**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Influência do manejo do nível freático e doses de nitrogênio em
culturas sob hipoxia no solo**

Jocelito Saccol de Sá

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem.**

**Piracicaba
2005**

Jocelito Saccol de Sá
Engenheiro Agrícola

**Influência do manejo do nível freático e doses de nitrogênio
em culturas sob hipoxia no solo**

Orientador:
Prof. Dr. **DÉCIO EUGÊNIO CRUCIANI**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem.**

Piracicaba
2005

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Sá, Jocelito Saccol de
Influência do manejo do nível freático e doses de nitrogênio em culturas sob
hipoxia no solo / Jocelito Saccol de Sá. - - Piracicaba, 2005.
167 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.
Bibliografia.

1. Drenagem agrícola 2. Fisiologia vegetal 3. Lentilha 4. Nutrição vegetal
5. Oxigênio – Deficiência 6. Soja 7. Trigo I. Título

CDD 635.658

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICO

À minha esposa Adriana Recart Romano pelo apoio, dedicação, companheirismo, incentivo e principalmente pelo seu amor. Sentimentos e atitudes que foram essenciais para a realização deste trabalho.

OFEREÇO

A meus pais Julieta S. de Sá (*in memoriam*) e Umbelino de Sá e a meus irmãos: Enilson, Enilda, Eronilda e Eduardo.

Agradecimentos

À Deus.

À Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz” – ESALQ/USP.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante o curso.

Ao Professor Décio Eugênio Cruciani, pela orientação, amizade, confiança e apoio incondicional dedicado durante a realização deste trabalho.

A todos os professores da Instituição, em especial aos professores Sérgio Nascimento Duarte, Jarbas Honório de Miranda; José Antônio Frizzzone; Rubens Duarte Coelho; Tarlei Arriel Botrel, Marcos V. Folegatti, Luiz Roberto Angelocci e Paulo L. Libardi pela amizade, sugestões e ensinamentos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural Sr. Antônio, César (*in memoriam*), Davilmar, Gilmar, Hélio, Juarez, Sandra, Osvaldo e Vanda, pela amizade e pelo auxílio indispensável durante o trabalho.

A todos os colegas do curso de pós-graduação pela amizade, ajuda e companheirismo.

Aos meus amigos Ariovaldo, Simone, Mi, Sérgio e Soraia pelos momentos de muita alegria e descontração.

A meu sogro e sogra Gilberto e Isabel Romano pelo apoio e carinho dedicado.

Aos meus sobrinhos e entes queridos.

Às pessoas que não estão mais conosco e que ficarão para sempre no nosso coração e,

Aos amigos Piracicabanos e a todos que ajudaram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 DESENVOLVIMENTO	13
2.1 Revisão bibliográfica.....	13
2.1.1 O excesso de água no solo.....	13
2.1.2 O nitrogênio em solo inundado	20
2.2 Material e métodos	25
2.2.1 Casa-de-vegetação.....	25
2.2.2 Parcelas experimentais.....	26
2.2.3 Características físicas e químicas do solo utilizado nos experimentos.....	27
2.2.4 Sistema de distribuição de água para as parcelas.....	30
2.2.5 Mecanismos utilizados para o controle do nível freático	30
2.2.6 Experimentos realizados.....	31
2.2.6.1 Experimento I - Lentilha	31
2.2.6.1.1 Implantação do experimento.....	32
2.2.6.1.2 Descrição dos tratamentos	33
2.2.6.1.3 Delineamento estatístico.....	35
2.2.6.2 Experimento II – Soja.....	36
2.2.6.2.1 Implantação do experimento.....	37
2.2.6.2.2 Descrição dos tratamentos	38
2.2.6.2.3 Delineamento estatístico.....	40
2.2.6.3 Experimento III – Trigo.....	40
2.2.6.3.1 Implantação do experimento.....	40
2.2.6.3.2 Descrição dos tratamentos	41
2.2.6.3.3 Delineamento estatístico.....	43
2.2.7 Manejo da irrigação	44
2.2.8 Parâmetros avaliados durante os experimentos	45
2.2.8.1 Altura de plantas	45

2.2.8.2 Área foliar e massa total das plantas	45
2.2.8.3 Taxa de crescimento absoluto (TCA).....	46
2.2.8.4 Análise dos teores de macro e micronutrientes no tecido foliar	46
2.2.8.5 Teor de proteína dos grãos.....	47
2.2.8.6 Determinação da porosidade livre de água no solo	47
2.2.8.7 Avaliação dos componentes de rendimento das culturas	47
2.2.8.8 Determinação da temperatura do ar e do solo.....	48
2.3 Resultados e discussão	49
2.3.1 Experimento I - Lentilha	49
2.3.1.1 Efeitos dos tratamentos na fenologia da cultura	49
2.3.1.2 Alterações morfofisiológicas ocasionadas pelo excesso de água no solo	52
2.3.1.3 Efeitos dos tratamentos na nutrição mineral das plantas.....	54
2.3.1.4 Efeito dos tratamentos na altura das plantas	57
2.3.1.5 Efeitos dos tratamentos na área foliar de plantas de lentilha.....	59
2.3.1.6 Efeitos dos tratamentos na massa seca total.....	63
2.3.1.7 Efeitos dos tratamentos nos componentes de rendimento da lentilha	68
2.3.2 Experimento II – Soja.....	72
2.3.2.1 Alterações fenológicas e morfofisiológicas ocasionadas pelos tratamentos	72
2.3.2.2 Efeitos dos tratamentos na absorção de nutrientes minerais	79
2.3.2.3 Efeitos dos tratamentos na altura de plantas de soja	84
2.3.2.4 Efeitos da inundação do solo na área foliar de plantas de soja	86
2.3.2.5 Efeitos dos tratamentos na parte aérea de plantas de soja	92
2.3.2.6 Respostas dos componentes de rendimento da soja aos tratamentos.....	96
2.3.2.7 Efeitos dos tratamentos nos teores de proteína de grãos de soja	107
2.3.3 Experimento III - Trigo	110
2.3.3.1 Efeitos dos tratamentos na aeração do solo	110
2.3.3.2 Respostas nutricionais das plantas de trigo.....	113
2.3.3.3 Efeito dos tratamentos na altura de plantas de trigo.....	118
2.3.3.4 Efeitos da saturação na área foliar de plantas de trigo	120
2.3.3.5 Efeitos dos tratamentos na massa seca total de plantas de trigo	124
2.3.3.6 Efeitos dos tratamentos na produção de plantas de trigo	130

3 CONCLUSÕES.....	139
REFERÊNCIAS	142

RESUMO

Influência do manejo do nível freático e de doses de nitrogênio em culturas sob hipoxia no solo

Em diversos países, extensas áreas agrícolas são afetadas por inundações temporárias que ocasionam significativos prejuízos à produção de alimentos. Os objetivos deste trabalho foram: a) avaliar os efeitos da exposição de plantas de lentilha (*Lens culinaris* Medik) ao estresse por excesso hídrico em relação ao manejo do nível freático; b) avaliar o comportamento de cultivares de soja (*Glycine max* L. Merrill) a hipoxia e à aplicação de nitrogênio na atenuação dos danos ocasionados pelo excesso hídrico e c) avaliar as respostas de plantas de trigo (*Triticum aestivum*, L.) à saturação hídrica, total ou parcial, da camada de solo correspondente à zona radicular da cultura. Em plantas de lentilha, o excesso de água no solo reduziu a expansão foliar, o acúmulo de biomassa, a produção de grãos e reduziu a concentração de N, K, Ca, Mn e Mg nas folhas e intensificou o processo de senescência foliar. As taxas de ascensão e de rebaixamento do nível freático de 15 e 30 cm dia⁻¹ influenciaram positivamente o desenvolvimento e a produção. Os danos mais drásticos foram ocasionados pela elevação e pelo rebaixamento do nível freático em 5 cm dia⁻¹. O efeito negativo da inundação do solo na produção de grãos foi reduzido em 21% pelo aumento da taxa de ascensão e de rebaixamento do nível freático de 5 para 30 cm dia⁻¹. A adição de 50 kg N ha⁻¹ não minimizou os danos ocasionados pela hipoxia. Em soja, a área foliar, o acúmulo de matéria seca, a produção e a qualidade dos grãos dos cultivares decresceram com o prolongamento da inundação do solo. Os teores foliares de N, K, Mg e Mn decresceram linearmente e a concentração de Fe aumentou com a inundação do solo. O cultivar FT-Abyara apresentou maior crescimento vegetativo e o cultivar CD205 maior produtividade e maior teor protéico. Os maiores danos à produção foram ocasionados pela inundação do solo por período superior a 48 h. A aplicação de 50 e 100 kg N ha⁻¹ aumentou o crescimento da parte aérea das plantas, a produção e a concentração de proteína dos grãos. O cultivar FT-Abyara apresentou melhores resultados à adição de N. A aplicação de N reduziu em 15% os danos causados pelo excesso de água no solo à produção de grãos. Em plantas de trigo, a saturação hídrica do solo intensificou a senescência das folhas, reduziu a produção de matéria seca, a taxa de crescimento da cultura e prejudicou a produção de grãos. Os efeitos ocasionados pela ocupação total dos poros do solo pela água foram mais severos para o desenvolvimento e a produção de grãos do que a saturação parcial dos poros pela água. O nível freático a 15 cm de profundidade minimizou em 30% os danos ocasionados pelo excesso de água no solo à produção de grãos. A aplicação de 50 kg N ha⁻¹ reduziu em 16% os danos ocasionados pela saturação hídrica do solo à produção de grãos.

Palavras-chave: plantas mesófitas, inundação temporária; deficiência de oxigênio

ABSTRACT

Effects of water table management and nitrogen supplies in crops under hypoxia conditions in soil

In many countries, extensive agricultural areas are affected by short-term waterlogging that cause significant damages to the crop yields. The objectives of this work were: a) to evaluate the stress effect of the soil water excess on lentil plants (*Lens culinaris* Medik) related to water table management; b) to evaluate the behavior of soybean cultivars (*Glycine max* L. Merrill) to hypoxia conditions and to the nitrogen supplying for reducing flood damages c) to evaluate wheat (*Triticum aestivum*, L.) responses to complete or partial soil water saturation in the root zone. On lentil plants the excess of water reduced the growth of the leaves, the dry matter and grain production and the concentration of N, K, Ca, Mn and Mg in leaves. Also the senescence process was increased. The elevation and lowering by 15 and 30 cm day⁻¹ affected positively the crop development and yield production. The most severe damage was induced by rate elevation of 5 cm day⁻¹ and drawdown of water table. The increasing of water table ascension and lowering rate from 5 to 30 cm day⁻¹ alleviated the damage effect on grain production in 21%. Hypoxia injuries were not minimized by a supplemental addition of 50 kg ha⁻¹ of nitrogen. The leaves area, shoot dry matter accumulation, the grain production and the grain protein concentration of soybean plants were reduced proportionally to the flooding duration. The N, K, Mg and Mn concentration in leaves decreased linearly while Fe concentration increased for the waterlogging duration. The soybean cultivar FT-Abyara showed the higher vegetative growth, while CD205 produced a greater grain yield and grain protein concentration. A flooding period of 48 h caused severe damage to grain yield. The leaf area, shoot growth, grain yield and grain protein increased with supplemental N application of 50 and 100 kg N ha⁻¹. The soybean cultivar FT-Abyara showed the best results due to the nitrogen supply. The N addition reduced the grain production damages by 15%. In wheat plants, the water excess increased leaves senescence, reduced dry matter and the growth rate and produced a significant decreasing on grain weight. The effects caused by total water saturation of soil pores were more severe to the plant growth and grain yield than those caused by partial water saturation, even for large periods. A water table at 15 cm depth minimized by 30% the harmful effects of water excess to the grain production. The application of 50 kg N ha⁻¹ reduced by 16% the damages on the crop yield caused by flooding.

Keywords: Mesophytes plants; short-term waterlogging; oxygen deficiency

1 INTRODUÇÃO

Inundações e enchentes não são eventos restritos às áreas urbanas. Em muitos países, extensas áreas agrícolas potencialmente produtivas são afetadas por inundações de durações variáveis, que inevitavelmente ocasionam significativas reduções na produção de alimentos.

Geralmente, os solos suscetíveis à inundação localizam-se próximos às planícies de rios e lagos e são comumente chamados de solos de várzea ou terras baixas. Entretanto, devido a sua formação em condições de hidromorfismo, tecnicamente recebem a denominação de solos hidromórficos.

Os solos hidromórficos apresentam uma elevada variabilidade das características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e hidromórficas, que originam diferentes classes de solos (Planossolos, Plintossolos, Gleis, Vertissolos e Aluviais). Conseqüentemente, tais solos requerem um manejo diferenciado e adaptado às suas limitações e às variações de suas aptidões de uso.

Contudo, a exploração agrícola desses solos dá-se basicamente pelo monocultivo de arroz irrigado, o que se tornou uma preocupação mundial devido a subutilização agrícola e econômica dessas áreas e o impacto ambiental ocasionado pelo uso intensivo da água.

Dentre as sugestões levantadas para a maximização do uso agrícola dessas áreas e redução do impacto ambiental oriundo da orizicultura está a rotação com culturas economicamente viáveis como feijão, milho, soja, trigo, hortaliças e outras. Porém, a introdução dessas culturas esbarra em problemas oriundos da drenagem deficiente, característica marcante dos solos hidromórficos.

Devido a essa característica, flutuações e elevações súbitas do lençol freático ocasionadas por chuvas intensas, cheias de rios e lagoas e pela irrigação excessiva são freqüentes. Nessas ocasiões, a disponibilidade de oxigênio no solo, para as plantas, pode variar desde os teores normais (normoxia), à deficiência (hipoxia) e até a ausência total de oxigênio (anoxia), afetando grande parte das culturas que exigem condições equilibradas de umidade e aeração do solo para o seu desenvolvimento.

Assim, são fundamentais condições adequadas de drenagem, que nem sempre são atendidas, pois, geralmente os sistemas de drenagem estão dimensionados para atender às necessidades da cultura do arroz e não às necessidades físico-hídricas que as plantas mesófitas requerem. Além disso, a necessidade freqüente de irrigações e a carência de informações a respeito do manejo da irrigação por superfície, somados aos problemas de sistematização da área são fatores que contribuem para o agravamento do problema.

Para uma exploração racional e sustentável dos solos hidromórficos, informações oriundas de trabalhos de pesquisa envolvendo estudos sobre a capacidade de adaptação e tolerância ao excesso de água no solo são de importância capital e necessárias. Atualmente, por meio da técnica de melhoramento genético é possível alterar a tolerância de cultivares ao excesso de água no solo, reduzindo as perdas de produtividade.

Porém, são fundamentais informações referentes a práticas agrícolas como manejo do solo e da cultura, do sistema de drenagem e de irrigação, controle da adubação e outras que possibilitem também a atenuação dos efeitos adversos ocasionados pela deficiência de oxigênio em solos hidromórficos.

Este trabalho foi fundamentado nas seguintes hipóteses: a) o controle da ascensão e do rebaixamento do nível freático no perfil do solo pode reduzir os efeitos prejudiciais do excesso de água no solo ao desenvolvimento e à produtividade das plantas; b) a aplicação suplementar de nitrogênio pode minimizar os danos à produtividade causados pela hipoxia temporária no solo; c) Os danos ocasionados pela hipoxia podem ser reduzidos pela drenagem parcial da água contida na camada de solo correspondente a zona radicular de plantas mesófitas.

Para validar estas hipóteses foram realizados três experimentos com as culturas de lentilha, soja e trigo, com objetivo geral de avaliar os efeitos do manejo do nível freático e o uso de adubação nitrogenada na recuperação de plantas mesófitas submetidas à inundação temporária do solo.

Especificamente, este trabalho teve como objetivos: a) avaliar os efeitos da exposição de plantas de lentilha (*Lens Culinaris* Medik) ao estresse por excesso hídrico em relação ao manejo do nível freático; b) avaliar o comportamento de cultivares de

soja (*Glycine max* L. Merrill) a períodos de hipoxia no solo e o efeito da aplicação de nitrogênio como atenuante dos danos ocasionados pela inundação temporária do solo durante o estágio de florescimento da cultura e c) avaliar as respostas de plantas de trigo (*Triticum aestivum*, L.) à saturação hídrica total ou parcial da camada de solo correspondente à zona radicular da cultura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 O excesso de água no solo

De uma maneira geral, as plantas para se desenvolverem necessitam de um ponto de equilíbrio entre a quantidade de água disponível no solo e o espaço ocupado pelo ar no solo.

A composição do ar no solo é semelhante à da atmosfera, porém, são observadas algumas diferenças, principalmente, nos teores de O_2 e CO_2 . No solo, a concentração de CO_2 é maior devido aos processos metabólicos. Já, a concentração de O_2 é menor do que na atmosfera devido ao consumo de microorganismos e do sistema radicular das plantas. Contudo, as concentrações desses elementos não são constantes. Os teores de O_2 e CO_2 podem variar de acordo com a distribuição das chuvas, as atividades biológicas do solo, a espécie cultivada, a profundidade e o tipo de solo, e as práticas de manejo e de cultivo (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1973; LARCHER, 2000).

Em solos bem drenados, a respiração aeróbia do sistema radicular das plantas e dos microorganismos consome cerca de 5 a 24 g O_2 m⁻² dia⁻¹ (JACKSON; DREW, 1984). Nessas condições, a transferência interna do O_2 das folhas para as raízes não é suficiente para suprir as necessidades de O_2 nos tecidos das raízes na maioria das plantas. Para evitar deficiências de O_2 ou excesso de CO_2 na rizosfera as trocas gasosas entre a atmosfera e o solo devem ocorrer rapidamente (REICHARDT, 1996).

O movimento dos gases entre a atmosfera e o solo resulta do fluxo de massa ocasionado por variações da temperatura, da pressão atmosférica, da velocidade, do vento e das precipitações, e também do fluxo por difusão (PONNAMPERUMA, 1984). Dentre estes processos, a difusão é considerada o principal mecanismo responsável pelo movimento dos gases entre os meios. Fatores como a compactação do solo, a incorporação de matéria orgânica e o excesso de água no solo podem afetar significativamente este intercâmbio (STEPNIEWSKI; GLINSKI; BALL, 1994).

Em solos hidromórficos, freqüentemente ocorrem inundações e oscilações da profundidade do lençol freático ocasionados por problemas de drenagem, precipitações intensas, cheias de rios e lagos e irrigações excessivas. Nessas condições, o espaço poroso do solo é totalmente preenchido pela água, interrompendo o intercâmbio gasoso existente entre a atmosfera e o solo. Isso porque as trocas gasosas em solos saturados são menores do que em solo não saturados, pois a difusão do oxigênio na água é 10.000 vezes mais lenta do que no ar (PATRICK; MAHAPATRA, 1968; SANCHEZ, 1976). Como consequência, ocorrem modificações nas propriedades físicas, químicas e bioquímicas do solo, que afetam de várias formas o desenvolvimento e a produtividade da planta (VOESENEK et al., 1992).

Com a interrupção do movimento dos gases entre o solo e atmosfera, são observadas na composição do ar no solo, reduções na concentração de O_2 disponível para as plantas e um aumento dos teores de CO_2 e de etileno (JACKSON; DREW, 1984; RODRIGUES; RODRIGUES; REIS, 1993).

Decréscimos da concentração de O_2 no solo podem afetar a respiração radicular e acarretar efeitos adversos ao desenvolvimento das plantas (HARRIS; VAN BAVEL, 1957). Nas revisões de Russell (1959) e Grable (1966) é citada uma forte relação entre a expansão radicular e a concentração de oxigênio no solo.

Em plantas de girassol, algodão e feijão submetidas a baixas concentrações de O_2 no solo, observou-se redução no crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (LETEY; STOLZY; BLANK, 1962). Também Aubertin e Kardos (1965) verificaram sérios danos ao desenvolvimento de plantas de milho submetidas a um nível de oxigênio abaixo de 10%.

No entanto, são observadas variações da limitação do crescimento das plantas em resposta à concentração de O_2 no solo. Em plantas de soja, o crescimento radicular não foi restringido até que a concentração de O_2 no solo atingisse níveis inferiores a 10% (HUCK, 1970). Yentur e Leopold (1976), verificaram que a taxa de crescimento do sistema radicular do cultivar de soja "Wayne", não foi afetada por níveis de O_2 abaixo de 2,5%, quando cultivada em câmara úmida. Plantas de milho submetidas a uma concentração de 1% de O_2 no solo por dois dias não apresentaram sintomas significativos em relação ao crescimento das plantas. Porém, para períodos superiores

a dois dias, severos danos às plantas foram observados (PURVIS; WILLIAMSON, 1972). O decréscimo da concentração de O_2 no solo de 15% para 2% em 48 horas de inundação do solo ocasionou sérios prejuízos ao desenvolvimento de plantas de ervilha (BELFORD et al., 1980). Em plantas de trigo, o crescimento radicular foi interrompido após 48h de inundação do solo devido à baixa concentração de O_2 no solo e reduziu substancialmente a produtividade de grãos (MEYER et al., 1985).

Segundo Jackson e Drew (1984) a redução da taxa de crescimento radicular é a primeira resposta ao estresse por excesso de água no solo. O metabolismo das raízes é rapidamente restringido quando a concentração de O_2 no solo diminui a níveis críticos, o que não ocorre na parte aérea das plantas. Na parte aérea, a assimilação e o metabolismo respondem lentamente à inundação do solo (MUSGRAVE; VANHOY, 1989). Deste modo, a deficiência de O_2 pode ser mais prejudicial ao crescimento radicular do que ao crescimento da parte aérea da planta. Em lentilha, a inundação do solo por doze dias reduziu a massa seca de raízes em 91% e a massa seca parte aérea em 47% (ASHRAF; CHISTI, 1993).

Igualmente ao consumo de oxigênio pelas plantas, o tempo necessário para que a concentração de O_2 no solo decaia a limites de deficiência (hipoxia) ou ausência total (anoxia) é muito variável. Essas variações devem-se principalmente às atividades microbiológicas no solo, idade das plantas, temperatura do solo, diferenças genéticas e diferentes meio de cultura (GRABLE, 1966; LUXMOORE; FISCHER; STOLZY, 1973; RUSSELL, 1959; TURNER et al., 1983).

Mukhtar; Baker e Kanwar (1996) observaram que o encharcamento do solo por 24 horas reduziu a concentração de O_2 , a taxa de difusão de oxigênio e o potencial redox a valores abaixo de 20%, $20 \times 10^{-8} \text{ g } O_2 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ e 600 mV, respectivamente, restringindo o oxigênio para as raízes das plantas

A anoxia pode ocasionar a morte de plantas não adaptadas em um intervalo de 24 a 48 horas. Já em condições de hipoxia, as plantas apresentam uma resistência maior, mesmo as mais sensíveis ao encharcamento do solo (BENINCASA, 1984).

Em condições de hipoxia, somente os sistemas que tem baixa afinidade por oxigênio, como os sistemas oxidativos microsomais, param de funcionar enquanto a cadeia de transportes de elétrons (CTE) mitocondrial continua a funcionar com algumas

limitações. Por outro lado, durante a anoxia, a CTE fica completamente paralisada (RODRIGUES; RODRIGUES; REIS, 1993).

Durante a hipoxia, o oxigênio que permanece dissolvido na água ou em pequenos espaços do solo é rapidamente consumido pela respiração das plantas e por microorganismos (GASTAL, 2000). Nesse processo a temperatura exerce grande influência, pois o aumento de temperatura ocasiona um aumento da atividade microbiológica do solo e da velocidade de transformações químicas e, conseqüentemente, aumenta também o consumo de oxigênio (LUXMOORE; FISCHER; STOLZY, 1973).

Em regiões de clima temperado, as inundações durante o inverno raramente são uma ameaça, em função das plantas perenes encontrarem-se em estágio de dormência, sob baixa atividade metabólica e transpirométrica. Já em regiões de clima tropical, o aumento da temperatura maximiza o efeito do déficit de O₂ (BLACKWELL, 1983).

A habilidade da planta em sobreviver em condições de hipoxia está relacionada à capacidade das raízes em oxidar a rizosfera (BARTLETT; JAMES, 1993). De acordo com Sanchez (1976), sob inundação, o poder de oxidação das raízes se dá na seguinte ordem: arroz>soja> trigo>sorgo>aveia>milho.

Com a interrupção do movimento dos gases do solo para atmosfera, elementos como CO₂, etileno (C₂H₄) e metano, acumulam-se rapidamente no solo atingindo níveis tóxicos às plantas. Em experimento realizado com milho, Cruciani (1985) constatou o aumento significativo da concentração de CO₂ no solo de 1 para 35% com duas horas de inundação. Após 216 horas de inundação, o teor de CO₂ no solo atingiu o índice de 64%.

As raízes de plantas cultivadas não toleram elevadas concentrações de CO₂. Para o algodão e a soja a concentração tolerável é de 20%, no entanto, outras culturas não toleram este nível (SILVA, 1984).

Segundo Voesenek et al. (1992), durante o período de alagamento, o etileno pode ser acumulado em grande quantidade, em razão do baixo coeficiente de difusão na água. Calheiros et al. (2000) verificou um aumento linear da concentração de etileno no solo com o aumento do grau de hipoxia em plantas de trigo. Níveis crescentes de

etileno podem ocasionar o afinamento das hastes, senescência, epinastia e queda das folhas (Nobel, 1974). A produção de raízes adventícias e a formação de aerênquima em plantas cultivadas em solos hidromórficos são decorrências da elevação do teor de etileno nas plantas (BRAILSFORD et al., 1993).

O etileno é um inibidor do crescimento radicular e seus efeitos são variáveis de acordo com a espécie da planta. Baixas concentrações de etileno no solo afetam significativamente as raízes de plantas de feijão. Já plantas de batata respondem ao aumento do etileno produzindo um maior número de lenticelas (CAVERS; HEARD, 2001). Segundo Jackson (2003), o etileno é um hormônio capaz de influenciar processos de desenvolvimento como expansão celular e senescência, e deve ser considerado como um regulador de crescimento e não uma toxina.

Em relação a atividade microbiana no solo, a deficiência de O_2 no solo ocasiona a redução de microorganismos aeróbios e aumento de microorganismos anaeróbios, que por sua vez passam a utilizar elétrons para a sua oxidação respiratória, resultando em uma baixa produção de trifosfato de adenosina (ATP) e também na redução do potencial de oxi-redução do solo (DENNIS et al., 2000; KAWASE, 1981).

O decréscimo do potencial de oxi-redução após a inundação do solo é influenciado pelo teor de matéria orgânica, temperatura e pela quantidade de receptores de elétrons existentes no solo (ABREU; LOPES, 1988).

Os processos de reduções afetam o pH e a condutividade elétrica dos solos de várzea. Em solos ácidos ocorre o aumento de pH e em solos alcalinos ocorre redução. Pires; Soprano e Cassol (2002) observaram, em experimento com soja, um aumento significativo do pH e da condutividade elétrica de amostras de solo inundado por 21 dias, em comparação com amostras retiradas de um solo mantido em condições normais de umidade. As alterações do pH são mais evidentes durante as primeiras semanas de encharcamento do solo. Ocorrem também alterações nos teores de nitrogênio, manganês, fósforo e ferro (ABREU; LOPES, 1988; PONNAMPERUMA, 1984).

Além dos efeitos citados, a deficiência de O_2 no solo ocasiona uma série de modificações químicas e bioquímicas nas plantas, dentre as quais podem ser citadas: redução na síntese de fitorreguladores como giberelinas e citocininas e aumento de

auxinas, como o ácido indolilacético (IAA) e do ácido abscísico (ABA) (SMIT; NEUMANN; STACHOWIAK, 1990; REID; BRADFORD, 1984); desordens metabólicas nas plantas, que diminuem eficiência na utilização de carbono e aumentam a produção de etanol e lactato (MARSCHNER, 1995); aumento, especialmente nos solos ácidos, da disponibilidade para as plantas de elementos como Fe, S, Ca, Mo, Ni, Zn, Pb e Co, ocasionando toxidez, principalmente pelo excesso de Fe e Mn (GRABLE, 1966; RODRIGUES; RODRIGUES; REIS, 1993; SHAPIRO, 1958; SILVA, 1984).

Em resposta às modificações decorrentes do excesso de água no solo, as plantas apresentam uma série sintomas como murchamento, epinastia, clorose das folhas, hipertrofia, formação de raízes adventícias e aerênquimas, diminuição no crescimento do caule, da planta e da produtividade, aumento na suscetibilidade ao ataque de pragas e doenças, morte das raízes e de plantas (BRADFORD; YANG, 1981; DEL ROSARIO; FAJARDO, 1991; GRABLE, 1966; KRAMER, 1983). Alguns desses sintomas podem ser considerados mecanismos fisiológicos de adaptação das plantas ao encharcamento do solo (BRADFORD; YANG, 1981).

Segundo Kramer e Jackson (1954), o murchamento é o primeiro sinal perceptível do estresse ocasionado de deficiência de O_2 no solo e ocorre principalmente, quando a inundação é imposta rapidamente e em condições atmosféricas favoráveis à transpiração.

Nos solos inundados, a redução de O_2 afeta o crescimento da parte aérea e das raízes da planta, provoca o escurecimento e a morte dos ápices radiculares e alterações nas organelas celulares, reduzindo a absorção de água e nutrientes pelas raízes (KAWASE, 1981; PATWARDHAN; NIEBER; MOORE, 1988; RODRIGUES; RODRIGUES; REIS, 1993).

A redução de nutrientes nas raízes e na parte aérea das plantas tem sido observada em várias espécies (JACKSON; DREW, 1984; PEZESHKI, 1994). Em plantas de fumo em solo inundado, a redução na absorção de íons obedeceu a seguinte ordem $K > N > P > Mg > Ca$ (HARRIS; VAN BAVEL, 1957). Barni (1999), estudando a tolerância de plantas de soja à inundação do solo, verificou que um período igual ou superior a 10 dias ocasionou a redução da absorção de P, K, Ca, Mg e Mn, embora os

teores desses nutrientes tenham permanecido dentro dos limites da faixa de normalidade para a soja.

Mesmo com excesso de água no solo a planta pode desempenhar suas funções normalmente, desde que exista uma porcentagem mínima de poros livres de água e que estes permitam a difusão de oxigênio próximo à zona radicular.

Para um desenvolvimento adequado das plantas mesófitas, o espaço livre de água no solo não deve ser inferior a 10% (VOMOCIL; FLOCKER, 1961; WESSELING, 1974). Para Meyer et al, (1985) os danos ocasionados pela aeração deficiente do solo pode variar com o tipo de cultura, o estágio de desenvolvimento, a disponibilidade de nutrientes e as condições de cultivo.

Em algodão, o crescimento das raízes foi limitado quando a porosidade livre de água foi inferior a $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (HODGSON; CHAN, 1982). Efeitos da aeração deficiente do solo também foram observados na produtividade de plantas de algodão Hodgson (1982), constatou que a produtividade de algodão foi significativamente relacionada com o tempo em que a porosidade livre de água permaneceu abaixo de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Em trigo, o aumento do espaço aéreo do solo de 5,9% para 28% proporcionou um incremento da produção de 5,6 para 127 grãos por planta (RIGHES, 1984). Segundo McDonald e Gardner (1987) para cada 1% de poros ocupados pela água a produtividade de trigo é reduzida em $0,29 \text{ t ha}^{-1}$.

Barni (1999) observou que plantas de soja submetidas a períodos de inundação de 10 e 20 dias e mantidas à capacidade de campo até a floração, recobram o crescimento e o desenvolvimento, quando o espaço aéreo do solo atingiu valores superiores a 5%.

No entanto, o restabelecimento da aeração do solo pode ocasionar danos ainda mais severos às plantas do que o período de deficiência de O_2 . Pesquisas têm indicado os efeitos nocivos da re-oxigenação do solo em algumas espécies e organismos de plantas submetidas à inundação do solo. De acordo com Monk; Fagerstedt e Crawford (1987) e Crawford (1992), a re-oxigenação após um período de privação de oxigênio pode ocasionar danos mais prejudiciais às plantas do que a própria deficiência de oxigênio.

Segundo Crawford e Braendle (1996), os efeitos são ocasionados pela formação de radicais ativos e produtos oxidativos tóxicos, como o acetaldeído. De acordo com esses autores, a anoxia prolongada sob altas temperaturas esgota a reserva de carboidratos e permite o acúmulo de metabólitos causando danos ao tecido celular, quando re-oxigenados.

Analizando os efeitos da re-oxigenação em plântulas de trigo, Biemelt; Keetman e Albrecht (1998) concluíram que a anoxia seguida pela re-oxigenação foi severamente prejudicial às atividades metabólicas das plantas quando comparadas com a hipoxia. Efeitos adversos do rebaixamento excessivo do lençol freático em plantas de trigo também foram apontados por Calheiros et al. (2000).

2.1.2 O nitrogênio em solo inundado

O nitrogênio está diretamente relacionado à formação de compostos orgânicos na planta, tais como proteínas, aminoácidos, enzimas e co-enzimas, além de ser constituinte da molécula de clorofila, sendo o elemento de maior concentração nas folhas e essencial para o desenvolvimento das plantas (MEURER; WANG; WANG, 1981). Em plantas de soja, o nitrogênio encontra-se, predominantemente na forma de proteína (85%) no interior das sementes, como constituintes de ácidos maléicos (10%) e em compostos aminados solúveis (5%) (TANAKA; MASCARENHAS, 1992).

As principais fontes de nitrogênio para o solo são: material orgânica, fertilizantes industriais, sais de amônio e nitratos trazidos pela precipitação e a fixação biológica de nitrogênio realizada por microorganismos. Destas, as mais importantes são os fertilizantes e a fixação biológica.

A resposta das culturas à adubação nitrogenada pode variar em função da cultivar, da época de semeadura, dos suprimentos de outros nutrientes, das características físico-químicas do solo, da umidade do solo, do conteúdo de matéria orgânica, das doses e época de aplicação, da irrigação, da radiação solar e da temperatura (BARBOSA FILHO, 1987).

O nitrogênio é o nutriente mais sensível às condições de aeração do solo, e conseqüentemente, em solos inundados, as reações do nitrogênio são severamente

afetadas (WESSELING, 1974). Em condições ideais de aeração, o nitrogênio mineral incorporado ao solo tende a passar para a forma orgânica, pela absorção das plantas e dos microorganismos. Esse processo é chamado de imobilização. Já o nitrogênio orgânico é transformado em nitrogênio inorgânico pelo processo chamado de mineralização. A mineralização é composta pelos processos de amonificação e nitrificação (MELLO et al., 1984)

O processo de amonificação é bastante lento, porém pode ocorrer tanto em condições aeróbias como anaeróbias, sendo que nesta última condição as transformações são mais lentas. Com a redução da concentração de O_2 no solo, a mineralização do nitrogênio orgânico é interrompida no estado de amonificação (NH_4^+), podendo ocorrer perdas pela passagem do amônio (NH_4^+) para amônia (NH_3), que é liberada para atmosfera. Esse processo é chamado de volatilização da amônia.

As perdas por volatilização podem ser evitadas pela aplicação de fertilizantes que contêm NH_4^+ e a uréia na camada redutora, ou seja, na profundidade de 10 a 15 cm. Já a aplicação de fertilizantes contendo NO_3^- não é recomendada em solos inundados, devido à rápida desnitrificação que ocorre na camada redutora (ABREU; LOPES, 1988).

A nitrificação é um processo de natureza estritamente biológica. O NO_3^- é o íon nitrogenado preferencialmente absorvido pela maioria das plantas cultivadas. Em solos inundados, as principais perdas de nitrato podem ocorrer por desnitrificação e lixiviação. A desnitrificação é definida como um processo respiração em anaerobiose, onde microorganismos como *Flavobacterium* e *Propionibacterium* utilizam o nitrato ou o nitrito como aceptores finais de elétrons em lugar do oxigênio (FIRESTONE, 1982). Os nitratos são convertidos em nitritos na camada reduzida do solo e se transformam em gases (N_2O e N_2) que escapam para atmosfera.

Está bem estabelecido que inundação do solo resulta na redução da concentração de N, P e K nos tecidos foliares. Sob condições de saturação, a nutrição mineral pode ser afetada por muitos fatores como a condição nutricional inicial do solo, alterações físico-químicas ocasionadas pela inundação do solo, desenvolvimento da planta e a tolerância da cultura à deficiência de O_2 (KOZLOWSKI, 1984).

Segundo Glinski e Stepniewski (1986), a falta de oxigenação no solo causa distúrbios funcionais em toda a planta, especialmente na absorção de nutrientes. A deficiência de O_2 no solo pode ocasionar a inibição da absorção e transporte de nutrientes em espécies sensíveis ao excesso de água no solo, devido à morte do sistema radicular, ao aumento da permeabilidade das membranas celulares das raízes e também a ineficiência do metabolismo anaeróbico em fornecer energia suficiente para a absorção dos íons (JACKSON; DREW, 1984).

Em espécies sensíveis à deficiência de O_2 , como a ervilha, a concentração de N total dos tecidos decresce em função do período de inundação do solo (CANNEL et al. 1979).

Em virtude da desnitrificação rápida causada pelas bactérias e da lixiviação intensa é comum ocorrer uma grande perda de nitrogênio nos solos inundados. Já as perdas por volatilização da amônia são menores. Segundo Vlek; Byrnes e Craswell, (1980), as magnitudes das perdas de nitrogênio em solos inundados devido a desnitrificação, a lixiviação e a volatilização podem variar de 1-70%; 25-90% e 0,5-20%, respectivamente.

Em leguminosas como ervilha, feijão, lentilha e soja o efeito do encharcamento do solo não se limita ao desenvolvimento das raízes e da parte aérea, mas também à fixação de nitrogênio. Nessas culturas, a fixação biológica pode fornecer mais de 85% da necessidade de nitrogênio às plantas.

Em lentilha e soja, a fixação biológica do nitrogênio ocorre mediante a simbiose entre a planta e bactérias das espécies *Bradyrhizobium japonicum* e *Bradyrhizobium elkanii*, denominados comumente de rizóbios.

Para a sua atividade, resumidamente, os rizóbios necessitam de a) N_2 como matéria prima; b) produtos da fotossíntese, que são metabolizados aerobicamente para formar adenosina-trifostato (ATP), gerando a energia necessária à redução do N_2 ; c) nitrogenase, um sistema enzimático que reduz N_2 a NH_3 ; d) um sistema doador de elétrons e e) um substrato receptor da amônia produzida para sua posterior incorporação ao metabolismo nitrogenado da planta na forma de ureídio.

Segundo Pires; Soprano e Cassol (2002), estas bactérias apresentam uma elevada sensibilidade à redução da concentração de O_2 no solo, afetando a fixação de

nitrogênio pelas plantas. Devido a esse fato, existe um conceito de que as leguminosas apresentam baixa tolerância ao excesso ou à deficiência de água no seu ambiente (GASTAL, 2000).

Os efeitos negativos da saturação hídrica do solo no número de nódulos foram observados em ervilha (SILVA, 1984), em feijão-caupi (HONG; MINCHIN; SUMMERFIELD, 1977) e soja (DE-POLLI; FRANCO; DÖBEREINER, 1973).

A inundação do solo também afeta a massa de nódulos (HONG; MINCHIN; SUMMERFIELD, 1977), o processo de fixação biológica de N_2 (SCHOLLES; VARGAS, 2004; SUNG, 1993).

Em plantas de soja, a deficiência de O_2 reduziu a absorção de nitrogênio e de outros nutrientes e inibiu o crescimento radicular e a nodulação (SALLAM; SCOTT, 1987). Desta maneira, o transporte de nutrientes para as folhas pode ser inadequado, resultando na clorose foliar (NATHANSON et al., 1984).

A inundação do solo tem efeito prejudicial na sobrevivência do *Bradyrhizobium* no solo, mas, dependendo da estirpe presente, este sobrevive e consegue promover uma boa nodulação, mesmo depois de três anos de cultivo de arroz (ROUGHLEY et al., 1995). Atualmente, as estripes de *Bradyrhizobium* recomendadas para a cultura da soja (SEMIA 587, 5019, 5079, 5080) são suscetíveis ao excesso de água no solo, reduzindo o processo de fixação biológica de N_2 . Porém, após a drenagem do solo, essas estripes apresentam sinais de recuperação da nodulação e do processo de fixação de N_2 (SCHOLLES; VARGAS, 2004).

A sobrevivência dos rizóbios, em solos alagados, está relacionada com o fornecimento de O_2 via aerênquima e raízes adventícias (MINCHIN; SUMMERFIELD, 1976). Porém, a sobrevivência dos rizóbios não garante a eficiência do processo simbiótico e nem a distribuição do N para as plantas.

Para Smith (1987), a sobrevivência e a fixação de nitrogênio dos nódulos em solos inundados estão associadas com a habilidade em desenvolver estruturas que permitam a troca de gases. Calheiros (2000), observou modificações morfológicas na superfície de nódulos em plantas de feijão submetidas a anoxia do solo e constatou a presença de nódulos, principalmente, em raízes adventícias na interface solo-atmosfera, beneficiando-se do suprimento interno de O_2 . Comportamento semelhante

foi observado em plantas de soja por Scholles e Vargas (2004). A capacidade dos nódulos em sobreviver e fixar nitrogênio em solos inundados está associada com a habilidade em desenvolver estruturas que permitam a troca de gases. A atividade da nitrogenase é sensível ao etileno

Em leguminosas, a atividade da nitrogenase também pode ser afetada pelo aumento da concentração endógena de etileno e a taxa de acúmulo de etileno em condições de deficiência de O_2 pode ser um importante fator na determinação da suscetibilidade das leguminosas à inundação do solo (JAMES; CRAWFORD, 1998; SMITH, 1987). O etileno atua como formador de estruturas responsáveis pelo fornecimento de O_2 aos nódulos (raízes adventícias, aerênquima e lenticelas) e também como limitador da nodulação (SCHOLLES; VARGAS, 2004). Nesse caso, a fixação biológica de N_2 em espécies que não apresentam alterações morfofisiológicas como a ervilha, pode ser seriamente prejudicada pelo aumento da concentração de etileno em solo alagado.

Os efeitos do excesso de água no solo à fixação de N_2 podem ser mais severos durante o estágio de florescimento da cultura. Nesse período o processo de fixação biológica de N_2 atinge seu ponto máximo, declinando-se a partir do estágio de formação de vagens (R3), por meio da senescência dos nódulos. No entanto, o declínio da atividade da nitrogenase ocorre antes do início do processo da senescência dos nódulos. O a redução da fixação biológica de N_2 deve-se à redução do suprimento de fotoassimilados aos nódulos, que competem com as estruturas reprodutivas (MAEHLER et al., 2003; VARGAS; SUHET, 1982).

Existem consideráveis evidências que o fornecimento de N pode compensar, em parte, os efeitos da inundação do solo (CANNELL et al., 1985; TROUGHT; DREW, 1980a; RITTER; BEER, 1969; SWARUP; SHARMA; 1993; WILLHITE; GRABLE; ROUSE, 1965).

Os problemas do crescimento da soja sob inundação, como resultado do decréscimo da fixação N_2 , podem ser corrigidos pela suplementação com nitrogênio mineral, reduzindo as perdas ocasionadas pela deficiência de O_2 no solo (MINCHIN; PATE, 1975; PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002). O uso de N mineral pode ocasionar um aumento significativo da atividade da nitrogenase e da produtividade em

leguminosas submetidas à deficiência de O_2 no solo (BACANAMWO; PURCELL, 1999a; MATSUNAGA et al., 1994).

Por ser o N um elemento que se perde facilmente por lixiviação, volatilização e desnitrificação no sistema solo-planta, o manejo adequado da adubação nitrogenada é tido como um dos mais difíceis. Assim, torna-se necessário determinar a resposta da cultura em relação a várias doses do nutriente, e adotar o método mais adequado de aplicação, pois este afeta o comportamento do N no solo e sua eficiência para as culturas (FAGERIA; STONE; SANTOS, 1999). Em se tratando de solos inundáveis, o manejo do nitrogênio torna-se ainda mais importante sob o ponto de vista econômico e ambiental.

2.2 Material e métodos

Para comprovar as hipóteses de que o controle do nível freático e a adição suplementar de nitrogênio podem minimizar os danos do excesso de água no solo ao desenvolvimento e à produção de grãos de plantas mesófitas, foram realizados três experimentos distintos.

Os experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação localizada em uma área experimental pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, situada no Município de Piracicaba – SP. As coordenadas geográficas locais são 22°42’30” de latitude Sul, 47°38’00” de longitude Oeste e 540 m de altitude. O clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo Cwa, tropical de altitude, com inverno seco e temperatura do mês mais quente maior que 22°C.

2.2.1 Casa-de-vegetação

A casa-de-vegetação utilizada apresenta as dimensões de 8,0 m de largura, 15,0 m de comprimento e pé direito de 3,0 m. Sua cobertura é do tipo arco, revestida por um filme de polietileno de baixa densidade, com aditivo ultravioleta e espessura de 150 μ m. As paredes da casa-de-vegetação são revestidas por uma tela de polipropileno com

30% de sombreamento. O fechamento das laterais era realizado por meio de cortinas laterais móveis e revestidas pelo mesmo material utilizado na cobertura. A casa-de-vegetação utilizada para a condução dos experimentos é apresentada na Figura 1a.

Figura 1 - Vista frontal da casa-de-vegetação (a) e dos tubos de concreto utilizados na condução dos experimentos (b)

2.2.2 Parcelas experimentais

No interior da casa-de-vegetação foram instalados 60 tubos de concreto com 0,40 m de diâmetro interno e 1,20 m de altura, perfazendo um volume útil de 150 litros, constituindo as parcelas experimentais, como apresentado na Figura 1b. Os tubos de concreto foram assentados diretamente ao solo enfileirados formando quatro colunas com 15 unidades. Suas bases e paredes laterais foram impermeabilizadas a fim de evitar a percolação de água durante os tratamentos.

Para promover a drenagem e a admissão da água para o interior das unidades experimentais, foram instalados horizontalmente tubos de PVC de 1/2" de diâmetro e 0,6m de comprimento com furos de 10 mm de diâmetro em seu perímetro espaçados entre si de 0,10m. Para facilitar a drenagem e impedir o carreamento do solo, utilizou-se materiais filtrantes como mantas sintéticas (Bidim OP-20) e uma camada de pedrisco de aproximadamente 0,15 m de espessura.

2.2.3 Características físicas e químicas do solo utilizado nos experimentos

As parcelas foram preenchidas com substrato composto pelo solo Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 1999), fase arenosa, pertencente à série “Sertãozinho”, retirado do seu perfil natural, na profundidade de 0 a 20 cm. Após o preenchimento, foram retiradas amostras compostas para a realização de análise química deste substrato. Os resultados obtidos pela análise química realizada pelo Laboratório do Departamento de Solos e Nutrição de plantas da ESALQ são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas do solo utilizado no preenchimento das parcelas experimentais

PH	M.O	P	K	Ca	Mg	H+Al	S	T	V (%)
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³						
6,3	22	36,7	3,2	101	27	16	131,2	147,2	89
6,2	31	50,4	3,1	125	34	58	166,1	224,1	74
6,3	31	37,4	4,0	106	24	18	134,0	152,0	88
6,4	24	43,2	3,2	111	29	18	143,0	161,2	89
6,4	20	39,6	4,2	100	23	18	127,2	145,2	88

A determinação da densidade do substrato, densidade de partícula, porosidade total e de drenagem, granulometria e curva de retenção da água foram realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Rural. Foram retiradas oito amostras indeformadas nas camadas de 0 a 15 cm e 15 a 30 cm de profundidade de quatro parcelas escolhidas aleatoriamente. Os valores obtidos pela análise granulométrica são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise granulométrica do solo utilizado no interior das parcelas experimentais

Areia (%)						Silte	Argila
Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Total	(%)	(%)
0,45	1,80	15,49	42,50	10,65	70,89	7,47	21,64

A densidade média do solo foi de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ para a camada de 0 a 15 cm de profundidade e de $1,22 \text{ g cm}^{-3}$ para a camada de 15 a 30 cm. Os valores de densidade do solo encontrados apresentaram um coeficiente de variação de 9,98%.

A densidade dos sólidos ou de partículas, obtida pelo método do picnômetro, foi de $2,63 \text{ g cm}^{-3}$. As amostras analisadas apresentaram uma porosidade total de 51%, com um coeficiente de variação de 8,69%. Já a porosidade drenável, obtida pela diferença entre a umidade de saturação do solo e a umidade do solo à tensão de 0,01 MPa (capacidade de campo) variou de 20,3 a 26,0%.

As curvas de retenção da água no solo foram confeccionadas com dados obtidos por meio de secamento (desorção) das amostras não deformadas. As amostras foram submetidas a pressões de 0,001 a 0,004 MPa em mesas de tensão e pressões de 0,1 a 1,5 MPa em câmaras de pressão de Richards (Richards, 1941). Com os valores de pressão (potencial matricial) e umidade à base de volume ($\psi \times \theta$), foram traçadas graficamente as curvas de retenção da água no solo (Figura 2).

Figura 2 - Curvas de retenção da água no solo. (●) camada de 0-15 cm; (○) camada de 15-30 cm

Por meio das curvas de retenção da água no solo, foi determinada a umidade do solo à capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade de saturação (θ_s). Para a camada de solo de 0 a 30 cm de profundidade, o valor médio de θ_{cc} foi de $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para uma tensão da água no solo correspondente a 0,01 MPa. Para a θ_s foi obtido o valor médio de $0,49 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

As relações entre os valores de pressão e de umidade volumétrica foram ajustadas pelo modelo matemático proposto por Genuchten (1980), descrito pela equação 1.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (1)$$

em que θ é a umidade volumétrica estimada do solo; θ_r é a umidade residual; θ_s é umidade de saturação; ψ é a tensão da água no solo (MPa) e α , n e m são parâmetros utilizados para o ajuste do modelo, sendo que m é obtido pela equação: $m = 1 - \left(\frac{1}{n}\right)$.

Para o ajuste ao modelo matemático, utilizou-se o programa computacional RETC (Genuchten et al., 1991), o qual possibilitou a obtenção dos parâmetros θ_r , θ_s , α e n , cujos valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos coeficientes da equação de Genuchten (1980) obtidos pelo programa RETC

Curvas	Camada	Parâmetros				
	(cm)	θ_r	θ_s	α	n	m
1	0-15	0,152	0,472	0,029	1,857	0,461
	15-30	0,173	0,456	0,032	1,861	0,462
2	0-15	0,123	0,483	0,050	1,861	0,462
	15-30	0,127	0,512	0,044	1,740	0,425
3	0-15	0,139	0,507	0,046	1,606	0,377
	15-30	0,135	0,515	0,046	1,606	0,377
4	0-15	0,172	0,495	0,034	1,915	0,477
	15-30	0,160	0,540	0,036	1,721	0,418

2.2.4 Sistema de distribuição de água para as parcelas

O sistema de distribuição de água para as unidades experimentais era composto por reservatórios de cimento-amianto com capacidade de 1000 L cada, providos de chave bóia e colocados sobre um tablado de madeira com 2,5 m de comprimento, 1,60 m de largura e 1,60 m de altura, localizado no interior da casa-de-vegetação e uma rede de tubos de PVC de 1/2" de diâmetro, colocados sob a superfície. Os tubos de PVC foram seccionados a cada 0,50 m para a colocação de uma derivação onde acoplava-se uma mangueira cristal de 1/2" conectada a um registro de esfera de PVC. As mangueiras foram acopladas em pequenos reservatórios cilíndricos, confeccionados em PVC, providos com chave bóia, com diâmetro e altura de 0,30 m. Estes reservatórios destinavam-se a controlar e manter constante o nível freático no interior das unidades experimentais durante os tratamentos.

2.2.5 Mecanismos utilizados para o controle do nível freático

Para promover a inundação das unidades experimentais, os reservatórios de PVC foram colocados em suportes metálicos, fixados por parafusos em caibros de madeira com 1,60m de altura, colocados ao lado das unidades experimentais. As mangueiras de cristal com registro eram conectadas às entradas dos reservatórios e as saídas eram ligadas, por meio de mangueiras aos tubos de PVC, instalados nas bases das parcelas.

A utilização dos suportes metálicos possibilitou a elevação e o rebaixamento progressivo do nível freático (NF) de acordo com os intervalos e profundidades desejados em cada repetição de cada tratamento. A Figura 3, ilustra o esquema utilizado para elevação do NF no interior das unidades.

Figura 3 - Representação gráfica dos elementos utilizados na inundação das unidades experimentais

2.2.6 Experimentos realizados

Foram realizados experimentos com as culturas de lentilha (*Lens culinaris* Medik), de soja (*Glycine max* L. Merrill) e de trigo (*Triticum aestivum* L.), durante o período de junho de 2003 a outubro de 2004. A metodologia, os objetivos e as peculiaridades desses experimentos serão descritos detalhadamente nos itens subseqüentes.

2.2.6.1 Experimento I - Lentilha

A metodologia estabelecida neste experimento baseou-se na elevação e no rebaixamento do NF efetuado em taxas distintas durante um estágio característico da cultura e na aplicação de adubação nitrogenada realizada posteriormente ao rebaixamento do NF. Esta metodologia foi empregada com o objetivo de avaliar os efeitos da imposição de taxas de elevação e de rebaixamento do NF e a aplicação suplementar de nitrogênio no desenvolvimento e na produção de plantas de lentilha submetidas à inundação do solo durante o estágio de florescimento.

A cultura da lentilha foi escolhida por ser uma leguminosa considerada sensível ao excesso de umidade do solo e de elevado valor nutricional e econômico (MUEHLBAUER; TULLU, 1998).

A lentilha é originária de regiões do Oriente e áreas próximas ao Mediterrâneo. Atualmente é produzida em 48 países, dos quais destacam-se a Índia, a Turquia e o Canadá, responsáveis por 61% da produção mundial de grãos de lentilha (JOHNSON; JIMMERSON, 2003).

No Brasil, produção de grãos de lentilha é praticamente insignificante, apesar de ter áreas agrícolas aptas ao cultivo de dessa leguminosa (GIORDANO; PEREIRA; LOPES, 1988), sendo o mercado interno abastecido pela importação anual de aproximadamente 5.000 t de grãos, provenientes principalmente do Canadá.

Na literatura, existem poucas informações referentes à adaptação desta cultura às condições edafoclimáticas brasileiras, principalmente à viabilidade do cultivo de lentilha em áreas sujeitas a inundações temporárias.

2.2.6.1.1 Implantação do experimento

O experimento foi implantado em junho de 2003 com a semeadura de sementes de lentilha, cv. Silvina, cedidas pelo Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPq - EMBRAPA).

Foram semeadas manualmente 30 sementes por unidade experimental na profundidade de 3 a 4 cm, em solo com umidade próxima à capacidade de campo (0,01MPa). Antes da semeadura as sementes foram tratadas com fungicidas Ronvral e Captan na dose do produto comercial equivalente a 100g por 100 kg de sementes e inoculadas com inoculante turfoso na dose de 0,4 kg de inoculante por 20 kg de sementes.

De acordo com os resultados da análise de fertilidade do solo (Tabela 1), não foi necessária a correção do pH e adubação de base. Dessa forma, foi executada a adubação complementar de acordo com as recomendações de uso de fertilizantes em hortaliças, sendo o solo em questão considerado de média fertilidade. Assim, a adubação complementar foi realizada adicionando-se 100 kg P_2O_5 ha⁻¹, em única

aplicação; 40 kg K₂O ha⁻¹, 4,0 kg B ha⁻¹ e 4,0 kg Zn ha⁻¹ em quatro aplicações: no plantio, na emergência e aos 10 e 20 DAE.

No 15º dia após a emergência (DAE) foi efetuado um debaste manual das plantas, visando uniformizar o número de plantas por unidade experimental. Adotou-se uma densidade de 40 plantas por metro linear, o que corresponde a uma população de aproximadamente 2 milhões de plantas por hectare ou 200 plantas por m² (GIORDANO; PEREIRA; LOPES, 1988). Desse modo, cada unidade experimental foi constituída por 16 plantas.

A duração do ciclo da cultura foi em média de 110 dias, sendo a colheita realizada manualmente em outubro de 2003. Durante o período de desenvolvimento da cultura foram realizadas pulverizações de inseticidas, fungicidas e acaricidas visando o controle preventivo de insetos e de doenças.

2.2.6.1.2 Descrição dos tratamentos

Os tratamentos consistiram de três níveis de elevação, três níveis de rebaixamento do nível freático, ausência e presença de nitrogênio e também um tratamento de controle, constituído por plantas submetidas somente à irrigação (normoxia).

Para ascensão do nível freático foram adotadas velocidades de 5, 15 e 30 cm dia⁻¹. Essas velocidades também foram empregadas para efetuar o rebaixamento do nível freático: 5, 15 e 30 cm dia⁻¹. Na Tabela 4, são apresentados os tratamentos e a terminologia utilizada para identificá-los. As taxas de elevação e de rebaixamento do nível freático (NF) foram controladas por meio do sistema descrito no item 3.5.

O NF foi mantido a 60 cm da superfície do solo até o início do estágio de florescimento da cultura, identificado pelo surgimento das primeiras flores em 50% das parcelas experimentais, o que ocorreu aos 45 DAE. Nesse momento, excetuou-se a elevação do NF no interior das parcelas constituintes do tratamento E1 (5 cm dia⁻¹). Nas parcelas destinadas ao tratamento E2 (15 cm dia⁻¹) e ao E3 (30 cm dia⁻¹), a elevação do NF teve início aos 53 e 55 DAE, respectivamente. Deste modo, a inundação do solo das parcelas experimentais ocorreu uniformemente aos 57 DAE, quando as plantas

encontravam-se em pleno florescimento, estágio identificado pela observação de plantas com flores em todas as parcelas experimentais.

Tabela 4 - Tratamentos e terminologia empregada em experimento com plantas de lentilha

Terminologia		Tratamentos
T0	Testemunha	
E1	Elevação do NF de 5 cm dia ⁻¹	
E2	Elevação do NF de 15 cm dia ⁻¹	
E3	Elevação do NF de 30 cm dia ⁻¹	
R1	Rebaixamento do NF de 5 cm dia ⁻¹	
R2	Rebaixamento do NF de 15 cm dia ⁻¹	
R3	Rebaixamento do NF de 30 cm dia ⁻¹	

Há uma certa unanimidade entre alguns autores à respeito de que o florescimento é a fase em que as leguminosas são mais sensíveis ao excesso de água no solo (CANNELL et al., 1979; COWIE; JESSOP; MacLEOD, 1996; LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998). Por esse motivo, foi o estágio escolhido para a comprovação da hipótese de que a velocidade de elevação e de rebaixamento do NF pode minimizar os danos oriundos da inundação temporária do solo ao desenvolvimento das plantas.

As plantas foram submetidas à inundação completa do sistema radicular durante 24 horas, mantendo-se uma lâmina de água acima da superfície de aproximadamente 20 mm. Posteriormente, foi efetuado o rebaixamento do NF em função das velocidades estabelecidas anteriormente. A elevação e o rebaixamento do NF era sempre realizado às 18:00 h. Somente as parcelas destinadas ao tratamento de controle não foram submetidas à inundação. O período de aplicação dos tratamentos e as respectivas profundidades do NF durante o ciclo de desenvolvimento da cultura são apresentados na Tabela 5.

Em relação ao fator nitrogênio, as parcelas sorteadas, receberam adubação nitrogenada na dosagem correspondente a 50 kg N ha⁻¹ na forma de uréia. Nas demais parcelas não houve adição de N.

A uréia foi aplicada no momento em que a umidade do solo encontrava-se à capacidade de campo, determinada pelo potencial da água no solo, o que ocorreu aos 65 DAE. O adubo nitrogenado foi aplicado ao solo próximo aos caules das plantas por meio de 200 ml de uma solução de 20 ppm.

Tabela 5 - Profundidade do NF (cm) no interior das unidades experimentais de acordo com os tratamentos aplicados

DAE	Tratamentos								
	E1R1	E1R2	E1R3	E2R1	E2R2	E2R3	E3R1	E3R2	E3R3
51	30	30	30						
53	20	20	20	60	60	60			
54	15	15	15	45	45	45			
55	10	10	10	30	30	30	60	60	60
56	5	5	5	15	15	15	30	30	30
57	Inundação total do solo								
58	5	15	30	5	15	30	5	15	30
59	10	30	60	10	30	60	10	30	60
60	15	45		15	45		15	45	
61	20	60		20	60		20	60	
63	30			30			30		
65	40			40			40		

2.2.6.1.3 Delineamento estatístico

Os tratamentos foram sorteados e distribuídos aleatoriamente nas unidades experimentais no interior da casa-de-vegetação. Desse modo, adotou-se o delineamento experimental inteiramente aleatorizado, arranjado em esquema fatorial $[(3 \times 3 \times 2) + 1]$, totalizando 19 tratamentos com 3 repetições.

Os dados coletados para as diferentes variáveis foram analisados estatisticamente por meio da análise da variância (teste F). Os efeitos estatisticamente significativos pelo teste F foram submetidos ao teste estatístico de comparação de médias entre os tratamentos de Tukey a 5% de probabilidade. Também utilizou-se a

análise de regressão polinomial quando foram observadas interações significativas entre os fatores quantitativos. Os dados apresentaram uma distribuição normal do erro e variância homogênea, não necessitando de transformação dos dados. As causas de variância e os respectivos graus de liberdade da análise de variância são apresentados na Tabela 6. Para a análise estatística, utilizaram-se os programas estatísticos SAS e SANEST e cálculos realizados no EXCEL.

Tabela 6 - Esquema da análise da variância utilizada no experimento de lentilha

Fontes de variação	Graus de liberdade
Elevação do NF (E)	2
Rebaixamento do NF (R)	2
Aplicação de nitrogênio (N)	1
Interação E*R	4
Interação E*N	2
Interação R*N	2
Interação E*R*N	4
Testemunha * Fatorial	1
Resíduo	38
Total	56

2.2.6.2 Experimento II – Soja

Este experimento foi implantado com os objetivos de avaliar o comportamento de cultivares de soja (*Glycine max* L. Merrill) a períodos de inundação do solo e a resposta desses cultivares à aplicação de doses de nitrogênio em relação a atenuação dos danos ao desenvolvimento e à produção de grãos ocasionados pela hipoxia temporária no solo.

A metodologia baseou-se na saturação hídrica total do solo por períodos distintos durante um estágio de desenvolvimento da cultura de fácil identificação e adição de doses de adubo nitrogenado após a drenagem total das parcelas experimentais. A

inundação do solo foi ocasionada pela ascensão progressiva do NF por meio de reservatórios de PVC, descritos no item 2.2.5.

2.2.6.2.1 Implantação do experimento

O experimento com soja teve início em dezembro de 2005. As sementes de soja foram cedidas pelo Laboratório de Melhoramento de Soja do Departamento de Genética da ESALQ. As mesmas, foram tratadas com fungicidas sistêmicos Carboxin e Thiram na dose do produto comercial equivalente a 200g por 100 kg de sementes.

Após o tratamento, as sementes foram inoculadas com bactérias do gênero *Bradyrhizobium japonicum* em meio turfoso, na dose de 0,6 kg por 40 kg de sementes. Para melhorar a aderência entre o inoculante e as sementes, foi aplicada uma solução de 10% de açúcar e água na dose de 6 ml para 1 kg de sementes. Após a secagem das sementes a sombra, realizou-se o plantio.

Foi realizada adubação complementar baseada na análise de fertilidade de amostras de solo retiradas das parcelas experimentais. De acordo com os resultados da análise de fertilidade do solo, não foi necessária a correção do pH. A adubação complementar foi baseada nas recomendações para um solo considerado de média fertilidade. Assim, a adubação complementar foi realizada adicionando-se 40 kg P_2O_5 ha⁻¹, em única aplicação; 40 kg K_2O ha⁻¹, 1,0 kg B ha⁻¹ e 5,0 kg Cu ha⁻¹; 5,0 kg Zn ha⁻¹ e 5,0 kg Mn ha⁻¹ em três aplicações: no plantio, na emergência e aos 10 DAE

Foram semeadas manualmente 20 sementes em cada parcela experimental, na profundidade de profundidade de 4 a 5 cm com o solo previamente umedecido. Após o estabelecimento da cultura aos 15 DAE, o excesso de plantas foi retirado manualmente a fim de proporcionar uma densidade de plantas uniforme nas parcelas. A densidade adotada foi de 20 plantas por metro linear, o que corresponde a uma população de 400 mil plantas por hectare segundo as indicações técnicas da 28ª Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul (1999).

As plantas foram colhidas a partir do 117 DAE, quando as vagens apresentavam uma coloração amarela palha.

Durante o desenvolvimento das plantas de soja foram realizadas aplicações de produtos específicos para o controle de tripes (*Trips tabaci*) e de lagartas falsa medideira (*Rachiplusia nu*). Não foi observada a ocorrência de doenças causadas por fungos e ou bactérias.

2.2.6.2.2 Descrição dos tratamentos

Este trabalho foi fundamentado na hipótese de que a aplicação de nitrogênio após a inundação temporária do solo pode minimizar os danos ocasionados pelo estresse por excesso hídrico ao desenvolvimento e à produção de grãos de soja. Assim, os tratamentos foram constituídos pelos fatores: cultivar, período de inundação do solo e doses de nitrogênio.

Foram adotados os cultivares FT-Abyara (C1) e CD205 (C2), cujas características principais são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Principais características dos cultivares de soja ⁽¹⁾

Características	Cultivar	
	FT-Abyara	CD205
Ciclo (dias)	121-130	121-130
Ciclo (classificação)	Semiprecoce	Semiprecoce
Altura de planta (cm)	84	80
Hábito de crescimento	Determinado	Determinado
Massa de 100 sementes (g)	14,2	13,6
Fertilidade	Alta	Média/alta
Genealogia	União x Sant'Ana	BR83 x OC 87-216

⁽¹⁾ Dados obtidos da Associação dos Produtores de Sementes do Rio Grande do Sul (APASSUL, 2003) e da Cooperativa Central de pesquisa Agrícola (COODECT, 2005).

A escolha desses cultivares foi motivada pelas seguintes razões: a tolerância apresentada pelo cultivar FT-Abyara a períodos de inundação do solo (PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002), o desempenho dos cultivares em solo de várzea no Rio

Grande do Sul (THOMAS; PIRES; MENEZES, 2000), a recomendação de exclusão do cultivar FT-Abyara para a safra de 2004/2005 para São Paulo (EMBRAPA SOJA, 2005) e a inexistência de informações à respeito do desempenho do cultivar CD205 em condições de solo inundado.

As plantas de soja foram submetidas a períodos de inundação total do solo por 24 (I1), 48 (I2) e 72 (I3) horas, durante o estágio de florescimento da cultura.

O estágio de florescimento é considerado o de menor tolerância ao excesso de água no solo e também estágio que marca o início do declínio da taxa de fixação biológica de nitrogênio pelos rizóbios, sendo o período escolhido para verificar os efeitos do excesso de água no solo no desenvolvimento e na produtividade de plantas de soja e a resposta dos cultivares à aplicação de N.

O estágio de florescimento foi identificado pela formação de flores nos quatro últimos nós do caule principal (FEHR et al., 1971). Este estágio foi atingido pelas plantas de soja aproximadamente aos 40 DAE.

A ascensão do nível freático teve início após a constatação visual de que pelo menos 50% das plantas apresentava flores completamente abertas, estágio de florescimento inicial. Foi empregada uma taxa de elevação do NF de 20 cm dia⁻¹ até formar sobre a superfície do solo uma lâmina de água de aproximadamente 20 mm. O nível freático foi mantido nessa posição durante os períodos mencionados e posteriormente rebaixado a uma velocidade de 20 cm dia⁻¹ até atingir a profundidade de 90 cm, quando se efetuou a drenagem total das parcelas.

Após a inundação do solo, foram aplicadas doses de nitrogênio nas parcelas sorteadas aleatoriamente. As doses de nitrogênio aplicadas foram de zero (D0), 50 (D1) e 100 kg ha⁻¹ (D2).

A fonte nitrogenada foi a uréia, aplicada via solo por meio de uma solução de 20 e 40 ppm para as doses de 50 e 100 kg de N, respectivamente. As plantas receberam a adubação nitrogenada após sete dias do período de inundação quando o solo encontrava-se na capacidade de campo (0,01 MPa).

2.2.6.2.3 Delineamento estatístico

O delineamento estatístico adotado foi de parcelas subdivididas inteiramente aleatorizadas em esquema fatorial $[(2 \times 3 \times 3)]$ com três repetições, totalizando 18 tratamentos, além de dois tratamentos com plantas não submetidas ao excesso de água no solo (Testemunhas).

Os dados coletados para as diferentes variáveis foram analisados estatisticamente por meio da análise da variância (teste F). Os efeitos estatisticamente significativos pelo teste F foram submetidos ao teste estatístico de comparação de médias entre os tratamentos de Tukey a 5% de probabilidade. Para os fatores quantitativos utilizou-se a análise de regressão polinomial quando foram observadas interações significativas entre os fatores estudados.

2.2.6.3 Experimento III – Trigo

Este experimento foi conduzido com os objetivos de avaliar as respostas de plantas de trigo (*Triticum aestivum*, L.) à saturação hídrica total e parcial da zona radicular da cultura e os efeitos da aplicação suplementar de nitrogênio na recuperação das plantas ao estresse por excesso hídrico imposto durante o estágio de florescimento da cultura. Para isso, a metodologia adotada consistiu na manutenção do NF em duas profundidades, visando simular condições distintas de saturação hídrica do solo durante um determinado estágio de desenvolvimento da cultura. Para esse fim utilizou-se o sistema de controle do NF descrito no item 2.2.5.

2.2.6.3.1 Implantação do experimento

O experimento foi implantado posteriormente ao cultivo de soja, tendo início em junho de 2004. O cultivar adotado foi o IAC 370, recomendado para a região de Piracicaba, SP. Esse cultivar apresenta um hábito de crescimento vegetativo semiprostado, um ciclo de maturação intermediário (120 a 130 dias) e altura média de plantas que variam de 80 a 95 cm, dependendo da fertilidade do solo. O florescimento

ocorre entre os 60 a 65 dias após emergência da plântula. Esse cultivar apresenta resistência às ferrugens do colmo e da folha e sensibilidade ao oídio. Os grãos são destinados as indústrias de panificação e de massa alimentícias. Além disso, o cultivar IAC 370 é resistente ao acamamento, permitindo adubações nitrogenadas.

As práticas relacionadas à semeadura, fertilidade do solo, irrigação e tratamentos fitossanitários foram realizadas segundo as indicações técnicas da 36ª Reunião da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo (2004).

As sementes, cedidas pelo Departamento de Produção Vegetal ESALQ/USP, foram tratadas com fungicida Thiram na dose de 1,4 g do ingrediente ativo por 1,0 kg de sementes. Foram semeadas manualmente 60 sementes em cada parcela na profundidade de 3 a 4 cm, com a umidade do solo próxima à capacidade de campo (-0,01 MPa). A emergência ocorreu cinco dias após a semeadura.

A adubação para o cultivo de trigo foi realizada de acordo com a análise de fertilidade do solo. Foram aplicados 50 kg P_2O_5 ha⁻¹ e 50 kg K_2O ha⁻¹, 3,0 kg B ha⁻¹ parceladamente no plantio e dez dias após a emergência das plântulas. Foram aplicados também 30 kg N ha⁻¹ no plantio e no perfilhamento das plantas.

Após o estabelecimento da cultura (15 DAE) foi realizado um debaste manual das plantas, a fim de promover uma densidade de 35 plantas por unidade experimental ou 80 plantas por metro, o que corresponde a uma população de 400 plantas por m² (IAC, 2002).

A colheita foi realizada no momento em que as plantas apresentavam folhas com coloração amarelo-palha ou secas. As plantas trigo atingiram a maturação fisiológica aos 120 DAE, sendo a colheita finalizada aos 130 DAE.

2.2.6.3.2 Descrição dos tratamentos

Os tratamentos foram constituídos por dois níveis de saturação do solo, quatro níveis de estresse por excesso hídrico e ausência e presença de nitrogênio. Além de um tratamento de controle, somente irrigado.

Os níveis de saturação do solo foram simulados por meio da manutenção do NF sobre a superfície do solo (solo totalmente saturado) e a 15 cm de profundidade (solo

parcialmente saturado). O controle e a manutenção da profundidade do NF, foram realizados por meio de poços de observação de 250 mm de diâmetro abertos em cada parcela experimental. O monitoramento da posição do NF em relação à superfície do solo foi realizado diariamente por meio de uma sonda de profundidade. Durante a inundação completa do solo, o nível freático foi mantido a 20 mm acima da superfície do solo.

A inundação do total do solo ocorreu durante o período de florescimento da cultura (antese). Estádio de desenvolvimento da cultura de trigo de maior sensibilidade ao excesso de água no solo (GLINSKI; STEPNIEWSKI, 1986). Os estádios de desenvolvimento da cultura foram identificados de acordo com a escala fenológica de Feekes, modificada por Large (1954).

Os níveis de estresse foram simulados pela manutenção do NF sobre e a 15 cm da superfície do solo. O tempo de permanência do NF em cada profundidade foi estimado pelo somatório dos excedentes de água (SEW_p), índice proposto por Sieben, 1964 apud Carter (1988). O valor de SEW_p foi obtido pela equação 2.

$$SWE_p = \sum_{i=1}^n (p - X_i) \quad (2)$$

em que: SEW_p é somatório dos excedentes de água acima da profundidade “p”, em cm dia; p é a profundidade de referência ou crítica do nível freático, em cm; X_i profundidade média do nível freático abaixo da superfície do solo no dia i, em cm, e n é o número de dias em que o nível freático permanece acima de “p” durante o ciclo da cultura. Adotou-se a profundidade 30 cm como a profundidade crítica do nível freático.

A utilização do SEW_{30} permitiu a comparação e também a quantificação da intensidade do estresse por excesso hídrico ocasionado pela permanência do NF nas posições mencionadas. Os tempos de permanência do NF e os respectivos valores de SEW_{30} são apresentados na Tabela 8.

Após o término dos tratamentos foi aplicada uma dose correspondente a 50 kg N ha^{-1} , na forma de uréia em três unidades experimentais de cada tratamento sorteadas aleatoriamente. A uréia foi aplicada no momento em que a umidade do solo encontrava-se à capacidade de campo, o que ocorreu durante a fase de enchimento dos grãos (80 DAE). O adubo nitrogenado foi aplicado ao solo próximo por meio uma solução aquosa.

Tabela 8 - Permanência do NF e os respectivos valores do somatório dos excedentes de água (SEW_{30}) em função da profundidade do NF

SEW_{30} (cm dia)	Permanência do NF (h)	
	NF sobre a superfície	NF a 15 cm
30	24	48
60	48	96
90	72	144
120	96	192

2.2.6.3.3 Delineamento estatístico

O delineamento utilizado foi o inteiramente aleatorizado em arranjo fatorial de $(2 \times 4 \times 2) + 1$, totalizando 17 tratamentos com três repetições cada. Os tratamentos e a terminologia utilizada para identificá-los são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Terminologia dos tratamentos utilizada no experimento com plantas de trigo

Terminologia	Tratamentos
T0	Tratamento de controle
P0	NF sobre a superfície do solo – saturação total
P1	NF a 15 cm da superfície do solo – saturação parcial
S30	$SEW_{30} = 30$ cm dia
S60	$SEW_{30} = 60$ cm dia
S90	$SEW_{30} = 90$ cm dia
S120	$SEW_{30} = 120$ cm dia
D0	Ausência de N
D1	Presença de N (50 kg ha^{-1})

Os dados coletados para as diferentes variáveis foram analisados estatisticamente por meio da análise da variância (teste F). Os efeitos estatisticamente significativos pelo teste F foram submetidos ao teste estatístico de comparação de médias entre os tratamentos, sendo adotado o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Também utilizou-se a análise de regressão polinomial quando foram observadas interações significativas entre os fatores quantitativos.

2.2.7 Manejo da irrigação

Durante os experimentos com lentilha, soja e trigo, o controle da irrigação foi realizado por meio de tensiômetros de cápsula porosa, instalados em uma das repetições de cada tratamento, nas profundidades de 15 e 30 cm.

Inicialmente, o manejo da irrigação foi fundamentado em se aplicar uma lâmina de água de 2 mm até o estabelecimento da cultura (15 DAE). A partir do 15 DAE, a irrigação era realizada somente quando o valor médio das leituras dos tensiômetros instalados a 15 cm de profundidade indicasse o valor de $-0,05$ MPa. A quantidade de água aplicada era determinada pelo potencial total da água no solo indicado pelos tensiômetros instalados a 30 cm de profundidade em cada tratamento. De posse do valor do potencial da água no solo, estimava-se por meio da equação de Genuchten (eq.1) a umidade volumétrica atual do solo. A lâmina de água aplicada em cada irrigação era suficiente para elevar novamente a umidade do solo próxima ao valor da umidade na capacidade de campo. A quantidade de água aplicada foi determinada pela equação 3.

$$L = (\theta_{cc} - \theta_a)Z \quad (3)$$

em que L é a lâmina de água aplicada (mm); θ_{cc} é a umidade a capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_a é umidade do solo atual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (mm), sendo considerada para ambas as culturas a profundidade de 300 mm.

No início dos tratamentos a irrigação era suspensa e reiniciada no momento em que o valor médio das leituras dos tensiômetros instalados nas unidades inundadas atingisse o valor da umidade considerada crítica ($-0,05$ MPa). A leitura dos tensiômetros era realizada diariamente, utilizando-se um vacuômetro digital. O volume de água correspondente ao calculado era aplicado por meio de uma proveta graduada.

2.2.8 Parâmetros avaliados durante os experimentos

Durante os experimentos foram realizadas coletas periódicas de plantas com a finalidade de avaliar o desenvolvimento das culturas estudadas em relação aos tratamentos aplicados.

As coletas foram realizadas aos 30, 45, 55, 65 e 75 DAE, para as plantas de lentilha, e aos 20, 35, 55, 75 e 90 DAE para as plantas de trigo. Foram coletadas aleatoriamente duas plantas de cada repetição de todos tratamentos. Devido o número inferior de plantas de soja por parcela, as coletas foram realizadas após a aplicação dos tratamentos aos 50 e 60 DAE. O material coletado foi separado em folhas, hastes, caule e vagens ou espigas. Durante as coletas foram realizadas avaliações da altura, da fitomassa total das plantas (folhas, caules, hastes e vagens) e da área foliar (AF).

Também foram realizadas análises foliares de macro e micronutrientes, teor de proteína dos grãos, determinação de parâmetros produtivos como: número de vagens e grãos produzidos, massa total de grãos e massa de 100 grãos. A metodologia utilizada para essas determinações será descrita nos próximos itens.

2.2.8.1 Altura de plantas

A mensuração da altura de plantas foi realizada em cada coleta de plantas de lentilha e de trigo por meio de uma trena metálica flexível. Foi tomada como a altura de planta a distância compreendida entre a extremidade inferior do caule ao ponto de inserção da última folha, para o caso da lentilha e na inserção da espiga, para o trigo.

Em plantas de soja a altura foi considerada como a distância entre o ponto de inserção do primeiro pecíolo de uma folha trifoliada completamente desenvolvida e a superfície do solo.

2.2.8.2 Área foliar e massa total das plantas

A área foliar foi estimada por um medidor fotoelétrico (LI-3000, Li-Cor) do Laboratório de Fisiologia de Plantas da ESALQ/USP.

Posteriormente, efetuou-se a secagem da matéria verde em estufa com ventilação forçada à temperatura média de 65°C, durante o tempo necessário para o material atingir a massa seca constante, o que foi determinado por pesagens diárias do material em balança digital com precisão de 0,001g.

2.2.8.3 Taxa de crescimento absoluto (TCA)

Com as determinações de área foliar e massa seca total em cada amostragem foi calculada a taxa de crescimento absoluto (TCA). A TCA avalia a produtividade primária líquida. É o somatório das taxas de crescimento dos diversos componentes das plantas (RADFORD, 1967; MAGALHÃES, 1985; PEREIRA; MACHADO, 1987). A TCA é expressa pela seguinte equação.

$$TCA = \frac{(W_{T2} - W_{T1})}{(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

em que, TCA é a taxa de crescimento absoluto (g dia⁻¹), W_{T1} e W_{T2} são a massa seca total da planta (g) coletada nos tempos t_1 e t_2 (dias).

2.2.8.4 Análise dos teores de macro e micronutrientes no tecido foliar

Após a determinação da AF, as folhas das plantas coletadas foram lavadas em uma solução de detergente neutro a 0,1% e secas em estufa com ventilação forçada a temperatura de 60°C, segundo as recomendações de Malavolta (1992). Após secagem, o material foi acondicionado em sacos de papel e submetido a análises dos teores de macronutrientes (N, P K, Ca, Mg e S) e de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) realizadas no Laboratório de fertilidade do departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP.

A análise foliar em plantas de lentilha foi realizada oito dias após o período de inundação total do solo (início da formação de vagens, 65 DAE). No experimento com plantas de soja, realizou-se a análise de folhas coletadas antes da inundação do solo, durante o período de florescimento da cultura, segundo recomendações de Ambrosano

et al. (1996) e durante o período de formação das vagens (estádio R4), dez dias após a aplicação dos tratamentos.

2.2.8.5 Teor de proteína dos grãos

A análise do teor de proteína em grãos de soja foi realizada em amostras coletadas de seis plantas de cada tratamento. Para cada amostra foram determinadas as concentrações de N, P, K e Ca.

O teor de proteína dos grãos foi determinado pela quantidade de N presente na amostra. Para isso, considerou-se que o N total em uma proteína represente 16% de seu peso, o que proporcionou um fator de conversão de 6,25, metodologia também adotada por Kolchinski e Schuch (2003).

2.2.8.6 Determinação da porosidade livre de água no solo

A variação da porosidade livre de água ou porosidade drenável foi estimada pela diferença entre a umidade de saturação ($\theta_s=0,49 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e a umidade atual do solo (θ_a). A umidade atual foi determinada por meio da equação de Genuchten (Eq.1) segundo metodologia utilizada por Queiroz; Cruciani e Libardi (1995). O potencial total da água foi obtido em leituras diárias realizadas em tensiômetros instalados a 7 cm de profundidade em duas parcelas de cada tratamento. A mensuração do potencial total da água foi realizada por meio de um vacuômetro digital com precisão de 0,001 bar.

2.2.8.7 Avaliação dos componentes de rendimento das culturas

Para avaliar a produção obtida nos experimentos com lentilha e soja, durante o período de colheita, foram coletadas duas plantas aleatoriamente para a avaliação dos componentes de rendimentos. Entende-se por componentes de rendimento o número de vagens por planta, número de grãos por vagem, massa total de grãos por planta e massa de cem grãos.

Para o trigo foram coletadas todas as espigas produzidas em cada parcela e de 10 espigas sorteadas quantificou-se o número de espiguetas por espiga, o número de grãos por espiga, a massa total de grãos e a massa de 100 grãos.

Para a obtenção da massa de grãos foi necessária a padronização da umidade dos grãos a 13%. Nesse intuito, determinou-se a umidade dos grãos após a colheita por meio de subamostras retiradas de cada repetição acondicionada em recipientes metálico e colocadas em estufa a temperatura de 110 a 120°C por 48 horas ou até atingir massa constante. A umidade dos grãos foi determinada pela seguinte equação.

$$U\% = \frac{P_u - P_s}{P_s} 100 \quad (5)$$

em que: U% é a umidade da massa de grãos em porcentagem; P_u é a massa de grãos úmidos (g) e P_s é a massa de grãos secos (g).

A massa de grãos foi então corrigida para o valor de umidade de 13% utilizando a eq. 6. Com a massa de grãos corrigida foi possível obter a massa de 100 grãos por meio da relação do número de grãos e a massa de grãos correspondente.

$$M_c = M \left[\frac{(100 - U\%)}{(100 - U_p\%)} \right] \quad (6)$$

em que M_c é a massa de grãos corrigida (g); M é a massa de grãos (g) a umidade de U% e $U_p\%$ é umidade considerada padrão (13%).

2.2.8.8 Determinação da temperatura do ar e do solo

A temperatura do ar, a umidade relativa e a evaporação da água foram registradas utilizando-se aparelhos instalados em um abrigo meteorológico, localizado no interior da casa-de-vegetação. A evaporação da água foi medida com o uso de um atmômetro de cápsula porosa de porcelana com 100 mm de diâmetro. A leitura era realizada diretamente no artefato em uma escala graduada em milímetros. Os registros da temperatura ambiente instantânea, máximos e mínimos foram realizados por meio de um termohigrômetro digital. A temperatura do solo foi obtida por um sensor instalado na profundidade de 10 cm em uma das parcelas experimentais ligado ao

termohigrômetro digital e por um geotermomêtro digital tipo espeto, que foi utilizado durante a inundação do solo.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Experimento I - Lentilha

2.3.1.1 Efeitos dos tratamentos na fenologia da cultura

A temperatura do ar e do solo exercem influências significativas no desenvolvimento das plantas. Devido a lentilha ser um cultura de clima temperado (GIORDANO; PEREIRA; LOPES, 1988), havia uma preocupação quanto aos efeitos da temperatura no interior da casa-de-vegetação sobre o crescimento das plantas de lentilha.

No decorrer do desenvolvimento da cultura, a temperatura do ar no interior da casa-de-vegetação foi em média 5°C maior do que a temperatura registrada no posto meteorológico da ESALQ/USP. Durante o período de germinação das sementes, foram registradas temperaturas médias do ar e do solo de 20,5 e 19,2°C, respectivamente. Valores dentro da faixa de temperatura ideal para a germinação das sementes de lentilha (MUEHLBAUER et al., 1993).

A emergência das plântulas de lentilha ocorreu uniformemente em todas as unidades experimentais, no período de seis a sete dias após a semeadura. Esse período foi semelhante ao observado por Vieira et al. (1999).

Durante o período vegetativo, a temperatura do ar no interior da casa-de-vegetação variou de 17 a 25°C. Nesse estágio, temperaturas superiores a 27°C podem afetar significativamente o desenvolvimento das plântulas (SUMMERFIELD, 1982 apud MUEHLBAUER et al., 1993). A variação da temperatura média do ar e do solo no interior da casa-de-vegetação durante o ciclo de desenvolvimento da lentilha é representada graficamente na Figura 4.

Figura 4 - Temperatura média do ar e do solo no interior da casa-de-vegetação em relação os estádios de desenvolvimento da cultura da lentilha. * Inundação total do solo

A lentilha é uma cultura de hábito de crescimento indeterminado, apresentando um florescimento prolongado, concomitante com a formação de novos ramos, vagens e grãos (MUEHLBAUER et al., 1993). O número de dias entre a emergência e o início do florescimento da lentilha pode variar com a temperatura e com o fotoperíodo (WHITEHEAD et al., 2000). Nas condições em que o experimento foi realizado, o estágio de florescimento da cultura teve início aos 45 dias após a emergência (45 DAE). Período semelhante ao observado por Whitehead et al. (2000) em diferentes genótipos de lentilha.

O término do florescimento, identificado pela ausência de flores em 50% das plantas das parcelas, ocorreu em média aos 65 DAE. A interrupção do florescimento da lentilha ocorre quando as plantas são submetidas a alguma forma de estresse de origem hídrica, nutricional, climática ou química (MUEHLBAUER et al., 1993). Vieira et al. (1999) observaram que a interrupção do período de florescimento foi ocasionada pelo aumento da temperatura ambiente. Porém, não houve um aumento significativo da temperatura durante o período de florescimento, como se verifica na Figura 4.

A interrupção do período de florescimento pode ser atribuída ao excesso de água do solo, ocasionado pela inundação total do solo aos 57 DAE. Durante esse período, a umidade volumétrica do solo encontrava-se acima da capacidade de campo ($0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), como se observa na Figura 5.

Figura 5 - Umidade do solo durante o ciclo de desenvolvimento da lentilha em parcelas inundadas e não inundadas. * Inundação total do solo

A influência da umidade do solo sobre o período de florescimento, tem sido observada em diversas culturas como feijão (DINIZ; FERREIRA; VALE, 1993), soja (SIONIT; KRAMER, 1977) e trigo (MÉLLO JÚNIOR, 1992). No entanto, não foram verificados efeitos significativos dos tratamentos ao período de florescimento das plantas de lentilha em comparação ao tratamento de controle. O número de dias do florescimento das plantas variou entre 16 a 20 dias e não foram observadas relações entre a velocidade de elevação e de rebaixamento do NF com a duração do estágio de florescimento da cultura.

O estágio de maturação teve início aos 95 DAE, quando as plantas começaram a apresentar uma coloração amarelada. Nesta fase não foram observadas diferenças significativas em relação à duração do estágio reprodutivo entre plantas submetidas à inundação do solo e de plantas não inundadas. O período reprodutivo foi em média de 50 dias. A duração dos estádios fenológicos observadas neste experimento foram semelhantes às obtidas por Whitehead et al. (2000) em trabalho realizado em campo

Na literatura, não há informações sobre alterações do ciclo fenológico de plantas de lentilha submetidas à inundação do solo. No entanto, observaram-se variações nos parâmetros relacionados ao desenvolvimento e ao rendimento das plantas de lentilha, que serão abordados nos itens subseqüentes.

2.3.1.2 Alterações morfofisiológicas ocasionadas pelo excesso de água no solo

Com a inundação total do solo, não foram observados sintomas como murchamento e, ou epinastia das folhas. Reações apresentadas pelas plantas que podem ser atribuídas à redução da concentração de O_2 no solo (KRAMER, 1951), apesar de haver indicações a respeito de influências de fatores como a condutância estomática, a resistência do fluxo de água no sistema radicular e a concentração de substâncias como o CO_2 e o etileno (BRADFORD; HSIAO, 1982; BRADFORD; YANG, 1981).

A ocorrência desses sintomas era esperada, pois a lentilha é considerada uma espécie sensível à deficiência de O_2 no solo (JAYASUNDARA; THOMSON; TANG, 1994). Entretanto, a reação das plantas a períodos de hipoxia ou anoxia, não está somente relacionada à tolerância das culturas ao excesso de água no solo, mas também aos fatores climáticos como a temperatura, a umidade relativa do ar, a radiação solar incidente e outros.

Durante o período de inundação das parcelas ocorreu uma queda brusca da temperatura do ar ($8^{\circ}C$) e do solo ($6^{\circ}C$), mantendo-se nessa condição ao longo do rebaixamento do NF, como pode ser observado na Figura 6. Essa mudança de temperatura provavelmente contribuiu para minimizar o estresse ocasionado pela inundação do solo, favorecendo a manutenção da turgescência das folhas. Observações semelhantes foram realizadas por Calheiros et al. (2001).

Em solo inundado, temperaturas elevadas potencializam os efeitos do déficit de O_2 , pois ocorre um aumento no consumo de O_2 pelas plantas e pelos microorganismos e também na velocidade das transformações químicas (oxi-redução) realizadas no solo (LUXMOORE; FISCHER; STOLZY, 1973). Em plantas de grão-de-bico, o murchamento das folhas foi positivamente correlacionado ao aumento da temperatura do ar, principalmente quando esta foi superior a $30^{\circ}C$ (COWIE; JESSOP; MacCLEOD, 1995).

No entanto, a redução da temperatura do solo pode aumentar a tolerância das plantas a períodos de deficiência de O_2 do solo (BLACKWELL, 1983). Nesse caso, as culturas de inverno apresentam uma tolerância maior à deficiência de oxigênio do

que plantas cultivadas no verão, devido a menor atividade metabólica e transpirométrica.

Figura 6 - Profundidade do NF no interior das parcelas experimentais em relação à superfície do solo durante aplicação dos tratamentos e temperatura do ar e do solo não inundado no interior da casa-de-vegetação

Não foram observadas alterações morfofisiológicas como a formação de lenticelas, aerênquimas e raízes adventícias. No entanto, estas estruturas foram observadas em plantas de lentilha submetidas à inundação do solo por seis dias (ALCALDE; SUMMERFIELD, 1994).

Porém, foi constatado um aumento do processo de senescência das folhas em plantas submetidas à inundação do solo, o que não ocorreu no tratamento de controle. A senescência prematura das folhas é um sintoma verificado em diversas espécies submetidas à inundação do solo como ervilha, grão de bico, feijão e lentilha (JAYASUNDARA; THOMSON; TANG, 1994). Em alguns casos a senescência prematura das folhas em plantas submetidas à inundação do solo é atribuída à deficiência de nutrientes, principalmente de nitrogênio. Porém, outros fatores podem estar envolvidos, como o aumento da concentração de etileno e alterações metabólicas das plantas (PEZESHKI, 1994).

2.3.1.3 Efeitos dos tratamentos na nutrição mineral das plantas

A análise foliar realizada após o término dos tratamentos, revelou reduções significativas dos teores de N, K, Ca, Mg e Mn em plantas submetidas à inundação do solo em relação aos observados em plantas do tratamento de controle. Os teores de macro (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe e Mn) determinados em tecidos de folhas de lentilhas submetidas à inundação do solo e não inundadas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Teores de macro e micronutrientes de folhas de lentilha submetidas à inundação do solo e plantas não inundadas coletadas aos 65 DAE

Condição do solo	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----	
Inundado	31,4	3,6	38,2	12,8	3,2	234,6	17,7
Não inundado	37,6**	3,8 ^{ns}	40,7*	17,4**	4,0*	227,4 ^{ns}	39,9**
CV(%)	5,38	8,32	5,82	9,92	10,80	22,2	21,2

*, ** Médias significativas entre si a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Efeito não significativo

A redução da concentração de nutrientes no tecido foliar de plantas submetidas ao excesso de água no solo tem sido observada em ervilha (BELFORD et al, 1980), em milho (SINGH; GHILDYAL, 1980) e em feijão e trigo (CALHEIROS et al, 2000). Em lentilha, a inundação do solo por duas semanas reduziu significativamente a concentração de K e Ca na parte aérea e nas raízes das plantas (ASHRAF; CHISHTI, 1993).

As plantas submetidas à inundação do solo apresentaram uma redução superior a 15% da concentração de N no tecido foliar em relação ao teor desse nutriente em plantas não inundadas (Tabela 10). Os teores de N encontrados em plantas inundadas foram semelhantes aos observados por Hoor et al. (2001).

A inibição da absorção de N em condições inundadas pode ser responsável em parte pela clorose e senescência prematura de folhas de plantas inundadas. A inundação do solo reduz profundamente a absorção de nutrientes, principalmente de

nitrogênio, como observado em ervilha (BELFORD et al. ,1980) e lentilha, grão-de-bico e feijão guandu (JAYASUNDARA; THOMSON; TANG, 1994)

Devido o elevado teor de proteína nos grãos, as leguminosas necessitam de grandes quantidades de N em relação a culturas como o milho e o trigo. Segundo Giordano; Pereira e Lopes (1988), para produzir 1,5 t de grãos de lentilha são necessários 75 kg N, 52 kg K₂O e 21 kg P₂O₅. Reduções na absorção desses nutrientes podem ocasionar danos à produtividade da cultura.

Segundo Kurdali; Kalifa e Al-Shamma (1997), 60 a 70% do N total requerido pelas plantas de lentilha é fornecido pela fixação biológica de N₂. O restante (30 a 40%) é fornecido pelo solo.

A redução da absorção de N em solos inundados pode ser atribuída à fixação de biológica de N₂. O ambiente anaeróbico ocasionado pelo excesso de água no solo prejudica a formação dos nódulos e afeta atividade de nitrogenase, além de reduzir a sobrevivência dos rizóbios (MINCHIN; PATE, 1975; ROUGHLEY et al., 1995; TURNER et al., 1983).

Em relação ao manejo do NF, houve um incremento linear do teor de N com o aumento da taxa de ascensão do NF, como mostrado na Figura 7a. Resultado que concorda com as observações realizadas por Kozlowski e Pallardy (1984). As plantas submetidas à elevação do NF de 5 cm dia⁻¹, apresentaram os menores teores de N no tecido foliar (29,3 g kg⁻¹). Comportamento semelhante foi observado em relação ao teor de K (Figura 7b).

Figura 7 - Efeito da elevação do NF de 5, 15 e 30 cm dia⁻¹ no teor de N (a) e de K (b) de folhas de lentilha ** Significativo a 1% de probabilidade

Em relação ao Ca, os tratamentos ocasionaram uma redução de 24% em comparação com o teor desse elemento no tecido foliar de plantas não inundadas. A concentração de Ca nas folhas de lentilha não foi afetada pelas taxas de elevação e de rebaixamento do NF impostos às plantas. Ashraf e Chishti (1993) observaram uma redução significativa da concentração de Ca em folhas de lentilha submetidas a 14 dias de inundação do solo. As maiores reduções foram observadas nos cultivares mais sensíveis à deficiência de oxigênio.

O teor de P no tecido foliar de plantas submetidas à inundação do solo foi em média 5% inferior ao teor desse nutriente em plantas não inundadas. No entanto, em plantas submetidas à ascensão do NF de 5 cm dia⁻¹ a redução do teor de P atingiu o valor de 12%. O P é um elemento pouco móvel no solo e seu suprimento para as raízes é efetuada principalmente por difusão, o qual depende da umidade do solo e da superfície radicular (OLSEN; WATANABE, 1970). Para algumas espécies como lentilha a maior resposta à adubação fosfatada ocorre em condições de estresse hídrico (MATAR, 1977).

Os teores de macro e micronutrientes encontrados no tecido foliar de plantas inundadas estão dentro do limite considerado adequado ao desenvolvimento da cultura (MALAVOLTA, 1992). No entanto, os sintomas observados nas folhas das plantas submetidas à inundação do solo como clorose e senescência das folhas, podem ser atribuídos à absorção deficiente de nutrientes, principalmente de N. Estes sintomas foram observados em diversas culturas (PEZESHKI, 1994).

Existem evidências que a inibição da absorção de nutrientes e conseqüentemente a deficiência de nutrientes está diretamente relacionada com o aumento da senescência foliar e à suspensão do crescimento de plantas submetidas ao encharcamento do solo (TROUGHT; DREW, 1980b).

O crescimento das raízes de muitas espécies sob condições saturadas é suspenso imediatamente e as raízes podem morrer em poucos dias. Porém, o crescimento da parte aérea continua por vários dias sem apresentar sintomas visíveis ocasionados pela inundação (TROUGHT; DREW, 1980a). A suspensão do crescimento e da respiração das raízes leva a uma drástica redução da absorção e transporte de

nutrientes para a parte aérea das plantas em poucos dias. Devido ao aumento da biomassa da planta, a concentração de nutrientes diminui pela diluição.

A baixa concentração de O_2 no solo além de afetar a absorção de nutrientes essenciais ocasiona um aumento da disponibilidade de certos elementos químicos às plantas provocando efeitos de toxidez, principalmente de Fe e Mn (GRABLE, 1966).

As taxas de elevação e de rebaixamento do NF não afetaram significativamente a concentração de Fe no tecido de folhas em relação ao tratamento de controle (Tabela 10). Ao contrário do observado em relação ao teor de Mn, que foi significativamente menor em plantas submetidas à inundação do solo. Estes resultados diferem de trabalhos que apontam o incremento da concentração de Fe e Mn no tecido de folhas de plantas submetidas à inundação do solo.

O aumento da disponibilidade desses elementos em solos alagados está relacionado aos processos de redução das formas Fe^{3+} e Mn^{3+} para Fe^{2+} e Mn^{2+} (PONNAMPERUMA, 1972). No entanto, absorção desses elementos depende da espécie e do cultivar. Espécies tolerantes à deficiência de O_2 no solo, são capazes de desenvolver mecanismos específicos para controlar a absorção de Fe e Mn (ARMSTRONG, 1982). Tal comportamento foi observado em cultivares de lentilha (ASHRAF; CHISHTI, 1993) e de trigo (HUANG et al., 1995).

2.3.1.4 Efeito dos tratamentos na altura das plantas

Os níveis de elevação e de rebaixamento do NF não ocasionaram alterações significativas na altura das plantas de lentilha em relação à estatura média de plantas não inundadas (tratamento de controle). Porém, as plantas inundadas apresentaram uma estatura menor do que a mensurada em plantas não inundadas, como pode ser observado na Tabela 11.

A altura final das plantas de lentilha, neste experimento, não difere de resultados obtidos por Vieira et al. (1999); Ayub; Rahim e Amjad (2001).

Tabela 11 - Altura média (cm) de plantas submetidas à inundação do solo e de plantas não inundadas, aos 30, 45, 55, 65 e 75 DAE

Tratamentos	Altura média de plantas (cm)				
	-----DAE-----				
	30	45	55	65	75
Plantas inundadas	15,1	24,0	32,3	40,0	42,7
Plantas não inundadas	16,7 ^{ns}	25,3 ^{ns}	33,3 ^{ns}	42,0 ^{ns}	46,6 ^{ns}
CV (%)	15,2	13,8	11,2	9,7	7,8

^{ns} Efeito não significativo

Inundações do solo de curta duração, geralmente, não ocasionam efeitos significativos na estatura das plantas, ao contrário do que se observa em plantas submetidas a inundações do solo por períodos prolongados. Sá; Cruciani e Minami (2004) observaram que seis horas de inundação total do solo, não ocasionaram efeitos significativos na altura de plantas de ervilha em relação à altura de plantas não inundadas. Porém, reduções significativas da altura de plantas de ervilha foram observadas após quatro dias de inundação do solo (CANNELL et al., 1979).

Os efeitos da inundação do solo na altura das plantas também estão relacionados com o estágio de desenvolvimento da cultura. Em feijão, foram verificadas reduções na altura das plantas quando foram submetidas a quatro dias de inundação, no estágio de florescimento da cultura (SILVA, 1982). Em soja, o encharcamento do solo durante o estágio vegetativo afetou significativamente a altura das plantas, mas quando o estresse ocorreu durante o estágio reprodutivo, a altura das plantas não foi afetada (GRIFFIN; SAXTON, 1988).

A aplicação de uréia na dose correspondente a 50 kg N ha⁻¹, oito dias após a inundação total do solo, quando as plantas encontravam-se no período final do estágio de florescimento da cultura (65 DAE), não afetou significativamente a altura final das plantas de lentilha. A altura média apresentada pelas plantas que receberam N após o rebaixamento do NF foi semelhante à altura de plantas sem a aplicação de N.

2.3.1.5 Efeitos dos tratamentos na área foliar de plantas de lentilha

No início da ascensão do NF, fase inicial do florescimento (45 DAE), as plantas de lentilha apresentavam um crescimento uniforme e homogêneo, não sendo observadas diferenças significativas do desenvolvimento foliar entre os tratamentos. Na Tabela 12, são apresentados os valores médios das áreas foliares de plantas de lentilha submetidas à inundação do solo e de não inundadas ao longo do desenvolvimento da cultura da lentilha.

Tabela 12 - Área foliar média (cm²) de plantas de lentilha submetidas à inundação do solo e de plantas não inundadas (tratamento de controle) ao longo do período de desenvolvimento

Tratamentos	Dias após a emergência (DAE)				
	30	45	55	65	75
Plantas inundadas	42,11	109,31	182,68	219,87	230,57
Plantas não inundadas	44,42 ^{ns}	127,33 ^{ns}	209,08 ^{ns}	258,83 ^{**}	287,91 ^{**}
CV (%)	15,6	16,2	22,0	20,0	15,9

^{**} Médias significativas entre si a 1% de probabilidade; ^{ns} Efeito não significativo

Aos 55 DAE, as plantas submetidas à elevação do NF em 5 cm dia⁻¹ (E1) apresentaram uma área foliar média 20% menor do que a obtida em plantas do tratamento de controle. Já as taxas de elevação do NF de 15 e 30 cm dia⁻¹ (E2 e E3) ocasionaram reduções da área foliar de 8 e 11%, respectivamente. Contudo, não houve diferenças significativas entre os níveis de elevação do NF e o tratamento de controle. O desenvolvimento da área foliar de plantas de lentilha em resposta aos níveis de elevação e rebaixamento do NF é mostrado na Figura 8.

Apesar do menor desenvolvimento foliar apresentado em plantas submetidas à elevação E1 em relação aos demais tratamentos, esperava-se que a elevação do NF em 5 cm dia⁻¹ ocasionasse maiores prejuízos ao crescimento das plantas, devido à baixa tolerância da cultura ao excesso de água no solo (MUEHLBAUER; TULLU, 2003).

Figura 8 - Desenvolvimento da área foliar de plantas de lentilha submetidas à elevação do NF de 5 , 15 e 30 cm dia⁻¹ e ao rebaixamento de 5 (R1); 15 (R2) e 30 cm dia⁻¹ (R3) e de plantas não inundadas (T0)

Ao final do estágio de florescimento (65 DAE), os efeitos da deficiência de O₂ no solo ao desenvolvimento das plantas foram significativos (Tabela 12). Este resultado foi

ocasionado principalmente pela elevação do NF em 5 cm dia⁻¹, que diferiu significativamente dos efeitos ocasionados pelas taxas E2 e E3.

Em relação à área foliar do tratamento de controle, o decréscimo médio da área foliar de plantas submetidas ao tratamento E1 foi de 25%. Já as taxas de elevação do NF de 15 e 30 cm dia⁻¹, ocasionaram reduções da área foliar de 8 e 12%, respectivamente, não havendo diferenças significativas entre as mesmas.

Observa-se na Figura 8, que ao final do estágio de florescimento (65 DAE), as áreas foliares de plantas submetidas aos tratamentos E2 e E3, não variaram significativamente em relação aos níveis de rebaixamento do NF. Comportamento divergente ao apresentado por plantas submetidas ao tratamento E1. Nesse tratamento, a velocidade de rebaixamento do NF de 5 cm dia⁻¹ ocasionou um maior decréscimo da área foliar em relação aos demais níveis de rebaixamento. Porém, não foram observados efeitos significativos do rebaixamento do NF no desenvolvimento foliar das plantas de lentilhas.

No período de formação e enchimento de grãos (75 DAE), foram observadas diferenças significativas entre o manejo do NF e tratamento de controle (Tabela 12). A redução média da área foliar ocasionada pelos tratamentos foi de 20% em relação ao tratamento de controle. Esse valor foi superior ao observado aos 65 DAE (15%). Tal resultado indica que o manejo do NF não contribuiu efetivamente para a recuperação da expansão foliar de plantas submetidas à inundação do solo. Porém, esse resultado pode ser atribuído aos danos significativos ocasionados pela elevação e pelo rebaixamento do NF em 5 cm dia⁻¹.

Aos 75 DAE, a velocidade de ascensão do NF de 5, 15 e 30 cm dia⁻¹ reduziu a área foliar em 27, 17 e 16%, respectivamente. Valores semelhantes foram observados em relação ao rebaixamento do NF em 5, 15 e 30 cm dia⁻¹, 25, 18 e 15%, respectivamente. Os resultados encontrados diferem dos obtidos por Alcalde e Summerfield (1994), que observaram reduções de até 60% da área foliar de plantas de lentilha submetidas à inundação por seis dias consecutivos.

Durante a fase de formação de vagens (75 DAE), verificou-se que a área foliar das plantas de lentilha aumentou linearmente com a taxa de elevação do NF, o mesmo sendo observado em relação à velocidade de rebaixamento do NF, como mostrado na

Figura 9. A maior área foliar foi obtida pela elevação e rebaixamento de 30 cm dia⁻¹ e a menor quando o NF foi elevado e rebaixado na velocidade de 5 cm dia⁻¹. Não foram observados efeitos significativos da interação dos fatores elevação e rebaixamento.

Figura 9 - Efeito da elevação (a) e do rebaixamento do NF (b) na área foliar de plantas de lentilha aos 75 DAE. ** Significativo a 1% de probabilidade

Em relação à adubação nitrogenada, não foram observados efeitos significativos da aplicação de 50 kg N ha⁻¹ na área foliar de plantas submetidas à inundação do solo. Observações divergentes foram realizadas por Matsunaga et al. (1994).

Os resultados sugerem que mesmo após a drenagem total das parcelas e a adição de nitrogênio, não houve uma recuperação efetiva do desenvolvimento foliar de plantas de lentilha do estresse ocasionado pelos tratamentos. Fato atribuído a senescência prematura das folhas e a inibição da expansão foliar, que ocasionaram plantas com menores áreas foliares em relação às plantas não inundadas.

A senescência das folhas pode estar associada à degeneração do sistema radicular, à deficiência de nutrientes como o nitrogênio, ao aumento da concentração de etileno na zona radicular e nas folhas e com modificações do fluxo interno de substâncias entre as raízes e a parte aérea da plantas, como giberelinas e citocininas (JACKSON e DREW, 1984; PEZESHKI, 1994; UMAHARAN et al., 1997).

2.3.1.6 Efeitos dos tratamentos na massa seca total

Não foram observadas diferenças significativas na massa seca total (MST) das plantas de lentilhas coletadas aos 30 e 45 DAE, indicando que as plantas apresentavam uma biomassa da parte aérea homogênea antes da execução dos tratamentos. Os valores médios da MST obtidos em amostragens realizadas ao longo do desenvolvimento da cultura são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Massa seca total de plantas de lentilha submetidas à inundação do solo e não inundadas (Controle) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

Tratamentos	Massa seca total (g)				
	-----DAE-----				
	30	45	55	65	75
Plantas inundadas	0,16	0,54	0,95	1,43	2,12
Plantas não inundadas	0,18 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,99 ^{ns}	1,80 ^{**}	2,80 ^{**}
CV (%)	8,8	10,2	16,3	14,4	17,5

^{**} Médias significativas entre si a 1% de probabilidade; ^{ns} Efeito não significativo

No estágio de florescimento da cultura (55DAE), a ascensão progressiva do NF não afetou significativamente a MST das plantas em relação às plantas não inundadas. Entretanto, as plantas submetidas à elevação do NF de 5 cm dia⁻¹ (E1) apresentaram uma redução média da MST de 12% em comparação com a obtida em plantas do tratamento de controle. Em plantas submetidas aos tratamentos E2 e E3, os decréscimos da MST foram inferiores a 2%.

As reduções da área foliar e da MST de plantas submetidas à elevação de 5 cm dia⁻¹, aos 55 DAE, podem ser interpretadas como respostas iniciais das plantas à aeração deficiente do solo, ocasionada pela ascensão do NF.

Danos ao desenvolvimento de leguminosas de inverno, ocasionados pelo excesso de água no solo, têm sido relatados em trabalhos realizados com ervilha (BELFORD et al., 1980; CANELL et al., 1979), grão-de-bico (COWIE; JESSOP; MacLEOD, 1996) e lentilha (ASHRAF; CHISHTI, 1993).

Com a continuidade dos tratamentos, a MST das plantas foi significativamente inferior à observada em plantas não inundadas (Tabela 13). Em relação ao tratamento

de controle, a MST de plantas submetidas à inundação foi reduzida em 20% ao final do estágio de florescimento (65 DAE) e em 24% após a drenagem das parcelas (75 DAE). Estas observações indicam que não houve uma recuperação significativa das plantas após o estresse por excesso hídrico. No entanto, esse resultado pode ser atribuído aos efeitos negativos ocasionados pela elevação e pelo rebaixamento do NF a 5 cm dia⁻¹. As plantas submetidas a essa taxa apresentaram uma redução da MST superior a 30% em relação ao tratamento de controle. Em relação às taxas de 15 e 30 cm dia⁻¹ foram observadas reduções médias de 22 e 18%, respectivamente.

O manejo do NF interferiu significativamente no acúmulo de matéria seca em plantas submetidas ao excesso de água no solo. O incremento da velocidade de ascensão do NF de 5 para 30 cm dia⁻¹ ocasionou um acréscimo de 23% da matéria seca, como se observa na Figura 10a. O aumento da velocidade de rebaixamento do NF também ocasionou um incremento significativo da MST das plantas de lentilha (Figura 10b).

Figura 10 - Efeito da elevação (a) e do rebaixamento do NF (b) na massa seca total da parte aérea de plantas de lentilha aos 75 DAE. ** Significativo a 1% de probabilidade

Efeitos do manejo do NF foram observados também na taxa de crescimento absoluto de plantas de lentilha (TC), como mostrado na Figura 11. No período em que solo foi totalmente inundado (55-65DAE), as plantas de lentilha afetadas apresentaram uma TC 41% menor do que a TC do tratamento de controle. A menor taxa de crescimento foi observada em plantas submetidas à elevação do NF em 5 cm dia⁻¹. Nesse tratamento, a TC foi 52% menor do que a de plantas não inundadas. Nos demais

níveis de ascensão do NF (15 e 30 cm dia^{-1}), as reduções da TC foram de 35 e 37%, respectivamente.

Figura 11 - Taxa de crescimento de plantas de lentilha em função da elevação do NF de 5, 15 e 30 cm dia^{-1} e rebaixamento de 5 (R1), 15 (R2) e 30 cm dia^{-1} (R3) e de plantas não inundadas (T0)

Em relação ao rebaixamento do NF, as plantas submetidas ao tratamento E1, apresentaram taxas de crescimento semelhantes, no entanto, significativamente inferiores à TC de plantas não inundadas. Este comportamento foi verificado também em plantas submetidas à elevação do NF em 15 cm dia⁻¹.

Os efeitos positivos do manejo do NF no crescimento de plantas de lentilha foram ocasionados pela elevação do NF em 30 cm dia⁻¹ (E3). As plantas submetidas à esse tratamento apresentaram uma TC semelhante à observada no tratamento de controle, principalmente quando o NF foi rebaixado em 15 e 30 cm dia⁻¹ (Figura 11).

Os decréscimos da MST observados neste experimento foram inferiores aos obtidos por Alcalde e Summerfield (1994), que mencionam reduções de 38 a 79% da massa seca total de plantas de lentilhas submetidas a períodos de 2 a 6 dias de inundação do solo. Essa diferença pode estar relacionada a fatores como o cultivar, o estágio de desenvolvimento da cultura, o tipo do solo, a temperatura ambiente, o tempo de inundação e outros (ASHRAF; CHISHTI, 1993; PANG et al., 2004).

A análise do material coletado aos 65 e 75 DAE, indicou reduções significativas da massa de folhas secas de plantas submetidas à inundação do solo em relação ao tratamento de controle. As massas secas médias de folhas e de ramos de plantas submetidas à inundação do solo e de plantas não inundadas, aos 65 e 75 DAE são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Massa de folhas (MF), de ramos (MR) e de vagens (MV) obtida em plantas de lentilha submetidas à inundação do solo com e sem adição de N e plantas não inundadas determinadas aos 65 e 75 DAE

Tratamentos	65 DAE		75 DAE		
	MF	MR	MF	MR	MV
Plantas inundadas sem N	0,70	0,73	0,84a ⁽¹⁾	0,99a	0,27a
Plantas inundadas com N	-	-	0,88a	0,99a	0,27a
Plantas não inundadas	0,90**	0,87**	1,22**	1,19 ^{ns}	0,39 ^{ns}

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras distintas diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey;

** Médias significativas entre si a 1% de probabilidade;

Em média, os decréscimos da massa de folhas de plantas submetidas à inundação do solo em relação ao tratamento de controle foram de 22%, aos 65 DAE, e

de 30%, aos 75DAE. Decréscimos inferiores foram observados na matéria seca dos ramos, 16 e 17%, respectivamente.

Os danos ocasionados à massa de folhas secas parecem estar relacionados com a redução do crescimento foliar, oriundos da inibição da expansão foliar e também pela senescência prematura das folhas. Resultados semelhantes foram observados em plantas de ervilha (BELFORD et al., 1980) e em feijão (SINGH et al., 1991).

A redução da massa de folhas pode ser causada pelo murchamento, epinastia, amarelecimento, clorose e necrose e também pelo desfolhamento. No entanto, pode-se atribuir a redução da massa foliar a senescência prematura das folhas e à diminuição das ramificações das plantas submetidas ao encharcamento do solo.

A exposição do sistema radicular a baixas concentrações de O_2 produz sinais que causam efeitos na parte aérea da planta. Presume-se que esses sinais sejam na forma de compostos específicos e, ou, variações no fluxo de substâncias entre a raiz e a parte aérea da planta (TROUGHT; DREW, 1980). O crescimento foliar é extremamente sensível ao encharcamento do solo e conseqüentemente à deficiência de O_2 . Wadman e Andel (1985), observaram que plantas de feijão paralisaram totalmente o crescimento foliar após 24 h de encharcamento do solo.

A aplicação de N após o período de inundação do solo não ocasionou efeitos significativos na massa de folhas seca, de ramos, de vagens e conseqüentemente na massa seca total (Tabela 14). As plantas que receberam a dosagem de 50 kg N ha^{-1} , apresentaram um pequeno incremento da massa seca da parte aérea, porém insuficiente para proporcionar uma recuperação efetiva das plantas ao estresse por excesso hídrico.

Os níveis de elevação e de rebaixamento do NF interferiram significativamente no acúmulo de biomassa na parte aérea das plantas de lentilha. No entanto, os resultados obtidos foram contrários às expectativas de que o manejo do NF e a aplicação de nitrogênio, promoveriam uma retomada do crescimento vegetativo mais intenso em relação ao tratamento de controle. Tal comportamento pode estar relacionado com a tolerância da cultura a períodos de hipoxia no solo.

Culturas mais tolerantes ao encharcamento podem apresentar uma taxa de desenvolvimento maior após a inundação do solo, como observado em plantas de soja (GASTAL, 2000).

A habilidade das plantas em sobreviver e de se recuperar após o encharcamento do solo depende da duração da inundação e do estágio de desenvolvimento da cultura e geralmente decresce durante a fase reprodutiva (COWIE; JESSOP; MacLEOD, 1996). Plantas de feijão-caupi submetidas à inundação do solo no estágio vegetativo apresentaram uma recuperação mais rápida do que plantas inundadas durante o período reprodutivo (UMAHARAN; ARIYANAYAGAM; HAQUE, 1997). Isso ocorre devido à redução da absorção de água e de nutrientes pelas raízes ser maior em plantas mais velhas do que em plantas novas (BELFORD et al., 1980).

2.3.1.7 Efeitos dos tratamentos nos componentes de rendimento da lentilha

O excesso de água no solo afetou significativamente os componentes de rendimento das plantas de lentilha. Diferenças significativas foram observadas entre os rendimentos apresentados por plantas submetidas à inundação do solo e os obtidos em plantas não inundadas. Na Tabela 15, são apresentados os componentes de rendimento avaliados de plantas submetidas ao excesso de água no solo e de plantas do tratamento de controle.

Tabela 15 - Componentes de rendimento de plantas de lentilha submetidas à inundação do solo e de plantas não inundadas.

Tratamentos	Número de grãos	Massa total de grãos (g)	Massa de 100 grãos (g)
Plantas inundadas	66	4,1	6,1
Plantas não inundadas	91**	5,9**	6,9**
CV (%)	15,2	18,5	10,3

** Médias significativas entre si a 1% de probabilidade pelo teste F.

Em relação ao número de grãos, os tratamentos ocasionaram uma redução média de 27% em comparação com o número de grãos produzidos por plantas do

tratamento de controle. Os danos mais severos à produção de grãos foram observados em plantas submetidas à elevação do NF em 5 cm dia⁻¹. As plantas submetidas à esse tratamento apresentaram uma produção média de 54 grãos por planta, representando uma redução de 40% em relação ao tratamento de controle.

O número de grãos obtidos no tratamento E1 diferiu significativamente dos demais níveis de elevação do NF (15 e 30 cm dia⁻¹). A produção equivalente nesses tratamentos foi de 77 e 81%.

Os níveis de rebaixamento do NF também afetaram significativamente a produção de grãos de lentilha. A menor produção de grãos foi obtida em plantas submetidas ao tratamento R1. Nesse tratamento, o decréscimo no número de grãos em relação ao tratamento de controle foi de 37%. Em plantas submetidas às taxas de rebaixamento de 15 e 30 cm dia⁻¹, a redução do número de grãos produzidos foi de 25 e 20%, respectivamente.

Houve uma relação significativa entre o número de grãos e o manejo do NF. O aumento da velocidade de ascensão do NF ocasionou um incremento linear do número de grãos de lentilha, como se observa na Figura 12a. Comportamento semelhante foi constatado em relação ao rebaixamento do NF (Figura 12b).

Figura 12 - Efeito da elevação (a) e do rebaixamento do NF (b) no número de grãos de lentilha.
** Significativo a 1% de probabilidade

A massa total de grãos produzida em plantas submetidas à inundação do solo foi significativamente inferior à observada no tratamento de controle, como pode ser verificado na Tabela 15. O excesso de água no solo durante o período de florescimento da cultura reduziu a produção de grãos em 30%. As menores produções foram

observadas principalmente, em plantas submetidas ao tratamento E1. Nesse tratamento, a massa de grãos foi de 3,3 g enquanto que, a obtida no tratamento de controle foi de 5,9 g por planta, indicando uma redução na produção de grãos de 45%. A massa de grãos obtida no tratamento E1 diferiu significativamente dos demais tratamentos (15 e 30 cm dia⁻¹), que apresentaram produções de 4,4 e 4,5 g por planta, respectivamente.

A massa total de grãos de lentilha variou significativamente com o aumento da velocidade de ascensão do NF, como mostrado na Figura 13a. Tendência semelhante foi observada em relação às taxas de rebaixamento do NF (Figura 13b). Em relação aos níveis de rebaixamento do NF, a menor produção de grãos foi obtida em plantas submetidas ao rebaixamento do NF de 5 cm dia⁻¹. Nesse tratamento, o decréscimo da produtividade em relação ao tratamento de controle foi superior a 40%. Em plantas submetidas às taxas de rebaixamento de 15 e 30 cm dia⁻¹, a produtividade foi reduzida em 30 e 25%, respectivamente.

Figura 13 - Efeito da velocidade de elevação (a) e de rebaixamento do NF (b) na massa total de grãos de lentilha. ** Significativo a 1% de probabilidade

Esses resultados indicam um aumento significativo da massa de grãos produzida com a diminuição do período de exposição do sistema radicular à saturação hídrica do solo em função da velocidade de ascensão e de rebaixamento do NF. Resultados semelhantes foram observados em soja (SÁ et al., 2005), em ervilha (SÁ; CRUCIANI; MINAMI, 2004) e em feijoeiro (DUARTE; CRUCIANI; CANTOS, 2000). Observações divergentes foram realizadas por Silveira et al. (1988).

A hipoxia temporária pode ocasionar prejuízos substanciais à produção de grãos. Porém, esses danos podem ser bastante variáveis em função de fatores como a espécie da cultura, o estágio de desenvolvimento, a duração da inundação do solo e o grau de degeneração do sistema radicular. Geralmente, a produção de grãos é mais afetada quando a inundação ocorre durante o estágio de florescimento e de enchimento das vagens (JAYASUNDARA; THOMSON; TANG, 1994). Em plantas de ervilha submetidas a quatro dias de inundação do solo a produtividade média foi reduzida em 65% (CANNELL et al., 1979). Em alface e batata, a produtividade foi reduzida em 50% pela inundação do solo e esse resultado não foi minimizado mesmo utilizando um coeficiente de drenagem de 30 cm em 24 horas (FLECHA, 2004)

A massa de 100 grãos foi significativamente reduzida pelo excesso de água no solo. Porém, esse componente não foi significativamente relacionado com os níveis de elevação e de rebaixamento do NF. Os valores médios de massa de 100 grãos registrados variaram de 5,81 a 6,36 g e foram semelhantes aos encontrados por Vieira et al. (1999), para o cultivar Silvina.

A aplicação da dose de 50 kg N ha⁻¹ em cobertura após a inundação total do solo, não ocasionou alterações significativas. A produção de grãos obtida em plantas inundadas sem adição e com adição de N não apresentaram diferenças entre si. Resultados semelhantes foram encontrados na massa total de grãos e na massa de 100 grãos, como apresentado na Tabela 16. No entanto, estes resultados divergem dos encontrados por Matsunaga et al. (1994), que obtiveram um aumento significativo da produtividade de grãos de feijão guandu ocasionado pela a adição de 50 kg N ha⁻¹ após o encharcamento do solo por três dias.

Tabela 16 - Número de grãos, massa total de grãos e massa de 100 grãos de lentilha em plantas submetidas à inundação do solo em função da presença e ausência de N

Tratamentos	Número de grãos	Massa total de grãos (g)	Massa de 100 grãos (g)
Ausência de N	67 a ⁽¹⁾	4,03 a	5,9 a
Presença de N	65 a	4,05 a	6,2 a

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

O manejo do NF não possibilitou uma recuperação significativa da produção de grãos em relação ao tratamento de controle. A redução da produção de grãos está provavelmente relacionada com o abortamento de flores e com a diminuição do número de vagens por planta, da massa foliar e da absorção de nutrientes. Contudo, o aumento da velocidade de ascensão e de rebaixamento do NF influenciou significativamente os componentes de rendimento da cultura. Deste modo, o manejo do NF pode contribuir positivamente para a redução dos efeitos prejudiciais da inundação temporária do solo à produção de grãos.

2.3.2 Experimento II – Soja

2.3.2.1 Alterações fenológicas e morfofisiológicas ocasionadas pelos tratamentos

As plantas de soja submetidas à inundação do solo não apresentaram diferenças significativas em relação ao desenvolvimento fenológico da cultura. Ambos os cultivares floresceram em média aos 45 DAE, momento em que o solo foi inundado. O período de florescimento foi de aproximadamente 4 a 7 dias, não sendo constatados efeitos da inundação do solo na interrupção do florescimento. Resultados semelhantes foram observados por Costa (1973).

Durante a fase de desenvolvimento vegetativo, foram registradas temperaturas médias do ar de 29,6°C. Assim como observado no experimento com lentilha, a temperatura média no interior da casa-de-vegetação foi em média 6°C maior do que a temperatura média do ar registrada no posto meteorológico da ESALQ/USP (23°C).

Segundo Sedyama et al. (1985), o desenvolvimento da soja ocorre normalmente com temperaturas entre 10 a 35°C. Temperaturas acima de 35°C podem prejudicar o desenvolvimento e a produtividade da cultura, aumentando a abscisão de órgãos reprodutivos (flores e vagens). Porém, temperaturas abaixo de 25°C podem retardar o florescimento e o ciclo das plantas. Além disso, a temperatura pode afetar também a qualidade de óleo e de proteína dos grãos. Efeitos nocivos da temperatura são observados também na fixação biológica de N₂. Temperaturas do solo acima de 30°C,

reduzem a sobrevivência das bactérias contidas no inoculante, prejudicam a formação de nódulos e comprometem a simbiose (URBEN FILHO; SOUZA, 1993).

Durante o ciclo da cultura, a temperatura média do solo variou entre 22 e 32°C e com a inundação do solo foi reduzida em 5°C em relação à temperatura registrada em solo não inundado. Resultados semelhantes foram observados por Cruciani (1985).

Em relação à nodulação, verificou-se um número reduzido de nódulos nas raízes de plantas submetidas à inundação do solo. Porém, devido à dificuldade em manter a integridade do sistema radicular durante a coleta, não foi possível a quantificação precisa do total de nódulos por planta.

Entre os cultivares não foi possível uma determinação precisa a respeito da eficiência da nodulação, mas o cultivar CD205 apresentou maior número de nódulos em relação ao cultivar FT-Abyara. Segundo Vargas e Hungria (1997), a nodulação adequada de soja avaliada no início da floração, situa-se em torno de 15 a 30 nódulos por planta ou o equivalente a uma massa de 100 a 200 mg. No entanto, a variabilidade de nódulos por planta é bastante elevada. Em experimento de campo, Câmara (1998) constatou plantas de soja sem nódulos e plantas com 720 nódulos.

Em plantas não inundadas, o número de nódulos variou entre 8 e 15 nódulos. Já em plantas submetidas à inundação do solo, foram encontrados de três a seis nódulos por planta. Quantidade semelhante à obtida por Pires; Soprano e Cassol (2002) em plantas de soja inundadas por 21 dias. Os nódulos encontrados no sistema radicular de plantas de soja submetidas à inundação do solo durante o estágio de florescimento da cultura são mostrados na Figura 14.

Não foram observadas relações significativas entre a quantidade de nódulos presentes no sistema radicular de plantas de soja e os períodos de inundação do solo. No entanto, relatos na literatura apontam para os efeitos negativos da inundação do solo no número e na massa de nódulos e no processo de fixação biológica de N₂ (DE-POLLI; FRANCO; DÖBEREINER, 1973; HONG; MINCHIN; SUMMERFIELD, 1977; MATSUNAGA, et al., 1994; SCHOLLES; VARGAS, 2004).

Figura 14 - Presença de nódulos fixadores de N_2 em plantas de soja submetidas à inundação do solo

Foram observadas raízes adventícias, em ambos os cultivares, após a inundação do solo por 24, 48 e 72 h. Contudo, não houve uma relação entre a emissão dessas estruturas, os genótipos avaliados e os períodos de inundação do solo. Resultados divergentes aos observados em feijoeiro (CALHEIROS et al., 2001). Na Figura 15, são mostradas raízes adventícias de plantas de soja submetidas à inundação do solo por 24, 48 e 72 h durante o estágio de florescimento da cultura.

Segundo Sena Gomes e Kozlowski (1980), o desenvolvimento de raízes adventícias é um dos mais importantes mecanismos de adaptação das plantas à deficiência de O_2 no solo.

A tolerância apresentada por algumas espécies à inundação do solo pode estar relacionada com a capacidade das plantas em apresentarem alterações morfofisiológicas como raízes adventícias, aerênquimas e lenticelas (JUSTIN; ARMSTRONG, 1987). Essas estruturas formam uma rede interna porosa, que permite a eliminação de substâncias tóxicas e a difusão de O_2 da parte aérea para as raízes e conseqüentemente para os nódulos, sendo fundamental para o processo de fixação biológica de N_2 (BACANAMWO; PURCELL, 1999b).

Também são importantes a formação de lenticelas no caule e a de aerênquima, com as primeiras funcionando como órgãos de absorção de O_2 e depósitos de metabólicos da respiração anaeróbia nas raízes (JUSTIN; ARMSTRONG, 1987;

KAWASE, 1981). O surgimento dessas estruturas e também a epinastia e a senescência prematura das folhas pode ser atribuído ao aumento da concentração de etileno no solo e na parte aérea das plantas (BRADFORD; YANG, 1981)

Figura 15 - Raízes adventícias em cultivares de soja FT-Abyara (C1) e CD205 (C2) submetidos à inundação do solo por 24 (I1), 48 (I2) e 72h (I3)

As plantas submetidas à inundação do solo apresentaram murchamento, clorose, senescência e abscisão de folhas e flores. Estes sintomas foram observados em plantas de ervilha (SÁ; CRUCIANI; MINAMI, 2004), em feijão (CALHEIROS et al, 2001; PEREIRA, 2003); em soja (GRIFFIN; SAXTON, 1988; PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002; SÁ et al.,2005) e trigo (CALHEIROS et al., 2000). Os efeitos da hipoxia temporária do solo na parte aérea de plantas de soja são mostrados na Figura 16.

Dentre estes sintomas, o murchamento das folhas é geralmente o primeiro a ser notado. O murchamento é atribuído principalmente à deficiência de O_2 no solo e às condições atmosféricas (LEVITT, 1980). Segundo observações de Kramer e Jackson (1954), o murchamento ocorre quando a inundação do solo é imposta rapidamente e em condições atmosféricas favoráveis à transpiração.

O murchamento das folhas foi observado em ambos os genótipos, porém não foi possível uma análise aprofundada da intensidade do murchamento em cada cultivar.

O murchamento é causado pela redução da permeabilidade das raízes ocasionada pela respiração anaeróbia, que aumenta a resistência à absorção de água (BRADFORD; YANG,1981). A redução da absorção de água também afeta o potencial da água na folha e provoca o fechamento dos estômatos e conseqüentemente aumenta a resistência estomática diminuindo a transpiração. O efeito da inundação na resistência à absorção de água do solo está relacionado com a idade das plantas (BELFORD et al.,1980).

Os danos ao desenvolvimento da parte aérea das plantas, ocasionados pelo alagamento do solo, podem ocorrer devido a mudanças no fluxo de substâncias entre as folhas e as raízes como acúmulo de ACC (ácido 1-minociclopropano-1- carboxílico) nas raízes e seu transporte para a parte aérea, onde é convertido a etileno (BRADFORD; YANG, 1981; JACKSON, 2003). Segundo Jackson e Drew (1984), a abscisão prematura das folhas, flores e frutos ocorre devido ao aumento da concentração de etileno.

Figura 16 - Efeito da inundação de solo por 24, 48 e 72 h na parte aérea de plantas de soja

A abscisão foliar aumentou significativamente com o prolongamento da inundação do solo. Esse comportamento foi observado em ambos os cultivares. Porém, os efeitos foram significativamente maiores no cultivar C2, principalmente quando o solo foi inundado por um período superior a 24 h, como se observa na Figura 17. A

inundação do solo por 48 e 72 h ocasionou um aumento da massa de folhas caídas no cultivar C2 de 70% em relação ao cultivar C1. Comportamento semelhante foi observado em plantas de soja após três dias de inundação do solo (SULLIVAN et al., 2001).

Figura 17 - Efeito da inundação do solo por 24, 48 e 72 h na queda de folhas dos cultivares FT-Abyara (C1) e CD205 (C2)

A abscisão foi significativamente relacionada com a duração da inundação do solo (Figura 17). Nesse caso, pode-se sugerir que o desfolhamento está relacionado com a sensibilidade dos cultivares ao excesso de água no solo e também ao tempo de submersão do sistema radicular.

O desfolhamento influencia significativamente o rendimento dos grãos. Reduz o número de vagens, de sementes por vagens e a massa das sementes (PRATISSOLI et al., 2001). O desfolhamento ocasiona maiores prejuízos à produtividade quando ocorre durante os estádios reprodutivos (PELUZIO et al., 2002).

A observação dos efeitos da hipoxia no solo na parte aérea das plantas pode ser um importante fator para a determinação da tolerância dos genótipos à deficiência de O_2 . Diferenças na resposta de genótipos de soja ao encharcamento do solo podem ser avaliadas pela análise do crescimento foliar e radicular, pela coloração das folhas e pela fixação biológica de N_2 (VANTOAI; NURJANI, 1996).

2.3.2.2 Efeitos dos tratamentos na absorção de nutrientes minerais

A análise foliar de plantas de soja realizada antes da inundação do solo, indicou teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) suficientes ao desenvolvimento da cultura (AMBROSANO et al., 1996). As concentrações médias dos nutrientes encontrados nos tecidos foliares dos cultivares FT-Abyara e CD205 são apresentados na Tabela 17.

Não foram observadas diferenças significativas entre os cultivares em relação aos nutrientes obtidos na análise do tecido foliar realizada durante o florescimento da cultura. Teores semelhantes de nutrientes foram obtidos em cinco cultivares de soja por Vitti e Luz (2000).

A soja tem sua exigência nutricional baseada na seguinte ordem de extração de N, K, Ca, Mg, P e S (SFREDO; CARRÃO-PANIZZII, 1990). O fornecimento balanceado desses nutrientes, além de outros fatores, são fundamentais para a obtenção de elevadas produtividades.

Estima-se que para produzir 1000 kg de grãos de soja, as plantas necessitam de 51 kg de N e 17 kg de K (EMBRAPA, 2004). Segundo Borket et al. (1994) uma parte do N absorvido pela cultura é fornecida pelo solo (25 a 35%) e outra pela fixação simbiótica do N₂ atmosférico (65 a 85%).

Tabela 17 - Teores de nutrientes em folhas de soja coletas durante o estágio de florescimento antes da inundação do solo (continua)

Nutrientes	Cultivar		Suficiente ⁽¹⁾
	FT-Abyara	CD205	
	g kg ⁻¹		
N	52,36	52,9	40-54
P	4,2	4,43	2,5-5,0
K	24,4	26,46	17-25
Ca	18,3	20	4-20
Mg	5,16	4,7	3-10
S	2,53	2,7	2,1-4,0

Tabela 17 - Teores de nutrientes em folhas de soja coletas durante o estágio de florescimento antes da inundação do solo (conclusão)

Nutrientes	Cultivar		Suficiente ⁽¹⁾
	FT-Abyara	CD205	
	mg kg ⁻¹		
B	46,3	49,4	21-55
Cu	9,6	15,03	10-30
Fe	206,2	212,5	50-350
Mn	96,76	79	20-100
Zn	50,8	57,5	20-50

¹ Teores de nutrientes considerados adequados à produtividade da soja (AMBROSANO et al., 1996)

Em solo inundado, a fixação biológica de N₂ pode ser afetada diminuindo a disponibilidade de N para as plantas. Além disso, a redução da concentração de O₂ no solo ocasiona restrições à atividade metabólica da plantas, prejudicando a absorção e o transporte de íons, reduzindo a absorção de nutrientes pelas plantas.

Tais observações foram comprovadas pelos resultados obtidos na análise de tecidos das folhas soja realizada dez dias após a inundação do solo. Houve reduções significativas dos teores de N, K e Mg em folhas de plantas submetidas a hipoxia no solo em relação aos observados no tratamento de controle (Tabela 18). Resultados semelhantes foram obtidos em soja por Barni (1999); Pires; Soprano e Cassol (2002).

Tabela 18 - Teores de nutrientes de folhas⁽¹⁾ de cultivares de soja submetidos à inundação do solo por 24, 48 e 72 h e não inundado (controle)

Cultivar	Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn
		g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹	
FT-Abyara	Inundado	42,4	5,5	24,3	15,7	3,8	302,6	72,1
	Controle	48,8*	4,7 ^{ns}	26,0*	16,0 ^{ns}	5,5**	230,2**	77*
CD205	Inundado	45,8	5,2	22,1	18,2	4,3	303,5	73,1
	Controle	50,8**	4,8 ^{ns}	26,6**	18,5 ^{ns}	5,0*	200,3**	75,5*
	CV%	6,74	10,2	5,35	8,86	10,05	8,82	6,06

⁽¹⁾ Análise foliar realizada dez dias após a inundação do solo;

*,** Diferença significativa entre os tratamentos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F;

^{ns} Efeito não significativo

Os teores de N, K e Mg decresceram linearmente com o prolongamento da inundação do solo. Na Figura 18, são mostradas as variações desses elementos nos cultivares analisados com o aumento do período de inundação do solo.

Figura 18 - Efeito da inundação do solo nos teores de N (a), P (b), K (c) e Mg (d) no tecido foliar dos cultivares de FT-Abyara (C1) e CD205 (C2). ** Significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} Efeito não significativo

Stepniewski e Przywara (1990), observaram decréscimos da absorção desses elementos e também de Ca em plantas de soja submetidas à deficiência de O₂ durante duas semanas. A concentração de P não foi afetada pelo aumento da inundação do solo.

A concentração de N no tecido de folhas de soja, decresceu linearmente com o prolongamento da inundação do solo (Figura 18a). Porém, esse decréscimo foi mais severo no cultivar C1 do que no cultivar C2, que não foi significativamente afetado pelo tempo de duração da inundação do solo. No cultivar C1, a inundação do solo por 72h,

reduziu o teor de N para 34,3 g kg⁻¹, enquanto que no cultivar C2, o teor de N no tecido das folhas foi de 43,5 g kg⁻¹.

O valor obtido em plantas do cultivar C1 submetido à inundação do solo por 72 h é considerado baixo segundo a tabela de interpretação de análise foliar de soja (AMBROSANO et al.,1996), podendo apresentar sintomas de deficiência desse nutriente.

A deficiência de N na soja manifesta-se inicialmente pela coloração verde-pálida das folhas. Posteriormente, as folhas ficam amarelas (clorose) em consequência da inibição da síntese da clorofila. Esses sintomas podem permanecer por vários dias, afetando o crescimento da planta. Eventualmente, as plantas deficientes podem perder as folhas (MEURER; WANG; WANG, 1981).

Os teores de P e Ca não foram afetados pela inundação do solo (Tabela 18), no entanto, houve um aumento da concentração desses elementos em plantas inundadas em relação ao tratamento de controle. Resultados semelhantes foram encontrados por Barni (1999), que observou maiores teores de P e Ca na parte aérea de plantas de soja submetidas à inundação do solo por cinco dias, porém, com o prolongamento do estresse por excesso hídrico, a concentração desses elementos decaiu linearmente. O aumento da concentração de P e Ca em folhas de plantas de soja submetidas à inundação do solo, também foi constatado por Sullivan et al. (2001).

Segundo Ponnamperuma (1984), o aumento da concentração de P solúvel em solos inundados ocorre pela hidrólise de fosfato de Fe³⁺ e Al³⁺; liberação e de fósforo retido na superfície de óxidos e hidróxidos de Fe³⁺ e Al³⁺.

Os teores dos principais micronutrientes absorvidos pela soja (Fe e Mn) também foram afetados pela inundação do solo. A concentração de Fe em plantas submetidas à inundação do solo foi significativamente superior ao obtido em plantas não inundadas (Tabela 18).

Com o prolongamento da inundação do solo ocorreu um aumento linear e significativo do teor de Fe no tecido foliar dos cultivares, como pode ser observado na Figura 19a. Comportamento semelhante foi observado por Barni (1999), que obteve uma concentração de Fe superior a 3000 ppm na parte aérea de plantas de soja quando submetidas à inundação contínua do solo por 26 dias.

O aumento da disponibilidade de fósforo, em solos inundados, ocorre devido a redução do fosfato de Fe^{3+} em fosfato Fe^{2+} , ocasionados pela condição de anaerobiose em solos inundados (PONNAMPERUMA, 1972). A forma Fe^{2+} é mais solúvel e facilmente absorvida pelas plantas, podendo atingir níveis tóxicos e prejudicar o desenvolvimento da cultura.

O teor médio de Fe no tecido de folhas de soja submetidas à inundação do solo por 24 a 72 h variou significativamente de 260 a 340 mg kg^{-1} , respectivamente. No entanto, a concentração de Fe foi inferior à considerada prejudicial às plantas de soja (>500 ppm) (SFREDO; CARRÃO-PANIZZI, 1990). Sintomas como o amarelecimento, clorose e morte de folhas novas e também a redução do crescimento das plantas foram atribuídos ao teor excessivo de Fe no tecido foliar de plantas de soja (BARNI, 1999). Os cultivares não diferiram significativamente entre si em relação aos teores de Fe nas folhas de plantas submetidas à inundação do solo.

Em relação ao Mn, o aumento do período de inundação do solo ocasionou um decréscimo significativo do teor desse nutriente no tecido foliar (Figura 19b). Comportamento apresentado por ambos os cultivares analisados. Esses resultados divergem de trabalhos que apontam que o Mn pode ser tóxico às plantas em ambientes de baixa difusão de oxigênio (GRABLE, 1966).

Figura 19 - Efeito da inundação do solo na concentração de Fe (a) e de Mn (b) em folhas dos cultivares de soja FT-Abyara (C1) e CD205 (C2). ** Significativo a 1% de probabilidade

Pires; Soprano e Cassol (2002), verificaram teores de Mn menores em plantas submetidas à inundação do solo por 21 dias em relação ao tratamento de controle. O

aumento da disponibilidade de Mn às plantas está relacionado com o pH, o teor de matéria orgânica e de Mn no solo. Segundo Ponnampetuma (1972), em solos ácidos, pobres em matéria orgânica mas relativamente ricos em Mn, o teor desse elemento pode atingir à concentração de 3.000 ppm em 50 dias de inundação do solo.

2.3.2.3 Efeitos dos tratamentos na altura de plantas de soja

O estresse ocasionado pela permanência do NF acima da superfície do solo por 24, 48 e 72 h não acarretou efeitos significativos na estatura das plantas de soja, como se observa na Tabela 19. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Griffin e Saxton (1988); Linkemer; Board e Musgrave (1998) e divergem de observações realizadas por Barni e Costa (1976b); Fagundes et al. (1997).

Porém, as plantas de soja submetidas à inundação do solo apresentaram uma estatura inferior à determinada em plantas não inundadas. Tal comportamento foi observado em ambos os cultivares em determinações realizadas posteriormente ao término dos tratamentos (Tabela 19).

Tabela 19 - Altura média de cultivares de soja submetidos ao solo inundado por 24, 48 e 72 horas e não inundado (controle)

Cultivares	Tratamento	Altura de plantas (cm)			
		-----DAE-----			
		40 (0)	50 (10)	60 (20)	70 (30) ⁽¹⁾
FT-Abyara	Inundado	44,7	49,7	53,4	56,2
	Controle	46,0 ^{ns}	51,7 ^{ns}	56,7 ^{ns}	57,7 ^{ns}
CD-205	Inundado	46,7	52,9	55,6	58,1
	Controle	47,7 ^{ns}	53,6 ^{ns}	58,3 ^{ns}	60,6 ^{ns}
	CV (%)	9,5	7,1	13,6	12,6

⁽¹⁾ Número entre parênteses indica o número de dias após a inundação do solo;

^{ns} Efeito não significativo.

A intensidade dos efeitos da inundação do solo no crescimento das plantas está relacionada com o estágio de desenvolvimento da cultura e com duração do estresse hídrico. Tais observações corroboram com as realizadas no experimento com lentilha.

Além desses fatores, observam-se tolerâncias distintas à saturação do solo entre cultivares de mesma espécie (PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002 e SCHÖFFEL et al., 2001).

Os cultivares estudados apresentaram respostas semelhantes aos efeitos da inundação do solo em relação ao porte das plantas. Em ambos os cultivares, observaram-se decréscimos das estaturas das plantas com o prolongamento da inundação do solo, porém esses efeitos não foram significativos.

A altura de plantas do cultivar C2 foi superior à observada no cultivar C1. Essa superioridade foi mantida ao longo do desenvolvimento da cultura. Porém, não houve diferenças significativas da altura de plantas entre os cultivares (Tabela 19).

A diferença de altura entre os cultivares pode estar relacionada à variabilidade genética dos mesmos, não podendo ser atribuída aos tratamentos. No entanto, reduções no porte das plantas podem ocasionar uma menor altura da inserção das primeiras vagens favorecendo o contato das mesmas com o solo e conseqüentemente a germinação dos grãos (ROSA, 1993). Segundo Queiroz et al, (1981), o porte das plantas afeta diretamente a eficiência da colheita mecânica. Nesse caso, recomenda-se que o porte das plantas deve ser superior a 50 cm.

O porte das plantas obtido neste experimento difere dos mencionados nas especificações dos cultivares. Fatores como época de plantio, densidade de plantas, adubação e períodos de déficit e de excesso de água podem influenciar significativamente no crescimento das plantas de soja. Variações significativas da altura de plantas de soja foram verificadas por Queiroz et al. (1981) e atribuídas à época de semeadura e à adubação fosfatada. Heiffig (2002), observou variações na altura das plantas de soja de 38 a 63 cm em função da densidade de plantas.

O porte das variedades de hábito determinado é definido no período vegetativo, cuja duração depende não só da variedade como também do fotoperíodo e da temperatura. Nos cultivares precoces, a menor duração do período vegetativo, via de regra, limita essa característica agrônômica com reflexos na produção de grãos (URBEN FILHO e SOUZA, 1993). Durante o estágio de florescimento, as plantas de hábito de crescimento determinado, atingem 87 a 90% de sua altura e matéria seca finais (EGLI e LEGGETT, 1973).

A aplicação de N, realizada dez dias após a inundação do solo (50 DAE), não ocasionou efeitos significativos na altura final das plantas submetidas à inundação do solo. Observações semelhantes foram obtidas no experimento com plantas de lentilha.

2.3.2.4 Efeitos da inundação do solo na área foliar de plantas de soja

Os cultivares de soja submetidos aos períodos de inundação do solo apresentaram decréscimos significativos da área foliar em relação ao tratamento de controle, indicando efeitos prejudiciais do excesso de água no solo ao desenvolvimento foliar das plantas. Estes resultados foram obtidos em avaliações realizadas dez e vinte dias após a saturação hídrica do solo, quando as plantas encontravam-se no estágio de formação das vagens, 50 e 60 DAE, respectivamente. As áreas foliares dos cultivares de soja submetidos à inundação do solo são apresentadas na Tabela 20.

A avaliação da área foliar realizada dez dias após a inundação do solo (50 DAE), indicou uma redução do tecido foliar de plantas submetidas ao estresse por excesso hídrico superior a 30% em comparação com plantas não inundadas. Resultados semelhantes foram obtidos em avaliação realizada vinte dias após a inundação do solo. Reduções desta magnitude foram obtidas por Hong; Minchin e Summerfield (1976).

Tabela 20 - Área foliar de cultivares de soja submetidos à inundação do solo e não inundados aos 50 e 60 DAE

Cultivar	Tratamento	Área foliar (cm ²)	
		-----DAE-----	
		50	60
FT-Abyara	Inundado	1299	1493
	Não inundado	1928**	2100*
CD205	Inundado	1227	1233
	Não inundado	1845**	2067*
	CV (%)	12,05	18,2

*,** Diferença significativa entre os tratamentos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F

Dentre as causas atribuídas à redução da área foliar estão a abscisão, a senescência prematura das folhas e a inibição da expansão foliar (JACKSON; DREW, 1984; BRADFORD; YANG, 1981). O aumento da concentração de etileno no solo pode ser o principal fator responsável pela senescência prematura e abscisão precoce das folhas de plantas em condições de hipoxia no solo (VOESENEK et al., 1992).

Aos 50 DAE, os cultivares apresentaram respostas semelhantes aos efeitos da inundação do solo ao crescimento foliar, não sendo observadas diferenças significativas entre os mesmos, como apresentado na Tabela 21.

Em relação aos efeitos do tempo de inundação do solo entre os cultivares, observou-se uma área foliar superior do cultivar C2 em relação ao cultivar C1, quando imposta a inundação do solo por 24 h. Porém, com o prolongamento da inundação do solo, o cultivar C2 apresentou um decréscimo acentuado da área foliar o que não ocorreu em plantas do cultivar C1 (Tabela 21). Esse comportamento pode estar relacionado com a tolerância deste cultivar ao aumento do período de inundação do solo. Contudo, os cultivares não diferiram significativamente entre si em relação ao tempo de inundação do solo.

Tabela 21 - Área foliar (cm²) de cultivares de soja dez dias após inundação do solo por 24, 48 e 72 h

Cultivar	Tempo de inundação total do solo (h)			Média
	24	48	72	
FT-Abyara	1389 a ⁽¹⁾	1272 a	1236 a	1299 a
CD205	1496 a	1180 a	1005 a	1227 a

⁽¹⁾ Letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade; d.m.s = 157,1

A inundação do solo por 72 e 48h afetou severamente a área foliar de plantas de soja, diferindo significativamente dos efeitos ocasionados pela saturação do solo por 24 h. Em relação à área foliar de plantas não inundadas (1880 cm²), a área foliar equivalente obtida nestes tratamentos foi respectivamente de 59, 64 e 76%.

O prolongamento da saturação do solo ocasionou um decréscimo linear da área foliar de plantas de soja (Figura 20). Sendo verificada uma relação significativa entre o desenvolvimento foliar das plantas de soja e o tempo de inundação de solo. Resultado também obtido em avaliações realizadas vinte dias após a inundação do solo (60 DAE).

Figura 20 - Área foliar de plantas de soja submetidas a 24, 48 e 72 h de inundação do solo.
 ** Significativo a 1% de probabilidade

Na avaliação realizada após vinte dias após a inundação do solo (60DAE), foram constatadas diferenças significativas entre as áreas foliares dos cultivares. Tais diferenças são atribuídas às respostas dos cultivares à duração da inundação do solo e à aplicação de doses de N.

Em relação ao tempo de inundação do solo, o cultivar C1 apresentou uma área foliar significativamente superior à observada no cultivar C2, principalmente quando o solo foi inundado por 24 e 48 h, como se verifica na Tabela 22. Com a saturação do solo por 72 h, ambos os cultivares mostraram-se severamente afetados pela inundação do solo.

Tabela 22 - Área foliar (cm²) de cultivares de soja vinte dias após inundação do solo por 24, 48 e 72 horas

Cultivar	Inundação do solo (h)			Média
	24	48	72	
FT-Abyara	1708 a ⁽¹⁾	1586 a	1187 a	1466 a
CD205	1447 b	1166 b	1088 a	1234 b

⁽¹⁾ Letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; d.m.s = 157,1

Comparando os valores de área foliar obtido aos 50 DAE (Tabela 21), observa-se uma tendência de recuperação do crescimento foliar no cultivar FT-Abyara em função do período de inundação de 24 e 48 h, o que não ocorreu no cultivar CD205. Os

sintomas como senescência, clorose e abscisão de folhas verificados em plantas inundadas, principalmente do cultivar CD205, contribuíram provavelmente para essas observações.

Esse resultado indica diferenças na tolerância dos cultivares ao excesso de água no solo e também na recuperação do crescimento vegetativo, principalmente quando a duração do estresse por excesso hídrico é menor que 72 h.

Relatos na literatura apontam para a influência das características genéticas na intensidade dos danos ao desenvolvimento das plantas ocasionados pelo excesso de água no solo (FAGUNDES et al., 1997); PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2004; VANTOAI et al., (1994).

O potencial de recuperação pós-estresse das plantas também está relacionado com essas características. Umaharan; Ariyanayagam e Haque (1997), observaram respostas divergentes da recuperação pós-estresse entre cultivares de feijão-caupi.

A tendência de recuperação do desenvolvimento foliar apresentada pelo cultivar FT-Abyara pode ser atribuída aos estímulos ocasionados pela aplicação de adubação nitrogenada em cobertura após a inundação do solo, como se observa na Tabela 23.

Tabela 23 - Área foliar (cm^2) de plantas de soja dos cultivares FT-Abyara e CD205 submetidas à inundação do solo e aplicação de doses de N

Cultivar	Doses de N (kg N ha^{-1})		
	0	50	100
FT-Abyara	1214 a ⁽¹⁾	1549 a	1635 a
CD205	1228 a	1243 b	1230 b

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras distintas na vertical diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; dms = 180,78

O cultivar FT-Abyara apresentou uma área foliar significativamente superior à observada no cultivar CD205 em função da aplicação de N em doses correspondentes a 50 e 100 kg ha^{-1} . Tal fato, indica respostas diferenciadas entre os cultivares em relação a absorção de nutrientes em condições de solo encharcado. Tais diferenças podem ser ocasionadas pelas características genéticas dos genótipos avaliados (MEURER; WANG; WANG, 1981).

A aplicação de N após a inundação do solo afetou significativamente a área foliar das plantas submetidas ao estresse hídrico. Verificou-se uma relação linear significativa entre as doses de N aplicadas e o desenvolvimento da área foliar, como se observa na Figura 21.

Figura 21 - Resposta da área foliar de plantas de soja submetidas à inundação do solo à aplicação de doses de N. * Significativo a 5% de probabilidade

A aplicação de doses de 50 e 100 kg N ha⁻¹ ocasionou um incremento de 15% da área foliar em relação ao tratamento sem adição de nitrogênio, diferindo significativamente deste. No entanto, o aumento da dose de nitrogênio não acarretou em um acréscimo significativo da área foliar. Nesse caso, aplicação de 50 kg N ha⁻¹ foi suficiente para promover uma recuperação significativa do desenvolvimento vegetativo.

O incremento da área foliar com a aplicação de N provavelmente está relacionado ao retardamento da senescência das folhas. Observação semelhante foi realizada em plantas de trigo (MÉLLO JÚNIOR, 1992). O retardamento da senescência pode ser atribuído ao incremento do teor de clorofila de folhas de plantas submetidas à inundação do solo após a aplicação de N. De acordo com Matsunaga et al. (1994), aplicação de N após a inundação do solo aumentou significativamente os teores de clorofila das folhas e a atividade da nitrogenase, responsável pela fixação biológica de N₂. Reduções dos teores de clorofila foram observadas também em plantas de soja submetidas à inundação do solo no estágio vegetativo (BACANAMWO; PURCELL, 1999a).

As plantas que receberam adubação nitrogenada apresentaram uma coloração das folhas mais intensa do que as plantas que não receberam N (D0), como mostrado na Figura 22. Esse comportamento também foi observado por Parameswaran et al. (1981). Segundo Meurer; Wang; Wang, (1981) a coloração mais intensa deve-se a um suprimento adequado de N e está diretamente relacionada a um crescimento vegetativo vigoroso.

Figura 22 - Efeitos da presença (b; d) e da ausência de N (a; c) na coloração de folhas dos cultivares FT-Abyara (a; b) e CD205 (c; d) submetidos à inundação do solo

Não houve efeitos significativos entre doses de N e períodos de inundação do solo. Porém, as plantas de soja submetidas à inundação de 24 e 48 h, apresentaram uma resposta positiva à adição de N no solo, ao contrário do observado quando a inundação do solo prolongou-se por 72h. Os danos ocasionados pela inundação do solo mais prolongada não foram minimizados pela adição de N.

2.3.2.5 Efeitos dos tratamentos na parte aérea de plantas de soja

O desenvolvimento da parte aérea de plantas de soja foi significativamente afetado pela inundação do solo imposta durante o estágio de florescimento da cultura. Os efeitos da saturação do solo foram observados na massa seca de folhas, de ramos e conseqüentemente na massa seca total da parte aérea das plantas, como apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Massa seca de folhas, de ramos e total (g) de cultivares de soja submetidos à inundação do solo e não inundados (controle) ⁽¹⁾

Cultivar	Tratamento	Massa de folhas	Massa de ramos	Massa Total
FT-Abyara	Inundado	4,13	4,38	8,51
	Controle	5,98**	4,45 ^{ns}	10,43*
CD205	Inundado	3,49	4,56	8,05
	Controle	5,82**	5,11 ^{ns}	10,93**
	CV(%)	16,36	16,9	14,5

⁽¹⁾ Médias obtidas de plantas coletadas dez dias após a inundação do solo (50 DAE).

*** Diferença significativa entre tratamentos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F
ns Efeito não significativo

Em relação aos tratamentos de controle, a saturação hídrica do solo ocasionou reduções de 18 e 26% da biomassa total da parte aérea dos cultivares FT-Abyara e CD205, respectivamente. O decréscimo da biomassa da parte aérea das plantas está provavelmente relacionado aos danos ocasionados pela saturação hídrica do solo ao desenvolvimento foliar das plantas de soja.

A inundação do solo reduziu a massa seca de folhas dos cultivares C1 e C2 em 30 e 40%, respectivamente, em comparação com o tratamento de controle. O estresse por excesso hídrico impõe limitações à expansão foliar reduzindo a interceptação da radiação solar e conseqüentemente a conversão de matéria seca total. Reduções semelhantes foram observadas em plantas de soja por Barni (1999); Sallam e Scott (1987).

Não houve diferenças significativas entre os cultivares em relação à massa de folhas, de ramos e total, indicando que os efeitos da inundação do solo no desenvolvimento da parte aérea dos genótipos analisados foram semelhantes, como se observa na Tabela 25.

Tabela 25 - Massa de folhas, ramos e total (g) da parte aérea de cultivares de soja submetidos à inundação do solo por 24, 48 e 72 h ⁽¹⁾

Cultivar	Massa de folhas	Massa de ramos	Massa Total
FT-Abyara	4,13 a ⁽²⁾	4,38 a	8,51 a
CD205	3,49 a	4,56 a	8,05 a

⁽¹⁾ Médias obtidas de plantas coletadas dez dias após a inundação do solo (50 DAE).

⁽²⁾ Médias seguidas por letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade.

A massa seca total da parte aérea das plantas de soja decresceu linearmente com o prolongamento da inundação do solo (Figura 23). Comportamento observado em ambos os cultivares. Resultado que indica uma relação significativa dos efeitos do prolongamento da hipoxia no solo ao desenvolvimento das plantas de soja.

A saturação hídrica do solo por um período de 72h ocasionou prejuízos significativos ao desenvolvimento da parte aérea das plantas de soja. Neste tratamento, verificaram-se decréscimos da massa seca dos cultivares C1 e C2 de 23 e 48%, respectivamente em relação ao tratamento de controle. Resultados semelhantes também foram obtidos na análise da massa de folhas e de ramos.

O decréscimo de 48% do acúmulo de matéria seca do cultivar C2 sob condições prolongadas de estresse por excesso hídrico, pode sugerir uma maior sensibilidade do cultivar à deficiência de O₂ no solo. Esta observação concorda com os resultados apresentados por Fagundes et al. (1997); Pires; Soprano e Cassol (2004). Nos demais

períodos de inundação do solo (24 e 48h) foram observados reduções médias da massa seca das plantas de 12 e 26%, respectivamente.

Os efeitos da inundação do solo na parte aérea das plantas são geralmente atribuídos à inibição da expansão foliar e à redução do número de folhas, relacionada com abscisão foliar (WADMAN; ANDEL, 1995; KOZLOWSKI, 1984).

Figura 23 - Efeito do período de inundação do solo na massa seca de plantas de soja ** Significativo a 1% de probabilidade

Vinte dias após a inundação do solo, os efeitos do estresse por excesso hídrico eram evidentes em ambos os cultivares. Reduções significativas da massa seca de folhas, de ramos e de vagens foram observadas entre as plantas submetidas à inundação do solo e os tratamentos de controle, como apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Massa seca de folhas, de ramos e total (g) de cultivares de soja submetidos à inundação do solo e não inundados (controle) ⁽¹⁾

Cultivar	Tratamento	Massa de folhas	Massa de ramos	Massa de vagens	Massa seca total
FT-Abyara	Inundado	6,05	5,11	4,59	15,75
	Controle	8,63**	6,49*	6,04 ^{ns}	21,16**
CD205	Inundado	5,09	4,80	5,39	15,28
	Controle	7,84**	7,10**	7,97**	22,91**
	CV(%)	18,6	18,3	16,7	15,1

⁽¹⁾ Médias obtidas de plantas coletadas vinte dias após a inundação do solo (60 DAE);

*,** Médias diferem entre si a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Apesar das plantas submetidas à inundação do solo terem recobrado o desenvolvimento da parte aérea em relação ao período anterior, o crescimento da biomassa de plantas inundadas foi significativamente inferior ao observado em plantas não inundadas. Resultados semelhantes foram obtidos em feijão-caupi (HONG; MINCHIN; SUMMERFIELD, 1976), em feijão-mungo (MUSGRAVE; VANHOY, 1989) e em soja (SALLAM; SCOTT, 1988).

Em média, a massa seca total da parte aérea de plantas submetidas à inundação foi 30% inferior à obtida em plantas não inundadas. Valor semelhante apresentado pelas plantas na avaliação anterior.

Os cultivares não diferiram significativamente entre si em relação à massa seca total das plantas submetidas à inundação do solo. Mas, apresentaram diferenças significativas quanto à massa de folhas secas e à massa de vagens (Tabela 27).

Tabela 27 - Massa seca de folhas, ramos e total (g) dos cultivares FT-abyara e CD205 vinte dias após a inundação total do solo (60 DAE).

Cultivar	Massa de folhas	Massa de ramos	Massa de vagens	Massa Total
FT-Abyara	6,05 a ⁽¹⁾	5,12 a	4,60 b	15,77 a
CD205	5,09 b	4,80 a	5,39 a	15,28 a

⁽¹⁾ Letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

O cultivar FT-Abyara apresentou uma massa foliar superior à observada no cultivar CD205. Tal resultado deve-se aos efeitos da inundação do solo na expansão foliar e à resposta do cultivar à aplicação de N após a inundação do solo. Em relação à massa de vagens, os resultados indicam um potencial produtivo do cultivar CD205 superior ao apresentado pelo cultivar FT-Abyara. Comportamento também apresentado entre plantas não inundadas (Tabela 26).

A aplicação de N nas doses correspondentes a 50 e 100 kg ha⁻¹, ocasionaram um incremento da massa seca da parte aérea das plantas de 15 e 22%, respectivamente em comparação com a massa seca de plantas que não receberam adubação nitrogenada. Resultados semelhantes foram observados por Pung et al. (1995). Esses autores verificaram um incremento de 15% da massa seca de trevo

branco (*Trifolium repens* L.) em condições de solo alagado após aplicação de N na forma de nitrato de amônia.

Os efeitos positivos da adição de N ocorreram efetivamente em plantas do cultivar C1. Neste genótipo, houve um acréscimo significativo da massa seca total da parte aérea das plantas em resposta à adição de uréia após a saturação hídrica do solo por períodos de 24, 48 e 72h. Efeitos distintos foram constatados em plantas do cultivar C2, que não responderam à aplicação de suplementar de N, como mostrado na Figura 24. Segundo Mascarenhas et al. (1980), cada cultivar tem as suas próprias exigências nutricionais e capacidade de extração de nutrientes do solo.

Figura 24 - Efeito da aplicação de N nas doses de 0, 50 e 100 kg ha⁻¹ na massa seca total dos cultivares FT-Abyara (C1) e CD205 (C2) submetidos à inundação do solo. ** Significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} Efeito não significativo

Esses resultados podem estar relacionados ao acúmulo de fotoassimilados na parte aérea das plantas de soja, aumentando significativamente a massa seca total das plantas, fato observado principalmente no cultivar FT-Abyara. Segundo Sedyama et al. (1985) nem sempre a matéria seca acumulada nos órgãos vegetativos da parte aérea das plantas é revertida em elevado rendimento de grãos pela cultura.

2.3.2.6 Respostas dos componentes de rendimento da soja aos tratamentos

Os períodos de inundação do solo e a aplicação de doses de N afetaram significativamente os componentes de rendimento de ambos os cultivares analisados.

Foram observadas diferenças significativas entre plantas não inundadas e inundadas em relação ao número de vagens por planta, ao número de grãos por vagem e à massa total de grãos. Na Tabela 28, são apresentados os componentes de rendimento dos cultivares FT-Abyara e CD205 em função dos tratamentos aplicados.

Tabela 28 - Componentes de rendimento de cultivares de soja em solo inundado por 24, 48 e 72 h e não inundado (tratamento de controle)

Cultivar	Tratamento	Número de vagens	Número de grãos	Massa de grãos (g)	Massa de cem grãos (g)
FT-Abyara	Inundado	44,68	2,17	12,37	12,75
	Controle	63,6**	2,21*	18,23**	13,04 ^{ns}
CD205	Inundado	48,19	2,48	13,07	10,94
	Controle	70,6**	2,64**	22,50**	12,03 ^{ns}
	CV(%)	15,06	5,7	16,2	8,5

*, ** Médias entre plantas inundadas e não inundadas significativas a 5% e a 1% de probabilidade pelo Teste F;

^{ns} Efeito não significativos

O estresse por excesso hídrico imposto às plantas de soja durante o estágio de florescimento da cultura ocasionou um decréscimo de 30% no número médio de vagens produzidas por planta em relação ao tratamento de controle. Este resultado foi semelhante ao encontrado por Scott et al. (1989) e concorda com as observações de Schöffel et al. (2001), que verificaram reduções médias de 23,8 a 34,6% do número de vagens de plantas de soja submetidas a dez dias de inundação do solo durante o estágio reprodutivo R2 a R4, respectivamente. Segundo Barni e Costa (1976b), a redução no número de vagens é maior quando a saturação do solo ocorre no período reprodutivo da cultura da soja, revelando-se como o componente mais afetado pelo excesso de água no solo. A saturação hídrica do solo, durante o florescimento, reduz o período de formação e o número de flores e conseqüentemente o número de vagens (SIONIT; KRAMER, 1977).

O prolongamento da inundação do solo não afetou significativamente o número de vagens por planta. Esse resultado contraria a expectativa de que a inundação do solo por um período prolongado (72 h) ocasionasse danos significativos à produção de

vagens. Esse comportamento pode ser atribuído às respostas positivas das plantas ao uso de N após a saturação do solo. Entretanto, observou-se uma tendência de decréscimo do número médio de vagens com o aumento do período de submersão do sistema radicular das plantas de soja. A redução do número de vagens de plantas submetidas à inundação do solo variou de 27 a 33%, para os períodos de 24 a 72 horas, respectivamente.

O efeito do encharcamento do solo no número de vagens foi semelhante entre os cultivares analisados, não sendo encontradas diferenças significativas entre os mesmos. Esta observação diverge da realizada por Schöffel et al. (2001).

Apesar dos danos ocasionados pela inundação do solo às plantas de soja, o número de vagens por planta verificado neste experimento foi superior aos obtidos por Griffin e Saxton (1988); Schöffel et al. (2001) e inferior ao observado por Sá (2002). Segundo Gandolfi et al. (1983), o número de vagens por planta pode variar de duas a mais de 20 em uma única inflorescência auxiliar, e até acima de 400 por planta.

A aplicação das doses D1 e D2 (50 e 100 kg N ha⁻¹), proporcionaram um incremento significativo do número de vagens por planta em comparação com a produção de plantas que não receberam adubação suplementar de N (D0). O aumento médio do número de vagens ocasionado pela adição de N foi de aproximadamente 15%.

O efeito positivo da adição de N na produção de vagens pode ser atribuído à maior retenção de flores e de vagens na planta. Segundo Tanaka e Mascarenhas (1992), o nitrogênio está diretamente relacionado ao pegamento de flores, número e retenção de vagens e também ao rendimento de grãos. Porém, a aplicação de uma dosagem maior de uréia (100 kg N ha⁻¹) não ocasionou um incremento significativo do número de vagens.

Em plantas do cultivar C2, a aplicação de N não contribuiu significativamente para o aumento do número de vagens por planta, ao contrário do observado no cultivar C1. Nesse genótipo, a produção de vagens aumentou linearmente com o incremento de doses de N, como pode ser observado na Figura 25. Sendo constatada uma relação significativa entre o número de vagens por planta e a aplicação suplementar de N após

a inundao do solo. Estes resultados evidenciam diferenas significativas entre os cultivares analisados e os efeitos da adio de N na produo das plantas de soja.

Figura 25 - Efeito de doses de nitrognio no nmero de vagens dos cultivares FT-Abyara (C1) e CD205 (C2) submetidos inundao do solo. ** significativo a 5 % de probabilidade; ^{ns} Efeito no significativo.

Diferenas significativas entre os cultivares foram observadas tambm em relao ao nmero mdio de gros por vagem. O cultivar C2 apresentou maior nmero de gros de soja por vagem em relao ao cultivar C1 (Tabela 24). No entanto, ambos os gentipos apresentaram efeitos significativos dos tratamentos quando comparados aos tratamentos de controle. Esses efeitos podem ser atribudos aos danos ocasionados pelos tratamentos na produo de vagens e tambm quantidade de gros no interior das vagens de soja. As vagens de soja podem conter de um a cinco gros, sendo mais comum nas variedades de soja, vagens com dois e trs gros (CARLSON, 1973).

Nas condioes em que o experimento foi realizado, o cultivar C1 apresentou um significativo nmero de vagens com um e dois gros em relao ao cultivar C2, como se observa Figura 26a e 26b. Porm, o nmero de vagens colhidas com trs gros foi significativamente superior em plantas do cultivar C2 (Figura 26c). J a quantidade de vagens com quatro gros foi inexpressiva em ambos os cultivares analisados.

Figura 26 - Número de vagens com um (a), dois (b) e três (c) grãos de soja em cultivares submetidos à inundação do solo. Letras iguais não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Com a aplicação dos tratamentos, não houve alterações significativas na proporção do número de grãos no interior das vagens em relação aos valores apresentados em condições não inundadas (Tabela 29). Esses resultados concordam com as observações realizadas por Gandolfi et al. (1983) de que a proporção de vagens com diferentes números de grãos é uma característica varietal e relativamente constante.

Tabela 29 - Número de vagens com um, dois e três grãos de soja dos cultivares FT-Abyara e CD205 em solo inundado e não inundado

Cultivares	Condição do solo	Número de vagens			
		1	2	3	Total
FT-Abyara	Inundado	7 (16) ⁽¹⁾	23 (52)	14 (32)	44
	Não inundado	9 (14)	33 (52)**	21 (34)	63**
CD205	Inundado	3 (6,8)	13 (29)	32 (64)	48
	Não inundado	3 (4,0)	18(26)	49 (69)**	70**

⁽¹⁾ Número entre parênteses indica a proporção de vagens com 1, 2 e 3 grãos em relação ao total de vagens produzido.

** Médias significativas entre si a 1% de probabilidade pelo teste F

A redução do número de grãos por vagem está relacionada principalmente ao decréscimo da quantidade de vagens produzidas e não com a quantidade de grãos no interior das vagens.

Em relação à redução do número de vagens, observou-se que os cultivares C1 e C2, apresentaram um decréscimo significativo de vagens com dois e três grãos, respectivamente (Tabela 29).

Em função dos períodos de inundação do solo o número médio de grãos por vagem variou de 1,98 a 2,72. Esses valores são superiores aos encontrados por Linkemer; Board e Musgrave (1998); Schöffel et al. (2001). Porém, não foram observadas relações significativas entre o número de grãos por vagem e a duração do estresse por excesso hídrico, ao contrário das observações realizadas por Griffin e Saxton (1988), que verificaram um decréscimo linear do número de grãos por vagem com o aumento da duração do encharcamento do solo.

O número de grãos por vagem não foi afetado significativamente pela aplicação de N após a inundação do solo. Resultados semelhantes foram obtidos em plantas de soja de submetidas a diferentes fontes de nitrogênio (JENDIROBA; CÂMARA, 1994).

No entanto, resultados divergentes foram observados em relação ao componente massa de grãos. Em plantas submetidas à inundação do solo, a adubação nitrogenada ocasionou um acréscimo de 25% da massa de grãos de soja em comparação a massa de grãos obtida sem a adição de N (D0).

Resultados semelhantes foram obtidos em feijão guandu por Matsunaga et al. (1994), que obtiveram aumentos da produtividade de 57 e 32% com aplicação de 50 e 100 kg N ha⁻¹, respectivamente após a inundação do solo. Em lentilha a adição de 50 kg N ha⁻¹ não contribuiu para o aumento da massa de grãos. Resultado semelhante foi observado em plantas de soja por Pookpakdi et al. (1997).

O acréscimo da dose de N de 50 para 100 kg ha⁻¹, não ocasionou um incremento significativo da massa de grãos de soja. Em resposta à adição de N, a massa total de grãos apresentou uma variação quadrática, sendo a massa de grãos máxima (14,4 g) obtida com aplicação de aproximadamente 75 kg N ha⁻¹. Os efeitos aplicação de N na massa total de grãos de plantas submetidas à inundação do solo são mostrados na Figura 27.

Figura 27 - Efeito da aplicação de doses de nitrogênio na massa total de grãos de plantas de soja submetidas à inundação do solo. ** Significativo a 1% de probabilidade.

Entre os cultivares, foram observadas respostas distintas quanto ao uso de N após a inundação do solo (Figura 28). No cultivar C1, aplicação de N ocasionou um aumento da massa de grãos por planta superior a 40% em comparação com a massa de grãos obtida em plantas sem adição de N. Sendo verificada uma relação linear significativa entre a massa total de grãos e aplicação de N após inundação do solo. No cultivar C2, a adição de N não resultou em acréscimos significativos da massa de grãos por planta. Resultados semelhantes foram observados na análise do número de vagens de soja.

Figura 28 - Massa total de grãos de cultivares de soja submetidos à inundação do solo em função da aplicação de nitrogênio. ** Significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} Efeito não significativo

Apesar da resposta positiva à aplicação de N, o cultivar C1 apresentou uma massa de grãos significativamente inferior à obtida em plantas do cultivar C2. Tal resultado está relacionado ao comportamento do cultivar C2 aos períodos de inundação do solo, indicando um potencial produtivo deste cultivar em condições inundadas superior ao cultivar FT-Abyara. A diferença entre os cultivares em relação a massa total de grãos foi de 11%. Schöffel et al. (2001), não encontraram diferenças significativas entre cultivares de soja submetidos à inundação do solo por dez dias, porém, verificaram diferenças, entre os cultivares, superiores a 20% da massa de grãos por planta.

Em relação à duração da inundação do solo, a massa de grãos decresceu linearmente com o aumento do tempo de alagamento do solo, como se observa na Figura 29. Esse comportamento foi verificado em ambos cultivares, porém, as relações entre os cultivares e os períodos de inundação do solo não foram significativas.

Figura 29 - Massa de grãos dos cultivares FT-Abyara (C1) e CD205 (C2) em função de períodos de inundação do solo. ** Significativo a 1% de probabilidade

Decréscimo significativo da produção de grãos ocorreu quando o solo foi inundado por um período superior a 24 h, concordando com observações realizadas por Sugimoto; Koesmaryono e Nakano (2000).

Em relação ao tratamento de controle, a inundação do solo por 24, 48 e 72 h, ocasionou decréscimos da massa de grãos de soja 30, 37 e 40%, respectivamente. Esses resultados são concordantes com observações realizadas por Scott et al. (1989).

Esses autores verificaram reduções de 26% da produtividade em plantas de soja submetidas à inundação do solo por 2 dias durante o estágio de florescimento da cultura. Outras observações corroboram com os resultados obtidos neste experimento (LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998; OOSTERHUIS et al., 1990; SORTE et al., 1997).

A menor massa de grãos observada no cultivar FT-Abyara, pode ser atribuída ao menor número de vagens produzidas e também à menor relação de grãos por vagem. A redução do número de vagens deve-se principalmente ao abortamento de flores e de vagens. Em condições normais de desenvolvimento, as plantas de soja apresentam um abordecamento espontâneo de flores e vagens. Mas, em solos alagados verifica-se um aumento da queda de flores e vagens. Esse comportamento é atribuído à redução da difusão de oxigênio, à redução da disponibilidade de nitrogênio e outros minerais para as plantas e à redução da fixação biológica de nitrogênio (COSTA, 1973; LUXMOORE; FISCHER; STOLZY, 1973).

Os danos ocasionados pela saturação hídrica do solo à produção de grãos foram menos severos em plantas que receberam adubação suplementar de N do que em plantas sem adição de N. Nesse tratamento, inundações do solo por 24, 48 e 72h, ocasionaram reduções de 36, 47 e 53% da massa de grãos em relação a produção média de grãos obtida no tratamento de controle (20,36 g). Em plantas que receberam doses de N, as reduções observadas em função dos períodos de inundação do solo foram de 28, 32 e 34%. Contudo, não houve uma relação significativa entre o período de inundação do solo e as doses de N aplicadas.

Estes resultados apontam que aplicação de N atenuou os danos da saturação hídrica do solo na produção de grãos de soja. Porém, os efeitos da adição de N não foram suficientes para compensar os prejuízos à produtividade de plantas de soja submetidas à inundação do solo em relação aos tratamentos de controle.

Comparativamente com o tratamento de controle, a aplicação de N reduziu os danos à produção de grãos de soja de 45% para 29%. Os efeitos da adição de N na atenuação dos danos ocasionados pela inundação do solo também foram constatados em feijão guandu (MATSUNAGA et al., 1994), em trigo, cevada e aveia (WATSON; LAPINS; BARRON, 1976).

Não foram observadas diferenças significativas entre a massa de 100 grãos de plantas inundadas e de não inundadas, de ambos os cultivares, como pode ser verificado na Tabela 28. Esse resultado diverge de observações que mencionam efeitos prejudiciais da inundação do solo à massa de 100 grãos independentemente da fase de desenvolvimento da planta. (GRIFFIN; SAXTON, 1988; SIONIT; KRAMER, 1977). Porém, pode-se atribuir tal resultado à duração do estresse por excesso hídrico e aos efeitos da adição de N.

A massa de cem grãos decresceu linearmente com o prolongamento da inundação do solo, relacionando-se significativamente com a duração do estresse por excesso hídrico (Figura 30).

Figura 30 - Efeito da inundação do solo de 24, 48 e 72 h na massa de 100 grãos de cultivares de soja. ** Significativo a 1% de probabilidade

Danos significativos à massa de 100 grãos foram ocasionados pela inundação do solo por períodos superiores a 24 h. A inundação do solo por 48 e 72 h ocasionou reduções de 7 e 10% desse componente, quando comparados com o tratamento de controle, que apresentou uma massa de 100 grãos média de 12,5 g. Acredita-se que esse componente não seja afetado significativamente por períodos de inundação de curta duração. Resultados semelhantes foram obtidos por Heatherly e Pringle (1991), que observaram que a inundação do solo por 24 e 48 h não reduziu significativamente a produtividade de plantas de soja, mas, períodos maiores resultaram em perdas significativas de produtividade. Sugimoto; Koesmaryono e Nakano (2000), verificaram

reduções significativas da massa de 100 grãos de soja somente após oito dias de inundação completa do solo. Trabalhos realizados com soja, também apontam para decréscimos significativos da massa de 100 grãos de soja após sete dias de inundação do solo (LINKEMER; BOARD; MUSGRAVE, 1998; SCHÖFFEL et al., 2001).

Os cultivares apresentaram respostas semelhantes aos períodos de inundação do solo, não sendo observadas diferenças significativas em relação à interação desses fatores. Entre os cultivares, houve uma variação linear decrescente da massa de 100 grãos com o prolongamento da inundação do solo. Porém, em condições de solo alagado, o cultivar FT-Abyara apresentou grãos significativamente maiores do que o cultivar CD205, independentemente do período de saturação do solo. A diferença observada entre os cultivares foi superior a 15%. Resultados semelhantes foram obtidos por Schöffel et al. (2001) entre os cultivares CEP 16 e FT-Saray. Na Tabela 30, são apresentados os valores de massa de 100 grãos dos cultivares analisados.

Tabela 30 - Massa de 100 grãos de cultivares de soja submetidos à inundação do solo por 24, 48 e 72 h.

Cultivar	Inundação do solo (h)			Média
	24	48	72	
FT-Abyara	13,3 a ⁽¹⁾	12,7 a	12,3 a	12,76 a
CD205	11,8 b	10,5 b	10,6 b	10,95 b

⁽¹⁾ Letras distintas na vertical diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Segundo Sedyama et al. (1981), a massa de 100 grãos é um valor característico de cada cultivar. A massa de 100 grãos, segundo Marcos Filho; Cícero e Silva (1987), é um dado importante que pode dar uma idéia a respeito da qualidade das sementes (estado de maturidade e sanidade), bem como oferecer informações que facilitarão o cálculo para semeadura e regulação de semeadoras.

A aplicação de doses de 50 e 100 kg N ha⁻¹ ocasionou um incremento linear significativo da massa de 100 grãos em relação às plantas do tratamento D0, reduzindo os danos provenientes do excesso de água no solo (Figura 31). Porém, não houve diferenças significativas na massa de 100 grãos em função do aumento das doses de N de 50 para 100 kg N ha⁻¹. Esse comportamento foi observado em ambos os cultivares analisados.

Figura 31 - Efeito da adição de N na massa de 100 grãos de cultivares de soja submetidos à inundação do solo . ** Significativo a 1% de probabilidade

Em relação aos períodos de inundação do solo, a aplicação de doses de N ocasionou uma variação linear da massa de 100 grãos. Os efeitos mitigadores do uso de N na massa de 100 grãos foram observados principalmente pela aplicação de 100 kg N ha⁻¹. Nesse tratamento, o aumento do período de inundação do solo não ocasionou variações da massa de 100 grãos. Comportamento contrário ao verificado no tratamento sem adição de N, cuja massa de 100 grãos decresceu linearmente com a inundação do solo. Nesse caso, a redução ocasionada pela inundação diária do solo foi de 1,13 g dia⁻¹. Já a redução da massa de 100 grãos no tratamento D2 foi apenas 0,108 g dia⁻¹. A dose de 50 kg N ha⁻¹ ocasionou um efeito intermediário. Esses resultados concordam com trabalhos que mencionam o efeito benéfico da aplicação de N após períodos de inundação do solo (BACANAMWO; PURCELL, 1999b; MATSUNAGA et al, 1994; SUGIMOTO; KOESMARYONO; NAKANO, 2000).

2.3.2.7 Efeitos dos tratamentos nos teores de proteína de grãos de soja

O encharcamento do solo durante o estágio de florescimento das plantas de soja, não acarretou danos significativos ao acúmulo de proteína em grãos dos cultivares FT-Abyara e CD 205. No entanto, os teores protéicos obtidos em grãos de plantas submetidas à inundação do solo foram inferiores aos observados em plantas não inundadas (tratamento de controle), como pode ser observado na Tabela 31.

Tabela 31 - Teores de proteína de grãos de cultivares de soja submetidos à inundação do solo e não inundados (tratamento de controle)

Cultivar	Tratamento	Proteína (%)
FT-Abyara	Inundado	34,59
	Controle	38,87 ^{ns}
CD205	Inundado	36,88
	Controle	38,75 ^{ns}
	CV (%)	6,64

^{ns} Efeito não significativo

Os teores de proteína obtidos neste experimento foram semelhantes aos observados por Maehler et al. (2003); Oliveira (1981); Portela (1981). Esses autores constataram variações de 34 a 41,2 % do teor de proteína de grãos de diferentes cultivares de soja.

Nos cultivares submetidos ao estresse por excesso hídrico, foram observadas diferenças significativas do teor de proteína. O conteúdo protéico do cultivar CD205 foi em média 5% maior do que o determinado em grãos do cultivar FT-Abyra.

Segundo Oliveira (1981), o conteúdo protéico dos grãos é uma característica intrínseca dos cultivares. Porém, o maior teor protéico verificado no cultivar C2, pode ser atribuído às reservas de N no tecido foliar deste cultivar, já que metade das proteínas dos grãos são provenientes do N armazenado nas folhas (IMSANDE; TOURAINE, 1994).

A superioridade do cultivar C2 em relação ao teor de proteína do cultivar C1, foi constatada principalmente quando o solo foi inundado por 48 e 72 h, como pode ser observado na Figura 32. Porém, não houve uma relação significativa entre o teor de proteína dos genótipos avaliados e a duração da inundação do solo.

A inundação do solo por 24, 48 e 72 h não afetou significativamente as reservas de proteína de grãos de soja. Porém, em ambos os cultivares, observou-se uma tendência de decréscimo do teor de proteína com o prolongamento da saturação hídrica do solo. Resultados semelhantes foram obtidos em feijão guandu (YADAV et al., 2000) e em milho (HILLER; CLARK; GLASS, 1971). Em soja, Barni e Costa (1976a)

observaram reduções significativas do teor protéico dos grãos em plantas submetidas a 30 dias de inundação contínua do solo durante o período de florescimento.

Figura 32 - Teor de proteína dos cultivares de soja FT-Abyara (C1) e CD205 (C2) em função da duração da inundação do solo. ^{ns} Efeito não significativo

Em relação à aplicação de N após a inundação do solo, não foram observadas diferenças significativas dos teores de proteína entre os cultivares. Porém, o cultivar C2 apresentou sinais mais evidentes do efeito da adição de N no acúmulo de proteínas nos grãos, como se observa na Figura 33. Esse resultado pode estar relacionado às diferenças genéticas entre os cultivares (MASCARENHAS et al., 1980).

A adição de N após a inundação do solo contribuiu significativamente para o aumento das reservas de proteína nos grãos de soja. Resultados semelhantes foram obtidos em trigo por Smith et al. (1989).

O aumento do teor de proteína devido aplicação das doses de 50 e 100 kg N ha⁻¹ foi em média de 15% em comparação ao tratamento cujas plantas não receberam adição de N. Esses resultados corroboram com as afirmações de Kelling e Fixen (1992).

A aplicação de dose superior a 50 kg N ha⁻¹ não ocasionou acréscimos significativos no conteúdo protéico dos grãos de soja, sendo observada uma relação quadrática entre o teor de proteína e o aumento das doses de N. Resultados divergentes foram obtidos por Novo et al. (1999), que verificaram uma resposta linear do teor de N em grãos de soja com o aumento de doses de N.

Figura 33 - Teor de proteína dos cultivares FT-Abyara (C1) e CD205 (C2) em função de doses de N adicionadas após inundação do solo. ** Significativo a 1% de probabilidade.

De acordo com as equações que expressam a relação entre o teor de proteína dos grãos e doses de N (Figura 33), no cultivar C1, o máximo teor de proteína no grão (36,3 %) foi obtido com 77 kg N ha⁻¹. Já o cultivar C2, o conteúdo protéico de 39,4% foi obtido com uma dosagem de N equivalente a 71 kg ha⁻¹. Resultados semelhantes foram citados por Câmara e Barros (2000), que obtiveram um máximo teor de proteína de grãos de soja quando aplicaram sulfato de amônio nas doses de 40 a 80 kg ha⁻¹ após o período de florescimento. Doses superiores de N reduziram o teor de proteína dos grãos.

2.3.3 Experimento III - Trigo

2.3.3.1 Efeitos dos tratamentos na aeração do solo

Durante o período de aplicação dos tratamentos (68 a 80 DAE), a umidade do solo na camada de 0 a 10 cm de profundidade, variou de 0,21 a 0,49 cm³ cm⁻³. A condição mais intensa quanto ao conteúdo de água no solo, foi ocasionada pela manutenção do NF sobre a superfície do solo (P0). Com a manutenção do NF a 15 cm de profundidade, a umidade máxima no solo foi de 0,45 cm³ cm⁻³. No entanto, durante os tratamentos, a manutenção do NF a 15 cm de profundidade resultou em um

conteúdo de água no solo 5% maior do que o observado no tratamento P0. Esse resultado pode ser atribuído ao tempo necessário para o declínio da umidade de saturação para a umidade do solo correspondente à capacidade de campo ($\theta_{cc}=0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

O tempo para o restabelecimento da umidade do solo à capacidade de campo, variou com a profundidade do NF e com a duração do estresse por excesso hídrico, representado pelo somatório dos excedentes hídricos (SEW_{30}). Observações semelhantes foram realizadas em algodão submetidas a inundações temporárias do solo (HODGSON; CHAN, 1982). O número de dias para o declínio da umidade do solo saturado para a umidade à capacidade de campo é apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 - Número de dias necessários para o restabelecimento da umidade do solo à capacidade de campo em função da profundidade do NF e da duração do estresse por excesso hídrico (SEW_{30})

Profundidade do NF (cm)	Duração do estresse por excesso hídrico (cm dia)				
	----- SEW_{30} -----				
	30	60	90	120	Média
0	9	11	11	13	11
15	10	12	13	18	13,2
Média	9,5	11,5	12	15,5	

O aumento do conteúdo de água no solo ocasiona um decréscimo da aeração, afetando a disponibilidade de O_2 para as plantas e para os microorganismos. A restrição de O_2 prejudica severamente os processos fisiológicos e metabólicos que regulam o crescimento e o desenvolvimento das plantas (TURNER et al. 1983).

A condição mais crítica de aeração do solo foi ocasionada pela manutenção do NF sobre a superfície do solo. Nesse tratamento, a porosidade livre de água ou porosidade drenável (POD) variou entre 0 e 22% e os poros foram totalmente ocupados pela água durante um período de até quatro dias (S120). Tempo suficiente para impor à zona radicular das plantas de trigo uma condição anaeróbia (CANNELL et al., 1979; MUKHTAR; BAKER; KANWAR, 1996) e ocasionar prejuízos a absorção e o transporte

de água e de nutrientes pelas raízes e ao crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (MEYER, 1985; SOJKA; STOLZY; KAUFMANN, 1975).

No tratamento de controle, a POD variou entre 23 a 32%. Já no tratamento P1, foram observadas variações de 4 e 17%, indicando uma ocupação parcial dos poros pela água. As oscilações da POD em função da posição do NF e da duração do estresse por excesso hídrico, estão representadas na Figura 41.

Figura 34 - Efeito da posição do NF sobre a superfície do solo (●) e a 15 cm de profundidade (□) e da duração do estresse por excesso hídrico (S30, S60, S90 e S120) na porcentagem de poros livres de água do solo

No tratamento P1, a POD decresceu com o aumento do estresse por excesso hídrico, representado pelo somatório dos excedentes hídricos (SEW_{30}). Para um estresse equivalente a 30, 60, 90 e 120 cm dia, foram observados valores médios da POD na camada de 0-10 cm de profundidade de 15, 11, 8 e 6%, respectivamente.

Analisando os efeitos da redução da aeração do solo na produção de grãos de trigo, observou-se uma relação significativa entre esses fatores. Principalmente quando a POD foi inferior a 10%, valor considerado crítico ao desenvolvimento da cultura

(VOMOCIL; FLOCKER, 1961; WESSELING, 1974). Nesse caso, o aumento do período em que a porosidade livre de água foi inferior a 10%, reduziu linearmente a massa de grãos de trigo, como mostrado na Figura 35. Resultados semelhantes foram obtidos em algodão (HODGSON, 1982) e em trigo (McDONALD, GARDNER, 1987).

Figura 35 - Efeito do período em que a porosidade drenável (POD) foi inferior a 10% na produção de plantas de trigo submetidas à permanência do NF sobre a superfície do solo (P0) e a 15 cm de profundidade (P1)

O decréscimo da produção de grãos com o aumento do número de dias em que a POD foi inferior a 10% foi observado independentemente da profundidade do NF. No entanto, a maior produção de grãos foi obtida com o NF mantido a 15 cm de profundidade. Tais observações indicam que os efeitos ocasionados pela ocupação total dos poros pela água foram mais prejudiciais à produção das plantas de trigo do que a saturação parcial dos poros pela água.

Os danos ocasionados pela saturação hídrica do solo ao desenvolvimento da parte aérea e à produção de plantas de trigo serão discutidos nos itens subseqüentes.

2.3.3.2 Respostas nutricionais das plantas de trigo

A análise do tecido foliar de plantas de trigo realizada antes da inundação do solo (55 DAE), indicou teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Mn, Zn, Cu, Fe, B) adequados ao desenvolvimento da cultura, segundo Ward; Whitne e

Westfallward (1973). Na Tabela 33, são apresentados os teores médios dos nutrientes encontrados nos tecidos foliares de plantas de trigo.

A quantidade de nutrientes absorvida pelas plantas de trigo obedeceu a seguinte ordem $K > N > Ca > P > S > Mg$. Observações semelhantes foram realizadas por Gargantini e Blanco (1973); Karlen e Whitney (1980).

Entre as análises, houve uma redução da concentração dos teores de macro e de micronutrientes, com exceção do Fe. Segundo Fontoura (1986), as concentrações dos elementos nutricionais decrescem progressivamente com desenvolvimento das plantas de trigo. As concentrações mínimas de macronutrientes ocorrem na maturação ou no estágio de grão leitoso e as de micronutrientes entre os estágios de floração e grão leitoso. Em relação ao Fe, Fontoura (1986) não obteve uma relação lógica da concentração desse elemento durante o desenvolvimento da cultura.

Tabela 33 - Teores de nutrientes em folhas de trigo coletas durante o estágio de florescimento antes da inundação do solo

Nutriente	Concentração de nutrientes	
	Adequado ⁽¹⁾	Amostra (55 DAE)
	-----%-----	
N	1,75-3,0	3,65
P	0,20-0,50	0,49
K	1,50-3,0	4,56
Ca	0,20-0,50	0,59
Mg	0,15-0,50	0,16
S	0,15-0,40	0,45
	-----ppm-----	
Mn	25-100	40,8
Zn	15-70	45,22
Cu	5-25	7,3
Fe	50-150	172
B	5-10	7,1

⁽¹⁾ Teores de nutrientes considerados adequados à produtividade de trigo (WARD; WHITNE; WESTFALLWARD, 1973)

A análise foliar realizada aos 75DAE, revelou alterações significativas dos teores de N, K, Fe e Mn no tecido foliar de plantas de trigo submetidas à saturação hídrica do solo em comparação com tratamento de controle.

Os teores dos elementos nutricionais obtidos em folhas de plantas de trigo submetidas à saturação hídrica do solo e à irrigação, são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Concentração de nutrientes no tecido foliar de plantas de trigo submetidas à saturação hídrica do solo e à irrigação (tratamento de controle)

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹	
Saturado	20,1	3,8	35,0	5,6	1,5	3,6	430,67	50,8
Controle	23,3**	3,9 ^{ns}	40,5**	5,4 ^{ns}	1,7 ^{ns}	4,0 ^{ns}	251,2**	30**
CV%	11,2	7,8	6,9	7,8	8,2	5,0	12,3	16,2

*, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Efeito não significativo

A redução de concentração de nutrientes no tecido foliar devido à inundação do solo tem sido observada em várias espécies de plantas (PEZESHKI, 1994; TROUGHT; DREW, 1980). Em trigo, Stieger e Feller (1994) constataram decréscimos significativos dos teores de N, P, K e Mn e o aumento da concentração de Mg e Fe. Resultados semelhantes foram observados por Huang et al. (1995). Calheiros et al. (2001), observaram reduções dos teores de N, P, K e S em duas espécies de trigo (*Triticum aestivum* e *Triticum durum*).

A inibição da absorção e do transporte de nutrientes ocasionado pelo excesso de água no solo pode ser atribuído à resistência do crescimento radicular, a ineficiência do metabolismo anaeróbico em fornecer energia adequada para absorção de íons e ao aumento da permeabilidade das membranas celulares das raízes (JACKSON; DREW, 1984; PEZESHKI, 1994; TROUGHT; DREW, 1980a).

Os efeitos do excesso de água no solo na absorção de nutrientes podem estar relacionados com a fertilidade do solo, com a espécie e com a tolerância da cultura à deficiência de O₂. Huang et al. (1995) observaram diferenças relacionadas à absorção de nutrientes em dois cultivares de trigo submetidos à inundação do solo. O cultivar mais sensível apresentou maiores concentrações de Fe e Mn.

O decréscimo dos teores de N e de K foram significativamente relacionados com a duração do excesso de água no solo. A concentração desses elementos decresceu linearmente com o aumento da duração do estresse por excesso hídrico (SEW₃₀). Resultados semelhantes foram observados em plantas de trigo por McDonald; Gardner (1987); Sharma; Swarup, (1988). Os efeitos da duração do estresse hídrico na concentração de N e K no tecido foliar de plantas de trigo são ilustrados na Figura 36.

Figura 36 - Efeito da duração do estresse por excesso hídrico no solo na concentração de N e K no tecido foliar de plantas de trigo. ** Significativo a 1% de probabilidade

A profundidade do NF afetou significativamente a concentração foliar de K. A concentração de K no tecido foliar de plantas submetidas ao tratamento P0 foi 7% menor do que a observada no tratamento P15. Segundo Glinski e Stepniewski (1986), a deficiência de O₂ ocasiona um decréscimo no conteúdo de K em todas as partes da plantas. Esses autores afirmam que o trigo em reposta ao encharcamento do solo, inibe completamente a absorção de K, deslocando o nutriente das folhas velhas para as mais novas e mencionam que a deficiência de K é o principal sintoma ocasionado pelo encharcamento do solo.

Em relação ao N, não foram observados efeitos significativos da profundidade do NF na concentração desse nutriente nas folhas de trigo. Resultado que diverge de observações realizadas por Malik et al. (2001), que verificaram reduções significativas do teor de N devido à profundidade do NF. Segundo esses autores, a concentração de

N nas folhas foi reduzida em 29% com NF mantido sobre a superfície do solo, 37% com o NF a 10 cm de profundidade e 14% com o NF na profundidade de 20 cm.

Em comparação com o tratamento de controle, foram observadas reduções de 15 e 20% da concentração de N em plantas submetidas aos tratamentos P0 e P1, respectivamente.

A redução do N pode ser atribuída ao transporte deficiente desse nutriente das raízes para a parte aérea das plantas submetidas a hipoxia no solo (BUWALDA et al., 1988). Segundo Trought e Drew (1980c) devido à restrição de N, as folhas mais velhas apresentam uma senescência precoce a fim de que o N e outros nutrientes possam ser remobilizados e utilizados para o desenvolvimento de folhas novas

Apesar dos efeitos significativos dos tratamentos na concentração de N e K, não foram observados sintomas causados pela deficiência desses elementos. A deficiência de N afeta principalmente os processos metabólicos, reduz o crescimento e produtividade das plantas e provoca um amarelecimento generalizado por toda a planta (MOTTA; LOUREIRO, 2004). Já a deficiência de K ocasiona um bloqueio no desenvolvimento da planta, interferindo nos processos fisiológicos e metabólicos.

A profundidade do NF e a duração do estresse por excesso hídrico influenciaram significativamente a concentração de Fe e de Mn nas folhas de trigo. O teor de Fe e Mn foi 70 e 52% maior em plantas submetidas à saturação hídrica do solo do que em plantas não inundadas. A maior concentração desses elementos foi ocasionada pela manutenção do NF sobre a superfície do solo. Nesta condição, o teor de Fe nas plantas foi 10% superior ao observado no tratamento P1 e de 14% para o Mn. A aeração deficiente do solo provavelmente contribuiu para o aumento da concentração desses elementos no tecido foliar de plantas de trigo. O aumento da concentração de Fe no tecido foliar também foi observado em plantas de soja (experimento II).

O prolongamento do estresse por excesso hídrico resultou em um incremento linear da concentração de Fe no tecido foliar de plantas de trigo. Comportamento semelhante foi observado em relação à variação do teor de Mn com o aumento do SEW₃₀, como se observa na Figura 37. Resultados semelhantes foram obtidos por Sharma e Swarup (1988); Stieger e Feller (1994).

Figura 37 - Efeito da duração do estresse por excesso hídrico no solo (SEW₃₀) na concentração de Fe (a) e de Mn (b) no tecido foliar de plantas de trigo ** Significativo a 1% de probabilidade

2.3.3.3 Efeito dos tratamentos na altura de plantas de trigo

Os resultados da análise de variância não indicaram diferenças significativas entre as alturas de plantas do tratamento de controle e de plantas submetidas a hipoxia temporária, como pode ser observado na Figura 38.

Efeitos da inundação do solo no crescimento de plantas de trigo foram relatados por Sharma e Swarup (1988); Calheiros et al. (2000). Porém, tais resultados foram obtidos em plantas submetidas à inundação do solo durante o estágio vegetativo da cultura.

Figura 38 - Altura média de plantas de trigo submetidas a hipoxia temporária no solo e de plantas irrigadas (tratamento de controle) durante o desenvolvimento da cultura

Não houve uma relação significativa da altura das plantas de trigo com os períodos de saturação hídrica do solo. Ao contrário do observado por Collaku e Harrison (2002) que verificaram um decréscimo linear da altura de plantas de trigo com o aumento do período de inundação do solo durante o estágio vegetativo da cultura.

Observa-se na Figura 38, que as plantas de trigo apresentaram um crescimento intenso durante o estágio de alongamento do colmo, atingindo a estatura máxima após o espigamento, que ocorreu aproximadamente aos 70 DAE. Aos 90 DAE, a altura final das plantas variou de 70 a 83 cm. Valores semelhantes foram obtidos por Azevedo (1988).

Geralmente, a inundação do solo pode ocasionar o acamamento das plantas de trigo. Segundo Rawson e McPherson (2001), o acamamento não ocasiona prejuízos relevantes à produtividade se ocorrer durante o estágio inicial de desenvolvimento da cultura, no entanto, se ocorrer durante a antese pode reduzir o rendimento das plantas em até 1% ao dia.

Entre os tratamentos, não foi observado o acamamento das plantas de trigo. Esse resultado pode ter sido influenciado pelo cultivo das plantas em ambiente protegido. O acamamento pode ser ocasionado também pelo uso excessivo de adubos nitrogenados. O suplemento excessivo de N aumenta o crescimento da parte aérea, comparativamente ao crescimento radical, ampliando a suscetibilidade da planta ao acamamento e a deficiência nutricional de fósforo e potássio (EMBRAPA TRIGO, 2003).

A estatura do cultivar também influencia a resposta da planta à adubação nitrogenada. Cultivares de porte alto respondem menos ao nitrogênio e podem apresentar acamamento com a adição de doses nitrogênio a partir de 40 kg ha⁻¹ (SILVA; GOTO, 1990). No entanto, a aplicação tardia de N não apresentou efeitos significativos na altura final e também no acamamento de plantas de trigo submetidas ao excesso de água no solo.

2.3.3.4 Efeitos da saturação na área foliar de plantas de trigo

O excesso de água no solo ocasionou uma redução significativa de 20% da área foliar de plantas de trigo em relação ao tratamento de controle. Danos ocasionados pelo excesso de água no solo ao desenvolvimento foliar também foram observados em experimentos realizados com lentilha (15%) e soja (30%). Em trigo, efeitos negativos da inundação do solo na expansão foliar foram constatados por Huang et al. (1994); Malik et al. (2001).

Segundo Kozlowski (1984), a inibição da expansão foliar é uma resposta comum das plantas à deficiência de O_2 ocasionada pelo excesso de água no solo. Para esse autor, tal efeito deve-se à redução do tamanho e do número de folhas e também ao aumento da abscisão foliar.

Em ambos os tratamentos, a expansão foliar máxima das plantas de trigo foi atingida durante o estágio de emborrachamento e florescimento da cultura, aproximadamente após a emissão da folha bandeira, o que ocorreu aos 55 DAE. Comportamento semelhante foi observado por Azevedo (1988). A variação da área foliar de plantas de trigo em função do estágio de desenvolvimento da cultura e dos níveis de saturação hídrica do solo pode ser observada na Figura 39.

Durante a fase de enchimento dos grãos, tem início o transporte de fotoassimilados das folhas para grãos, ocasionando a senescência natural das folhas. No entanto, com o início dos tratamentos (70 DAE), verificou-se um decréscimo significativo da área foliar das plantas de trigo em resposta ao excesso de água no solo (Figura 39).

Em plantas de trigo, a redução foliar foi atribuída ao menor número de perfilhos e à redução da taxa de alongamento das folhas (SOJKA; STOLZY; KAUFMANN, 1975; TROUGHT; DREW, 1980c). No entanto, tais observações foram realizadas em plantas submetidas à inundação do solo durante o estágio vegetativo da cultura, diferindo deste experimento.

Figura 39 - Variação da área foliar ao longo do desenvolvimento de plantas de trigo em função da permanência do NF sobre a superfície do solo (P0) e a 15 cm de profundidade (P1) e de plantas irrigadas (controle). A seta indica o período de execução dos tratamentos. ** Diferença significativa entre os níveis de profundidade do NF a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Efeito não significativo

Os resultados observados podem estar relacionados à intensificação do processo de senescência das folhas ocasionado pela deficiência de O₂ no solo. Observações semelhantes foram realizadas por Belford; Cannell e Thomson (1985); Lu (1994). A inundação do solo influencia indiretamente a senescência foliar devido a uma alteração na distribuição de solutos das raízes para a parte aérea das plantas. Vários hormônios são estimulados e transportados para as folhas, causando a senescência prematura das folhas em poucos dias. Dentre os hormônios estão o etileno, a citocinina, a giberelina e o ABA (REID; BRADFORD, 1984, STIEGER; FELLER, 1994).

A senescência foliar prejudica a capacidade fotossintética da cultura, podendo afetar significativamente a produção de grãos. Segundo Mélo Júnior (1992), condições adversas de déficit hídrico ou de N aceleram a senescência foliar e reduzem a duração da área foliar.

O processo de senescência das folhas foi mais intenso em plantas submetidas à saturação total da zona radicular da cultura (Figura 39). As plantas submetidas a esse tratamento apresentaram uma redução da área foliar de 28% em comparação com o tratamento de controle. Com a saturação parcial do solo, a redução da área foliar foi significativamente inferior (9%). Os efeitos ocasionados pela saturação hídrica do solo à área foliar de plantas de trigo foram proporcionais à posição do NF. Observações

semelhantes foram realizadas por Malik et al. (2001). Efeitos semelhantes foram observados também em milho por Almeida et al. (2002). Segundo esses autores, a permanência do nível freático próximo à superfície do solo reduziu o índice de área foliar, aumentou a senescência das folhas e diminuiu a expansão da área foliar do dossel vegetativo das plantas.

Os danos à área foliar de plantas de trigo também foram ocasionados pela duração do estresse por excesso hídrico. Houve um decréscimo linear da área foliar em resposta ao aumento do estresse hídrico (SEW_{30}) na zona radicular da cultura, como pode ser observado na Figura 40. Resultados semelhantes foram obtidos nos experimentos realizados com lentilha e soja, indicando os efeitos da deficiência de O_2 no solo ao desenvolvimento foliar.

Figura 40 - Efeito do prolongamento do estresse por excesso hídrico na área foliar de plantas de trigo aos 75 DAE. ** Significativo a 1% de probabilidade

Em relação à área foliar obtida em plantas de controle ($159,6 \text{ cm}^2$), o estresse por excesso hídrico equivalente a 30, 60, 90 e 120 cm dia ocasionou reduções significativas da área foliar de 7, 10, 14 e 31%, respectivamente. Estes resultados foram semelhantes aos obtidos em plantas de trigo submetidas à inundação do solo por 14 dias (MALIK et al., 2001).

Não foram observados efeitos significativos da interação entre a profundidade do NF e a duração do estresse por excesso hídrico na área foliar de plantas de trigo.

Adição de N dez dias após o início dos tratamentos (80 DAE), não foi suficiente para proporcionar uma recuperação efetiva da área foliar de plantas de trigo submetidas ao excesso de água no solo em relação ao tratamento de controle. Em coletada realizada aos 90 DAE, as plantas estressadas apresentaram uma área foliar 15% inferior à observada em plantas de controle.

Porém, diferenças significativas foram observadas em relação ao uso de N entre as plantas submetidas à saturação parcial e total do solo. A aplicação de 50 kg N ha⁻¹, ocasionou um incremento médio de 15% da área foliar de plantas submetidas ao excesso de água no solo quando comparado à ausência de N. Este resultado deve ser interpretado como um retardamento do processo de senescência das folhas de trigo. Resultados semelhantes foram observados em trigo por Mélo Júnior (1992); Parameswaran; Graham e Aspinall (1981).

Segundo Parameswaran; Graham e Aspinall (1981), a aplicação de N aumentou a duração da área foliar e uso de água, principalmente quando o fertilizante foi aplicado diretamente ao solo e não por pulverização foliar.

Evidências apontam que a inibição da absorção de nutrientes ocasiona deficiências nutricionais são diretamente responsáveis pelo aumento da senescência foliar e suspensão do crescimento foliar em plantas submetidas à inundação do solo (TROUGHT; DREW, 1980a). Em algodão, a senescência prematura das folhas foi relacionada à redução da absorção de K e P pelas raízes em solo inundado (McLEOD et al., 1990).

Os efeitos da aplicação de N na área foliar não foram significativamente relacionados com a profundidade do NF e com a duração do estresse por excesso hídrico. No entanto, as plantas submetidas ao tratamento P0 apresentaram uma resposta maior à adição de N. Na Tabela 35, são apresentados os valores médios de área foliar de plantas de trigo em resposta à presença e ausência de N após saturação hídrica total e parcial do solo.

Tabela 35 - Área foliar de plantas de trigo em função da adição de N após saturação hídrica total e parcial do solo

Doses de N (kg ha ⁻¹)	Saturação do solo		
	Total	Parcial	Média
0	59 b ⁽¹⁾	75 a	67 b
50	74 a	80 a	77 a

⁽¹⁾ Letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. d.m.s.=8,6

No tratamento P0, a adição de uréia ocasionou um incremento de 20% da área foliar em relação às plantas que não receberam adubação nitrogenada. Em plantas submetidas à saturação parcial do solo a diferença entre a presença e a ausência de N foi de apenas 6%. Apesar da resposta positiva à adição de N apresentada pelas plantas submetidas à saturação total do solo, a área foliar destas foi significativamente inferior à observada em plantas submetidas ao encharcamento do solo.

Segundo Trought e Drew (1980b) a senescência foliar causada inundação do solo pode ser contornada por meio de aplicações de nitrato na superfície do solo e de uréia por pulverização foliar, mas o efeito benéfico no desenvolvimento foliar foi pequeno em relação aos efeitos causados pela inundação do solo.

2.3.3.5 Efeitos dos tratamentos na massa seca total de plantas de trigo

O acúmulo de matéria seca da parte aérea de plantas de trigo foi significativamente afetado pela saturação hídrica (total e parcial) do solo, imposta durante o estágio de florescimento da cultura. Os efeitos da saturação hídrica do solo na massa seca total de plantas de trigo foram evidentes em análises realizadas aos 75 e 90 DAE. Os valores médios das massas secas totais de plantas de trigo submetidas ao excesso de água no solo e ao tratamento de controle obtidos aos 20,35, 55, 75 e 90 são representados graficamente na Figura 41.

Comportamento semelhante foi constatado no experimento com lentilha e soja, concordando com as observações realizadas por Pezeshki (1994); Kozlowski (1984). Segundo esses autores, reduções no acúmulo de matéria seca da parte aérea da planta são efeitos característicos do estresse ocasionado por excesso de água no solo,

geralmente observada em espécies sensíveis à deficiência de O_2 no solo. No entanto, a severidade dos danos ocasionados pela inundação do solo ao desenvolvimento das plantas pode variar de acordo com a espécie, o genótipo, a idade das plantas e com as condições edafoclimáticas.

Figura 41 - Acúmulo de massa seca total de plantas de trigo durante o desenvolvimento da cultura em condições de solo saturado e não saturado (controle). ** Diferença significativa entre os tratamentos a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Efeito não significativo

Decréscimos da massa seca total da parte aérea de plantas de trigo submetidas à inundação do solo foram observados por Calheiros et al. (2000); Huang et al. (1994); Huang e Johnson (1995); Lu (1994); Thomson et al. (1992).

Os efeitos da saturação hídrica do solo na massa seca total das plantas de trigo foram significativamente relacionados com a duração do estresse hídrico. A massa seca total da parte aérea das plantas decresceu linearmente com o aumento do estresse por excesso hídrico (Figura 42). Em relação ao tratamento de controle, o estresse por excesso hídrico de 30, 60, 90 e 120 cm dia ocasionou decréscimos da massa seca total de 10, 15, 22 e 27%, respectivamente.

Figura 42 - Efeito do estresse por excesso hídrico na massa seca total da parte aérea de plantas de trigo. ** Significativo a 1% de probabilidade

A profundidade do NF não afetou significativamente a massa seca total da parte aérea de plantas de trigo. Este resultado diverge de observações sobre os efeitos prejudiciais da profundidade do lençol freático no desenvolvimento de plantas de trigo (MALIK et al., 2001).

Analisando separadamente os efeitos dos tratamentos nos constituintes da parte aérea das plantas de trigo, observou-se um decréscimo da massa seca de folhas e de colmos, concomitantemente houve um aumento da massa seca de espigas (Figura 43). Comportamento semelhante ao descrito por Page; Smalley e Talibudeen (1977).

Esse decréscimo é ocasionado pelo transporte de assimilados das folhas, colmos e espiga, para formar a massa de grãos (WALDREN; FLOWERDAY, 1979). No entanto, a produção e o acúmulo de matéria seca na parte vegetativa e nos grãos depende das características genéticas dos cultivares e da disponibilidade de água durante o seu desenvolvimento.

A cultura do trigo, durante seu desenvolvimento, apresenta necessidades distintas quanto à disponibilidade de água (SOUZA; TUBELIS, 1982). Na fase de perfilhamento ao início da floração, a cultura exige um suprimento abundante de água. Na segunda metade do florescimento ao início do estágio de grão leitoso, o suprimento excessivo de água é prejudicial. A cultura de trigo apresenta elevada suscetibilidade ao excesso de água no solo durante o período de florescimento da cultura (GILL; QADAR; SINGH, 1992).

Figura 43 - Massa de folhas (MF), colmos (MC) e espigas (ME) ao longo do desenvolvimento de plantas de trigo submetidas ao excesso de água no solo (marcadores em branco) e de plantas somente irrigadas (marcadores em negro)

Na análise realizada aos 75 DAE, o excesso de água no solo não ocasionou danos significativos ao acúmulo de massa seca de folhas e de colmos, mas afetou drasticamente o acúmulo de matéria seca nas espigas. Comparativamente com o tratamento de controle, a saturação hídrica do solo ocasionou decréscimos da massa seca de folhas, colmos e espigas de 8, 16 e 30%, respectivamente. Estes resultados indicam que os danos ocasionados pelo excesso de água no solo ao acúmulo da biomassa total da parte aérea de plantas de trigo foram ocasionados principalmente, pela drástica redução da massa seca de espigas.

A massa seca de espigas foi significativamente afetada pela profundidade do NF e pela duração do estresse hídrico. As plantas submetidas à saturação total do solo apresentaram um decréscimo significativo da massa de espigas com o aumento permanência do NF acima da superfície do solo (SEW_{30}), como mostrado na Figura 44. Comportamento distinto foi observado em plantas submetidas ao NF à profundidade de 15 cm. Neste tratamento, o aumento do SEW_{30} não afetou o acúmulo de matéria seca nas espigas.

Em média, as plantas submetidas ao tratamento P0 apresentaram espigas com maior massa. Este comportamento pode estar relacionado à disponibilidade de água para a planta durante o período de saturação total do solo, principalmente com o solo inundado por um curto período (24 e 48 horas). Observações semelhantes foram realizadas por Freitas et al. (1985); Fontoura (1986); Musick e Dusek (1980).

Figura 44 - Massa seca de espigas de plantas de trigo submetidas ao NF sobre a superfície do solo (P0) e a 15 cm de profundidade (P1) em função da duração do estresse por excesso hídrico ** Significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} Efeito não significativo

Aos 90 DAE, os danos ocasionados pela saturação hídrica do solo ao desenvolvimento da parte aérea das plantas foram evidentes quando comparado ao desenvolvimento de plantas não estressadas (Figura 41). Nesse período, as plantas submetidas ao estresse por excesso hídrico apresentaram uma massa seca total 28% menor do que à observada no tratamento de controle. Resultado superior ao observado aos 75 DAE (20%), apesar do aumento da massa seca total das plantas verificado entre as análises. Este resultado indica uma menor taxa de desenvolvimento da cultura após a saturação hídrica do solo. Observações semelhantes foram realizadas no experimento com lentilha.

A taxa de crescimento (TC) das plantas de trigo foi significativamente afetada pelos níveis de saturação hídrica do solo, como se observa na Figura 45. No período de execução dos tratamentos (55-75 DAE), as plantas submetidas à saturação do solo apresentaram uma taxa de crescimento 51% inferior à TC de plantas do tratamento de controle. Esse resultado deve-se provavelmente aos efeitos da hipoxia temporária no solo ao sistema radicular da cultura, prejudicando a absorção de nutrientes e a translocação de assimilados para os grãos. Segundo Boru et al. (2003), a disponibilidade inadequada de oxigênio para as raízes é o principal fator limitante do crescimento de plantas expostas ao estresse por excesso hídrico.

Figura 45 - Taxa de crescimento de plantas de trigo submetidas ao NF sobre a superfície do solo (P0), a 15 cm de profundidade (P1) e somente irrigadas (controle)

Os efeitos da saturação total e parcial do solo na taxa de crescimento das plantas de trigo foram semelhantes durante o período de 55-75 DAE, ao contrário do observado no período correspondente ao término dos tratamentos (75-90 DAE). Nesse período, as plantas submetidas à saturação total do solo apresentaram uma TC significativamente superior (41%) à apresentada por plantas submetidas à saturação parcial do solo (Figura 45). Este resultado está relacionado ao maior acúmulo de matéria seca na parte aérea de plantas submetidas à saturação do solo.

A diferença observada entre os níveis de profundidade do NF em relação à massa seca total das plantas foi de 15%. Resultado contrário ao obtido no período anterior (75DAE) e pode ser atribuído ao maior acúmulo de matéria seca nas espigas de plantas submetidas ao tratamento P0, como apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 - Matéria seca de colmos, folhas e espigas de plantas submetidas ao NF sobre a superfície do solo (P0) e a 15 cm de profundidade (P1)

Tratamento	Massa seca (g)			
	Colmo	Folha	Espiga	Total
P0	1,72 a ⁽¹⁾	0,67 b	3,41 a	5,81 a
P1	1,49 a	0,90 a	2,53 b	4,92 b

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

A dose correspondente a 50 kg N ha⁻¹ ocasionou um incremento de 17% na massa seca total das plantas de trigo. Resultados semelhantes foram obtidos no experimento com soja, cuja adição de N ocasionou um aumento significativo da massa seca total das plantas de 15 e 22%.

Estas observações indicam que as plantas de trigo não apresentaram uma recuperação efetiva do desenvolvimento após o estresse por excesso hídrico, em comparação com o tratamento de controle. No entanto, a adição suplementar de N reduziu os efeitos adversos do excesso de água no solo ao desenvolvimento da parte aérea das plantas de trigo.

Resultados positivos da adição de fertilizantes nitrogenados em solos alagados foram constatados por Hodgson (1982); Hodgson e MacLeod (1987) em algodão e por Watson; Lapins e Barron (1976) em trigo, cevada e aveia. em plantas de trigo. Em plantas de trigo, o aumento da concentração de nutrientes no sistema radicular inundado reduziu o declínio da fotossíntese e do conteúdo de clorofila e aumentou o teor de N nas folhas e o crescimento da parte aérea, minimizando os efeitos adversos do excesso de água no solo (HUANG et al., 1994).

2.3.3.6 Efeitos dos tratamentos na produção de plantas de trigo

Os tratamentos afetaram significativamente os componentes de rendimento da cultura. Em comparação com o tratamento de controle, foram constatados efeitos do excesso de água no solo no número de grãos por espiga e na massa total de grãos. Na Tabela 37, são apresentados os valores médios dos componentes de rendimento referentes aos tratamentos impostos às plantas durante o estágio de florescimento da cultura.

Em relação ao número de espiguetas e à massa de 100 grãos, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos impostos às plantas de trigo e o tratamento de controle. Entretanto, o número de espiguetas em plantas submetidas ao excesso de água no solo foi menor do que o apresentado por plantas não estressadas.

Tabela 37 - Componentes de rendimento médio de plantas de trigo submetidas à saturação hídrica do solo e de plantas irrigadas (tratamento de controle)

Tratamento	Número de espiguetas	Número de grãos	Massa de grãos ⁽¹⁾ (g)	Massa de cem grãos (g)
Saturado	17,9	37,2	7,5	4,0
Controle	19,4 ^{ns}	49,7 ^{**}	9,4 ^{**}	3,7 ^{ns}
CV(%)	8,6	9,75	14,0	12,04

¹ Valor referente à massa de grãos de cinco espigas

^{**} Médias entre tratamentos significativas entre si a 1% de probabilidade;

^{ns} Efeito não significativo

A redução do número de espiguetas foi significativamente relacionada à profundidade do NF. O número de espiguetas observado em plantas submetidas à saturação total do solo (16,9) foi significativamente inferior ao observado em plantas submetidas à saturação parcial do solo (18,9).

No entanto, o número de espiguetas não foi relacionado significativamente à duração do estresse por excesso hídrico. Resultado semelhante foi verificado em relação à aplicação de N após o estresse. Também não foram observadas diferenças significativas pelo teste de variância entre as interações dos fatores profundidade do NF, duração do estresse e uso de N.

Em relação ao número de grãos, o excesso de água no solo ocasionou uma redução média de 25% em comparação o número de grãos produzidos por plantas do tratamento de controle.

Diferenças significativas entre os tratamentos foram observadas em função da profundidade do NF e da duração do estresse e também em relação ao uso de N após a saturação hídrica do solo. As menores produções de grãos foram observadas em plantas submetidas ao NF sobre a superfície do solo, ou seja, com o solo totalmente saturado.

As plantas submetidas à esse tratamento apresentaram uma produção média de 34,1 grãos por espiga, representando um decréscimo de 30% em relação ao tratamento de controle. Já no tratamento P1, houve uma redução média do número de grãos por espiga de 19% em comparação com o tratamento de controle. Neste caso, a menor profundidade do NF resultou em um decréscimo significativo no número de grãos de

trigo por espiga (18%). Observações semelhantes foram realizadas por Malik et al. (2001).

Em soja, o lençol freático a 15 cm de profundidade ocasionou uma produtividade de grãos 48% inferior à obtida com o lençol freático a 60 cm de profundidade (SARWAR, 2002). Resultado que diverge dos obtidos em pesquisas realizadas com soja cultivada em solos permanentemente alagados (HUNTER; JABRUN; BYTH, 1980; NATHANSON et al. 1984).

Além dos efeitos da profundidade do NF, a duração do estresse afetou significativamente a quantidade de grãos produzidos. Em relação ao tratamento de controle, as reduções médias no número de grãos de trigo ocasionadas pelo aumento do estresse por excesso hídrico variaram de 22 a 32%. Os maiores danos foram ocasionados pela permanência do NF acima da superfície do solo. Porém, a interação entre a profundidade e o tempo de permanência do NF não foi significativa.

Foi observada uma relação significativa entre o número de grãos e a duração do estresse. O aumento da permanência do NF ocasionou uma variação quadrática do número de grãos de trigo, sendo verificado um decréscimo acentuado no número de grãos ocasionado por um período de estresse superior a 90 cm dia ou o equivalente a 72 h de solo completamente inundado ou 144 h de solo parcialmente saturado (Figura 46).

Figura 46 - Efeito da duração do estresse por excesso hídrico no número de grãos de trigo por espiga.
 ** Significativo a 1% de probabilidade

Resultado divergente ao obtido por Collaku e Harrison (2002), que verificaram uma redução linear do número de grãos por espiga com o aumento do período de inundação do solo. Entretanto, estas observações concordam com as realizadas por Sieben (1962 apud CARTER, 1988), que verificou em experimentos com cereais de inverno uma redução no rendimento de grãos quando SEW_{30} foi superior a 100 e 200 cm dia durante o ciclo de desenvolvimento das culturas. Resultados semelhantes foram obtidos por Almeida et al. (2002), que verificaram uma resposta quadrática da produtividade de milho com o aumento do SEW_{30} .

A aplicação da dose correspondente a 50 kg N ha^{-1} , ocasionou um aumento de 10% do número de grãos em relação ao tratamento D0. Esse efeito foi observado principalmente em plantas submetidas à saturação total do solo, como pode ser observado na Tabela 38. Porém, não houve interação significativa entre o uso de N e a profundidade do NF.

Tabela 38 - Número de grãos de trigo produzidos em função da profundidade do NF e doses de N.

Dose de N (kg ha^{-1})	Profundidade do NF (cm)		
	0	15	Média
0	32,0	40,0	36,03 b ⁽¹⁾
50	36,2	40,4	38,33 a

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Efeitos da aplicação suplementar de N também foram verificados na massa total de grãos. O aumento do estresse por excesso hídrico não afetou significativamente a massa de grãos das plantas que receberam adubação nitrogenada, como pode ser observado na Figura 47. Tal comportamento proporcionou um aumento significativo de 16% da massa de grãos em comparação com a obtida em plantas que não receberam adubação nitrogenada. Essas observações evidenciam os efeitos positivos da aplicação de N na atenuação dos danos ocasionados pelo excesso de água no solo. Estes resultados são semelhantes aos observados em trigo, cevada e aveia (WATSON; LAPINS; BARRON, 1976) e divergem dos resultados obtidos em plantas de trigo irrigadas (SMITH et al., 1989).

Figura 47 - Massa total de grãos⁽¹⁾ em função da ausência (D0) e presença de N (D1) e da duração do estresse por excesso hídrico. ** Significativo a 1% probabilidade; ^{ns} Efeito não significativo.
⁽¹⁾ Massa de grãos de cinco espigas.

Na ausência de N, a massa total de grãos decresceu significativamente com o aumento do estresse por excesso hídrico (Figura 54). Resultados semelhantes foram encontrados nos experimentos realizados com lentilha, soja, milho (SCHILD et al., 1994) e trigo (GILL; QADAR; SINGH, 1992). Corroborando com as observações a respeito da intensidade dos efeitos do excesso de água no solo à produção das culturas com o aumento do período de submersão do sistema radicular.

No tratamento D1, o estresse por excesso hídrico equivalente a 30, 60, 90 e 120 cm dia ocasionou reduções da massa de grãos de 15, 15, 9 e 23%, respectivamente em relação à produção de plantas não inundadas (9,46 g). Na ausência de N, as reduções observadas em função do estresse imposto às plantas foram de 11, 25, 34 e 40 %, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados por Sharma e Swarup (1988), que verificaram uma redução de 39% da produtividade de plantas de trigo causada pela inundação do solo. Musgrave (1994), constatou decréscimos da produtividade de 37 a 45% em oito cultivares de trigo após inundação do solo. Reduções superiores (60%) foram obtidas por Collaku e Harrison (2002) em cultivares de trigo submetidos à inundação do solo por 30 dias.

Os efeitos da adição de N na produção das plantas de trigo não foram relacionados com a profundidade do NF. Porém, a massa de grãos foi significativamente afetada pela profundidade do NF.

O NF mantido a 15 cm de profundidade proporcionou uma massa de grãos de trigo 49% maior do que a obtida com o NF sobre a superfície do solo. Em relação ao tratamento de controle, a produção relativa do tratamento P0 e P1 foi 63 e 93%, respectivamente. Esses resultados concordam com os obtidos por Calheiros et al. (2000) que verificaram um desenvolvimento melhor de plantas de trigo, em condições de encharcamento, quando o lençol freático foi mantido a 15 cm de profundidade. Já Andrade e Dos Reis (1992); Coelho et al. (1992) atribuíram as reduções de produtividade de plantas de milho e de soja à aeração deficiente ocasionada pela profundidade do lençol freático a 30 cm de profundidade.

A divergência entre esses resultados pode estar relacionada com fatores edáficos como a porosidade e a estrutura do solo. Em condições alagadas, a produção de plantas de trigo foi 44% maior em solo melhor estruturado do que em solo desestruturado (MEYER et al., 1985).

A superioridade da massa de grãos em plantas submetidas ao NF a 15 cm de profundidade foi observada em todos os períodos de estresse impostos às plantas de trigo, como apresentado na Tabela 39.

Tabela 39 - Massa total de grãos de trigo⁽¹⁾ em função da profundidade do NF e de períodos de estresse por excesso hídrico

Profundidade do NF (cm)	SEW ₃₀ (cm dia)				
	30	60	90	120	Média
0	6,87 b ⁽²⁾	6,17 b	5,68 b	5,07 b	5,95 b
15	9,45 a	8,96 a	9,18 a	7,85 a	8,86 a

⁽¹⁾ Massa de grãos de cinco espigas

⁽²⁾ Letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

A manutenção do NF a 15 cm da superfície do solo durante o período de florescimento da cultura possibilitou a formação de grãos maiores em comparação com os obtidos com o NF mantido sobre a superfície do solo. Entre os níveis de profundidade do NF, verificou-se uma diferença de massa de 100 grãos de 28%.

A massa de 100 grãos foi significativamente superior nos tratamentos submetidos ao NF a 15 cm de profundidade, independentemente da duração do estresse por excesso hídrico. Os valores médios da massa de 100 grãos de trigo em

função da profundidade do NF e da intensidade do estresse por excesso hídrico são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Valores médios da massa de 100 grãos de trigo em função da profundidade do NF e de períodos de estresse por excesso hídrico

Profundidade do NF (cm)	SEW ₃₀ (cm dia)				Média
	30	60	90	120	
0	4,06b	3,46b	3,04b	3,39b	3,49b
15	4,59a	4,39a	4,56a	4,06a	4,40a

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras distintas na vertical diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

A duração do estresse hídrico afetou significativamente o acúmulo de matéria seca nos grãos de trigo. A massa de 100 grãos apresentou uma relação significativa com a duração do estresse hídrico. O aumento do grau de estresse ocasionou um decréscimo linear da matéria seca acumulada nos grãos, como se observa na Figura 48. Resultados semelhantes foram obtidos por Gill; Qadar e Singh (1992).

Figura 48 - Efeito da duração do estresse por excesso hídrico na massa de 100 grãos de trigo.
** Significativo a 1% de probabilidade

O decréscimo da massa de 100 grãos pode ser associado à senescência prematura das folhas, verificada principalmente em plantas submetidas à saturação total do solo. Observações semelhantes foram realizadas por Fischer e Kohn (1966).

O uso de N também afetou positivamente a massa de 100 grãos. Esse componente apresentou um incremento de 8% com a aplicação de 50 kg N ha⁻¹. Resultados semelhantes foram obtidos por Watson; Thorne e French (1963).

Segundo Almeida (2002), a adubação nitrogenada aumenta o tamanho dos grãos de trigo, independente da dose ou forma de aplicação. A aplicação mais tardia favorece o aumento do teor de proteínas. O aumento de proteína nos grãos foi verificado no experimento realizado com plantas de soja.

As plantas submetidas ao tratamento P1 apresentaram uma recuperação e uma produção de grãos superior à observada em plantas submetidas à saturação total do solo. Esses resultados podem ser atribuídos à existência de poros livre de água, o que permitiu às plantas de trigo desempenharem suas funções normalmente, mesmo com o teor de água no solo acima da capacidade de campo. Comportamento semelhante foi observado em algodão (HODGSON; CHAN, 1982), em cevada (DREW; SISWORO 1977); em feijão (WILLIAMSON, 1968), em soja (BARNI 1999) e em trigo (CALHEIROS et al., 2001; RIGHES, 1984).

Os danos observados ao desenvolvimento das plantas de trigo em condições de saturação total do solo, podem estar relacionados à interrupção da troca de gases entre o solo e atmosfera. Com a interrupção do movimento dos gases do solo para atmosfera, a concentração de O₂ decai rapidamente. A depleção de O₂ resulta em uma série de mudanças químicas do solo que incluem a formação de elementos como CO₂ e etileno (C₂H₄), que se acumulam rapidamente no solo atingindo níveis tóxicos às plantas (CRUCIANI, 1985). Os processos seguintes incluem desnitrificação, redução de ferro, manganês e sulfato, do pH e do potencial oxi-redução (PONNAMPERUMA, 1984).

O declínio de concentração O₂ em solos inundados é consideravelmente maior na superfície do solo do que em camadas mais profundas. Tais resultados estão provavelmente relacionados com a maior atividade respiratória das raízes e dos microorganismos na superfície do solo do que em camadas mais profundas (CANNELL et al., 1985; BELFORD; CANNELL; THOMSON, 1985).

A atividade microbiológica do solo sofre influências da temperatura, que interfere também na difusão e na solubilidade dos gases na solução do solo (LUXMOORE; STOLZY, 1972).

Durante o ciclo da cultura de trigo, a temperatura média do solo variou entre 16 a 28°C. Não foram observados efeitos da posição do NF na temperatura média do solo. No tratamento P1, a temperatura média do solo a 5 cm de profundidade foi de 24,9°C e de 25,5°C no tratamento P0. Essa temperatura pode ter sido prejudicial principalmente às plantas submetidas à saturação total do solo, já que segundo Luxmoore; Fischer e Stolzy (1973) há uma interação significativa entre os efeitos da temperatura e de períodos de inundação do solo na produtividade de plantas de trigo.

3 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi conduzido o experimento com a cultura de lentilha, a análise dos resultados permitiu concluir que:

- O excesso de água no solo por um período de 24 h, durante o estágio de florescimento da cultura de lentilha, reduziu a expansão foliar, o acúmulo de biomassa da parte aérea das plantas, a produção e a massa de 100 grãos e diminuiu a concentração de N, K, Ca, Mn e Mg nas folhas e intensificou o processo de senescência, reduzindo a área foliar em 20%;
- Os maiores danos ao desenvolvimento e à produção das plantas de lentilha foram ocasionados pela elevação e rebaixamento do nível freático em 5 cm dia⁻¹. A velocidade de ascensão e de rebaixamento do nível freático de 15 e 30 cm dia⁻¹ aumentou significativamente a área foliar, a matéria seca da parte aérea e a produção de grãos de lentilha;
- A recuperação das plantas após a inundação do solo foi maior quando a ascensão do nível freático e seu rebaixamento foram mais rápidos (30 cm dia⁻¹) e menor quando a velocidade de ascensão e de rebaixamento do nível freático foi mais lenta (5 cm dia⁻¹);
- O manejo do nível freático minimizou parcialmente os prejuízos ocasionados pela inundação temporária do solo. O efeito negativo da inundação do solo na produção de grãos foi reduzido em 21% pelo aumento da taxa de ascensão e de rebaixamento do nível freático de 5 para 30 cm dia⁻¹;
- A aplicação de N, após a inundação do solo, não reduziu os danos ocasionados pela hipoxia temporária no solo ao desenvolvimento e à produção de plantas de lentilha.

No experimento com soja, a análise dos resultados permitiu concluir que:

- A inundação do solo prejudicou o desenvolvimento da parte aérea e a produção de grãos dos cultivares FT-Abyara e CD205. Ocasinou o murchamento e clorose das folhas e intensificou a senescência e a abscisão de folhas e flores.

- Em ambos os cultivares os teores de N, K, Mg e Mn das folhas decresceram, enquanto que a concentração de Fe aumentou linearmente com a duração da inundação do solo,
- O prolongamento da inundação do solo de 24 a 72 h ocasionou o decréscimo linear da área foliar, da massa seca da parte aérea das plantas e da massa total de grãos dos cultivares de soja. Os maiores danos foram ocasionados pela inundação do solo por período superior a 48 h;
- Após a inundação do solo, o cultivar FT-Abyara apresentou maior crescimento vegetativo e o cultivar CD205 maior produtividade e maior teor protéico. Os cultivares apresentaram comportamentos distintos à aplicação de N em solo inundado. O cultivar FT-Abyara apresentou maior crescimento vegetativo e produtivo em resposta à adição de N após a inundação do solo.
- A aplicação de N aumentou a área foliar, o acúmulo de biomassa na parte aérea, a massa de grãos e o teor de proteína dos grãos. O uso de N minimizou em 15% os danos da inundação do solo à produção de grãos. A adição de uma dose superior a 50 kg N ha⁻¹ não proporcionou um aumento significativo do desenvolvimento e da produção de grãos.

Nas condições em que foi conduzido o experimento com a cultura de trigo, a análise dos resultados permitiu concluir que:

- A saturação hídrica do solo intensificou a senescência das folhas, reduziu o acúmulo de matéria seca, a taxa de crescimento da cultura e prejudicou significativamente a produção de grãos;
- A área foliar, a massa seca total e a massa total de grãos decresceram linearmente com o aumento do estresse por excesso hídrico. Os maiores danos às plantas foram ocasionados pela manutenção do NF sobre a superfície do solo por um período superior a 3 dias e por 6 dias com o NF mantido a 15 cm de profundidade;
- Os efeitos ocasionados pela saturação total do perfil do solo foram mais severos ao desenvolvimento das plantas de trigo do que a saturação parcial dos poros do solo pela água;

- O NF mantido a 15 cm de profundidade ocasionou um maior acúmulo de biomassa na parte aérea das plantas, maior número e massa de grãos por espiga, minimizando em 30% os efeitos da hipoxia no solo na produção de grãos;
- A aplicação de 50 kg N ha⁻¹ reduziu em 16% os danos ocasionados pela saturação hídrica do solo à produção de grãos;

Como conclusões gerais, observou-se uma relação significativa entre os danos ao desenvolvimento e à produção das plantas e o tempo de submersão do sistema radicular das culturas de lentilha, soja e trigo. As práticas de manejo do nível freático, avaliadas, foram promissoras pois, os efeitos prejudiciais causados pelo excesso de água no solo às culturas de lentilha e trigo foram atenuados, por um controle específico do nível freático, especialmente quanto às suas flutuações no perfil do solo. Por outro lado, a adição de nitrogênio reduziu em média 15% os prejuízos ocasionados pela hipoxia no solo à produção das plantas de soja e trigo. Entretanto, foram observadas diferenças nas respostas das culturas e dos cultivares analisados quanto à aplicação de nitrogênio em solo inundado.

Deste modo, recomendam-se avaliações da aplicabilidade e da viabilidade destas práticas em experimentos com diferentes culturas e cultivares, visando também à identificação genótipos mais eficientes na absorção de nitrogênio em condições de hipoxia e mais tolerantes às variações de umidade em solos hidromórficos.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. A. de; LOPES, A. S. Alterações físico-químicas e químicas dos solos inundados. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 152, p. 14-21, 1988.

ALCALDE, J.A.; SUMMERFIELD, R.J. Effect of waterlogging during the vegetative stage on growth and development of lentil (*Lens culinaris*). **Lens Newsletter**, v. 21, n. 1, p. 22-29, 1994. In: **AGRIS Abstracts on CD-ROM** 1995-96.

ALMEIDA, A. **Efeito de diferentes doses de nitrogênio e de potássio na cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.)**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, 2000. 30p.

ALMEIDA, R.E.; CARLESSO, R.; MARCHEZAN, E.; FRIZZO, Z.; MICHELON, C.J. Índice de estresse por excesso hídrico para a cultura do milho em solo de várzea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002. Salvador: **CONBEA 2002: Anais...** Salvador: SBEA, 2000, 1 CD-ROM.

AMBROSANO, E.J.; TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2 ed. Campinas: Instituto Agrônomo, Fundação IAC, 1996. p. 187-203.

ANDRADE, L.M.; DOS REIS, A.E. Efeito da profundidade do lençol freático nas culturas de soja, de milho e de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 6. p. 923-933, jun. 1992.

ARMSTRONG, W. Waterlogged soils, In: ETHERINGTON, J.R. (Ed.). **Environment and Plant Ecology**. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 1982, p. 290-330.

ASHRAF, M.; CHISHTI, S.N. Waterlogging tolerance of some accessions of lentil. **Tropical Agriculture**, Trinidad & Tobago, v. 70, n. 1, p. 60-67, jan. 1993.

ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE SOJA DA REGIÃO SUL (APASUL). Disponível em: <[http:// www.apassul.com.br](http://www.apassul.com.br)>. Acesso em: 02 nov. 2003.

AUBERTIN, G. M.; KARDOS, L. T. Root growth through porous media under controlled conditions II. Effect of aeration levels and rigidity. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 29, n. 1, p. 363-365, jan./ dec. 1965.

AYUB, K.; RAHIM, M.; AMJAD, K. Performance of exotic lentil varieties under rainfed conditions in Mingora Pakistan. **Journal of Biological Sciences**, Munbai, v. 1, n. 5, p. 343-344, 2001. Disponível em: <<http://www.ansinet.org/journals.php>>. Acesso em: 05 ago. 2004.

AZEVEDO, J. A. de **Níveis de tensão de água no solo e suspensão da irrigação em três períodos de crescimento do trigo (*Triticum aestivum* L.) em solo do cerrado**. 1988. 157p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L.C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 50, n. 334, p. 689-696, may 1999a.

_____. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 1, p. 143-149, jan. 1999b.

BARBOSA FILHO, M.P. **Nutrição e adubação do arroz: sequeiro e irrigado**. Piracicaba: Potafos, 1987. 129p. (Boletim Técnico, 9).

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**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 7-18, 1999.

BARNI, N.A.; COSTA, J.A. Efeitos de períodos de inundação do solo sobre o rendimento de grãos de soja. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 207-222, 1975.

_____. Efeitos de excesso de água no solo sobre os percentuais de óleo e proteína do grão e o poder germinativo de sementes de soja. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 147-162, 1976a.

_____. Efeito de períodos de inundação do solo sobre o crescimento e características morfológicas da planta de soja. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 163-173, 1976b.

BARTLETT, R.J.; JAMES, B.R. Redox chemistry of soil. **Advances in Agronomy**, New York, v. 50, p. 151-208, 1993.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Aeracion del suelo. In: _____. **Fisica de suelos**. Mexico: Centro regional de Ayuda Técnica, 1973. p. 243-250.

BELFORD, R. K.; CANNELL, R. Q.; THOMSON, R. J. Effects of single and multiple waterlogging on the growth and yield of winter wheat on Clay soil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 36, n. 1, p. 142-156, jan. 1985.

BELFORD, R. K.; CANNELL, R. Q.; THOMSON, R. J.; DENNIS, C. W. Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of peas (*Pisum sativum* L.) **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 31, n. 4, p. 857-869, apr. 1980.

BENINCASA, M. M. P. Fisiologia de culturas adaptadas as condições de várzeas. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O APROVEITAMENTO DE VÁRZEAS, 1., 1984. Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FCAV, 1984. p.131-139.

BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, New York, v. 116, n. 2, p. 651-658, feb. 1998.

BLACKWELL, P. S. Measurements of aeration in waterlogged soils: some improvements of techniques and their applications to experiments using lysimeters. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 34, n. 2, p. 271-285, june 1983.

BORU, G.; GINKEL, M. VAN; TRETHOWAN, R.M.; BOERSMA, L.; KRONSTAD, E.W. Oxygen use from solution by wheat genotypes differing in tolerance to waterlogging. **Euphytica**, Netherlands, v. 132, n. 2, p. 151-158, 2003.

BRADFORD, K.J.; YANG, S.F. Physiological responses of plants to waterlogging. **HortScience**, St. Joseph, v. 16, n. 1, p. 25-30, feb. 1981.

BRADFORD, K.J.; HSIAO, T. Stomatal behavior and water relations of waterlogged tomato plants. **Plant Physiology**, New York, n. 5, v. 70, p. 1508-1513, nov. 1982.

BRAILSFORD, R.W.; VOESENEK, L.A.C.J.; BLOOM, C.W.P.M.; SMITH, A.R.; HALL, M.A.; JACKSON, M.B. Enhanced ethylene production by primary roots of *Zea mays* L. in response to sub-ambient partial pressures of oxygen. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 16, n.8, p. 1071-1080, aug. 1993.

BUWALDA, F.; GREENWAY, H.; DAVIES, B.A.; BARRETT-LENNARD; E.G. Effect of growing wheat in hypoxic nutrient solutions and of subsequent transfer to aerated solutions. II. Concentration and uptake of nutrients and sodium in shoots and roots. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 15, n. 4, p. 599–612, aug. 1988.

CALHEIROS, R. de O. **Efeito do manejo da água de drenagem na adaptação fisiomorfológica de plantas mesófitas ao encharcamento**. 2000. 127p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2000.

CALHEIROS, R. de O.; CRUCIANI, D.E.; ARRUDA, F.B.; VOLTAN, R.B.Q.; SAKAI, E.; PIRES, R.C. de M. Efeito do manejo do lençol freático na adaptação fisiomorfológica de duas espécies de trigo ao encharcamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 194-202, maio/ ago. 2000.

_____. Efeito de três manejos do lençol freático na adaptação fisiomorfológica de feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 779-789, maio/jun. 2001.

CÂMARA, G.M.S. Inoculação das sementes de soja. In: _____. **Soja: tecnologia da produção**. Piracicaba. ESALQ/USP, 1998, p.278-293.

CÂMARA, G.M.S; BARROS, F.F. Efeito de aplicações tardias de nitrogênio mineral sobre o rendimento sobre o rendimento e teor de proteína nos grãos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 7., 2000, Piracicaba. **SICUSP 2000. Anais...** Piracicaba: USP, 2000. 1 CD-ROM.

CANNELL, R.Q.; BELFORD, R.K.; BLACKWELL, P.S.; GOVI, G.; Thonson, R.J. Effects of waterlogging on soil aeration and on root and shoot growth and yield of winter oats (*Avena sativa* L.). **Plant and Soil**, Netherlands, v. 85, n. 2, p. 361-73, mar. 1985.

CANNELL, R.Q.; GALES, K.; SNAYDON, R.W.; SUHAIL, B.A. Effects of short-term waterlogging on the growth and yield of peas. **Annals of Applied Biology**, Cambridge, v. 93, n. 3, p. 327-335, dec. 1979.

CARLSON, J.B. Morphology. In: CALDWELL, B.E. (Ed.). **Soybeans: Improvement, productions and uses**. Madison: American Society Agronomy, 1973. p. 17-95.

CARTER, C. E.; BENGTON, R. L.; ROGERS, J. S. Drainage needs as indicated by high water tables. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 5, p. 1410-1415, 1988.

CAVERS, C.; HEARD, J. Managing Crops for excess water stress. In: ANNUAL MANITOBA AGRONOMISTS CONFERENCE, 2., 2001. Disponível em: <http://www.umanitoba.ca/faculties/afs/agronomists_conf/2001>. Acesso em: 02 mar. 2004.

COELHO, E.F.; PEREIRA, P.M.; CAIXETA, T.J.; VIANA, M.C.M.; MAIA, A.H.N. Comportamento da cultura do milho sob diferentes profundidades do lençol freático em várzea. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 6, p. 881-891, jun. 1992.

COLLAU, A.; HARRISON, S.A. Losses in wheat due to waterlogging. **Crop Science**, Madison, v. 42, n. 2, p. 444-450, mar./ apr. 2002.

COSTA, J.A. Efeitos de inundação sobre a soja (*Glycine max* L. Merrill). **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 113-119, jan. 1973.

COWIE, A.L.; JESSOP, R.S.; MacLEOD, D.A. A study of waterlogging damage in Australian chickpea cultivars. **International Chickpea and Pigeonpea Newsletter** n. 2, p. 22-23, 1995. In: **CAB Abstracts on CD-ROM** 1996-97.

_____. Effects of waterlogging on chickpeas. I. Influence of timing of waterlogging. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 183, n. 1, p. 97-103, june. 1996.

CRAWFORD, R.M.M. Oxygen availability as an ecological limit to plant distribution. **Advances in Ecological Research**, San Diego, v. 23, n. 1, p. 93-185, jan. 1992

CRAWFORD, R.M.M.; BRAENDLE, R. Oxygen deprivation stress in a changing environment. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, n. 295, p. 145–159, feb. 1996.

CRUCIANI, D. E. Caracterização agrônômica do coeficiente de drenagem para a elaboração de projetos com cultura de milho (*Zea mays*, L.). **ITEM Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 22, n. 22, p. 28-31, set. 1985.

DEL ROSARIO, D.A.; FAJARDO, F.F. Waterlogging resistance in crops. **Philippine Agriculturist**, Philippines, v. 74, n. 1, p. 51-58, jan./mar. 1991. In: **AGRIS Abstracts on CD-ROM**, 1991-92.

DENNIS, E.S.; DOLFERUS, R. ELLIS, M.; RAHMAN, M.; WU, Y.; HOEREN, F.U.; GROVER, A.; ISMOND, K.P.; GOOD, A.G.; PEACOCK, W.J. Molecular strategies for improving waterlogging tolerance in plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 51, n. 342, p. 88-97, jan. 2000.

DE-POLLI, H.; FRANCO, A.A.; DÖBEREINER, J. Sobrevivência de *Rhizobium* em solo de baixada sujeitos a inundação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 8, n. 1, p. 133-138, jan. 1973.

DINIZ, A.J.; FERREIRA, M.M.; VALE, F.R.; RAMALHO, M.A.P. Avaliação de níveis de água no solo visando à seleção de cultivares de feijoeiro para o cultivo em solos de várzea. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 113-119, 1993.

DREW, M. C.; SISWORO, E. J. Early effects of flooding on nitrogen deficiency and leaf chlorosis in barley. **New Phytologist**, Cambridge, v. 79, n. 3, p. 567-71, mar. 1977.

DUARTE, S.N.; CRUCIANI, D.E.; CANTOS, B.L. Efeitos da dinâmica do lençol freático sobre a cultura do feijoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29. 2000. Fortaleza: **CONBEA 2000: Anais...** Fortaleza: SBEA, 2000, 1 CD-ROM.

EGLI, D.B.; LEGGETT, A. Dry matter accumulation patterns in determinate and indeterminate soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 63, n. 2, p. 429-430, mar./apr. 1973.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA TRIGO. **Trigo**. Passo Fundo, 2003. (Circular técnica, 14). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ci/p_ci14_1.htm>. Acesso em: 04 jul. 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA SOJA - **Tecnologias de produção de soja**: Região Central do Brasil – 2005. Londrina, 2004. 239p. (Sistema de produção, 6)

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos. **Maximização da eficiência de produção das culturas**. Brasília: Embrapa - SCT/Embrapa - CNPAF, 1999. 294p.

FAGUNDES, P.R.R.; VERNETTI, F.J.; GASTAL, M.F.C, DAMIAN, E.A. Effects of soil saturation on yield and other characteristics of soybean. In: WORLD SOYBEAN CONFERENCE, 1., 1994, Chiang Mai. **Proceedings...** Chiang Mai: Bangkok: Kaset Sart University, 1997. p. 377-382.

FLECHA, P.A.N. **Sensibilidade das culturas da batata (*Solanum tuberosum* L.) e da alface (*Lactuca sativa* L.) ao excesso de água no solo**. 2004. 68p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E; BURMOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stages of development descriptions for soybeans (*Glycine max* L. Merrill). **Crop Science**, Madison, v. 11, n. 6, p. 929-931, nov./ dec. 1971.

FIRESTONE, M.K. Biological denitrification. In: STEVENSON, F.J. **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society Agronomy, 1982. chap. 4, p. 289-326.

FISCHER, R.A.; KOHN, G.D. The relationship of grains yield to vegetative growth and post-flowering leaf area in the wheat crop under conditions of limited soil moisture. **Australian Journal Agriculture Research**, Melbourne, v. 17, n. 2, p. 281-295, 1966.

FONTOURA, J.U.G. **Matéria seca, absorção e exportação pelos grãos de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn pelo trigo, sob regime de sequeiro e irrigado em latossolo roxo**. 1986. 125p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

FREITAS, J.G.; CARDOSO, A.A.; SEDIYMA, C.S.; FERREIRA, P.A.; MOURA FILHO, W de Trigo: efeito de três faixas de umidade na evapotranspiração real na produção de grãos e seus componentes. **Bragantia**, Campinas, v. 44, n. 2, p. 515-530, 1985.

GANDOLFI, V.H.; BAN, A.D.; VILHORDO, B.W.; MÜLLER, L. Morfologia, anatomia e desenvolvimento. In: VERNETTI, F.J. (Coord.). **Soja: planta, clima, pragas, moléstias e invasoras**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. cap. 2, p. 17-89.

GARGANTINI, H.; BLANCO, H.G. Absorção de nutrientes pelo trigo. **Bragantia**, Campinas, v. 32, n. 16, p. 285-307, out. 1973.

GASTAL, M. F. C. Excesso de água no solo – Efeitos na soja. **Agropecuária Clima Temperado**, Pelotas, v. 3, n. 1, p. 93-110, jan. 2000.

GENUCHTEN, M.Th. van A close – form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3 p. 892-888, may/ june 1980.

GENUCHTEN, M. Th. van; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, Version 1.0. U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 1991. Disponível em: <<http://www.ussl.ars.usda.gov/models.htm>>. Acesso em: 20 mar. 2002.

GILL, K.S.; QADAR, A.; SINGH, K.N. Response of wheat genotypes to sodicity in association with waterlogging at different stages of growth. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 62, n. 2, p. 124-128, 1992. In: **CAB Abstracts on CD-ROM 1993-94**.

GIORDANO, B. L.; PEREIRA, W.; LOPES, J.F. **Cultivo da lentilha**. Brasília: EMBRAPA, CNPH, 1988. 6p. (Instruções Técnicas, 9).

GLINSKI, J.; STEPNIEWSKI, W. **Soil aeration and its role for plants**. Flórida: CRC Press, 1986. 228p.

GRABLE, A. R. Soil aeration and plant growth. **Advances in Agronomy**, New York, v. 18, p. 57-106, 1966.

GRIFFIN, J.L.; SAXTON, A.M. Response of solid-seeded soybean to flood irrigation. II. Flood irrigation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, n. 5, p. 885-888, nov./dec. 1988.

HARRIS, D. G.; BAVEL, C. H. M. van Growth, yield, and water absorption of tobacco plants as affected by composition of the root atmosphere. **Agronomy Journal**, Madison, v. 49, n. 1, p. 11-14, jan. 1957.

HEATHERLY, L.G.; PRINGLE, H.C. Soybean cultivars response to flood irrigation of clay soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 1, p. 231-236, jan./ feb. 1991.

HEIFFIG, L.S. **Plasticidade da cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) em diferentes arranjos espaciais**. 2002. 85p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2002.

HILLER, E.A.; CLARK, R.N.; GLASS, L.J. Effect of water table height on soil aeration and crop response. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.14, n. 5, p. 879-882, sept./ oct. 1971.

HODGSON, A.S. The effects of duration, timing and chemical amelioration of short-term waterlogging during furrow irrigation of cotton in a Cracking Grey Clay. **Australian Journal of Agricultural Research** Melbourne, v. 33, n. 2, p. 1019-1028, 1982

HODGSON, A.S.; CHAN, K.Y. The effect of short-term waterlogging during furrow irrigation of cotton in a Cracking Grey Clay. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 33, n. 1, p. 109-116, 1982

HODGSON, A.S.; MACLEOD, D.A. Effects of foliar applied nitrogen fertilizer on cotton waterlogged in a Cracking Grey Clay. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 38, n. 2, p. 681-688, 1987

HONG, T.D.; MINCHIN, F.R.; SUMMERFIELD, R.J. Recovery of nodulated cowpea plants (*Vigna unguiculata* L.) from waterlogging during vegetative growth. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 48, n. 3, p. 661-672, dec. 1977.

HOORN, J.W. van; KATERJI, N.; HAMDY, A.; MASTRI\ORILLI, M. Effect of salinity on yield and nitrogen uptake of four grain legumes and on biological nitrogen contribution from the soil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 51, n. 2, p. 87–98, oct. 2001.

HUANG, B.; JOHNSON, J.W. Root respiration and carbohydrate status of two wheat genotypes in response to hypoxia. **Annals of Botany**, London, v. 75, n. 4, p. 427-432, apr. 1995.

HUANG, B.; JOHNSON, J.W.; NeSMITH, S.; BRIDGES, D.C. Growth, physiological and anatomical responses of two wheat genotypes to waterlogging and nutrient supply. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 45, n. 271, p. 193-202, feb. 1994.

_____. Nutrient accumulation and distribution of wheat genotypes in response to waterlogging and nutrient supply. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 173, n. 1, p. 47-54, jun. 1995.

HUCK, M.G. Variation in taproot elongation rate as influenced by composition of the soil air. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, n. 6, p. 815-818, nov./ dec. 1970.

HUNTER, M.N.; DE JABRUN, P.L.M, BYTH, D.E. Response of nine soybeans lines to soil moisture conditions close to saturation. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, Melbourne, v. 5, n. 3, p. 339-345, june 1980.

IMSANDE, J.; TOURAINE, B. Demand and the regulation of nitrate uptake. **Plant Physiology**, New York, v. 105, n. 1, p. 3-7, jan. 1994

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Trigo** – recomendações. Campinas: Instituto Agronômico, 2002, 92p. (IAC, Boletim Técnico, 167).

JACKSON, M.B. Aeration stress in plant tissue cultures. **Bulgarian Journal Plant Physiology**, special issue, 2003, p. 96-109, 2003. Disponível em: <<http://www.bio21.bas.bg/ipp/gapbfiles/essa-03>>. Acesso em: 23 ago. 2004

JACKSON, M. B. DREW, M. C. Effects of flooding on growth and metabolism of herbaceous plants. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed). **Flooding and plant growth**. Orlando: Academic Press, 1984. chap. 3. p. 47-113.

JAMES, E.; CRAWFORD, R. Effect of oxygen availability on nitrogen fixation by two *Lotus* species under flooded conditions. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, n. p. 599-909, 1998.

JAYASUNDARA, H.P.S.; THOMSON, B.D.; TANG, C. Responses of cool season grain legumes to soil abiotic stresses. **Advances in Agronomy**, New York, v. 63, p. 77-151, 1994.

JENDIROBA, E.; CÂMARA, G.M.S. Rendimento agrícola da cultura da soja sob diferentes fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 8, p. 1201-1209, ago.1994.

JOHNSON, J.B.; JIMMERSON, J. Lentils. **Briefing**, Montana, n. 61, p. 1-4, dec. 2003. Disponível em: <<http://www.ampc.montana.edu>>. Acesso em: 25 mar. 2005.

JUSTIN, S.H.F.W.; ARMSTRONG, W. The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. **New Phytologist**, Cambridge, v. 106, n. 3, p. 465-495, july 1987.

KARLEN, D.L.; WHITNEY, D.A. Dry matter accumulation, mineral concentrations, and nutrient distribution in winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 1, p. 281-288, jan./ feb. 1980.

KAWASE, M. Anatomical and morphological adaptation of plants to waterlogging. **HortScience**, St. Joseph, v. 16, n. 1, p. 30-34, feb. 1981.

KELLING, K.A.; FIXEN, P.E. Soil and nutrition requirements for oat production. In. MARSHALL, H.G.; SORRELIS, M.E. (Ed.). **Oat science and technology**. Madison: ASA/CSSA, 1992. chap. 6, p. 165-190.

KOLCHINSKI, E.M.; SCHUCH, L.O.B. Atributos de desempenho industrial e qualidade de sementes em aveia branca em função da disponibilização da adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 587-598, maio/ jun. 2003.

KRAMER, J.P. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. **Plant Physiology**, New York, v. 26, n. 4, p. 722-736, oct. 1951. Disponível em: <<http://www.pubmedcentral.gov>>. Acesso em: 20 jan. 2004

KRAMER, J.P. Development of root system. In: _____ **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 1983. chap. 6, p. 146-186.

KRAMER, J.P.; JACKSON, W.T. Causes of injury to flooded tobacco plants. **Plant Physiology**, New York, v. 29, n. 2, p. 241-245, feb. 1954. Disponível em: <<http://www.pubmedcentral.gov>>. Acesso em: 20 jan. 2004

KOZLOWSKI, T.T. Extent, cause and impacts of flooding. In: _____ **Flooding and plant growth**. Orlando: Academic Press, 1984. chap. 1, p. 1-5.

KOZLOWSKI, T.T.; PALLARDY, S.G. Effect of flooding on water, carbohydrate, and mineral relations. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Flooding and plant growth**. Orlando: Academic Press, 1984. chap. 5, p. 165-188.

KURDALI, F.; KALIFA, K.; AL-SHAMMA, M. Cultivar differences in nitrogen assimilation, partitioning and mobilization in rain-fed grown lentil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 54, n. 2-3, p. 235-243, sept. 1997.

LARCHER, W. A planta sob estresse. In: _____ **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000, p.341-437.

LARGE, E.C. Growth stages in cereals. Illustration of the Feekes scale. **Plant Pathology**, London, v. 3, n. 1, p. 128-129, jan. 1954.

LETEY, J.; STOLZY, H.; BLANK, G. B. Effect of duration and timing of low soil oxygen content on shoot and root growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 34-37, jan./ feb. 1962.

LEVITT, J. **Responses of plants to enviromental stresses**: water, radiation, salt, and other stresses. New York: Academic Press, 1980, 607p.

LINKEMER, G.; BOARD, J.E.; MUSGRAVE, M.E. Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. **Crop Science**, Madison, v. 36, n. 6, p. 1576-1584, nov./ dec. 1998.

LU, J. The injury to winter wheat growth by soil waterlogging and its mechanism. **Acta Phytophysiologica Sinica**, v. 20, n. 3, p. 221-226, 1994. In: **CAB Abstracts on CD-ROM**, 1993-94.

LUXMOORE, R.J.; STOLZY, L.H. Oxygen consumption rates predicted from respiration, permeability and porosity measurements on excised wheat root segments. **Crop Science**, Madison, v. 12, n. 3, p. 442-445, may/ june 1972.

LUXMOORE, R.J.; FISCHER, R.A.; STOLZY, L.H. Flooding and soil temperature effects on wheat during grain filling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 361-364, may./ june 1973.

MAEHLER, A.R.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; RAMBO, L. Qualidade de grãos de duas cultivares de soja em função da disponibilidade de água no solo e arranjo de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 213-218, mar./abr. 2003.

MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M.G. (Ed.) **Fisiologia Vegetal**. São Paulo: EPU/EDUSP, 1985, v.1, p. 331-350.

MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solo e folhas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 127p.

MALIK, A. I.; COLMER, T.D.; LAMBERS, H.; SCHORTEMEYER, M. Changes in physiological and morphological traits of roots and shoots of wheat in response to different depths of waterlogging. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 28, n. 11, p. 1121-1131, 2001.

MARCOS FILHO, J.; CÍCERO, S.M.; SILVA, W.R. **Avaliação da qualidade das sementes**. Piracicaba: FEALQ, 1987. 230p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego, S. ed. 1995. 889p.

MASCARENHAS, H.A.A.; NEPTUNE, A.M.L.; MURAOKA, T.; BULISANI, E.A.; HIROCE, R. Absorção de nutrientes por cultivares de soja (*Glycine max* L. Merrill). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 2, p. 92-96, maio/ ago. 1980

MATAR, A.E. Yields and response of cereal crops to phosphorus fertilization under changing rainfall conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 879-881, set./oct. 1977.

MATSUNAGA, R.; ITO, O.; TOBITA, S.; RAO, T.P.; JOHANSEN, C. Response of short-duration pigeonpea to nitrogen application after short-term waterlogging on a Vertisol. **Fiel Crops Research**, Netherlands, v. 38, n. 3, p. 167-174, sept.1994.

McDONALD, G.K.; GARDNER, W.K. Effect of waterlogging on the grain yield response of wheat to sowing date in south-western Victoria. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 27, n. 5, p. 661-670, 1987.

McLEOD, I.; BLAIR, G.; LEFROY, R.; MacLEOD, D. **The effect of waterlogging during boll fill on the development of premature senescence of cotton**. Disponível em: <<http://natres.psu.ac.th/Link/SoilCongress/bdd/symp14/456-t.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2005.

MÉLLO JÚNIOR, A.V. **Funções de resposta do trigo (*Triticum aestivum* L.) à níveis de irrigação e de nitrogênio**. 1992, 159 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1992.

MELLO, F.A.F.; BRASIL SOBRINHO, M.O.C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R.I.; NETTO, A.C.; KIEHL, J. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Distribuidora, 1984. 400p.

MEURER, E.J.; WANG, G.M.; WANG, S.R. Função dos nutrientes e sintomas de deficiências. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, 1981, cap. 4, p. 156-167.

MEYER, W.S.; BARRS, H.D.; SMITH, R.C.G; WHITE, N.S.; HERITAGE, A.D.; SHORT, D.L. Effect of irrigation on soil oxygen status and root and shoot growth of wheat in clay soil. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.36, n.7, p.171-185, 1985.

MINCHIN, F.R.; PATE, J.S. Effects of water, aeration, and salt regime on nitrogen fixation a nodulated legume. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 26, n. 90, p. 60-99, feb. 1975.

MINCHIN, F.R.; SUMMERFIELD, R.J. Symbiotic nitrogen fixation and vegetative growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) in waterlogged conditions. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 45, n. 1, p. 113-127, jan. 1976.

MONK, L.S.; FAGERSTEDT, K.V.; CRAWFORD, R.M.M. Superoxide dismutase as an anaerobic polypeptide. A key factor in recovery from oxygen deprivation in *Iris pseudacorus*? **Plant Physiology**, New York, v. 85, n. 4, p. 1016-1020, dec. 1987.

MORAES, J.F.V. Efeitos da inundação do solo. I. Influência sobre o pH, o potencial de oxirredução e a disponibilidade do fósforo no solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 8, n. 1, p. 93-101, jan. 1973.

MOTTA, F. M., LOUREIRO, M. E. **Nutrição mineral de plantas**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/ib/ecologia/caeco/Nutricaominlufv.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2004.

MUEHLBAUER, F.J.; KAISER, W.J.; CLEMENT, S.L.; SUMMERFIELD, R.J. Production and breeding of lentil. **Advances in Agronomy**, New York, v. 54, p. 283-332, 1993.

MUEHLBAUER, F.J.; TULLU, A. **Lens Culinaris Medik**. Disponível em: <<http://www.hort.purdue.edu/newcrop/cropfactsheets/lentil.html>>. Acesso em: 20 jan. 2003.

MUSGRAVE, M.E. Waterlogging effects on yield and photosynthesis in eight winter wheat cultivars. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 5, p. 1314-1318, setp./ oct. 1994.

MUSGRAVE, M.E.; VANHOY, M.A. A growth analysis of waterlogging damage in mung bean. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 67, n. 8, p. 2391-2395, aug. 1989.

MUKHTAR, S.; BAKER, J. L.; KANWAR, R. S. Effect of short-term flooding and drainage on soil oxygenation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 3, p. 915-920, may./ june 1996.

MUSICK, J.T, DUSEK, D.A. Planting date and water deficit effects on development and yield of irrigated winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 1, p. 45-52, jan./ feb. 1980.

NATHANSON, K; LAWN, R. J.; DE JABRUN, P. L. M.; BYTH, D. E. Growth, nodulation and nitrogen accumulation by soybean in saturated soil culture. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 73-92, 1984.

NOBEL, P.S. **Introduction to biophysical plant ecology**. San Francisco: Freeman, 1974. 480p.

NOVO, M.C.S.S.; TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A.; BORTOLETTO, N.; GALLO, P.B. Nitrogênio e potássio na fixação simbiótica de N₂ por soja cultivada no inverno. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 1, p. 143-155, jan./ fev. 1999.

OLIVEIRA, J.E.D. Valor da soja como alimento. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, 1981, cap. 14, p. 820-823.

OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. Diffusive supply of phosphorus in relation to soil textural variations. **Soil Science**, Baltimore, v. 110, n. 1, p. 318-327, july/ dec. 1970.

OOSTERHUIS, D.M.; SCOTT, H.D.; HAMPTON, R.E.; WULLSCHLEGER, S.D. Physiological responses of two soybean cultivars to short- term flooding. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 85-92, jan. 1990.

PAGE, M.B.; SMALLEY, J.L.; TALIBUDEEN, O. The growth and nutrient uptake of winter wheat. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 49, n. 1, p. 149-160, feb. 1977.

PANG, J.; ZHOU, M.; MENDHAM, N.; SHABALA, B.S. Growth and physiological responses of six barley genotypes to waterlogging and subsequent recovery. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 55, n. 8, p. 895-906, 2004. Disponível em: <<http://www.publish.csiro.au/journals/ajar>>. Acesso em: 27 ago. 2004.

PARAMESWARAN, K.V.M.; GRAHAM, R.D.; ASPINALL, D. Studies on the nitrogen and water relations of wheat. I. Growth and water use in relation to time and method of nitrogen application. **Irrigation Science**, New York, v. 3, n. 1, p. 29-44, dec. 1981.

PATRICK, W.M.H.; MAHAPATRA, I.C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 20, p. 323-359, 1968.

PATWARDHAN, A. S.; NIEBER, J. L.; MOORE, I. D. Oxygen, carbon dioxide, and water transfer in soils: Mechanisms and crop response. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 5, p. 1383-1395, sept./ oct. 1988.

PELUZIO, J.M.; BARROS, H.B.; ROCHA, R.N.C.; SILVA, R.R.; NASCIMENTO, I.R. Influência do desfolhamento artificial no rendimento de grãos e componentes de produção de soja. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 26, n. 6, p. 1197-1203, nov./ dez. 2002.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campinas: IAC, 1987. 33p. (Boletim Técnico, 114)

PEREIRA, J.R.B. **Manejo do nível freático visando a adaptação fisiomorfológica do feijoeiro a hipoxia**. 2003. 62p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

PEZESHKI, S.R. Plant response to flooding. In: WILKISON, R.E. (Ed.) **Plant-Environment Interactions**. New York: M. Dekker, 1994. cap. 10, p. 289-321.

PIRES, J.L.F.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 37, n. 1, p. 41-50, jan. 2002

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 24, p. 274-309, 1972.

_____. Effects of flooding on soils. In: KOZLOWSKI, T.T. **Flooding and Plant Growth**. Orlando: Academic Press, 1984, chap. 2, p. 1–44.

POOKPAKDI, A.; THUAMKHAM, C.; BENJASIL, V.; SUWANNARAT, C. Effects of genotype and nitrogen fertilizer on growth and yield of soybeans when sown under saturated soil culture. **Kasetsart Journal Natural Sciences**, Bangkok, v. 31, n. 3, p. 271-280, 1997. In: **CAB Abstracts on CD-ROM**, 1998.

PORTELA, F. Algumas cultivares brasileiras quanto o aspecto nutricional. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, 1981, cap. 14. p. 827-832.

PRATISSOLI, D.; SCHIMILDT, E.R.; DOS REIS, E.F.; THULER, R.T. Influência de desfolhas simuladas na produtividade e em outras características agronômicas do feijoeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 48, n. 275, p. 17-24, 2001

PUNG, R.; WITTY, J.F.; MYTTON, L.R.; MINCHIN, F.R. The effect of waterlogging on nitrogen fixation and nodule morphology in soil-grown white clover (*Trifolium repens* L.). **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 46, n. 284, p. 285-290, mar. 1995.

PURVIS, A.C.; WILLIAMSON, R.E. Effects of flooding and gaseous composition of the root environment on the growth of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, n. 6, p. 674-678, nov./ dec. 1972.

QUEIROZ, E.F.; NEUMAIER, N.; TORRES, E.; PEREIRA, L.A.G. Recomendações técnicas para a colheita mecânica. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. **A soja no Brasil**. Campinas: ITAL, 1981, cap. 10, p. 701-710.

QUEIROZ, J.E.; CRUCIANI, D.E.; LIBARDI, P.L. Estimativa da porosidade drenável de um solo de várzea a partir da tensão da água no solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 469-475, set./ dez. 1995.

RADFORD, P.J. Growth analysis formulae – their use and abuse. **Crop Science**, Madison, v. 7, n. 3, p. 171-175, may./jun. 1967.

RAWSON, H.M.; MacPHERSON, H. G. **Trigo regado: Manejo del cultivo**. Roma: FAO, 2001, 106p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1996. 505p.

REID, D.M.; BRADFORD, K.J. Effects of flooding on hormone relations. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Flooding and plant growth**. Orlando: Academic Press, 1984. chap. 6, p. 195-212.

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 36, 2004, Passo Fundo. **Indicações técnicas da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo**, Passo Fundo: EMBRAPA, 2004. 150p.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 28, 2000. **Santa Maria. Recomendações técnicas para o cultivo de soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**, Santa Maria:UFSM - Depto. Defesa Sanitária, 2000. 150p. Disponível em:<<http://www.ufsm.br/dfs/reunisoja/>> Acesso em: 20 ago. 2003

RICHARDS, L.A.A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. **Soil Science**, Baltimore, v. 51, p. 377-386, jan./ june 1941.

RIGHES, A. A. Irrigação e drenagem em várzeas. In: SIMPÓSIO SOBRE ALTERNATIVAS AO SISTEMA TRADICIONAL DE UTILIZAÇÃO DAS VÁRZEAS DO RIO GRANDE DO SUL, 1., Porto Alegre, 1984. **Anais...** Brasília: PROVÁRZEAS;PROFIR, 1986. p. 129-151.

RITTER, W.F.; BEER, C.E. Yield reductions by controlled flooding of corn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 12, n. 1, p. 46-50, jan./feb. 1969

RODRIGUES, T. J. D.; RODRIGUES, L. R. A.; REIS,. R. A. Adaptação de plantas forrageiras às condições adversas. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMA DE PASTAGENS, 2., 1993. Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FUNEP, 1993. p. 17-61.

ROSA, J.A. Níveis de drenagem para a cultura do feijoeiro em várzeas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 8, p. 947-954, ago. 1993.

ROUGHLEY, R.J.; GAULT, R.R.; GEMELL, L.G.; ANDREWS, J.A; DUNN, B.W. Autoecology of *Bradyrizobium japonicum* in soybean-rice rotations. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 176, n. 1, p. 7-14, sept. 1995.

RUSSELL, M.B. Water and its relation to soils and crops. **Advances in Agronomy**, New York, v.11, p.1-131, 1959.

SÁ, J.S.; CRUCIANI, D.E.; MINAMI, K. Efeitos de inundações temporárias do solo em plantas de ervilha. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 50-54, jan./ mar. 2004.

SÁ, J.S.; CRUCIANI, D.E.; NASCIMENTO, S.D.; PEREIRA, J.R.B Sensibilidade de plantas de soja ao rebaixamento do nível freático. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 2, p. 135-145, maio/ jul. 2005.

SALLAM, A.; SCOTT, H. D. Effects of prolonged flooding on soybeans during early vegetative growth. **Soil Science**, Baltimore, v. 144, n. 1, p. 61-66, july/ dec. 1987.

SANCHEZ, P. A. **Properties and management of soils in the tropics**. New York: John Willey, 1976. 618p.

SARWAR, T. Physiological response of soybean to shallow water table depths. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 5, n. 12, p. 1300-1308, 2002. Disponível em: <[http:// www.ansinet.org](http://www.ansinet.org)>. Acesso em: 23 mar. 2004

SCHILD, L.N.; PARFITT, J.M.B.; PORTO, M.P.; SIEWERDT, F. Efeito do encharcamento do solo sobre a cultura do milho em planossolo Pelotas – safra 92/93. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 39, 1994, Cruz Alta. **Anais...** Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 1994. p. 56-60

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**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 7-12, jan./ fev. 2001.

SCHOLLES, D.; VARGAS, L.K. Viabilidade da inoculação de soja com estirpes de *Bradyrhizobium* em solo inundado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 973-979, dec. 2004.

SCOTT, H.D.; DeANGULO, J.; DANIELS, M.B.; WOOD, L.S Flood duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 631-636, july/ aug. 1989.

SEDIYAMA, T.; PEREIRA, M.G.; SEDIYAMA, C.S.; GOMES, J.L.L. **Caracterização de cultivares de soja**. Viçosa: UFV – Centro de Ciências Agrárias, 1981. 81p.

_____. **Cultura da soja**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1985. 96p.

SENA GOMES, A.R.; KOZLOWSKI, T.T. Growth responses and adaptations of *Fraxinus pensylvanica* seedlings to flooding. **Plant Physiology**, New York, v. 66, n. 2, p. 267–270, feb. 1980.

SFREDO, G.J.; CARRÃO-PANIZZII, M.C.C. **Importância da adubação e da nutrição na qualidade da soja**. Londrina: EMBRAPA – CNPSo, 1990, 51p. (Documentos, 40).

SHARMA, D.P.; SWARUP, A. Effects of short-term flooding on growth yield and mineral composition of wheat on sodic soil under field conditions. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 107, n. 1, p. 137-143, jan. 1988.

SILVA, A. R. Tolerância das plantas ao encharcamento. In: SIMPÓSIO SOBRE ALTERNATIVAS AO SISTEMA TRADICIONAL DE UTILIZAÇÃO DAS VÁRZEAS DO RIO GRANDE DO SUL, 1., 1984. Porto Alegre. **Anais...** Brasília: PROVÁRZEAS; PROFIR, 1986. p. 166-181.

SILVA, D.B.; GOTO, W.S. Resposta do trigo de sequeiro ao nitrogênio, após soja precoce, na região do Alto Paranaíba, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 9, p. 1401-1405, set. 1990.

SILVA, E.L. **Suscetibilidade do feijoeiro cv. Goiano precoce, a inundações temporárias do sistema radicular em diferentes fases do seu ciclo vegetativo**. 1982. 77p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

SILVEIRA, P.M.; BARION, F.; FERREIRA, P.A.; MONNERAT, P.H.; ALVAREZ, V.H. Produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L) em diferentes manejos da profundidade do lençol freático. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 35, n. 199, p. 307-321, 1988.

SINGH, B.P.; TUCKER, K.A.; SUTTON, J.D.; BHARWAJ, H.L. Flooding reduces gas exchange and growth in the snap bean. **HortScience**, St. Joseph, v. 26, n. 4, p. 372-373, apr. 1991

SINGH, R.; GHILDYAL, B.P. Soil submergence effects on nutrient uptake, growth, and yield of five corn cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 5, p. 737-741, set./oct. 1980.

SIONIT; N.; KRAMER, P.J. Effects of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, n. 2, p. 274-278, mar./apr. 1977.

SMIT, B.A.; NEUMANN, D.S.; STACHOWIAK, M.L. Root hypoxia reduces leaf growth. Role of factors in the transpiration stream. **Plant Physiology**, New York, v. 92, n. 4, p. 1021-1028, apr. 1990.

SMITH, K.A. The effects of waterlogging on root growth and on symbiotic nitrogen fixation by legumes. In: WORKSHOP ADAPTATION OF CHICKPEA AND PIGEONPEA TO ABIOTIC STRESSES.1., 1984, Patancheru. **Proceedings...** Patancheru: ICRISAT, 1987, p.77-89. In: **AGRIS Abstract on CD-ROM**, 1989-90.

SMITH, C.J.; FRENEY, J.R.; CHAPMAN, S.L. GALBALLY, I.E. Fate urea nitrogen applied to irrigated wheat at heading. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 40, n. 5, p. 951-963, 1989.

SOJKA, R.E.; STOLZY, L.H.L KAUFMANN, M.R. Wheat growth related to rhizosphere temperature and oxygen levels. **Agronomy Journal**, Madison, v. 67, n. 5, p. 591-596, sept./ oct. 1975

SORTE, N.V.; SORTE, P.N.; DEOTALE, R.D.; GORAMNAGAR, H.B. Effect of waterlogging on performance of soybean cultivars at various growth stages. **Journal of Soils and Crops**, v.7, n.2, p.171-174, 1997. In: **CAB Abstracts on CD-ROM**, 1996-98.

SOUZA, F.G.A.; TUBELIS, A. Determinação do período crítico de irrigação na cultura do trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 8, p. 1193-1198, ago, 1982.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. p.265-286.

STEPNIEWSKI, W.; PRZYWARA, G. The influence of soil oxygen availability on soybean yield and nutrient uptake. II. The content and uptake of N, P, K, Ca, Mg and Na. **Polish Journal of Soil Science**, v. 23, n. 1, p. 11-16, 1990. In: **CAB Abstracts on CD-ROM**, 1990-92.

STIEGER, P.A.; FELLER, U. Nutrient accumulation and translocation in maturing wheat plants grown on waterlogged soil. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 160, n. 1, p. 87-95, mar. 1994.

SUGIMOTO, H.; KOESMARYONO, Y.; NAKANO, R. Effects of excess moisture in the soil at different stages of development on the growth and seed yield of soybean. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 3, n. 9, p. 1965-1967, 2000. Disponível em: <<http://www.ansinet.org>>. Acesso em: 23 mar. 2004.

SULLIVAN, M.; VANTOAI, T.; FAUSE, N.; BEUERLEIN, J.; PARKINSON, R.; SOBOYEJO, A. Evaluating on-farm flooding impacts on soybean. **Crop Science**, Madison, v. 41, n. 1, p. 93-100, jan./ feb. 2001.

SUNG, F.J.M. Waterlogging effect on nodule nitrogenase and leaf nitrate reductase activities in soybean. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 35, n. 3, p. 183-189, aug. 1993.

SWARUP, A.; SHARMA, D.P. Influence of to dressed nitrogen in alleviating adverse effects of flooding of grwth and yield of wheat in a sodic soil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 35, n. 2, p. 93-100, july 1993.

TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A. **Soja: nutrição, correção do solo e adubação**. Campinas: Fundação Cargill, 1992. 60p.

THOMAS, A.L.; PIRES, J.L.; MENEZES, V.G. Rendimento de grãos de cultivares de soja em solo de várzea. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 107-112, 2000.

THOMSON, C.J.; COLMER, T.D.; WATKIN, L.J. GREENWAT, H. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* cvs. Gamenya and Kite) and triticale (*Triticosecale* cv. Muir) to waterlogging. **New Phytologist**, Cambridge, v. 120, n. 3, p. 335-344, mar. 1992

TROUGHT, M. C. T.; DREW, M. C. The development of waterlogging damage in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). I. shoot and root growth in relation to changes in the concentrations of dissolved gases and solutes in the soil solution. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 54, n. 1, p. 77-94, jan. 1980a.

_____. The development of waterlogging damage in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). II. Accumulation and redistribution of nutrients by the shoot. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 56, n. 2, p. 77-94, fev. 1980b.

_____. The development of waterlogging damage in young wheat plants in anaerobic solution cultures. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 31, n. 125, p. 1573-1585, dec. 1980c.

TURNER, F.T.; SIJ, J.W.; McCAULEY, G.N.; CHEN, C.C. Soybean seedling response to anaerobiosis. **Crop Science**, Madison, v. 23, n. 1, p. 40-44, jan./ feb. 1983.

UMAHARAN, P.; ARIYANAYAGAM, R.P.; HAQUE, S.Q. Effect of short-term waterlogging applied at various growth phases on growth, development and yield in *Vigna unguiculata*. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 128, n. 2, p. 189-198, mar. 1997.

URBEN FILHO, G.; SOUZA, P.I.M. Manejo da cultura da soja sob cerrado: época, densidade e profundidade de semeadura. In: ARANTES, N.E.; SOUZA, P.I.M. (Ed.). **Cultura da soja no cerrado**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 267-298.

VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. Fixação biológica do nitrogênio em soja. In: _____ (Ed.). **Biologia dos solos de cerrados**. Planaltina. EMBRAPA-CPAC, 1997. p. 295-360.

VARGAS, M.A.T.; SUHET, A.R. Adubação nitrogenada, inoculação e épocas de calagem para a soja em um solo sob Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 8, p. 1127-1132, ago. 1982.

VANTOAI, T.T.; NURJANI, N. Screening for flooding of soybean. **Soybean Genetics Newsletter**, v. 23, p. 210-213, 1996. In: **CAB Abstracts CD-ROM**, 1996- 98.

VANTOAI, T.T.; BEUERLEIN, J.E.; SCHMITTHENNER, A.F.; MARDESIGN A.T. Genetic variability for flooding tolerance in soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 4, p. 1112-1115, july/ aug. 1994.

VIEIRA, R.F.; RESENDE, M.A.V.; VIEIRA, C.; FERREIRA, T. Épocas de plantio da lentilha precoce em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 7, p. 1233-1240, jul. 1999.

VLEK, P.L.G.; BYRNES, B.H.; CRASWELL, E.T. Effect of urea placement on leaching loss of nitrogen from flooded rice soils. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 54, n. 3, p. 441-449, nov. 1980.

VOESENEK, L. A. C. J.; SMAN, A. J. M.; VAN-DER HARREN, F. J. M.; BLOM, C. W. P. M. An amalgamation between hormone physiology and plant ecology: a review on flooding resistance and ethylene. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 11, n. 3, p. 171-188, june 1992.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of ASAE**. St Joseph, v. 4, n. 1, p. 242-246, jan./ feb. 1961.

WADMAN S. van; ANDEL, O.M. van Interdependence of growth, water relations and abscisic acid level in *Phaseolus vulgaris* during waterlogging. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 63, n. 2, p. 215-220, feb. 1985.

WATSON, D.J.; THORNE, G.N.; FRENCH, S.A. Analysis of growth and yield of winter and spring systems. **Annals of Botany**, London, v. 27, n. 1 p. 1-22, jan. 1963.

WALDREN, R.P.; FLOWERDAY, A.D. Growth stages and distribution of dry matter, N, P and K in winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 3, p. 391-397, may/ jun. 1979.

WARD, R.C.; WHITNE, D.A.; WESTFALL, D.G. Plant Analysis as an Aid in Fertilizing Small Grains. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1973. p. 329-344.

WATSON, E.R.; LAPINS, P.; BARRON, R.J.W. Effect of waterlogging on the growth, grain and straw yield of wheat, barley e oats. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, Melbourne, v. 16, n. 78, p. 114-122, feb. 1976.

WESSELING, J. Crop growth in wet soils. In: SCHILFGAARDE, J. van (Ed.). **Drainage for agriculture**. Madison: American Society Agronomy, 1974. chap. 1, p. 9-37.

WHITEHEAD, S.J.; SUMMERFIELD, F.J.; MUEHLBAUER, F.J.; COYNE, C.J.; ELLIS, R.H.; WHEELER, T.R. Crop improvement and the accumulation and partitioning of biomass and nitrogen in lentil. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 1, p. 110-120, jan./ feb. 2000.

WILLHITE, F.M.; GRABLE, A.R.; ROUSE, H.R. Interaction of nitrogen and soil moisture and the production and persistence of timothy in lysimeters. **Agronomy Journal**, Madison, v. 57, n. 5, p. 479-498, set./ oct. 1965.

WILLIAMSON, R.E. Effect of water table depth and method of watering on yield of stringbeans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 60, n. 2, p. 242-244, mar./apr. 1968.

YADAV, R.S.; SHRI, K.; ANIL, K. KRISHNA, S.; KUMAR, A. Effect of waterlogging on nitrogen content and seed yield of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.). **Legume Research**, v. 23, n. 1, p. 29-32, 2000. In: **CAB Abstracts on CD-ROM**, 2000-02.

YENTUR, S.; LEOPOLD, A. C.; Respiration transition during seed germination. **Plant Physiology**, New York, v. 57, n. 2, p. 274-276, feb. 1976.