**MANEJO DO NÍVEL FREÁTICO VISANDO A ADAPTAÇÃO
FISIOMORFOLÓGICA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* sp) À
HIPOXIA**

JOSÉ ROBERTO BRITO PEREIRA

Engenheiro Agrônomo

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

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade
de São Paulo, para a obtenção do título de
Doutor em Agronomia, Área de
concentração: Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA

Estado de São Paulo – Brasil

Agosto - 2003

MANEJO DO NÍVEL FREÁTICO VISANDO A ADAPTAÇÃO FISIOMORFOLÓGICA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* sp.) À HIPOXIA.

JOSÉ ROBERTO BRITO PEREIRA

p.	ítem	linha	onde se lê	leia-se
06	2.2	sétima	1996	1996
07	2.3	vigésima sétima	toxificação	intoxicação
11	3.1	primeira	Este	Esse
15	3.2	terceira	no Tabela 3...	na Tabela 3...
15	3.2	nona	extrema	extrema
18	3.3.3	oitava	fins	fim
31	4.3	Tabela 6	ns	a

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

Pereira, José Roberto Brito

Manejo do nível freático visando a adaptação fisiomorfológica do feijoeiro
(*Phaseolus vulgaris* sp) à hipoxia / José Roberto Brito Pereira. - - Piracicaba, 2003.
62 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003.
Bibliografia.

1. Deficiência de oxigênio 2. Drenagem agrícola 3. Efeito do encharcamento
4. Feijão 5. Fisiologia vegetal 6. Lençol freático (manejo) 7. Morfologia vegetal
8. Substrato de cultura I. Título

CDD 635.652

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

Aos meus pais, JOSÉ HOMEM PEREIRA FILHO E LUZIA DE BRITO PEREIRA, aos irmãos, sobrinhos e à todas as pessoas, que de forma especial, fizeram sentir-me amado, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Às instituições:

À ESALQ/USP, pela oportunidade;

À UNIMONTES, pelo incentivo;

À FAPEMIG, pela bolsa de estudos;

Ao Departamento de Exatas da ESALQ, pela área experimental;

Ao IAC, pelo empréstimo dos aparelhos,

Ao Departamento de Biologia/ESALQ e ao CENA, pelas análises.

Ao Professor Décio Cruciani pela orientação.

Ao pesquisador do IAC, Rinaldo Calheiros, pelos debates técnicos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ.

À todos os funcionários, em especial: o Sr. Antônio, Sandra, Gilmar e Marli (ESALQ) e Chiquinho (CENA).

Ao aluno de graduação Mateus pela contribuição na coleta de dados.

Aos colegas de curso, em especial: Jocelito, Alexandre, Luis Geraldo, Flávio, Walter, Olívio e Ênio.

Aos amigos e colegas de trabalho Clarice e Carlos pelo companheirismo.

À todas as amigas que fiz, dentro e fora da ESALQ, no período em que residi em Piracicaba.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 O cultivo em várzeas.....	4
2.2 A hipoxia e as plantas.....	5
2.3 A adaptação das plantas à hipoxia.....	7
2.4 A fibra de coco como substrato.....	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 A estrutura experimental.....	11
3.2 A experimentação.....	14
3.3 As avaliações.....	17

3.3.1 Caracterização e monitoramento do ambiente.....	17
3.3.2 Caracterização físico-hídrica do solo.....	17
3.3.3 Alterações físico-químicas no solo.....	18
3.3.4 Parâmetros biométricos das plantas.....	18
3.3.5 Estado nutricional das plantas.....	19
3.3.6 Relações hídricas na planta.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1 Caracterização e monitoramento do ambiente.....	20
4.2 Caracterização físico-hídrica do solo.....	24
4.3 Alterações físico-químicas no solo.....	27
4.4 Parâmetros biométricos das plantas.....	32
4.5 Estado nutricional das plantas.....	46
4.6 Relações hídricas nas plantas.....	48
5 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Vista geral do experimento com a distribuição das caixas-parcelas	11
Temperatura média do ar ocorrida no período do experimento	20
3 Precipitação ocorrida no período do experimento	21
4 Umidade relativa do ar ocorrida no período do experimento	22
5 Evaporação média diária ocorrida no período do experimento	23
6 Velocidade média do vento ocorrida no período do experimento	23
7 Curva característica dos substratos, antes do plantio.....	26
8 Curva característica dos substratos, após o plantio.	26
9 Temperatura média da solução do solo dos tratamentos durante as medições de pH e oxigênio dissolvido	28
10 Oxigênio dissolvido na solução do solo dos tratamentos	29
11 Determinação do pH da solução do solo dos tratamentos	29
12 Valores de condutividade elétrica (CEes) nas parcelas dos tratamentos	32
13 Massa seca da parte aérea das plantas aos 15 DAE e aos 37 DAE, para os tratamentos sem (s) e com (c) fibra de coco	33

14 Altura média das plantas de feijão nas sub-parcelas, sem e com fibra de coco, em cada tratamento, aos 15 DAE	34
15 Aparecimento de epinastia e clorose nas plantas no início dos tratamentos 3 e 4, (a) e (b) respectivamente	35
16 Manifestações de epinastia e clorose nos tratamentos durante o T.A.H.. (a) T1; (b) T3; (c) T4; (d) T5; (e) T2	36
17 Ausência de aerênquima no corte de córtex da raiz do Tratamento 1	38
18 Presença de aerênquima, no córtex de raiz lateral do Tratamento 3	38
19 Presença de aerênquima, no córtex de raiz lateral do Tratamento 4	39
20 Presença de aerênquima, no córtex de raiz lateral do Tratamento 5	40
21 Diferenciação das sub-parcelas em função dos substratos: à direita sem fibra de coco e à esquerda com fibra de coco. (a) Seqüência dos tratamentos 2, 5, 4 e 2. (b) Seqüência dos tratamentos 4, 4, 1 e 2. (c) Detalhe do T3. (d) Detalhe do T4	46
22 Resistência estomática durante a aplicação dos tratamentos	49
23 Transpiração das plantas durante o experimento	50
24 Resistência estomática no decorrer do dia, antes da aplicação do T.A.H	51
25 Transpiração das plantas no decorrer do dia, antes da aplicação do T.A.H	51
26 Resistência estomática medida durante a aplicação do T.A.H.....	52
27 Transpiração medida durante a aplicação do T.A.H.....	52
28 Potencial hídrico na folha das plantas das sub-parcelas sem fibra de coco no início dos tratamentos.....	54

29	Potencial hídrico na folha das plantas das sub-parcelas com fibra de coco no início dos tratamentos.....	54
30	Potencial hídrico na folha das plantas, medido na véspera da aplicação do T.A.H..	55
31	Potencial hídrico na folha das plantas, medido durante a aplicação do T.A.H.....	56

LISTA DE TABELAS

Página

1	Análise granulométrica do solo utilizado na composição do substrato.....	12
2	Análise da água utilizada para o abastecimento do experimento.....	14
3	Resumo dos níveis de tratamento componentes do fator B.....	15
4	Parâmetros da equação de Van Genuchten para as curvas características.....	27
5	Valores da condutividade elétrica obtida de 0 a 30cm de profundidade nos tratamentos T1, T2 e T5.....	30
6	CEes (dS. m ⁻¹) obtida no perfil do solo de parcelas experimentais submetidas a níveis de hipoxia.....	31
7	Comparação de médias dos tratamentos em relação ao número de plantas	41
8	Comparação de médias de tratamentos em relação ao número de vagens produzidas	42
9	Comparação de médias de tratamentos em relação ao número de grãos produzidos	43
10	Comparação de médias de tratamentos em relação a massa de 100 grãos (gramas)	44

11 Comparação de médias de tratamentos em relação à produtividade (sacas.ha ⁻¹).....	44
12 Resultados da análise foliar das plantas de feijão dos tratamentos.....	47

MANEJO DO NÍVEL FREÁTICO VISANDO A ADAPTAÇÃO FISIOMORFOLÓGICA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* sp) À HIPOXIA

Autor: JOSÉ ROBERTO BRITO PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. DÉCIO EUGÊNIO CRUCIANI

RESUMO

O aproveitamento das terras de várzeas para o cultivo de plantas mesófitas, que adveio da necessidade de se expandir à área cultivada se insere atualmente dentro do objetivo maior de aumentar o rendimento por área e também da subsistência de pequenos produtores. O feijão é uma das culturas mesófitas de interesse para essas áreas, porém, necessita de sistemas de drenagem suficientes para garantir seu desenvolvimento, o que poderá causar um impacto ambiental e/ou a degradação do solo. Visando uma solução para esses problemas, de forma a garantir uma produção satisfatória ao produtor e sob as hipóteses de que um manejo do nível freático seria capaz de induzir adaptações fisiomorfológicas nas plantas, capazes de sustentar as mesmas durante um encharcamento temporário do solo; de que a incorporação de fibra de coco ao solo pudesse alterar benéficamente as condições físicas do mesmo e auxiliar a planta sob hipoxia, esse trabalho objetivou: a) Um manejo do lençol freático que melhor promovesse a indução na planta do feijoeiro, para as transformações fisiomorfológicas necessárias à sua adaptação ao encharcamento, avaliadas através dos parâmetros produtivos; b) Detectar as transformações fisiomorfológicas que venham

ocorrer, advindas da indução e c) Avaliar o comportamento do feijoeiro, sob condição de hipoxia, em substrato com e sem a incorporação de fibra de coco. O trabalho foi realizado na área do Posto Meteorológico, no Campus da ESALQ/USP, Município de Piracicaba, SP, durante os meses de março a junho. Para a confirmação da adaptação da cultura, a mesma foi submetida ao encharcamento por 7 dias no estágio de florescimento. Após as análises e observações morfológicas das plantas, pode-se concluir que: 1) Os tratamentos hipóxicos aplicados induziram as plantas à modificarem-se fisiomorfologicamente, emitindo raízes adventícias, formando aerênquimas e alterando a transpiração e a resistência estomática, o que possibilitou a cultura concluir todos os seus estádios fisiológicos, até a maturação dos grãos; 2) A eficácia da indução à adaptação dos tratamentos T3, T4, e T5 ao encharcamento, ficou evidenciada pela resistência ao teste de adaptação à hipoxia e pela morte das plantas do T2, não induzido, ao segundo dia de alagamento; 3) Não foi possível identificar o manejo do nível freático mais eficaz na indução a adaptação hipóxica entre os tratamentos T3, T4 e T5, pelos parâmetros de produção analisados; 4) O tempo de duração do teste de adaptação à hipoxia aparentemente foi excessivo, sugerindo a redução para 5 dias, visto que esse é maior do que o dobro do tempo de resistência das plantas do tratamento T2, sem indução à adaptação, que foi de 2 dias. Esse procedimento poderá melhorar as respostas dos parâmetros de produção, com possível diferenciação entre os tratamentos hipóxicos, 5) A fibra de coco aplicada ao substrato das parcelas teve influência negativa no aspecto químico do solo, aumentando a condutividade elétrica do mesmo e, possivelmente, trazendo prejuízos na absorção dos nutrientes pelas plantas dessas parcelas. O efeito físico esperado que pudesse ser benéfico se mostrou muito tímido e de pouca duração sob as condições estudadas, não sendo recomendado para condições de alagamento.

**MANAGEMENT OF THE WATER TABLE LEVEL SEEKING THE
PHYSICAL-MORPHOLOGICAL ADAPTATION OF THE BEAN PLANT
(*Phaseolus vulgaris* sp) TO HYPOXIA**

Author: JOSÉ ROBERTO BRITO PEREIRA

Adviser: Prof. Dr. DÉCIO EUGÊNIO CRUCIANI

SUMMARY

The use of the lowlands for the cultivation of mesophyte plants comes from the need of expanding the cultivated area and of the subsistence of small producers. Bean is one of the mesophyte crops of interest for those areas, however, it needs enough drainage systems to guarantee its development, that may cause an environmental impact and/or the soil degradation. Another problem of the bean plant in lowlands is that even with drainage system, in case of excessive rain, the producer loses the whole farming. Seeking a solution for those problems, a physical-morphological adaptation of bean to the temporary condition of hypoxia in the soil was tested. This work was conducted in the Weather Station area of the department of Exact Sciences, in the Campus of ESALQ/USP, Municipal district of Piracicaba, SP, during the months of March to June. The induction of the bean plant to the physical-morphological adaptation was aimed, only by the management variation of the water table level. In order to manage the water table level, the natural condition of a lowland was simulated in vases with capacity for 1000L, which were filled with lowland soils, with and without addition of coconut fiber

conditioner, composing the substrate. The crop was submitted to waterlogging by 7 days at flowering stage to confirm the its adaptation. Although with yield losses, the plants of the treatments that received the induction completed the cycle, differing of the treatment that was not submitted to induction, which did not resist and all their plants were dead in the second day of waterlogging. The morphologic observations also confirmed the presence of adaptation alterations that the plant developed, as emission of foreign roots, aerenchyma and lenticels. There was not significant difference in the statistical analysis for the comparison of average values of the production parameters among the three water table levels management adopted and nor effect of the coconut fiber as a soil conditioner. To determine the management that promotes a satisfactory yield, the reduction for 4 days in the time of the resistance test to hypoxia is recommended as the planting of the crop in periods of lower transpiration demand.

1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais provocados por diversas atividades humanas estão mais visíveis, provocando um aumento da consciência ecológica nas pessoas. Esta consciência vem acompanhada do dilema entre a necessidade de expansão da área de produção de alimentos no mundo e a preservação do meio ambiente. Enquanto não se consegue um incremento significativo na produtividade das culturas, suficientemente grande para garantir alimentos a uma população mundial crescente, a alternativa ainda freqüente é de se expandir a área cultivada. Essa expansão pode atingir as áreas de terras baixas e/ou de várzeas, que são de difícil manejo e conservação, geralmente cultivadas com arroz, por ser uma cultura hidrófita.

Da superfície terrestre, estima-se que 6% sejam de áreas alagadas ou sujeitas ao alagamento temporário, sendo aproximadamente de doze milhões de hectares nos Cerrados brasileiros, que podem ser aproveitados para o processo produtivo, desde que se encontre uma solução viável para o problema de excesso de umidade.

A respiração aeróbica das plantas e microorganismos nessas condições reduz a concentração do oxigênio da solução do solo, tornando o ambiente hipóxico ou anóxico, eliminando as plantas que não sejam resistentes ou adaptadas (Crawford & Braendle, 1996). A utilização das áreas de várzeas para o cultivo de plantas mesófitas como o feijão, o milho e a soja, normalmente exige trabalho de drenagem para se estabelecer uma condição de umidade e aeração adequada a essas culturas. A técnica de drenagem é entendida como o rebaixamento do lençol freático até uma profundidade em que, teoricamente, não interfira com os tratos culturais e desenvolvimento normal das

raízes das plantas. Esse rebaixamento normalmente é excessivo e perdura por todo o ciclo da cultura. Com a drenagem se altera a condição natural do solo hidromórfico, que é um ecossistema complexo, sensível e de baixa atividade oxidativa, promovendo a queima da matéria orgânica, expondo o substrato sub-superficial de reduzida fertilidade e afetando o lençol freático em sua recarga, direção de fluxo, além da possibilidade de sua contaminação por poluentes. Os reflexos dessas alterações são ainda pouco estudados, mas claramente visualizados pelo insucesso de vários projetos de aproveitamento de terras baixas com problemas de aeração.

Em 1975 foi criado o PROVÁRZEAS, um programa governamental para se explorar melhor o potencial produtivo dos solos de várzeas. Pretendia-se incrementar o cultivo do arroz no período chuvoso e utilizar a área no período seco com a produção de grãos, leguminosas e hortaliças. No aspecto de engenharia o projeto teve seus méritos. No entanto, o mesmo manejo empregado nos cultivos de grãos em sequeiro foi implementado nas culturas de grãos em várzeas irrigadas, sem que houvesse nenhuma adaptação para as condições físicas, químicas e biológicas desses solos, provocando o insucesso do empreendimento.

Apesar da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) ser muito exigente em aeração, sendo uma das espécies mais susceptíveis à hipoxia dentre as leguminosas comerciais, seu cultivo pode ser apontado como uma boa opção de rotação com a cultura de arroz nessas áreas, aumentando a utilização da área e incorporando uma leguminosa, que poderá trazer benefícios ao solo, assim como, auxiliar no controle fitossanitário. O manejo da irrigação subterrânea e/ou da drenagem revestem-se de fundamental importância, uma vez que a planta é sensível aos excessos de água e, da mesma forma, à toxidez de alguns elementos químicos comuns em solos encharcados.

Mediante ao risco de se perder todo o cultivo de feijão, na ocorrência de uma precipitação maior do que a capacidade do sistema de drenagem implantado, a recomendação da cultura em rotação com o arroz, sem grandes alterações no ecossistema das terras baixas ou de várzeas, de forma a garantir aos produtores uma produção economicamente viável, é condicionada ao desenvolvimento de uma técnica de adaptação da cultura às condições eventuais de hipoxia. Calheiros et al. (2001),

demonstraram a possibilidade do manejo do nível freático ser capaz de induzir uma adaptação fisiomorfológica da planta à hipoxia, com resultados promissores.

Seguindo essa linha de pesquisa, formulou-se as hipóteses de que um manejo do nível freático seria capaz de induzir o desenvolvimento de mecanismos de adaptação fisiomorfológica nas plantas, de que esses mecanismos de adaptação desenvolvidos pelas plantas seriam capazes de sustentar a mesma durante um período de sete dias sob encharcamento do solo e de que a incorporação de fibra de coco ao substrato utilizado para o cultivo pudesse alterar benéficamente as condições físicas do mesmo e auxiliar a planta sob hipoxia.

Acreditando nessas hipóteses, esse trabalho objetivou encontrar: a) Um manejo do lençol freático que melhor promovesse a indução na planta do feijoeiro, para as transformações fisiomorfológicas necessárias à sua adaptação ao encharcamento, avaliadas através dos parâmetros produtivos; b) Detectar as transformações fisiomorfológicas que venham ocorrer, advindas da indução e c) Avaliar o comportamento do feijoeiro, sob condição de hipoxia, em substrato com e sem a incorporação de fibra de coco.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O cultivo em várzeas

O aumento significativo de produtividade em várzeas é dependente do melhor conhecimento técnico no fornecimento de água ao solo ou na drenagem das mesmas, para o máximo aproveitamento agrícola. A exploração racional de várzeas irrigáveis representa ótima opção para a maioria dos Estados brasileiros, visando, principalmente, à incorporação de áreas geralmente de alta fertilidade e de facilidade de irrigação e mecanização no processo produtivo. Já foram levantados mais de 20 milhões de hectares de várzeas em todo o Brasil sem aproveitamento definido (Silveira, 1992).

A demora na exploração agropecuária racional dos solos de várzeas, apesar de serem solos aluviais e/ou hidromórficos, geralmente planos, ricos em matéria orgânica, irrigáveis e de boa fertilidade, é que, em sua maioria, apresentam umidade excessiva, necessitando de drenagem adequada (Lamster, 1980). A cultura do feijoeiro é muito exigente em aeração, sendo uma das espécies mais susceptíveis à hipoxia dentre as leguminosas comerciais (Hodgson et al., 1989).

Os solos de várzeas geralmente se apresentam ácidos, com problemas de toxicidade de Al e Mn e alguns trabalhos têm demonstrado que o feijoeiro é bastante sensível às altas concentrações de Al (Fageria et al., 1996) e de Mn (Andrade, 1997). Sendo o feijoeiro uma cultura sensível à acidez, a calagem tem sido uma prática indispensável para viabilizar o seu cultivo nesses solos (Faquim et al., 1998).

A intensificação dos cultivos em várzeas com arroz e outras espécies em rotação, como o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.), possibilitaria o aproveitamento racional dessas áreas. Por apresentarem características físicas e químicas próprias, as

técnicas utilizadas no cultivo tradicional do feijoeiro em solos das partes mais elevadas, não se aplicam aos solos de várzeas (Andrade et al., 2000).

2.2 A hipoxia e as plantas

A profundidade ótima do lençol freático para cada espécie de planta é um dado fundamental para a instalação de um projeto de drenagem, uma vez que, com base nessa profundidade, são calculados a profundidade, o espaçamento, o diâmetro e outras características dos drenos (Pizarro, 1978). Dependendo do tipo de solo, a franja capilar formada acima do nível do lençol freático pode levar a umidade do solo ao ponto de saturação na zona radicular das plantas, reduzindo a aeração dessa camada e podendo causar danos ao sistema radicular.

A respiração é um dos aspectos mais sensíveis da atividade da planta, e a redução da atividade respiratória tem efeito limitante no desenvolvimento da cultura. As várias combinações de classe de solo, estágio de desenvolvimento, comprimento do dia e duração da inundação podem dificultar o avanço de uma teoria única a respeito das injúrias causadas às plantas de feijão pela falta de drenagem do solo ou aeração deficiente. O aumento da resistência ao movimento de água através das raízes, o aumento da concentração de substâncias tóxicas nas plantas, diminuição do crescimento e do potencial de água nas folhas são outros aspectos negativos que ocorrem em condições de má drenagem do solo (Silveira, 1992).

O oxigênio é um gás pouco solúvel em água e a sua solubilidade depende da pressão atmosférica, temperatura e sais dissolvidos. O indicador da concentração de oxigênio dissolvido na água é o Oxigênio Dissolvido (OD), em mg L^{-1} . Normalmente, a concentração de saturação está em torno de 8 mg L^{-1} a 25°C entre 0 e 1.000 m de altitude (Derisio, 1992).

A disponibilidade de oxigênio para as plantas pode variar de teores ótimos ou normais (normoxia), caminhar para uma deficiência (hipoxia) e chegar até uma ausência (anoxia). Dentre os processos metabólicos afetados pela deficiência de O_2 , os mais estudados são os eventos relacionados à respiração e ao metabolismo de

nitrogênio. Embora não esteja bem elucidado, já se sabe que o NO_3 produz um efeito benéfico em relação à tolerância das raízes das plantas à hipoxia (Sousa & Sodek, 2002).

Alguns trabalhos em bioquímica têm demonstrado que não somente a hipoxia, mas também a reoxigenação das raízes das plantas devem ser realizadas de maneira cuidadosa, para se evitar danos irreversíveis no tecido vegetal. Tais danos são consequências da formação de radicais ativos e de produtos oxidativos tóxicos como o acetaldeído (Crawford & Braendlle, 1996).

Silveira et al. (1988), avaliaram os efeitos de diferentes manejos da profundidade do lençol freático na produção e nos componentes da produção do feijoeiro. Analisando os resultados, concluíram que: a taxa de difusão de oxigênio no solo a 1/3 da profundidade do lençol, a produção de grãos, o número de vagens por plantas e o peso da matéria seca das raízes cresceram com o aumento da profundidade do lençol freático; dentre os componentes de produção, o número de vagens por planta foi o que mais influenciou a produção de grãos. O peso de 100 grãos decresceu com o aumento da profundidade do lençol freático. Os tratamentos de elevação e subsequente rebaixamento do nível do lençol freático, de modo geral, não tiveram efeito marcante sobre as variáveis da planta estudada.

Seong et al. (2000), determinaram as reduções no crescimento e na produtividade das plantas de soja cultivada em sucessão ao arroz, submetidas a elevados teores de água no solo, devido a prolongadas irrigações por inundação, durante os estádios vegetativo V6 e reprodutivo R8. Concluíram que o tempo de irrigação teve influência nas características dos referidos estádios das plantas. As irrigações antes do florescimento afetaram mais as plantas de soja do que as realizadas após esse estágio. A redução no crescimento dos órgãos vegetativos foi significativa no estágio V6.

Sugimoto et al. (2000), estudaram o efeito produzido por condições de hipoxia e anoxia durante o estágio de pós-florescimento e de maturação dos grãos de soja cultivadas em solo de várzea. Verificaram que no estágio de pós-florescimento, os parâmetros de produção de sementes e crescimento vegetativo, foram acentuadamente afetados pelos tratamentos. Quanto mais longa a duração dos tratamentos, maiores foram

os efeitos negativos na produtividade. No estágio de maturação dos grãos, as plantas foram mais tolerantes ao excesso de umidade do solo.

Com o objetivo de estudar o efeito de velocidades de rebaixamento do nível freático no desenvolvimento e na produtividade da soja e da ervilha, Sá et al. (2002) testaram as velocidades de 10, 20, 30, 40 e 60 cm por dia, nos estádios vegetativo e reprodutivo da cultura, em ambiente protegido. Os resultados mostraram que os efeitos causados pela inundação no número de vagens e de grãos produzidos foram proporcionais ao tempo em que as raízes ficaram submersas e variaram com a cultura e com o estágio de desenvolvimento da planta. As velocidades de 10 e 20 cm por dia afetaram drasticamente o crescimento e a produtividade das culturas.

2.3 A adaptação das plantas à hipoxia

Embora o alagamento reduza a disponibilidade de oxigênio para a planta, algumas espécies submetidas ao alagamento modificam-se morfo-anatômicamente, desenvolvendo lenticelas hipertróficas (Larson et al., 1991), formação de aerênquima e raízes adventícias (Mitchell, 1990), criando mecanismos que permitem a difusão do oxigênio da parte aérea para as raízes, continuando com a respiração aeróbica. Crawford (1978), acredita que a adaptação das plantas à hipoxia seja devida a alterações de rotas metabólicas. Para Joly (1994), a resposta pode estar na junção das duas teorias, modificações morfo-anatômicas e metabólicas.

Respostas da parte aérea ao estresse imposto às raízes pelo alagamento, podem ser medidas por mudanças no fluxo de substâncias entre os dois sistemas. O estresse experimentado pelas raízes sob inundação intensifica-se com o tempo, com a passagem de um estado de hipoxia para anoxia e pela ação de toxinas produzidas por bactérias anaeróbicas do solo. Algumas das respostas iniciais das plantas à hipoxia é a ação do etileno, que permite que as raízes evitem a anoxia e a toxificação, na persistência da inundação (Jackson, 1993). Dentre estas mudanças, é importante ressaltar o acúmulo de ACC (ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico) nas raízes sob alagamento e seu transporte para a parte aérea, onde é convertido a etileno (Bradford &

Yang, 1992). Sugere-se que a ação do etileno seja o principal processo responsável pelas modificações morfo-anatômicas observadas em caules e folhas (Jackson et al., 1987; Voesenek et al., 1993). Tais autores verificaram que o etileno é o principal responsável pelo alongamento do caule em resposta à submersão, resultando no contato da parte aérea com a atmosfera. Os mesmos autores relatam que o etileno é produzido continuamente na planta, mas durante o alagamento ele pode ser acumulado em grande quantidade, em razão do seu baixo coeficiente de difusão na água, provocando senescência e abscisão precoce das folhas. Produção de raízes adventícias e formação de aerênquima em plantas cultivadas em solos hidromórficos também são creditadas à elevação nos níveis de etileno nessas plantas (Brailsford et al., 1993).

O aumento da concentração de substâncias tóxicas como o dióxido de carbono, etileno, ferro reduzido, metano, sulfetos e outros compostos no solo não devem ser atribuídos a deficiência de O₂, mas ao acúmulo de água no solo, que impede a liberação dos gases para a atmosfera (Benicasa, 1984).

A deficiência de oxigênio, juntamente com a concentração de gases tóxicos, em solos encharcados pode promover murchamento e clorose das folhas, epinastia, hipertrofia do caule, emissão de raízes adventícias, formação de aerênquima, redução do crescimento e da produtividade, podendo até causar a morte das raízes e das plantas. Vários desses sintomas, acrescidos da conseqüente redução da transpiração, redução da fotossíntese e fechamento dos estômatos, podem ser considerados como mecanismos de adaptação fisiológica das plantas à hipoxia (Bradford & Yang, 1981).

Medri et al. (1998), estudaram os efeitos do alagamento e da aplicação de etrel em canafístula, num período de setenta dias e concluíram que a tolerância observada na planta seja, possivelmente, em razão das modificações anatômicas induzidas por variações nos níveis hormonais, lideradas pelo etileno.

Em estudo do manejo do nível freático na adaptação fisiomorfológica do feijoeiro ao encharcamento, Calheiros et al. (2001), utilizaram o teste de adaptação à hipoxia, que consistia em manter um alagamento no solo por sete dias à partir do final da floração, e puderam concluir que as características biométricas de colheita número de grãos por vagem, massa de mil sementes e rendimento de grãos, tanto do manejo do

lençol estabilizado a 15 cm de profundidade , como do manejo de elevação gradativa, evidenciaram a efetividade adaptativa, permitindo à planta manter-se viva, completar seu ciclo, apresentar menor comprometimento da qualidade e grãos e maior produtividade entre os tratamentos que sofreram hipoxia.

Dantas et al. (2001), observaram a formação de aerênquimas em plântulas de milho em resposta à hipoxia, com e sem a presença de cálcio na solução tampão, verificando que, nas raízes, a formação de aerênquimas aumentou logo após a hipoxia, chegando a ocupar 50% do total do córtex ao quarto dia de tratamento. Enquanto nos coleóptiles a área de aerênquima atingiu 15% do córtex, nas raízes o tamanho da área ocupada por essa estrutura no córtex foi sete vezes maior.

Pires et al. (2002), estudaram as adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado e a melhor forma de aplicação de nitrogênio para as plantas. Para isso, utilizaram duas cultivares (FT – Abyara e BR 4) sob dois regimes hídricos (inundação e capacidade de campo) e duas formas de aplicação de N (inoculação e N mineral). Concluíram que houve redução nos teores de N, K, Mg e Mn, e aumento de Fe nas folhas, quando da inundação. Que existem diferenças entre cultivares de soja, destacando-se a cultivar FT – Abyara pela melhor adaptação. Para a identificação da cultivar mais tolerante à inundação, o diâmetro do caule sob a lâmina de água é uma característica fundamental. Concluíram também que, mesmo sob inundação, ocorrem nodulações em raízes de soja.

2.4 A fibra de coco como substrato

O cultivo do coco vem aumentando a cada ano no Brasil, se expandindo para todas as regiões do país, procurando atender a crescente demanda por água de coco e demais produtos. Porém, o descarte da casca se torna um problema para as regiões consumidoras da bebida. Uma solução para o problema pode estar na reutilização da fibra da casca do coco na agricultura, como substrato. Gonçalves (1995), aponta como características favoráveis de um substrato o baixo custo do material utilizado, a alta disponibilidade, a sua capacidade de troca de cátions, o teor de nutrientes, a esterilidade

biológica e características físico-hídricas de uniformidade, aeração e retenção de umidade.

A Amafibra, produtora de substratos de fibra de coco, vem divulgando seus produtos para utilização em produção de mudas, ressaltando as suas vantagens na aeração, estabilidade física do substrato, grande capacidade de retenção de água e molhabilidade. No entanto, o fabricante alerta para o consumo adicional de Nitrogênio durante o cultivo, devido a formação recente de suas fibras e microcélulas, e não fossilizadas, como as turfas.

Bezerra & Rosa (2002), testaram o pó da casca de coco-verde como substrato na produção de mudas de alface, regado com solução nutritiva de diferentes concentrações. Os autores concluíram que o pó de coco-verde pode ser indicado como substrato para a produção de mudas de alface, com a ressalva de que o mesmo seja devidamente lavado com água destilada. O trabalho mostrou ainda a necessidade de cuidadosa fertilização via água de rega.

Rosa et al. (2001), analisaram e caracterizaram quimicamente o pó da casca do coco verde. Os resultados das análises mostraram uma alta concentração de sódio, que foi responsabilizado por uma condutividade elétrica de $4,74\text{dS.m}^{-1}$. A concentração de taninos solúveis encontrada no material foi de 42ppm, o que pode trazer problemas de fitotoxidez e inibirem o crescimento das pontas das raízes. O pH da casca de coco verde variou entre os valores de 4,8 e 5,2. Os autores recomendam a lavagem prévia do material para promover a lixiviação dos sais de sódio e potássio, o que fez com que a condutividade elétrica reduzisse para níveis de $1,5\text{dS.m}^{-1}$. Além disso, a concentração de taninos também reduz muito com a prática de lavagem.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 A estrutura experimental

Este trabalho foi realizado na área do posto meteorológico do Departamento de Ciências Exatas do Campus da ESALQ/USP, no município de Piracicaba – SP.

A estrutura utilizada foi aproveitamento de trabalhos anteriores, composta de 20 caixas de cimento amianto com capacidade de 1.000 litros, que serviram de parcelas experimentais (Figura 1). Cada caixa-parcela foi equipada com reservatório externo de água para a manutenção do nível freático na parcela. O sistema era dotado de registros hidráulicos nas entradas e saídas das caixas, na parte inferior das mesmas, o que permitia, tanto a elevação rápida do nível freático, quanto a drenagem da parcela.

Figura 1 – Vista geral do experimento com a distribuição das caixas-parcelas

O preenchimento de cada caixa-parcela com o substrato se deu com a colocação de 10 cm de brita nº 1 ao fundo, na altura dos drenos, seguida de outra camada de mesma espessura de pedriscos e finalmente, uma camada de 60 cm de solo. O solo utilizado na composição do substrato é proveniente do Distrito de Paredão Vermelho, Ártemis – SP. Sua classificação é de Podzólico Vermelho Amarelo abrupto, unidade Serrinha (Arenic abruptic Paleudalt), A moderado e espesso, de textura arenosa e de média fertilidade, cuja análise granulométrica se encontra na Tabela 1. A textura arenosa do solo do substrato favoreceu o manejo do nível freático, permitindo os rebaixamentos e/ou elevações com relativa rapidez.

Cada caixa-parcela foi dividida ao meio, no sentido transversal, por uma chapa de zinco, até a profundidade dos drenos, o que não impedia a comunicação de água de um lado para o outro da caixa. Em um dos lados da caixa incorporou-se 0,07 m³ de fibra de coco, visando analisar seu efeito na estruturação do solo e conseqüentes influências na adaptação das plantas sob os tratamentos.

A adubação mineral de plantio para o solo foi recomendada pelo Departamento de Ciência do Solo da ESALQ, visando conseguir a elevação do teor de fósforo para 40 mg . dm⁻³, elevação do percentual de potássio para 3% e aplicação de 7 g/parcela de nitrogênio, baseando-se numa produtividade de 2,5 a 3,5 t . ha⁻¹. Adubação de cobertura com 45g de nitrogênio por caixa, parcelado em duas vezes.

Tabela 1. Análise granulométrica do solo utilizado na composição do substrato

Areia				Silte	Argila	Floculação em Água	Classe
(%)				(%)	(%)	(%)	Textural
G	M	F	MF				
1	20	67	4	2	6	33	Arenosa

Extraído de Calheiros, 2000.

A densidade de partículas dos substratos foi determinada antes do plantio, para o substrato sem fibra de coco e para o substrato com fibra de coco, com valores de

2,47 g.cm⁻³ e 2,30 g.cm⁻³, respectivamente. Como o solo utilizado para compor esse substrato é de textura arenosa, demonstrada anteriormente, os valores resultantes de densidade estão dentro da faixa normal para esse tipo de solo.

A densidade do solo do substrato que não contém fibra de coco apresentou valor de 1,58 g.cm⁻³ antes do plantio. No caso do substrato contendo fibra de coco o valor da densidade foi da ordem de 1,37 g.cm⁻³. O menor valor obtido para o substrato com fibra de coco se deve exatamente à matéria orgânica incorporada

Para se estudar possíveis variações na relação entre tensão e umidade no solo (substrato), foram confeccionadas curvas características do mesmo antes de se iniciar o plantio do feijão e após a sua colheita, nos substratos com e sem fibra de coco. Utilizou-se para tal análise uma mesa de tensão e um conjunto de membranas extratoras de Richards (Painéis de Pressão).

O efeito da fibra na porosidade total do substrato, inicialmente proporcionou uma porosidade mais elevada, de 40,43%, enquanto no substrato sem fibra de coco esse valor era de 36,03%.

A cultura estudada foi a do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Carioca, plantada de acordo com as recomendações encontradas em Dourado Neto (2001), do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ. Utilizou-se para isso 15 sementes por metro linear de sulco, na profundidade de 1 cm, aproximadamente, e com espaçamento entre sulcos de 20 cm. O plantio do feijão ocorreu no dia 20 de março de 2002 e sua germinação no dia 24 do mesmo mês. Todas as parcelas apresentavam aspecto homogêneo aos quinze dias de germinadas e a cultura foi considerada estabelecida.

A água utilizada para as irrigações é proveniente do rio Piracicaba, classificada como de boa qualidade para irrigação (Tabela 2). Sua captação era feita em um tanque de distribuição existente na área mais alta do posto meteorológico e sua condução foi toda por gravidade, utilizando-se mangueira plástica de três polegadas, com 30 metros de comprimento, até dois reservatórios de 1.000 litros cada, localizados às margens da área experimental. Destes reservatórios saíam tubos de PVC de 1,5

polegada, posicionados nas entre-linhas de caixas, nos quais ligavam-se mangueiras de polietileno de 0,5 polegada, distribuindo a água para as caixas-parcelas.

O nível freático dentro das caixas-parcelas era monitorado por meio de poços de observação no solo, revestido de tubos de PVC de 2 polegadas perfurados.

Em cada caixa-parcela foi instalado um tensiômetro, a 15 cm de profundidade do solo, para o controle das irrigações. Para o acompanhamento da variação de temperatura do solo, foram instalados geotermômetros na profundidade de 15 cm no substrato das caixas-parcelas e, na mesma profundidade, no solo adjacente às caixas, para se verificar se ocorriam variações entre os dois ambientes.

Tabela 2. Análise da água utilizada para o abastecimento do experimento

Parâmetro	Valor (mg.l ⁻¹)	VMPC (mg.l ⁻¹)	Parâmetro	Valor (mg.l ⁻¹)	VMPC (mg.l ⁻¹)
Nitrogênio	0,60	-	Zinco	0,10	5,00
Sulfato	11,80	961,00*	Sódio	2,70	920,00*
Nitrato	1,80	10,00*	CO ₂	7,10	8,70
Cloreto	0,50	1050,00*	Acidez	11,20	18,90
Fósforo	0,30	2,00*	Dureza	41,60	500,00
Potássio	1,60	2,00*	Alcalinid.	33,00	
Cálcio	7,60	400,00*	Sedimentos	15,00	
Magnésio	5,50	60,70*	Cor ⁽¹⁾	60,00	5,00
Ferro	1,00	0,30	Turbidêz ⁽²⁾	23,00	1,00
Cobre	0,10	1,00	CE ⁽³⁾	0,40	3,00*
Manganês	n,c,	0,10	pH	6,90	6,00 – 8,50*

VMPC = Valor máximo permitido (água para consumo humano); ⁽¹⁾ Ptc; ⁽²⁾ FTU; ⁽³⁾ mmho cm, * Limite máximo indicado para água de irrigação. Fonte: Laboratório de Ecologia Aplicada. ESALQ/USP

3.2 Metodologia e delineamento experimental

O delineamento estatístico adotado foi de parcelas subdivididas com dois fatores (A e B) e quatro repetições, visando a indução da adaptação das plantas à hipoxia, durante seu desenvolvimento vegetativo, sob variadas condições de

encharcamento. O fator **A** compunha-se de dois níveis: **A₁** – substrato com incorporação de fibra de coco; **A₂** – substrato sem incorporação de fibra de coco. O fator **B** compunha-se de cinco níveis, que de forma resumida se apresentam no Tabela 3, a seguir:

O teste de adaptação à hipoxia (T.A.H.) foi aplicado no estágio de florescimento, considerado o período mais sensível ao estresse hídrico para a maioria das culturas, seja por excesso ou déficit. O teste consistiu na manutenção de uma lâmina de água de 1 a 2 cm acima da superfície do solo, por um período de 7 dias, período esse muito superior ao que geralmente ocorre na natureza, de 2 a 3 dias para que ocorra a drenagem da área após a chuva. A resistência da planta a essa condição extrema de hipoxia, estará indicando a ocorrência de algum processo de adaptação.

Tabela 3. Resumo dos níveis de tratamento componentes do fator **B**

Níveis	Estádio de desenvolvimento		
	Vegetativo	Florescimento	Pós-florescimento
B ₁ – Testemunha	Sem estresse	Sem estresse	Sem estresse
B ₂ – Sem condicionamento	Sem estresse	T.A.H.	Reoxigen. Brusca
B ₃ – Condiciona// parcial	Indução branda	T.A.H.	Reoxigen. Lenta
B ₄ – Condiciona// pleno	Indução gradual	T.A.H.	Reoxigen. Lenta
B ₅ – Condiciona// intermitente	Indução seriada	T.A.H.	Reoxigen. Lenta

Os tratamentos hipóxicos testaram diferentes manejos de ascensão do nível freático como indutores de adaptações fisiomorfológicas da planta à hipoxia. A eficácia dessa indução foi testada impondo-se uma condição anóxica temporária, no estágio de florescimento, considerado o mais crítico e de maior sensibilidade à hipoxia (Garrity & Pernito, 1996). A quantificação dessa eficácia foi realizada de modo comparativo entre os tratamentos, por intermédio dos parâmetros quantitativos biométricos do desempenho da cultura, incluindo a avaliação do rendimento de grãos. Após o T.A.H., nos tratamentos que possuem rebaixamento gradativo do nível freático, a dinâmica foi de 5 cm a cada 5 dias.

No nível **B₁** (Tratamento 1) – Testemunha, conduziu-se a cultura sob condições ótimas de aeração e umidade. As irrigações eram subterrâneas, em caráter suplementar, por meio de elevação do nível freático até a profundidade dos 5 cm da superfície do solo, com imediato rebaixamento para os 50 cm de profundidade. O momento da irrigação era determinado pelo potencial hídrico do solo de -50 kPa, indicado por tensiômetros instalados na profundidade estimada, correspondente a 50% do sistema radicular. Assim, o **B₁** representou o potencial máximo produtivo relativo da cultura naquela situação de solo e clima.

No nível **B₂** (Tratamento 2) – Sem indução de adaptação à hipoxia, a cultura foi conduzida em solo sob condição ótima de aeração e umidade até o florescimento e então, foi subitamente inundada (T.A.H.). Esse tratamento simulou o encharcamento de uma várzea pela ocorrência ocasional de um período prolongado de precipitações, ultrapassando a chuva prevista no projeto de drenagem, que é a principal causa de perda de produção de culturas mesófitas em terras baixas. Após o T.A.H., o nível freático foi rebaixado em curto espaço de tempo (2 dias), também simulando a condição natural, com os decorrentes efeitos negativos da reoxigenação brusca. Assim, o **B₂** representou a condição da planta repentinamente submetida ao encharcamento temporário, com adaptação zero, sem controle algum do nível freático.

No nível **B₃** (Tratamento 3), após o estabelecimento da cultura, o nível freático foi elevado e mantido a 15 cm de profundidade durante todo o desenvolvimento vegetativo, exercendo a função de indutor adaptativo. O T.A.H. foi aplicado no estágio de florescimento e, após o mesmo, o rebaixamento do nível freático se deu de forma gradativa, visando minimizar os efeitos da reoxigenação.

No nível **B₄** (Tratamento 4) – com indução de adaptação plena, após o estabelecimento da cultura, o nível freático foi elevado e mantido a 15 cm de profundidade por sete dias, então, gradativamente o nível freático foi sendo elevado, até que chegasse à superfície do solo no estágio de florescimento da planta. Essa elevação exerceu a função de indução adaptativa gradual. No referido estágio foi aplicado o T.A.H., seguido do rebaixamento gradativo do nível freático na mesma dinâmica do **B₃**.

No nível **B₅** (Tratamento 5) – com indução de adaptação intermitente, após o estabelecimento da cultura, as parcelas foram inundadas a cada 10 dias, com duração do evento de 24 horas, até atingirem o estágio de floração, na tentativa das planta criarem mecanismos de adaptação fisiomorfológicas. No estágio de floração foi aplicado o T.A.H. e o rebaixamento do nível freático foi idêntico aos níveis **B₃** e **B₄**.

3.3 Parâmetros avaliados durante o experimento

No intuito de se monitorar e avaliar as alterações ocorridas no solo, no clima e nas plantas, as seguintes determinações fizeram-se necessárias:

3.3.1 Caracterização e monitoramento do ambiente

Grande parte dos elementos climáticos de interesse para esse trabalho foi mensurada e registrada no posto meteorológico do departamento de Ciências Exatas da ESALQ, instalado ao lado da área experimental, tais como: temperatura máxima, média e mínima do ar; umidade relativa do ar; temperatura do solo dentro das caixas-parcelas e no solo adjacente, precipitação; velocidade do vento e evaporação.

3.3.2 Caracterização físico-hídrica do solo

As determinações para a caracterização físico-hídrica do solo como, curva característica do solo, densidade de partículas, densidade do solo e porosidade total foram realizadas em duas etapas: uma inicial, na instalação do experimento, e outra ao final do mesmo, com exceção da densidade de partículas, para a verificação de possíveis alterações em seus valores. A metodologia adotada é apresentada por Caudura & Dorfman (1986).

3.3.3 Alterações físico-químicas no solo

As transformações físico-químicas do solo foram avaliadas em quatro repetições por tratamento, mensurando-se o pH da solução do solo, utilizando-se para isso o aparelho portátil Aquacheck, e a concentração de O₂ dissolvido na solução do solo, empregando o medidor portátil Oxímetro. Em ambos os casos a temperatura da solução solo foi mensurada concomitantemente. As leituras eram feitas em intervalos de três em três dias, aproximadamente.

Ao final do experimento foram realizadas amostragens do solo para análise de condutividade elétrica (CEes) da pasta de saturação, a fins de se detectar alguma alteração no solo. Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30cm das parcelas com e sem aplicação de da fibra de coco. Para a determinação da CEes, as amostras deformadas de solo foram submetidas à secagem ao ar livre e peneiradas. Para a confecção da pasta de saturação, pesou-se 300g do solo e adicionou-se gradualmente água destilada até atingir o ponto de saturação. Após o repouso por um período de 24 horas foram retirados os extratos de saturação por meio de sucção, conforme a metodologia proposta por Richards (1954).

3.3.4 Parâmetros biométricos das plantas.

O desenvolvimento da cultura foi avaliado pela caracterização do ciclo fenológico, biomassa seca da parte aérea e altura da planta. Também foram observados aspectos fenotípicos da planta, relacionados aos efeitos dos tratamentos, tais como: grau de clorose e epinastia. As avaliações foram realizadas em amostragens de oito plantas por tratamento.

A adaptação do sistema radicular à hipoxia foi avaliada por meio da observação da emissão de raízes adventícias, formação de aerênquima e pela determinação do teor de etileno, em amostras de oito plantas por tratamento. A formação de aerênquima foi detectada por meio de observações microscópicas de lâminas de cortes de raízes. Na análise do teor de etileno na raiz utilizou-se a cromatografia à gás, realizada em duas etapas, aos 30 e aos 50 dias após a germinação.

No final do ciclo, foram determinados os principais componentes de produção da cultura, tais como: número de plantas, número de vagens, número de grãos, massa de 100 grãos e rendimento de grãos.

3.3.5 Estado nutricional das plantas

A deficiência nutricional das plantas teve sua avaliação através de análise foliar, coletando-se 4 folhas da parte superior da planta, todas verdes, e quatro da parte inferior, com aproximadamente 40% de sua superfície amarelada, em duas plantas por repetição e em duas repetições por tratamento.

3.3.6 Relações hídricas na planta

As determinações para a caracterização das relações hídricas na planta e da possível ocorrência de estresse se basearam na quantificação da resistência estomática e no potencial de água no pecíolo das folhas.

A resistência estomática, avaliada por amostragem de 8 plantas por tratamento durante todo o ciclo da cultura, foi determinada utilizando-se do equipamento porômetro de equilíbrio dinâmico, da marca Licor, modelo Li-1600. Procurou-se amostrar as folhas da parte superior da planta, completamente expandidas e expostas a radiação solar. As medições ocorriam preferencialmente no período das 12 às 14 horas, exceto nos dias em que se determinava o potencial de água no pecíolo da folha, nos quais se media de 2 em 2 horas. Os parâmetros de umidade relativa na folha, temperatura da folha e taxa de transpiração, lidos em seqüência, auxiliaram na interpretação da resistência estomática.

O potencial de água no pecíolo da folha foi mensurado utilizando-se a câmara de pressão (Câmara de Scholander), em amostras de oito plantas por tratamento, nas fases anterior, posterior e durante o T.A.H.. Nos dias de avaliação as medições ocorriam em intervalos de 2 em 2 horas das 6 às 18 horas, com a câmara de pressão instalada no local do experimento, reduzindo-se assim o tempo entre a coleta da folha e a leitura do manômetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Monitoramento do ambiente

A temperatura média do ar no período do experimento se manteve sempre elevada, com valores de 25,8 °C no mês de março, 24,7 °C no mês de abril, 20,7 °C em maio e de 20,3 °C em junho, considerados normais para a região (Figura 2). Nos primeiros dias do experimento esses valores elevados de temperatura foram favoráveis ao desenvolvimento do feijão, mas após o início dos tratamentos os mesmos dificultavam ainda mais a condição da planta, pela maior necessidade de absorção de água para suprir a demanda evapotranspirométrica. Como as plantas dos tratamentos 3, 4 e 5 estavam em processo adaptativo de suas raízes, os reflexos apareceram na forma de murchamento, epinastia e clorose das folhas.

Figura 2 – Temperatura média do ar ocorrida no período do experimento. Fonte: Dept. de Ciências Exatas/ESALQ/USP

O mesmo efeito foi observado por Calheiros et al. (2001). Nos tratamentos 1 e 2, que não sofriam limitações na absorção de água, as plantas se encontravam em pleno desenvolvimento e com aspecto bastante saudável. Durante a aplicação do T.A.H. as temperaturas diárias variaram de 21,4 °C a 23,6 °C e as injúrias ocorridas nas plantas se deveu mais a deficiência das raízes na absorção de água sob hipoxia, do que à temperatura, já que estas se encontravam mais amenas.

No início do cultivo, em março, ocorreram precipitações que dispensaram o uso de irrigações. No mês de abril as precipitações foram reduzidas, ocorrendo somente em dois dias e sua média mensal foi de 0,91mm. Em maio, as precipitações ocorreram no início da aplicação do T.A.H. e depois nos meados do mês, com média mensal de 3,63mm. O mês de junho foi bastante seco, o que propiciou a fase de maturação dos grãos. Não foram registradas precipitações nesse mês (Figura 3).

Figura 3 – Precipitação ocorrida no período do experimento. Fonte: Dept. de Ciências Exatas/ESALQ/USP

Na Figura 4 pode-se observar o comportamento da umidade relativa do ar no período do experimento. Podemos notar que a mesma se manteve, em quase todo ciclo da planta, acima dos 70% e no mês de maio apresentou a sua maior média, 77,4%,

coincidindo com o período de aplicação do T.A.H., o que veio a favorecer as plantas pela redução da taxa transpirométrica. Nesse referido período os valores diários de umidade relativa do ar variaram de 71 a 85%. Durante a aplicação dos tratamentos os valores de umidade não foram tão favoráveis assim, chegando a apresentar valor mínimo de 56%. Os teores baixos nesse período podem ter exigido maiores esforços das plantas em adaptação.

Figura 4 – Umidade relativa do ar ocorrida no período do experimento. Fonte: Dept. de Ciências Exatas/ESALQ/USP

Valores de evaporação podem ser observados na Figura 5. A evaporação, que é dependente da radiação solar e vento, apresentou valores médios de $6,0\text{mm.dia}^{-1}$ em março, $5,0\text{mm.dia}^{-1}$ em abril, $3,1\text{mm.dia}^{-1}$ em maio e $2,9\text{mm.dia}^{-1}$ em junho. Os valores reduzidos em maio e junho podem ter contribuído para a resistência das plantas sob hipoxia.

Figura 5 – Evaporação média diária ocorrida no período do experimento. Fonte: Dept. de Ciências Exatas/ESALQ/USP

Figura 6 – Velocidade média do vento ocorrida no período do experimento. Fonte: Dept. de Ciências Exatas/ESALQ/USP

A velocidade do vento durante toda a fase experimental foi moderada, sendo que os valores altos mais prejudiciais às culturas. Nesse período o maior valor registrado foi de $18,90 \text{ km.h}^{-1}$ no dia 21 de março, dia em que as plantas ainda não haviam germinado. A direção predominante dos ventos foi a nordeste, afetando igualmente a todos os tratamentos, visto que a área experimental tem tamanho muito reduzido.

Acompanhando a queda da temperatura do ar, a temperatura do solo também declinou a partir de meados de maio. A temperatura do solo medida a 15cm de profundidade, apresentaram valores diferentes nas medições dentro das parcelas e no terreno onde o experimento estava instalado, nas sub-parcelas com e sem fibra de coco e nas medições realizadas em períodos anteriores e durante o T.A.H.. As medições feitas no solo do terreno em que o experimento estava instalado sempre apresentaram temperaturas superiores em 1 ou 2 graus em relação ao substrato dentro das sub-parcelas com fibra de coco e de 2 a 3 graus em relação às sub-parcelas sem fibra de coco. Esse resultado se deve, provavelmente, a redistribuição de energia ocorrida nas parcelas, em troca com o ar circundante. As sub-parcelas com fibra de coco possuíam temperatura mais elevada do que as sub-parcelas sem fibra de coco, antes da aplicação do T.A.H. Possivelmente, a coloração mais escurecida do substrato com fibra tenha causado tal diferença. Durante a aplicação do T.A.H. essa diferença desapareceu em todos os tratamentos, exceto no tratamento 1, indicando ser a água responsável por esse comportamento, já que no tratamento 1 não era aplicado o T.A.H..

4.2. Alterações físico-hídricas do solo

A densidade do solo é dependente do manejo empregado no solo e, por isso, sofre alterações de um cultivo para o outro e/ou dentro do mesmo cultivo. Na análise desse parâmetro, o substrato que não continha fibra de coco possuía uma densidade de solo antes do plantio de $1,58 \text{ g.cm}^{-3}$ e praticamente não sofreu alteração em seu valor, analisado após a colheita, passando para $1,59 \text{ g.cm}^{-3}$. Como não houve movimentação de máquinas sobre esse substrato dentro das caixas-parcelas e os tratos

culturais eram manuais, era de se esperar que um solo arenoso como esse permanecesse com a sua densidade do solo inalterada e dentro dos valores de um solo mineral.

No caso do substrato contendo fibra de coco houve variação no valor da densidade, visto que, anterior ao plantio a fibra de coco estava recém incorporada e fez com que o valor da densidade ficasse reduzido, sendo da ordem de $1,37 \text{ g.cm}^{-3}$. Após a colheita o valor da densidade do solo apresentou uma elevação, se aproximando muito do valor de densidade do substrato sem fibra de coco, com valor de $1,56 \text{ g.cm}^{-3}$. Provavelmente, essa matéria orgânica no plantio não havia se incorporado realmente ao substrato e, com sua capacidade de armazenamento de água e expansão, reduziu drasticamente a densidade do mesmo. Posteriormente, com a decomposição desse material e as inúmeras inundações, a fibra de coco pode ter sido carregada para camadas mais profundas e o valor da densidade do solo se elevou, atingindo valor muito próximo de densidade do substrato sem a fibra.

O efeito da fibra na porosidade total desse substrato, inicialmente proporcionou uma porosidade mais elevada, de 40,43%, enquanto no substrato sem fibra de coco esse valor era de 36,03%. Ao final do ciclo da cultura, a porosidade total do substrato, com fibra de coco, reduziu para 32,17%, já que a densidade do solo aumentou. O fato mais curioso é que esse valor é menor do que o valor de porosidade do substrato sem fibra, no fim do cultivo, que foi de 35,63%. O resultado indica uma maior tendência de adensamento do substrato com fibra do que o sem fibra. A pequena redução da porosidade total do substrato sem fibra de coco é devida ao adensamento natural.

As curvas características do solo (substrato) confeccionadas antes de se iniciar o plantio do feijão são apresentadas nas Figuras 7a e 7b, respectivamente para os substratos sem fibra de coco e com fibra. Por essas curvas podemos observar que a fibra de coco confere ao substrato uma capacidade bem maior de retenção de água, quando comparada à curva oriunda do substrato sem fibra de coco. Os valores de capacidade de campo (Cc) foram de $0,43 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,35 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, para os substratos com e sem fibra respectivamente. No ponto de murcha permanente (Pm) a umidade volumétrica foi da ordem de $0,16 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para o substrato com fibra e de $0,10 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para o substrato sem a fibra.

Após o cultivo do feijão, as curvas dos dois substratos analisados se equipararam (Figuras 8a e 8b), com valores muito próximos para a C_c , $0,42 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e $0,40 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para os substratos com e sem fibra, respectivamente. No P_m os valores encontrados são idênticos e da ordem de $0,06 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Esse resultado aponta um aumento na capacidade de armazenamento dos substratos, não pelo aumento da umidade na C_c , mas sim da redução da mesma no P_m .

Figura 7 – Curva característica dos substratos, antes do plantio. (a) sem fibra; (b) Com fibra

Figura 8 – Curva característica dos substratos, após o plantio. (a) sem fibra; (b) Com fibra

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros da equação de Van Genuchten, correspondentes às curvas características apresentadas.

Tabela 4. Parâmetros da equação de Van Genuchten para as curvas características

Parâmetro	Curvas			
	7a	7b	8a	8b
θ_r	0,1072	0,1818	0,0916	0,0891
θ_s	0,3636	0,4479	0,4099	0,4303
α	0,0235	0,0230	0,0323	0,0330
η	2,7481	2,0921	4,4677	4,0112

Como se pode observar nas referidas figuras, os efeitos da fibra de coco nas propriedades físico-hídricas do substrato têm comportamento semelhante para todos os parâmetros analisados. Inicialmente os efeitos são bastante favoráveis, mas de curta duração, considerando a cultura de feijão de ciclo curto, as características benéficas apresentadas no início do cultivo não permaneceram até o final do mesmo. Talvez a condição de encharcamento possa ter encurtado o período de eficácia da fibra de coco, quanto às características físicas do substrato.

4.3 Alterações físico-químicas no solo

Observa-se nas Figuras 9, 10 e 11 os resultados das medições dos parâmetros de avaliação das alterações físico-químicas na solução do solo. A temperatura em que se encontra a solução do solo influencia o comportamento do pH e o teor de oxigênio dissolvido. Esse parâmetro teve variação de 17,0 a 25,5 °C para os meses de abril e junho, respectivamente, acompanhando a variação das condições de temperatura do ar. Em sua pesquisa, Cannell et al. (1980) concluíram que sob temperaturas de 11 à 12 °C na solução do solo o oxigênio se esgotou totalmente em 5 dias, podemos então inferir que, os valores medidos por nós contribuem para o esgotamento mais rápido de oxigênio.

Durante a aplicação do T.A.H. a temperatura da solução do solo variou de 21,5 a 24,0 °C, ficando somente 2 °C, em média, abaixo da temperatura do ar. Os elevados valores de temperatura apresentados intensificam mais a hipoxia na solução do

solo devido ao maior consumo do oxigênio pelas plantas e microorganismos, assim como pela redução da dissolução do O_2 na água, o que torna maior a dificuldade de adaptação das plantas à hipoxia em regiões de clima tropical.

Figura 9 – Temperatura média da solução do solo dos tratamentos durante as medições de pH e oxigênio dissolvido

No início da aplicação dos tratamentos o teor de oxigênio dissolvido na solução do solo se encontravam próximos de 3 mg.L^{-1} . De acordo com Derisio et al. (1992), esses valores estão abaixo da metade do valor de saturação a 25°C de temperatura da solução e comprovam os tratamentos hipóxicos. Os valores foram decaindo no decorrer do tempo e se chegou aos valores mínimos durante a aplicação do T.A.H., com nível zero no tratamento 3. As variações no teor de oxigênio dissolvido, ocorridas durante os tratamentos, são devidos às recargas de água nas parcelas (Figura 10). As pequenas variações no teor desse parâmetro não foram suficientes para promover diferenças significativas nos parâmetros de produção entre os tratamentos que sofreram indução de adaptação.

Após a aplicação do T.A.H. os teores de oxigênio foram se elevando para todos os tratamentos, porém, sem retornar aos valores iniciais do tratamento por se tratar de descarga gradual de água e não de recarga do nível freático como acontecia na fase inicial dos tratamentos.

Figura 10 – Oxigênio dissolvido na solução do solo dos tratamentos

Os valores de pH se comportaram igualmente em todos os tratamentos, iniciando na faixa de 6,5 à 7,0, evoluindo para 8 no final de abril. Após essa data houve um declínio dos valores por esgotamento das reações de oxi-redução na solução do solo, chegando ao valor de 7 durante a aplicação do T.A.H. Com a inundação ocorrida, houve uma ligeira reação pela recarga, mas logo se estabilizou no patamar de 7 (Figura 11). A elevação do pH é um fenômeno comum em solos ácidos inundados, em consequência do consumo de H^+ na redução do Fe^{3+} (Pires et al., 2002).

Figura 11 – Determinação do pH da solução do solo dos tratamentos

A condutividade elétrica da pasta de saturação (CEes), medida em cada parcela, variou de acordo com o tratamento aplicado e com a aplicação de fibra de coco na composição do substrato. Além da contribuição da condição de hipoxia, através da oxi-redução de alguns elementos para o aumento da CEes, a fibra de coco forneceu sais para o solo, elevando o valor da condutividade elétrica em todos os tratamentos. Essa afirmativa pode ser comprovada pela observação da Tabela 5, onde se pode notar que no T1 o valor da CEes da parcela com fibra de coco é maior do que os valor apresentado na parcela sem fibra de coco, sendo que nesse caso não há inundação, e portanto, não há contribuição por oxi-redução. Nos tratamentos T2 e T3 que sofreram inundação, os resultados de CEes sugerem ter havido translocação de sais de uma parcela para a outra através da água, mesmo assim é possível notar que no T2, que somente foi inundado no florescimento, os valores da parcela sem fibra de coco são menores do que a parcela que continha fibra. Comparando os resultados dos tratamentos T1 e T2, nas parcelas sem fibra de coco, podemos observar a elevação do valor de CEes na parcela do T2, mas nesse caso, ao podemos separar o que foi contribuição da oxi-redução e o que foi translocado de sais da parcela vizinha, durante a inundação do referido tratamento.

Tabela 5. Valores da condutividade elétrica obtida de 0 a 30cm de profundidade nos tratamentos T1, T2 e T5

Tratamentos	CEes (dS. m ⁻¹)	
	Parcelas sem fibra	Parcelas com fibra
T1	1,6 b	2,2 a
T2	2,1 a	2,4 a
T3	2,3 a	2,4 a
T4	2,3 a	2,3 a
T5	2,3 a	2,3 a

Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O T5, como sofreu maior número de inundações, apresenta valores de CEes iguais nas parcelas com e sem fibra de coco. Podemos notar que os valores de

CEes do T5 são iguais ao valor encontrado na parcela com fibra de coco do T1 e inferiores ao valor apresentado na parcela com fibra de coco do T2. Esse fato pode ser justificado pelas sucessivas lavagens do solo em que foi submetido o T5, promovendo assim a lixiviação dos sais e conseqüente retirada de sais da parcela através da drenagem.

Na Tabela 6 são apresentados os dados comparativos de CEes média das parcelas com e sem fibra de coco, de todos os tratamentos que sofreram hipoxia. Podemos notar que a fibra de coco aumentou significativamente a CEes nas parcelas, nas profundidades de 0 – 10cm e de 20 – 30cm do solo. Esse resultado mostra a influência isolada da fibra de coco sobre a CEes do solo, já que todas as parcelas dessa análise foram inundadas. Mesmo havendo movimentação de sais de um lado para o outro nos tratamentos sob hipoxia, os valores médios mostram que a maior concentração permaneceu na parcela em que o mesmo foi aplicado. Esse fator pode estar relacionado com uma possível redução na absorção de nutrientes na parcela com fibra de coco, proporcionando o aspecto diferenciado da cultura nas parcelas do mesmo tratamento, visualizadas na Figura 21.

A não diferenciação da CEes na camada de 10 - 20cm pode ter ocorrido devido aos valores da condutividade elétrica na parcela sem a fibra de coco ser mais influenciada pela oxi-redução do que pela liberação de sais da fibra, que foram deslocados da parcela adjacente. Podemos ver que seu comportamento é crescente com a profundidade, o que não ocorreu com a parcela com fibra de coco.

Tabela 6. CEes ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$) obtida no perfil do solo de parcelas experimentais submetidas a níveis de hipoxia

Parcelas	Camada de solo (cm)		
	0-10	10-20	20-30
Sem Fibra	2,04 b	2,19 ns	1,75 b
Com Fibra	2,35 a	2,27 ns	2,36 a

Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na Figura 12 podemos observar o comportamento da CEes nas parcelas dos tratamentos estudados. Nota-se que nos tratamentos hipóxicos praticamente não há diferença entre as parcelas. Nos tratamentos T1 e T2 observa-se que a fibra de coco contribuiu para o aumento da condutividade.

Figura 12 – Valores de condutividade elétrica (CEes) nas parcelas dos tratamentos

4.4 Parâmetros biométricos das plantas

Os tratamentos começaram a ser aplicados quinze dias após a emergência (15 DAE), no mesmo dia em que se coletaram amostras para análise de massa seca e altura das plantas. Nas Figuras 13 e 14 podemos observar os resultados dessas análises. Na Figura 13, observa-se que não há grandes diferenças de massa seca entre os tratamentos aos 15 DAE, a diferença maior é verificada dentro de cada tratamento, com relação ao substrato. Nas sub-parcelas em que o substrato contém fibra de coco as plantas apresentam valores menores do que as sub-parcelas em que o substrato não possui fibra de coco. Esse comportamento pode estar associado à alta capacidade de retenção de água proporcionada pela fibra de coco, ocasionando uma drenagem mais lenta do solo e a aeração deficiente pode ter afetado o desenvolvimento dessas plantas. Na análise do dia 30 de abril (37 DAE), já sob o efeito dos tratamentos, observou-se que

nos tratamentos 1, 2 e 5 as sub-parcelas que possuíam fibra de coco apresentaram um desenvolvimento maior em relação as sub-parcelas sem fibra de coco. Podemos notar também que, no tratamento 3, em que o nível freático estava estabilizado a 15cm de profundidade, a diferença é muito pequena e no tratamento 4, com o solo mais saturado do que o solo do tratamento 3, a redução no valor da massa seca é bem marcante. A explicação para esse resultado pode estar na possível salinidade liberada pela fibra de coco quando se encontra encharcada.

Figura 13 – Massa seca da parte aérea das plantas aos 15 DAE e aos 37 DAE, para os tratamentos sem (s) e com (c) fibra de coco

No tratamento 5 a fibra de coco se comportou da mesma forma que nos tratamentos que não sofreram indução, isso se deve ao tipo de indução imposta ao mesmo, de forma esporádica e por curto período de tempo, não possibilitando o efeito negativo provocado pela fibra em solos inundados, mas esse tipo de indução se mostrou bastante prejudicial ao parâmetro de massa seca, quando comparado aos demais tratamentos.

Os tratamentos 1 e 2 apresentaram os melhores resultados de massa seca aos 37 DAE, em proporção de ganho de massa, quando comparados aos demais tratamentos.

A análise da altura de plantas aos 15 DAE, antes de iniciarem os tratamentos, pode ser visualizada na Figura 14. Pode-se notar que não havia diferença entre os tratamentos, com uma ligeira diferença no valor das médias de alturas das sub-parcelas com substratos contendo fibra de coco, provavelmente seja decorrente das alterações físico-hídricas que a fibra tenha causado no substrato.

Figura 14 – Altura média das plantas de feijão nas sub-parcelas, sem e com fibra de coco, em cada tratamento, aos 15 DAE

Pelas características dessa variedade de feijão (Tipo II, segundo Dourado Neto & Fancelli, 2000), a determinação da altura das plantas se torna impraticável, devido às inúmeras ramificações que a planta emite quando atinge certa fase do desenvolvimento, dificultando se fixar uma referência para a medição. No caso desse plantio as ramificações aconteceram aos 25 DAE, aproximadamente.

As altas temperaturas ocorridas no período, aliadas às respostas da planta às condições adversas de aeração do solo, alteraram a duração dos estádios da cultura. Do plantio até a germinação foram 4 dias para todos os tratamentos. Da germinação até o início da floração, estágio vegetativo, houve diferença nos tratamentos. Os tratamentos 1 e 2 tiveram o estágio vegetativo reduzido, terminando aos 36 DAE e entrando no estágio reprodutivo com o início da floração. No tratamento 3 o início da floração ocorreu aos 40 DAE e nos tratamentos 4 e 5 aos 43 DAE. Esse resultado difere do

resultado obtido por Calheiros et al (2001), em que todos os tratamentos chegaram ao florescimento ao mesmo tempo.

A maturação dos grãos ocorreu primeiro no tratamento 1, resultado coerente com a precocidade nas fases anteriores, seguido pelos tratamentos 3, 4 e 5, com 5 dias de atraso e sem diferença entre os mesmos. Esse atraso com relação à testemunha provavelmente se deve ao desgaste das plantas desses tratamentos em se adaptarem à condição de hipoxia imposta.

Diferentemente de Calheiros et al (2001), as plantas do tratamento 2, que simula a condição natural de uma várzea e portanto não recebeu indução de adaptação à hipoxia, morreram no segundo dia do T.A.H., demonstrando uma sensibilidade maior ao encharcamento do que as plantas do mesmo tratamento aplicado pelo referido autor. As condições ambientais ocorridas no período de realização desse trabalho, como temperaturas mais elevadas, devem ter contribuído para tal resultado, o que ressalta mais ainda a eficácia adaptativa da cultura através dos tratamentos indutivos T3, T4 e T5.

A partir da aplicação dos tratamentos 3 e 4 as plantas começaram a apresentar um pequeno grau de epinastia. No tratamento 4, a medida em que se elevava o nível freático, esse grau de epinastia foi aumentando. Nos tratamentos 2 e 5 a epinastia se manifestou durante o T.A.H., enquanto nos tratamentos 3 e 4 o efeito se intensificava (Figuras 15 e 16).

Figura 15 – Aparecimento de epinastia e clorose nas plantas no início dos tratamentos 3 e 4, (a) e (b) respectivamente

Figura 16 – Manifestações de epinastia e clorose nos tratamentos durante o T.A.H.. (a) T1; (b) T3; (c) T4; (d) T5; (e) T2

Acompanhando a epinastia houve o aparecimento de clorose nas folhas das plantas, com o mesmo desenvolvimento, se agravando em resposta ao aumento da hipoxia. No início, com aproximadamente 3 dias de aplicação dos tratamentos 3 e 4, acometia 15% das plantas, evoluindo gradativamente até atingir 60% das plantas durante o T.A.H., conforme pode ser observado nas Figuras 15 e 16.

Os efeitos negativos da reoxigenação rápida observada por Calheiros et al (2001), prevista para acontecer no tratamento 2, não teve a oportunidade de se manifestar devido a morte das plantas desse tratamento no segundo dia do T.A.H. (Figura 16e).

Grande parte da resistência à hipoxia dos tratamentos 3, 4 e 5 pode ser atribuída a emissão de raízes adventícias, como adaptação fisiomorfológica das plantas, observada nos 3 tratamentos citados, sendo que no tratamento 4 o número de raízes adventícias apresentado foi maior, seguido pelo tratamento 3 e por último o tratamento 5, quando comparado ao número emitido pelas plantas do tratamento 1. Esse resultado coincide com o resultado obtido por Calheiros et al. (2001) e tende a confirmar a hipótese de que a elevação gradativa do lençol possibilita a recuperação do sistema radicular das plantas pela emissão de raízes adventícias.

Outra razão para a resistências das plantas de feijão a um período tão longo de hipoxia, pode ser a formação de aerênquimas, observada microscopicamente em lâminas com cortes de raízes laterais dos tratamentos que tiveram indução à adaptação, sendo que a mesma estrutura não foi encontrada nas lâminas com os cortes de raízes do tratamento 1 (Figura 17). Pode se observar que as estruturas formada nos tratamentos 3 e 4 são mais nítidas do que as verificadas no tratamento 5 (Figuras 18, 19 e 20, respectivamente). Esse fato pode ser resposta ao maior período sob hipoxia ao qual os tratamentos 3 e 4 foram submetidos, consolidando a formação dos seus espaços intercelulares. Calheiros et al. (2001) observou estruturas de aerênquima em raízes de feijão, com resultados semelhantes.

Figura 17 – Ausência de aerênquima no corte de córtex da raiz do Tratamento 1

Figura 18 – Presença de aerênquima, apontada pela seta, no córtex de raiz lateral do Tratamento 3

Figura 19 – Presença de aerênquima, apontada pela seta, no córtex de raiz lateral do Tratamento 4

Figura 20 - Presença de aerênquima, apontada pela seta, no córtex de raiz lateral do Tratamento 5

Dantas et al. (2001), estudaram a correlação entre a atividade celulase e a formação de aerênquimas em plântulas de milho submetidas a hipoxia. Os resultados mostraram um aumento na formação de aerênquimas nas raízes logo após a hipoxia, atingindo 50% do total do córtex no quarto dia de hipoxia. Resultados semelhantes foram alcançados por Pires et al. (2002), em trabalho com soja cultivada sob inundação, os autores observaram elevada ruptura no córtex das raízes adventícias, que o levaram a acreditar se tratar de formação de aerênquima do tipo lisígeno, que cria espaços vazios, favorecendo a transferência de O_2 para as raízes.

Kawase (1978), afirma que a hipoxia promove a formação anaeróbica de etileno, que é catalisador da enzima celulase, responsável pela formação do aerênquima pela lise da célula. O etileno também é usado como resposta no exame laboratorial de atividade vital dos nódulos fixadores de nitrogênio na raiz das plantas (rizóbios), pela aplicação de acetileno. A cromatografia à gás, como é chamado o referido exame, foi realizado em duas etapas do experimento. A primeira análise, realizada aos 15 DAE, detectou baixa atividade nos rizóbios, possivelmente em decorrência da falta de inoculação nas sementes ou de um desequilíbrio químico no substrato. A segunda análise ocorreu aos 45 DAE e, dessa vez, a resposta foi praticamente insignificante, apontando a morte dos poucos rizóbios em atividade detectados na primeira análise. Esses resultados destoam dos resultados apresentados por Calheiros et al. (2001) e Michin & Summerfield (1976), este último trabalhou com feijão Caupi (*Vigna unguiculata*, L. Walp) reconhecidamente mais resistente ao encharcamento.

O efeito do encharcamento, no caso deste trabalho, não parece ter relação com a redução da atividade dos rizóbios, já que no tratamento 1 também ocorreu a mesma redução.

Os parâmetros de produção, como o número de plantas, o número de vagens, o número de grãos, a massa de 100 grãos e a produtividade, foram mensurados e analisados estatisticamente através do programa SAS. A análise estatística mostrou o elevado valor do coeficiente de variação dos dados para todos os parâmetros analisados, característica do tipo de experimentação, onde se está tentando uma sobrevivência às

condições adversas, e não o contrário, num experimento onde se busca a melhor condição que refletirá na melhor produção.

Os dados aqui analisados são brutos, sem passar por nenhum tratamento prévio para retirada de dados discrepantes ou eliminação de valores iguais a zero. Com esse procedimento podemos ter uma análise mais rigorosa, mas por outro lado deixamos de ter diferenças significativas entre tratamentos e/ou fatores que visualmente se manifestaram e que, devido aos baixos valores de médias e do alto valor do coeficiente de variação, ficaram ocultas.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados das análises de comparação de médias entre tratamentos, no que se refere à quantidade de plantas existente ao final do ciclo da cultura. Notamos que o tratamento 2 se difere de todos os demais tratamentos, visto que seu valor médio é igual a zero, devido a morte de todas as plantas desse tratamento ocorrida no segundo dia de aplicação do T.A.H.. Esse resultado é importante para confirmarmos a sensibilidade do feijoeiro, apontada por Hodgson et al. (1989).

Tabela 7. Comparação de médias dos tratamentos em relação ao número de plantas

Tratamentos.	1	2	3	4	5	Média
T1	-----	0.00	0.06	0.04	0.07	28.67
T2	0.00	-----	0.00	0.00	0.00	0.00
T3	0.06	0.00	-----	0.91	0.86	23.17
T4	0.04	0.00	0.91	-----	0.75	22.88
T5	0.07	0.00	0.86	0.75	-----	23.62

Valores iguais ou inferiores a 0,05 diferem entre si pelo teste de Tukey.

O tratamento 1 diferiu dos tratamentos 2 e 4, o mesmo não ocorrendo com relação aos tratamentos 3 e 5. Portanto, o tratamento 4 apresenta o resultado menos satisfatório para esse parâmetro, com média igual a 22,88, dentre os tratamentos que sofreram indução de adaptação à hipoxia, já que dentre os tratamentos induzidos foi o

único que se diferenciou da testemunha. O coeficiente de variação dessa variável foi de 28,24.

Na análise do parâmetro de número de vagens produzidas (Tabela 8), os tratamentos 1 e 2 diferem-se entre si e individualmente com os demais tratamentos, ocupando os extremos dos valores de média obtidos. Os tratamentos que passaram pela indução de adaptação à hipoxia não diferiram estatisticamente entre si e a análise estatística aponta um elevado coeficiente de variação de 45,65.

Tabela 8. Comparação de médias de tratamentos em relação ao número de vagens produzidas

Tratamentos.	1	2	3	4	5	Média
T1	-----	0.00	0.00	0.00	0.00	101.83
T2	0.00	-----	0.00	0.00	0.00	0.00
T3	0.00	0.00	-----	0.97	0.64	19.83
T4	0.00	0.00	0.97	-----	0.64	20.00
T5	0.00	0.00	0.64	0.64	-----	22.88

Valores iguais ou inferiores a 0,05 diferem entre si pelo teste de Tukey.

Analisando-se esse resultado conjuntamente com o resultado de número de plantas, podemos inferir que as técnicas de manejo do nível freático, usadas como indutores de adaptação à hipoxia, permitiram a planta completar seu ciclo, mas os efeitos da hipoxia ocorrida no estágio de floração da cultura reduziram a produção de vagens da mesma.

Observando-se os resultados de número de plantas e de vagens produzidas do tratamento 5, podemos dizer que a manutenção de plantas até o final do ciclo conferiu valores de média de produção de vagens maior para esse tratamento. Já no caso do tratamento 3 essa coerência não se repetiu.

O tratamento 4, dentre os tratamento induzidos, teve o pior desempenho no parâmetro de número de grãos produzidos (Tabela 9), não diferindo significativamente do tratamento 2, que não teve indução alguma e apresenta média

igual a zero. Não houve diferença significativa entre os tratamentos induzidos 3, 4 e 5, apresentando a análise um coeficiente de variação de 41,98. O tratamento 1 se difere dos demais tratamentos, sendo a testemunha e apresentando o maior valor de média.

Analisando-se os dados da Tabela 9 em conjunto com os dados da Tabela 8, nota-se que os tratamentos 3 e 5 possuem maior número de grãos por vagem em comparação com o tratamento 4, já que os mesmos tratamentos possuíam valores de média iguais para número de vagens.

Tabela 9. Comparação de médias de tratamentos em relação ao número de grãos produzidos

Tratamentos	1	2	3	4	5	Média
T1	-----	0.00	0.00	0.00	0.00	453.67
T2	0.00	-----	0.01	0.07	0.00	0.00
T3	0.00	0.01	-----	0.26	0.88	41.83
T4	0.00	0.07	0.26	-----	0.29	25.25
T5	0.00	0.00	0.88	0.29	-----	39.62

Valores iguais ou inferiores a 0,05 diferem entre si pelo teste de Tukey.

Na Tabela 10 se encontram as comparações entre médias dos tratamentos com respeito ao parâmetro de massa de 100 grãos. Nessa tabela podemos verificar que os tratamentos 1 e 2 diferem estatisticamente entre si e individualmente com os tratamentos 3, 4 e 5, representando os limites superior e inferior de média, com os valores de 23,63 e 0,0 para os tratamentos 1 e 2, respectivamente.

Os tratamentos 3, 4 e 5 não diferiram significativamente entre si, demonstrando que a hipoxia afetou a qualidade do grão em qualquer que fosse o manejo do nível freático adotado, embora tenha permitido a produção e evidenciado a sua eficiência pela falta de produção do tratamento 2, não induzido. A quebra de rendimento ficou em torno de 40% com relação ao tratamento 1, testemunha.

Entre os tratamentos induzidos 3, 4 e 5, o tratamento 4 aparentemente produziu grãos maiores do que os produzidos pelos tratamentos 3 e 5, já que o valor

médio de número de grãos foi inferior e a massa de 100 grãos foi igual aos demais tratamentos induzidos. Possivelmente o menor número de grãos possibilitou um maior acúmulo de reservas nos mesmos pelas plantas do tratamento 4.

Tabela 10. Comparação de médias de tratamentos em relação a massa de 100 grãos (gramas)

Tratamentos	1	2	3	4	5	Média
T1	-----	0.00	0.00	0.00	0.00	23.63
T2	0.00	-----	0.00	0.00	0.00	0.00
T3	0.00	0.00	-----	0.21	0.55	12.64
T4	0.00	0.00	0.21	-----	0.45	14.80
T5	0.00	0.00	0.55	0.45	-----	13.62

Valores iguais ou inferiores a 0,05 diferem entre si pelo teste de Tukey.

Quanto a produtividade dos tratamentos, expressa em sacas/ha, novamente os tratamentos 1 demais tratamentos (Tabela 11). Não houve diferença significativa entre os tratamentos 2, 3, 4 e 5 a nível de 5% de probabilidade, com o coeficiente de variação elevado e igual a 50,62.

Tabela 11. Comparação de médias de tratamentos em relação à produtividade (sacas/ha)

Tratamentos	1	2	3	4	5	Média
T1	-----	0.00	0.00	0.00	0.00	20.48
T2	0.00	-----	0.08	0.11	0.17	0.00
T3	0.00	0.08	-----	0.76	0.60	1.37
T4	0.00	0.11	0.76	-----	0.81	1.14
T5	0.00	0.16	0.60	0.81	-----	0.98

Valores iguais ou inferiores a 0,05 diferem entre si pelo teste de Tukey.

Comparando os tratamentos 3, 4 e 5 com o tratamento 1 verifica-se a magnitude da quebra de produtividade provocada pela hipoxia, em torno de 95%. Deve-

se relevar esses valores pelo fato de ter havido produção, mesmo depois de 7 dias inundados, demonstrando que o caminho para se chegar a uma adaptação é esse, restando encontrar o melhor manejo do nível freático. O período de hipoxia também foi bastante drástico e irreal, podendo o T.A.H. ser reduzido para 5 dias de inundação, isto é, mais que o dobro do tempo de resistência das plantas do tratamento 2.

Quanto a incorporação de fibra de coco, as análises estatísticas apontam resultados interessantes, apesar de em muitos parâmetros não ter havido diferença significativa entre os tratamentos. Nos tratamentos induzidos não houve diferença significativa entre as médias das sub-parcelas, mas notar-se que os valores de média no tratamento 5 se apresentam iguais para todos os parâmetros analisados, assim como nos tratamentos 3 e 4, o valor da média da sub-parcela com fibra de coco se apresentou menor para todos os parâmetros estudados.

O tratamento 1 apresenta diferenças significativas entre as médias das sub-parcelas nos parâmetros de número de vagens, de grãos produzidos e de produtividade. Nesses três parâmetros as médias das sub-parcelas com fibra de coco se mostraram maiores do que as sub-parcelas em que o substrato não possui fibra de coco. Nos parâmetros de número de plantas e peso de 100 grãos não houve diferença significativa entre as médias das sub-parcelas.

Este comportamento pode ter sua explicação em duas hipóteses: primeira, a fibra de coco é reconhecidamente retentora de água, o que viria a favorecer no tratamento 1, que não sofria hipoxia, e seria desfavorável nos tratamentos 3, 4 e 5. Nesse último tratamento, a hipoxia curta e esporádica permitiu que os valores das médias ficassem praticamente iguais; segunda, a fibra de coco em água pode promover salinidade no solo, prejudicando as plantas.

Em todos os casos citados acima, as diferenças visuais das sub-parcelas em questão eram evidentes (Figura 21) e, possivelmente, o baixo valor das médias e o alto coeficiente de variação dos dados tenham acarretado esses resultados estatísticos.

Figura 21 - Diferenciação das sub-parcelas em função dos substratos: à direita sem fibra de coco e à esquerda com fibra de coco. (a) Seqüência dos tratamentos 2, 5, 4 e 2. (b) Seqüência dos tratamentos 4, 4, 1 e 2. (c) Detalhe do T3. (d) Detalhe do T4

4.5 Estado nutricional das plantas

Os resultados da análise foliar realizada ao final dos tratamentos se encontram na Tabela 12. Analisando primeiramente os resultados obtidos no tratamento 1, testemunha, entre os substratos com e sem fibra de coco, notamos haver uma pequena diferença nos macro-nutrientes N e P, com valores menores nas sub-parcelas com fibra de coco. A maior diferença ocorreu no macro-nutriente K, de forma inversa, com teores do elemento de $53,3 \text{ g.kg}^{-1}$ no substrato com fibra de coco contra $18,0 \text{ g.kg}^{-1}$ no substrato sem a fibra. Essa diferença de teores entre os substratos pode ser o responsável pela

diferença significativa da produtividade do feijão, como visto anteriormente na análise dos parâmetros de produção. Os micro-nutrientes Ca, Mg, S, Cu e Zn apresentam valores inferiores nas plantas do substrato com fibra de coco e de Fe e Mn superiores nas plantas desse substrato.

No tratamento 3, as plantas conseguiram apresentar valores de N muito próximos dos teores apresentados pela testemunha. O teor de P foi o dobro em relação ao T1 e os valores de Ca a metade, ainda em comparação com a testemunha. Para os demais elementos o comportamento foi semelhante ao da testemunha com exceção das pequenas inversões ocorridas nos valores de Mg e Fe, onde o substrato sem fibra apresenta valores inferiores para o Mg e superiores para o Fe. Comparando somente os substratos sem fibra de coco dos tratamentos 1 e 3, podemos notar que o tratamento 3 apresenta concentração maior dos elementos K, S, Mg e Zn.

No tratamento 4 os teores de N e K se encontram reduzidos, em comparação com o T1 e T3. Quanto aos micro-nutrientes desse tratamento, houve menor acúmulo de Cu, Mn e Zn, em comparação com o T3. Observa-se também uma maior concentração de Ca com relação ao T3 (Tabela 12).

Tabela 12. Resultados da análise foliar das plantas de feijão dos tratamentos.

Trat.	Subst	Elemento									
		N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
T1	C/coco	30.7	3.5	53.3	53.3	3.9	3.7	13	1361	123	70
T1	S/coco	31.8	4.0	18.0	80.0	11.7	3.9	16	1206	82	85
T3	C/coco	30.8	7.0	39.2	30.8	10.1	4.5	14	1461	145	98
T3	S/coco	33.4	9.0	34.6	48.8	9.8	7.4	18	1487	131	162
T4	C/coco	25.8	5.3	29.1	35.5	10.0	4.6	10	1347	65	81
T4	S/coco	-	5.5	26.7	57.3	8.8	5.8	10	1877	101	69
T5	C/coco	35.0	4.7	34.5	61.6	10.1	4.1	15	1660	94	159
T5	S/coco	-	4.8	34.4	55.1	10.1	4.4	15	1677	95	161

No tratamento 5 (Tabela 12), praticamente não houve diferença nos teores dos elementos analisados entre os substratos, com exceção de uma ligeira diferença em

Ca, em que o substrato com fibra de coco apresenta valor maior. Esse fato possivelmente se deve a forma de inundações intermitentes do mesmo. O teor médio de Fe se apresenta maior em comparação com os demais tratamentos.

4.6 Relações hídricas nas plantas

A medida da resistência estomática caracteriza bem o estado de estresse em que a planta se encontra, como uma tentativa de conservar a quantidade mínima de água para atender às suas necessidades vitais e reflete com fidelidade os tratamentos aqui aplicados (Figura 22). Verifica-se que a testemunha, que não sofreu estresse hipóxico, se mantém constante com valores abaixo de 2 s.cm^{-1} . O tratamento 2 aparece representado por somente um ponto no primeiro dia de determinações, por não se conseguir mais leituras nesse tratamento, em função da morte das plantas no segundo dia do T.A.H., mas o valor inicial de resistência estomática no T2 igual ao T1 demonstra estarem em mesmas condições de aeração, clima e umidade. No tratamento 3 os valores de resistência vão aumentando com o passar dos dias, já que o nível freático se mantém a 15cm de profundidade. No momento em que o T.A.H. foi aplicado a resistência estomática dá um pico em seu valor, chegando a 12 s.cm^{-1} , decrescendo da metade do T.A.H. em diante. A resistência vai se suavizando até chegar aos patamares iniciais no fim da drenagem do nível freático. No tratamento 4 o comportamento é semelhante ao T3, embora os valores sejam mais elevados, devido à elevação gradativa do nível freático nesse tratamento. Tanto no T3, quanto no T4, a redução nos valores de resistência estomática ainda na metade do T.A.H., pode significar a utilização das modificações fisio-morfológicas alcançadas pelas plantas.

Figura 22 – Resistência estomática medida às 10:00 h do dia, durante a aplicação dos tratamentos

O tratamento 5, que vinha sofrendo inundações intermitentes, somente expressou elevação da resistência estomática durante a aplicação do T.A.H., de forma gradativa e uniforme, sem o pico de valores demonstrado pelos T3 e T4. ao término do T.A.H. os valores de resistência decresceram ao nível inicial. O valor máximo de resistência no T5 foi de $8,5 \text{ s.cm}^{-1}$.

A Figura 23 mostra a transpiração ocorrida nas plantas de cada tratamento durante a duração dos mesmos. Notamos que o tratamento 1 apresenta uma taxa de transpiração regular durante quase todo o experimento e maior em comparação aos demais tratamentos. Essa taxa ficou em média entre 8 e $10 \mu\text{g.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, com pequenas variações resultantes de intempéries do dia. O tratamento 2 estava em condições iguais aos T1 até que lhe fosse aplicado o T.A.H., momento em que a transpiração declina bruscamente. O tratamento 3 e 4 apresentam as mesmas taxas transpirométricas durante todo o experimento, sofrendo reduções nessa taxa a partir da aplicação dos tratamentos, e como função inversa da resistência, apresenta taxa de transpiração menor durante o período do T.A.H.. Após o mesmo, os referidos tratamentos esboçam uma pequena elevação e se mantêm constantes nesse ponto. O tratamento 5 teve o comportamento melhor nesse parâmetro antes e durante o teste hipóxico, tendo redução na sua taxa, mas

com valores ainda superiores aos T3 e T4. Depois do T.A.H. a taxa se manteve baixa e constante.

Estes resultados nos mostram que, apesar da adaptação das plantas ao encharcamento, a redução na taxa de transpiração foi acentuada e comprometeu a produção de grãos da cultura.

Figura 23 – Transpiração das plantas medida às 10:00 h do dia, durante o experimento

Analisando o comportamento do parâmetro de resistência estomática no decorrer do dia, às vésperas da aplicação do T.A.H. (Figura 24), podemos notar que todos os tratamentos apresentam comportamento semelhante. A resistência nas primeiras horas do dia começa com valores próximos de zero, vai crescendo com o passar das horas até atingir o valor máximo próximo das 10:00h da manhã. A partir desse ponto há um declínio dos valores. Comparando os tratamentos, que estão sob a mesma demanda transpirométrica, podemos ver que o T5 apresenta valores superiores ao T1, indicando que está mais sensível às condições ambientais e tentando manter a água no interior das plantas. Os tratamentos T3 e T4 demonstram estarem melhores adaptados, mantendo a resistência estomática numa faixa de valores menores do que a do T1. O comportamento diferenciado dos tratamentos hipóxicos em relação ao T1 fica mais evidente nas horas do dia em que a demanda transpirométrica é maior.

Figura 24 – Resistência estomática no decorrer do dia, antes da aplicação do T.A.H.

Como a transpiração é controlada pela resistência estomática os resultados de sua medida são bastante coerentes com a mesma e de forma inversa (Figura 25). Considerando os dados a partir das 8:00h, os tratamentos possuem taxas de transpiração muito próximas, com exceção do T5 que possui taxa menor. Às 10:00h ocorre a diferenciação, com os T3 e T4 numa taxa maior que o T1. A partir desse ponto a taxa transpirométrica começa a decair. As medições realizadas às 6:00h não condizem com a realidade e, provavelmente são reflexos da deficiência do aparelho nessa hora do dia, em função da alta umidade na folha da planta.

Figura 25 – Transpiração das plantas no decorrer do dia, antes da aplicação do T.A.H.

Quando analisamos os resultados de resistência estomática durante a aplicação do T.A.H. (Figura 26), os tratamentos se revelam bastante diferentes em seu comportamento nessa condição de hipoxia. O T1 se mantém com valores próximos de zero por não estar sob hipoxia. O T3 demonstra ser o melhor adaptado por apresentar valores menores de resistência, com o valor máximo ocorrendo ao meio dia. O T4 foi o tratamento que apresentou o maior valor de resistência, mas depois decaiu à valores muito próximos ao T3. O T5 variou bastante em torno de valores elevados de resistência.

Figura 26 – Resistência estomática medida durante a aplicação do T.A.H.

Figura 27 – Transpiração medida durante a aplicação do T.A.H.

A transpiração ocorrida durante a aplicação do T.A.H. pode ser observada na Figura 27. O T1 variou de forma uniforme e crescente de 9,0 a 14,5 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ às 10:00 e 16:00h, respectivamente. O T4 se encontrava com valores baixos de transpiração e os T3 e T5 com valores próximos um do outro.

O potencial hídrico nas plantas é o estado de energia em que a água se encontra dentro das plantas, em comparação ao seu estado livre e puro, numa determinada temperatura. Esse parâmetro nos dá idéia da turgidez da planta, ou do estado de estresse hídrico em que ela se encontra naquele momento. Na Figura 28 observa-se o comportamento do potencial hídrico nas folhas das plantas das sub-parcelas sem fibra de coco, medida nos primeiros dias de aplicação dos tratamentos. Como as condições atmosféricas a que estão submetidas as plantas dos tratamentos é idêntica, podemos comparar os tratamentos, atribuindo as diferenças ao manejo do nível freático imposto a cada um deles. Na referida Figura, podemos notar que às 6:00h da manhã as plantas estão bastante túrgidas, com potenciais em torno de 300kPa, e que somente o T5 se diferencia um pouco dos demais, com potencial na casa dos 450kPa, provavelmente devido a inundação sofrida por ele ter ocorrido a mais tempo do que a irrigação dos T1 e T2. Com o aumento da transpiração, em função das condições atmosféricas, o potencial em todos os tratamentos vai diminuindo e se diferenciando um do outro. Nota-se que os T3 e T4 apresentam maior potencial, devido ao nível freático estar a 15cm de profundidade, deixando o solo úmido na superfície. O T5 reduz o potencial, mas numa proporção menor do que o T1 e T2, de forma bastante uniforme. O potencial de 10:00h para as 14:00h continua diminuindo e chega ao menor valor, aglutinando os valores de todos os tratamentos na faixa dos 900 aos 1100kPa. O reduzido valor das 14:00 é reflexo das horas mais quentes do dia, em que é natural esse atraso nas reações.

A fibra de coco no substrato parece dar maior uniformidade em termos de umidade, observando que há quase uma linearidade no decorrer do dia, com uma pequena diferenciação nos T3 e T5 com relação aos demais (Figura 29). O potencial nos T1, T2 e T4 às 6:00h estava em torno dos 300 kPa e reduziu para os 700kPa às 10:00h. Nos T3 e T5 o potencial se diferenciou dos demais às 10:00h, com valores em torno dos

450kPa. As medições feitas às 14:00h mostram os tratamentos não hipóxicos (T1 e T2) em torno dos 1000kPa e os demais em torno dos 1200kPa.

Figura 28 – Potencial hídrico na folha das plantas das sub-parcelas sem fibra de coco no início dos tratamentos

Figura 29 – Potencial hídrico na folha das plantas das sub-parcelas com fibra de coco no início dos tratamentos

Figura 30 - Potencial hídrico na folha das plantas, medido na véspera da aplicação do T.A.H.

Após 20 dias de aplicação dos tratamentos, às vésperas da aplicação do T.A.H., o potencial hídrico nas folhas dos tratamentos foi medido e o resultado dessa mensuração se encontra na Figura 30. Nota-se que, das 6:00h às 8:00h o comportamento de todos os tratamentos é bastante homogêneo, passando dos 200kPa para os 400kPa, respectivamente. Com o aumento da demanda transpirométrica o comportamento do potencial no T3 é bastante variado, às 10:00h apresentando uma redução de 400kPa para 1000kPa, às 12:00h aumentou para a faixa dos 700 – 800kPa, retornou para os 1000kPa às 14:00h e novamente aumentou para 800kPa às 16:00h. Esse comportamento reflete a maior sensibilidade às variações atmosféricas desse tratamento. Os T1, T4 e T5 seguiram de forma linear até os 900kPa às 14:00h e se diferenciaram um pouco às 16:00h, dentro da faixa de 700 a 1000kPa.

Na Figura 31 pode-se analisar o comportamento dos tratamentos, com relação ao potencial hídrico, durante a aplicação do T.A.H.. Podemos ver que os tratamentos hipóxicos têm um comportamento muito próximo do T1, significando uma boa condição de manutenção do potencial hídrico, mesmo sob condição de hipoxia acentuada. O T3 apresenta uma variação um pouco maior em relação aos demais na avaliação realizada às 12:00h, atingindo o menor valor de potencial, aproximadamente

1500kPa. Todos os tratamentos nessa fase apresentam potenciais maiores, comparados aos dias anteriores demonstrados, possivelmente em função das condições atmosféricas, já que o T1 possui o mesmo comportamento.

Figura 31 - Potencial hídrico na folha das plantas, medido durante a aplicação do T.A.H.

5 CONCLUSÕES

As condições de realização desse trabalho e os resultados obtidos possibilitaram concluir que:

Os tratamentos hipóxicos aplicados induziram as plantas à modificarem-se fisio-morfológicamente, emitindo raízes adventícias, formando aerênquimas e alterando a transpiração e a resistência estomática, o que possibilitou a cultura concluir todos os seus estádios fisiológicos, até a maturação dos grãos.

A eficácia da indução à adaptação dos tratamentos T3, T4, e T5 ao encharcamento, ficou evidenciada pela resistência ao teste de adaptação à hipoxia (T.A.H.) e pela morte das plantas do T2, não induzido, ao segundo dia de alagamento.

Não houve diferença significativa nos parâmetros de produção entre os tratamentos hipóxicos (T3, T4 e T5), não permitindo a identificação do manejo do nível freático mais eficaz para a adaptação à hipoxia, dentre os referidos tratamentos.

O tempo de duração do teste de adaptação à hipoxia (T.A.H.) aparentemente foi excessivo, sugerindo a redução para 5 dias, visto que esse é maior do que o dobro do tempo de resistência das plantas do tratamento T2, sem indução à adaptação, que foi de 2 dias. Esse procedimento poderá melhorar as respostas dos parâmetros de produção, com possível diferenciação entre os tratamentos hipóxicos.

A fibra de coco aplicada ao substrato das parcelas teve influência negativa no aspecto químico do solo, aumentando a condutividade elétrica do mesmo e, possivelmente, trazendo prejuízos na absorção dos nutrientes pelas plantas dessas parcelas. O efeito físico esperado e que pudesse ser benéfico se mostrou muito tímido e

de pouca duração sob as condições estudadas, não sendo recomendado para condições de alagamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. A. B.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E. et al. Fertilidade de solos de várzeas do Sul de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.11, p.2287-2294, nov. 2000.
- ANDRADE, W.E.B. Limitações nutricionais para a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) e do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em cultivo sucessivo em solo de várzea da região norte fluminense. Lavras, 1997.125p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras.
- BENICASA, M. M. P. Fisiologia de culturas adaptadas as condições de várzeas. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O APROVEITAMENTO DE VÁRZEAS, 1., Jaboticabal, 1984. **Anais**. Jaboticabal: FCAV, 1984. p.131-139.
- BRADFORD, K. J.; YANG, S. F. Physiological responses of plants to waterlogging. **HortScience**, v.16, p.25-30, 1981.
- BRAILSFORD, R.W.;VOESENEK, L.A.C.J.; BLOOM, C.W.P.M.; et al. Enhanced ethylene production by primary roots of *Zea mays* L. in response to sub-ambient partial pressures of oxygen. **Plant Cell & Environment**. v.16, p.1071-1080. 1993.
- CALHEIROS, R. O.; CRUCIANI, D. E.; ARRUDA, F. B.; et al. Efeito de três manejos de lençol freático na adaptação fisiomorfológica do feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.) ao encharcamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.25, p.779-789. 2001.
- CANNELL, R. Q.; BELFORD, R. K. GALES, K. DENNIS C.W.; et al. Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yeld of winter wheat. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. v.31, p.117-132, 1980.
- CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaio de laboratório de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre: PRONI/IPH, UFRGS, 1986. 216p.

- CRAWFORD, R.M.M. Metabolic adaptation to anoxia. In: HOOK, D.D.; CRAWFORD, R.M.M. (Ed.). **Plant life in anaerobic environments**. Ann Arbor: Science Publisher. 1978. p.119-136.
- CRAWFORD, R. M. M.; BRAENDLE, R. Oxygen deprivation stress in a changing environment. **Journal of Experimental Botany**, v.47, n.295, p.145-149, 1996.
- DANTAS, F. B.; ARAGÃO, C.A.; ALVES, J.D. Cálcio e o desenvolvimento de aerênquimas e atividade de celulase em plântulas de milho submetidas a hipoxia. **Scientia Agrícola**, v.58, n.2, p.251-257, 2001.
- DERISIO, J.C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. São Paulo: Cetesb, 1992. 210p.
- FAGERIA, N.K.; OLIVEIRA, I.P.; DUTRA, L.G. Limitações químicas dos solos de cerrado e de várzeas. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. **Deficiências nutricionais na cultura do feijoeiro e suas correções**. Goiânia, 1996. p.8-11. (Embrapa. CNPAF. Documento, 65).
- FAQUIN, V.; ANDRADE, C.A.B.; FURTINI NETO, A.E.; ANDRADE, A.T.; et al. Resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solos de várzea do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.4, p.651-660, out./dez. 1998.
- GARRITY, D. P.; PERNITO, R. Mungbean response to surface drainage when grown as a pre-rice crop on waterlog-prone ricelands. **Agricultural and Water Management**, v.29, p.299-314, 1996.
- HODGSON, A. S.; HOLLAND, J.F.; RAYNER, P. Effects of field slope and duration of furrow irrigation on growth and yield of six grain-legumes on a waterlogging-prone vertisol. **Field Crops Research**, v.22, p.165-180, 1989.
- JACKSON, M. B.; HALL, K. C. Early stomatal clousure in waterlogged pea plants is mediated by abscisic acid in the absence of foliar water deficits. **Plants, Cell and Environment**, v.10, p.120-130, 1987.
- JACKSON, M. B.; KOWALEWSKA, A. K. B. Positive and negative messages from roots induce foliar desiccation and stomatal closure in flooded pea plants. **Journal of Experimental Botany**, v.34, n.142, p.493-506, 1983.

- JOLY, C. A. Flooding tolerance: a reinterpretation of Crawford's metabolic theory. **Proceedings of the Royal Society of Edimburgh**, v.102B, p.343-354, 1994.
- KAWASE, M. Aerenchyma formation: how plants adapt to Waterlogging. **Ohio Report on Research and Development**, v.63, n.1, p.14-15, 1978.
- LAMSTER, E. C. Programa Nacional de Aproveitamento Racional de Várzeas – Provárzeas nacional. **Informe Agropecuário**, v.65, n.6, p.308, 1980.
- LARSON, K.D.; DAVIES, F.S; SCHAFFER, B. Flood water temperature and stem lenticel hypertrophy in *Mangifera indica* (Anacardiaceae). **American Journal of Botany**, v.78, p.1397-1403. 1991.
- McNAMARA, S.T.; MITCHELL, C.A. Adaptative stem adventitious root responses of two tomato genotypes to flooding. **HortScience**. v.25, p.100-103. 1990.
- MINCHIN, F. R.; SUMMERFIEL, R. J. Symbiotic nitrogen fixation and vegetative growth of cowpea (*Vigna unguiculata*, (L) Walp.) in waterlogged conditions. **Plant and Soil**, v.45, p.113-127, 1976.
- PIRES, J. L. F.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.1, p.41-50. 2002.
- PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos** Madrid: Agric. Española, 1978. 528p.
- SÁ, J.S.; CRUCIANI, D.E.; PEREIRA, J.R.B.. Efeitos da velocidade de rebaixamento do nível freático na produtividade da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., Salvador, 2002. **Resumos**. Salvador: SBEA, 2002. p.54-55.
- SEONG, R. C.; SOHN, J. Y.; SHIM, S. Responses of soybean cultivars to excessive soil moisture imposed at different growth stages. **Korean Journal of Crop Science**, v. 45, n.5, p. 282-287, 2000. /Resumo em **CAB Abstracts on CD-ROM**, 2000-01/
- SILVEIRA, P. M. **Drenagem para a cultura do feijão**. Goiânia: EMBRAPA, CNPAF, 1992. 36p. (EMBRAPA. CNPAF. Circular Técnica, 26).
- SOUSA, C. A. F. de; SODEK, L. Respostas metabólicas de plantas à deficiência de oxigênio. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v.14, n.2, p.83-94, 2002.

- 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.1465-1667, 2000. /Resumo em **AGRIS Abstracts on CD-ROM**, v.5, 1999-01/.
- VOESENEK, L. A. C. J.; SMAN, A. J. M.; VAN-DER HARREN, F. J. M.; et al. An amalgamation between hormone physiology and plant ecology: a review on flooding resistance and ethylene. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.11, n.3, p.171-188. 1992. /Resumo em **AGRIS Abstract on CD-ROM**, 1993-94/.