



Soja

Manejo para alta
produtividade de grãos

André Luís Thomas & José Antonio Costa
Organizadores



Porto Alegre
2010

© 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

2010

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. Consequentemente, 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.

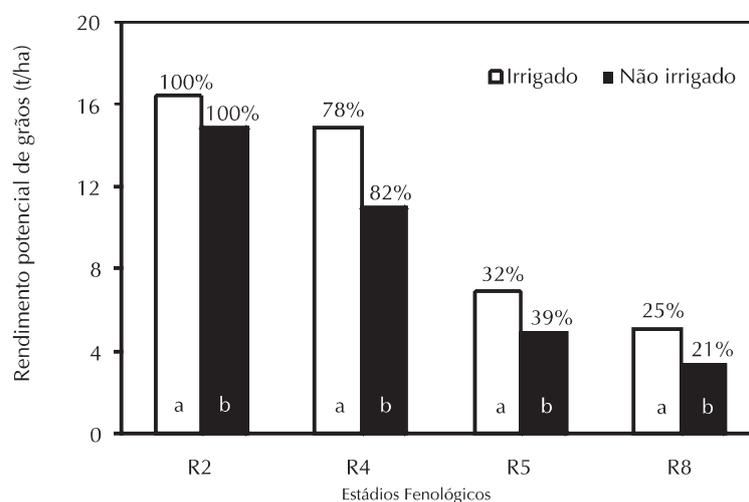


Figura 1. Estimativa do potencial de rendimento de grãos e em percentual do rendimento máximo nos estádios fenológicos do florescimento (R2), formação de legumes (R4), início de enchimento de grãos (R5) e maturação (R8) da soja. Médias com a mesma letra, em cada estágio fenológico, não diferem entre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

² Médias 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 contínuo 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; Vantoi 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 conseqüente 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 inundação 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 inundação, 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 conseqüente 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 $\text{O}_2^{\cdot-}$ (superóxido) nas raízes, aumentando a atividade da superóxido dismutase que cataliza a síntese de H_2O_2 ($\text{O}_2^{\cdot-} + \text{O}_2^{\cdot-} + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}_2$). 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 inundação do sistema radicular e de parte do caule da planta de soja faz com que ocorra interconexão 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 inundação. Além do que, no segmento do caule submerso ocorre o desenvolvimento de raízes adventícias com aerênquima a partir do segundo dia de inundação. 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 estão envolvidas no processo (Thomas, 2008).

Tabela 6. Área foliar, estatura do caule, comprimento da raiz principal, diâmetro e área da seção 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 inundação do sistema radicular, após 21 dias de inundação*.

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
Seção 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 Sulriogradense*, 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 Sulriogradense*, 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 agrônômicas da soja (*Glycine max* (L) Merr.). *Agronomia Sulriogradense*, 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 an 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 rendimento 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 Printes & 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.; UDWARDI, M.K. Structure, function and regulation of ammonium transportes 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 grãos 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. II. Conservation of seed growth rate. *Plant Physiology*, v.91, p.980-985, 1989.
- WIRÉN, 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.