES, J.R.R. Fixação Biológica do nitrogênio em soja. In: ARAUJO, R.S.; HUNGRIA, M. (Ed.). *Microrganismos de importância agrícola*. Brasília: Embrapa-CNPAP, 1994. p.9-89.
- KING, C.A.; PURCELL, L.C. Inhibition of N₂ fixation in soybean is associated with elevated ureides and amino acids. *Plant Physiology*, v. 137, p.1389-1396, 2005.
- KING, C.A.; PURCELL, L.C.; VORIES, E.D. Plant growth and nitrogenase activity of glyphosate-tolerant soybean in response to foliar glyphosate applications. *Agronomy Journal*, v.93, p.179-186, 2001.
- MALTY, J.S.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S. Efeitos do glifosato sobre microrganismos simbióticos de soja, em meio de cultura e casa de vegetação. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.41, p.285-291, 2006.
- MANAVALAN, L.P.; GUTTIKONDA, S.K.; TRAN, L.P.; NGUYEN, H.T. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant & Cell Physiology*, v.50, p.1260-1276, 2009.
- MIRANDA, C.H.B.; MACEDO, M.C.M. *Fixação de nitrogênio pela soja em sistemas de cultivo e rotacionado com pecuária nos cerrados*. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2001. 29p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 14).
- PIRES, J.L.F.P.; CUNHA, G.R.da; THOMAS, A.L.T. Fatores promotores de rendimento em modelos de produção para soja. In: SANTOS, H.P.dos; FONTANELI, R.S.; SPERA, S.T.; PIRES, J.L.; TOMM, G.O. (Org.) - *Eficiência de soja cultivada em modelos de produção sob sistema plantio direto*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2005. p.36-80.
- REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M. Glyphosate-resistant soybean response to various salts of glyphosate and glyphosate accumulation in soybean. *Weed Science*, v.51, p.496-502, 2003.
- REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 37. , 2009, Porto Alegre. *Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em*

Santa Catarina 200/2010. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 134 p.

ROSINHA, R.C.; DOTTO, S.R.; SARTORI, J.F. Rendimento de cultivares de soja na rede experimental da Fundação Pró-Sementes. *Informativo Pró-Sementes e Apassul*, n.27, p. 4-5, 2007.

SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; JACQUES, R.J.S.; KASUYA, M.C.M; SILVA, A.A. Comportamento de estirpes de *Bradyrhizobium* sp. sob efeito de componentes glyphosate potássico. *Revista Ciência Agronômica*, v.34, p.201-206, 2003.

SANTOS, J.B; JACQUES, R.J.S.; PROCÓPIO, S.O.; KASUYA, M.C.M.; SILVA, A.A.; SANTOS, E.A. Efeitos de diferentes formulações comerciais de glyphosate sobre estirpes de *Bradyrhizobium*. *Planta Daninha*, v.22, p.293-299, 2004.

SERRAJ, R.; SINCLAIR, T.R.; PURCELL, L.C. Symbiotic N₂ fixation response to drought. *Journal of Experimental Botany*, v.50, p.143-155, 1999.

VOSS, M. *Inoculação de Bradyrhizobium em soja, em sistema plantio direto, em áreas inoculadas anteriormente, no Planalto Médio do RS*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 8 p. html, 3 tab. (Embrapa Trigo. Circular Técnica Online, n.6). Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_ci06.htm.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: A review. *Journal of Environmental Quality*, v.33, p.825-831, 2004.

Estabelecimento da lavoura de soja

*André Luís Thomas¹, José Antonio Costa²
& João Leonardo Fernandes Pires³*

O estabelecimento da lavoura de soja apresenta papel primordial no potencial de rendimento de grãos, principalmente por meio da época de semeadura que procura disponibilizar as melhores condições de umidade, temperatura e fotoperíodo para o desenvolvimento e o rendimento da cultura. Já a escolha das cultivares a serem semeadas e a distribuição espacial das plantas (população e espaçamento entre as fileiras) na lavoura influenciam tanto o manejo da lavoura como o potencial de rendimento de grãos.

1. Escolha de cultivares

No sistema de produção da soja, um dos fatores que influenciam decisivamente no potencial de rendimento da lavoura é a escolha correta de cultivares, que muitas vezes não recebe a atenção adequada. Essa prática deve ser planejada com antecedência, a fim de verificar a disponibilidade de sementes das cultivares desejadas. Na escolha da cultivar, além do potencial genético, está sendo definido o conjunto de práticas de manejo a ser empregado na lavoura e, por associação, o nível de investimento a ser realizado.

¹ Professor da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Caixa Postal 15100, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

² Professor Titular Aposentado da Faculdade de Agronomia da UFRGS. E-mail: jamc@ufrgs.br

³ Pesquisador da Embrapa Trigo. BR 285, km 294, Caixa Postal 451, CEP 99001-970, Passo Fundo, RS. E-mail: pires@cnpt.embrapa.br

No mercado existe grande número de cultivares que se distinguem pelo potencial de rendimento, ciclo, hábito de crescimento, resistência ao acamamento, a doenças, a nematóides, a insetos pragas e a herbicidas, na eficiência do uso da adubação e na tolerância a acidez do solo, possibilitando diferentes níveis tecnológicos de manejo da lavoura.

Cultivares melhoradas, portadoras de genes capazes de expressar produtividade elevada, ampla adaptação e boa resistência/tolerância a fatores bióticos ou abióticos adversos, representam uma das mais significativas contribuições à eficiência do setor produtivo (Tecnologias, 2008a). Existem cultivares com potencial genético para produzir mais de 6000 kg/ha de grãos em parcelas experimentais (Costa et al., 1998; Pires et al., 1998b; Rosinha et al., 2007) e 4000 kg/ha em lavouras. Entretanto, para que isso ocorra é essencial que o agricultor utilize sementes de cultivares desenvolvidas pela pesquisa e com origem conhecida, ou seja, multiplicadas por produtores ou instituições credenciadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Com isso, o agricultor tem garantia do poder germinativo das sementes e do vigor inicial das plântulas, que são essenciais ao estabelecimento da população de plantas na lavoura, e de que não haverá disseminação de doenças nem infestação de plantas daninhas por meio de lotes de sementes contaminadas.

Devido ao grande número de cultivares disponíveis no mercado, a escolha das adaptadas a cada região de cultivo é de fundamental importância para potencializar o rendimento da cultura. Na Tabela 1 são mostrados alguns exemplos.

A diversificação de cultivares, ou seja, a utilização de cultivares de ciclos diferentes (Tabela 2) tem como principal objetivo evitar grandes flutuações no rendimento de ano para ano. Quando uma cultivar ocupa uma área muito grande, ocorrências meteorológicas desfavoráveis, como deficiência hídrica, coincidindo com períodos críticos da cultura, como florescimento e enchimento de grãos, bem como o excesso de precipitação na maturação de colheita, resultam em decréscimo na quantidade e na qualidade dos grãos produzidos. A utilização de cultivares com ciclos diferentes também permite melhor distribuição da carga de trabalho na semeadura, nos tratamentos fitossanitários (controle de plantas daninhas, insetos pragas e moléstias), na colheita e no transporte dos grãos, possibilitando a utilização mais racional do maquinário (Costa, 1996).

Tabela 1. Rendimento de grãos de três cultivares de soja em quatro municípios do Rio Grande do Sul, safra 2001/2002.

Local	Cultivar		
	BRS FEPAGRO 25	IAS 5	OCEPAR 14
	----- kg/ha -----		
Júlio de Castilhos	3457	3318	3722
Santa Rosa	4947	3847	3696
São Borja	2562	2383	1850
Vacaria	3943	3957	4060

Fonte: Adaptado de Reunião, 2003.

Tabela 2. Período da emergência ao florescimento e da emergência à maturação, de três cultivares de soja resistentes ao glifosate (RR), semeadas em novembro, no município de Coxilha, RS, safra 2008/2009.

Cultivar	Emergência	
	Florescimento	Maturação
	----- dias -----	
BRS 255 RR	60	128
Fundacep 59 RR	68	139
CD 219 RR	72	145

Fonte: Fundação Pró-Sementes.

Outro aspecto importante é a rotação de cultivares numa mesma área, visando evitar o aumento de doenças de raízes, uma vez que entre elas há níveis diferentes de suscetibilidade às doenças e a nematóides (Tecnologias, 2008b).

Para cultivares com o mesmo ciclo, com hábitos de crescimento diferentes, as de hábito indeterminado podem apresentar uma pequena vantagem no rendimento de grãos em condições ambientais desfavoráveis, como época de semeadura muito tardia e recuperação após período de deficiência hídrica, pois elas continuam a crescer após o florescimento (Rodrigues-Villalobos & Shibles, 1985; Purcell et al., 1998).

2. Época de semeadura

O fator mais importante a ser considerado no manejo da lavoura de soja é a duração da estação de crescimento disponível para cultivo. Nesse sentido, o Brasil e, especificamente, as principais regiões produtoras de soja, têm delimitações de sua estação de crescimento impostas pela disponibilidade hídrica (como nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) e pela temperatura (como ocorre nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná). Estas limitações já estabelecem o rendimento possível de ser alcançado pela cultura. Entretanto, a deficiência hídrica em períodos críticos, como o florescimento e o enchimento de grãos, é a principal variável meteorológica responsável pelas oscilações anuais no rendimento nas principais regiões produtoras do País (Pires et al., 2005).

A época de semeadura determina a exposição das plantas de soja às variações na distribuição dos fatores climáticos e contribui fortemente para a definição da duração do ciclo, da altura da planta e do rendimento de grãos (Tecnologias, 2008b). A soja é uma espécie que apresenta exigências fotoperiódicas, térmicas e hídricas para se desenvolver adequadamente e expressar seu potencial de rendimento.

O fotoperíodo exerce influência sobre os períodos vegetativo e reprodutivo, determinando, conseqüentemente, a duração do ciclo da soja. Os efeitos dessa ação, entretanto, dependem principalmente da latitude e da época de semeadura, mas variam de acordo com as cultivares (Urban Filho & Souza, 1993; Alliprandini et al., 2009). A sensibilidade fotoperiódica da soja varia com o genótipo, e o grau de resposta ao estímulo é o principal determinante da área de adaptação das cultivares. Nas cultivares de soja sensíveis, a resposta ao fotoperíodo é quantitativa e não absoluta, o que significa que a floração ocorrerá de qualquer modo, mas, o tempo requerido para tal dependerá do comprimento do dia, sendo mais rápida a indução com dias curtos do que com dias longos (Rodrigues et al., 2001). Desse modo, a indução floral provoca a transformação dos meristemas vegetativos em reprodutivos (primórdios florais), determinando o potencial de rendimento (Lawn & Byth, 1973; Major et al., 1975). Pelo fato do fotoperíodo crítico ser constante para uma mesma cultivar, a planta modifica seu crescimento e desenvolvimento quando é semeada em latitudes diferentes da que está adaptada, ou em diferentes épocas de semeadura em uma mesma latitude (Costa, 1996).

A duração do subperíodo emergência–florescimento é influenciada pelo acúmulo de temperaturas e pela ação fotoperiódica determinadas pela época de semeadura. Isso faz com que uma cultivar semeada em três épocas diferentes, no período indicado à cultura, não tenha a mesma época de florescimento, como demonstra a Tabela 3 (Pires et al., 2005). Na soja, a temperatura age sobre os processos de germinação, crescimento, florescimento, frutificação, nas reações químicas da respiração e da fotossíntese e ainda na absorção de água e nutrientes. Dessa forma, a temperatura é uma das variáveis meteorológicas mais importantes, afetando não apenas o acúmulo de fitomassa como também a duração dos estádios de desenvolvimento da espécie, uma vez que, para completar cada subperíodo de desenvolvimento, as plantas necessitam um determinado acúmulo térmico (Schöffel & Volpe, 2002). Assim, semeaduras muito tardias, fora da época indicada para a soja, não proporcionam tempo suficiente para as plantas atingirem crescimento adequado antes do florescimento (Barni & Matzenauer, 2000).

Tabela 3. Mudança da duração do período vegetativo da cultivar de soja IAS 5 (precoce e tipo determinado) em função de três épocas de semeadura. Porto Alegre, RS, safra 2004/2005.

Época de semeadura	Data de florescimento	Emergência-Florescimento (dias)
07 outubro	20 dezembro	67
05 novembro	10 janeiro	60
06 dezembro	31 janeiro	51

Fonte: Adaptado de Pires et al., 2005.

A época de semeadura e a duração do ciclo das cultivares devem permitir que a germinação, o crescimento, a reprodução das plantas, até a plena formação dos grãos, e a colheita, ocorram durante o período de maior probabilidade de incidência de temperatura e umidade favoráveis, na maioria dos anos. Essa condição ocorre com maior frequência dentro de um período mais ou menos comum, para a maioria das regiões produtoras no Brasil, com melhor período para semeadura que vai de meados de outubro a meados de dezembro. De modo geral, para cultivares de hábito determinado, semeaduras em épocas anterior ou posterior ao período mais indicado para uma

dada região reduzem o porte e o rendimento das plantas (Figura 1). Quanto à duração de ciclo, sementeiras anteriores a novembro tendem a alongar o ciclo e sementeiras posteriores tendem a encurtá-lo (Tabela 4). A intensidade de variação da altura de planta e da duração do ciclo, por efeito da época de sementeira, difere entre cultivares, locais e anos (Tecnologias, 2008b).

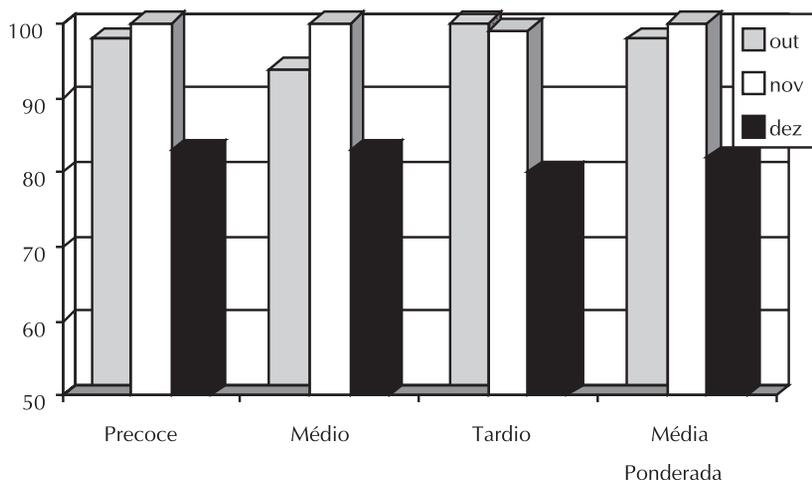


Figura 1. Rendimento médio percentual de grãos de soja de cultivares de ciclo precoce, médio e tardio, em três épocas de sementeira no Rio Grande do Sul. Média de quatro locais e três anos agrícolas.

Fonte: Adaptado de Bonato et al., 1998.

Tabela 4. Duração e soma térmica do subperíodo sementeira até maturação fisiológica da cultivar de soja BRS 153, em três épocas de sementeira. Eldorado do Sul, RS, safra 2003/2004.

Época de sementeira	Sementeira - Maturação fisiológica	
	Ciclo (dias)	Soma térmica* (graus-dia)
Outubro	156	1272
Novembro	137	1175
Dezembro	111	1005

* Temperatura base= 14°C

Fonte: Adaptado de Gubiani, 2005.

3. Distribuição espacial das plantas na lavoura

A distribuição espacial das plantas de soja na lavoura é determinada pela população de plantas e pelo espaçamento entre as fileiras. Essa prática, aparentemente simples, tem grande influência sobre o desenvolvimento, o manejo e o potencial de rendimento da cultura. Na Figura 2 apresenta-se (em escala) a área ocupada por cada planta de soja em diferentes combinações de populações de plantas e espaçamentos entre as fileiras.

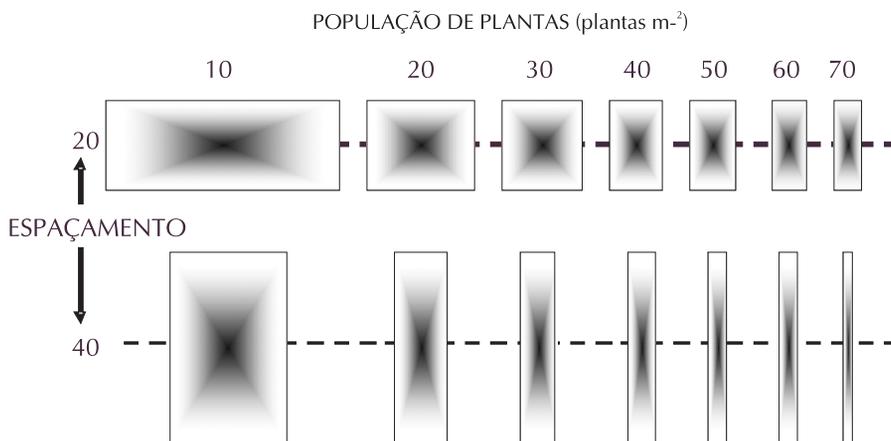


Figura 2. Área (em escala) ocupada por cada planta de soja em diferentes combinações de populações de plantas e espaçamentos entre as fileiras.

A soja é considerada uma espécie com grande plasticidade, ou seja, apresenta a capacidade de se adaptar a uma variação na população de plantas e no espaçamento entre as fileiras sem, muitas vezes, apresentar alteração no rendimento de grãos. Entretanto, ao semear uma lavoura, deve-se buscar a distribuição das plantas que proporcione a melhor utilização dos fatores do ambiente, como radiação solar, água e nutrientes.

Nas principais regiões produtoras de soja do País utiliza-se o espaçamento entre as fileiras de 45 a 50 cm, e a população indicada para a cultura situa-se em torno de 300 mil plantas por hectare ou 30

plantas m⁻². Variações de 20% nesse número, para mais ou para menos, não alteram significativamente o rendimento de grãos para a maioria dos casos. Quando a semeadura ocorre em condições que favorecem o acamamento de plantas, como utilização de cultivares de ciclo longo no início da época de semeadura, cultivo em solos com elevada fertilidade ou em solos que podem apresentar excesso de umidade, deve-se reduzir a população de plantas. Já quando a semeadura for realizada no final da época indicada deve-se aumentar a população e reduzir o espaçamento entre as fileiras com o objetivo de compensar a redução de estatura de planta em função do encurtamento do subperíodo vegetativo. Entretanto, existe resposta diferenciada em rendimento para espaçamentos e populações, dependendo da arquitetura da planta e do ciclo da cultivar (Tecnologias, 2006; Garcia et al., 2007; Reunião, 2008; Tecnologias, 2008b).

O máximo rendimento de grãos da soja depende da capacidade das plantas da comunidade de acumularem um mínimo de matéria seca e/ou da capacidade de maximizarem a interceptação de radiação solar, o mais cedo possível, na fase vegetativa e no início da fase reprodutiva, sendo esse acúmulo de matéria seca dependente de muitos fatores, como condições meteorológicas, época de semeadura, genótipo, fertilidade do solo, população de plantas e espaçamento entre as fileiras (Wells, 1993; Board & Modali, 2005). Nesse sentido, a redução do espaçamento entre as fileiras dos tradicionais 45 a 50 cm para em torno de 20 cm tem proporcionado o aumento no rendimento de grãos da soja (Tabela 5) devido à melhor distribuição das plantas na lavoura (Thomas et al., 1988; Pires et al., 1998a; Rambo et al., 2003; Harder et al., 2007). Com a diminuição do espaçamento entre as fileiras para uma mesma população de plantas haverá: menor competição intraespecífica na fila pelos fatores do ambiente; sombreamento mais rápido do espaço entre as fileiras, proporcionando melhor controle de plantas daninhas; melhor uso da água; e maior interceptação de radiação solar (Doss & Thurlow, 1974; Johnson et al., 1982; Johnson, 1987; Board & Harville, 1992; Ikeda, 1992).

Tabela 5. Efeito de espaçamentos entre as fileiras e de populações de plantas sobre o rendimento de grãos de soja.

Plantas/ha (mil)	Espaçamento entre as fileiras (cm)			
	19	38	76	DMS ²
	----- kg/ha -----			
124	3760	3700	3440	NS ³
185-190	4040	3940	3680	230
296-300	4330	4140	3910	260
445	4410	4220	3720	320
DMS ¹	240	290	300	-

¹ Valor requerido para haver diferença mínima significativa (DMS) entre populações de plantas.

² Valor requerido para DMS entre espaçamentos entre as fileiras.

³ Não significativa.

Fonte: Adaptado de Harder et al., 2007.

A utilização de espaçamento reduzido entre fileiras é indicado para sistemas de manejo que visam elevado rendimento de grãos, proporcionando ganhos, principalmente quando: não ocorre deficiência hídrica (Taylor, 1980); utilizam-se cultivares de ciclo precoce (Costa et al., 1980); os solos são bem supridos de nutrientes (Thomas et al., 1998); e a semeadura for tardia (Board et al., 1990; Rodrigues et al., 2002). Entretanto, esta prática exige a adaptação de implementos para a semeadura e, principalmente, para a realização de tratos culturais (controle de insetos pragas, plantas daninhas e doenças) porque poderá haver amassamento de plantas.

A utilização de espaçamentos entre as fileiras acima dos tradicionalmente utilizados (45 a 50 cm) reduz o potencial de rendimento da soja (Figura 3) devido à maior competição intraespecífica na fila. Às vezes, essa prática tem sido adotada na expectativa de melhorar o controle da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) da soja por uma melhor cobertura com fungicidas das folhas das plantas na lavoura. Entretanto, estudos têm demonstrado que isso não é necessário porque se consegue boa cobertura das plantas de soja em espaçamentos reduzidos entre as fileiras de plantas com tecnologia de aplicação, em que incluem-se: monitoramento da lavoura para aplicação do fungicida no momento correto; observar os fatores do ambiente, como umidade relativa do ar, velocidade do vento e horário de aplicação

favoráveis; tipo de bico utilizado, diâmetro das gotas e pressão de trabalho do pulverizador; volume de calda aplicado por área; velocidade de aplicação, entre outras (Ozkan, 2005; Hanna et al., 2008, Costa et al., 2009; Ferreira & Boller, 2009; Mueller et al., 2009; Witt et al., 2009). Mesmo porque, por ocasião da ocorrência da ferrugem, as plantas, nesses espaçamentos, já cobriram completamente o solo.

O arranjo de plantas em soja não pode ser definido somente em função de um fator que determina o rendimento de grãos (ex. controle fitossanitário). Muitas vezes isto tem acontecido na lavoura de forma generalizada (sem levar em consideração condições regionais, de uso de tecnologia e de característica intrínsecas a cada estação de crescimento). A mera mudança na população e no espaçamento influencia uma série de fatores promotores do rendimento que determinam o potencial de rendimento da lavoura. Portanto, a escolha da melhor combinação deve levar em consideração todos estes fatores. Se isto não ocorrer, por exemplo, no caso da ferrugem, estaremos em pouco tempo cultivando soja com espaçamento entre fileiras muito grande e com baixa população de plantas (para podermos ter boa aeração e aplicarmos fungicida a fim de cobrir totalmente as folhas); utilizando cultivares superprecoce (que ficam menos tempo expostas aos riscos da doença); aplicando fungicidas precocemente e preventivamente (por um calendário predefinido sem levar em consideração as condições ambientais), entre outros. Com certeza esta não é a melhor combinação para obtenção de elevados rendimentos e, principalmente, retorno financeiro em soja.

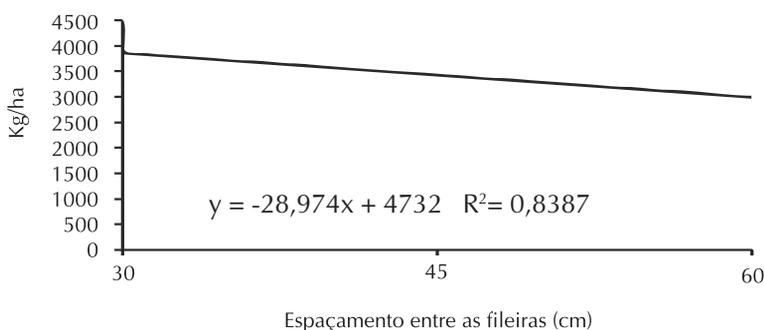


Figura 3. Rendimento de grãos em função do espaçamento entre fileiras na cultura da soja. Santa Maria,RS, safra 2007/2008. Fonte: Fiorin, 2009.

4. Referências

- ALLIPRANDINI, L.F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, J.E.C.; GABE, H.L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M.N.; OLIVEIRA, M.A.R.; PITOL, C.; PRADO, L.C.; STECKLING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. *Crop Science*, v.49, p.801-808, 2009.
- BARNI, N. A.; MATZENAUER, R. Ampliação do calendário de semeadura da soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos ambientes. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.6, p.189-203, 2000.
- BOARD, E.; HARVILLE, B.G.; SAXTON, A.M. Branch dry weight in relation to yield increases in narrow-row soybean. *Agronomy Journal*, v. 82, p.540-544, 1990.
- BOARD, J.E.; HARVILLE, G. Explanations for greater light interception in narrow-vs. Wide-row soybean. *Crop Science*, v.32, p.198-202, 1992.
- BOARD, J.E.; MODALI, H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crop Science*, v.45, p.1790-1799, 2005.
- BONATO, E.R.; BERTAGNOLLI, P.F.; IGNACZAK, J.C.; TRAGNAGO, J.L.; RUBIN, S. DE A.L. Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.33, p.879-884, 1998.
- COSTA, D.I.; BOLLER, W.; CARVALHO, W.P.A. Controle de oídio e ferrugem asiática da soja, com aplicação de fungicida por vias aérea e terrestre em diferentes períodos do dia. In: Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 37., Porto Alegre, 2009. *Programa e resumos*. Porto Alegre: UFRGS, 2009. CD-ROM.
- COSTA, J.A.; OPLINGER, E.S.; PENDLETON, J.W. Response of soybean cultivars to planting patterns. *Agronomy Journal*, v. 72, p.153-156, 1980.
- COSTA, J.A. *Cultura da Soja*. Porto Alegre: Manica, I.; Costa, J.A., 1996. 233 p.
- COSTA, J.A.; THOMAS, A.L.; PIRES, J.L.; FERREIRA, F.G. Rendimento de grãos de cultivares de soja de ciclo médio, semeadas em Eldorado do Sul-RS, na safra 1997/98. In: Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 26, 1998, Cruz Alta. *Ata e Resumos*. Cruz Alta, RS: UNICRUZ, 1998. p.166.
- DOSS, D.B.; THURLOW, D.L. Irrigation, row width, and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. *Agronomy Journal*, v.66, p.620-623, 1974.
- FERREIRA, M.C.; BOLLER, W. Aplicações de fungicida para o controle da ferrugem asiática da soja e interações com diferentes arranjos espaciais da

cultura. In: Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 37., Porto Alegre, 2009. *Programa e resumos*. Porto Alegre: UFRGS, 2009. CD-ROM.

FIORIN, R.A. *Penetração de gotas e rendimento de grãos em função do arranjo de plantas, cultivares e volume de calda na cultura da soja*. 2009. 92 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2009.

GARCIA, A.; PIPOLO, A.E.; LOPES, I.O.N.; PORTUGAL, F.A.F. *Instalação da lavoura de soja: época, cultivares, espaçamento e população de plantas*. Londrina: Embrapa Soja, 2007. Circular Técnica 51. 12p.

GUBIANI, E.I. *Crescimento e rendimento da soja em resposta a épocas de semeadura e arranjo de plantas*. 2005. 77 p. Dissertação (Mestrado – Plantas de Lavoura) Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HANNA, S.O.; CONLEY, S.P.; SHANER, G.E.; SANTINI, J.B. Fungicide application timing and row spacing effect on soybean canopy penetration and grain yield. *Agronomy Journal*, v.100, p.1488-1492, 2008.

HARDER, D.B.; SPRAGUE, C.L.; RENNER, K.A. Effect of soybean width and population on weeds, crop yield, and economic return. *Weed Technology*, v.21, p.744-752, 2007.

IKEDA, T. Soybean planting patterns in relation to yield and yield components. *Agronomy Journal*, v.84, p.923-926, 1992.

JOHNSON, R.R. Crop management. In: WILCOX, J.R. (Ed.) *Soybeans: improvement, production, and uses*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1987. p. 355-385.

JOHNSON, R.R.; GREEN, D.E.; JORDAN, C.W. What is the best soybean row width? *Crops and Soils Magazine*, v.43, p.10-13, 1982.

LAWN, R. J.; BYTH, D. E. Response of soya bean to planting date in South-Eastern Queensland. I. Influence of photoperiod and temperature on phasic development patters. *Australian Journal of Agricultural Research*, v.24, p.67-80, 1973.

MAJOR, D. J.; JOHNSON, D. R.; TANNER, J. W.; ANDERSON, I. C. Effects of daylength and temperature on soybean development. *Crop Science*, v.15, p. 174-179, 1975.

MUELLER, T.A.; MILES, M.R.; MOREL, W.; MAROIS, J.J.; WRIGHT, D.L.; KEMERAIT, R.C.; LEVY, C.; HARTMAN, G.L. Effect of fungicide and timing of application on soybean rust severity and yield. *Plant Disease*, v.93, p.243-248, 2009.

OZKAN, H.E. Spraying recommendations for soybean rust. Extension fact sheet. AEX-526-05. 2005. 5p. Disponível em <<http://ohioline.osu.edu/aex-fact/pdf/0526.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2009, 12:31.

PIRES, J.L.F.; COSTA, J.A.; THOMAS, A.L. Rendimento de grãos de soja influenciado pelo arranjo de plantas e níveis de adubação. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.4, p.183-188, 1998a.

PIRES, J.L.; THOMAS, A.L.; COSTA, J.A.; PEDROSO, M.M. Rendimento de grãos de cultivares de soja de ciclo precoce, semeadas em Eldorado do Sul-RS, na safra 1997/98, em espaçamento entre linhas reduzido. In: Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 26, 1998, Cruz Alta. *Ata e Resumos*. Cruz Alta, RS: UNICRUZ, 1998b. p.164.

PIRES, J.L.F.; CUNHA, G.R. da; THOMAS, A.L. Fatores promotores de rendimento em modelos de produção de soja. In: SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; SPERA, S.T.; PIRES, J.L.F.; TOMM, G.O. (Org.). *Eficiência de soja cultivada em modelos de produção sob sistema plantio direto*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2005. 248p.

PURCELL, L.C.; SNELLER, C.H.; VORIES, E.D. 1998. Soybean Drought. Disponível em <<http://www.arspb.org/research/1998/23.asp>>. Acesso em: 26 jun. 2009, 15:23.

RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F.G. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. *Ciência Rural*, v.33, p.405-411, 2003.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL. *Ata e Resumos*, 2003. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 252p.

REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 36. , 2008, Porto Alegre. *Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2008/2009*. Porto Alegre: Fepagro, 2008. 144 p.

RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M.C.C.; LHAMBY, J.C.B.; BONATO, E.R.; BERTAGNOLLI, P.F. *Redução de espaçamento em semeadura tardia de soja*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. Documento Online nº 12. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_do12_22.htm>. Acesso em: 12 ago. 2009, 14:18.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; BERTAGNOLLI, P.F.; LUZ, J.S. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.431-437, 2001.

RODRIGUES-VILLALOBOS, E.; SHIBLES, R. Response of determinate and indeterminate tropical soybean cultivars to water stress. *Field Crops Research*, v.10, p.269-281, 1985.

ROSINHA, R.C.; DOTTO, S.R.; SARTORI, J.F. Rendimento de cultivares de soja na rede experimental da Fundação Pró-Sementes. *Informativo Pró-Sementes e Apassul*, n.27, p. 4-5, 2007.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Relação entre soma térmica efetiva e o crescimento da soja. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, p.89-96, 2002.

TAYLOR, H.M. Soybean growth and yield as affected by row spacing and by seasonal water supply. *Agronomy Journal*, v.72, p.543-547, 1980.

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE SOJA – PARANÁ – 2007. Londrina: Embrapa Soja, 2006. 217p.

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE SOJA – REGIÃO CENTRAL DO BRASIL – 2008. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008a. 280p.

_____. – 2009 E 2010. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados : Embrapa Agropecuária Oeste, 2008b. 262p.

THOMAS, A.L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L. Rendimento de grãos de soja afetado pelo espaçamento entre linhas e fertilidade do solo. *Ciência Rural*, v.28, p.543-546, 1998.

URBEN FILHO, G.; SOUZA, P.I.M. de. Manejo da cultura da soja sob cerrado: época, densidade e profundidade de semeadura. In: ARANTES, N.E.; SOUZA, P.I.M. de (ed.). *Cultura da soja nos cerrados*. Piracicaba: POTAFOS, 1993. 535p.

WELLS, R. Dynamics of soybean growth in variable planting patterns. *Agronomy Journal*, v.1, p.44-48, 1993.

WITT, J.S.S.; BOLLER, W.; ARAÚJO, E.C.; RODIGHIERO, C.P.; MALDANER; CECCON, R. Desenvolvimento de mecanismo para auxiliar a deposição de gotas no interior do dossel da cultura da soja com pulverizador de barras. In: Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 37., Porto Alegre, 2009. *Programa e resumos*. Porto Alegre: UFRGS, 2009. CD-ROM.

Estresse hídrico em soja: impacto no potencial de rendimento de grãos

André Luís Thomas¹ & José Antonio Costa²

A obtenção de lavouras de soja de alto potencial de rendimento de grãos depende, primeiramente, do conhecimento detalhado do crescimento e do desenvolvimento da cultura, das exigências edafoclimáticas e nutricionais, do potencial genético e do manejo a ser utilizado em diferentes situações de cultivo, para maximizar o rendimento. Nesse contexto, a disponibilidade hídrica apresenta papel primordial no desenvolvimento da planta e no rendimento de grãos de soja.

A demanda por água aumenta progressivamente com o desenvolvimento da cultura da soja, atingindo o máximo no florescimento até o início da formação de legumes e se mantém alta até a maturação fisiológica (Tabela 1). Na média, a cultura necessita ao redor de 6 mm diários de água durante seu ciclo, fazendo com que cultivares superprecoces (ciclo de 100-110 dias) necessitem de 600 mm e cultivares tardias (ciclo de 140 dias) de 840 mm de água, bem distribuídos durante o ciclo de desenvolvimento.

O estresse hídrico ao desenvolvimento de uma lavoura de soja pode ser ocasionado tanto pela deficiência como pelo excesso de água. A deficiência hídrica é mais comum e apresenta maior importância e impacto sobre a produção de soja. Já o excesso de água fica mais restrito a áreas de várzea. Entretanto, ambos os estresses podem

¹ Professor da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Caixa Postal 15100, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

² Professor Titular Aposentado da Faculdade de Agronomia da UFRGS. E-mail: jamc@ufrgs.br

proporcionar grandes perdas no potencial de rendimento de grãos. Sendo assim, a seguir serão abordadas as principais causas que levam os estresses hídricos a diminuir o rendimento de grãos nessa cultura.

Tabela 1. Evapotranspiração (EPT) total e média diária em subperíodos do ciclo de desenvolvimento da soja.

Subperíodos de desenvolvimento	EPT total	EPT diária
	... mm de água ¹ ...	
Semeadura - Emergência	16	2,2
Emergência - R1*	266	5,1
R1 - R3*	160	7,4
R3 - R7*	362	6,6
R7 - R8*	36	3,7
Ciclo	840	5,8

¹ 01 mm de água = 1 litro de água/m².

* R1 = Início do florescimento, R3 = Início da formação de legumes, R7 = Maturação fisiológica, R8 = Maturação de colheita.

Fonte: Berlato & Bergamaschi, 1979.

1. Deficiência hídrica

A deficiência hídrica, muitas vezes, é abordada simplesmente como a baixa disponibilidade de água ao desenvolvimento das plantas, entretanto, normalmente, em nossas condições de cultivo, ela está associada a temperaturas elevadas e alta radiação solar. Essa interação de estresses abióticos apresenta grande potencial para formar compostos oxidativos altamente reativos e tóxicos que são capazes de danificar as células vegetais (Apel & Hirt, 2004; Mittler et al., 2004), prejudicando o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, o potencial de rendimento de grãos, dependendo da sua intensidade, duração e estágio de ocorrência.

1.1. Germinação da semente e emergência da plântula

A semente de soja apresenta todas as estruturas para gerar uma nova planta. Entretanto, para que isso ocorra, é necessário que ela absorva aproximadamente 50% de seu peso em água para iniciar o processo de germinação. Durante a germinação ocorre o desdobra-

mento das reservas cotiledonares (carboidratos, lipídios e proteínas) em compostos mais simples (açúcares e aminoácidos) e energia que são utilizados no desenvolvimento da plântula. As reservas e os nutrientes dos cotilédones suprem as necessidades metabólicas da plântula por 7-10 dias após a emergência. Durante a germinação da semente e a emergência da plântula, ocorrem o desenvolvimento do sistema radicular seminal, o desenrolamento das folhas primárias e o desenvolvimento do meristema apical, que dará origem à parte aérea, fazendo com que a plântula passe a absorver nutrientes do solo e produzir fotoassimilados para seu desenvolvimento. A emergência ocorre de 7 a 10 dias após a sementeira, dependendo do vigor da semente, da profundidade de sementeira e da umidade, textura e temperatura do solo (Muller, 1981a; Carelli, 1981).

O turgor celular, proporcionado pela absorção de água, é o responsável pelo crescimento (alongação) e divisão celular, proporcionando a germinação da semente e o desenvolvimento da plântula.

A fase de estabelecimento das plantas tem importância fundamental no potencial de rendimento da lavoura, pois determinará o número de plantas por área e, conseqüentemente, o manejo de plantas daninhas, altura e ramificações da planta, acamamento de plantas ou de ramos, etc., bem como a uniformidade da população, diminuindo a proporção de plantas dominadas, que aumentam a competição intraespecífica e contribuem para diminuir o potencial de rendimento. Portanto, faz-se necessário semear a lavoura com o solo apresentando boa disponibilidade hídrica e dentro da época recomendada pela pesquisa, porque ela é ajustada para tentar evitar que períodos de baixa precipitação ocorram durante os estádios reprodutivos (Mota, 1983; Cunha et al., 1999; Matzenauer et al., 2003).

1.2. Fase vegetativa

O desenvolvimento vegetativo da planta de soja é muito importante para o rendimento de grãos, sendo necessário um período de 50-55 dias de crescimento vegetativo, com acúmulo de 200 g/m² de matéria seca na parte aérea até o início do florescimento, para serem obtidos rendimentos elevados (Board & Modali, 2005). O desenvolvimento depende basicamente da continuidade da divisão celular, da progressiva iniciação de tecidos e primórdios de órgãos e da

elongação celular, até que a forma característica da planta seja alcançada (Machado, 1981).

A deficiência hídrica proporciona diminuição na taxa de absorção de água pelas raízes de soja. O desbalanço entre a água absorvida pelas raízes e a água perdida através da transpiração causa o murchamento da planta. A planta se defende da perda de água com o fechamento dos estômatos das folhas, evitando uma rápida desidratação. Entretanto, o fechamento estomático restringe a troca de CO_2 e O_2 entre os tecidos internos da planta e o ar atmosférico. Além disso, com o decréscimo drástico do fluxo de água através da planta, ocorre diminuição na absorção de nutrientes. O processo de fixação biológica de N_2 também é reduzido. Todos esses fatores fazem com que a planta de soja reduza seu metabolismo para sobreviver ao período de seca e voltar a se desenvolver quando a água no solo deixa de ser o fator limitante. A redução no desenvolvimento vegetativo da planta de soja limita seu potencial de rendimento de grãos por diminuir o número de nós na planta, ou seja, o número de locais potenciais (com gemas meristemáticas) para florescimento (Sionit & Kramer, 1977; Ashley & Ethridge, 1978; Scott & Batchelor, 1979; Boerma & Ashley, 1982).

Boa nutrição mineral é essencial para o desenvolvimento vegetativo das plantas, em especial o nitrogênio, que, no caso da cultura da soja, é suprido, na maior parte, pela simbiose com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*. Para que isso ocorra, é recomendado fazer a inoculação das sementes com inoculante de qualidade. No caso de utilizar inoculantes turfosos, recomenda-se umedecer a semente para melhorar a aderência, porém deve haver o cuidado de não utilizar água em excesso (o tegumento da semente fica enrugado) porque isso já desencadeia o processo de germinação da semente. Caso essa semente seja semeada em um solo com baixa disponibilidade hídrica, ela poderá se desidratar e morrer, diminuindo a população de plantas.

Feita a inoculação da semente de soja com *Bradyrhizobium*, os nódulos podem ser visualizados logo após a emergência da plântula, entretanto eles serão efetivos na fixação de N_2 de 10 a 14 dias após esse estágio. No Brasil estima-se que a fixação biológica de N_2 contribua com 69% a 94% do nitrogênio necessário ao desenvolvimento

da cultura da soja (Hungria et al., 2005a e 2005b). O restante é suprido pelo solo, entretanto fatores adversos, como acidez, falta de macro e micronutrientes, temperatura elevada e baixa disponibilidade de água no solo, reduzem acentuadamente a fixação biológica.

A fixação biológica é altamente sensível à seca. A taxa de fluxo do floema diminui logo que inicia o processo de deficiência hídrica no solo. Devido a alta sensibilidade dos nódulos ao fluxo volumétrico do floema ocorre diminuição na fixação biológica de N_2 e, conseqüentemente, também ocorre decréscimo no acúmulo de nitrogênio e no potencial de rendimento de grãos de soja. A inibição da fixação biológica de N_2 no início da deficiência hídrica é atribuída à sinalização de compostos nitrogenados, associada ao acúmulo de N na parte aérea e nódulos (Serraj et al., 1999; King & Purcell, 2005; Todd et al., 2006). O decréscimo no fluxo do floema diminui a disponibilidade de carbono aos nódulos, entretanto o suprimento de fotoassimilados durante a deficiência hídrica não é o fator mais limitante da atividade dos nódulos (Serraj et al., 1999), até porque a fixação biológica diminui antes do que a fotossíntese das folhas, quando o processo de deficiência hídrica começa a se desencadear no solo (Sinclair et al., 1987; Djekoun & Planchon, 1991; Manavalan et al., 2009).

Na soja, a fixação biológica de N_2 aumenta até o início do enchimento de grãos e a partir daí diminui acentuadamente (Franco et al., 1978), e ela apresenta vários ciclos de nódulos, tendo em vista que a vida útil deles é de 6-7 semanas (Bergensen, 1958, citado por Muller, 1981b). Dependendo da intensidade da deficiência hídrica a que os nódulos são submetidos, eles não recuperam totalmente sua atividade quando as condições de umidade do solo voltam a ser adequadas (Djekoun & Planchon, 1991), afetando também o potencial de rendimento da cultura.

A nutrição nitrogenada da soja é uma combinação da fixação biológica de N_2 e da absorção e assimilação do nitrogênio inorgânico do solo. Entretanto, a fixação biológica é mais sensível à deficiência hídrica que a absorção e assimilação do nitrogênio do solo (Purcell & King, 1996; Purcell et al., 2004). Porém, não é recomendado fazer adubação nitrogenada em cobertura na lavoura de soja, para ela recuperar seu desenvolvimento após um período de deficiência hídrica,

pois os resultados mais frequentes da adubação da soja com N têm sido a falta de resposta ou o aumento de produtividade não lucrativa (Weber, 1966; Barni et al., 1977; Brevadan et al., 1978; Cattelan & Hungria, 1994).

Existe variabilidade entre genótipos de soja quanto à sensibilidade de fixar N_2 biologicamente em condições de deficiência hídrica, podendo esta característica ser utilizada em programas de melhoramento genético para aumentar a eficiência da fixação biológica em condições de seca (Sall & Sinclair, 1991; Serraj et al., 1999; Sinclair et al., 2000; Purcell et al., 2004).

O crescimento da planta depende da taxa fotossintética por unidade de área da folha, da área total disponível para fotossíntese e da duração da área foliar (Begg & Turner, 1976). A deficiência hídrica inibe mais cedo e severamente a expansão celular que a fotossíntese na planta de soja, proporcionando diminuição na área foliar (Boyer, 1970). Por outro lado, a deficiência hídrica pode provocar a queda ou acelerar a senescência de folhas fisiologicamente velhas para reduzir o uso da água (Begg & Turner, 1976). O ajustamento osmótico frequentemente ocorre em folhas maduras durante períodos de deficiência hídrica e, normalmente, é maior quando a deficiência desenvolve-se lentamente. O ajustamento osmótico permite que o turgor das células seja mantido quando ocorre grande mudança no potencial da água da folha. A extensão do ajustamento osmótico varia entre cultivares, entre diferentes órgãos e estádios de desenvolvimento de uma planta (Barlow, 1983). Os açúcares solúveis, ácidos orgânicos e aminoácidos são os principais constituintes do ajustamento osmótico em folhas expandidas de muitas espécies (Boyer, 1983; Hanson & Hitz, 1982; Morgan, 1984).

A boa tolerância da planta de soja à falta da água na fase vegetativa, quando comparada ao milho, é devida a características intrínsecas da espécie. Ela consegue manter maior taxa de alongação celular e maior atividade fotossintética que o milho com baixos potenciais de água nas folhas (Boyer, 1970), o que permite o crescimento e a manutenção das estruturas verdes por certo período de deficiência hídrica. Também apresenta grande quantidade de reservas temporárias nas estruturas vegetativas, possibilitando manter crescimento mínimo, mesmo sob regime de deficiência hídrica (Brevadan & Egli, 2003).

Durante a deficiência hídrica há menor translocação de fotoassimilados na planta de soja, devido à redução da fotossíntese nas folhas e à inibição do crescimento dos órgãos da planta (Sionit & Kramer, 1977). O efeito da falta de água sobre o acúmulo de matéria seca nos órgãos da parte aérea da soja depende do estágio de desenvolvimento da cultura, da intensidade e da duração da deficiência hídrica. Devido a isso, existem resultados demonstrando ou não diferenças no acúmulo de matéria seca nos órgãos ou em toda a parte aérea das plantas submetidas a deficiência hídrica, em relação a plantas bem supridas de água (Ashley & Ethridge, 1978; Boerma & Ashley, 1982; Egli et al., 1983; Finn & Brun, 1980; Scott & Batchelor, 1979; Silvius et al., 1977; Sionit & Kramer, 1977).

A deficiência hídrica diminui a altura da planta de soja devido ao menor comprimento do espaço entre nós (Desclaux et al., 2000), porém o número de nós no caule não é alterado (Momen et al., 1979). O número de ramos da planta de soja não é modificado pela deficiência hídrica, porém o crescimento dos mesmos pode diminuir nessa condição (Ashley & Ethridge, 1978; Korte et al., 1983a; Momen et al., 1979). Já as folhas podem ser menores, com aspecto de murchas e enroladas. Muitas vezes as folhas fisiologicamente mais velhas entram em senescência mais rapidamente, morrem e se desprendem da planta com a finalidade de diminuir as perdas de água (Begg e Turner, 1976).

O máximo rendimento de grãos de soja é determinado pela capacidade da planta interceptar a radiação solar durante o período vegetativo e nos estádios reprodutivos iniciais (Wells, 1991). Sendo assim, a deficiência hídrica pode restringir o desenvolvimento vegetativo da planta, principalmente a área foliar, que é a responsável pela síntese de fotoassimilados necessários à produção e fixação das estruturas reprodutivas.

1.3. Fase Reprodutiva

A sensibilidade da soja para a deficiência hídrica, quando dimensionada em termos de redução do rendimento de grãos, tende a aumentar com o avanço da cultura através da sequência natural de desenvolvimento, com mínima sensibilidade durante a fase vegetativa e máxima sensibilidade durante a fase reprodutiva, principalmente

durante a formação dos legumes e o enchimento dos grãos (Ashley & Ethridge, 1978; Korte et al., 1983b; Momen et al., 1979; Sionit & Kramer, 1977). Entretanto, a ocorrência de deficiência hídrica severa na fase vegetativa pode comprometer o rendimento de grãos devido ao menor desenvolvimento vegetativo da planta (Boerma & Ashley, 1982).

Para que uma lavoura de soja apresente alto potencial de rendimento de grãos, é necessário que acumule 200 g/m² de matéria seca na parte aérea no início do florescimento (Board & Modali, 2005).

Nos estádios iniciais da fase reprodutiva, do florescimento até o início do enchimento de grãos, ocorre rápido acúmulo de matéria seca e de nutrientes nas partes vegetativas (folhas, pecíolos, ramos e raízes) da planta, bem como aumenta rapidamente a taxa de fixação de N₂ pelos nódulos. A partir do enchimento de grãos ocorre grande remobilização das reservas e nutrientes das estruturas vegetativas da planta para o enchimento dos grãos (Ludlow & Muchow, 1990; Sadras & Conner, 1991; Brevedan & Egli, 2003). O teor de nitrogênio do grão de soja está diretamente relacionado com a quantidade de nitrogênio disponível na planta para redistribuição durante o enchimento de grão, e não com a capacidade da planta obter nitrogênio mineral do solo ou via fixação biológica, durante esse período (Egli et al., 1983).

Plantas de soja que apresentem pouco desenvolvimento vegetativo por ocasião do florescimento, submetidas à deficiência hídrica após esse período, podem ter a concentração de nitrogênio nas folhas reduzida a nível menor do que o necessário para manter a capacidade fotossintética, abreviando o período de enchimento de grãos e, conseqüentemente, o potencial de rendimento de grãos (Cure et al., 1985).

Na fase reprodutiva, os estádios de florescimento, formação dos legumes e enchimento dos grãos são os mais afetados pela deficiência hídrica.

1.3.1. Florescimento

O desenvolvimento de uma flor representa baixo investimento de fotoassimilados pela planta de soja, quando comparado com a formação de um legume ou de um grão. Por isso, normalmente, o aborto de flores é o principal meio para a planta ajustar o potencial de

rendimento às condições ambientais de crescimento. Sem deficiência hídrica, de 40% a 80 % das flores são abortadas naturalmente (Hansen & Shibles, 1978; Navarro Jr. & Costa, 2002; Maehler et al., 2003). O período total de florescimento pode durar de três a mais de cinco semanas, dependendo do genótipo e do ambiente. Esta característica proporciona à soja grande habilidade para amenizar ou recuperar as perdas no potencial de rendimento ocasionadas por adversidades. A soja é uma espécie que apresenta autopolinização, sendo menos vulnerável à seca e a altas temperaturas no florescimento que o milho, pois este apresenta polinização aberta. Entretanto, se a deficiência hídrica for muito severa, as plantas de soja podem reduzir o período de florescimento e abortar grande número de flores, diminuindo seu potencial de rendimento de grãos (Sullivan & Brun, 1975; Sionit & Kramer, 1977). A planta de soja pode diminuir ou paralisar o crescimento e, dependendo da duração e da intensidade do estresse, ela pode ou não recuperar o crescimento e o florescimento após a água deixar de ser o fator limitante.

As cultivares de soja podem ter hábito de crescimento determinado ou indeterminado, dependendo do crescimento do caule. As cultivares de hábito de crescimento determinado se caracterizam por pequeno crescimento em estatura após o início do florescimento. Já as cultivares de hábito de crescimento indeterminado continuam desenvolvendo nós e alongando o caule, assim crescem significativamente em estatura até o final do florescimento. Normalmente, para um mesmo ciclo de desenvolvimento, as cultivares de hábito determinado apresentam maior ramificação e menor período de florescimento que as cultivares de hábito indeterminado.

1.3.2. Formação dos legumes

A formação de um legume requer da planta de soja um investimento de fotoassimilados bem maior do que para a formação de uma flor. Conseqüentemente, a planta de soja tentará manter o maior número de legumes para expressar o potencial de rendimento. Sob condições hídricas satisfatórias, entre 40% e 70% das flores de uma planta de soja produzirão legumes (Navarro Jr. & Costa, 2002).

A fixação e o desenvolvimento de legumes apresentam papel primordial no incremento do rendimento de grãos, pois determinam

o número total de legumes por planta, sendo esse o componente mais maleável na composição do rendimento por área. Nesse estágio ocorre rápido crescimento do legume, que atinge aproximadamente 80% de seu tamanho final, para posteriormente ocorrer o início do enchimento dos grãos.

A incidência de deficiência hídrica durante a formação do legume pode acarretar diminuição no tamanho do mesmo e, se as condições hídricas voltarem a ser satisfatórias no período de enchimento dos grãos, esses poderão expressar todo seu potencial genético e ocasionar a rachadura do legume, proporcionando perdas no potencial de rendimento. Por outro lado, deficiência hídrica severa, que acarreta grande queda de legumes e de potencial de rendimento, seguida de condições hídricas e térmicas favoráveis ao desenvolvimento da planta, poderá ocasionar uma nova florada e o prolongamento do ciclo de desenvolvimento, proporcionando dificuldades na colheita porque haverá legumes maduros e legumes em formação na mesma planta.

1.3.3. Enchimento dos grãos

No enchimento de grãos inicia um período de rápido acúmulo de matéria seca e nutrientes nos grãos, em função da planta atingir seu máximo índice de área foliar, desenvolvimento de raízes e fixação de N_2 . Também acelera-se a redistribuição de nutrientes, carboidratos e compostos nitrogenados provenientes da senescência das folhas, ramos e caule para os grãos. No final desse estágio as folhas começam a amarelar e a cair, inicialmente na parte inferior da planta (Hanway, 1976; Franco et al., 1978; Maheler, 2000).

O aborto de flores, óvulos e legumes em plantas de soja submetidas à deficiência hídrica, e a posterior redução no tamanho do grão podem ser atribuídos parcialmente ao efeito da deficiência hídrica das folhas sobre a fotossíntese, antes que à diminuição da concentração de reservas nos órgãos vegetativos (Ahsley & Ethridge, 1978; Boerma & Ahsley, 1982; Korte et al., 1983a; Korte et al., 1983b; Ramseur et al., 1984; Sionit & Kramer, 1977).

A deficiência hídrica durante o enchimento do grão diminui o tamanho do mesmo, devido à diminuição do suprimento de fotoassimilados pela planta e pela inibição do metabolismo do próprio grão, mantendo dessa maneira a taxa de enchimento. Portanto, a

redução no tamanho do grão causada pela deficiência hídrica é ocasionada pelo menor período de enchimento (Ramseur et al., 1984; Westgate et al., 1989; Westgate & Grant, 1989). O menor período de enchimento de grãos ocorre porque a falta de água e as altas temperaturas aceleram o ciclo da soja a partir da metade final da fase reprodutiva, fazendo com que ocorra aceleração na senescência das folhas. Essas apresentam um rápido declínio na taxa de troca de carbono, nos teores de nitrogênio e clorofila (Korte et al., 1983b; Sionit & Kramer, 1977).

Os teores de óleo e de proteína nos grãos de soja praticamente não são afetados pela incidência de deficiência hídrica no enchimento dos mesmos (Sionit & Kramer, 1977; Maheler, 2000; Manavalan et al., 2009), porque a síntese de óleo e de proteína se mantém proporcional durante a formação dos grãos (Sionit & Kramer, 1977). Entretanto, a quantidade de proteína e a quantidade de óleo produzidas por área diminuem em função do menor rendimento de grãos (Sionit & Kramer, 1977; Maheler, 2000).

1.3.4. Potencial de rendimento, rendimento de grãos e seus componentes

O potencial de rendimento pode ser definido como a produtividade de uma cultivar em ambiente ao qual está adaptada, sem limitações edafoclimáticas e nutricionais, livre da ação de pragas e de doenças e com os demais estresses efetivamente controlados (Evans, 1993; Evans & Fischer, 1999). Representa o máximo rendimento da cultivar, quando os fatores bióticos e abióticos que impedem a plena expressão de seu potencial genético são minimizados, possibilitando a fixação máxima de estruturas reprodutivas pela planta.

O potencial de rendimento num estágio é determinado a partir dos componentes número de legumes/área com um, dois, três e sem grãos e o peso médio de grãos em legumes com um, dois e três grãos obtidos na maturação de colheita. Estes dados são extrapolados para calcular o potencial de rendimento de acordo com as estruturas reprodutivas presentes em cada estágio avaliado, considerando-se que todas as estruturas atingiriam a maturação de colheita (Costa, 1993). Ou, pode-se determinar o número de estruturas reprodutivas em cada estágio e multiplicar pelo número médio de grãos/legume e peso

médio de grãos da cultivar que, normalmente, são encontrados na descrição da cultivar.

O potencial de rendimentos de grãos na soja é maior em plantas bem supridas de água através da irrigação do que naquelas sujeitas às precipitações normais durante o ciclo de desenvolvimento (Figura 1). Plantas de soja com deficiência hídrica (190 mm) na fase vegetativa tiveram o potencial de rendimento de grãos reduzido a partir do florescimento (Figura 1), pois a falta de água restringe o crescimento vegetativo e, por consequência, o número de nós com gemas meristemáticas com potencial para florescer. A suplementação inadequada de água na fase de formação de legumes e no enchimento de grãos contribui para a diminuição no potencial e no rendimento de grãos (Figura 1); deficiência de 85 mm no enchimento de grãos reduziu o rendimento de grãos de 5189 kg/ha com a irrigação para 3440 kg/ha sem irrigação. Entretanto, o padrão de perda do rendimento de grãos foi similar nos dois regimes hídricos, apesar das plantas com irrigação terem partido de um potencial maior (Figura 1) (Maehler et al., 2003).

Deficiência hídrica de 260 mm na fase vegetativa e de 190 mm do florescimento à maturação fisiológica dos grãos fez com que o rendimento de grãos de soja passasse de 3689 kg/ha com irrigação para 1759 kg/ha sem irrigação (Tabela 2). Entre os componentes primários do rendimento (número de legumes por planta ou área, número de grãos por legume e peso do grão), o número de legumes por planta foi o componente mais afetado pela deficiência hídrica, seguido do peso dos grãos. Já o número de grãos por legume não foi afetado pela deficiência hídrica (Tabela 2). Isto demonstra que o número de legumes por planta ou área é o componente mais importante no rendimento de grãos da soja, e sua diminuição sob deficiência hídrica ocorre, principalmente, devido ao aborto de flores e legumes ocasionado pela restrição de fotoassimilados e nutrientes ao desenvolvimento das plantas. A diminuição no peso dos grãos em plantas sob deficiência hídrica ocorre pelo menor período de enchimento dos mesmos, tendo em vista que a seca acelera a senescência das plantas. O número de grãos por legume não foi alterado pela deficiência hídrica porque é uma característica genética intrínseca de cada cultivar pouco influenciada pelo meio, entretanto existe variabilidade entre as cultivares que podem apresentar legumes com 1, 2, 3 e, raramente, 4 grãos.

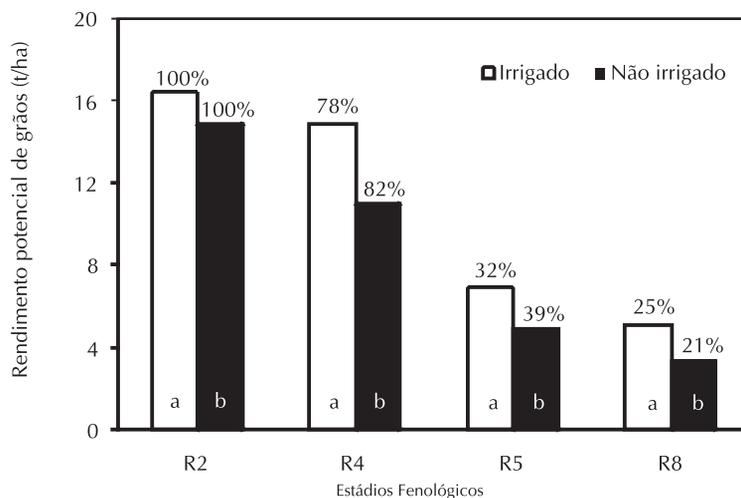


Figura 1. Estimativa do potencial de rendimento de grãos e em percentual do rendimento máximo nos estádios fenológicos do florescimento (R2), formação de legumes (R4), início de enchimento de grãos (R5) e maturação (R8) da soja. Médias com a mesma letra, em cada estágio fenológico, não diferem entre si.

Fonte: Maehler et al., 2003.

Tabela 2. Rendimento de grãos e componentes primários do rendimento em plantas de soja com e sem irrigação.

Parâmetro avaliado	Com irrigação	Sem irrigação ¹
Rendimento de grãos(kg/ha)	3689 a ²	1759 b
Legumes férteis por planta	67 a	40 b
Peso de 100 grãos (g)	17,4 a	12,9 b
Grãos/legume	1,8 a	1,8 a

¹Deficiência hídrica de 260 mm na fase vegetativa e 190 mm do florescimento à maturação fisiológica dos grãos.

² Médias com letras iguais na linha são estatisticamente similares.

Fonte: Thomas & Costa, 1994.

Além dos componentes primários do rendimento, a soja apresenta uma série de componentes secundários, como número de nós e nós férteis (com ao menos um legume com um grão bem formado) na planta e suas partes (caule e ramos) que indiretamente são mensurados através dos componentes primários. Entretanto, os componentes secundários nos detalham o desenvolvimento e o rendimento de grãos das plantas. A deficiência hídrica de 260 mm na fase vegetativa e de 190 mm do

florescimento à maturação fisiológica diminuiu o número de nós na planta, basicamente por restringir o desenvolvimento dos ramos que apresentaram menor número de nós, pois o número de nós no caule não foi afetado (Tabela 3). A deficiência hídrica diminuiu o número de nós férteis na planta e suas partes (caule e ramos) em função do aborto de flores, legumes e grãos. Apesar do desenvolvimento dos ramos ter diminuído com a deficiência hídrica, o seu número não foi afetado, pois essa característica é mais influenciada pela densidade de plantas e época de semeadura. A altura do caule diminuiu com a deficiência hídrica sem ter ocorrido diminuição no número de nós no caule, portanto houve decréscimo nos espaços entre os nós do caule devido a menor alongação celular (Tabela 3). Em suma, os componentes secundários do rendimento expressam fielmente a disponibilidade hídrica durante o desenvolvimento das plantas. A deficiência hídrica restringe o crescimento vegetativo e, por conseguinte, o aparato fotossintético e o número de locais (nós com gemas meristemáticas) com potencial para florescer; aumenta o aborto de flores, de legumes e de grãos por restringir a quantidade de fotoassimilados, diminuindo assim o número de nós férteis na planta; e diminui o peso dos grãos porque encurta o período de enchimento dos mesmos. Isso faz com que o potencial de rendimento de grãos diminua, com maior ou menor intensidade, durante a deficiência hídrica.

Tabela 3. Rendimento de grãos, componentes secundários do rendimento e estatura do caule em plantas de soja com e sem irrigação.

Parâmetro avaliado	Com irrigação	Sem irrigação ¹
Grãos (kg/ha)	3689 a ²	1759 b
Nós na planta	52 a	38 b
Nós férteis na planta	34 a	26 b
Altura do caule (cm)	60 a	50 b
Nós no caule	13 a	12 a
Nós férteis no caule	7 a	5 b
Número de ramos	6 a	5 a
Nós nos ramos	40 a	25 b
Nós férteis nos ramos	29 a	19 b

¹Deficiência hídrica de 260 mm na fase vegetativa e 190 mm do florescimento a maturação fisiológica dos grãos.

²Médias com letras iguais na linha são estatisticamente similares.

Fonte: Thomas & Costa, 1994.

1.4. Estratégias para amenizar as perdas do potencial de rendimento de grãos devido à deficiência hídrica

A cultura da soja necessita ter sua demanda hídrica atendida para expressar seu potencial de rendimento de grãos, entretanto, muitas vezes, durante o ciclo de desenvolvimento das plantas ocorrem períodos de deficiência hídrica, quer pela falta, quer pela distribuição irregular de chuvas. A quantidade de chuvas tem relação direta com a umidade disponível no solo para o desenvolvimento das plantas. O solo absorve a água da chuva e vai perdendo-a lentamente através da drenagem, da evaporação e da transpiração das plantas. Diferenças na topografia, tipo e profundidade do solo, quantidade e tipo de cobertura vegetal, presença de crosta superficial e/ou zona compactada no solo são algumas variáveis que determinam quanto de água será armazenada no solo. Também a distribuição irregular da chuva; o estágio de desenvolvimento da cultura; a disponibilidade de nutrientes; o pH do solo; a presença de plantas daninhas, de insetos pragas e de doenças, entre outros fatores, contribuem para a severidade da deficiência hídrica. Sendo assim, e não havendo a possibilidade de utilizar irrigação, algumas estratégias podem ser adotadas para amenizar as perdas do potencial de rendimento de grãos em soja devido à deficiência hídrica:

- a) semear dentro da época indicada pela pesquisa, tendo em vista que são utilizadas informações do ciclo de desenvolvimento das cultivares e a disponibilidade de água do solo para que o período de florescimento – enchimento dos grãos não coincida com o período de maior probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica (Motta, 1983; Cunha et al., 1999; Cunha et al., 2002; Matzenauer, 2003). Indiretamente ela também considera as melhores condições ambientais (temperatura e fotoperíodo) para que as plantas atinjam o florescimento com acúmulo de matéria seca suficiente para garantir o maior potencial de rendimento de grãos na região.
- b) semear cultivares indicadas pela pesquisa, tendo em vista que elas são testadas para apresentar boa adaptabilidade à região de cultivo. Além do que se conhece a melhor densidade de semeadura, a duração dos estádios e do ciclo de desenvolvimento, a

resistência a doenças, as exigências nutricionais, entre outras características agronômicas, que são informações importantes para garantir bom potencial de rendimento de grãos.

- c) fazer a diversificação de cultivares, ou seja, semear a lavoura com cultivares de diferentes ciclos de desenvolvimento (precoce, médias e tardias) com o objetivo de apresentar áreas com plantas em diferentes estádios de desenvolvimento. Isso diminui os riscos da deficiência hídrica atingir toda a lavoura no período mais crítico (enchimento de grãos), proporcionando maior estabilidade na produção. Caso possua somente uma cultivar, é aconselhado fazer o escalonamento da semeadura com a finalidade de buscar a defasagem nos estádios de desenvolvimento das plantas. A diferença de 30 dias na época de semeadura de uma cultivar, dentro do período indicado pela pesquisa, proporciona a diferença de mais ou menos 20 dias na época do florescimento.
- d) de adotar práticas agronômicas que aumentem a capacidade do solo armazenar água, bem como práticas que minimizem as perdas de água do solo. Como exemplos podem-se citar:
- fazer rotação de culturas com espécies que apresentem sistema radicular agressivo, a fim de proporcionar melhorias na estrutura do solo, bem como proporcionar o aumento no teor de matéria orgânica ao longo dos anos. A matéria orgânica apresenta papel fundamental na retenção de umidade do solo pois ela funciona como uma “esponja”, absorve grande quantidade de água e a libera lentamente.
 - fazer o cultivo de espécies que produzam palhada em abundância e que não se decomponha rapidamente, a fim de manter o solo coberto a maior parte do ano. Isso busca evitar o aquecimento do solo e diminuir a perda de água por evaporação.
 - utilizar técnicas de cultivo que evitem a formação de camadas compactadas no solo porque elas diminuem a capacidade de retenção de umidade no mesmo, bem como dificultam a penetração das raízes.
 - fazer a semeadura em nível a fim de utilizar as plantas como barreiras contra o escoamento superficial de água.

2. Excesso hídrico

2.1. Soja em solos de várzea

Os solos de várzea compreendem aqueles solos que apresentam uma característica comum, que é a formação em condições de hidromorfismo. A principal característica desses solos é a drenagem natural deficiente, normalmente motivada pelo relevo predominantemente plano, associado a um perfil cuja camada superficial é pouco profunda e a subsuperficial é praticamente impermeável (Pauletto et al., 1998).

O sistema de utilização dos solos hidromórficos no Rio Grande do Sul compreende, na maioria das propriedades, além da cultura do arroz irrigado, a pecuária de corte. Deste modo, após a colheita, o gado aproveita os restos culturais e a flora de sucessão, permanecendo na área até o preparo do solo para instalação da próxima lavoura de arroz, o que pode acontecer no ano seguinte ou 2 a 3 anos mais tarde. Esse binômio, que por muitas décadas tem sido utilizado com sucesso, apresenta rentabilidade que não mais satisfaz aos produtores. O arroz irrigado, apesar do bom rendimento, apresenta elevados custos de produção e, normalmente, é utilizado uma vez a cada três anos na mesma área. A pecuária de corte, por sua vez, apresenta baixos índices de produtividade, motivados principalmente pela alimentação deficiente em períodos críticos. Por outro lado, o cultivo continuado do arroz em uma determinada área leva à autolimitação da cultura, isto é, acaba impedindo a continuidade do cultivo devido ao aumento de plantas daninhas, em especial o arroz vermelho (Sousa et al., 1995).

A rotação de culturas em solos de várzea é uma prática recomendada para aumentar o rendimento de grãos de arroz, quer pelo efeito direto de quebrar o ciclo de insetos pragas, de moléstias e de plantas daninhas que prejudicam o desenvolvimento do arroz quer pelo efeito indireto na melhoria das condições químicas e físicas do solo, além de proporcionar a utilização de herbicidas no controle do arroz vermelho. Entretanto, para que esse efeito ocorra, é necessário utilizar espécies e/ou cultivares que se adaptem às condições de excesso de água no solo e que proporcionem retorno econômico ao

produtor. Nesse contexto, enquadra-se a cultura da soja, que, embora introduzida e melhorada para áreas bem drenadas no Brasil, é uma espécie originária de áreas alagadiças do norte da China (Evans, 1996), e, possivelmente, mantém em seu germoplasma genes capazes de permitir sua adaptação fisiológica às condições impostas pelo cultivo em várzeas, tendo em vista que existe variabilidade genética entre os materiais disponíveis no mundo e alguns apresentam bons rendimentos de grãos em condições de excesso de água no solo (Barni & Costa, 1975; Vantoai et al., 1994; Linkemer et al., 1998; Ferreira et al., 2000; Thomas et al., 2000; Sullivan et al., 2001; Riche, 2004).

2.2. Solos de várzea

Em solo com drenagem deficiente, quando ocorre inundação os espaços porosos são preenchidos pela água, que bloqueia a difusão do oxigênio na fase gasosa do mesmo. Como a difusão do O_2 na água é lenta, somente a camada superficial de milímetros do solo permanece oxidada, e em 24 horas, com temperatura ambiente superior a 20 °C, pode haver o esgotamento total do O_2 no solo (Tabela 4) pelo consumo por microrganismos, fauna e raízes (Marschner, 1995; Liesack et al., 2000; Sousa et al., 2000).

A falta de O_2 no solo não é o único entrave ao desenvolvimento das plantas de soja, pois as alterações químicas que ocorrem no solo em decorrência do excesso de umidade podem ser mais prejudiciais ao metabolismo das plantas. Com a inundação ocorre elevação no pH da solução do solo, bem como aumento nas concentrações de amônio, ferro e manganês (Tabela 4), devido às transformações de nitrato em amônio, dos óxidos férricos em óxidos ferrosos e dos óxidos mangânicos em óxidos manganosos, respectivamente (Marschner, 1995; Liesack et al., 2000; Sousa et al., 2000). Em alguns casos, a inundação também pode acentuar o efeito salino sobre as plantas, pela ascensão do sódio das camadas mais profundas do solo e/ou sua adição através da água de inundação.

A redução dos óxidos férricos (Fe^{+3}) a óxidos ferrosos (Fe^{+2}), com consequente aumento da solubilidade do ferro, é a alteração química mais importante que ocorre em solos inundados. As alterações que ocorrem em solo inundado são marcadamente afetadas pela química do ferro em função da grande quantidade de óxidos e hidróxidos de

ferro que podem sofrer redução e da reatividade do ferro com outros compostos do solo. A concentração de Fe^{+2} na solução de um solo inundado pode atingir 300 mg/L (Sousa et al., 2000). Entretanto, em torno de até 5,5 mg de Fe / L de solução de solo é a quantidade do nutriente requerida para o ótimo desenvolvimento das plantas, que apresentam concentração entre 50 e 100 mg de Fe/kg de matéria seca de folhas (Guerinot & Yi, 1994). O ferro, para ser absorvido pelas raízes de soja, deve estar, obrigatoriamente, na forma reduzida (Fe^{+2}) (Chaney et al., 1972; Guerinot & Yi, 1994; Fox & Guerinot, 1998; Mori, 1999).

Tabela 4. Alterações na acidez (pH) e concentrações de oxigênio (O_2), nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), sódio (Na), ferro (Fe) total e manganês (Mn) total na solução de um solo de várzea (Gleissolo) alagado durante 22 dias.

Dias após o alagamento	pH	O_2	NO_3^-	NH_4^+	Na	Fe	Mn
	----- mg/L -----						
0	5,0	5,8	3,3	2,3	10,8	0,1	0,5
2	5,6	0,3	1,4	1,9	11,4	1,3	0,5
5	5,4	< 0,1	< 0,2	2,3	11,8	8,3	0,6
7	5,6	< 0,1	< 0,2	3,6	13,0	12,7	0,8
10	5,8	< 0,1	< 0,2	6,5	16,6	29,6	1,9
15	5,9	< 0,1	< 0,2	10,0	22,8	61,7	2,7
17	6,0	< 0,1	< 0,2	13,7	16,8	96,9	2,0
22	6,0	< 0,1	< 0,2	16,8	21,6	100,0	2,6

Fonte: Bohnen, H., comunicação pessoal.

A absorção excessiva de ferro pode causar toxidez na planta de soja, limitando seu crescimento (Foy et al., 1978), provocando os sintomas de amarelecimento foliar, clorose e morte de folhas novas (Barni, 1999). Plantas de soja cultivadas sob inundações em solos hidromórficos apresentam altos teores de ferro nas folhas, chegando a valores entre 0,8 e 3,0 g de Fe/ kg de matéria seca (Barni, 1999; Pires et al., 2002). Porém, existe diferença na suscetibilidade a toxidez por ferro entre cultivares de soja (Foy et al., 1978).

Para o excesso de absorção de ferro, em plantas sob inundações, são mencionados quatro mecanismos de tolerância: 1. restrição da absorção pela capacidade da planta oxigenar o sistema radicular atra-

vés de aerênquima, oxidando Fe^{+2} a Fe^{+3} na superfície das raízes, com consequente precipitação do Fe^{+3} sobre elas (Foy et al., 1978; Hendry & Brocklebank, 1985; Marschener, 1995), ou restrição à entrada através da membrana plasmática das células das raízes (Hall, 2002); 2. a absorção de Fe^{+2} induz a produção do radical O_2^- (superóxido) nas raízes, aumentando a atividade da superóxido dismutase que cataliza a síntese de H_2O_2 ($\text{O}_2^- + \text{O}_2^- + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}_2$). Com o acúmulo transitório de H_2O_2 nas raízes e a presença de ferro livre, pode haver a formação de radicais hidroxilas ($\text{Fe}^{+2} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{Fe}^{+3} + \text{OH} + \text{OH}$), que causam peroxidação de lipídios, inativação de membranas de proteínas, perda da integridade e morte celular. Em espécies e/ou genótipos tolerantes, além do aumento da atividade da superóxido dismutase, ocorre a indução da síntese da peroxidase que converte H_2O_2 em H_2O , sendo que esse mecanismo pode tornar-se ineficaz 36-48 horas após sua indução (Hendry & Brocklebank, 1985); 3. absorção com compartimentalização do ferro em espaços apoplásticos e vacúolos; e 4. também uma classe de proteínas, as ferritinas, atuam no tamponamento do ferro dentro da célula. Cada molécula de ferritina da soja pode armazenar de 800 a 2700 átomos de ferro numa forma solúvel, não tóxica e prontamente disponível à célula. Portanto, o conteúdo de ferro no tecido vegetal (Tabela 5) é um parâmetro impreciso para avaliar o efeito tóxico desse elemento sobre o tecido vegetal. As ferritinas acumulam-se nos cloroplastos e plastídios não verdes (proplastídeos, etioplastos e amiloplastos), sendo encontradas em tecidos da parte aérea, ápice radicular, sementes e nódulos (Sczekan & Joshi, 1987; Lobréaux & Briat, 1991; Ragland & Theil, 1993; Guerinot & Yi, 1994; Briat & Lobréaux, 1997; Clemens et al., 2002). A tolerância de um genótipo à toxicidade por ferro e a tolerância à inundação do solo estão correlacionadas, sendo a susceptibilidade à toxidez por ferro influenciada pelos estádios de desenvolvimento e nutricional da planta (Foy et al., 1978).

Em muitos solos aeróbicos, o nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+) são as fontes predominantes de N disponíveis às plantas. Entretanto, com o alagamento o NO_3^- é rapidamente convertido em NH_4^+ (Tabela 4). Normalmente, a maioria das espécies apresenta melhor desenvolvimento quando supridas com NH_4^+ e NO_3^- . Entretanto, poucas espécies apresentam desenvolvimento satisfatório quando o NH_4^+ é a única ou a predominante fonte de N, e muitas desenvolvem sintomas de

toxidez quando crescem em níveis de NH_4^+ moderados para altos (Howitt & Udvardi, 2000; Wirén et al., 2000; Britto et al., 2001).

A inundação de um solo de várzea (Gleissolo) demonstra que, após 7 dias de inundação, a concentração de NH_4^+ na solução do solo atinge 3,6 mg/L e 6,5 mg/L com 10 dias de inundação, perfazendo entre 3,2 e 5,8 mM de N (Tabela 4). Em plantas de soja com sistema radicular inundado, essas concentrações de N supridas com NH_4^+ reduzem o desenvolvimento da planta de soja a partir de 5 dias de inundação do sistema radicular, afetando a estatura, a área foliar, a matéria seca das raízes e da parte aérea, quando comparada com planta com sistema radicular inundado com solução nutritiva contendo NO_3^- ou com planta não inundada fixando N_2 (Thomas, 2004; Thomas & Sodek, 2005). Muitas hipóteses têm sido formuladas para explicar a toxidez do NH_4^+ às plantas, mas nenhuma delas é considerada satisfatória (Wirén et al., 2000; Britto et al., 2001).

O aumento na concentração de manganês na solução do solo (Tabela 4) com a inundação pode provocar toxidez às plantas de soja. Os sintomas de toxidez caracterizam-se pelo aparecimento de pontuações castanhas nas folhas, seguida de deformações e necrose. Entretanto o nível tóxico de Mn nas folhas de soja é característico de cada genótipo, sendo valores entre 140 e 300 mg de Mn / Kg de matéria seca de folhas relatados como tóxicos ao desenvolvimento das plantas (Carter et al., 1975; Foy et al.; 1978; Heenan & Campbell, 1980; Ohki et al., 1980; Rosolem et al., 1992).

Havendo baixas concentrações de oxigênio no solo, a presença de NH_4^+ como fonte predominante de nitrogênio poderá potencializar a absorção de Na^+ pelas plantas de algumas cultivares de soja, provavelmente por provocar a despolarização da membrana plasmática das raízes (Speer et al., 1994; Loque & Wirén, 2004; Figueira & Caldeira, 2005). Existe diferença entre cultivares de soja quanto a tolerância à salinidade (El-Samad & Shaddad, 1997; Inanaga et al., 2001), talvez isso explique o alto teor de Na^+ nas folhas de um genótipo que apresentou baixo rendimento de grãos, enquanto em outros dois genótipos o teor de Na^+ nas folhas foi bem menor, e o rendimento de grãos foi maior sob as mesmas condições de inundação (Tabela 5).

Tabela 5. Teor de nitrogênio (N), potássio (K), ferro (Fe), manganês (Mn) e sódio (Na) nas folhas de três genótipos de soja com 6 a 7 folhas trifolioladas desenvolvidas (V6-7) após inundação de 7 dias, e rendimento de grãos com inundação de 7 dias em V6-7 e no enchimento de grãos, em solo de várzea (Gleissolo).

Genótipo	Nutrientes nas folhas					Rendimento de grãos
	N	K	Fe	Mn	Na	
%.....	 mg/kg.....			kg/ha
1	2,6	1,1	2500	152	698	840
2	2,0	1,2	2100	178	67	1310
3	1,7	1,0	6800	92	58	2064
4	2,1	0,8	1900	95	93	2600

Fonte: Thomas, A.L., dados não publicados.

2.3. Efeito do excesso hídrico sobre o desenvolvimento da planta e do potencial de rendimento de grãos

O estabelecimento da densidade adequada de plantas em lavoura de soja é essencial para se obter altos rendimentos de grãos, entretanto isso pode ser problemático em solos de várzea que apresentam drenagem deficiente. A ocorrência de chuvas pesadas, que saturam o solo no período de germinação das sementes e emergência das plântulas, diminui a população inicial de plantas. O processo de germinação de uma semente de soja requer que o solo apresente teores adequados de umidade, de temperatura e de oxigênio para que ocorra a utilização das reservas presentes nos cotilédones. A falta de oxigênio no solo diminui ou inibe a respiração da semente de soja, que passa a ter metabolismo anaeróbico (fermentação) e por consequência menor disponibilidade de energia para emergir, ficando também mais suscetível ao ataque de doenças de solo. A formação de crosta superficial em solo com preparo convencional, após uma chuva pesada, pode ser um obstáculo a mais à emergência das plântulas. Em função disso, ocorre grande morte de sementes, tornando o estágio de semeadura-emergência extremamente sensível ao excesso de umidade no solo (Hou & Thseng, 1991; Wuebker et al., 2001).

A inundação do solo prejudica o desenvolvimento da planta de soja porque altera a absorção de nutrientes, diminui o crescimento radicular, inibe/diminui a fixação biológica de nitrogênio,

diminui a fotossíntese, diminui a taxa de expansão celular e, conseqüentemente, a taxa de crescimento da cultura (Sallam & Scott, 1987; Linkemer et al., 1998; Riche, 2004). Entretanto, a soja pode ser considerada uma espécie mais tolerante ao excesso hídrico e à falta de O₂ no solo do que o esperado (Sallam & Scott, 1987; Russel et al., 1990; Boru et al., 2003).

A inundaçãõ do sistema radicular e de parte do caule da planta de soja faz com que ocorra interconexãõ de aerênquima entre o segmento do caule submerso e a raiz principal, entre a raiz principal e as raízes laterais mais superficiais, e entre as raízes laterais mais superficiais e os nódulos a partir de 5 dias de inundaçãõ. Além do que, no segmento do caule submerso ocorre o desenvolvimento de raízes adventícias com aerênquima a partir do segundo dia de inundaçãõ. Isso faz com que a planta de soja apresente capacidade de tolerar o excesso de umidade no solo (Barni & Costa, 1976; Vantoai et al., 1994; Bacanamwo & Purcell, 1999a; Pires et al., 2002; Shimamura et al.; 2003; Thomas et al., 2005), entretanto o custo energético dessas adaptações morfológicas reduz o desenvolvimento das plantas de soja (Tabela 6). Porém, tem-se observado que genótipos de soja com pouco aerênquima e poucas raízes adventícias apresentam maior tolerância ao excesso hídrico que genótipos com abundância de aerênquima e raízes adventícias (Figura 1), demonstrando que diferenças metabólicas também estãõ envolvidas no processo (Thomas, 2008).

Tabela 6. Área foliar, estatura do caule, comprimento da raiz principal, diâmetro e área da seçãõ do caule no nível do solo, e número de raízes adventícias em uma planta de soja de um genótipo tolerante (27) e outro suscetível (BRS 154) à inundaçãõ do sistema radicular, após 21 dias de inundaçãõ*.

Parâmetros avaliados na planta	Genótipos	
	Tolerante	Suscetível
Área foliar (cm ²)	107 a	32 b
Estatura do caule (cm)	11 a	5 b
Comprimento da raiz principal (cm)	10 a	5 b
Diâmetro do caule no nível do solo (mm)	5 b	8 a
Seçãõ do caule no nível do solo (mm ²)	20b	50a

*iniciou com plantas com 2 folhas trifolioladas.

Fonte: Thomas, 2008.



Figura 1. Genótipos de soja tolerante (esquerda) e suscetível (direita) após 21 dias de inundação do solo, iniciada com plantas com uma folha trifoliolada desenvolvida.

A fixação biológica de N_2 é fortemente inibida com a inundação das raízes da planta de soja, pois os nódulos precisam de O_2 para manter a respiração aeróbica, sendo essa necessária para suprir a grande quantidade de ATP à atividade da nitrogenase (Loureiro et al., 1988). Após uma hora de inundação, a quantidade de ureídeos (compostos nitrogenados produzidos na fixação biológica de N_2) na seiva do xilema de plantas de soja é reduzida em 65% e em 90% após 4 h de inundação, permanecendo nesse nível até 5 dias de inundação das raízes. A partir daí ocorre a recuperação lenta da fixação biológica (Thomas, 2004). A adaptação da planta de soja à inundação, através do desenvolvimento de aerênquima e raízes adventícias, faz com que ocorra a recuperação da fixação biológica de N_2 (Bacanamwo & Purcell, 1999a,b; Thomas et al., 2005). O tempo de recuperação depende do estágio de desenvolvimento das plantas; foi alcançado 14 dias após a inundação das raízes de plantas com 5-6 folhas trifolioladas desenvolvidas e 10 dias após a inundação das raízes de plantas no florescimento com 10-12 folhas trifolioladas desenvolvidas. Entretanto as plantas tiveram seu desenvolvimento reduzido e apresentaram-se cloróticas

(Thomas, 2004). A recuperação mais rápida da fixação biológica em plantas mais desenvolvidas ocorre porque o maior acúmulo de reservas permite manter a glicólise (produz energia) e o metabolismo durante o período de estresse (Drew, 1977; Perata et al., 1992). Convém salientar que esses resultados foram obtidos somente com a deficiência de O_2 , não havendo interferência de nutrientes que têm sua disponibilidade elevada com a inundação e podem alcançar níveis que prejudiquem a nodulação. Entretanto, em condições de solo inundado, foi observado que os nódulos de soja permanecem ativos após 30 dias de submersão do sistema radicular, e logo após a drenagem ocorre a recuperação da fixação biológica de N_2 (Scholles & Vargas, 2004).

O excesso de água no solo durante a fase vegetativa diminui o desenvolvimento das plantas de soja que apresentam menor número de nós com gemas que podem ser induzidas a florescer e, conseqüentemente, restringe o potencial de rendimento de grãos. Já durante a fase reprodutiva ocorre o aborto de flores, legumes e grãos pela menor disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio, e fotoassimilados. Entretanto, o percentual de diminuição no rendimento de grãos vai depender da tolerância do genótipo (Tabela 5) à inundação, do estágio de desenvolvimento das plantas em que ocorre o estresse e do período de duração da inundação (Tabela 7) (Barni & Costa, 1975; Scott et al., 1989; Linkemer et al., 1998; Schöffel et al., 2001; Sullivan et al., 2001).

Tabela 7. Efeito da inundação dos sistemas radiculares de plantas de soja sobre o rendimento de grãos em função do estágio de desenvolvimento da planta e do período de duração da inundação.

Estádio de início da inundação	Período (dias)	Rendimento de grãos (kg/ha)
Sem inundação	--	4088 a
Plantas com três folhas desenvolvidas	15	3758 b
Plantas com três folhas desenvolvidas	30	2444 d
Início do florescimento	15	3630 b
Início do florescimento	30	1407 e
Início do enchimento de grãos	15	3685 b
Início do enchimento de grãos	30	2956 c

Fonte: Adaptado de Barni & Costa, 1975.

2.4. Estratégias para minimizar os efeitos do excesso de água no solo sobre o potencial de rendimento de grãos

Apesar de haver poucas informações técnicas relativas aos efeitos do excesso de água no solo sobre o desenvolvimento e rendimento da planta de soja, algumas estratégias podem ser adotadas para amenizar as perdas de potencial de rendimento:

- a) Cultivar a soja em área sistematizada, porque facilita a drenagem do excesso de água em caso de chuvas pesadas, bem como facilita a irrigação por inundação em caso de seca.
- b) Fazer a semeadura da soja dentro da época preferencial indicada pela pesquisa. Isso deve ser observado porque o atraso da época de semeadura restringe o crescimento vegetativo das plantas de soja e, adicionando o risco de ocorrer excesso de umidade no solo, o potencial de rendimento de grãos poderá ser drasticamente reduzido.
- c) Buscar informações técnicas dos genótipos que mais se adaptam ao excesso de umidade no solo da região.

3. Referências

- AHSLEY, D.A.; ETHRIDGE, W.J. Irrigations effects on vegetative and reproductive development of three soybean cultivars. *Agronomy Journal, Madison*, v.70, p.467-471, 1978.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology and Plant Molecular Biology*, v.55, p.373-399, 2004.
- BACANAMWO, M.; PURCELL, L.C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. *Journal of Experimental Botany*, v.50, p.689-696, 1999b.
- _____. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. *Crop Science*, v.39, p.143-149, 1999a.
- BARLOW, E.W.R. Water relations of the mature leaf. In: Dale, J .E.; Milthorpe, F.L. (ed.). *The growth and functioning of leaves*. New York, Cambridge University Press, 1983. 540p.

- BARNI, N.A. Efeito do período de inundação do solo na absorção de nutrientes, uso da água e crescimento da planta de soja. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.5, p.7-18, 1999.
- BARNI, N.A.; COSTA, J.A. Efeito de períodos de inundação do solo sobre o rendimento de grãos da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agronomia Sulriograndense*, Porto Alegre, v.11, p.207-222, 1975.
- BARNI, N.A.; COSTA, J.A. Efeito de períodos de inundação do solo sobre o crescimento e características morfológicas da planta de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agronomia Sulriograndense*, Porto Alegre, v.12, p.163-172, 1976.
- BARNI, N.A.; KOLLING, J.; MINOR, H.C. Efeitos de níveis de nitrogênio sobre o rendimento de grãos, nodulação e características agronômicas da soja (*Glycine max* (L) Merr.). *Agronomia Sulriograndense*, v.13, p.93-104, 1977.
- BEGG, J.E.; TURNER, N.C. Crop water deficits. *Advances in Agronomy*, v.28, p.161-217, 1976.
- BERGENSEN, F.J. The bacterial component of soybean root nodules: changes in respiratory activity, dry cell weight and nucleic acid content with increasing nodule age. *Journal of General Microbiology*, v.19, p.312-323, 1958.
- BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Consumo de Água da soja. I. Evapotranspiração estacional em condições ótimas de disponibilidade de água no solo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1., Londrina-PR, 1978. *Anais...* Londrina, CNPSo/EMBRAPA, 1979, v.1, p.53-59.
- BOARD, J.E.; MODALI, H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crop Science*, v.45, p.1790-1799, 2005.
- BOERMA, H.R.; ASHLEY, D.A. Irrigation, row spacing, and genotype effects on late and ultra-late planted soybeans. *Agronomy Journal*, v.74, p.995-999, 1982.
- BORU, G.; VANTOAI, T.; ALVES, J.; HUA, D.; KNEE, M. Responses of soybean to oxygen deficiency and elevated root-zone carbon dioxide concentration. *Annals of Botany*, v. 91, p.447-453, 2003.
- BOYER, J.S. Subcellular mechanisms of plant response to low water potential. *Agricultural Water Management*, v.7, p.239-248, 1983.
- _____. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiology*, v.46, p.233-235, 1970.
- BREVADAN, R.E. EGLI, D.B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Science*, v. 43, p.2083-2088, 2003.

- BREVADAN, R.E. EGLI, D.B.; LEGGET, J.E. Influence of N nutrition on flower and pod abortion and yield of soybeans. *Agronomy Journal*, v.70, p.81-84, 1978.
- BRIAT, J.-F.; LOBRÉAUX, S. Iron transport and storage in plants. *Trends in Plant Science*, v. 2, p.187-193, 1997.
- BRITTO, D.T.; SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M.; KRONZUCKER, H.J. Futile transmembrane NH_4^+ cycling: A cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. *Proceedings of the National Academy of Science of USA*, v.98, p.4255-4258, 2001.
- CARELLI, M.L.C. Efeitos de reservas cotiledonares no desenvolvimento de plântulas. In: MIYASAKA, S; MEDINA, J.C. (ed.). *A soja no Brasil*. Campinas: ITAL, 1981. p.145-149.
- CARTER, O.G.; ROSE, I.A.; READING, P.F. Variation in susceptibility to manganese toxicity in 30 soybean genotypes. *Crop Science*, v.15, p.730-732, 1975.
- CATTELAN, A.J.; HUNGRIA, M. Nitrogen nutrition and inoculation. In: *Tropical Soybean – Improvement and production*. Rome: FAO, 1994. p.201-215.
- CHANEY, R.L.; BROWN, J.C.; TIFFIN, L.O. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. *Plant Physiology*, v.50, p.208-213, 1972.
- CLEMENS, S.; PALMGREN, M.G.; KRÄMER, U. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, v.7, p.309-315, 2002.
- COSTA, J.A. Mapeamento de plantas: uma opção de manejo para altos rendimentos de soja. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 21., 1993. Santa Rosa. *Ata e resumos...* Porto Alegre: CIENTEC, IPAGRO, 1993. p.192.
- CUNHA, G. R. DA; MALUF, J. R. T.; HAAS, J. C.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M. *Mapeamento de riscos de deficiência hídrica para soja no Rio Grande do Sul*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 23 p. html (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 8). Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_bp08.htm
- CUNHA, G.R.; HAAS, J.C., DALMAGO, G.A. et al. *Cartas de perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. 52p. (Boletim de pesquisa, 1).
- CURE, J.D.; RAPER JR., C.D.; PATTERSON, R.P.; ROBARGE, W.P. Dinitrogen fixation in soybean in response to leaf water stress and seed growth rate. *Crop Science*, v.25, p.52-58, 1985.

- DESCLAUX, D; HUYNH, T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Science*, v.40, p.716-722, 2000.
- DJEKOUN, A; PLANCHON, C. Water status effect of dinitrogen fixation and photosynthesis in soybean. *Agronomy Journal*, v.83, p.316-322, 1991.
- DREW, M.C. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v.48, p.223-250, 1997.
- EGLI, D.B.; MECKEL, L.; PHILLIPS, R.E., RADCLIFFE, D.; LEGGETT, J.E. Moisture stress and N redistribution in soybean. *Agronomy Journal*, v.75, p.1027-1031, 1983.
- EL-SAMAD, A.; SHADDAD, M.A.K. Salt tolerance of soybean cultivars. *Biologia Plantarum*, v.39, p.263-269, 1997.
- EVANS, L.T. *Crop evolution, adaptation and yield*. Cambridge: University Press, 1996. 500p.
- EVANS, L.T.; FISCHER, R.A. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, v. 39, p.1544-1551, 1999.
- FERREIRA, F.G; PIRES, J.L.F.; MENEZES, V.G. Avaliação de cultivares de soja na várzea. In: Reunião de pesquisa da soja da região sul, 28, 2000, Santa Maria. *Resumos...* 2000. p.159.
- FIGUEIRA, E.M.A.P.; CALDEIRA, G.C.N. Effect of nitrogen nutrition on salt tolerance of *Pisum sativum* during vegetative growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v.168, p.359-363, 2005.
- FINN, G.A.; BRUN, W.A. Water stress effect on CO₂ assimilation, photosynthate partitioning, stomatal resistance, and nodule activity in soybean. *Crop Science*, v.20, p.431-435, 1980.
- FOX, T.C.; GUERINOT, M.L. Molecular biology of cations transport in plants. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v.49, p.669-696, 1998.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 29, p.511-566, 1978.
- FRANCO, A.A.; FONSECA, O.O.M.; MARRIEL, I.E. Efeito do nitrogênio mineral na atividade da nitrogenase e nitrato-redutase, durante o ciclo da soja no campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.2, p.110-114, 1978.
- GUERINOT, M.L.; YI, Y. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available. *Plant Physiology*, v.104, p.815-820, 1994.

- HALL, J.L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, v.53, p.1-11, 2002.
- HANSEN, W.R.; SHIBLES, R. Seasonal log of the flowering and podding activity of field-grown soybean. *Agronomy Journal*, v.70, p.47-50, 1978.
- HANSON, A.D.; HITZ, W.D. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Annual Review of Plant Physiology*, v.33, p.163-203, 1982.
- HANWAY, J.J. Interrelated developmental and biochemical processes in the growth of soybean plants. In: Hill, L.D. (ed.). *World soybean research*. Danville: The Interstate Printers & Publishers, Inc., 1976. p.5-15.
- HEENAN, D.P.; CAMPBELL, L.C. Growth, yield components and seed composition of two soybean cultivars affected by manganese supply. *Australian Journal of Agricultural Research*, v.31, p.471-476, 1980.
- HENDRY, G.A.F.; BROCKLEBANK, K.J. Iron-induced oxygen radical metabolism in waterlogged plants. *New Phytologist*, v.101, p.199-206, 1985.
- HOU, F.F.; THSENG, F.S. Studies on the flooding tolerance of soybean seed: varietal differences. *Euphytica*, v.57, p.169-173, 1991.
- HOWITT, S.M.; UDVARDI, M.K. Structure, function and regulation of ammonium transporters in plants. *Biochimica and Biophysica Acta*, v.1465, p.152-170, 2000.
- HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; GRAHAM, P. H. The importance of nitrogen fixation to the soybean cropping system in South America. In: *Nitrogen fixation research: Agriculture, Forestry, Ecology and the environment*. D. Werner (Ed.). Springer, 2005a. 347p.
- HUNGRIA, M., LOUREIRO, M.F., MENDES, I.C., CAMPO, R.J.; GRAHAM, P.H. Inoculant preparation, production and application. In: *Nitrogen fixation research: Agriculture, Forestry, Ecology and the environment*. D.Werner (Ed.) Springer, 2005b. 347p.
- INANAGA, P.NA.; KAFKAFI, U.; LUX, A; SUGIMOTO, Y. Different effect of humidity on growth and salt tolerance of two soybeans cultivars. *Biologia Plantarum*, v.44, p.405-410, 2001.
- KING, C.A.; PURCELL, L.C. Inhibition of N₂ fixation in soybean is associated with elevated ureides and amino acids. *Plant Physiology*, v.137, p.1389-1396, 2005.
- KORTE, L.L.; SPECHT, J.E.; WILLIAMS, J.H.; SORENSEN, R.C. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny. I I. Yield component responses. *Agronomy Journal*, v. 23, p.528-533, 1983a.

- KORTE, L.L.; WILLIAMS, J.H.; SPECHT, J.E.; SORENSEN, R.C. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny. I. Agronomic responses. *Crop Science*, v.23, p.521-527, 1983b.
- LIESACK, W.; SCHNELL, S.; REVSBECH, N.P. Microbiology of flooded rice paddies. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 24, p.625-645, 2000.
- LINKEMER, G.; BOARD, J.E.; MUSGRAVE, M.E. Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. **Crop Science**, v.38, p.1576-1584, 1998.
- LOBRÉAUX, S.; BRIAT, J-F. Ferritin accumulation and degradation in different organs of pea (*Pisum sativum*) during development. *Biochemical Journal*, v.274, p.601-606, 1991.
- LOQUÉ, D.; WIRÉN, N. VON. Regulatory levels for the transport of ammonium in plant roots. *Journal of Experimental Botany*, v.55, p.1293-1305, 2004.
- LOUREIRO, M.F.; JAMES, E.K.; FRANCO, A.A. Nitrogen fixation by legumes in flooded regions. IN: *Ecophysiological strategies of xerophytic and amphibious plants in the neotropics* (F.R. Scarano and A.C. Franco), Series Oecologia Brasiliensis, vol. IV, PPGE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 1988. p.195-233.
- LUDLOW, M.M.; MUCHOW, R.C. A critical evaluation of traits for improving crop yield in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, v.43, p.107-153, 1990.
- MACHADO, E.C. Disponibilidade de água como fator de crescimento da planta. In: MIYASAKA, S; MEDINA, J.C. (ed.). *A soja no Brasil*. Campinas: ITAL, 1981. p.153-156.
- MAEHLER, A.R. *Crescimento e rendimento de duas cultivares de soja em resposta ao arranjo de plantas e regime hídrico*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, 2000. 107p.
- MAEHLER, A.R.; PIRES, J.L.F.; COSTA, J.A.; FERREIRA, F.G. Potencial de rendimento da soja durante a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.38, p.225-231, 2003.
- MANAVALAN, L.P.; GUTTIKONDA, S.K.; TRAN, L.P.; NGUYEN, H.T. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant & Cell Physiology*, v.50, p.1260-1276, 2009.
- MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. San Diego: Academic Press, 1995. 889p.

- MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consume relativo de água para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, v.33, p.1013-1019, 2003.
- MITTLER, R.; VANDERAUWERA, S.; GOLLERY, M.; BREUSEGEM, F.V. Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, v.9, p.490-498, 2004.
- MOMEN, N.N.; CARLSON, R.E.; SHAW, R.H.; ARJMAND, O. Moisture stress effects on the yield components of two soybean cultivars. *Agronomy Journal*, v.76, p.86-90, 1979.
- MORGAN, J.M. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, v.35, p.299-319, 1984.
- MORI, S. Iron acquisition by plants. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 2, p.250-253, 1999.
- MOTA, F.S. DA. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: VERNETTI, F. de J. (Coord.) *Soja*. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 463p.
- MULLER, L. Fixação simbiótica do nitrogênio. In: MIYASAKA, S; MEDINA, J.C. (ed.). *A soja no Brasil*. Campinas: ITAL, 1981b. p.401-414.
- _____. Morfologia, anatomia e desenvolvimento. In: MIYASAKA, S; MEDINA, J.C. (ed.). *A soja no Brasil*. ITAL, Campinas: ITAL, 1981a. p.73-108.
- NAVARRO JR., H.M.N.; COSTA, J.A. Expressão do potencial de rendimento de cultivares de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.275-279, 2002.
- OHKI, K.; WILSON, D.O.; ANDERSON, O.E. Manganese deficiency and toxicity sensitivities of soybean cultivars. *Agronomy Journal*, v.72, p.713-716, 1980.
- PAULETTO, E.A.; SOUSA, R.O.; GOMES, A.S. Caracterização e manejo de solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: *Produção de arroz irrigado*. Peske, S.T., Nedel, J.L., Barros, A.C.S.A. (ed.). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 1998. 659p.
- PERATA, P.; POZUETA-ROMERO, J.; AKAZAWA, T.; YAMAGUCHI, J. Effect of anoxia on starch breakdown in rice and wheat seeds. *Planta*, v.188, p.611-618, 1992.
- PIRES, J.L.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfo-fisiológicas da soja em solo inundado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, p.41-50, 2002.
- PURCELL, L.C.; KING, C.A. Drought and nitrogen source effects on nitrogen nutrition, seed growth, and yield in soybean. *Journal of Plant Nutrition*, v.19, p.969-993, 1996.

- PURCELL, L.C.; SERRAJ, R.; SINCLAIR, T.R.; DE, A. Soybean N₂ fixation estimates, ureide concentration, and yield responses to drought. *Crop Science*, v.44, p.484-492, 2004.
- RAGLAND, M.; THEIL, E.C. Ferritin (mRNA, protein) and iron concentration during soybean nodule development. *Plant Molecular Biology*, v.21, p.555-560, 1993.
- RAMSEUR, E.L.; QUISENBERRY, V.L.; WALLACE, S.U.; PALMER, J.H. Yield and yield components of Braxton soybeans as influenced by irrigation and intrarow spacing. *Agronomy Journal*, v.76, p.442-446, 1984.
- RICHE, C.J. Identification of soybean cultivars tolerance to waterlogging through analyses of leaf nitrogen concentration. Louisiana State University, Department of Agronomy. Thesis, 36 p.
- ROSOLEM, C.A.; BESSA, M.A.; AMARAL, P.G. DO, PEREIRA, H.F.M. Manganês no solo, sua avaliação e toxidez de manganês em soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.27, p.277-285, 1992.
- RUSSELL, D.A.; WONG, D.M.L.; SACHS, M.M. The anaerobic response of soybean. *Plant Physiology*, v. 92, p.401-407, 1990.
- SADRAS, V.O.; CONNER, D.J. Physiological basis of the response of harvest index to the fraction of water transpired after anthesis: A simple model to estimate harvest index for determinate species. *Field Crops Research*, v.26, p.227-240, 1991.
- SALL, K.; SINCLAIR, T.R. Soybean genotypic differences in sensitivity of symbiotic nitrogen fixation to soil dehydration. *Plant and Soil*, v.133, p.p.31-37, 1991.
- SALLAM, A.; SCOTT, H.D. Effects of prolonged flooding on soybeans during early vegetative growth. *Soil Science*, v.144, p.61-66, 1987.
- SCHÖFFEL, E.R.; SACCOL, A.V.; MANFRON, P.A.; Medeiros, S.L.P. Excesso hídrico sobre os componentes do rendimento da cultura da soja. *Ciência Rural*, v.31, p.7-12, 2001.
- SCHOLLES, D.; VARGAS, L.K. Viabilidade da inoculação de soja com estirpes de *Bradyrhizobium* em solo inundado. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v.28, p.973-979, 2004.
- SCOTT, H.D.; BATCHELOR, J.T. Dry weight and leaf area production rates of irrigated determinated soybeans. *Agronomy Journal*, v.71, p.776-781, 1979.
- SCOTT, H.D.; DEANGULO, J.; DANIELS; WOOD, L.S. Flood duration effects on sybean growth an yield. *Agronomy Journal*, v.81, p.631-636, 1989.

SCZEKAN, S.R.; JOSHI, J.G. Isolation and characterization of ferritin from soybeans (*Glycine max*). *Journal of Biological Chemistry*, v.262, p.13780-13786, 1987.

SERRAJ, R.; SINCLAIR, T.R.; PURCELL, L.C. Symbiotic N₂ fixation response to drought. *Journal of Experimental Botany*, v.50, p.143-155, 1999.

SHIMAMURA, S.; MOCHIZUKI, T.; NADA, Y; FUKUYAMA, M. Formation and function of secondary aerenchyma in hypocotyl, roots and nodules of soybean (*Glycine max*) under flooded conditions. *Plant and Soil*, v.251, p.351-359, 2003.

SILVIUS, J.E.; JOHNSON, R.R.; PETERS, D.B. Effects of water stress on carbon assimilation and distribution in soybeans plants at different stages of development. *Crop Science*, 17:713-716, 1977.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C.; BENNETT, J.M.; HAMMOND, L.C. Relative sensitivity of nitrogen and biomass accumulation to drought in field-grown soybean. *Agronomy Journal*, v.79, p.986-991, 1987.

SINCLAIR, T.R.; PURCELL, L.C.; VADEZ, V. SERRAJ, R. KING, C.A.; NELSON, R. Identification of soybean with N₂ fixation tolerance to water deficits. *Crop Science*, v.40, p.1803-1809, 2000.

SIONIT, N.; KRAMER, P.J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agronomy Journal*, v.69, p.274-278, 1977.

SOUSA, R.O.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S. *Alternativas de sistemas de cultivo para o arroz irrigado: O caso da região sul do Brasil*. Apostila, UFPel, 1995. 20p.

SOUSA, S.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. Solos Alagados. In: *Fundamentos de química de solo*. MEURER, E.J.(ed.). Gênese, Porto Alegre-RS, 2000. 174p.

SPEER, M.; BRUNE, A.; KAISER, W.M. Replacement of nitrate by ammonium as the nitrogen source increases the salt sensitivity of pea plants. I. Ion concentrations in root and leaves. *Plant Cell and Environment*, v.17, p.1215-1221, 1994.

SULLIVAN, M.; VANTOAI, T.; FAUSEY, N.; BEUERLEIN, J.; PARKINSON, R.; SOBOYEJO, A. Evaluating on-farm flooding impacts on soybean. *Crop Science*, v.41, p.93-100, 2001.

SULLIVAN, T.P.; BRUN, W.A. Effects of root genotype on shoot water relations in soybean. *Crop Science*, v.15, p.319-322, 1975.

THOMAS, A.L. *Modificações morfológicas e assimilação de nitrogênio em plantas de soja (*Glycine max*) com sistemas radiculares sob deficiência de O₂*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004, tese de doutorado. 76p.

- THOMAS, A.L. Modificações morfológicas na planta de soja como indicadoras da tolerância à inundação. In: REUNIÃO DA PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 36., 2008, Porto Alegre. *Ata e resumos...* Porto Alegre: Fepagro, 2008. p.75.
- THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.29, p.1389-1396, 1994.
- THOMAS, A.L.; GUERREIRO, S.M.C.; SODEK, L. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the root system of nodulated soybean. *Annals of Botany*, v.96, p.1191-1198, 2005.
- THOMAS, A.L.; PIRES, J.L.F.; MENEZES, V.G. Rendimento de gr os de cultivares de soja na várzea. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*. Porto Alegre, v.6, p.107-112, 2000.
- THOMAS, A.L.; SODEK, L. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.17, p.291-297, 2005.
- TODD, C.D.; TIPTON, P.A.; BLEVINS, D.G.; PIEDRAS, P.; PINEDA, M; POLACCO, J.C. Update on ureide degradation in legumes. *Journal of Experimental Botany*, v.57, p.5-12, 2006.
- VANTOAI, T.T.; BEUERLEIN, J.E.; SCHMITTHENNER, A.F.; MARTIN, S.K.ST. Genetic variability for flooding tolerance in soybean. *Crop Science*, v.34, p.1112-1115, 1994.
- WEBER, C.R. Nodulating and nonnodulating soybean isolines: I. Agronomic and chemical attributes. *Agronomy Journal*, v.58, p.43-46, 1966.
- WELLS, R. Soybean growth response to plant density: relationships among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. *Crop Science*, v.31, p.755-761, 1991.
- WESTGATE, M.E.; GRANT, D.T. Effect of water deficits on seed development in soybean. I. Tissue water status. *Plant Physiology*, v.91, p.975-979, 1989.
- WESTGATE, M.E.; SCHUSSLER, J.R.; REICOSKY, D.C.; BRENNER, M.L. Effect of water deficits on seed development in soybean. 11. Conservation of seed growth rate. *Plant Physiology*, v.91, p.980-985, 1989.
- WIR N, N. VON; GAZZARRINI, S.; GOJON, A; FROMMER, W.B. The molecular physiology of ammonium uptake and retrieval. *Current Opinion in Plant Physiology*, v.3, p.254-261, 2000.
- WUEBKER, E.F.; MULLEN, R.E.; KOEHLER, K. Flooding and temperature effects on soybean germination. *Crop Science*, v.41, p.1857-1861, 2001.

Agricultura de precisão aplicada ao manejo do solo na cultura da soja

Telmo J. C. Amado¹ & Antônio L. Santi²

1. Introdução

O manejo conservacionista do solo é a base de sustentação dos sistemas agrícolas. A insustentabilidade do preparo convencional estimulou os agricultores a adotarem o sistema plantio direto. O avanço tecnológico vivenciado a partir da década de 80 tem subsidiado o aprimoramento do manejo do solo. Introduzido inicialmente como alternativa de controle da erosão, esse sistema foi sendo gradualmente adaptado para as condições tropicais. Parte do sucesso dessa estratégia de manejo, adotada no Sul do Brasil, pode ser atribuída à inovação dos agricultores pioneiros e ao suporte das instituições de pesquisa que estabeleceram os requisitos básicos de sua sustentação (rotação de culturas, manutenção permanente da cobertura do solo, incremento da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, estímulo da atividade biológica, entre outros).

Assim como o sistema plantio direto, outras tecnologias transformaram a agricultura brasileira nas últimas décadas. O melhoramento genético, ofertando cultivares adaptadas às zonas agroclimáticas no País, a biotecnologia, o gerenciamento da unidade de produção e a busca de eficiência em todos os processos dotaram de competitividade a agri-

¹ Eng^o Agr^o Dr. Professor Associado da UFSM, Coordenador Técnico do Projeto Aquarius. E-mail: tamado@smail.ufsm.br.

² Eng^o Agr^o Dr. Professor Adjunto do CESNORS – UFSM; E-mail: santi_pratica@yahoo.com.br

cultura, tornando-a capaz de se adaptar à globalização da economia e apta a competir no mercado internacional. Esse novo direcionamento dado na forma de produzir, visando também ao mercado internacional, e o uso de tecnologias modernas na agricultura, desencadearam mudanças no perfil do produtor rural, que se transformou em empresário agrícola. A indústria agrícola inicialmente procurou desenvolver tecnologicamente as máquinas adaptadas ao sistema plantio direto. Assim, as semeadoras foram preparadas para trabalhar com resíduos na superfície, os pulverizadores foram desenvolvidos para trabalhar com baixa vazão e as colhedoras tiveram aumentada a capacidade de armazenamento, limpeza e operacionalidade. Um novo marco no desenvolvimento da indústria de máquinas agrícolas é a utilização da eletrônica embarcada que permite o controle eficaz das operações, subsidiando o manejo localizado do solo.

Nesse cenário, a observação da variabilidade espacial das propriedades dos solos e seus efeitos no desenvolvimento e no rendimento das culturas passou a ser relevante. Coelho (2003) alertou que um agricultor que atualmente cultiva mil hectares com manejo tradicional e aplicação uniforme de insumos utiliza menos informações da variabilidade espacial do que dez agricultores que anteriormente cultivavam essa mesma área em lotes de cem hectares. Reverter essa situação de limitada disponibilidade de informações em lavouras comerciais é um desafio atual de agricultores, técnicos e pesquisadores. Para tanto, as novas ferramentas, como as tecnologias da agricultura de precisão, estão sendo incorporadas como meio de identificar e gerenciar a variabilidade de atributos de solo e de plantas na propriedade.

A agricultura de precisão se propõe a aumentar a eficiência da atividade primária, com base no manejo localizado, respeitando a variabilidade existente na área. Integra computação, eletrônica, organização de banco de dados, considerando a habilidade em monitorar e gerenciar a atividade agrícola em locais específicos da lavoura (Queiroz et al., 2000; Santi et al., 2009b). Através de análise detalhada dos campos de produção e do aprimoramento das técnicas de manejo, novos níveis de eficiência, qualitativos e quantitativos, da produção de culturas podem ser obtidos (Balastreire, 2000).

Este capítulo objetiva discutir como essas modernas ferramentas tecnológicas podem contribuir para o gerenciamento produtivo, conduzindo ao aprimoramento do manejo do solo na busca de altos rendi-

mentos na cultura da soja. Essa abordagem baseia-se nas experiências da pesquisa e nas práticas de campo, junto a produtores usuários da agricultura de precisão, em áreas de lavouras comerciais no Rio Grande do Sul e em outras regiões do Brasil. O capítulo ressalta estratégias e avaliações utilizadas no levantamento de atributos e sua utilização na definição, planejamento e gerenciamento dos recursos econômicos e ambientais.

2. Avaliações do potencial produtivo do solo

Entre as aplicações da agricultura de precisão, destacam-se a racionalização do uso de insumos, o controle eficaz dos fatores de produção, a preservação dos recursos naturais e a identificação de subáreas com limitações ou potencialidades para o incremento do rendimento.

A presença de unidades homogêneas (subáreas), com particularidades diferenciadas e específicas, deve-se a processos naturais e a ações antrópicas caracterizadas por processos contínuos de inter-relação entre o sistema solo e o ambiente ecológico (Sá, 2001). A análise da produtividade das culturas ao longo dos anos pode ser uma estratégia para a compreensão das possíveis causas determinantes da variabilidade do rendimento (Fraisse, 2003). O mapa de rendimento, quando disponível, é uma das alternativas mais simples para se estimar a heterogeneidade da área e, talvez, o ponto de partida preferencial para a prospecção da variabilidade espacial das lavouras e a definição de unidades de alta e baixa produtividade dentro da mesma lavoura (Molin, 2001). Por outro lado, a distribuição espacial dos principais atributos químicos usados na avaliação da fertilidade também pode ser uma alternativa para o estudo da variabilidade na produtividade (Lima & Silans, 1999; Viana, 2005).

Analisando o potencial produtivo da cultura da soja, Ventimiglia et al. (1999) observaram que a maior perda percentual de potencial de rendimento, motivada tanto pelo aborto de flores como pela perda de legumes, foi observada nas condições de baixo teor de fósforo no solo. Já Rosa Filho et al. (2009) reportaram que a densidade do solo também pode ser um indicador eficiente do potencial de produtividade da cultura. Assim, a integração de atributos químicos, físicos e biológicos do solo, combinada com as informações do mapa de rendimento, é a alternativa mais completa na investigação dessa variabilidade (Molin, 2002; Capelli, 2003; Kitchen et al., 2003).

Conhecer a heterogeneidade da produtividade e suas causas deve ser a base para a tomada de decisões de manejo localizado do solo sob agricultura de precisão, permitindo avaliar o êxito ou os insucessos das intervenções realizadas anteriormente, além de balizar as alterações de manejo nos anos subsequentes.

2.1. Mapeamento da produtividade das culturas

2.1.1. Ferramentas básicas para a coleta de dados

Estão disponíveis aos produtores, atualmente, colhedoras equipadas com monitores e atuadores capazes de auxiliar durante as operações de colheita, fornecendo informações básicas sobre nível de combustível, rotação de eixos, rotação do motor, sistema elétrico, perdas de grãos no conjunto de peneiras e saca-palha. Essas máquinas também congregam um conjunto de ferramentas, como sensores de rendimento, sensor de umidade, cartão para o armazenamento de dados e antena com Sistema de Posicionamento Global (GPS), que proporcionam o monitoramento, em tempo real, da produtividade e também o armazenamento de dados de colheita e dos níveis de perdas.

Os primeiros mapas de produtividade, gerados na década de 80, trouxeram novas perspectivas de análise das áreas produtivas. O conhecimento que muitos produtores e técnicos possuíam até então, em relação às áreas produtivas, era um valor médio de produtividade para um talhão ou mesmo para todos os talhões que perfaziam a propriedade. Neste caso, embora presente e percebida visualmente, a variabilidade na produtividade era negligenciada por não se dispor de instrumentos capazes de auxiliar em sua mensuração, espacialização e registro. As tecnologias embarcadas nas colhedoras permitiram aos usuários a opção de registro e armazenamento, em um determinado tempo, da posição da máquina no campo (latitude, longitude e altitude) e o respectivo rendimento (Figura 1).

É importante salientar que os dados coletados pelos sensores de produtividade podem apresentar, em sua forma bruta, alguns erros sistemáticos. Esses erros podem ser causados pelo não preenchimento completo da plataforma, ajuste incorreto no interruptor de plataforma (altura), tempo de enchimento da colhedora, posicionamento incorreto da colhedora, calibração de volume, entre outros. Esses erros

devem ser investigados e corrigidos antes da utilização dos mapas na agricultura de precisão (Blackmore & Marshall, 1996; Menegatti, 2002).

Os mapas de produtividade podem ser ferramentas úteis para estabelecer o potencial produtivo possível de ser atingido em cada lavoura. Eles permitem uma visão detalhada da propriedade e de cada talhão (Figura 2). “É a expressão do que realmente aconteceu ou está acontecendo na área”.

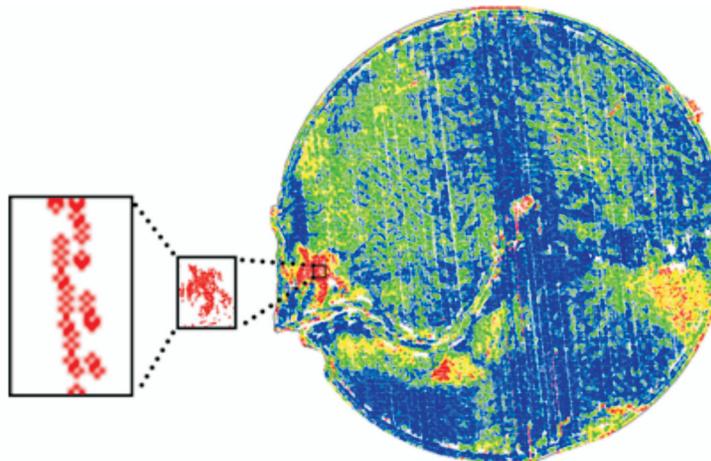


Figura 1. Exemplo de um mapa de colheita. No detalhe, frequência de pontos armazenados. Fonte: Santi, 2009. Dados não publicados.

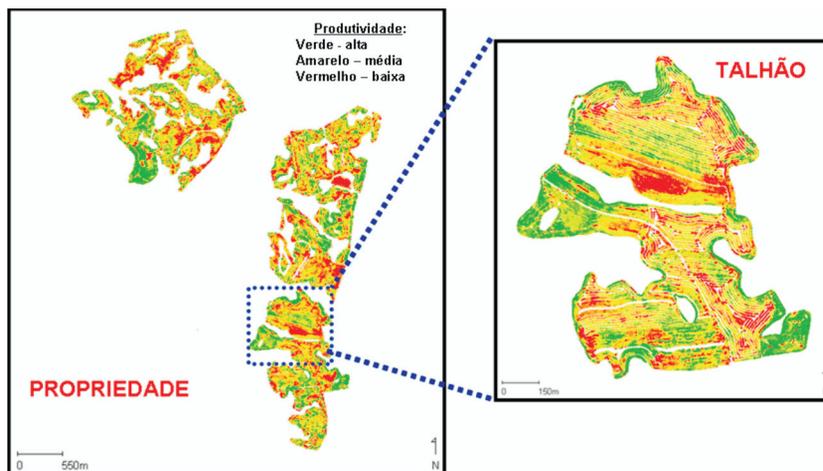


Figura 2. Mapeamento da produtividade em uma propriedade – detalhe de um talhão. Fonte: Santi, 2009. Dados não publicados.

2.1.2. Uso de marcadores durante a operação de colheita

A interpretação da variabilidade do rendimento requer o acompanhamento e a análise de mapas gerados por mais de uma safra para que se contemple a variabilidade temporal (Fraisse, 2003). Em muitas áreas produtoras, a variabilidade tem sua origem em questões básicas de manejo, como a desuniformidade na população inicial e final de plantas, controle ineficiente de plantas daninhas, ocorrência de pragas e doenças, problemas com o excesso de umidade do solo em decorrência da má drenagem, redução da espessura do horizonte A por erosão, perdas na colheita, entre outros.

Em áreas relativamente pequenas, o produtor tem maior conhecimento dessas variáveis, uma vez que, além de dispor de experiências acumuladas advindas de vários anos, também consegue retornar várias vezes ao mesmo local durante o ciclo da cultura e, por isto, conhecer espacialmente muitos desses problemas. Em áreas grandes ou quando novos talhões são incorporados ao processo produtivo, esse conhecimento torna-se limitado ou mesmo inexistente. Assim, novos mecanismos tecnológicos podem ser utilizados para a análise da variabilidade na área. A operação de colheita proporciona uma das melhores oportunidades de analisar detalhadamente todos os pontos do talhão. Pensando nisso, foram desenvolvidas ferramentas, disponibilizadas nos monitores das colhedoras, onde o operador pode registrar particularidades visualizadas na área, como, por exemplo, irregularidade na população de plantas, acamamento, infestação por plantas daninhas, fitotoxicidade, entre outras, ou ainda modificações a serem realizadas no talhão, como, por exemplo, a necessidade de construção de um “dreno” para minimizar as perdas no rendimento pelo excesso de umidade em anos úmidos (Figura 3). Essas ferramentas qualificam a interpretação do mapa de rendimento uma vez que elas evitam suposições equivocadas sobre a relação da variabilidade da produtividade com os atributos de solo.



Figura 3. Detalhe da configuração de um marcador “Dreno” em um monitor de colheita, à esquerda, e a vista da área caracterizada. Fonte: Material divulgação AGCO e fotos dos autores.

2.1.3. Variabilidade de rendimentos em lavouras do Rio Grande do Sul

Elevada variabilidade espacial da produtividade da soja, em áreas de lavouras comerciais no Rio Grande do Sul, tem sido registrada em áreas manejadas sob agricultura de precisão. Unidades de baixas e altas produtividades na mesma lavoura são evidenciadas em praticamente todos os municípios produtores.

No município de Não-Me-Toque, em uma área de 132 hectares, a produtividade da cultura da soja, na safra 2002/03, quando considerado um valor médio, foi de 51 sacas por hectare (3060 kg ha⁻¹). No entanto, a variabilidade de rendimento foi de 23 (1380 kg ha⁻¹) a 87 (5220 kg ha⁻¹) sacas por hectare (Figura 4).

Outro aspecto importante é que a variabilidade do rendimento tem se mostrado estruturada, justificando o manejo diferenciado. Por outro lado, se a variabilidade não apresentasse estrutura espacial, ou seja, se ela ocorresse ao acaso, em áreas muito pequenas, a melhor estimativa de qualquer parâmetro nessa área seria o valor médio ou a mediana, e a melhor maneira de manejá-la seria usando os conceitos da agricultura convencional, por meio de manejo uniforme (Coelho, 2003).

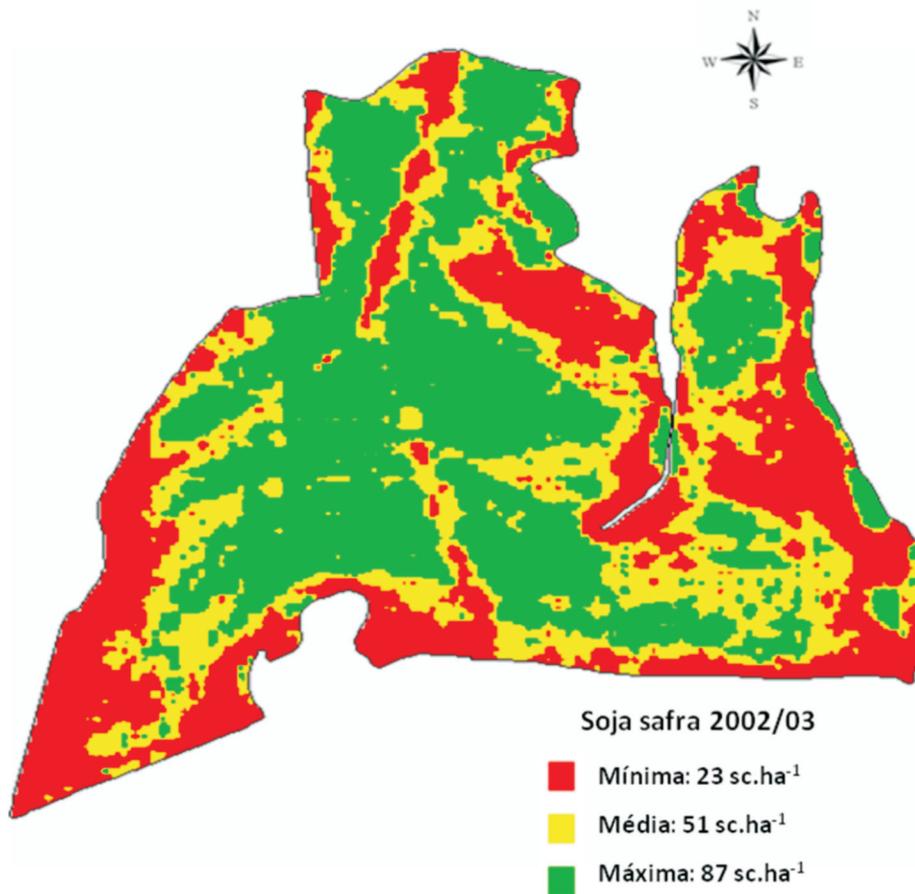


Figura 4. Produtividade de grãos da cultura da soja na safra 2002/03 com colheita georreferenciada, Não-Me-Toque, RS.
Fonte: Projeto Aquarius-Santi, 2007.

Quando se deseja trabalhar com mapas de produtividade, é importante ter uma base maior de mapas e, conseqüentemente, incrementar a confiabilidade da interpretação. Uma sugestão é que sejam considerados mapas de diferentes anos e de diferentes culturas, pois algumas culturas, como o milho, parecem ser mais eficientes em discriminar o potencial produtivo do solo do que a soja (Figura 5).

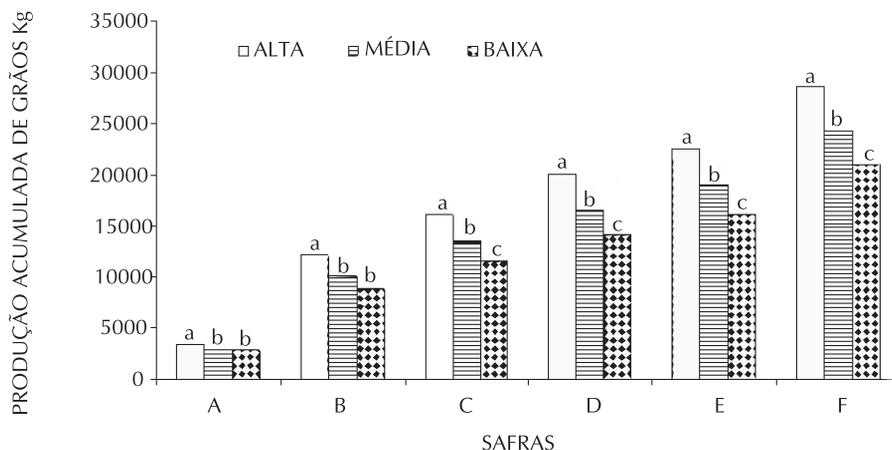


Figura 5. Produção acumulada de grãos em três zonas potenciais produtivas na safra de soja 2000/01 (A); safras de soja 2000/01 + milho 2001/02 (B); safras de soja 2000/01 + milho 2001/02 + soja 2002/03 (C); safras de soja 2000/01 + milho 2001/02 + soja 2002/03 + trigo 2003 (D); safras de soja 2000/01 + milho 2001/02 + soja 2002/03 + trigo 2003 + soja 2003/04 (E) e safras de soja 2000/01 + milho 2001/02 + soja 2002/03 + trigo 2003 + soja 2003/04 + milho 2004/05 (F) – Teste T 5% de probabilidade.

Fonte: Santi, 2007.

A análise dos mapas de rendimento disponíveis evidencia a necessidade de replanejamento das estratégias de manejos uniformes utilizadas na agricultura convencional, a qual se baseia em valores médios de produtividade e de intervenções uniformes de manejo.

A consolidação de um histórico de mapas é importante para a definição e distribuição das classes de rendimento, isolando a variabilidade temporal. Na Figura 5 observa-se a importância do histórico de mapas em discriminar as zonas de potencial de rendimento. Essa é uma estratégia que requer organização, porém é a alternativa viável para quem deseja trabalhar por zonas de manejo visando minimizar a variabilidade espacial da lavoura. No Rio Grande do Sul, a incerteza climática, traduzida pelos frequentes déficits hídricos, pode mascarar o efeito das intervenções de manejo localizado realizadas.

A variabilidade espacial do rendimento observada nos mapas de produtividade (Figura 6) é o reflexo da complexa interação de fatores ligados aos aspectos fisiológicos das culturas, aos fatores climáticos e a todos aqueles atributos referentes à qualidade do solo. Assim,

teoriza-se que os atributos físicos do solo (resistência à penetração de raízes, infiltração e armazenamento de água) sejam discriminados mais facilmente em anos com déficit hídrico. Por outro lado, os atributos químicos, como a disponibilidade de nutrientes, seriam preferencialmente prospectados em anos sem déficit hídrico, uma vez que a umidade do solo é importante para a dinâmica dos nutrientes no solo. O assunto é complexo, pois a possibilidade de alcançar determinado rendimento máximo é variável entre anos, e, para cada teto de rendimento, o fator limitante poderá ser diferente. Exemplificando, um solo com problemas de compactação e com teores de fósforo abaixo da suficiência poderá ter, em ano de déficit hídrico, a resistência à penetração das raízes e a disponibilidade de água como principais fatores limitantes ao rendimento. Por outro lado, em anos sem déficit hídrico significativo o teor de fósforo no solo passará a ser o fator limitante ao rendimento máximo.

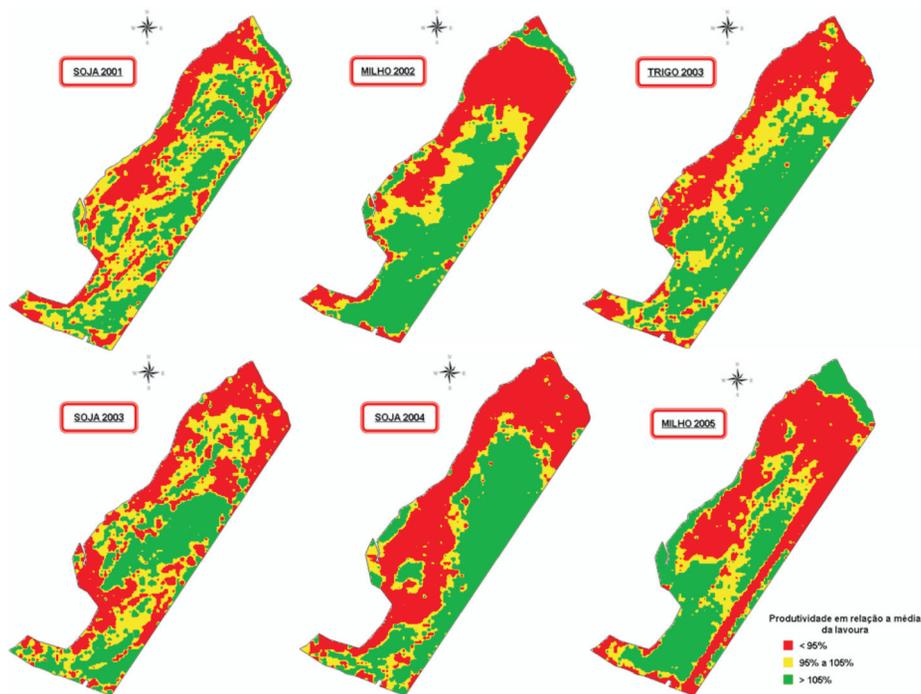


Figura 6. Espacialização horizontal da produtividade das culturas da soja (três safras), do milho (duas safras) e do trigo (uma safra) em relação à média da lavoura, na área de Palmeira das Missões, RS.

Fonte: Santi, 2007.

2.1.4. Rendimentos máximos de soja em áreas de agricultura de precisão

Conhecer o potencial produtivo de uma cultura, em determinada situação de lavoura, é importante para definir estratégias de manejo e minimizar os custos de produção. Para as condições americanas, Cooper (2003) identificou que o principal fator limitante ao rendimento de soja foi a disponibilidade de água. Porém, ressalva-se que o rendimento alvo deve ser considerado nesta análise. Assim, para rendimentos de 3000 kg ha⁻¹ a disponibilidade de água não seria o principal fator limitante para grande parte do centro-oeste americano. No entanto, para rendimentos de 6000 kg ha⁻¹ a disponibilidade de água foi o principal fator limitante ao rendimento em praticamente todos os anos de pesquisa da produtividade máxima. Quando a limitação de disponibilidade de água é eliminada, outros fatores determinantes do rendimento, relacionados ao manejo de solo e de planta, ficam mais valorizados. Fato semelhante tem sido observado em lavouras irrigadas no Rio Grande do Sul sob pivô central. A principal razão para este resultado é que, provavelmente, os outros fatores determinantes do rendimento não estão ainda controlados e, quando o problema de disponibilidade de água é resolvido, eles passam a controlar o rendimento. Entre as principais condições necessárias para a obtenção de elevado rendimento de soja, Cooper (2003) aponta ainda: manter os teores de nutrientes no solo na classe alta, utilizar variedades de elevado potencial de rendimento e resistentes ao acamamento e a doenças, utilizar rotação de culturas, rearranjo de plantas e disponibilidade de água de 50 mm por semana a partir do estágio V3 (2^o trifólio).

Em condições experimentais com a cultura da soja no Rio Grande do Sul, Rambo et. al (2003) obtiveram rendimentos de grãos superando os 5000 kg ha⁻¹. Em condições irrigadas a produtividade foi 18% superior a não irrigadas. Deficiências hídricas na fase de enchimento de grãos podem ter contribuído para tais diferenças. Em condições de lavouras americanas, Cooper (2003) ressalta que a adoção de cultivares de porte mais baixo, em áreas com potencial de produtividade mais elevada, não cria um ambiente de alta produtividade, mas pode ter maior vantagem que cultivares tradicionais indeterminadas, mais suscetíveis ao acamamento. Um bom exemplo prático para o uso dos mapas de produtividade (definição das áreas de alta e baixa produtividade) é a utilização de pesquisas com espaçamento e população de plantas, como forma de administrar o

manejo da população de plantas em função da fertilidade e da capacidade de armazenamento de água no solo.

2.2. Mapeamento dos atributos químicos do solo

Quando os problemas básicos de manejo estiverem solucionados e os mapas de rendimento ainda continuarem a expressar variabilidade espacial, há necessidade de partir para estudo mais detalhado envolvendo a interação de atributos do solo. A variabilidade espacial dos solos não é assunto novo e sua presença tem sido registrada em vários trabalhos científicos da Ciência do Solo. Porém, com o advento dessa nova forma gerencial de tratar as áreas produtivas – agricultura de precisão – ela tem despertado atenção especial nas distintas áreas da agronomia (Reichardt et al., 1986; Vieira, 2009).

O conhecimento da variabilidade nas lavouras, tanto por parte da pesquisa, prestadores de serviço e produtores, tem se concentrado sobre a heterogeneidade dos fatores de ordem química do solo. Isso porque, em várias situações de campo, os benefícios gerados pelo gerenciamento da variabilidade de atributos químicos do solo trazem vantagens imediatas tanto na racionalização do uso de insumos como na elevação da produtividade.

2.2.1. Amostragem do solo e o diagnóstico da variabilidade química

Para conhecer a variabilidade da fertilidade do solo, faz-se necessária a amostragem intensiva de solo. Na agricultura de precisão, as amostragens são georreferenciadas e espacializadas nas áreas, diferindo do conceito tradicional, e comumente utilizado, em que há subamostras que compõem poucas amostras representativas de uma grande gleba. Para tanto, Roloff & Focht (2002) propõem utilizar a metodologia denominada de “malha de amostragem” (Figura 7). Para as condições do Sul do Brasil tem se preconizado utilizar malhas amostrais com tamanho preferencial de um hectare, principalmente na fase da implantação da agricultura de precisão.

Outra forma de investigar a variabilidade dos atributos químicos do solo pode ser a partir do conhecimento da variabilidade espacial do rendimento. Com o mapa de colheita é possível realizar amostragens de solo dirigidas ou “inteligentes” baseadas na variabili-

dade da produtividade. Com isto é possível reduzir o número de amostras de solo, racionalizando os custos. Conhecer as variações horizontais da fertilidade é estratégia fundamental para que se possa planejar e executar adequadamente intervenções de manejo visando à resolução de problemas de fertilidade, que limitam os incrementos de produtividade (Schiebelbein et al., 2004).

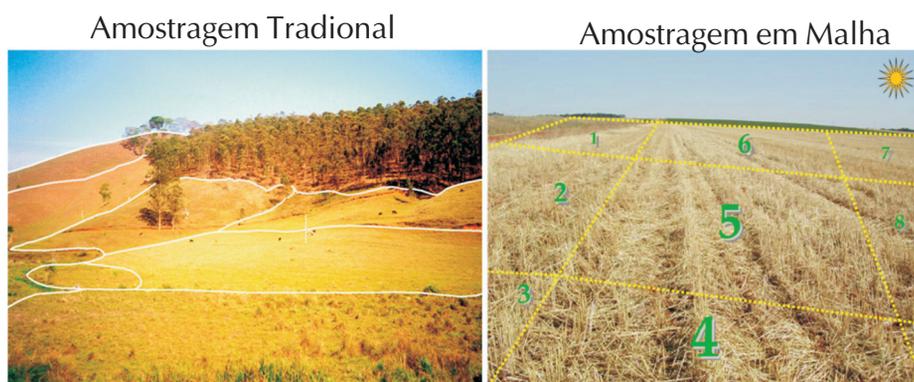


Figura 7. Exemplo de uma amostragem tradicional, à esquerda, e de uma coleta de solo georreferenciada seguindo a metodologia de malha de amostragem, à direita.

Sempre que existir limitação na expressão do potencial produtivo não relacionada a adversidades climáticas se faz necessária a caracterização da área (Raij, 1981). Essa etapa deve ser bem planejada e cuidadosamente executada, pois erros consideráveis de interpretação e de manejo podem ser gerados a partir de coleta de solo mal conduzida. É importante que o produtor considere a amostragem de solo como investimento em sua propriedade e como importante ferramenta de gerenciamento da fertilidade do solo. Por outro lado, um alerta importante é que os dados gerados pelas coletas georreferenciadas de solo não acabem sendo uma atitude isolada de manejo do solo para a busca de altas produtividades da soja. Essa ação investigativa deve ser entendida como mais um componente de um sistema complexo e com muitas inter-relações, que é o solo agrícola.

Uma das primeiras variáveis que pode ser investigada é a existência de diferentes tipos de solo dentro da mesma área produtiva. E ainda, a possível existência de variabilidade textural deve ser prospectada. Esse atributo tem relação com a retenção de água no solo e com a adsorção

de nutrientes, como o fósforo. Na Figura 8 se evidencia a variabilidade textural em um talhão. Quando da sobreposição dos resultados dos teores de fósforo no solo sobre o mapa de argila, percebe-se a variabilidade desse atributo (cores do mapa), gerada ao longo dos anos, devido ao manejo uniforme e às sucessivas aplicações de fertilizante a uma taxa uniforme, desconsiderando a existência de variabilidade da textura na área. Neste caso, na área em verde, com maior teor de argila, para a construção dos teores de fósforo é requerida maior quantidade de fertilizantes fosfatados do que na área em vermelho, com menor teor de argila.

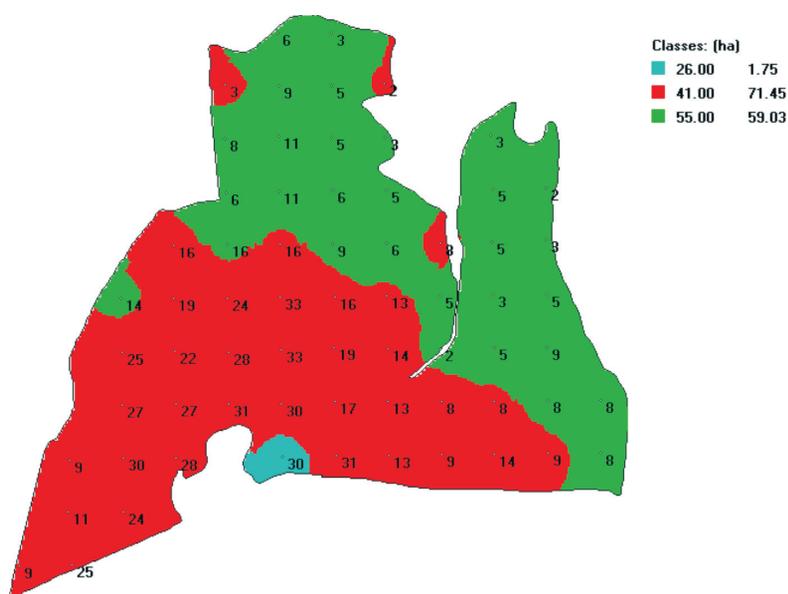


Figura 8. Variabilidade do teor de argila (cores) e sobreposição dos teores de fósforo (números) no solo, na camada de 0-10 cm, área da Lagoa, Não-Me-Toque, RS.
Fonte: Projeto Aquarius.

Um dos primeiros trabalhos desenvolvidos no Rio Grande do Sul utilizando as ferramentas da amostragem intensiva de solo, através da malha de amostragem, detectou variabilidade nos principais atributos do solo. Assim, os teores de argila no solo variaram de 31 a 74%. Para o potássio, essa variação foi de 97 a 486 ppm, para o fósforo de 2 a 28 ppm, a matéria orgânica de 0,5 a 3,0% e o pH H_2O de 4,7 a 7,0. Esses resultados justificaram repensar a forma tradicional de manejar as áreas onde se considerava um valor médio como representativo de toda a área (Figura 9).

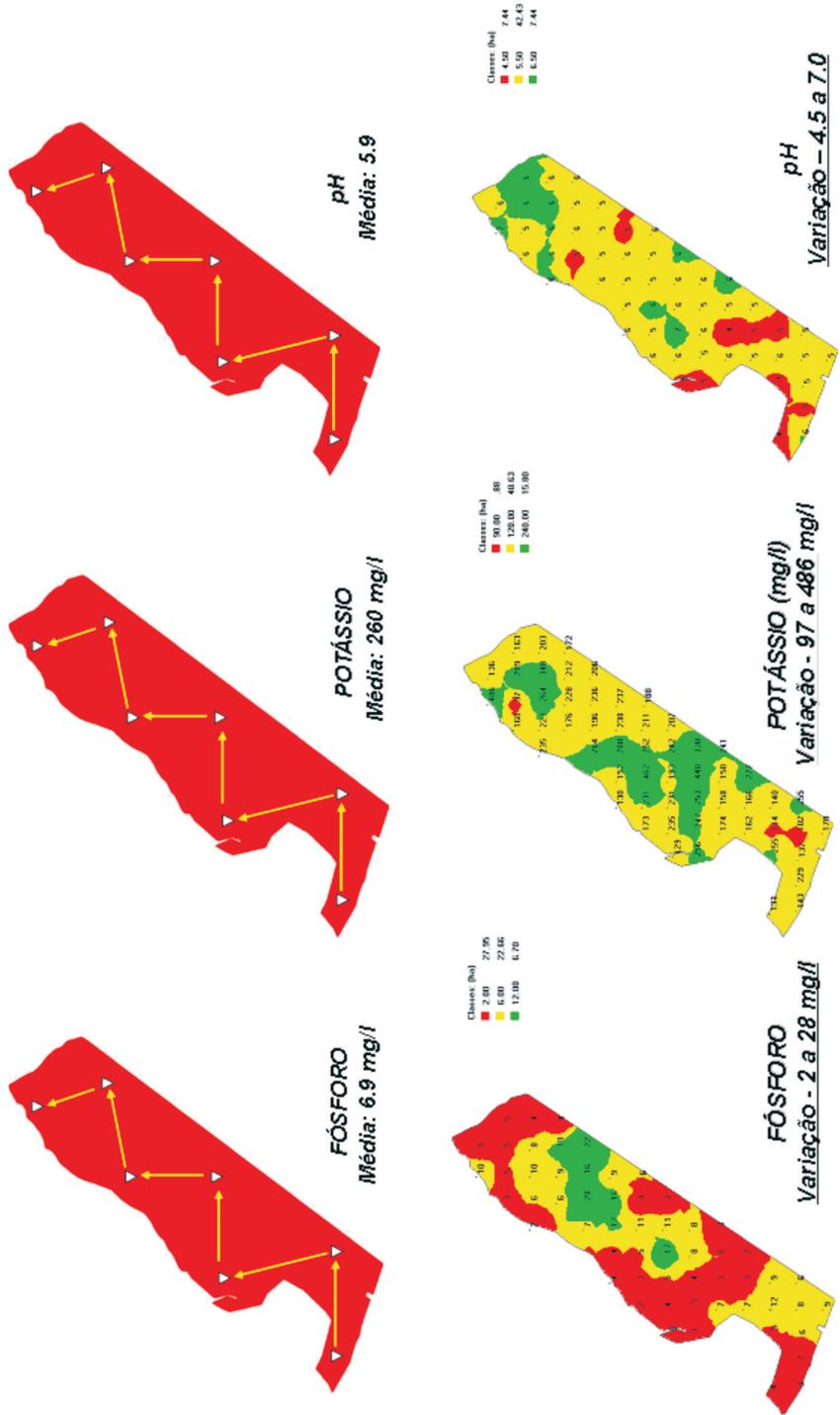


Figura 9. Teores de fósforo, potássio e pH do solo na camada de 0 a 10 cm quando de uma amostragem tradicional, superior, e de uma coleta de solo georreferenciada em malha de amostragem, inferior.
 Fonte: Santi, 2007.

3. O manejo da variabilidade química do solo

3.1. Ferramentas auxiliares na aplicação de insumos

Muitas vezes, por desconhecimento, usuários reduzem as potencialidades da agricultura de precisão à aplicação de insumos a taxa variada, sem mesmo investigar se essa é realmente a principal causa da variabilidade da produtividade na área. Essa, por si só, é uma solução simplificada e não ajustável a todas as situações de campo, podendo limitar as potencialidades gerenciais da agricultura de precisão. Assim, não há uma “receita pronta” de manejo do solo sob agricultura de precisão aplicável a todas as situações. Porém, vale lembrar que a avaliação de atributos de solo de forma conjunta (física, química e biológica), com os mapas de rendimento, gera resultados mais confiáveis do que avaliações isoladas.

Para a aplicação de fertilizantes em taxas variáveis, existem várias opções de equipamentos à disposição do produtor (aplicadores a lanço, aplicadores em sulcos individuais ou conjugados e aplicadores com distribuição pneumática). Nos países que já vêm adotando a prática da agricultura de precisão há mais tempo, e mesmo no Brasil, já estão em operação equipamentos específicos para a aplicação localizada de fertilizantes. Estes equipamentos com tecnologia embarcada são capazes de armazenar diversos produtos (matéria-prima) em separado e aplicar mais de um nutriente ao mesmo tempo, a partir de informações definidas previamente e arranjadas em forma de mapas de aplicação. Um passo a frente é a disponibilização de equipamentos capazes de compor instantaneamente a mistura de nutrientes necessária, de acordo com a análise de solo. Esses equipamentos ainda apresentam elevados custos de aquisição, ficando restritos a empresas prestadoras de serviço, não estando ainda popularizados no Brasil. Mesmo assim, a indústria nacional está atenta a esses acontecimentos e, em breve, devem fazer parte do dia-a-dia das operações de aplicação em taxa variada.

Quando os usuários potenciais não dispõem de recursos ou aguardam maior embasamento para investir em máquinas e equipamentos desenvolvidos para a aplicação em sítio específico, “meios alternativos” são formas (embora sem consenso quanto a sua eficiência) de proceder à

minimização da variabilidade espacial da fertilidade do solo. Como em todo novo paradigma, na agricultura de precisão também existem muitas dúvidas, tornando-se campo fértil para amplas discussões, porém o objetivo deste embate teórico deve ser a busca de alternativas ajustadas à realidade dos produtores brasileiros e não simplesmente importadas de países desenvolvidos, com realidade agrícola muito distinta da nossa.

A alternativa baseada principalmente no custo reduzido ao usuário é proposta por Werner et al. (2004). Esses autores sugerem o chamado "Implemento Virtual", que consiste num conjunto em que o trator, equipado para a agricultura de precisão, utiliza implemento normal (distribuidor existente na propriedade) para realizar aplicações a taxa variada de fertilizantes. Esses autores encontraram coeficientes de variação de 8,78% e 12,48% para a variação longitudinal. Nas escalas do sistema dosador, para a largura de trabalho determinada e nas velocidades selecionadas, foi possível variar as taxas de 104 a 461 kg ha⁻¹ de fertilizantes, se ajustando com isto as diferentes zonas de manejo. No entanto, Molin & Menegatti (2005) alertaram para cuidados com simplificações nessa fase inicial de implantação da agricultura de precisão. Esses autores sustentaram que a correção da área pela aplicação de insumos com base em zonas de manejo (taxa variada simplificada), que consistem na definição e demarcação de subáreas no talhão onde são aplicadas doses de corretivos e fertilizantes diferenciadas, porém constantes dentro das subáreas, pode ser estratégia demasiadamente simples, em comparação a taxa variável plena, que se baseia no manejo em sítio específico.

No entanto, aplicações por zonas de manejo ou por zona de aplicação, segundo Coelho (2003), podem ser alternativas simples e de menor investimento inicial para os agricultores brasileiros que desejam iniciar os trabalhos com agricultura de precisão. Utilizando-se desse procedimento, já é possível obter informações importantes para o gradual aprimoramento dos sistemas de produção.

Sugere-se que também sejam analisadas questões que desafiam o manejo em sítio específico ou mesmo em zonas de manejo, como a correta definição dos nutrientes que estejam limitando o rendimento, se as atuais recomendações quanto aos teores críticos são adequadas aos tetos de produtividade obtidos, quais as quantidades de nutrientes que devem ser aplicadas em cada local visando elevar o teor no solo e o que implica essa variabilidade espacial na nutrição de plantas.

Atualmente, está ocorrendo esforço da indústria para atender à demanda do produtor brasileiro, o qual almeja equipamentos especificamente desenvolvidos para a agricultura de precisão, porém com preço mais acessível do que o praticado em países da Europa ou nos Estados Unidos.

3.2. Aplicações em taxa variada de insumos

Constatada a presença de variabilidade na produtividade e associando-a a atributos químicos do solo, é possível planejar e realocar insumos através da aplicação dos fertilizantes e corretivos utilizando a taxa variada. Do ponto de vista prático, a aplicação deve ser conduzida primando por quantidades que proporcionem maior produtividade, mas nunca esquecendo o aspecto econômico e o ambiental (Mantovani, 2000). Como as características das culturas e do solo variam no espaço e no tempo, chegar à recomendação de aplicação em taxa variada de algum insumo deve ter como base um processo de investigação e de diagnóstico (Molin & Menegatti, 2005).

Depois de estabelecida a intervenção desejada, fruto da análise de um conjunto de dados, é a vez das operações de campo, como a aplicação localizada dos insumos ou o manejo localizado do solo. A prescrição de fertilizantes fundamentada numa amostragem sistemática e detalhada subsidia a recomendação para cada pequena porção do talhão, contrapondo a forma tradicionalmente utilizada, que se baseia num número reduzido de amostras de solo e prevê uma dose uniforme de insumos (Molin, 2003).

A taxa variada baseia-se no uso de mapas de aplicação (Figura 10) elaborados por meios eletrônicos que relacionam a posição da máquina no campo (latitude e longitude) e a quantidade de insumo a ser aplicada naquele local específico (volume por unidade de área ou peso por unidade de área). A quantidade de insumo a ser aplicada também pode ser definida com base em informações obtidas, em tempo real, por meio de sensores. Essa opção, embora emergente no Brasil (Queiroz et al. 2000), já é utilizada em mais de 20 países, por indicar as necessidades reais da cultura, aumentar a eficiência da aplicação, minimizar a possibilidade de risco ambiental e permitir ajustes instantâneos.

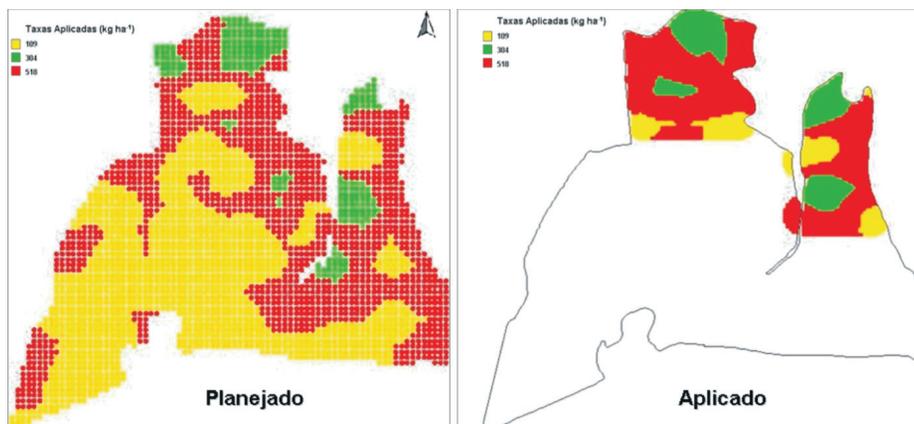


Figura 10. Mapa de prescrição de adubação para aplicação em taxa variada (cada cor corresponde a uma dose diferente) à esquerda, e à direita, a rastreabilidade da aplicação, área da Lagoa, Não-Me-Toque, RS.
 Fonte: Projeto Aquarius.

Quando se trabalha com um valor médio para todo o talhão, seguindo os teores médios de nutrientes no solo, a recomendação de adubação é uniforme para todo o talhão, e uma única posição no mecanismo dosador será mantida. Quando se trabalha considerando a variabilidade, há necessidade do uso dos mecanismos atuadores e dosadores, permitindo variar a dosagem em cada local do talhão (Molin, 2003) ou aplicar uma dose para cada zona uniforme dentro do talhão (Coelho, 2003).

Quando o produtor não dispõe de recursos para investimento a curto prazo, a aplicação de insumos pode ser adequada com base em zonas de manejo ou zonas de aplicação. Tal estratégia permite contemplar e se adequar à realidade econômica e operacional do produtor. Quando possível, a utilização da aplicação em taxa variada permite atuar sobre subáreas menores, de acordo com mapa de prescrição, com base nos teores de nutriente do solo, na expectativa de rendimento, nos rendimentos obtidos nas safras anteriores (exportação de nutrientes nos grãos) e na variação da textura do solo.

Um segundo passo da pesquisa em agricultura de precisão no Sul do Brasil é elucidar se realmente as intervenções localizadas de corretivos e fertilizantes surtem efeitos positivos no rendimento das culturas (Figura 11). Em 2001, num talhão de 57 hectares no municí-

pio de Palmeira das Missões, cerca de 50% da área apresentava teores de fósforo no solo considerados abaixo do suficiente, e apenas 12% dessa área estava com níveis nutricionais considerados satisfatórios.

Independente da forma utilizada para a aplicação de fertilizantes, em taxa variada baseada em zona de manejo (Figura 11) ou em sítio específico (Figura 12), observa-se a correção das subáreas com teores deficientes de nutrientes no solo. O manejo adotado proporcionou, na área de Palmeira das Missões (Figura 11), redução de 50% para menos de 1% da subárea com limitação nos teores de fósforo no solo. Na área em Não-Me-Toque (Figura 12), o resultado obtido foi de redução de 20% para 6% da subárea com limite crítico. Isso demonstra a potencialidade dessa tecnologia em melhorar a qualidade química do solo e proporcionar a elevação do potencial produtivo.

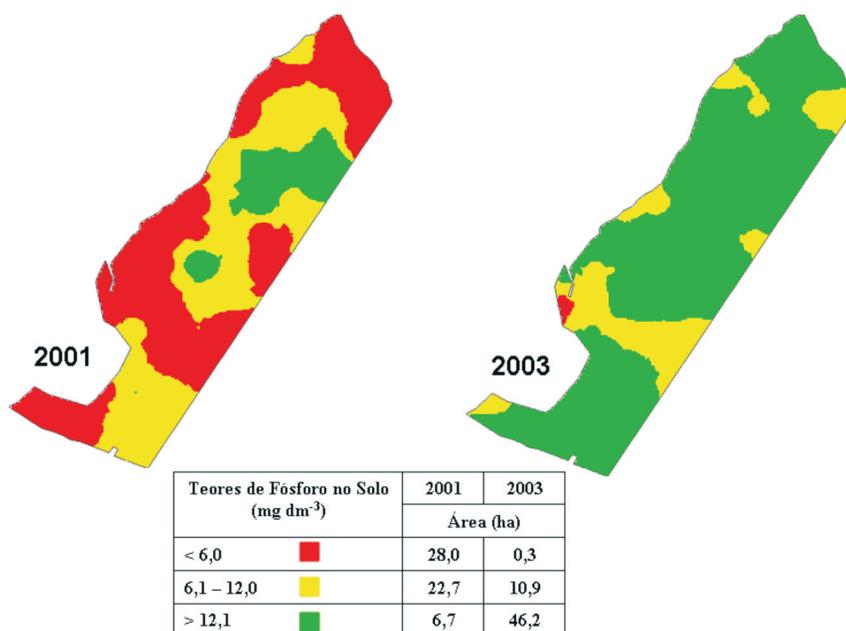


Figura 11. Variabilidade e evolução dos teores de fósforo no solo, na camada de 0-10 cm antes e após intervenções de adubação em zonas de manejo (taxa variada simplificada), Palmeira das Missões, RS.

Fonte: Setor de Uso, Manejo e Conservação do Solo e da Água- UFSM.

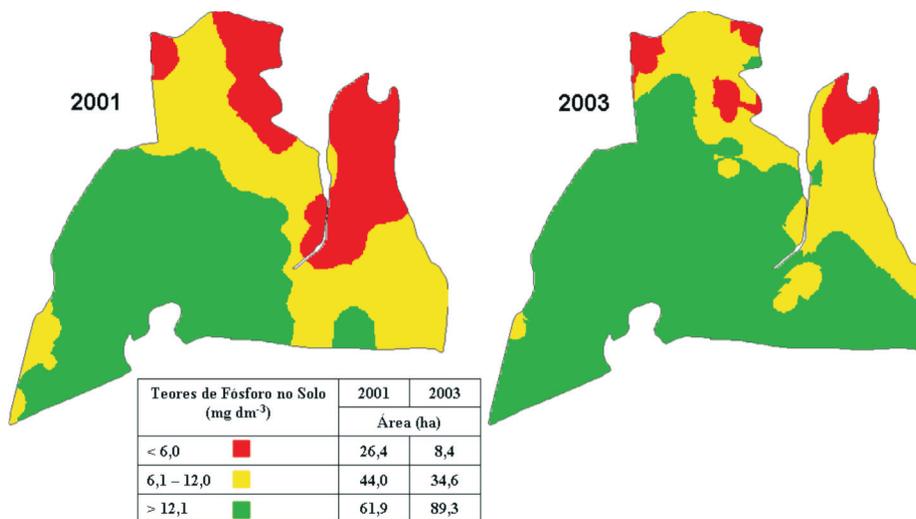


Figura 12. Variabilidade e evolução dos teores de fósforo no solo, na camada de 0-10 cm antes e após intervenções de adubação em sítio específico (taxa variada plena), área da Lagoa, Não-Me-Toque, RS.

Fonte: Projeto Aquarius.

Além da variabilidade horizontal, é importante que se observe a melhoria dos atributos químicos no perfil do solo (variabilidade vertical). Na Figura 13 observa-se, em Palmeira das Missões, a construção da fertilidade nas zonas de manejo tanto, na profundidade de 0 a 5 cm como na de 5 a 10 cm. A possibilidade de avaliação da eficiência das intervenções de manejo adotado é outra das vantagens da agricultura de precisão.

4. Atributos físicos do solo

Quando os teores de nutrientes estiverem em níveis suficientes e as correlações com a produtividade das culturas forem baixas, os demais atributos do solo, especialmente os físicos, devem ser investigados (Viana, 2005). A qualidade física do solo, nesse caso, deve ser monitorada. Vários trabalhos publicados e mesmo observações de pesquisadores e técnicos de campo indicam haver, frequentemente, em áreas de plantio direto, compactação na camada de solo entre 8 e 15 cm de profundidade. Embora haja controvérsia quanto aos níveis

considerados como restritivos ao desenvolvimento radicular ou capazes de prejudicar o desenvolvimento vegetal, Reinert et al. (2001) encontraram relação entre densidade radicular e resistência à penetração medida pelo penetrômetro, na ordem de $r^2 = 0,65$. Em revisão realizada por esses mesmos autores, a resistência à penetração de 2,8 a 3,2 MPa retarda a elongação das raízes e acima de 4,0 MPa interromperia o crescimento das mesmas. De uma maneira geral, os valores acima de 2 MPa são os mais aceitos como críticos de resistência do solo ao crescimento das raízes, podendo ter flexibilidade de 2 a 5 MPa (Camargo & Aleoni, 1997; Silva et al. 1998; Reinert et al., 2001).

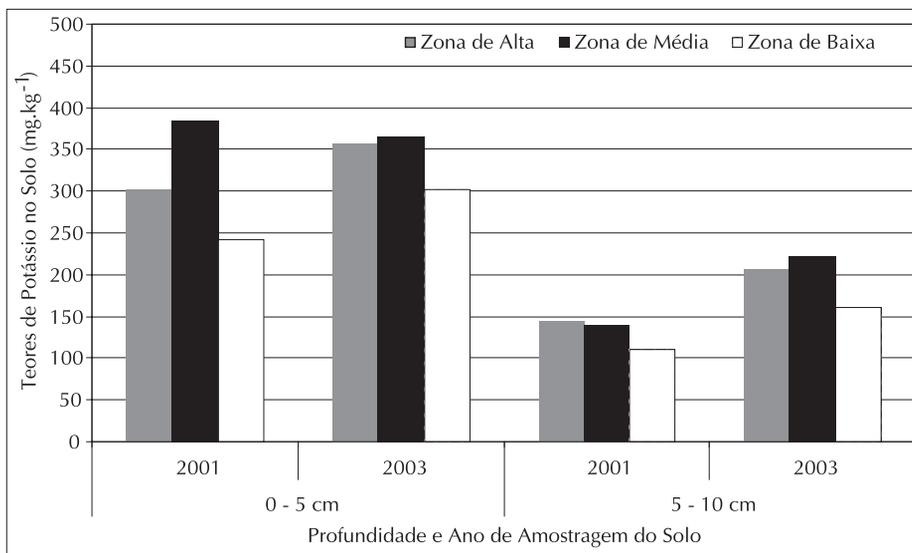


Figura 13. Evolução do teor de fósforo no solo em três zonas de manejo com diferentes potenciais produtivos, nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm, Palmeira das Missões, RS. Fonte: Santi, 2007.

Santi (2007), avaliando a qualidade física do solo em zonas de manejo com diferentes potenciais produtivos, numa área em Palmeira das Missões, a resistência do solo à penetração (Figura 14) indicou haver presença de camadas adensadas desde 6 cm de profundidade, agravando-se na camada entre 12 a 14 cm. Nesta última camada, os valores foram notadamente mais elevados na zona de baixo rendimento, sugerindo que este pode ter sido um fator limitante ao rendimento.

Apesar da densidade do solo não ser a propriedade que recebe maior impacto com a modificação da estrutura do solo, por questões de facilidade de coletas e determinações a campo, ela tem sido usada para definir problemas relacionados aos atributos físicos do solo. Reinert et al. (2001), com propósito de caracterizar o estado de compactação, propuseram os seguintes valores críticos de densidade do solo: horizonte de textura argilosa, com mais de 55% de argila = $1,45 \text{ g cm}^{-3}$; horizonte de textura média, com argila de 20 a 55% = $1,55 \text{ g cm}^{-3}$; horizonte de textura arenosa, com menos de 20% de argila = $1,65 \text{ g cm}^{-3}$.

A adoção de estratégias de manejo de redução da compactação do solo utilizando métodos biológicos, como plantas de cobertura do solo (nabo forrageiro e guandu, por exemplo), ainda é preferencial em relação aos métodos mecânicos, pois os efeitos são mais duradouros e se associam a outros ganhos, como a fixação biológica de nitrogênio e a melhoria na infiltração de água no solo.

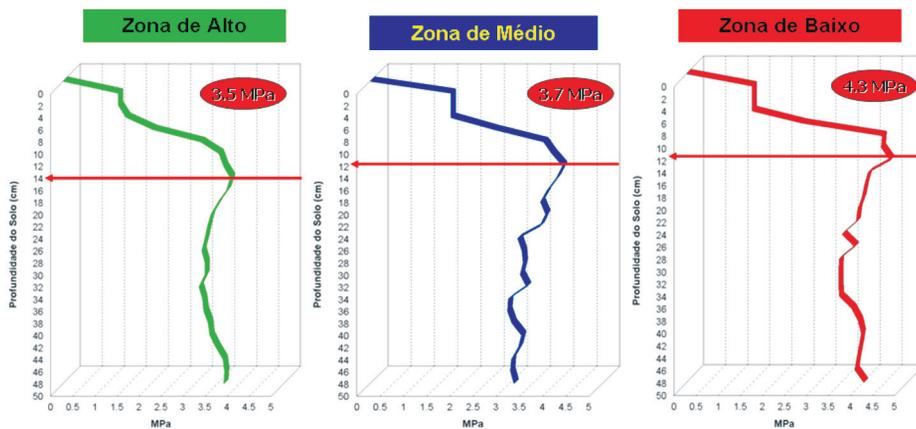


Figura 14. Resistência à penetração determinada na camada de 0-50 cm, nas zonas de manejo de alto, médio e baixo potencial de rendimento em um Latossolo Vermelho distrófico, em Palmeira das Missões, RS.

Fonte: Santi, 2007.

Dentre os atributos de ordem física, a taxa de infiltração de água, em relação aos demais atributos, como macroporosidade, resistência à penetração de raízes, densidade, porosidade total e microporosidade, é considerada como a mais importante, pois integra vários fatores, como a distribuição do tamanho e continuidade de poros, poros bio-

lógicos e a cobertura do solo (Reichert, et al., 2003). E ainda, a taxa de infiltração de água é propriedade intimamente associada ao arranjo textural e estrutural do solo.

A taxa de infiltração de água no solo é condicionante para determinar a partição da precipitação em infiltração, escoamento superficial, armazenamento de água e na celeridade do avanço da frente de umidade, podendo explicar o desenvolvimento vegetal. Assim, a investigação das características físicas do solo pode ser de grande valia para o entendimento das causas da variabilidade de rendimento, justificando o estudo sobre a variabilidade espacial das propriedades hidrodinâmicas do solo. Mesmo de aparência homogênea, essas variáveis podem apresentar considerável variabilidade no espaço e, conseqüentemente, determinar a resposta das culturas às intervenções realizadas (Lima & Silans, 1999).

Avaliando a infiltração de água no solo em três zonas de manejo (alto, médio e baixo rendimento), Santi (2007) verificou que a infiltração foi superior nas zonas de alto potencial de rendimento, em relação às zonas de baixo potencial (Figura 15). A infiltração e o armazenamento de água no solo foram os principais fatores que determinam a variabilidade espacial do rendimento da soja.

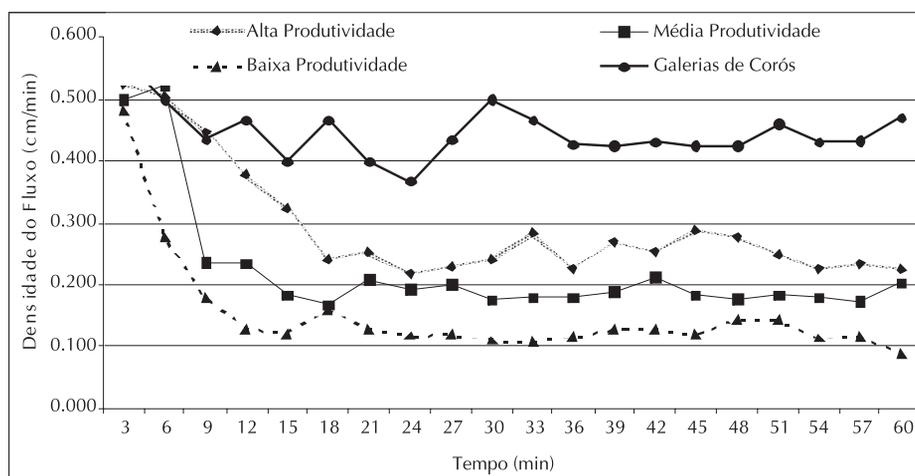


Figura 15. Variação da infiltração de água no solo, em três zonas potenciais produtivas e quando da presença de galerias de corós (*Diloboderus abderus*), estimada pelo método do Cornell Sprinkle Infiltrometer, Palmeira das Missões, RS.

Fonte: Santi, 2007.

Em determinações de permeabilidade foi possível observar, em algumas das repetições, que a presença de galerias de corós (*Dilaboderus abderus*) modificou completamente a permeabilidade do solo sob plantio direto, aumentando-a substancialmente. Esse resultado reforça a importância da atividade biológica na permeabilidade do solo, pois essas galerias possibilitam o fluxo preferencial de água no solo, especialmente sob sistemas com mínima mobilização do solo. Quando da presença de galerias de corós, independente da zona, a infiltração foi de quatro a oito vezes superior à determinada nas zonas de alta e baixa produtividade, respectivamente.

Outra característica importante dentre os atributos da física do solo é a distribuição dos agregados (Figura 16). Esta característica é tida por Vezzani (2003) como o principal atributo indicador de qualidade do solo. Santi (2007) também encontrou, em condições de lavoura, que os agregados > 4,76 mm discriminaram eficientemente as zonas de potencial de rendimento. Com base nos resultados apresentados, destaca-se que o incremento da atividade biológica do solo, além de melhorar a infiltração de água no solo, é estratégia de incremento da produtividade da cultura (Figura 17).

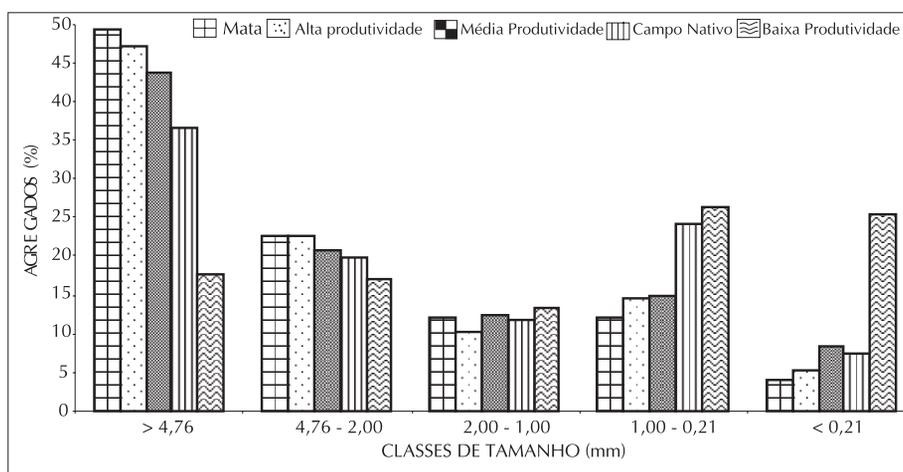


Figura 16. Distribuição de agregados em classes na camada de 0-5 cm, Palmeira das Missões, RS.

Fonte: Santi, 2007.



Figura 17. Presença de poros biológicos gerados pela ação de organismos como minhocas (A) e corós (B e C). Visualização do favorecimento dessas galerias (D e E) para com a infiltração de água no solo e o crescimento radicular.
Fonte: Santi, 2007.

A sobreposição de mapas multitemáticos passa a ser uma necessidade da segunda etapa da agricultura de precisão (Figura 18). Entre a primeira camada, que é a dos atributos químicos, e a última, que é a do rendimento, outras devem ser incluídas. A resistência à penetração do solo, ocorrência de pragas e doenças, mapa de vigor, mapa de condutividade elétrica, mapa do teor de argila, mapa do teor de matéria orgânica e mapa de declividade estão entre as opções atualmente disponíveis (Santi et al., 2009a).

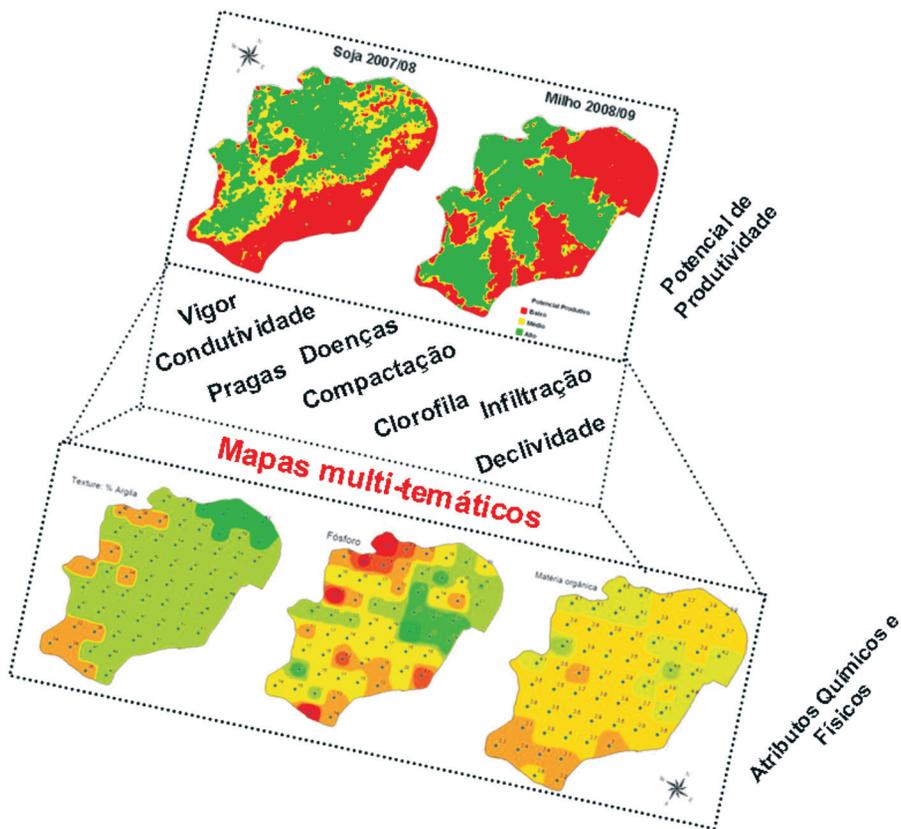


Figura 18. Integração de mapas multitemáticos em uma mesma área agrícola.
 Fonte: Santi et al. 2009a.

5. Considerações Finais

Alcançar elevados rendimentos de soja é um desafio complexo que exige a otimização de atributos do solo que influenciam o desenvolvimento vegetal. A agricultura de precisão é uma ferramenta que permite controle detalhado das intervenções de manejo. É importante que os agricultores primeiramente ajustem os demais fatores de produção (época de semeadura, escolha de cultivar, espaçamento, população, controle de invasoras, etc.). Caso ainda se evidencie a existência de desuniformidade na lavoura com variações espacial e temporal no rendimento da soja, a agricultura de precisão deve ser adotada.

Parte desta variabilidade poderá ser explicada por atributos químicos do solo, especialmente quando os teores estão abaixo da suficiência. A utilização da taxa variada para aplicação de corretivos e fertilizantes é uma estratégia eficiente, podendo trazer benefícios a curto prazo. A amostragem intensiva e georreferenciada do solo é fundamental neste processo de racionalização do uso de insumos. Caso haja disponibilidade, os mapas de rendimento devem ser utilizados para subsidiar os agricultores e os técnicos nas intervenções de manejo. A definição de zonas de potencial de rendimento, com base em um conjunto de dados (mapas multitemáticos), passa a ser importante.

Algumas surpresas poderão ocorrer a partir da adoção da agricultura de precisão, como mapas de construção de teores não serem os esperados, atributos químicos não explicarem os baixos ou altos rendimentos, ou até mesmo a não observância dos esperados incrementos de rendimento. Esse é o momento em que será necessária a assistência especializada, visão holística da lavoura, solidez no conhecimento do histórico da área e a etapa em que a pesquisa deve ser valorizada.

6. Referências

- BALASTREIRE, L.A. O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil. Piracicaba, L.A. BALASTREIRE, 2000. 224p.
- BLACKMORE, B.S.; MARSHALL, C.J. *Yield mapping; errors and algorithms*. In: International Conference On Precision Agriculture, n.3, Minneapolis, 1996. Proceedings of the 3rd International Conference of Precision Agriculture, Madison, WI, 1996, p.403-415.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas*. Piracicaba, SP. O. A. Camargo & L. R. F. Alleoni, 1997, 133p.
- CAPELLI, N.L. *Agricultura de precisão – Novas tecnologias para o processo produtivo*. Disponível em: <http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.htm>. Capturado em 10 de fevereiro de 2006.
- COELHO, A.M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: *Tópicos em Ciência do Solo*, volume 3. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. 2003. p. 249.
- COOPER, R.L. *Pesquisa sobre produtividade máxima da soja nos EUA*. Informações Aronômicas – POTAFOS, n.101, março de 2003.

FRAISSE, C. Agricultura de Precisão: tecnologia ao alcance de todos. Disponível na Internet via WWW.URL:<http://www.agricultura.de.precisao.com.br>. Arquivo capturado em 07 de fevereiro de 2006.

KITCHEN, N.R., SUDDUTH, K.A., HUGHES, D.F., BIRELL, S.T. *An Evaluation Of Methods For Determining Site Specific Management Zones*. Disponível em: <http://www.fse.missouri.edu/mpac/pubs/sscmzone.pdf>. Capturado em 10 de fevereiro de 2006.

LIMA, C.A.G.; SILANS, A.P. Variabilidade espacial da Infiltração de Água no Solo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.34, n.12, p.2311-2320, dez. 1999.

MANTOVANI, E. C. . A Agricultura de Precisão e sua organização no Brasil. In: Aluisio Borém; Marcos P. del Giúdice; Daniel Marçal de Queiroz; Evandro Chartuni Mantovani; Lino Roberto Ferreira; Francisco Xavier R. do Valle; Reinaldo Lúcio Gomide. (Org.). Agricultura de Precisão. Viçosa, MG: Giúdice & Borém, 2000, v. 1, p. 77-92.

MENEGATTI, L.A.A. *Metodologia para identificação, caracterização e remoção de erros em mapas de produtividade*, Piracicaba, 2002, 84p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.

MOLIN, J.P. *Agricultura de Precisão – o gerenciamento da variabilidade*. Piracicaba/SP, 2001 – reimpressão, 2003. 83p.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. *Engenharia Agrícola*, v.22,p.83-92, jan.2002.

MOLIN, J. P. ; MENEGATTI, L. A A . Tratamento localizado. *Cultivar Máquinas*, Pelotas, v. 3, p. 22 - 26, 01 ago. 2005.

QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. In: *Agricultura de Precisão*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 2-42.

RAIJ, B. van. *Avaliação da fertilidade do solo*. Piracicaba: POTAFOS, 1981. 142P.

RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F. *et ali*. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. *Ciência Rural*, v.33,p.405-411, 2003.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R.; LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 10, p.1-6, 1986.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*. Jul/Dez. 2003, p.26-48.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M.; CERETTA, C.A., orgs. *Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul*. Santa Maria, Palloti, 2001. v.1, p.114-133.

ROLOFF, G.; FOCHT, D. Mapeamento dos atributos do solo – malha ou zona de manejo. p. 104-114. In: BALASTREIRE, L.A. *Avanços na agricultura de Precisão do Brasil no período de 1999-2001*. Piracicaba, 2002.

ROSA FILHO, et al. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p.283-293, 2009.

SÁ, M.F.M. *Abordagem quantitativa na predição espacial de atributos do solo e geração de zonas de manejo agrícola*. Piracicaba, 2001. 117p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.

SANTI, A. L. ; AMADO, T. J. C. ; FLORA, L. P. D. ; SMANIOTTO, R.F.F. . Agricultura de Precisão: É chegada a hora da integração do conhecimento. *Revista Plantio Direto*, p. 24 - 30, 02 fev. 2009a.

_____. *Aprimoramento do manejo do solo utilizando as ferramentas da agricultura de precisão*. 2006. Tese de doutorado – no prelo. 210 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SANTI, A.L. et. al. A calagem na agricultura de precisão. *Revista A Granja*, n. 65, p. 65-67, agosto/2009b.

SCHIEBELBEIN, L.M.; FOCHT, D.; ROLOFF, G. *Aumento de produtividade com o uso da agricultura de precisão ao longo do tempo*. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. Piracicaba, SP. ESALQ/USP. 2004.

SILVA, V. R.; REINERT, D.J. Efeito do sistema de cultivo na resistência de um latossolo roxo. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 1998, Brasília. Cd-rom, VI ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Qualidade Ambiental e Prosperidade na Agricultura. Brasília – DF: 1998. v.1. p.1-3.

VENTIMIGLA, L.A.; et. al. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.34, p.195-199, fev. 1999.

VEZZANI, F. M. *Qualidade do sistema solo na produção agrícola*. 2001. Tese de doutorado. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIANA, J. H.M., In: *Distribuição Espacial de Atributos Físico-Químicos, Mineralógicos e Micromorfológicos de Latossolos, Visando o Mapeamento de Áreas Produtivas*. Viçosa, UFV, Tese de Doutorado. 2005, 194p.

VEIRA, S.R. *Aplicação da geoestatística nas pesquisas em conservação do solo, da água e do meio ambiente*. XXXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Fortaleza, CE. UFC. 2009.

WERNER, V. et al., *Aplicação de fertilizantes à taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento*. Cd-rom, Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. Piracicaba, SP, ESALQ/USP, 2004.

Monitoramento de lavouras - Opção de manejo para altos rendimentos de soja

José Antonio Costa¹ & André Luís Thomas²

Este capítulo tem como objetivo fornecer a pesquisadores e a técnicos de campo ferramentas para avaliações de suas áreas cultivadas com soja (parcelas experimentais ou lavouras), de forma criteriosa e tecnicamente correta, podendo utilizar os dados como indicativo para a tomada de decisões de manejo, bem como no auxílio da mensuração de efeitos de tratamentos experimentais com a cultura. Para os produtores, esta metodologia pode ajudar a entender como a soja se comporta frente a diferentes opções de manejo, objetivando a obtenção de altos rendimentos, assim como ajudar a quantificar a variabilidade espacial e temporal nas lavouras. Graças à determinação do potencial de produtividade, é possível estabelecer metas realistas de rendimento, em cada região, propriedade e mesmo em glebas dentro de áreas maiores.

No momento em que os lucros com a atividade agrícola são cada vez mais difíceis de serem obtidos, com a competitividade acirrada nos mercados mundiais, é fundamental que se conheçam a potencialidade da lavoura que se está manejando, e a variabilidade existente no rendimento de grãos e nos fatores responsáveis por esta variabilidade. Portanto, o método de Monitoramento de Lavouras está intimamente relacionado com ferramentas atuais de manejo, como a Agricultura de Precisão.

¹ Professor Titular Aposentado da Faculdade de Agronomia da UFRGS. E-mail: jamc@ufrgs.br

² Professor da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Caixa Postal 15100, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

O material aqui apresentado sintetiza os resultados obtidos com a pesquisa em Fisiocologia e Manejo da Cultura da Soja, no Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com a contribuição de inúmeros estudantes de iniciação científica e pós-graduação, de mestrado e doutorado, e de muitas dissertações, teses e artigos científicos e de divulgação, escritos ao longo do tempo.

1. Introdução

O monitoramento de lavouras tem como objetivo fornecer informações que permitam opções de manejo para a obtenção de altos rendimentos de soja. Para tanto, por meio de amostragens, é feita a avaliação do crescimento do caule e dos ramos e do surgimento no tempo, da localização, tipo e quantidade de estruturas reprodutivas nas plantas de soja.

Com base nos dados obtidos, pode-se tomar decisões que vão influenciar o rendimento atual da lavoura, como a cobertura do solo, irrigação, controle de insetos, tratamento químico da parte aérea para preservação de área foliar, controle de doenças de final de ciclo; bem como aquelas que vão determinar o desempenho futuro da área, como inoculação da(s) cultura(s) antecedente(s), análise de solo (em mais de uma profundidade), incluindo micronutrientes, correção das características químicas e físicas do solo sempre que necessário, uso de sementes de qualidade, de cultivares com alto potencial de rendimento, tratamento de sementes, inoculação anual, adoção de novos arranjos espaciais das plantas, exame das raízes, verificação de existência de camada compactada, avaliação da nodulação, análise foliar e estimativa do rendimento.

O sistema aqui proposto avalia, identifica e registra a área foliar, a estatura da planta, o comprimento e o número de nós no caule, número de ramos, comprimento dos entrenós e número de nós nos ramos, nós férteis no caule e nos ramos, acúmulo de matéria seca no caule e nos ramos, produção e retenção de flores, legumes e grãos no caule e nos ramos.

Nas variedades de hábito de crescimento determinado, a contribuição dos ramos para o rendimento é considerável. A pesquisa

tem mostrado que, nas nossas variedades, até 70% dos legumes totais da planta podem ser produzidos nos ramos. Já está determinado também que a posição mediana (6^o ao 10^o nó) da planta é onde se localiza a maior parte das flores, dos legumes e dos grãos.

Mas, para saber se isto está acontecendo de forma satisfatória, e sabê-lo em tempo para tomar decisões de manejo, é necessário fazer o monitoramento sistemático da lavoura. A amostragem sequencial de plantas ajuda a identificar problemas a tempo de corrigi-los.

2. Amostragem

2.1. Quando Amostrar

Sugere-se amostragens da lavoura ou áreas experimentais aos 10, 20, 30 e 40 dias após a emergência, no pré-florescimento, para determinar a população de plantas (número de plantas por unidade de área), para a avaliação da nodulação e para a quantificação do crescimento. Os dados coletados permitem o cálculo de parâmetros fisiológicos que refletem o vigor das plantas e da população.

O monitoramento no período reprodutivo deve começar no florescimento pleno (R2), que é quando o caule já apresenta a maioria dos nós e inicia o desenvolvimento dos ramos. As amostragens seguintes devem ser feitas no início da formação de legumes (R3), na formação de legumes (R4), no início do enchimento de grãos (R5), no máximo volume de grãos (R6), na maturação fisiológica (R7) e na maturação (R8). Recomenda-se a determinação dos estádios de desenvolvimento utilizando a escala adaptada por Costa & Marchezan, 1982.

2.2. Como Amostrar

É preciso selecionar os locais de monitoramento, que têm que ser representativos dos tipos de situações presentes; fazer a leitura dos estádios de desenvolvimento nos mesmos locais, com 7 a 10 dias de intervalo; utilizar alguma maneira de marcar as plantas da amostra que torne fácil a sua localização. O uso de bandeirolas coloridas economiza tempo na identificação das áreas escolhidas. O número de locais de amostragem vai depender da uniformidade da lavoura. Em

geral, cada amostra deve representar 5 a 10 hectares. Em áreas experimentais deve-se amostrar todas as repetições de cada tratamento que está sendo testado.

A frequência de amostragem e a área que cada local representa dependem do objetivo do monitoramento. Se o desejado é comparar o desenvolvimento de uma lavoura testemunha (manejada de forma tradicional) com outra que está sendo manejada de forma diversa ou na qual está sendo testada uma prática nova, o número de amostragens pode ser reduzido. Por exemplo, realizando-se uma amostragem, quando a prática for aplicada para servir como testemunha; proceder uma em R2 (florescimento), para determinar a matéria seca por área como indicativo do rendimento; outra em R5 (início do enchimento de grãos), que é um estágio crítico; e a última na colheita (R8).

A escolha das plantas da amostra para serem monitoradas é muito importante. Deve-se percorrer toda a lavoura para identificar amostras representativas de situações diferenciadas de cada gleba.

Em cada amostragem selecionar 10 plantas de cada local. As amostragens devem ser feitas após a leitura (realização das determinações) das plantas que estão sendo monitoradas. Estas plantas escolhidas devem ser representativas das plantas do local e estar no mesmo estágio de desenvolvimento daquelas que estão sendo monitoradas. Não se deve coletar as plantas que estão sendo monitoradas. As plantas amostradas devem ter estatura semelhante, o espaçamento entre elas deve ser o mais uniforme possível e têm de ser retiradas do interior da lavoura, nunca das bordaduras. As plantas devem ser retiradas em sequência, na fileira, medindo-se a área coletada. Maior número de amostras menores (nunca menos de 10 plantas por amostra) reflete melhor uma área do que apenas uma ou duas amostras com maior número de plantas.

As dez plantas consecutivas selecionadas, na fileira, devem ser cortadas rente ao solo (se for possível, cavar. Nesse momento, aproveitar para observar as raízes – coloração, desenvolvimento lateral e em profundidade, presença de doenças e a nodulação). Plantas com caule danificado não devem ser incluídas na amostra. Para cada estágio de desenvolvimento existe uma planilha específica, que será detalhada mais adiante, para registro dos dados.

Como já foi referido anteriormente, a vantagem do método é sua fácil adaptação aos objetivos do monitoramento. Pode ser usado integralmente ou apenas em parte, de acordo com a finalidade em vista. Os dados podem ser obtidos e utilizados por planta ou a média das dez plantas.

O objetivo do monitoramento é fornecer a técnicos e a produtores uma ferramenta para aumentar o rendimento da soja, pelo entendimento de como o manejo atua no crescimento e vigor das plantas, influenciando o potencial de rendimento e o rendimento final da lavoura. Permite também a obtenção de dados para planejar ações que irão resultar no aumento do potencial de rendimento da lavoura nas safras posteriores.

3. Estádios vegetativos

3.1. Caracterização dos estádios vegetativos

A Figura 1 mostra a semente colocada no solo, absorvendo água, emitindo a radícula e iniciando a emergência. O aparecimento dos cotilédones à superfície do solo caracteriza a emergência (VE); é o início do período vegetativo. O estágio cotiledonar das plântulas é identificado por VC. Todos os estádios do período vegetativo são antecidos pela letra "V" (Tabela 1). O número do estágio vegetativo é determinado pela contagem do número de nós do caule, começando com o nó das folhas unifolioladas até o nó que tem ou teve folha desenvolvida (Figura 2). O nó da folha trifoliolada é contado quando as margens dos folíolos da folha do nó imediatamente superior não mais estão se tocando, o que caracteriza uma folha desenvolvida. Por esse critério pode-se fazer leituras simultâneas de estádios vegetativos e reprodutivos. Quando cessa o acréscimo de nós no caule, não implica, necessariamente, o término do período vegetativo da planta. Apenas não há mais aumento em estatura, continuando ainda, por algum tempo, incremento de massa seca no caule e nos ramos.

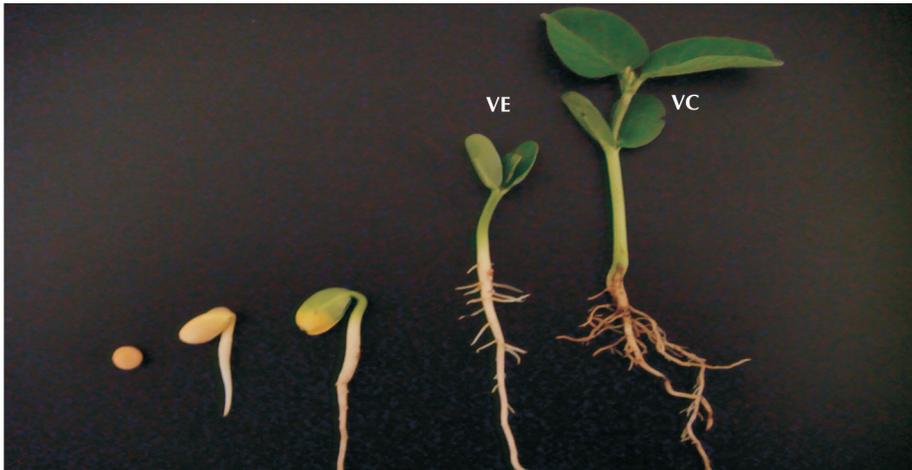


Figura 1. Germinação-emergência da soja, com caracterização dos estádios de emergência (VE) e cotiledonar (VC) das plântulas.

Tabela 1. Descrição dos estádios vegetativos da soja.

Estádio	Subtítulo	Descrição
VE	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo (Figura 1).
VC	Estádio cotiledonar	Folhas unifolioladas com as margens não mais se tocando (Figura 1).
V1	Primeiro nó	Folhas unifolioladas desenvolvidas.
V2	Segundo nó	Folha trifoliolada desenvolvida no nó acima das folhas unifolioladas (Figura 2).
V3	Terceiro nó	Três nós do caule com folhas desenvolvidas começando com o nó das folhas unifolioladas.
Vn	"n" nó	"n" número de folhas desenvolvidas começando com o nó das folhas unifolioladas.

Somente os nós do caule devem ser considerados na identificação do estágio. Em caso de quebra ou outro dano que interfira no desenvolvimento normal do caule da planta, deve-se eliminá-la da leitura e substituí-la por outra em estágio de desenvolvimento semelhante.

3.1.1. Monitoramento no período vegetativo ou pré-florescimento

Normalmente, no período vegetativo ou pré-florescimento são realizadas quatro amostragens, aos 10, 20, 30 e 40 dias após a emergência (DAE).

↳ **Objetivos:**

A amostragem nesta etapa objetiva determinar a população de plantas, a nodulação, o vigor das plantas e o potencial de rendimento da lavoura com base na matéria seca acumulada por área, o grau de estresse ocorrido e a necessidade de aplicação, por exemplo, de irrigação, e, se não foram feitos, o tratamento e a inoculação de sementes no ano seguinte.

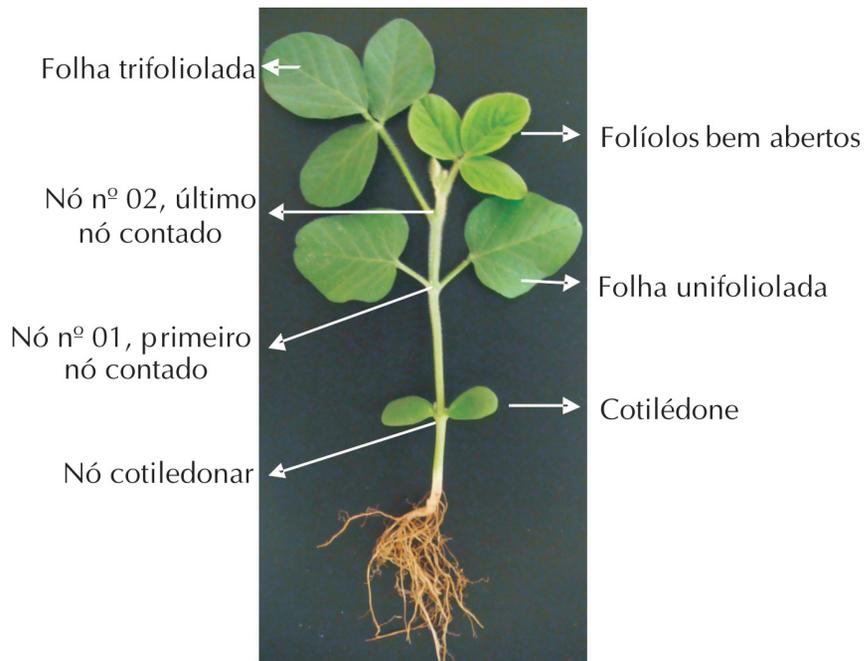


Figura 2. Planta de soja no estágio V2 com a identificação de suas estruturas anatômicas.

↳ Procedimentos:

- ✓ Anotar a data da amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra, no mínimo em dois locais, para cada situação uniforme de lavoura (em geral, cada amostra representa 5 a 10 hectares).
- ✓ Determinar o estágio de desenvolvimento (Costa & Marchezan, 1982).
- ✓ Cortar as plantas rente ao solo.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ Medir cada planta, em centímetros, do corte até a parte terminal do caule.
- ✓ Contar os nós do caule incluindo o nó cotiledonar.
- ✓ Determinar a área foliar (AF) de cada planta.
- ✓ Determinar a massa seca (MS) de folhas.
- ✓ Determinar a MS das plantas.
- ✓ Determinar a MS por unidade de área.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 1.
- ✓ Calcular as médias das observações.
- ✓ Com os dados primários, calcular o índice de área foliar (IAF), dividindo a área foliar (AF) pela área de superfície de solo amostrada (S).

$$IAF = AF/S$$

A partir da segunda amostragem é possível calcular parâmetros fisiológicos, como a taxa de crescimento da parte aérea, raízes e cultura.

↳ Definições:

1. Nó cotiledonar – é o nó onde estão localizados os cotilédones; é o nó mais próximo da superfície do solo (Figura 2).
2. Nó das folhas unifolioladas – é o segundo, a partir da superfície do solo (Figura 2).
3. Folha completamente desenvolvida – uma folha é considerada desenvolvida quando as margens dos folíolos da folha do nó imediatamente superior não estejam se tocando (Figura 2).

Planilha 1. Tabulação de dados no período vegetativo ou pré-florescimento¹.
DAE:

Planta número	1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)								
Nós do caule								
Área foliar (cm ²)								
MS ^{2*} (g)	Folhas							
	Caule							
	Ramos							
	Total							
Nódulos ³	Número							
	MS							

¹ Amostragens aos 10, 20, 30 e 40 dias após a emergência (DAE).

^{2*} Matéria seca em estufa ventilada, a 65°C, até peso constante.

³ Na leitura dos 30 dias.

4. Caracterização dos estádios reprodutivos

A determinação dos estádios reprodutivos também é feita utilizando-se a identificação das estruturas reprodutivas (flores e legumes) dos nós do caule. A designação do estádio é indicada pela letra "R", acompanhada de um número. O período reprodutivo compreende florescimento, desenvolvimento dos legumes, desenvolvimento de grãos e maturação (Tabela 2 e Figura 3). Cada uma dessas fases é constituída por dois estádios. Normalmente, no período reprodutivo são realizadas amostragens em R2, R3, R4, R5, R6, R7 e R8 para determinar componentes do crescimento e do rendimento de grãos. O potencial de rendimento de grãos num desses estádios é determinado a partir dos componentes número de legumes/área com um, dois, três e sem grãos e o peso médio dos grãos em legumes com um, dois e três grãos obtidos na maturação de colheita. Estes dados são extrapolados para calcular o potencial de rendimento de acordo com as estruturas reprodutivas presentes em cada estádio avaliado, considerando-se que todas as estruturas atingiriam a maturação de colheita (Costa, 1993). Ou, então, pode-se determinar o número de estruturas reprodutivas em cada estádio e multiplicar pelo número médio de grãos/legume e peso médio de grãos da cultivar que está sendo amostrada que, normalmente, são encontrados na descrição da cultivar.

Tabela 2. Descrição dos estádios reprodutivos da soja.

Estádio	Subtítulo	Descrição
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule (Figura 3a).
R2	Florescimento pleno*	Uma flor aberta em um dos dois últimos nós do caule com folha desenvolvida.
	Florescimento**	Flores nos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 3b).
R3	Início da formação de legumes	Um legume com 5 mm num dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 3c).
R4	Formação de legumes	Um legume com 2 cm num dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 3d).
R5	Início do enchimento de grãos	Grãos com 3 mm num legume dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 3e).
R6	Máximo volume de grãos	Legume contendo ao menos um grão verde que ocupa toda a cavidade, num dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 3f).
R7	Maturação fisiológica	Um legume normal, no caule, que atingiu a cor de legume maduro (Figura 3g).
R8	Maturação	95% dos legumes atingiram a cor de legume maduro (perda total de clorofila) (Figura 3h).

* Definição original de Fehr & Caviness, 1977.

** Adaptação sugerida por Costa & Marchezan, 1982.

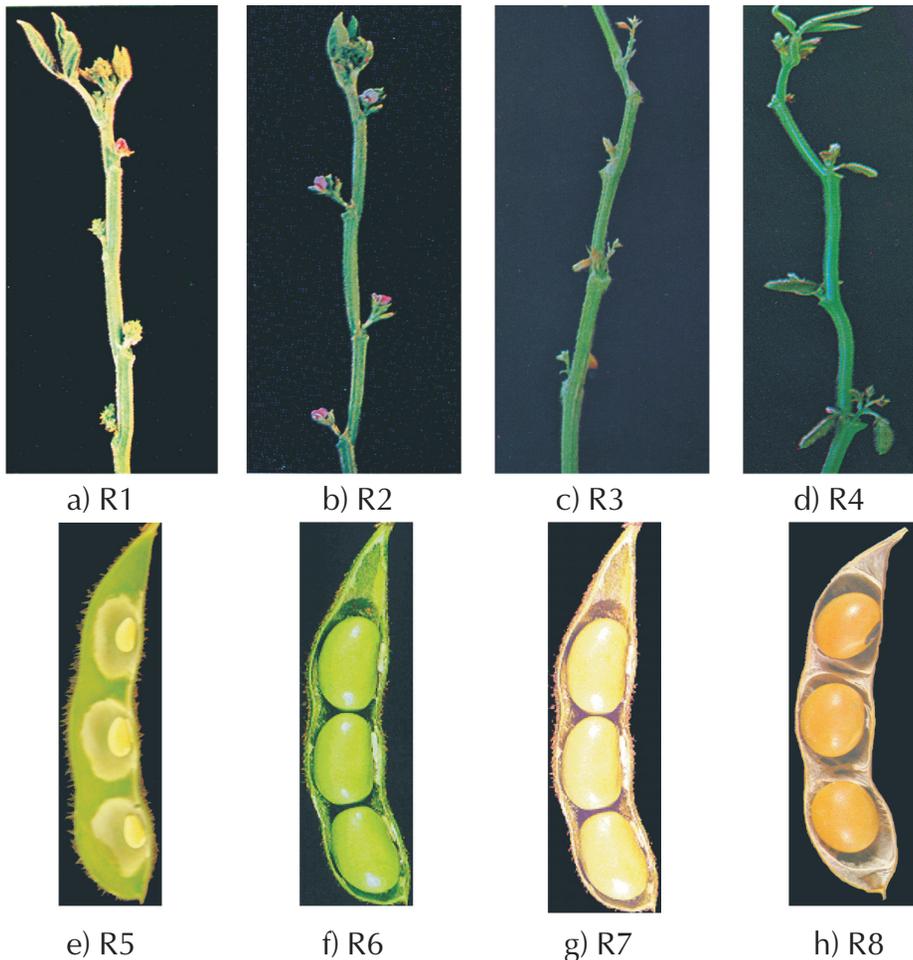


Figura 3. Estádios reprodutivos da soja: a) R1 – Início do florescimento; b) R2 – Florescimento; c) R3 – Início da formação de legumes; d) R4 – Formação de legumes; e) R5 – Início do enchimento de grãos; f) R6 – Máximo volume de grãos; g) R7 – Maturação fisiológica; e h) R8 – Maturação.

4.1. Monitoramento no florescimento (R2)

↳Objetivos:

Verificar o desenvolvimento e o vigor das plantas; quantificar o surgimento de ramos e flores. Determinar a matéria seca das folhas, caule e ramos, acumulada pelas plantas até este estágio. Especificar os parâmetros fisiológicos (taxas de crescimento, expansão foliar, etc.). Determinar o potencial de rendimento com base no número de flores.

↳ Procedimentos:

- ✓ Anotar a data da amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ De cada planta medir a estatura, contar o número de nós do caule e ramos, determinar a área foliar, quantificar e qualificar (primários ou secundários) os ramos e contar o número de flores.
- ✓ Determinar a MS das folhas, do caule e dos ramos.
- ✓ Determinar a MS total por unidade de área.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 2 e calcular as médias.
- ✓ Calcular o IAF e os parâmetros fisiológicos.
- ✓ Calcular o potencial de rendimento.

↳ Definição:

1. Ramo – estrutura lateral com pelo menos dois nós.

Planilha 2. Tabulação de dados no florescimento (R2).
DAE¹:

Planta número	1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)								
Nós do caule								
Área foliar (cm ²)								
Ramos	Número							
	Nós							
	Comprimento (cm)							
Flores (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
MS ^{2*} (g)	Folhas							
	Caule							
	Ramos							
	Total ³							

¹ Dias após a emergência.

^{2*} Matéria seca.

³ A existência de 200 g/m² ou mais de MS total da parte aérea das plantas é indicativa de lavoura em condições de produzir rendimento elevado.

4.2. Monitoramento no início da formação de legumes (R3)

↳ Objetivos:

Determinar como está ocorrendo o desenvolvimento das plantas pelos parâmetros fisiológicos, crescimento do caule e dos ramos e a produção de estruturas reprodutivas, como flores e legumes.

↳ Procedimentos:

- ✓ Anotar a data de amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ De cada planta medir a estatura, determinar a área foliar, contar o número de nós do caule e dos ramos, contar o número de ramos, medir o comprimento dos ramos, quantificar o número de flores e legumes no caule e nos ramos.

Planilha 3. Tabulação de dados no início da formação de legumes (R3).
DAE¹:

Planta número	1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)								
Nós do caule								
Área foliar (cm ²)								
Ramos	Número							
	Nós							
	Comprimento (cm)							
Flores (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
Legumes (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
MS ^{2*} (g)	Folhas							
	Caule							
	Ramos							
	Legumes							
	Total							

¹ Dias após a emergência.

^{2*} Matéria seca.

- ✓ Determinar a MS das folhas, dos legumes, do caule e dos ramos.
- ✓ Determinar a MS total por unidade de área.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 3 e calcular as médias.
- ✓ Calcular o IAF e os parâmetros fisiológicos.

4.3. Monitoramento na formação de legumes (R4)

↳Objetivos:

Continua importante a estimativa do vigor das plantas e da lavoura através dos parâmetros fisiológicos, crescimento do caule e dos ramos, do acúmulo de matéria seca, bem como da produção de flores e legumes.

↳Procedimentos:

- ✓ Anotar a data de amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ De cada planta medir a estatura, determinar a área foliar, contar o número de nós do caule e dos ramos, contar o número de ramos, medir o comprimento dos ramos, quantificar o número de flores e legumes no caule e nos ramos.
- ✓ Determinar a MS das folhas, do caule, dos ramos e dos legumes.
- ✓ Determinar a MS total por unidade de área.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 4 e calcular as médias.
- ✓ Calcular o IAF e os parâmetros fisiológicos.

Planilha 4. Tabulação de dados na formação de legumes (R4).

DAE¹:

Planta número	1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)								
Nós do caule								
Área foliar (cm ²)								
Ramos	Número							
	Nós							
	Comprimento (cm)							
Flores (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
Legumes (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
MS ^{2*} (g)	Folhas							
	Caule							
	Ramos							
	Legumes							
	Total							

¹ Dias após a emergência.

^{2*} Matéria seca.

4.4. Monitoramento no início do enchimento de grãos (R5)

↳ Objetivos:

1. Determinar o vigor das plantas pelo crescimento do caule e dos ramos, pelo acúmulo de matéria seca, bem como pelos parâmetros fisiológicos. As plantas devem estar em condições de, através das folhas, fazendo fotossíntese, fornecer reservas necessárias para o enchimento de grãos.
2. Verificar e quantificar a nodulação das raízes.
3. Com o número de flores e legumes, calcular o potencial de rendimento.

↳ Procedimentos:

- ✓ Anotar a data de amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra.
- ✓ Atenção: nesta amostragem retirar as plantas com as raízes para avaliação e quantificação da nodulação.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ De cada planta medir a estatura, determinar a área foliar, contar o número de nós do caule e dos ramos, contar o número de ramos, medir o comprimento dos ramos, quantificar o número de flores e legumes no caule e nos ramos.
- ✓ Determinar a MS das folhas, do caule, dos ramos e dos legumes (com os grãos).
- ✓ Determinar a MS total por unidade de área.
- ✓ Contar o número de nódulos e determinar a MS.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 5 e calcular as médias.
- ✓ Calcular o IAF e os parâmetros fisiológicos.
- ✓ Calcular o potencial de rendimento.

Observações:

Aproveitar as plantas amostradas, retirando-as com as raízes para observar, qualificar e quantificar a nodulação. Cavar, com uma pá, até a metade das fileiras, em ambos os lados das plantas da amostra. Se o solo estiver muito seco, molhar a área a ser amostrada, com algum tempo de antecedência. Dessa forma, a perda de nódulos é mínima.

Se houver tempo e interesse, em laboratório, os nódulos podem ser separados por tamanho. Podem também ser cortados e classificados de acordo com a coloração interna, permitindo a avaliação qualitativa da nodulação. Pode-se também separar os nódulos presentes na raiz principal e nas laterais, para atender a algum objetivo específico.

Planilha 5. Tabulação de dados no início do enchimento de grãos (R5).
DAE¹:

Planta número	1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)								
Nós do caule								
Área foliar (cm ²)								
Ramos	Número							
	Nós							
	Comprimento (cm)							
Flores (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
Legumes (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
MS ^{2*} (g)	Folhas							
	Caule							
	Ramos							
	Legumes e grãos							
	Total ³							
Nódulos	Número							
	MS (g)							

¹ Dias após a emergência.

^{2*} Matéria seca.

³ A existência de 600 g/m² ou mais de MS total da parte aérea das plantas é indicativa de lavoura em condições de produzir rendimento elevado.

4.5. Monitoramento no máximo volume de grãos (R6)

↳ Objetivos:

1. Determinar o vigor das plantas e o potencial de rendimento da lavoura.
2. Verificar a produção e fixação de legumes.
3. Determinar a população média de plantas da lavoura. Com este dado e o número médio de legumes por planta, é possível fazer estimativa do potencial de rendimento da lavoura.

↳ Procedimentos:

- ✓ Anotar a data de amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ De cada planta medir a estatura, determinar a área foliar, contar o número de nós do caule e dos ramos, contar o número de ramos, medir o comprimento dos ramos, quantificar o número de legumes no caule e nos ramos.
- ✓ Determinar a MS das folhas, do caule, dos ramos e dos legumes (com os grãos).
- ✓ Determinar a MS total por unidade de área.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 6 e calcular as médias.
- ✓ Calcular o IAF e os parâmetros fisiológicos.

Planilha 6. Tabulação de dados no máximo volume de grãos (R6).
DAE¹:

Planta número	1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)								
Nós do caule								
Área foliar (cm ²)								
Ramos	Número							
	Nós							
	Comprimento (cm)							
Legumes (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
Grãos (n ^o)	Caule							
	Ramos							
	Total							
MS ^{2*} (g)	Folhas							
	Caule							
	Ramos							
	Legumes e grãos							
	Total							

¹ Dias após a emergência.

^{2*} Matéria seca.

4.6. Monitoramento na maturação fisiológica (R7)

↳ Objetivos:

1. Determinar o vigor das plantas e o desenvolvimento da lavoura.
2. Verificar a fixação de legumes.
3. Determinar o potencial de rendimento da lavoura e comparar com a amostragem de R6 (máximo volume de grãos).

↳ Procedimentos:

- ✓ Anotar a data de amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ De cada planta medir a estatura, contar o número de nós do caule e dos ramos, contar o número de ramos, medir o comprimento dos ramos, quantificar o número de legumes no caule e nos ramos.

Planilha 7. Tabulação de dados na maturação fisiológica (R7).

DAE¹:

Planta número	1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)								
Nós do caule								
Ramos	Número							
	Nós							
	Comprimento (cm)							
Legumes (nº)	Caule							
	Ramos							
	Total							
Grãos (nº)	Caule							
	Ramos							
	Total							
MS ^{2*} (g)	Folhas							
	Caule							
	Ramos							
	Legumes e grãos							
	Total							

¹ Dias após a emergência.

^{2*} Matéria seca.

- ✓ Determinar a MS das folhas, do caule, dos ramos e dos legumes (com os grãos).
- ✓ Determinar a MS total por unidade de área.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 7 e calcular as médias.
- ✓ Calcular os parâmetros fisiológicos.

4.7. Monitoramento na maturação de colheita (R8)

↳ Objetivos:

1. Fazer a estimativa do rendimento, pela determinação da população de plantas e pelos demais componentes do rendimento.
2. Pelo percentual de fertilidade de nós, legumes e grãos, determinar a diferença entre o rendimento obtido e o potencial de rendimento.

↳ Procedimentos:

- ✓ Anotar a data de amostragem em DAE.
- ✓ Escolher 10 plantas típicas por amostra.
- ✓ Medir a área ocupada pelas 10 plantas e a distância entre as fileiras.
- ✓ De cada planta medir a estatura, contar o número de nós do caule e dos ramos, contar o número de ramos, medir o comprimento dos ramos, quantificar o número de legumes no caule e nos ramos.
- ✓ Determinar a MS das folhas, do caule, dos ramos, legumes e dos grãos.
- ✓ Determinar a MS total por unidade de área.
- ✓ Contar o número de plantas por unidade de área, para determinação da população final.
- ✓ Transferir os dados para a Planilha 8 e calcular as médias.
- ✓ Determinar os componentes do rendimento.
- ✓ Determinar o número de nós e legumes férteis no caule e nos ramos.

↳ Definições:

1. Nó fértil – nó que tenha, pelo menos, um legume com, pelo menos, um grão de tamanho normal (tamanho característico da cultivar).

2. Legume fértil – legume que apresente, pelo menos, um grão de tamanho normal.

3. ICa – Índice de colheita aparente – quociente entre o peso seco de grãos por unidade de área ou por planta, ou ainda, por amostra, e a MS da parte aérea (incluindo legumes e grãos).

Planilha 8. Tabulação de dados na maturação (R8).

DAE¹:

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Estatura (cm)									
Nós do caule	Total								
	Férteis								
Ramos	Número								
	Nós	Total							
		Férteis							
Comprimento (cm)									
Legumes (n ^o)	Caule	Total							
		Férteis							
	Ramos	Total							
		Férteis							
	Planta	Total							
		Férteis							
MS ² (g)	Caule								
	Ramos								
	Total								
MS de grãos (g)	Caule								
	Ramos								
	Total								
ICa ³	Caule								
	Ramos								
	Total								

¹ Dias após a emergência.

² Matéria seca.

³ Índice de colheita aparente

A determinação da matéria seca (MS) de grãos por área através de seus componentes pode ser realizada por meio da seguinte fórmula:

$$\text{MS de grãos (kg/ha)} = \text{plantas/m}^2 \times \text{MS de grãos por planta (g)} \times 10,$$

onde 10 é uma constante resultante da transformação de m² para ha e de g para kg.

4.8. Quantificação de nós férteis e retenção de estruturas reprodutivas

A partir dos dados obtidos na amostragem de R8 são realizadas a quantificação de nós férteis e a retenção de estruturas reprodutivas nas plantas. Para isso são preenchidas planilhas:

Planilha 9. Nós férteis no caule.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Nós	Total								
	Férteis								
Fertilidade %									

Planilha 10. Nós férteis nos ramos.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Nós	Total								
	Férteis								
Fertilidade %									

Planilha 11. Retenção de flores no caule.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Flores	Total ¹								
	Férteis ²								
Retenção (%)									

¹ Usar os dados da amostragem em R2, R3, R4 e R5.

² Usar os dados da amostragem em R8.

Planilha 12. Retenção de flores nos ramos.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Flores	Total ¹								
	Férteis ²								
Retenção (%)									

¹ Usar os dados da amostragem em R2, R3, R4 e R5.

² Usar os dados da amostragem em R8.

Planilha 13. Retenção de legumes no caule.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Legumes	Total ¹								
	Retidos ²								
Retenção (%)									

¹ Usar os dados da amostragem em R3, R4 e R5.

² Usar os dados da amostragem em R8.

Planilha 14. Retenção de legumes nos ramos.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Legumes	Total ¹								
	Retidos ²								
Retenção (%)									

¹ Usar os dados da amostragem em R3, R4 e R5.

² Usar os dados da amostragem em R8.

Planilha 15. Retenção de flores na planta.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Flores	Total ¹								
	Retidas ¹								
Retenção (%)									

¹ Usar os dados das planilhas 11 e 12.

Planilha 16. Retenção de legumes na planta.

Planta número		1	2	3	4	...	10	Total	Média
Legumes	Total ¹								
	Retidos ¹								
Retenção (%)									

¹ Usar os dados das planilhas 13 e 14.

5. Interpretação dos resultados obtidos para o vigor e o desenvolvimento das plantas

5.1. Desenvolvimento vegetativo

O “vigor da planta” indica o crescimento potencial da planta de soja. Este índice usa o número de “nós” como medida de idade fisiológica da planta, pois esse parâmetro é pouco afetado por estresses ambientais. Porém, a estatura (elongação dos entre nós) da planta é muito sensível a estresses. Assim, para um mesmo número de nós no caule, a planta com melhor disponibilidade de P apresenta maior estatura que a planta que se desenvolveu com deficiência de P (Figura 3). As outras características avaliadas, número de nós e matéria seca, bem como sua variação ao longo do tempo, são medidas de vigor das plantas que compõem a lavoura.

Estresse associado com umidade, doenças, nematóides, nodulação deficiente, temperaturas baixas, compactação e deficiência de nutrientes diminuem o vigor. Quando o vigor é baixo, ou não está aumentando, a(s) causa(s) deve(m) ser identificada(s) e devem ser usadas práticas de manejo corretas (inoculação, controle de pragas, controle de moléstias, irrigação, adubação, descompactação, etc.) para garantir alto rendimento.

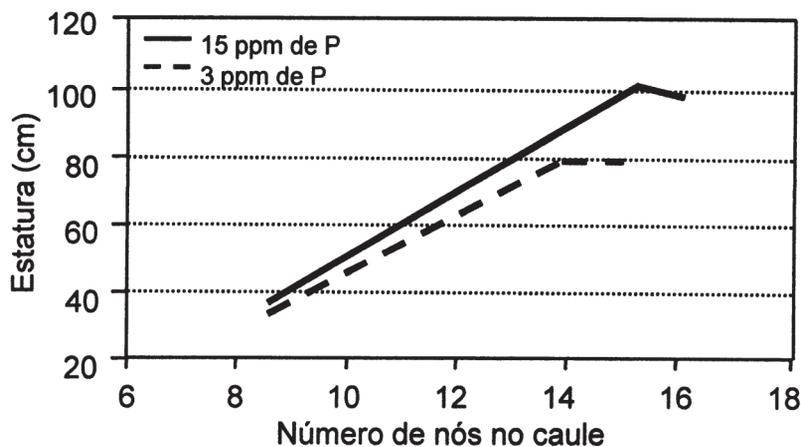


Figura 3. Estatura e número de nós no caule de plantas de soja, média de duas cultivares, sob dois níveis de fósforo no solo.

Fonte: Ventimiglia, 1996.

Vários estudos têm mostrado que a contribuição dos ramos para o rendimento da planta de soja pode chegar a 70%, em cultivares com hábito de crescimento determinado. Por esse motivo, o conhecimento do desenvolvimento das ramificações é de suma importância para alcançar rendimentos elevados. Não só o número de ramos é importante, mas também o comprimento (possibilidade de alcançar o topo do dossel e captar luz), o número de nós (pontos de aparecimento de estruturas reprodutivas), bem como o vigor dos ramos (quantidade de matéria seca acumulada) se constituem em fatores importantes para alcançar o potencial de rendimento.

5.2. Retenção de estruturas reprodutivas

Não só a formação de estruturas reprodutivas (flores, legumes e grãos) é importante para a obtenção de rendimentos elevados, mas também a fixação dessas estruturas, no caso de flores e legumes, e expressão máxima do potencial do tamanho e densidade, no caso dos grãos.

A manutenção e a expressão máxima das estruturas vegetativas e reprodutivas das plantas são dependentes das condições encontradas pela lavoura durante o desenvolvimento. Essas condições, por sua vez, podem ser modificadas por práticas de manejo adequadas, aplicadas no momento oportuno.

5.2.1. Retenção de flores

Em torno de 80% das flores formadas pela planta de soja são abortadas, não se transformando em legumes. Assim, são formadas flores suficientes para a obtenção de rendimentos elevados. O que deve ser evitado é a perda excessiva de flores. Condições de umidade, temperatura e deficiência de nutrientes são os principais responsáveis pela perda de flores.

O fósforo e o potássio são importantes no desenvolvimento das raízes; o molibdênio auxilia na nodulação; o nitrogênio e o boro são fundamentais para a fixação de flores. Esses são apenas alguns exemplos de como a nutrição da planta é fundamental na determinação do rendimento.

Para manter a planta em condições adequadas de hidratação, pode-se, sempre que possível, lançar mão da irrigação. A semeadura direta, com o solo sempre mantido com cobertura, é outro meio eficiente de conservação de água no solo. Também deve-se fazer um exame do solo para determinar a existência de camada compactada, o que pode comprometer o desenvolvimento normal das raízes. Analisar o solo em maiores profundidades para detectar fatores ou condições (elementos tóxicos livres, como alumínio e manganês; lençol freático muito superficial, por exemplo) que possam impedir ou restringir o desenvolvimento das raízes.

Incidência de insetos e/ou doenças atacando as raízes são dois fatores que influem no desenvolvimento geral das plantas de soja. No caso de várzeas, particularmente, deve-se providenciar drenagem adequada da lavoura.

5.2.2. Retenção de legumes

Praticamente tudo o que influi na retenção de flores tem o mesmo efeito sobre a quantidade de legumes que permanecem na planta.

Como sempre, os vários fatores estão interligados. O nitrogênio e o potássio são importantes na retenção de legumes. Por sua vez, o cálcio, o enxofre e o molibdênio auxiliam na nodulação e na fixação biológica de nitrogênio. O cálcio é fundamental no desenvolvimento de raízes.

Nunca é demais lembrar que a hidratação adequada da planta e o fornecimento de nutrientes dependem da umidade disponível no solo.

5.2.3. Enchimento de grãos

A produção de maior número possível de grãos vai ser o fator final determinante do rendimento.

Para o enchimento efetivo dos grãos, a planta deve estar com o aparato fotossintético (folhas do dossel) funcionando adequadamente, o que depende em grande parte do nitrogênio, que, por sua vez, depende de nodulação e fixação eficiente de nitrogênio.

Além da função importante dos outros elementos, o fósforo, o potássio e o zinco auxiliam no amadurecimento e na qualidade dos grãos. O controle de percevejos é outro fator primordial na obtenção de grãos de qualidade.

Novamente, o funcionamento adequado de todos esses processos depende da disponibilidade de água no solo para o suprimento da planta, fazendo com que ela permaneça com um grau adequado de hidratação durante a maior parte de tempo possível, maximizando o metabolismo da planta.

6. Obtenção de gráficos e cálculo de parâmetros de desenvolvimento

Colocar em forma de gráfico os dados obtidos em relação ao caule. Colocar em um eixo a estatura da planta em centímetros e no outro o número de nós no caule para determinar o vigor da planta e seguir o aumento em estatura e de nós durante o ciclo (Figuras 3 e 4). Proceder da mesma forma em relação ao acúmulo de matéria seca na planta toda (Figura 5). Plotar também nós e ramos no caule (Figura 6). O tempo deve ser expresso em dias após a emergência (DAE). Com os dados obtidos para os ramos, fazer gráficos entre o tempo e o número de ramos (Figura 7).

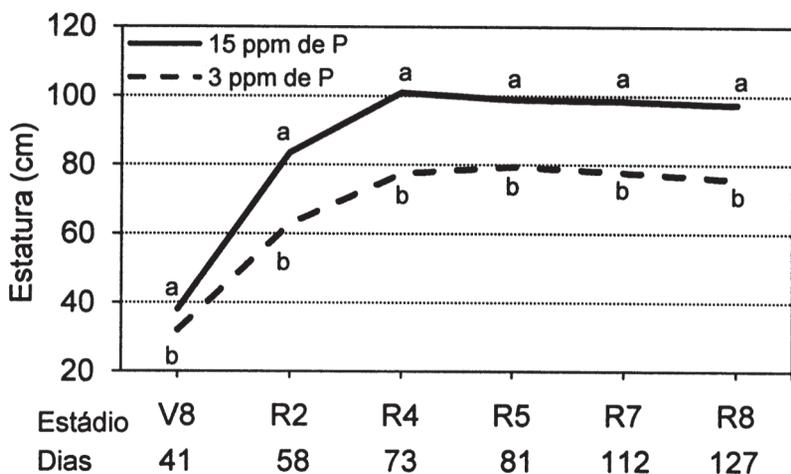


Figura 4. Desenvolvimento da estatura das plantas de soja, média de duas cultivares, sob dois níveis de fósforo no solo. Letras iguais para cada estágio fenológico indicam diferenças não significativas.
 Fonte: Ventimiglia, 1996.

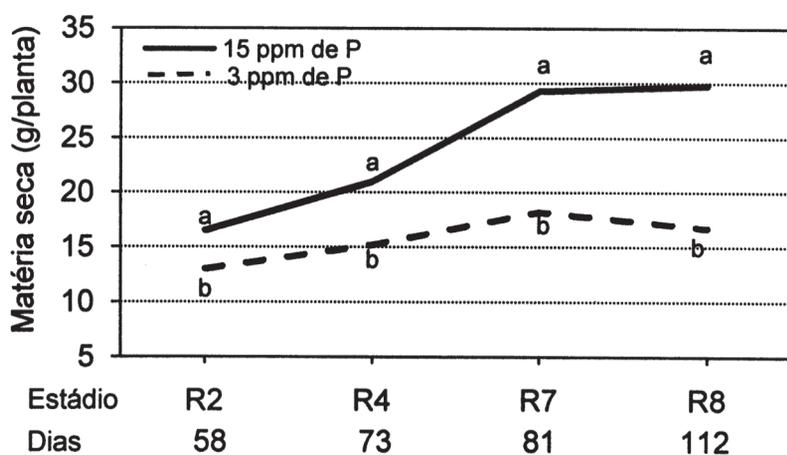


Figura 5. Matéria seca de planta de soja, média de duas cultivares, sob dois níveis de fósforo no solo. Letras iguais para cada estágio fenológico indicam diferenças não significativas.
 Fonte: Ventimiglia, 1996.

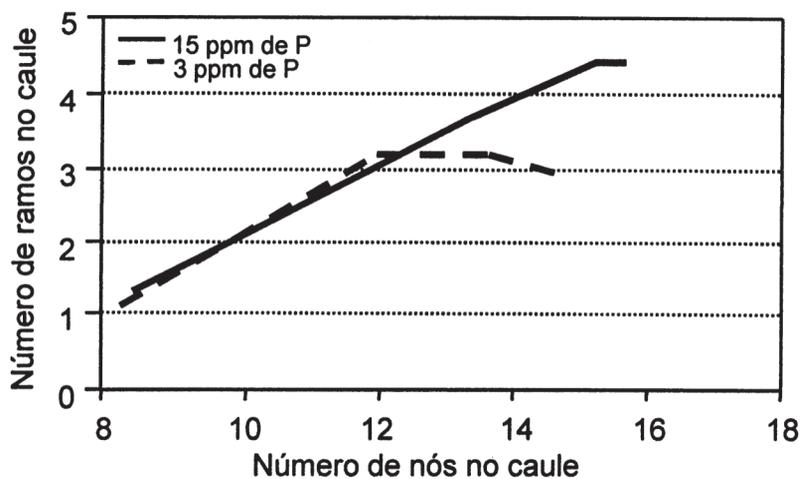


Figura 6. Número de nós no caule e o número de ramos no caule de plantas de soja, média de duas cultivares, sob dois níveis de fósforo no solo.
 Fonte: Ventimiglia, 1996.

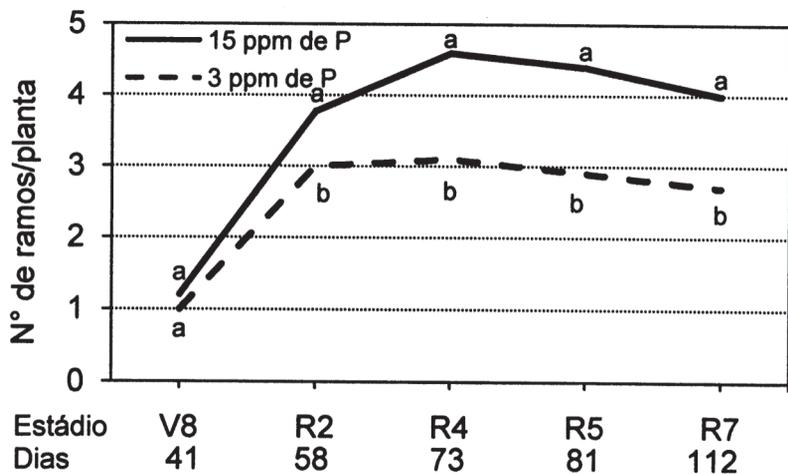


Figura 7. Número de ramos por planta de soja, média de duas cultivares, sob dois níveis de fósforo no solo. Não há diferença entre letras iguais para cada estágio fenológico.
 Fonte: Ventimiglia, 1996.

Com os dados coletados, através de fórmulas, é possível calcular parâmetros fisiológicos que descrevem a dinâmica do crescimento, como:

a) $TCC = dw/dt$

onde:

TCC = taxa de crescimento da cultura, expressa em g de MS/m²/dia.

dw = MS acumulada na parte aérea.

dt = duração (em dias) dos subperíodos de desenvolvimento (VE até R1, R1 até R2, e assim por diante). Um exemplo é mostrado na Figura 8.

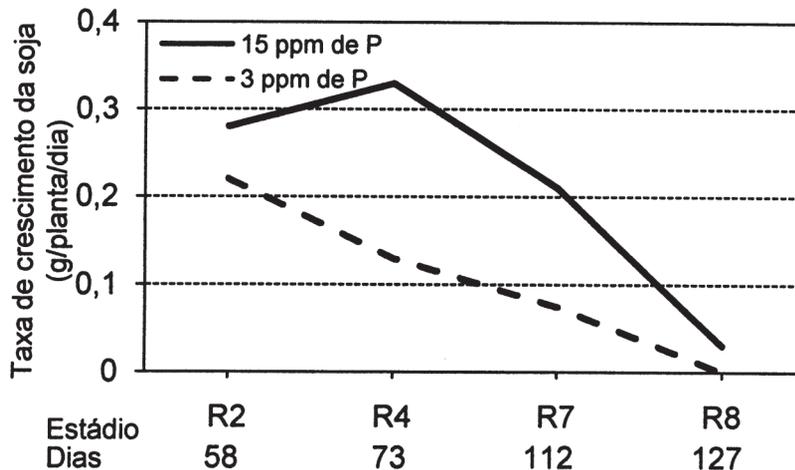


Figura 8. Taxa de crescimento da soja, média de duas cultivares, sob dois níveis de fósforo no solo.

Fonte: Ventimiglia, 1996.

b) $TEG = RG/D_{R5 \text{ a } R6}$

onde:

TEG = taxa de enchimento de grãos, expressa em g de grãos/m²/dia.

RG = rendimento de grãos

D_{R5 a R6} = número de dias do período de enchimento de grãos de R5 a R6.

7. Potencial de rendimento

O potencial de rendimento é um alvo móvel, ou seja, é variável de acordo com o local e as condições de ambiente. Pode ser determinado ao longo do ciclo da soja, sendo pontos de referência importantes o potencial no florescimento (R2) e no início do enchimento de grãos (R5) para comparar com o rendimento final (R8) (Figura 9).

O potencial estimado varia entre anos e com as variedades (Figura 10), com o teor de fósforo no solo (Figura 11), com o espaçamento entre fileiras (Figura 12) e com a disponibilidade hídrica (Figura 13). Com certeza também outros fatores determinam o potencial de rendimento e estão sendo objeto de estudo. Num futuro muito próximo, as lavouras de soja serão conduzidas de maneira mais tecnicada, proporcionando maior rendimento de grãos e retorno econômico ao agricultor.

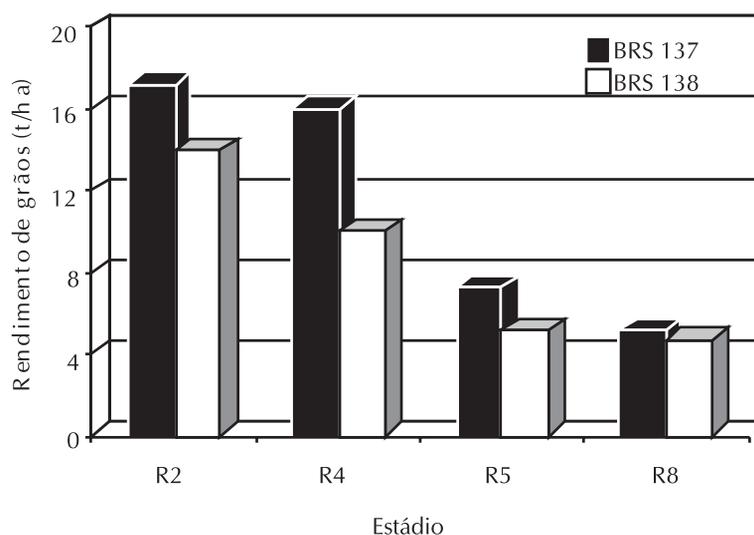


Figura 9. Potencial de rendimento em R2 (florescimento), R4 (formação de legumes), R5 (início do enchimento de grãos) e R8 (maturação) em duas variedades de soja. Fonte: Maheler, 2000.

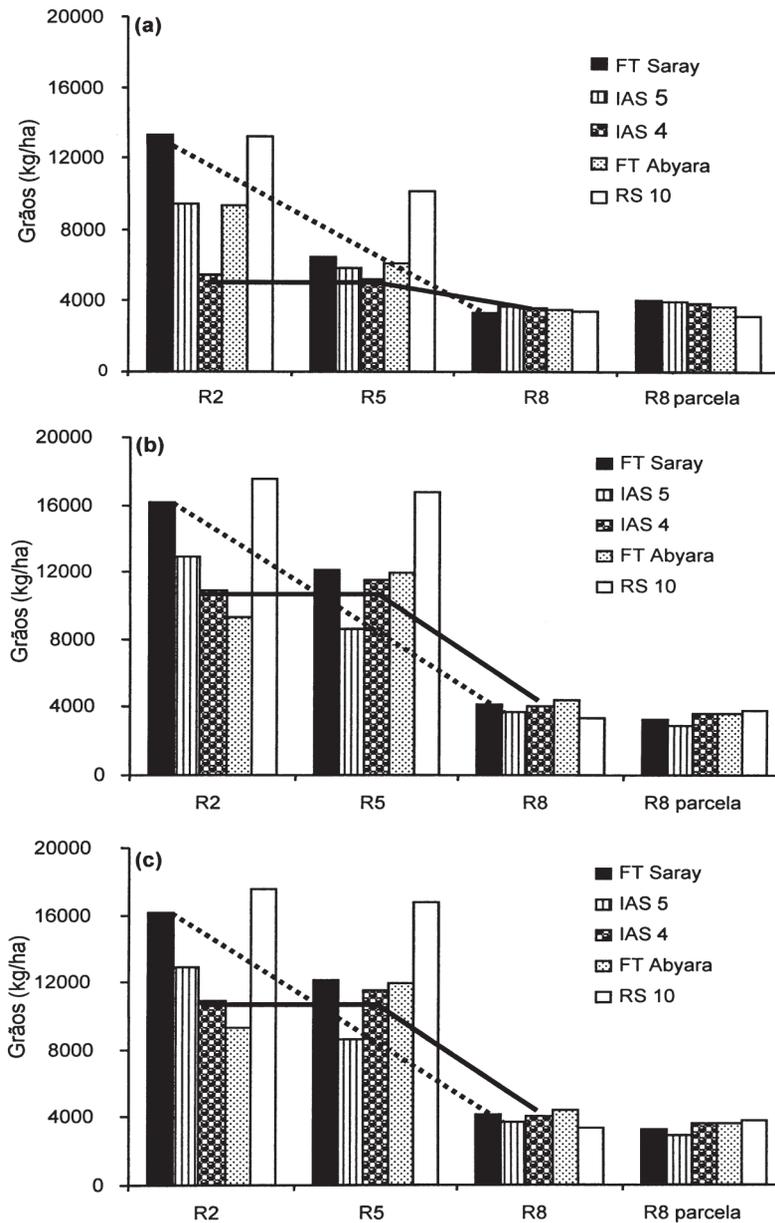


Figura 10. Potencial de rendimento de grãos no florescimento (R2), enchimento de grãos (R5) e maturação (R8), em cinco variedades de soja, nos anos agrícolas 1996/1997 (a), 1999/2000 (b) e 2000/2001 (c).
 Fonte: Pires, 2002.

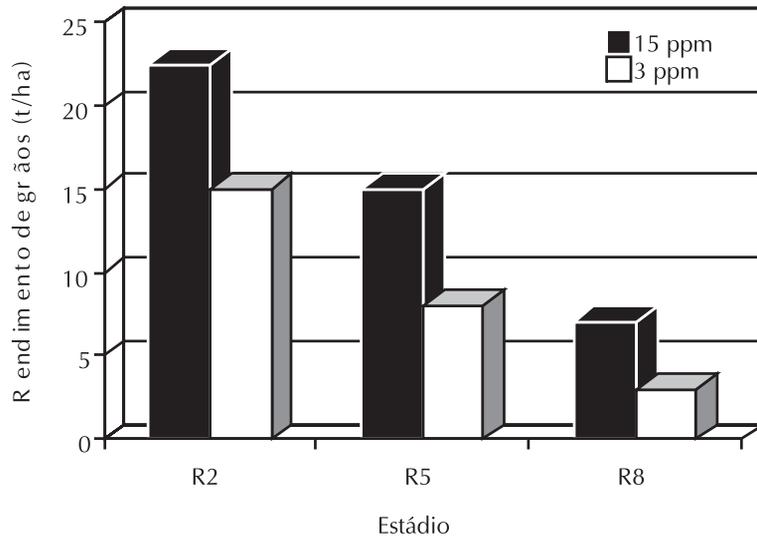


Figura 11. Potencial de rendimento da soja nos estádios R2 (florescimento), R5 (início do enchimento de grãos) e R8 (maturação) em relação ao teor de fósforo no solo. Fonte: Ventimiglia, 1996.

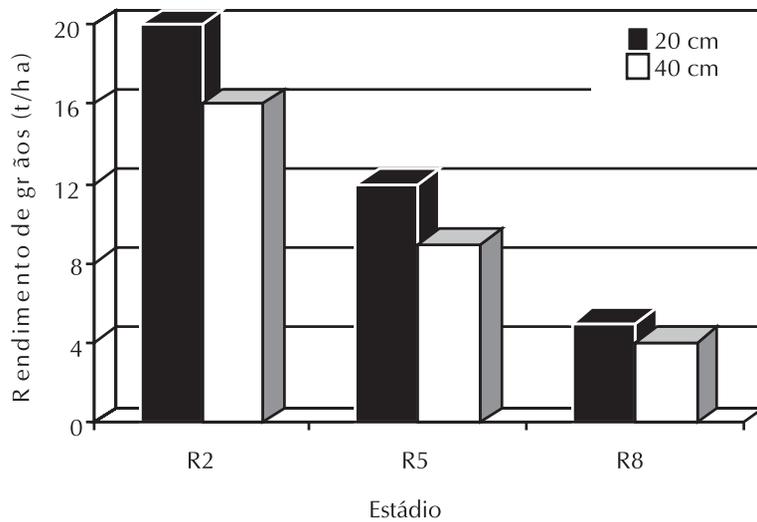


Figura 12. Potencial de rendimento da soja nos estádios R2 (florescimento), R5 (início do enchimento de grãos) e R8 (maturação) em relação ao espaçamento entre fileiras. Fonte: Ventimiglia, 1996.

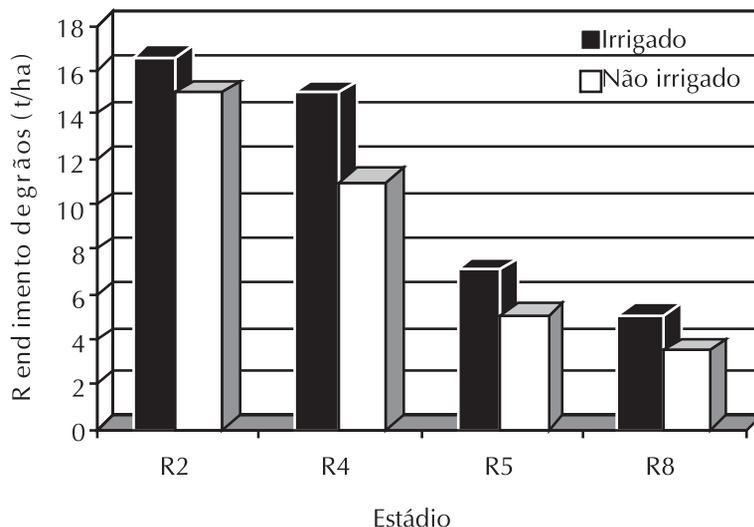


Figura 13. Potencial de rendimento da soja nos estádios R2 (florescimento), R4 (formação de legumes), R5 (início do enchimento de grãos) e R8 (maturação) em relação à disponibilidade hídrica.

Fonte: Maehler, 2000.

8. Referências

BRAGA, N.R.; COSTA, J.A. Avaliação de dez cultivares de soja pelo índice de colheita. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.18, p.253-260, 1983.

COLASANTE, L.O.; COSTA, J.A. Índice de colheita e rendimento biológico na comparação da eficiência de variedades de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.16, p.225-230, 1981.

COSTA, J.A.; MARCHEZAN, E. *Características dos estádios de desenvolvimento da soja*. Campinas: Fundação Cargill, 1982. 30p.

COSTA, J.A.; TEIXEIRA, M.C.C.; MARCHEZAN, E. Taxa e duração do acúmulo de matéria seca nos grãos de soja e sua relação com o rendimento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 26, p. 1577-1582, 1991.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. *Stages of soybean development*. Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11p.

MAHELER, A.R. *Crescimento e rendimento de duas cultivares de soja em resposta ao arranjo de plantas e regime hídrico*. Porto Alegre: UFRGS. 107p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Fitotecnia) Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. 2000.

MARCHEZAN, E.; COSTA, J.A. Atividade reprodutiva de três cultivares de soja por secção da planta e estádios de desenvolvimento. *Turrialba*, v.33, p.55-60, 1983.

MARCHEZAN, E.; COSTA, J.A. Produção e fixação de flores e legumes em três cultivares de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.18, p.129-136, 1983.

MOMEN, N.N.; CARLSON, R.E.; SHAW, R.W.; ARTMAND, O. Moisture stress effects on the yield components of two soybean cultivars. *Agronomy Journal*, v.71, p.86-90, 1979.

NAVARO JR., H.M. *Estratégias associadas à expressão do potencial de produção por planta em cultivares de soja*. Porto Alegre: UFRGS. 82p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Fitotecnia) Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. 1998.

PIRES, J.L.F. *Estimativa do potencial produtivo da soja e variabilidade espacial de área de produção*. Porto Alegre: UFRGS. 139p. Tese (Doutorado – Plantas de Lavoura) Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, UFRGS, Porto Alegre, RS. 2002.

PIRES, J.L.F. *Efeito da redução no espaçamento entre linhas da soja sobre o rendimento de grãos e seus componentes, em semeadura direta*. Porto Alegre: UFRGS. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Fitotecnia) Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. 1998.

RADFORD, P. J. Growth analysis formulae – their use and abuse. *Crop science*, v. 7, p. 171-175, 1967.

THOMAS, A.L. *Desenvolvimento e rendimento da soja em resposta a cobertura morta e à incorporação do gesso ao solo, com e sem irrigação*. Porto Alegre: UFRGS. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Fitotecnia) Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. 1992.

VENTIMIGLIA, L.A. *Morfologia e fisiogenia da soja afetadas pelo espaçamento entre fileiras e níveis de fósforo no solo*. Porto Alegre: UFRGS. 118p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Fitotecnia) Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. 1996.

Projeto Gráfico:

jadeditora
Edição Eletrônica
jadeditora@brturbo.com.br

Fotolitos e impressão:

EDITORA
Evangraf
LTD.A