

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
APLICAÇÃO DE ÁGUA E NITROGÊNIO NA
CULTURA DA ALFACE AMERICANA**

PATRÍCIA APARECIDA MARQUES SILVA

2006

PATRÍCIA APARECIDA MARQUES SILVA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE ÁGUA E
NITROGÊNIO NA CULTURA DA ALFACE AMERICANA

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Curso de Doutorado em
Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação
e Drenagem, para a obtenção do título de "Doutor".






..... Orientador




..... Prof. Dr. Geraldo Magela Pereira




LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2006

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de
Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Silva, Patrícia Aparecida Marques

Análise técnica e econômica da aplicação de água e nitrogênio na cultura da
alface americana / Patrícia Aparecida Marques Silva. – Lavras : UFLA, 2005.
93 p. : il.

Orientador: Geraldo Magela Pereira.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Alface americana. 2. Irrigação. 3. Adubação nitrogenada. 4. função de produção. 5. Superfície de resposta.
6. Ambiente protegido. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-635.5287

PATRÍCIA APARECIDA MARQUES SILVA

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE ÁGUA E
NITROGÊNIO NA CULTURA DA ALFACE AMERICANA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 19 de dezembro de 2005.

Prof. Dr. Rovilson José de Souza	UFLA
Prof. Dr. Ricardo Pereira Reis	UFLA
Prof. Dr. Jony Eishi Yuri	UNINCOR
Profa. Dra. Fátima Conceição Rezende	UFLA


Prof. Dr. Geraldo Magela Pereira

UFLA

(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

“Cada pessoa em sua existência pode ter duas atitudes: construir ou plantar. Os construtores podem demorar anos em suas tarefas, mas um dia terminam aquilo que estavam fazendo. Então, param e ficam limitados por suas próprias paredes. A vida perde sentido quando a construção acaba. Mas existem os que plantam. Estes, às vezes sofrem com tempestades, com as estações, e raramente descansam. Mas, ao contrário de um edifício, o jardim jamais pára de crescer. E, ao mesmo tempo em que exige atenção do jardineiro, também permite que, para ele, a vida seja uma aventura. Os jardineiros sempre se reconhecerão entre si porque sabem que na história de cada planta está o crescimento de toda a Terra.”

Paulo Coelho.

Aos meus pais, José Santana e Vera, pelo amor e incentivo.

Ao meu esposo, César, pelo apoio e amor.

Às minhas filhas, Gabriella e Rafaella, pelo carinho e alegria transmitidos.

Às minhas irmãs, Cláudia, Raquel, Simone e Danielle, pela força e ajuda em todos os momentos.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, luz em todos os momentos da vida, fonte de fé e amor.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização do curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de auxílio.

Ao professor e orientador Geraldo Magela Pereira, pelo ensino, apoio e dedicação prestados neste trabalho.

Aos professores co-orientadores Rovilson José de Souza e Luís Antônio Lima, pelo auxílio na condução do experimento e observações que propiciaram a melhoria desta tese.

Ao profissional e Professor Jony Eishi Yuri, pela colaboração na doação das mudas de alface americana e sugestões apresentadas neste trabalho.

Ao Professor Ricardo Pereira Reis, pelo apoio na análise econômica do experimento e à Professora Fátima Conceição Rezende, pelas sugestões dadas.

Aos demais professores do curso de pós-graduação em Irrigação e Drenagem e do Departamento de Engenharia, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia, Sr. Berg, Neném, José Luís, Daniela, Juliana e Sandra, e do Setor de Olericultura, Sr. Pedro, Sr. Milton e Leandro, pela grande ajuda e serviços prestados no decorrer do experimento.

Aos bolsistas José Henrique e Jorge, pela ajuda na condução do experimento.

Às minhas amigas de curso, Joelma, Mirian e Polyanna, pela amizade, convívio e companheirismo, e aos demais colegas do curso de Engenharia Agrícola, pela convivência e companheirismo.

A todos que contribuíram para o êxito deste trabalho científico.

3.7.1 Função de produção da alface americana tendo a água como fator variável.....	34
3.7.2 Função de produção da alface americana tendo o nitrogênio como fator variável.....	38
3.7.3 Superfície de resposta.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 Resultados gerais do experimento.....	42
4.1.1 Parâmetros climáticos na casa de vegetação.....	42
4.1.2 Avaliação do sistema de irrigação.....	44
4.1.3 Lâminas aplicadas.....	45
4.2 Altura de plantas.....	48
4.3 Número de folhas externas e internas.....	49
4.4 Circunferência da cabeça.....	51
4.5 Diâmetro do caule.....	53
4.6 Comprimento do caule.....	55
4.7 Produtividade total da alface americana.....	57
4.8 Produtividade comercial da alface americana.....	59
4.8.1 Efeito das lâminas de água sobre a produtividade comercial.....	61
4.8.2 Lâmina de água economicamente ótima.....	63
4.8.3 Efeito das doses de nitrogênio sobre a produtividade comercial.....	66
4.8.4 Dose de nitrogênio economicamente ótima.....	67
4.8.5 Superfície de resposta.....	68
4.8.6 Curva de decisão de W e N.....	70
5 CONCLUSÕES.....	73
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
ANEXOS.....	83

RESUMO

SILVA, Patrícia Aparecida Marques. **Análise técnica e econômica da aplicação de água e nitrogênio na cultura da alface americana.** 2005. 93 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

Estudar o efeito das lâminas de água, doses de nitrogênio e sua interação sobre a produtividade econômica e algumas características produtivas da alface americana, foi o principal objetivo deste trabalho, que foi realizado na Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, no período de setembro a novembro de 2004 em casa de vegetação. O delineamento experimental utilizado foi fatorial 4 x 4 em blocos casualizados, sendo que os tratamentos constituíram-se da combinação de quatro lâminas de irrigação ($W_1=91,99$; $W_2=142,79$; $W_3=186,34$; $W_4=237,14$ mm) com quatro níveis de adubação nitrogenada ($N_0=0$; $N_1=80$; $N_2=160$; $N_3=320$ kg ha⁻¹) com três repetições. Utilizou-se a cultura da alface americana, cultivar Raider. As irrigações diárias foram controladas com base na evaporação de um minitanque (EVM), sendo os tratamentos W_1 , W_2 , W_3 e W_4 , correspondentes a 0,35EVM, 0,70EVM, 1,0EVM e 1,35EVM, respectivamente. A cultura foi instalada no espaçamento de 0,30 m x 0,30 m, irrigada por um sistema de irrigação por gotejamento, com gotejadores autocompensantes de 1,6 L h⁻¹ de vazão, espaçados de 0,3 m. Após análise dos resultados concluiu-se que a aplicação de 205,26 mm de água e de 257,14 kg ha⁻¹ de nitrogênio proporcionou estimar uma produtividade máxima de 26.959,93 kg ha⁻¹ que correspondeu à obtenção do lucro máximo, considerando os preços dos fatores água (R\$ 0,44 mm⁻¹), nitrogênio (R\$ 2,09 kg⁻¹) e da alface americana (R\$ 0,80 kg⁻¹). A produtividade física máxima de 27.004,49 kg ha⁻¹ foi estimada com 208,03 mm e 290,5 kg ha⁻¹ de nitrogênio. O menor valor médio da produtividade comercial da alface americana (13.814,25 kg ha⁻¹) foi obtido no tratamento onde foi aplicada a menor lâmina de água (91,99 mm). Esta produtividade é inferior àquela obtida no tratamento com dose 0 kg ha⁻¹ de nitrogênio, cuja produtividade média foi de 19.943,7 kg ha⁻¹, indicando, portanto, que a água é um fator altamente limitante para o desenvolvimento da alface americana.

¹ Comitê Orientador: Geraldo Magela Pereira – UFLA (Orientador), Rovilson José de Souza – UFLA e Luiz Antônio Lima – UFLA.

ABSTRACT

SILVA, Patrícia Aparecida Marquês. **Technical and economical analysis of water and nitrogen application on crisphead lettuce.** 2005. 93 p. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.

The main objective of this experiment, carried out, from September to December/2004, inside a greenhouse at the Federal University of Lavras, in Minas Gerais, was to study the effect of water and nitrogen applications, and interaction between these factors, on economic yield and on yield characteristics of crisphead lettuce. A 4 x 4 factorial experimental design with randomized blocks and three replications was used. Treatments were determined by combinations of four water depths ($W_1=91.99$; $W_2=142.79$; $W_3=186.34$; $W_4=237.14$ mm) and four nitrogen levels ($N_0=0$; $N_1=80$; $N_2=160$; $N_3=320$ kg ha⁻¹). Crisphead lettuce (cv. raider) was grown under daily irrigations applications computed based on the evaporation measured on a reduced pan (E_{Vm}). Treatments W_1 , W_2 , W_3 e W_4 , corresponded to, respectively, 0.35E_{Vm}, 0.70E_{Vm}, 1.0E_{Vm}, and 1.35E_{Vm}. A 0.30m x 0.30 m plant spacing was observed and irrigation water was applied trough a drip irrigation system with 1.6 L h⁻¹ emitters spaced 0.30 m apart. Under the price scenario considered, water at R\$ 0.44 mm⁻¹, nitrogen at R\$ 2.09 kg⁻¹ and crisphead lettuce at R\$ 0.80 kg⁻¹, the maxim profit, and the maxim economical productivity, estimated at 26,959.93 kg ha⁻¹, was achieved with the application of 205.26 mm of water and 257.14 kg ha⁻¹ of nitrogen. The maxim physical productivity (27,004.49 kg ha⁻¹) would be achieved by applying 208.03 mm of water and 290.5 kg ha⁻¹ of nitrogen. The smaller average value of crisphead lettuce commercial yield (13,814.25 kg ha⁻¹) would be achieved with the application of the lowest water depth (91.99 mm). This yield is smaller than the yield achieved by the treatment with 0 kg ha⁻¹ of nitrogen (19,943.7 kg ha⁻¹). Therefore, irrigation water was the limiting factor for crisphead lettuce growth.

Guidance Committee: Geraldo Magela Pereira – UFLA (Major Professor), Rovilson José de Souza – UFLA and Luiz Antônio Lima – UFLA.

substancialmente a incidência de doenças fúngicas e bacterianas, e aumentando a produtividade e a qualidade do produto final. Ademais, por não molhar toda a superfície do solo, reduzindo as perdas por evaporação, e por apresentar alta eficiência de irrigação, pode reduzir o uso de água em até 60%. Por estas razões, o gotejamento tem sido um sistema muito utilizado no Brasil. Outro aspecto importante é que são mais eficientes para o uso da quimigação, como a aplicação de fertilizantes via água de irrigação, porquanto aumentam a eficiência de uso dos mesmos, reduzindo as perdas dos nutrientes por lixiviação, melhorando, dessa forma, o controle da concentração de nutrientes no solo e economizando mão-de-obra e energia, além de oferecer flexibilidade de operação (Marouelli et al., 2000).

A produtividade das culturas pode ser influenciada por diversos fatores, entre os quais, o modo de aplicação de fertilizantes e a dosagem utilizada. Dentre os elementos que influenciam o desenvolvimento das plantas, o nitrogênio é de vital importância e, embora seja o mais abundante na natureza, representando cerca de 78% da composição do ar atmosférico (na forma gasosa não é disponível para a maioria das plantas), é um dos elementos que limitam a produção das culturas (Neves, 1981). Por ser uma hortaliça cujas folhas constituem a parte utilizável, o nitrogênio na dosagem correta, entre todos os nutrientes absorvidos pela alface, é o que promove maior incremento na produtividade e na massa da planta (Filgueira, 2000).

A otimização da rentabilidade constitui o principal objetivo da empresa agrícola e está associada ao uso racional dos recursos disponíveis no processo de produção, de forma a se obterem os mais altos níveis de rendimento econômico. A produção agrícola tem como fatores complementares na rentabilidade econômica, a água e os nutrientes, e o uso eficiente desses recursos permite a sustentabilidade hídrica e edáfica de uma região, fator preponderante para o êxito da agricultura. Além disso, as maiores variações no rendimento da cultura

em questão é resposta às mudanças nos níveis destes dois recursos, expressando a alta sensibilidade do rendimento aos níveis destes fatores de produção. Portanto, ao utilizar os procedimentos das funções de resposta permite-se encontrar soluções na otimização do uso da água e dos fertilizantes, obtendo-se o máximo do produto com determinado custo de produção (Soares et al., 2002).

Sob esse aspecto, percebe-se a necessidade de realizar estudos que visem a correta utilização destes fatores de produção no cultivo da alface americana irrigada. Portanto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar o efeito da água, do nitrogênio e da interação destes fatores sobre os rendimentos produtivo e econômico da cultura da alface americana irrigada por gotejamento, nas condições edafoclimáticas de Lavras, sul de Minas Gerais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura da alface americana

A alface americana (*Lactuca sativa* L) é uma planta herbácea da família Asteraceae, como o almeirão e a chicória ou escarola, possuindo um caule muito curto, no qual estão inseridas as folhas. Apresenta cabeça compacta, com folhas imbricadas e nervuras salientes, semelhantes a um repolho. A coloração das folhas externas é verde-escura e a parte interna apresenta coloração creme-amarelada e aspecto crocante que se mantém, mesmo em contato com alimentos quentes e, por isso, sendo muito utilizada em sanduíches pelas redes de lanchonetes (Bueno, 1998). Apresenta raízes do tipo pivotante, quando semeada diretamente no campo, podendo atingir até 60 cm de profundidade, porém, tem ramificações delicadas, finas e curtas que ocorrem quando é realizado o transplântio de mudas, explorando apenas os primeiros 25cm de solo, faixa considerada de grande importância quando se faz uso da adubação e irrigação (Filgueira, 2000; Yuri et al., 2002). As cultivares americanas, segundo Conti (1994), apresentam grande acúmulo de matéria verde e seca. São normalmente cultivares tardias, pendoando após 60 dias, quando as condições climáticas são favoráveis.

A cultura da alface foi muito popular na Roma antiga e introduzida na Europa pelos romanos (Davis et al., 1997) e difundiu-se rapidamente para a França, Inglaterra e, posteriormente, para toda a Europa, mostrando tratar-se de uma cultura popular e de uso extensivo. Foi, então, introduzida nas Américas e, desde 1647, é cultivada no Brasil (Ryder & Whitaker, 1976).

A grande aceitação deste grupo de alface no Brasil se deve à sua boa conservação durante o período de armazenamento e, principalmente, à sua resistência às altas temperaturas na época de verão, possibilitando o cultivo

durante o ano inteiro. Segundo Sanders (1999), nos Estados Unidos, a alface americana é considerada o vegetal mais consumido em forma de salada, chegando a produzir, em 1997, cerca de 3.480.000 toneladas, em 80.000 hectares, com produtividade média de 43,5 t ha⁻¹ (Rhodes, 1999).

2.2 Exigências climáticas

A alface é uma hortaliça de ciclo curto e crescimento rápido, sendo muito exigente quanto às condições climáticas, disponibilidade de água e nutrientes para que ocorra um acelerado incremento de massa.

Planta tipicamente de inverno, a alface americana é capaz de resistir a baixas temperaturas, inclusive a geadas leves. Temperaturas acima de 24°C inibem a germinação das sementes. Baixas temperaturas noturnas inferiores a 20°C são mais importantes, em relação às diurnas. Temperaturas noturnas superiores a 20°C favorecem o pendoamento precoce; entretanto, as cultivares lançadas mais recentemente são mais resistentes às altas temperaturas diurnas (20°C a 30°C) (Yuri et al., 2002).

Sanders (1999) observou que a alface americana é adaptada à condição de temperatura amena, tendo como ótima a faixa de 15,5°C a 18,3°C. Próximo de 21,1°C a 26,6°C, a planta floresce e produz sementes. Pode tolerar alguns dias com temperaturas de 26,6°C a 29,4°C, desde que as temperaturas noturnas sejam baixas.

Em fase de crescimento rápido, a alface americana exige uma amplitude térmica entre dia e noite, devendo as temperaturas diurnas estarem entre 14°C e 18°C e as noturnas entre 5°C e 8°C (Serrano Cermeño, 1996, citado por Fernandes & Martins, 1999). Temperaturas acima de 20°C estimulam o pendoamento, que é acelerado à medida que a temperatura aumenta (Yuri, 2000), podendo provocar queima das bordas, formar cabeças pouco compactas

e, também, contribuir para a ocorrência de deficiência de cálcio, conhecida como “tip-burn”. Baixas temperaturas, próximas do congelamento, em plantas jovens, não provocam danos, porém, o desenvolvimento é retardado, podendo prejudicar plantas no ponto de colheita e danificando as folhas externas.

Segundo Sganzerla (1995) e Cermeño (1990), a alface é muito sensível às temperaturas elevadas e exige grandes amplitudes térmicas, por isso, a temperatura máxima não deve ultrapassar os 30°C e a temperatura mínima 6°C, associadas a outras condições, como a umidade relativa do ar, a variedade e a forma de irrigação.

Além da temperatura, o fotoperíodo também afeta a planta, pois, a alface exige dias curtos durante a fase vegetativa e dias longos para que ocorra o pendoamento. Segundo Conti (1994), o comprimento do dia não é problema para o cultivo de verão no Brasil, pois as cultivares européias importadas já estão adaptadas a dias mais longos do que os que ocorrem no país. A expansão da cultura está se transferindo para as áreas de latitudes menores, conseqüentemente, o fotoperíodo não é obstáculo. Entretanto, em condições de menores latitudes, verifica-se o aumento da temperatura. Nessas situações, há a necessidade de se escolher áreas de elevadas altitudes. Nas condições de verão do sul de Minas Gerais, o cultivo é viável a partir de uma altitude de 850 m. Temperatura noturna acima de 20°C, associada a altitudes inferiores a 850 m, aumenta a possibilidade de pendoamento precoce, inviabilizando a atividade nesta estação do ano. Portanto, à medida que diminui a latitude do local, para compensar o aumento da temperatura, torna-se necessária a escolha de regiões de altitudes mais elevadas (Yuri et al., 2002).

A umidade relativa do ar mais adequada ao bom desenvolvimento da alface varia de 60% a 80%, mas, em determinadas fases de seu ciclo, apresenta melhor desempenho, com valores inferiores a 60%. Umidade relativa muito

elevada favorece a ocorrência de doenças, fato que constitui um dos problemas da cultura produzida em estufa (Cermeño, 1990).

2.3 Manejo da irrigação

A alface é uma das hortaliças mais exigentes em água durante o seu período de desenvolvimento, o que influencia de forma decisiva na produtividade e na qualidade comercial da cabeça. Portanto, as irrigações devem ser freqüentes e abundantes, devido à ampla área foliar e à evapotranspiração intensiva, bem como ao sistema radicular delicado e superficial e à elevada capacidade de produção. Quando irrigadas adequadamente, as folhas são tenras e as plantas grandes. Experimentos realizados com irrigação demonstram que a massa da planta e a produtividade aumentam linearmente com a quantidade de água aplicada, até se atingir o máximo de produção, a partir do qual há uma queda em função do excesso de umidade no solo (Filgueira, 2000).

Jensen (1983), citado por Monteiro (2004), define manejo da irrigação como a atividade de planejamento e tomada de decisão que o agricultor irrigante deve assumir durante o desenvolvimento da cultura. Para que uma atividade agrícola irrigada por um sistema localizado funcione de modo racional, dois aspectos devem ser levados em consideração: o retorno econômico da cultura irrigada e os custos de instalação, manutenção e operação do sistema, sendo a irrigação localizada apropriada para condições de agricultura intensiva e de alto retorno econômico (Benami & Ofen, 1993 citados por Monteiro, 2004).

A irrigação, quando realizada no momento oportuno e na quantidade correta, é decisiva para o sucesso da cultura, favorecendo o desenvolvimento e a produtividade da alface. No gotejamento, a água é aplicada de forma localizada junto às raízes das plantas, sem que a parte aérea e a faixa entre as fileiras de plantio sejam molhadas. O sistema apresenta, como principais vantagens, a

economia de água e de mão-de-obra, a alta eficiência de irrigação e a facilidade da fertirrigação. Pode ser utilizado nos mais diversos tipos de solos, topografia e clima, minimizando a incidência de doenças foliares e de plantas invasoras (Silva & Marouelli, 1998).

Bernardo (1995) afirma que o momento da irrigação pode ser definido tanto pelo sintoma como pela medição da deficiência de água na planta. Também pode ser determinado pela disponibilidade de água no solo, pelo turno de rega, pelo balanço de água no solo e pela evapotranspiração real.

Para que a técnica da irrigação seja eficiente, a quantificação acurada da água a ser aplicada é fundamental. Um método bastante utilizado pelos agricultores irrigantes é o tanque Classe A, pela sua facilidade de operação, baixo preço e relativa acurácia (Silva et al., 1998). Esse tanque foi desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Norte Americano (U.S.W.B) e é de uso generalizado, inclusive no Brasil (Pereira et al., 1997).

Diversos trabalhos procuraram estabelecer, para a cultura da alface uma lâmina de água condizente com as condições edafoclimáticas de uma determinada região ou, mais especificamente, de um local, baseando-se na porcentagem de evaporação do tanque Classe A (Gomes, 2001). Porém, devido às suas dimensões, consideradas grandes para médias e pequenas estufas, alguns pesquisadores têm utilizado, para cultivo em ambiente protegido, um tanque reduzido, com dimensões de 0,60 m de diâmetro e 0,25 m de altura, com bons resultados.

Fernandes et al. (2001) verificaram que o requerimento de água da cultura do melão, estimado pelo tanque Classe "A" modificado (tanque reduzido), quando comparado com o obtido por uma estação agrometeorológica automática, por meio da equação de Penman-Monteith, apresenta correlação da ordem de 0,7646 e concordância de 0,9373, tornando viável a utilização do tanque reduzido para pequenos produtores.

Já Medeiros et al. (1997), comparando a evaporação medida em um tanque Classe A e o minitanque, dentro e fora da estufa, verificaram que a evaporação do minitanque foi, em média, 15% a mais do que o tanque Classe A, enquanto que, dentro da estufa, correspondeu a 47% da evaporação medida na estação meteorológica.

Os evaporímetros são bastante utilizados na determinação da lâmina a ser aplicada. Para se ter um manejo rigoroso da lâmina de água aplicada, pode-se monitorar a umidade do solo momentos antes da irrigação ou 24 horas após a mesma com determinações da tensão de água no solo.

Existe uma série de instrumentos utilizados na determinação da tensão de água do solo, porém, a medida do potencial matricial por meio das leituras de tensiômetros tem sido um dos mais utilizados, em função da facilidade de aquisição dos mesmos (Figuerêdo, 1998).

O tensiômetro determina diretamente o potencial matricial em diferentes pontos do solo, em campo. Este dispositivo consiste de uma cápsula de cerâmica porosa conectada a um vacuômetro, mas, recentemente, vem sendo substituído por um tensímetro digital, por meio de um tubo geralmente de PVC ou acrílico. Quando o dispositivo é colocado no solo, a água contida na cápsula tende a entrar em equilíbrio com a tensão da água no solo ao seu redor. Qualquer mudança no teor de água do solo e, conseqüentemente, em seu estado de energia, será transmitida à água no interior da cápsula, sendo indicada rapidamente pelo dispositivo de leitura. A cápsula do tensiômetro funciona como uma membrana semi-permeável, permitindo a livre passagem de água e íons, não permitindo a passagem de ar e partículas de solo. Teoricamente, o tensiômetro poderia medir tensões de até 101,3 kPa; na prática, porém, só é possível medir até 80 kPa, aproximadamente. Acima desta tensão, o ar penetra no instrumento através dos poros da cápsula, a água começa a passar do estado líquido para o estado de vapor e as medições perdem precisão (Gomide, 2000).

2.4 Importância do nitrogênio

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pela maioria das culturas que necessitam de adições regulares desse nutriente, por apresentar acentuado dinamismo no solo (Malavolta, 1980). Na planta, é um nutriente essencial, sendo constituinte da proteína e das clorofilas. De acordo com Filgueira (2000), o fornecimento adequado de nitrogênio favorece o crescimento vegetativo, expande a área fotossinteticamente ativa e eleva o potencial produtivo da cultura, beneficiando, principalmente, as hortaliças herbáceas por constituírem de folhas, hastes tenras e inflorescências.

Em casos de deficiência, ocorre redução na produtividade em todas as culturas, sendo os sintomas mais severos nas hortaliças folhosas, como é o caso da alface, podendo retardar o crescimento e induzir ausência ou mal-formação da cabeça, as folhas mais velhas tornam-se amareladas e desprendem-se com facilidade (Garcia et al., 1982). Situações de excesso de nitrogênio podem ocasionar a queima das folhas, aumentar a suscetibilidade da planta a certas doenças fúngicas e bacterianas, dificultar a absorção de outros nutrientes, prolongar o ciclo cultural retardando a colheita (Filgueira, 2000), além de promover desenvolvimento vegetativo exagerado (Weir & Cresswell, 1993).

As culturas absorvem N ao longo do ciclo cultural, porém, é pequena a absorção na etapa inicial do desenvolvimento. Portanto, é prejudicial aplicar a quantidade total de N necessária por ocasião do plantio, já que a eficiência na utilização aumenta pela aplicação parcelada.

Em solos bem adubados com nitrogênio, as culturas são, relativamente, menos propensas aos efeitos das secas devido ao bom desenvolvimento do seu sistema radicular. A irrigação impõe uma maior necessidade de nutrientes e os solos bem adubados, produzem rendimentos muito maiores por unidade de água de irrigação que solos mal adubados, desde que os fertilizantes estejam no

mesmo nível em que as plantas extraem a água do solo (Doorenbos & Pruitt, 1977).

2.5 Água e nitrogênio no rendimento das culturas

A situação ideal para o rendimento das culturas ocorre quando há água disponível no solo e o fluxo da água atende à demanda atmosférica, ou seja, a evapotranspiração real (ET_r) é igual à evapotranspiração máxima (ET_m). Toda vez que a ET_r é menor que a ET_m, significa que existe restrição de água e o rendimento pode estar sendo afetado (Reichardt, 1990). O rendimento máximo de uma cultura, segundo Doorenbos & Kassan (1979), é aquele obtido de uma cultivar altamente produtiva e bem adaptada ao respectivo ambiente de crescimento em condições tais que não haja limitações de água, nutrientes, pragas e doenças, durante todo o período de crescimento.

Conforme Aguiar (1989), apesar da relação de produtividade versus evapotranspiração ser a mais adequada para prever rendimentos, uma vez que é considerada a água realmente consumida pela planta, a produtividade como função da lâmina de água aplicada desperta mais interesse nos agricultores, pela possibilidade do controle exercido sobre a lâmina de água aplicada.

Segundo Reichardt (1978), a água é indispensável para a produção, e por isso a sua falta ou excesso afeta, significativamente, a produtividade de uma cultura, tornando indispensável o seu manejo racional para se conseguir a maximização da produção. Isso foi comprovado por diversos autores de que a irrigação afeta diretamente a produtividade em culturas como melão, feijão, abóbora e melancia (Andrade Júnior et al., 1996; Bezerra & Mourão, 2000; Medeiros et al., 2000; Pereira et al., 2000).

Para a cultura da alface, diversos autores testaram várias frações de irrigação baseadas na evaporação de um tanque evaporimétrico ou na medida da

tensão de água no solo por meio do tensiômetro, obtendo respostas positivas quanto ao aumento da produtividade. Gomes (2001), trabalhando com a cultura da alface, verificou que essa hortaliça respondeu em produtividade à medida que utilizou maiores lâminas de irrigação. Hamada & Testelaf (1996), em experimento trabalhando com a cultura da alface irrigada por gotejamento a fim de avaliar a influência sobre o desenvolvimento e a produtividade comercial, observaram que quanto maior a lâmina de água aplicada, maior a produtividade comercial e melhor o desenvolvimento.

Andrade Júnior (1994) avaliando o efeito de quatro lâminas de irrigação na alface (25%, 50%, 75% e 100% da evaporação do tanque classe A) sobre o comportamento fisiológico e produtivo de uma cultivar do tipo americana ('Mesa 659'), sob cultivo protegido, obteve melhores resultados de número de folhas, área foliar e matéria seca durante o crescimento para os níveis de irrigação correspondentes a 50% e 75% da evaporação do tanque classe A (ECA). No final do ciclo os melhores resultados de número de folhas, área foliar, matéria seca e produtividade foram proporcionados pelo nível de 75% da ECA.

Santos (2002), avaliando o efeito de diferentes tensões de água no solo sobre o comportamento produtivo da alface americana, cv. Raider, em ambiente protegido, verificou que, para a obtenção de maiores produtividades (total e comercial), as irrigações devem ser realizadas quando as tensões de água no solo a 0,15 m de profundidade estiverem em torno de 15 kPa; a produtividade da cultura reduziu-se linearmente em função do aumento da tensão da água no solo no intervalo entre 15 e 89 kPa.

Klar (1988) afirma que a fertilidade do solo, em particular, promove uma maior eficiência de uso da água pelas culturas, sendo o nitrogênio um dos nutrientes que promovem expressiva variação na eficiência do uso da água pelas culturas. Segundo Monteiro (2004), quando o rendimento de uma cultura

aumenta com a adubação, a eficiência do uso da água pela cultura também aumenta.

A alface é bastante exigente em nutrientes. Garcia et al. (1982) afirmam que, sendo a alface composta basicamente por folhas, a cultura responde mais ao fornecimento de nitrogênio, nutriente que requer um manejo especial quanto à adubação, por ser de fácil lixiviação e pelo fato da cultura absorver cerca de 80% do total extraído nas últimas quatro semanas do ciclo (Katayama, 1993). Filgueira (2000) também afirma que a maior parte do nitrogênio deve ser aplicada em cobertura.

Outra constatação é a de que as plantas se comportam de forma diferenciada em relação à absorção de nutrientes, em função da época de produção. No caso da alface americana, por se tratar de uma cultura típica de inverno, durante essa época, observa-se maior eficiência na absorção e, conseqüentemente, na produtividade e qualidade pós-colheita. Por outro lado, nas condições de verão, o comportamento da planta e sua necessidade nutricional são modificados, ocorrendo reduções na produtividade e na qualidade. Apesar disso, na maioria das vezes, as mesmas doses de fertilizantes são utilizadas nas duas épocas de cultivo, enfatizando a necessidade de pesquisas sobre o assunto, que servirão de base para que os fertilizantes sejam usados pelos produtores de forma mais racional e econômica, além de evitar problemas de solo, como excesso de sais.

Como a técnica de fertirrigação na cultura da alface americana é relativamente recente no Brasil, têm-se poucos trabalhos nesta área. Madeira et al. (2000) recomendam a aplicação de cerca de 40 kg ha⁻¹ de N e 80 kg ha⁻¹ de K₂O.

Maroto (1986) recomenda que sejam fornecidas 4 doses iguais de N, sendo a primeira junto com os demais fertilizantes no preparo dos canteiros, a

segunda quando a planta estiver com 6 a 8 cm, a terceira 15 dias após e a quarta no início da fase de formação da “cabeça”.

Bueno (1998) estudou o efeito da adubação nitrogenada via fertirrigação sobre a cultura da alface americana cv. Lorca. As doses de N aplicadas variaram de 0 a 105,6 kg ha⁻¹ e foram avaliados o número de folhas, a massa da raiz, o comprimento e a largura do caule, a circunferência da cabeça e a produção total e comercial. A produção total alcançou o máximo no nível de 80 kg ha⁻¹ de N, enquanto que a produção comercial não foi afetada pelas doses de N, apesar de ter sido cerca de 32% superior à testemunha.

Alves (1995), estudando o efeito da adubação nitrogenada via fertirrigação e aplicação convencional em alface tipo lisa, cv. Regina-440, em estufa, verificou que a fertirrigação foi superior em todas as características estudadas. A produção encontrada foi de 18,8 t ha⁻¹, nos tratamentos com fertirrigação, enquanto que, na adubação convencional, foi de 13,49 t ha⁻¹ e a testemunha foi de 11,3 t ha⁻¹.

Alvarenga (1999), avaliando doses de N de 120 a 240 kg ha⁻¹ e de cálcio na produção da alface americana, cv. Raider, em cultivo protegido verificou que o nitrogênio é extremamente importante no crescimento e acúmulo de matéria fresca na planta de alface. Verificou também que, nas condições de outono, o melhor rendimento foi obtido com a dose de 240 kg ha⁻¹ de N e que a aplicação do nitrogênio deve ser parcelada em quantidades menores no início e maiores no final das aplicações.

Rocio et al. (1999), estudando os efeitos da adubação nitrogenada na alface tipo lisa, cv Regina, visando determinar as doses mais adequadas, concluíram que o melhor rendimento foi obtido com a dose de 200 kg ha⁻¹, porém, a melhor qualidade foi obtida quando se aplicou a dose de 50 kg ha⁻¹.

Pereira et al. (2000), estudando os efeitos das lâminas de água e doses de nitrogênio em cobertura sobre a produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.),

observaram que o feijociro respondeu positivamente à irrigação, até o nível em que o excesso de água foi prejudicial no seu desenvolvimento. A produção de grãos aumentou com a elevação da dose de nitrogênio em cobertura. A lâmina de água apresentou efeito significativo para a massa de 100 grãos, número de vagens por planta e de grãos por vagem. O nitrogênio em cobertura foi significativo para massa de 100 grãos, número e massa de grãos por vagem.

Marouelli et al. (2000), estudando a resposta da aboboreira a diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio, constataram que o número máximo de frutos comerciáveis foi obtido para a dose de nitrogênio de 114 kg ha^{-1} e a lâmina de irrigação de 401 mm, enquanto a produtividade máxima foi obtida para 109 kg ha^{-1} e 385 mm.

Bezerra & Mourão (2000), avaliando a produtividade de frutos de melão em função de diferentes níveis de irrigação, verificaram diferenças significativas entre as produtividades médias dos tratamentos, diminuindo de 26.089 para 8.776 kg ha^{-1} , quando a aplicação das lâminas de água reduziram de 100% para 20% da ECA.

Yuri (2004), em experimento realizado no município de Três Pontas, MG, com a alface americana, cultivar Raider, durante o verão (jan. e fev. de 2003), verificou que, para a massa fresca total da parte aérea, a dose de $48,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (mais 30 kg ha^{-1} aplicados pelo produtor em cobertura) associado a dose de 180 kg ha^{-1} de K_2O em cobertura adicional promoveu o maior rendimento, próximo ao encontrado por Bueno (1998). Nas condições de Lavras, MG, este último autor obteve um rendimento de $0,801 \text{ kg planta}^{-1}$, utilizando $80,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de N em cobertura via fertirrigação.

Resende (2004), estudando doses de N e molibdênio com a mesma cultivar, obteve um rendimento comercial de $0,45 \text{ kg planta}^{-1}$ com a aplicação de $89,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de N em cobertura.

Observa-se que tanto para lâminas de irrigação como para níveis de adubação são recomendações genéricas que objetivam a obtenção de produtividades físicas máximas, podendo ser inviável sob o ponto de vista econômico, já que a eficiência econômica não corresponde, necessariamente, à eficiência técnica. Portanto, é necessário que sejam desenvolvidos estudos a fim de determinar lâminas de irrigação e níveis de adubação nitrogenada para a cultura da alface, acompanhada de uma análise econômica.

2.6 Função de produção

O rendimento de uma cultura agrícola está condicionado a vários fatores referentes ao solo, à planta e ao clima. Dentre esses fatores, a água e o nitrogênio merecem destaque especial, não só pelo custo de produção que juntos, representam cerca de 10% no caso da melancia (Mousinho et al., 2003), mas também devido à necessidade de se utilizar a água e o nitrogênio eficientemente, de modo a garantir a disponibilidade da água e manter o solo com condições de ser utilizado por gerações futuras. Alia-se a estas considerações o fato destes dois recursos proporcionarem as maiores variações no rendimento da cultura, em função dos níveis utilizados.

Existe uma relação funcional entre estes fatores e a produção das culturas, que é característica de cada condição ambiental. A exploração ótima, do ponto de vista econômico, de uma cultura, requer a utilização de níveis adequados destes fatores (Hexem & Heady, 1978).

Segundo Frizzone (1993) e Ferguson (1989), a função de resposta ou de produção das culturas é uma relação física entre as quantidades de certo conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que podem ser obtidas do produto, para dada tecnologia conhecida. Assim, ao se supor que a função de resposta representa o máximo que se pode obter com o uso de cada combinação

de insumos, está se definindo uma relação funcional entre os insumos e o produto. Estas funções de produção são relações empíricas, geralmente obtidas mediante uma análise de regressão entre uma variável dependente e uma ou várias variáveis independentes, segundo um determinado modelo que pretende representar um sistema de produção.

Os estudos agroeconômicos de experimentos utilizando a função de produção são bastante difundidos em alguns países. Sua utilização para determinar os níveis ótimos econômicos dos fatores é o principal ponto crítico (Lanzer & Paris, 1980 citados por Dantas Neto, 1994). Existem diferentes aplicações das funções de produção, como, por exemplo, determinar a relação entre a quantidade de água aplicada e os benefícios resultantes, previsão de safra e estudar como diferentes ambientes podem alterar a produção das culturas.

Nos casos específicos em que a água e o nitrogênio são os fatores de produção, as informações são escassas. Os poucos trabalhos realizados utilizaram modelos polinomiais, sendo o quadrático o modelo que melhor estimou a produtividade de uma cultura, principalmente quando se trabalha com uma maior amplitude nos níveis dos fatores de produção. O rendimento das culturas e a lâmina de água aplicada, por exemplo, têm sido melhor representados por uma relação do tipo quadrática.

O modelo polinomial quadrático foi utilizado por Frizzone (1986) com o intuito de determinar os níveis ótimos econômicos de água e de nitrogênio para a cultura do feijão, encontrando uma função de produção com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9460, indicando um ótimo ajustamento dos fatores à estimativa da produtividade.

Frizzone et al. (1982), analisando a cultura do feijoeiro num Latossolo Vermelho Escuro, verificaram um aumento de 23,4% no rendimento de grãos, quando a lâmina de água aplicada aumentou de 350 para 530 mm. Foram

testadas quatro lâminas de água, verificando-se um aumento linear da produtividade com o aumento da lâmina d'água no intervalo de 350 a 530 mm.

Frizzone et al. (1995), estudando o efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio na produção da aveia para forragem, obtiveram uma função de produção utilizando um modelo estatístico polinomial quadrático e, a partir da função de produção, estimaram uma produtividade máxima de 6.900 kg ha^{-1} a ser obtida com a aplicação de 319,2 mm de água e $152,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrogênio.

Aguiar (1989), baseado nas produtividades médias de feijão caupi, obtidas em função das lâminas totais de água aplicada, verificou que a irrigação provocou aumento no rendimento de grãos, conforme uma relação quadrática.

Determinando a função de produção do melão aos níveis de água e nitrogênio no Vale do Curu, CE, utilizando irrigação por sulcos, Barros (1999) verificou que o modelo polinomial de segundo grau representou melhor a variação do rendimento da cultura em função das lâminas de água e das doses de nitrogênio, sem, contudo, ser significativa a interação entre os fatores água e nitrogênio.

Em pesquisa objetivando estimar uma função de produção da melancia à água e ao nitrogênio no Vale do Curu, CE, irrigado por sulcos, Soares et al. (2002) obtiveram uma relação quadrática entre lâminas de água infiltrada e doses de nitrogênio e a produtividade da melancia, mas, não constataram significância entre a interação água e nitrogênio.

Mousinho (2003), buscando a estimativa da função de resposta da melancia à aplicação de água e nitrogênio para as condições edafoclimáticas de Fortaleza, CE, utilizando irrigação por gotejamento, constatou um comportamento quadrático da produtividade em relação aos fatores estudados, permitindo estimar uma máxima produtividade de $30.806 \text{ kg ha}^{-1}$, a ser obtido com o emprego de 693,5 mm de água e $222,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrogênio.

Oliveira (1993), com o objetivo de estimar uma função de resposta para o milho doce em função da água e do nitrogênio apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,7418, e constatou que as doses de 330,8 mm de água e de 182,2 kg ha⁻¹ de nitrogênio foram as que proporcionaram a produtividade de 10.584 kg ha⁻¹ e que corresponderam ao lucro máximo.

Carvalho (1995), trabalhando com a cultura da cenoura, observou que a maior produtividade comercial foi estimada em 36.000 kg ha⁻¹ com uma lâmina de irrigação de 443 mm e que a lâmina que promoveria o maior retorno econômico foi estimada em 438 mm, com uma produtividade de 35.900 kg ha⁻¹, tendo o custo variável tido pouca influência na determinação da lâmina de máximo retorno econômico.

Monteiro (2004), estudando o efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio na produtividade do melão, encontrou uma produtividade máxima estimada de 25.496,1 kg ha⁻¹, obtida com 612,1 mm de água e 224,4 kg ha⁻¹ de nitrogênio, enquanto que a máxima receita líquida estimada de R\$/ha 3.353,24 foi obtida com uma produtividade de 25.384,3 kg ha⁻¹ de melão, utilizando 609,2 mm de água e 186,2 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação (Figura 1) situada no Setor de Olericultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), durante os meses de setembro e novembro de 2004. A UFLA situa-se no município de Lavras, Sul de Minas Gerais, numa altitude média de 910 metros, 21°14'S, Latitude Sul e 45°00'W, Longitude Oeste.

A casa de vegetação possui estrutura de madeira do tipo “capela”, apresentando 2,0 m de pé-direito, 3,5 m de altura na parte central, 31,0 m de comprimento e 10,0 m de largura (310 m²), coberta por um filme de polietileno transparente de baixa densidade (PEBD), com aditivo anti-ultravioleta e espessura de 150 µm. As laterais foram fechadas com tela tipo clarite.



FIGURA 1. Vista geral do experimento no interior da casa de vegetação. UFLA, Lavras, MG, 2005.

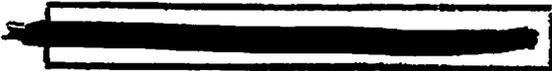
De acordo com a classificação de Köppen (Antunes, 1986), a região apresenta clima Cwa, ou seja, clima temperado suave, chuvoso, com inverno seco. O solo onde está situada a casa de vegetação foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico, textura muito argilosa (Embrapa, 1999). Os resultados das análises físicas e químicas do solo encontram-se na Tabela 1.

TABELA 1. Análise física e química de amostras de solo coletadas na área experimental*. UFLA, Lavras, MG. 2005.

Sigla	Descrição	Unidade	Amostras**	
			0 – 0,20m	0,20 – 0,40m
pH	em água (1:2,5)	-	5,9 AM	5,6 AM
P	Fósforo (Melich)	mg/dm ³	12,4 mb	3,1 B
K	Potássio	mg/dm ³	98 b	36 B
Ca	Cálcio	Cmol/dm ³	3,7 b	2,2 b
Mg	Magnésio	Cmol/dm ³	1,3 b	1,1 b
Al	Alumínio	Cmol/dm ³	0,0 MB	0,2 MB
H+Al	Ac.potencial	Cmol/dm ³	2,1 B	2,9 M
SB	Soma bases	Cmol/dm ³	5,3 b	3,4 M
(t)	CTC efetiva	Cmol/dm ³	5,3 b	3,6 M
(T)	CTC a pH 7,0	Cmol/dm ³	7,4 M	6,3 M
V	Saturação bases	%	71,4 b	53,9 b
M	Saturação alumínio	%	0 MB	6 MB
MO	Matéria orgânica	dag/kg	1,2 B	1,2 B
P-rem	Fósforo remanescente	mg/l	12,5 b	7,5 M
Zn	Zinco	mg/dm ³	2,5 A	1,1 M
Fé	Ferro	mg/dm ³	35,8 b	38,9 b
Mn	Manganês	mg/dm ³	15,1A	12,0 A
Cu	Cobre	mg/dm ³	3,4 A	3,0 A
B	Boro	mg/dm ³	1,9 A	1,3 A
S	Enxofre	mg/dm ³	37,2 mb	87,2 A
Areia	-	dag/kg	13	12
Silte	-	dag/kg	18	14
Argila	-	dag/kg	69	74
Ms	Massa específica do solo	mg/m ³	1,10	1,02

* Análise realizada no Laboratório do Departamento de Ciências do Solo, UFLA, Lavras, MG, 2004.

** A – alto; b – bom; mb – muito bom; B – baixo; M – médio; MB – muito baixo; AM – acidez média.



De acordo com Gomes et al. (1999) e com os resultados da análise do solo, não foi preciso realizar a correção da acidez do solo, pois, o índice de saturação por bases (V) foi superior ao recomendado para a cultura da alface (70%).

A curva característica de água do solo foi determinada no Laboratório de Relação Água-Solo-Planta do Departamento de Engenharia da UFI.A. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas camadas de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm de profundidade. As amostras indeformadas em anéis de PVC foram colocadas para saturar em água destilada durante 24 horas e depois foram levadas para uma bancada dotada de funil de Haines para determinação dos pontos de baixa tensão (0, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa) com 3 repetições para cada camada.

Já as amostras de solo com estrutura deformada (terra fina seca ao ar) foram colocadas em cilindros de PVC e, depois de saturadas, foram levadas para a câmara de pressão de Richards para a determinação dos pontos de maiores tensões (33, 100, 500 e 1500 kPa). Com os valores das umidades associadas às suas respectivas tensões foram obtidos os ajustes conforme os parâmetros empíricos da equação proposta por Van Genuchten (1980). O ajuste das curvas características foi processado utilizando-se do programa computacional SWRC (Dourado Neto et al., 1990). A partir das expressões (1) $r^2 = 0,998$, camada de 0 a 20 cm e (2) $r^2 = 0,997$, camada de 20 a 40 cm e dos valores observados, foram geradas as curvas características de água no solo (Figura 2).

$$\theta_{0-20} = 0,256 + \frac{0,403}{\left[1 + (0,4397 \cdot \Psi_m)^{1,7206}\right]^{0,4188}} \quad (1)$$

$$\theta_{20-40} = 0,242 + \frac{0,376}{\left[1 + (0,5680 \cdot \Psi_m)^{1,7748}\right]^{0,4365}} \quad (2)$$

em que:

θ = umidade atual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

ψ_m = tensão de água no solo (kPa).

A fim de determinar a umidade do solo na capacidade de campo, utilizaram-se as expressões (1) e (2), considerando uma tensão de água no solo correspondente a 10 kPa (Carvalho et al., 1996). Foram encontrados os valores de $\theta_{cc} = 0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $\theta_{cc} = 0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para as camadas de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, respectivamente.

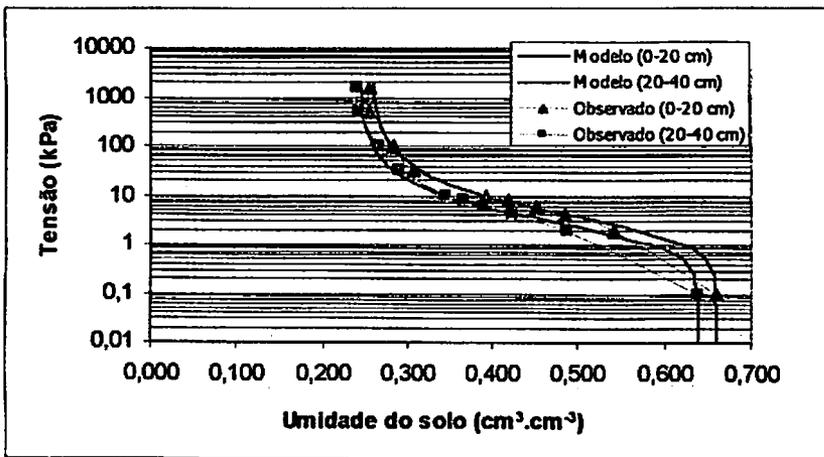


FIGURA 2. Curva característica de água no solo gerada, utilizando o modelo descrito por Van Genuchten (1980). UFLA, Lavras, MG, 2005.

A alface é considerada moderadamente sensível à salinidade, sendo seu rendimento potencial alcançado quando a condutividade elétrica do extrato saturado atinge o valor limiar de $1,3 \text{ dS.m}^{-1}$ (Rhoades & Miyamoto, 1990). Antes de iniciar o experimento, foram coletadas amostras de solo a fim de verificar a salinidade do solo. Estas amostras foram levadas para o laboratório e

determinada a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, o qual foi inferior ao valor limite recomendado para a cultura da alface.

3.2 Instalação e condução da cultura no campo

Para o preparo do solo foi utilizada a enxada rotativa antes da construção dos canteiros. A adubação de plantio foi realizada nos canteiros sete dias antes do transplântio, com base na análise química do solo (Tabela 1) e de acordo com Gomes et al. (1999). Foram aplicados 420 kg ha^{-1} de P_2O_5 , cuja fonte foi o superfosfato simples e 140 kg ha^{-1} de K_2O , sendo o cloreto de potássio empregado como fonte desse elemento e aplicados a lanço nos canteiros na camada superficial do solo e, posteriormente, incorporados ao solo com o auxílio de uma enxada.

Utilizou-se, neste experimento, a alface americana, cultivar Raider (Figura 3). As mudas foram doadas por um produtor do município de Alfenas, MG, as quais foram semeadas no dia 14 de setembro de 2004. Foram cultivadas em bandejas de isopor de 200 células sobre substrato próprio para o cultivo da alface. Decorridos 30 dias da semeadura, ocasião em que as mudas apresentavam por volta de 4 folhas definitivas, efetuou-se o transplântio.

O transplântio foi realizado manualmente em covas espaçadas de $0,30 \times 0,30 \text{ m}$. A adubação nitrogenada foi feita via fertirrigação e seguindo as recomendações da 5ª aproximação (Gomes et al., 1999) para a cultura da alface cultivada em ambiente protegido, na condição de solo estudada. O adubo utilizado como fonte de nitrogênio foi a uréia. O parcelamento do nitrogênio foi feito em sete aplicações crescentes (9%, 11%, 13%, 15%, 16%, 17% e 19%) tendo sido a primeira realizada aos 11 dias após o transplântio e a última 3 dias antes da colheita.



FIGURA 3. Aspecto da alfaca americana cultivar Raider no experimento, UFLA, Lavras, MG, 2005.

Desde o transplante das mudas para os canteiros (14/10) até o início da diferenciação dos tratamentos (21/10), foram efetuadas irrigações diárias por um período de 7 dias, repondo-se a lâmina evaporada do minitanque, utilizando-se microaspersores Naan Hadar 7110, bocal azul (1,4 mm) com uma vazão de 103 L h⁻¹, pressão de 20 mca, espaçamento de 3,90 m entre linhas e 3,95 m entre microaspersores. Nesta condição, a intensidade de precipitação média calculada foi de 6,67 mm h⁻¹. Este sistema foi utilizado com a finalidade de uniformizar a umidade do solo em todas as parcelas para favorecer o estabelecimento da cultura. Após este período, a irrigação foi feita por gotejamento.

O controle de doenças e pragas foi feito conforme o recomendado para a cultura da alfaca. Durante o experimento, as plantas daninhas que eventualmente ocorreram foram eliminadas por meio de capinas manuais.

Durante a condução do experimento, os parâmetros meteorológicos foram obtidos de uma estação meteorológica automática com sensores de temperatura e umidade relativa, localizada no centro da casa de vegetação, a qual registrou, diariamente, a temperatura e a umidade relativa máxima e mínima do ar.

3.3 Delineamento experimental e tratamentos

Foi empregado o delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 4x4, com a combinação de quatro tratamentos de lâminas de irrigação com quatro doses de adubação nitrogenada distribuídos em três repetições, perfazendo um total de 48 parcelas. Os tratamentos constituíram-se de quatro lâminas de água com base na evaporação do minitanque e quatro doses de nitrogênio sendo:

- W1 - lâmina total de 91,99 mm referente a 35% da evaporação do minitanque;
- W2 - lâmina total de 142,79 mm referente a 70% da evaporação do minitanque;
- W3 - lâmina total de 186,34 mm referente a 100% da evaporação do minitanque;
- W4 - lâmina total de 237,14 mm referente a 135% da evaporação do minitanque.
- N0 - sem nitrogênio;
- N1 - dose de 80 kg ha⁻¹ (50% da dose recomendada);
- N2 - dose de 160 kg ha⁻¹ (100% da dose recomendada);
- N3 - dose de 320 kg ha⁻¹ (200% da dose recomendada).

Cada parcela experimental apresentava as dimensões de 1,20 m de largura e 2,40 m de comprimento (2,88 m²). Foram utilizadas quatro linhas de plantas espaçadas de 0,30 m entre si e 0,30 m entre plantas, perfazendo um total de 32 plantas por parcela. A área útil da parcela foi constituída pelas duas fileiras centrais (1,08 m²), sendo descartadas a primeira e a última planta destas linhas, resultando num total de 12 plantas (Figura 4).

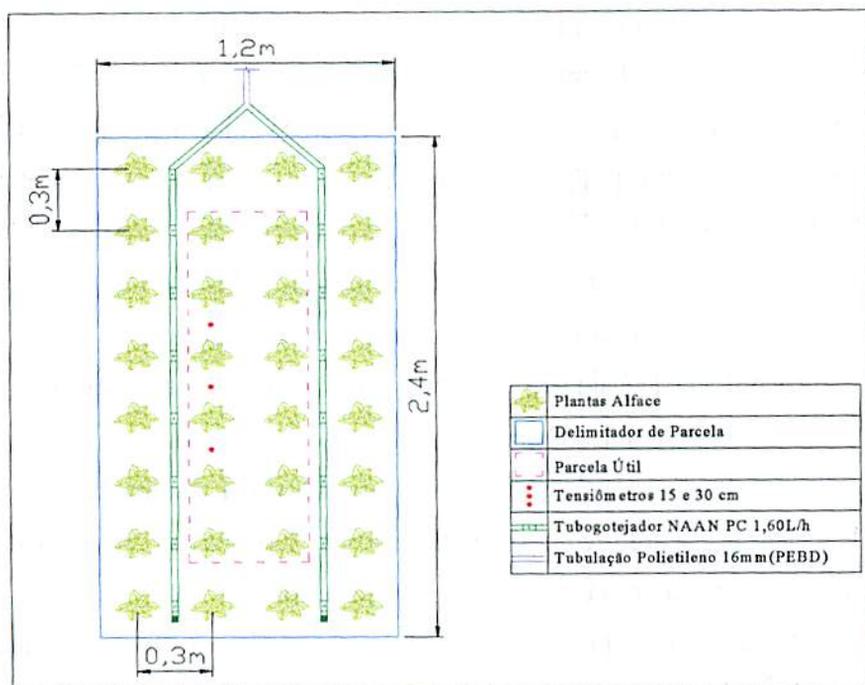


FIGURA 4. Esquema de uma parcela experimental com o sistema de irrigação implantado e os sensores de umidade. UFLA, Lavras, MG, 2005.

3.4 Sistema e manejo da irrigação

Para a aplicação das lâminas de água utilizou-se um sistema de irrigação por gotejamento, com tubogotejadores NAAN PC com uma vazão de $1,60 \text{ L h}^{-1}$, DN 16mm e espaçados entre si de 0,30 m. Cada parcela experimental possuía duas linhas de gotejadores autocompensantes trabalhando com pressão de serviço de 20 mca, tendo cada linha atendido duas linhas de plantas.

As linhas laterais foram conectadas às linhas de derivação de polietileno (PEBD DN 16 mm); estas, por sua vez, foram conectadas às linhas principais (PEBD DN 16 mm) que tinham, no seu início, válvulas de comando elétrico (solenóides). Foi utilizada uma válvula para cada combinação de tratamentos,

totalizando 16 válvulas. Essas válvulas foram acionadas por um controlador previamente programado em cada irrigação para funcionar o tempo necessário para repor a lâmina de água referente à evaporação do minitanque (aplicação dos tratamentos). A fertirrigação foi realizada por meio de um tanque previamente calibrado que foi instalado em um ponto antes da tomada de pressão que, por sua vez, estava localizada antes das válvulas solenóides. Após o acionamento da bomba, a solução de fertilizante era injetada nas linhas através da abertura do registro (depois do fechamento do registro que permite a passagem da água), dentro do tempo programado para repor a lâmina diária necessária.

A frequência de irrigação foi diária, sendo a lâmina de irrigação estabelecida de acordo com os tratamentos e baseada na evaporação do minitanque, instalado no centro da casa de vegetação.

O minitanque tem a forma circular, construído em chapa galvanizada com 60,5 cm de diâmetro (50% do diâmetro do tanque Classe A), 25,4 cm de profundidade e apoiado sobre estrado de madeira, esse com altura de 15 cm acima do solo (Figura 5) e instalado no centro da casa de vegetação.

No cálculo da lâmina de irrigação, expressão (3), consideraram-se a evaporação diária, a fração de evaporação de cada tratamento e a eficiência de aplicação de água do sistema:

$$LI = \frac{E_{Vm} * K}{E_i} \quad (3)$$

em que:

LI = lâmina de irrigação a ser aplicada em cada tratamento (mm);

E_{Vm} = evaporação diária do minitanque (mm);

E_i = eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação;

K = fração da evaporação de cada tratamento.



FIGURA 5. Minitanque evaporimétrico utilizado no experimento. UFLA, Lavras, MG, 2005.

As diferentes lâminas de irrigação, para cada tratamento, foram obtidas mediante diferentes tempos de funcionamento das linhas de gotejadores. Esse tempo foi obtido a partir da vazão média dos gotejadores, do espaçamento entre gotejadores e entre linhas de irrigação, conforme a seguinte expressão:

$$T_i = \frac{LI * S_g * S_l}{q} \quad (4)$$

em que:

T_i = tempo de irrigação para cada tratamento (h);

LI = lâmina de irrigação a ser aplicada no tratamento (mm);

S_g = espaçamento entre gotejadores (m);

S_l = espaçamento entre linhas de irrigação (m);

q = vazão média dos gotejadores ($L h^{-1}$).

O monitoramento da umidade do solo foi efetuado por meio de tensiômetros instalados nas profundidades de 0,15 m e 0,30 m. Em algumas parcelas, a partir do momento em que os tensiômetros não apresentavam condição de leitura, estes foram substituídos por sensores do tipo GMS (*Grain Matrix Sensor*) denominado Watermark, instalados nas mesmas profundidades. As leituras dos tensiômetros foram realizadas diariamente pela manhã, com tensiômetro digital de punção com precisão de $\pm 0,03\%$. Os valores de tensão foram utilizados para monitorar a umidade do solo em cada tratamento e relacionar com a produtividade da alfaca.

Foram realizados testes a fim de determinar a vazão média do gotejador e a eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação. Para isso, adotou-se o procedimento recomendado por Merriam & Keller (1978), citados por Cabello (1996), em que se escolhe uma subunidade e nela se selecionam quatro laterais: a primeira, a situada a 1/3 do início, a situada a 2/3 e a última. Em cada lateral, selecionam-se quatro emissores: o primeiro, o situado a 1/3, o situado a 2/3 e o último. São coletadas vazões desses emissores. A partir da expressão (5), é calculado o coeficiente de uniformidade. No caso do sistema de irrigação em questão, os tratamentos eram as subunidades. Como cada subunidade possuía duas laterais, ambas foram usadas no teste. Foram usadas apenas as laterais dos tratamentos W_2N_1 e W_2N_3 , sendo empregados os gotejadores 1, 3, 5 e 8 de cada lateral:

$$CU D = \frac{q_{25}}{q_a} \quad (5)$$

em que:

CU D = coeficiente de uniformidade de distribuição;

q_{25} = média das 25% menores vazões coletadas ($L \cdot h^{-1}$);

q_a = média das vazões coletadas ($L \cdot h^{-1}$).

Foi determinado também o coeficiente de variação total (CVt) de vazão, conforme metodologia apresentada por Bralts & Kesner (1978), descrita por Cabello (1996). O coeficiente de variação total é a relação entre o desvio padrão das vazões e a vazão média, e indica como está a uniformidade da vazão na subunidade estudada. Cabello (1996) apresenta uma tabela classificando a uniformidade de acordo com o valor do CVt. Segundo essa tabela, o CVt estando acima de 0,4, a uniformidade é inaceitável, de 0,4 a 0,3 é baixa, de 0,3 a 0,2 é aceitável, de 0,2 a 0,1 é muito boa e de 0,1 a 0 é excelente.

3.5 Características avaliadas da cultura

A colheita foi realizada quando as plantas completaram seu máximo desenvolvimento vegetativo, nos dias 26 e 27 de novembro de 2004 e procedendo, imediatamente, as avaliações.

3.5.1 Altura de plantas

As folhas externas das plantas localizadas na parcela útil foram levantadas e, com o auxílio de uma trena, mediu-se a altura (cm) desde a superfície do solo. Foram usadas médias de quatro plantas por parcela.

3.5.2 Número de folhas externas e internas por planta

Após a pesagem da parte aérea total de cada planta, retiraram-se as folhas externas, que foram contadas, sendo consideradas folhas externas aquelas mais escuras. Após a pesagem da parte comercial, as folhas foram retiradas para contagem, obtendo-se o número de folhas internas. Utilizou-se também média de quatro plantas por parcela.

3.5.3 Circunferência da cabeça

Após obtida a massa da cabeça comercial, com o auxílio de uma fita métrica, efetuou-se a medida da sua circunferência com os resultados médios (4 plantas) expressos em cm.

3.5.4 Diâmetro do caule

Foi medido com paquímetro depois de retiradas todas as folhas. Os resultados foram representados pela média de quatro plantas e expressos em mm.

3.5.5 Comprimento do caule

Foi medido com paquímetro e os resultados representados pela média de quatro plantas e expressos em mm.

3.5.6 Produtividade total

As plantas foram cortadas rente ao solo e pesadas em balança digital com precisão de 1g e os resultados foram expressos em gramas com média de quatro plantas, obtendo-se a massa fresca total. Com base nas dimensões das parcelas e considerando-se o espaço entre elas, estimou-se a população de plantas por hectare, encontrando-se o valor de 78.667 plantas. A partir das médias de massa fresca total, obtidas de quatro plantas em cada parcela, estimou-se a produtividade total. Os resultados foram expressos em kg ha^{-1} .

3.5.7 Produtividade comercial

Para a obtenção da produtividade comercial foram pesadas as cabeças comerciais em balança digital com precisão de 1g e os resultados foram expressos em gramas obtendo-se a massa fresca da cabeça comercial. A partir das médias de massa fresca comercial, obtidas de quatro plantas em cada parcela, estimou-se a produtividade comercial. Os resultados foram expressos em kg ha^{-1} .

3.6 Análise estatística

A análise de variância pelo teste F e as análises de regressão ao mínimo de 5% e 1% de probabilidade, foram executadas no software SISVAR versão 4.0 (Ferreira, 2000).

O ajuste dos modelos de regressão foi feito pelo software R (R, 2005), bem como a normalidade dos resíduos.

3.7 Função de produção

A produção de uma cultura depende dos fatores ou insumos que afetam essa produção. De maneira geral, pode-se expressar por meio de uma curva de resposta (ou superfície de resposta), que representa a tecnologia, denominada função de produção:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

em que:

Y = produção da cultura (atividade produtiva);

x_1, x_2, \dots, x_n = fatores que afetam a sua produção.

Essa função de produção é uma relação empírica e geralmente obtida por análise de regressão entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes, conforme o modelo proposto. Neste experimento, os fatores de produção água (W) e nitrogênio (N), constituíram-se nas variáveis independentes e a variável dependente (Y), representada pela produtividade comercial da alface americana.

3.7.1 Função de produção da alface americana tendo a água como fator variável

O modelo de análise utilizado foi o polinômio do segundo grau, da forma:

$$Y = f(W) = a + bW + cW^2 \quad (7)$$

em que:

Y = produtividade comercial (kg ha^{-1});

W = lâmina total de água aplicada (mm);

a, b e c = parâmetros de ajuste, tendo como hipóteses que $b > 0$ e $c < 0$.

A lâmina de água ótima econômica a ser aplicada deve corresponder a uma produtividade que traduza na otimização do lucro (L), dado pela expressão:

$$L(W) = P_y \cdot Y - P_w \cdot W - C \quad (8)$$

em que:

L(W) = lucro máximo (R\$);

P_y = preço do produto (R\$ kg^{-1});

Y = produtividade (kg ha^{-1});

P_w = preço do fator água (R\$ mm^{-1});

W = lâmina total de água aplicada (mm);

C = custo dos fatores mantidos constantes no experimento (R\$).

O preço do produto (P_y) representa o preço na indústria por quilo de alface americana comercial. As indústrias de processamento de alface no sul de Minas Gerais adquiriram o quilo da alface ao preço de R\$0,80/kg (cotação de junho/2005). Esse preço foi considerado para efeito de análise econômica no presente estudo.

O preço do fator água (P_w) representa o custo da energia para o bombeamento, da depreciação do sistema de irrigação e dos custos de manutenção e operação do sistema de irrigação. Considerando-se que estes componentes do preço do fator água são extremamente variáveis e, conseqüentemente, os seus custos também o são, tornou-se imprescindível fixar alguns parâmetros como o sistema de irrigação por gotejamento, a capacidade de área de 1 ha e altura manométrica de 25 metros. Nessas condições, o preço do sistema de irrigação para 1 hectare foi de R\$ 7.172,33, incluindo uma motobomba monofásica (3 cv), o tubogotejador, o injetor de fertilizante, um controlador com 4 estações, chave de partida, válvulas solenóides, a tubulação de sucção e recalque além das conexões.

No cálculo da depreciação do sistema (fator de recuperação de capital), consideraram-se a taxa de juros anual de 10% e a vida útil do equipamento de 10 anos, chegando-se a um fator de 0,1627 que, multiplicado ao custo do sistema de irrigação, gerou-se o custo dos fatores mantidos constantes de R\$ 1.167,23.

O custo de manutenção e operação do sistema de irrigação foi considerado sobre 2% do seu valor de aquisição, o que equivale a R\$ 143,45/ha ano ou R\$ 35,86/ha em um ciclo da cultura. Para a obtenção do custo da energia de bombeamento foi calculado o consumo de energia do sistema de irrigação conforme Silva (1994):

$$CE = \text{Pot} * n * 0,736 \quad (9)$$

em que:

CE = consumo de energia, em horas;

Pot = potência da bomba, em cv;

n = número de horas de funcionamento da bomba.

Considerando um ciclo médio da alfaca de 48 dias, com um turno de rega de 3 dias e o custo do kWh de R\$0,29 (valor fornecido pela CEMIG para o mês de junho de 2005), o custo da energia foi de R\$ 69,32, para uma motobomba de 3 cv trabalhando 6,76 horas/dia (que equivale ao tempo necessário para repor uma lâmina de água evaporada de 5 mm/dia).

Somando-se os custos de manutenção do sistema e de energia de bombeamento chegou-se a um custo variável total de R\$ 105,18. Então, o custo por milímetro de água aplicado foi calculado dividindo-se o custo variável total por hectare pela lâmina de água aplicada no ciclo da cultura, em mm, chegando-se ao valor de R\$ 0,44.

Uma vez que W é expresso em milímetro (mm) e que as equações de regressão foram baseadas na lâmina total de água aplicada após início dos tratamentos, em milímetros, correspondentes a cada tratamento de % da EVm, foram obtidos os produtos físicos marginais (PFMa) da água.

Sob a hipótese de que L(W) tem um máximo e que a água é o único fator variável, tem-se:

$$\frac{dL(W)}{dW} = P_Y \frac{dY}{dW} - P_W = 0 \quad (10)$$

em que:

$$\frac{dY}{dW} \cdot P_Y = \text{valor da produtividade física marginal do fator água (W);}$$

$$\frac{dY}{dW} = \text{produtividade física marginal do fator água (W)}.$$

A produtividade física marginal (PFMa) do fator variável é o aumento no produto físico total decorrente do emprego de uma unidade adicional do fator variável. Graficamente, o PFMa representa a declividade do produto total ou da função de produção em um determinado nível do fator variável e é indicador das eficiências técnica e econômica do experimento.

Da expressão (10), obtem-se o indicador de eficiência econômica:

$$\frac{dY}{dW} = \frac{P_W}{P_Y} \quad (11)$$

A expressão (11) mostra que o lucro se maximiza (considerando a água como único fator variável) se a derivada primeira da produtividade em relação à lâmina total de água (produto físico marginal da água) for igual à relação entre os preços do fator e do produto.

Portanto, da expressão (7), tem-se:

$$\frac{dY}{dW} = b - 2cW = \frac{P_W}{P_Y} \quad (12)$$

Da expressão (12), obteve-se a lâmina de irrigação ótima econômica para as condições desse trabalho, considerando como fator variável o total de lâmina de água aplicada e os demais insumos utilizados no experimento permaneceram constantes.

3.7.2 Função de produção da alface americana tendo o nitrogênio como fator variável

O modelo utilizado foi o polinômio do segundo grau da forma:

$$Y = f(N) = a + bN + cN^2 \quad (13)$$

em que:

Y = produtividade comercial (kg ha⁻¹);

N = dose de nitrogênio utilizada (kg ha⁻¹);

a, b e c = parâmetros de ajuste sob a hipótese de que b>0 e c<0.

O preço do fator nitrogênio (P_N) foi composto pelos custos de aquisição do fertilizante no comércio e de aplicação na área cultivada. A aplicação foi feita via fertirrigação, evitando-se assim gastos com mão-de-obra para a aplicação desse fertilizante. Quanto ao fertilizante, foi considerada como fonte a uréia, por ter alta solubilidade sem risco de entupimento para o equipamento de irrigação.

O preço da uréia no mercado foi de R\$ 0,94/kg, tendo o preço do nitrogênio ficado em R\$ 2,09/kg. A dose ótima econômica de nitrogênio a ser aplicada deve corresponder a uma produtividade que traduza um lucro máximo dado pela expressão:

$$L(N) = P_Y \cdot Y - P_N \cdot N - C \quad (14)$$

em que:

L(N) = lucro máximo (R\$);

P_Y = preço do produto (R\$ kg⁻¹);

Y = produtividade comercial (kg ha⁻¹);

P_N = preço do fator nitrogênio (R\$ kg⁻¹);

N = dosagem de nitrogênio (kg ha⁻¹).

Considerando que $L(N)$ tem um máximo e que o nitrogênio é o único fator variável, tem-se:

$$\frac{dY}{dN} = \frac{P_N}{P_Y} \quad (15)$$

Assim, da expressão (13), obtém-se:

$$\frac{dY}{dN} = b + 2cN = \frac{P_N}{P_Y} \quad (16)$$

Da expressão (16) obtém-se a dose ótima econômica de nitrogênio (N) para uma condição específica, considerando como fator variável o total de nitrogênio aplicado e os demais insumos utilizados no experimento permaneceram constantes.

3.7.3 Superfície de resposta

A produtividade comercial da alface americana (Y) também foi estudada como uma função de dois fatores: água (W) e nitrogênio (N), ou seja, obteve-se uma função de produção tendo como variáveis independentes, simultaneamente, água e nitrogênio, e produtividade comercial como variável dependente:

$$Y = f(W, N) \quad (17)$$

A relação representada pela expressão (17) é denominada função ou superfície de resposta. Sua representação polinomial, conforme apresentada e

discutida por Box (1954) e Hexem & Heady (1978), citados por Frizzone (1986), é definida pela expressão:

$$Y = b_0 + b_1W + b_2N + b_{11}W^2 + b_{22}N^2 + b_{12}WN \quad (18)$$

em que:

Y = produtividade comercial (kg ha^{-1});

W = lâmina total de água aplicada (mm);

N = dose de nitrogênio aplicada (kg ha^{-1});

b = parâmetro de ajuste tendo como hipóteses que $b_1 > 0$, $b_2 > 0$, $b_{11} < 0$, $b_{22} < 0$ e $b_{12} < 0$

Os níveis ótimos econômicos dos fatores água e nitrogênio foram aqueles que conduziram a uma produtividade que correspondeu a um lucro máximo representado pela expressão:

$$L(W, N) = P_Y.Y - P_W.W - P_N.N - C \quad (19)$$

em que:

$L(W, N)$ = lucro máximo (R\$);

P_Y = preço do produto (R\$/kg);

Y = produtividade comercial (kg ha^{-1});

P_W = preço da lâmina de água (R\$ mm^{-1});

W = lâmina total de água aplicada (mm);

P_N = preço do quilo de nitrogênio (R\$ kg^{-1});

N = dose de nitrogênio aplicada (kg ha^{-1});

C = custo dos fatores mantidos constantes no experimento, (R\$).

A condição necessária para que se tenha um máximo da função $L(W,N)$, mantendo fixo um dos fatores (N ou W), é dada pelas expressões:

$$\frac{dY}{dW} = \frac{P_W}{P_Y} \quad (20)$$

$$\frac{dY}{dN} = \frac{P_N}{P_Y} \quad (21)$$

P_W/P_Y e P_N/P_Y representam relações entre o preço de custo da água e o preço de venda do produto e entre o preço de custo do nitrogênio e o preço de venda do produto, respectivamente.

Obtêm-se pois:

$$\frac{dY}{dW} = b_1 - 2b_{11}W + b_{12}N = \frac{P_W}{P_Y} \quad (22)$$

$$\frac{dY}{dN} = b_2 + 2b_{22}N + b_{12}W = \frac{P_N}{P_Y} \quad (23)$$

A solução do sistema composto pelas expressões (22) e (23) fornece os valores ótimos econômicos para irrigação e para a dosagem de nitrogênio que auferiram o lucro máximo, fixando, em cada caso, o valor de N e de W, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados gerais do experimento

4.1.1 Parâmetros climáticos na casa de vegetação

Os dados relativos à temperatura máxima, média e mínima do ar e à umidade relativa máxima, média e mínima do ar, durante o período de aplicação dos tratamentos (outubro e novembro/2004), são apresentados nas Figuras 6 e 7.

Observa-se, nestas figuras, que a temperatura média do ar durante o período experimental foi de 21,6°C, a média das temperaturas mínimas resultou em 17,0°C e a média das temperaturas máximas em 27,9°C. Os valores de temperatura e umidade relativa média do ar oscilaram em torno de 17°C a 24,4°C e entre 54% e 90%, respectivamente.

A alface, cultura de clima temperado, é melhor adaptada a temperaturas baixas do que as altas. A máxima tolerável pela planta fica em torno de 30°C e a mínima situa-se em torno de 6°C, para a maioria das cultivares, enquanto a umidade relativa mais adequada ao bom desenvolvimento da alface varia de 60% a 80% (Cermeño, 1990; Sganzerla, 1995). Verificou-se que apesar das altas temperaturas verificadas em alguns dias, bem como da umidade relativa, isso não prejudicou o desenvolvimento da alface americana, nem tampouco no surgimento de doenças.

Os dados relativos à evaporação do minitanque, no período de aplicação dos tratamentos são apresentados na Figura 8. A evaporação máxima diária foi de 6,52 mm, a mínima de 1,29 mm e a média de todas as medidas efetuadas foi de 3,73 mm dia⁻¹.

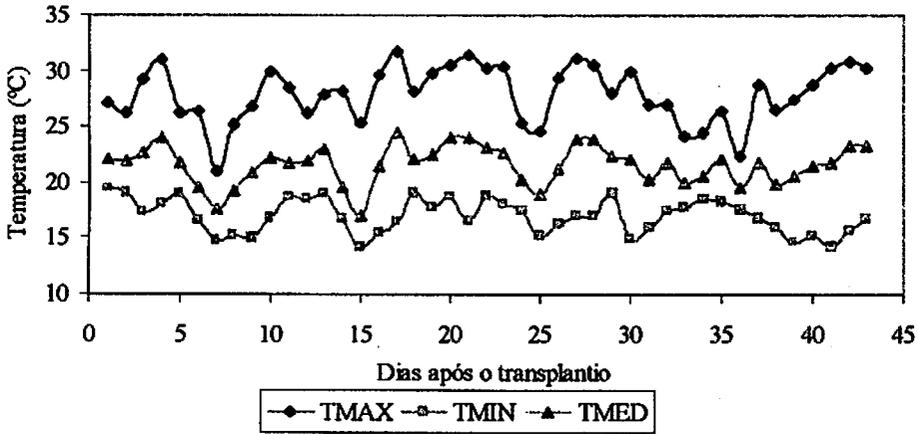


FIGURA 6. Temperatura do ar (°C) máxima, média e mínima ocorrida no interior da casa de vegetação, UFLA, Lavras, MG, 2005.

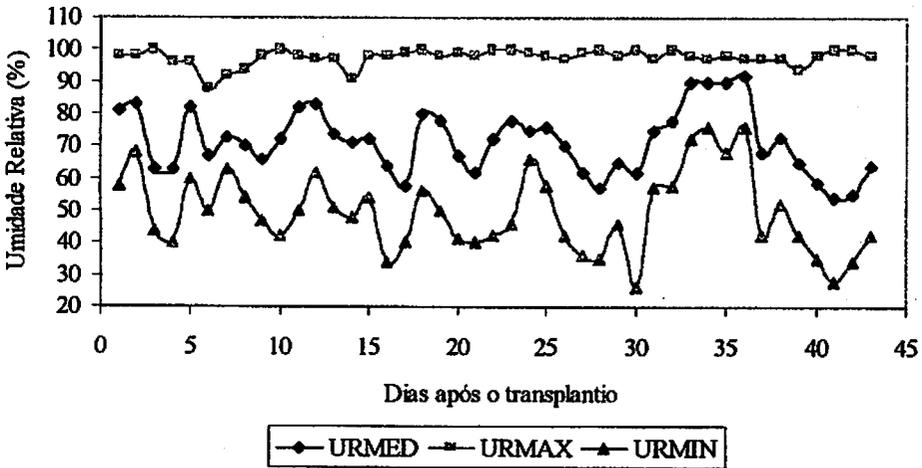


FIGURA 7. Umidade relativa do ar (%) máxima, média e mínima ocorrida no interior da casa de vegetação. UFLA, Lavras, MG, 2005.

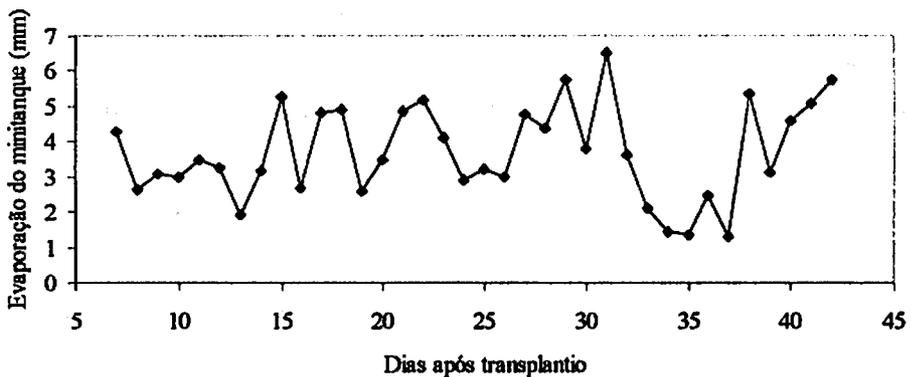


FIGURA 8. Valores diários de evaporação do minitanque ocorrida no interior da casa de vegetação. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Comparando-se o valor médio de evaporação medido dentro da casa de vegetação (minitanque) com o valor médio obtido no posto meteorológico (tanque Classe A) localizado na Universidade Federal de Lavras ($5,72 \text{ mm dia}^{-1}$), durante o mesmo período, observa-se uma diferença entre eles de $1,99 \text{ mm}$. Essa diferença é justificada em função das diferentes condições, principalmente de radiação solar a que foram submetidos os dois evaporímetros, e da dimensão reduzida do minitanque, a qual influencia no volume de água evaporado.

4.1.2 Avaliação do sistema de irrigação

Como os gotejadores tinham uma faixa de compensação de vazão compreendida entre as pressões de 6 a 41 mca, procurou-se manter a pressão de funcionamento no final das linhas laterais próximo a 20 mca, por meio de uma válvula reguladora de pressão instalada no cabeçal de controle. Os tratamentos W2N1 e W2N3 foram submetidos ao teste de uniformidade de vazão. A vazão média dos gotejadores foi de $1,7 \text{ L h}^{-1}$, um pouco acima do valor indicado pelo

fabricante (1,6 L h⁻¹). O coeficiente de uniformidade de distribuição de água encontrado foi de 95,14%, significando que a água foi uniformemente distribuída nas parcelas em qualquer nível de irrigação, não se constituindo em uma fonte de variação adicional no ensaio, além da prevista pela aplicação dos diferentes coeficientes de evaporação atribuídos aos tratamentos.

Calculou-se também o coeficiente de variação total de vazão (CVt), que foi de 0,037, indicando uma excelente uniformidade de vazão nos tratamentos. O CVt é um dos parâmetros usados para diagnosticar problemas de uniformidade em campo (Cabello, 1996).

4.1.3 Lâminas aplicadas

Visando o estabelecimento da cultura, foram realizadas irrigações diárias por meio de um sistema de microaspersão, até 7 dias após transplântio (DAT), totalizando 41,18 mm de lâmina aplicada em cada tratamento. Salienta-se que, nas lâminas de irrigação por tratamento, não estão computados os 41,18 mm que foram aplicados durante a fase de estabelecimento da cultura. Os valores das lâminas de irrigação aplicadas nos tratamentos são encontrados na Figura 9. Para a análise estatística das características físicas e produtivas da alface americana, foi considerada a soma das irrigações feitas antes e após o início dos tratamentos.

Observa-se uma pequena diferenciação entre as lâminas de irrigação no início da aplicação dos tratamentos, que foi se acentuando com o decorrer do experimento. No final do experimento, as lâminas aplicadas foram de 50,81; 101,61; 145,16 e 195,96 mm, nos tratamentos W35, W70, W100 e W135, respectivamente. A lâmina aplicada no tratamento W100 foi três vezes superior à lâmina aplicada no tratamento W35, evidenciando ter ocorrido uma ampla variação no teor de água no solo para o desenvolvimento da alface americana.

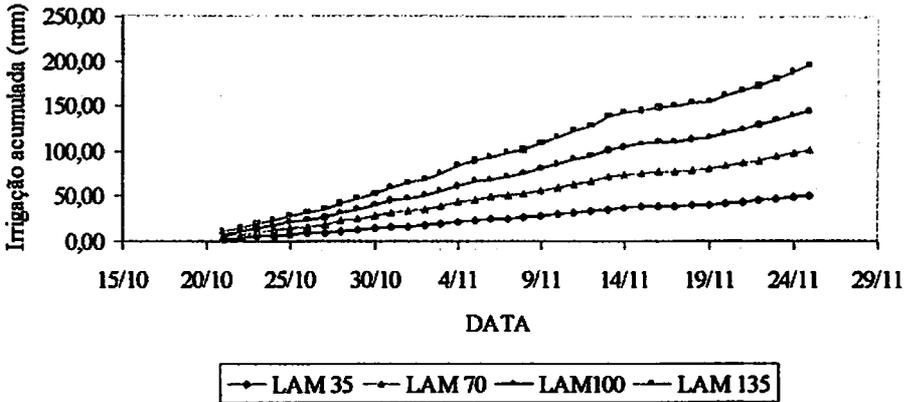


FIGURA 9. Lâmina de irrigação acumulada aplicada nos tratamentos, no período de outubro a novembro de 2004. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Diariamente, foram determinadas as tensões de água no solo para cada tratamento de lâmina de irrigação, momentos antes de iniciar a irrigação. Essas medidas permitiram verificar o comportamento da umidade do solo ao longo do ciclo da cultura e estão representadas na Figura 10. A partir desses valores de tensão, utilizou-se a curva característica de água no solo pela expressão 1, em que permitiu-se estimar os valores da umidade do solo correspondente à aplicação das diferentes lâminas ao longo do período de irrigação.

Verifica-se que, no tratamento W35, a tensão (valor médio de três sensores instalados na profundidade de 15 cm) variou de 15 a 144 kPa, que corresponde a uma umidade do solo de $35,8 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ e $27,6 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

4.2 Altura de plantas

A altura das plantas foi influenciada pelas diferentes lâminas de irrigação aplicadas, a 1% de probabilidade, não tendo sido encontrado efeito significativo para doses de nitrogênio e sua interação com as lâminas de irrigação (Tabela 2). Santos (2002) também obteve efeito significativo das diferentes tensões aplicadas no solo sobre a altura das plantas.

A variação ocorrida para a altura das plantas foi explicada por uma regressão linear simples ou quadrática, com o nível de significância de 1%, tendo a segunda opção apresentado maior coeficiente de determinação (r^2).

TABELA 2. Síntese da análise de variância e de regressão para altura de plantas da alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fonte de variação	GL	Altura de plantas (cm)	
		QM	F
Lâmina	3	33,3540	12,934**
Dose nitrogênio	3	4,9317	1,912 ^{NS}
Lâmina x dose N	9	3,2128	1,246 ^{NS}
Bloco	2	14,7688	5,727**
Erro	30	2,578	
Média	-	21,6075	
c.v (%)	-	7,43	
Linear	1	60,3301	23,396**
Quadrático	1	39,7124	15,400**
Desvio	1	0,01947	0,008 ^{NS}
Resíduo	30	2,5787	

** e significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente

^{NS} não significativo

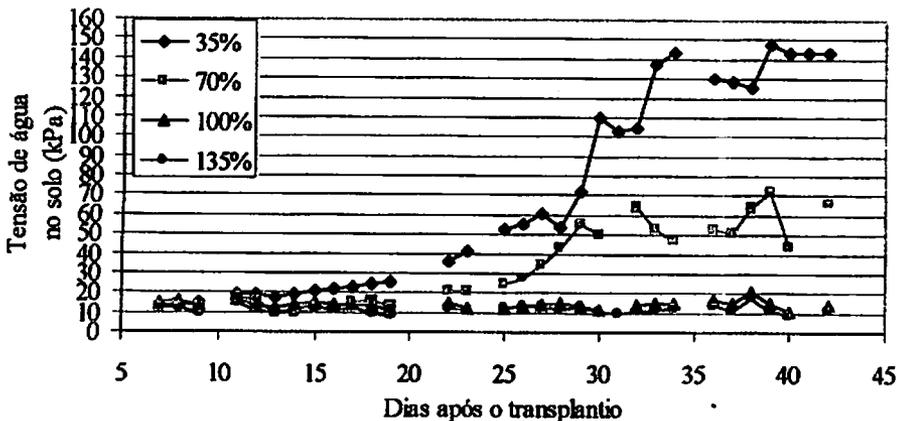


FIGURA 10. Variação das tensões de água no solo nos tratamentos W35, W70, W100 e W135 na profundidade de 15 cm ao longo do ciclo da alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Segundo Silva & Marouelli (1998), a tensão de água no solo em que se deve promover a irrigação para obter produtividade máxima em alface está entre 10 e 30 kPa, no caso do cultivo em solo irrigado por gotejamento em ambiente protegido, com o sensor instalado a, aproximadamente, 15 cm de profundidade, enquanto Santos (2002), mantendo o solo a uma tensão em torno de 15 kPa, obteve os melhores resultados. No tratamento W70, a tensão variou de 12 a 70 kPa ($37,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $29,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Já no tratamento W100, a tensão ficou entre 10 e 20 kPa ($39,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $33,9 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o que indicou menor variação nos valores de tensões comparados com W35. No tratamento W135, que corresponde a uma aplicação de água acima das necessidades da cultura, a tensão de água no solo se manteve próximo de 10 kPa, com tensões variando entre 8 e 12 kPa. Neste tratamento, ao final do ciclo, observou-se umidade excessiva no solo, ambiente propício para o desenvolvimento de doenças, forçando a antecipação da colheita a fim de evitar queda de produção.

De acordo com o gráfico da Figura 11, a lâmina de água que proporciona a maior altura de planta (22,51cm) equivale a 184,75 mm, em que 99,99% das variações ocorridas na altura em função das lâminas de água são explicadas pela regressão quadrática. Assim, a umidade no solo favoreceu, de forma direta, o desenvolvimento vegetativo dessa cultura.

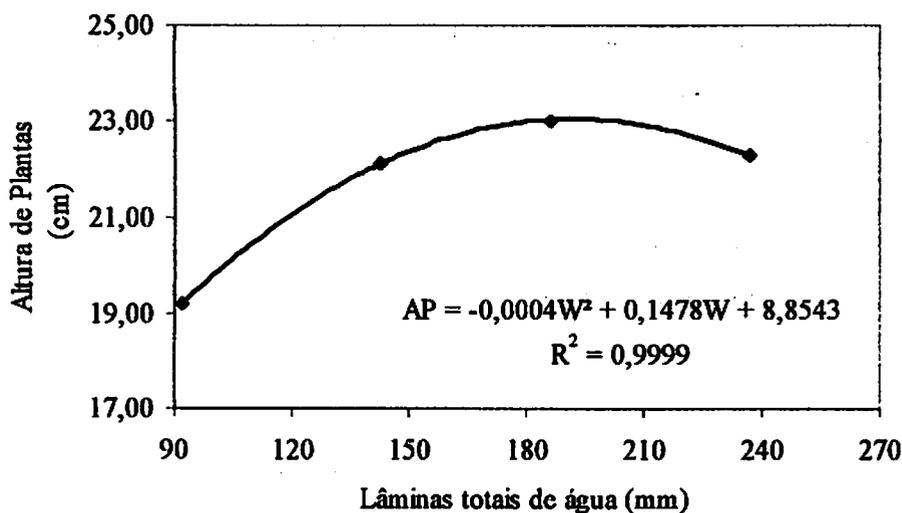


FIGURA 11. Altura de plantas de alface americana em função das lâminas totais de água aplicadas. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.3 Número de folhas externas e internas

As lâminas de água aplicadas no experimento exerceram influência, a 1% de significância, pelo teste F, no número de folhas externas e internas, não encontrando efeito significativo para doses de nitrogênio e sua interação com as lâminas de irrigação, indicando que esta variável não foi influenciada pelos aumentos ocorridos nas doses de N aplicadas ao solo (Tabela 3). Furtado (2001)

também não encontrou efeito significativo da adubação nitrogenada para o número de folhas das plantas.

As variações ocorridas para número de folhas externas foram explicadas por uma regressão linear simples, a 1% de probabilidade, enquanto que, para o número de folhas internas, foi melhor explicada por uma regressão linear simples ou quadrática, com o nível de significância de 1%, tendo a segunda opção apresentado maior coeficiente de determinação (R^2), como pode ser visto na Figura 12. Observou-se também que o número de folhas internas pode ser explicado por outro modelo de regressão, uma vez que os desvios foram significativos a 5% de probabilidade.

TABELA 3. Síntese da análise de variância e de regressão para o número de folhas externas (NFE) e internas (NFI) da alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fonte de variação	GL	NFE		NFI	
		QM	F	QM	F
Lâmina	3	16,9167	6,282**	34,5833	8,902**
Dose nitrogênio	3	0,1389	0,052 ^{NS}	1,8611	0,479 ^{NS}
Água x nitrogênio	9	1,3426	0,499 ^{NS}	2,3611	0,608 ^{NS}
Bloco	2	0,6072	0,225 ^{NS}	1,3958	0,609 ^{NS}
Resíduo	30	2,6929		3,8847	
Média	-	12,8750		18,5417	
c.v (%)	-	12,75		10,63	
Linear	1	40,8741	15,179**	47,0931	12,123**
Quadrático	1	5,3333	1,981 ^{NS}	33,3333	8,581**
Desvio	1	4,5425	1,687 ^{NS}	23,3236	6,004*

** e * significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente

^{NS} não significativo

A relação entre número de folhas externas e lâmina de irrigação é inversa, ou seja, há uma tendência de diminuição do número de folhas com o aumento da lâmina, enquanto o número de folhas internas aumentou com o aumento da lâmina de água. A diminuição no número de folhas externas pode ser devido ao apodrecimento que ocorreu nas folhas mais próximas ao solo ocasionado pelo excesso de umidade do solo. O número máximo de folhas internas obtido neste experimento foi de 21,0, aplicando-se uma lâmina total de água de 215,67 mm.

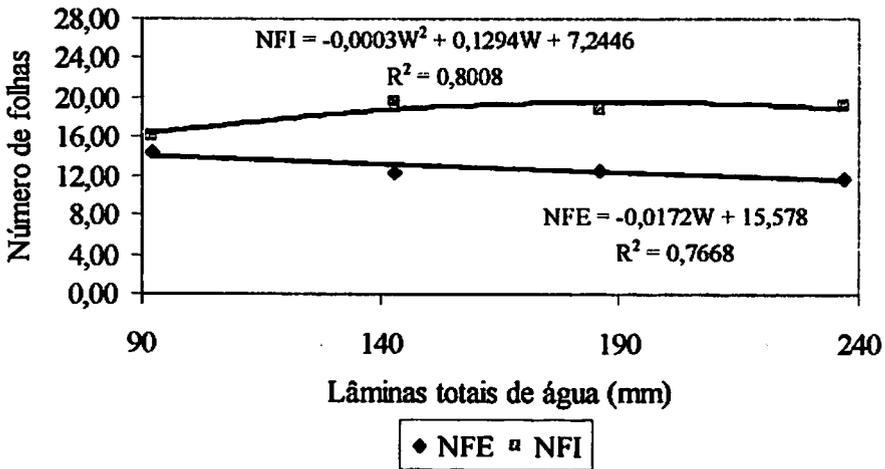


FIGURA 12. Número de folhas externas (NFE) e internas (NFI) de plantas de alface americana em função de diferentes lâminas de irrigação. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.4 Circunferência da cabeça

A análise de variância da circunferência da cabeça comercial mostrou que essa característica foi afetada somente pelas lâminas de irrigação

aplicadas, a 1% de probabilidade (Tabela 4). Furtado (2001) também não encontrou efeito significativo da adubação nitrogenada para o diâmetro da cabeça.

A variação ocorrida para esta característica foi explicada por uma regressão linear simples ou quadrática, tendo a segunda opção apresentado maior coeficiente de determinação (R^2), como pode ser visto na Figura 13.

TABELA 4. Síntese da análise de variância para a circunferência da cabeça de alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fonte de variação	GL	Circunferência da cabeça (cm)	
		QM	F
Lâmina	3	79,6336	11,537**
Dose nitrogênio	3	10,5097	1,523 ^{NS}
Lâmina x dose N	9	5,1662	0,748 ^{NS}
Bloco	2	9,5808	1,388 ^{NS}
Erro	30	6,9023	
Média		43,75	
c.v (%)		6,01	
linear	1	67,8154	9,825**
Quadrático	1	160,6008	23,267**
Desvio	1	10,4846	1,519 ^{NS}
Resíduo	30	6,9024	

** significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente

^{NS} não significativo

A circunferência da cabeça comercial é uma importante característica para a cultura da alface americana, principalmente quando se refere à preferência

do consumidor para a aquisição do produto (Bueno, 1998). É importante, também, para a indústria de beneficiamento, pois plantas com maiores circunferências proporcionam maiores rendimentos no processamento.

O valor máximo da circunferência da cabeça comercial obtido neste trabalho foi de 44,94 cm, com uma lâmina total de água de 170,81 mm.

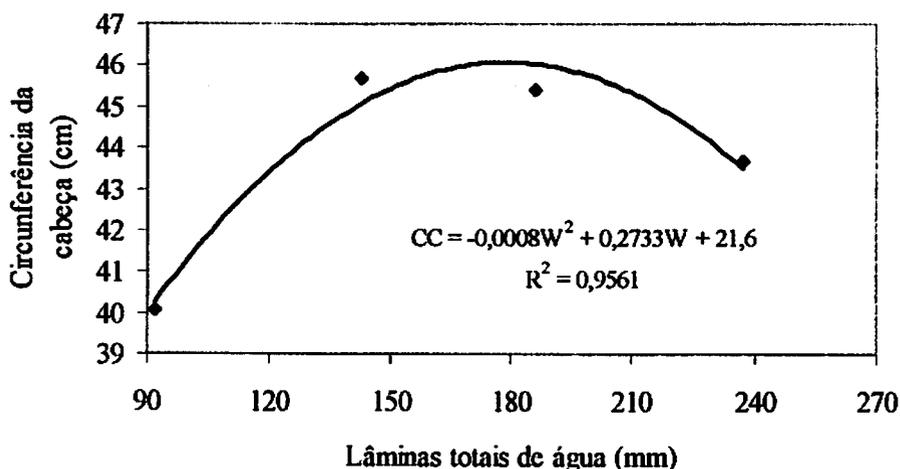


FIGURA 13. Circunferência da cabeça da alface americana em função das lâminas de irrigação. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.5 Diâmetro do caule

Com relação ao diâmetro do caule, este apresentou efeito significativo para lâmina de água a 1% de probabilidade e doses de nitrogênio e sua interação com as lâminas de irrigação a 5% de probabilidade (Tabela 5). Ao fazer o desdobramento de lâminas dentro de cada dose de N, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi aquele que, além de apresentar efeito significativo, apresentou maior coeficiente de determinação (Tabela 1A). Neste caso, o modelo quadrático se ajustou para as doses de 0 e 160 kg ha⁻¹ de nitrogênio,

enquanto que, para as doses de 80 e 320 kg ha⁻¹ de nitrogênio, foi o modelo linear. Na Figura 14 estão representadas as curvas ajustadas para cada dose de nitrogênio estudada.

Os diâmetros máximos alcançados para as doses de 0, 80 e 160 kg ha⁻¹ foram de 26,83, 30,97 e 30,99 mm para lâminas de 161,71, 216,5 e 233,1 mm. Santos (2002) obteve um diâmetro médio de caule de 30,44 mm, à tensão de 15 kPa, enquanto Mota (1999) obteve um valor de diâmetro de caule de 28,1 mm. Observa-se, na Figura 14, que no tratamento sem aplicação de nitrogênio (N0), o aumento das lâminas de irrigação praticamente não favoreceu o aumento do diâmetro do caule.

TABELA 5. Síntese da análise de variância para o diâmetro do caule de plantas de alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fonte de variação	GL	Diâmetro do caule (mm)	
		QM	F
Lâmina	3	126,3637	30,368 ^{**}
Dose nitrogênio	3	14,3254	3,443 [*]
Lâmina x dose N	9	9,4248	2,265 [*]
Bloco	2	1,5769	0,379 ^{NS}
Erro	30	4,1610	
Média		27,58	
c.v (%)		7,40	

^{**} e ^{*} significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente

^{NS} não significativo

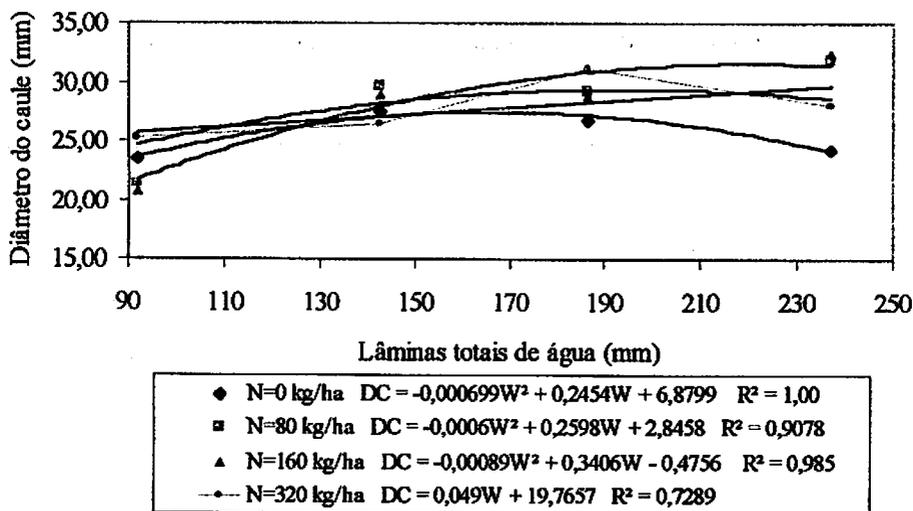


FIGURA 14. Diâmetro do caule de plantas de alface americana em função das lâminas de irrigação. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.6 Comprimento do caule

A análise de variância do comprimento de caule apresentou efeito significativo a 5% de probabilidade, para o fator lâmina de água (Tabela 6). A análise de regressão pode ser explicada por um modelo linear ou quadrático, porém, o segundo modelo apresentou maior coeficiente de determinação (Figura 15). O nitrogênio não apresentou nenhum efeito significativo sobre o comprimento do caule, a 5% de probabilidade, concordando com Yuri (2004).

TABELA 6. Síntese da análise de variância para o comprimento do caule de plantas de alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fonte de variação	GL	Comprimento do caule (mm)	
		QM	F
Lâmina	3	694,3354	4,047*
Dose nitrogênio	3	199,2598	1,161 ^{NS}
Lâmina x dose N	9	182,0613	1,061 ^{NS}
Bloco	2	1088,1171	6,342**
Erro	30	171,5671	
Média	80,68	80,68	
c.v (%)	16,23	16,23	
Linear	1	1130,3036	6,588*
Quadrático	1	937,1285	5,462*
Desvio	1	15,5740	0,091 ^{NS}
Resíduo	30	171,5671	

* e significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente

^{NS} não significativo

Essa característica é muito importante, principalmente quando a alface é destinada à indústria (Resende, 2004; Yuri et al., 2002). Na prática, caules de até 6 cm seriam os mais adequados, sendo aceitáveis até o patamar de 9 cm e inaceitáveis, ou menos recomendados, para processamento acima disso (Resende, 2004). Salienta-se que há uma tendência de a alface americana em condições de cultivo de verão, apresentar maiores comprimentos de caule, comparativamente ao cultivo de inverno, em que se mostra perfeitamente adaptada. Neste experimento, o máximo comprimento de caule para uma lâmina total de 193,61 mm foi de 8,86 cm, valor dentro do limite.

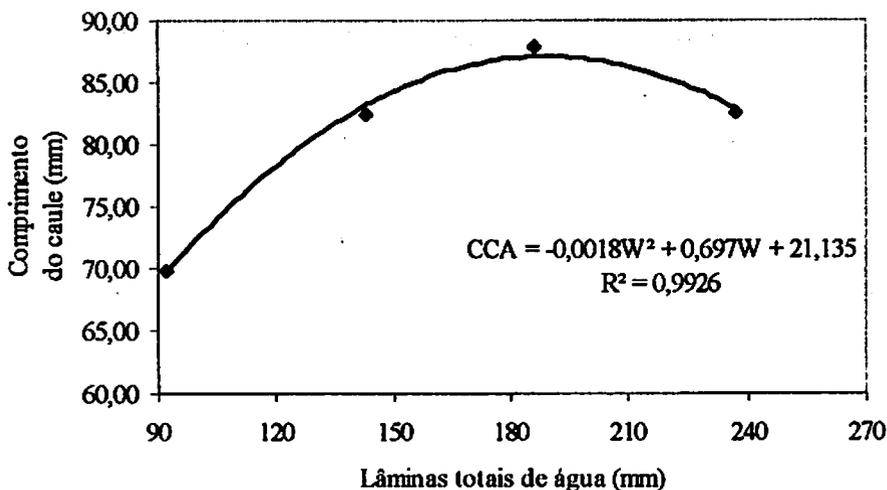


FIGURA 15. Comprimento do caule de plantas de alface americana, em função das lâminas de irrigação. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.7 Produtividade total da alface americana

A análise de variância dos valores relativos à produtividade total mostrou que essa característica foi afetada significativamente pelas lâminas totais de água, pelas doses de nitrogênio e pela interação entre os fatores (Tabela 7). Já Furtado (2001) não encontrou efeito significativo da adubação nitrogenada para a massa fresca da parte aérea (produção total).

A análise do desdobramento das lâminas de água dentro de cada dose de nitrogênio demonstrou efeito significativo para as lâminas de água dentro de todas as doses de nitrogênio (Tabela 2A). Os dados, quando submetidos à análise de regressão, mostraram que a equação polinomial quadrática apresentou melhor ajuste para todas as doses de N, podendo ser visualizado na Figura 16. Bueno (1998) também obteve resposta quadrática em função das doses de nitrogênio aplicadas.

As produtividades máximas alcançadas foram de 43.700,4; 48.855,0; 50.333,35 e 49.590,6 kg ha⁻¹ com lâminas totais de 168,1; 219,8; 185,17 e 215,45 mm para as doses de 0, 80, 160 e 320 kg ha⁻¹. Bueno (1998) obteve uma produtividade máxima de 48.070,3 kg ha⁻¹ com uma dose de 80,13 kg ha⁻¹, que foi também a dose que promoveu a maior massa fresca total, para Yuri (2004).

Bueno (1998) verificou redução na produtividade total com o incremento das doses de N. O mesmo não ocorreu neste trabalho, no qual foi encontrada uma resposta quadrática. Importante notar que o referido autor usou como dose máxima de N, 105,6 kg ha⁻¹, inferior à dose recomendada pela análise de solo usada neste trabalho.

TABELA 7. Síntese da análise de variância para a produtividade total da alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fonte de variação	GL	Produtividade total (kg ha ⁻¹)	
		QM	F
Lâmina	3	620517767,46	28,022 ^{**}
Dose nitrogênio	3	88649988,59	4,003 [*]
Lâmina x dose N	9	53278709,85	2,406 [*]
Bloco	2	37284073,51	1,684 ^{NS}
Erro	30	22143663,67	
Média	-	41405,47	
c.v (%)	-	11,36	

^{**} e ^{*} significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente

^{NS} não significativo

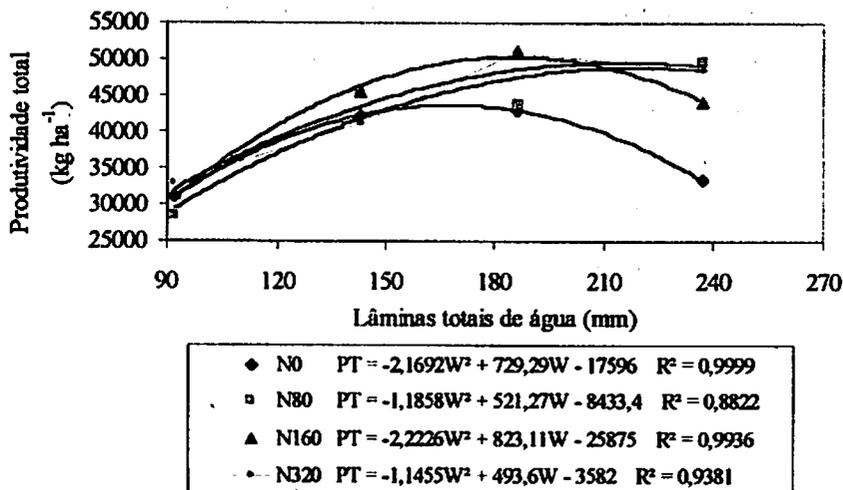


FIGURA 16. Produtividade total da alface americana em função das lâminas de irrigação aplicadas, para todas as doses de nitrogênio. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.8 Produtividade comercial da alface americana

A síntese da análise de variância da produtividade comercial encontra-se na Tabela 8 e mostrou efeito significativo da lâmina de água (a 1% de probabilidade) e sua interação com doses de nitrogênio a 5% de probabilidade sobre a produtividade comercial da alface americana. Embora a produtividade total tenha recebido influência significativa do N, não teve reflexos na parte interna da planta, ou seja, na cabeça que é a parte comercializada. Furtado (2001) também não encontrou efeito significativo da adubação nitrogenada para a massa fresca da parte comercial (produção comercial). Já Soares et al. (2002) e Frizzone et al. (1995), estudando o efeito das lâminas de água e doses de nitrogênio sobre o rendimento da melancia e aveia, respectivamente, verificaram a influência da água e do nitrogênio, sem, no entanto, haver efeito significativo

da interação destes fatores sobre o rendimento. Barros (1999) e Monteiro (2004) trabalharam com a cultura do melão e encontraram efeito significativo, a 5% de probabilidade, somente para lâminas de água, enquanto que, para nitrogênio e a interação água-nitrogênio, não houve efeito significativo.

TABELA 8. Síntese da análise de variância para a produtividade comercial. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fonte de variação	GL	Produtividade comercial (kg ha ⁻¹)	
		QM	F
Lâmina de água	3	311244940,28	31,415**
Efeito linear	1	620294606,76	62,608**
Efeito quadrático	1	299246174,14	30,204**
Dose nitrogênio	3	11606224,19	1,171 ^{NS}
Efeito linear	1	14230580,55	1,436 ^{NS}
Efeito quadrático	1	12867803,12	1,299 ^{NS}
Lâmina x dose N	9	22706326,33	2,292*
Bloco	2	11439788,16	1,155 ^{NS}
Resíduo	30	9907558,18	
Média	-	21401,52	
c.v (%)	-	14,71	

** e* significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente

^{NS} não significativo

Os valores médios da produtividade comercial da alface americana em função dos tratamentos de lâminas de água e doses de nitrogênio são apresentados na Tabela 9. A máxima produtividade da alface americana, 27.841,56 kg ha⁻¹, foi obtida no tratamento W₄N₃, equivalente à aplicação de 237,14 mm de água e 320 kg ha⁻¹ de N. Esta combinação é 35% superior à reposição da evaporação do minitanque e quanto à aplicação de uma dose de

nitrogênio, é 100% superior à recomendada pela análise de solo. O menor valor médio da produtividade comercial da alface americana (13.814,25 kg ha⁻¹) foi obtido no tratamento em que foi aplicada a menor lâmina de água (91,99 mm). Esta produtividade é inferior àquela obtida no tratamento com dose 0 kg ha⁻¹ de nitrogênio, cuja produtividade média foi de 19943,7 kg ha⁻¹, mostrando a importância de uma correta irrigação sobre o rendimento da cultura.

TABELA 9. Produtividade comercial da alface americana, em kg ha⁻¹, em função das lâminas de água e doses de nitrogênio. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Lâminas totais de água (mm)	Doses de nitrogênio (kg ha ⁻¹)				Médias
	N ₀ -0	N ₁ -80	N ₂ -160	N ₃ -320	
W ₁ -91,99	13602,8	13425,84	13491,39	14736,95	13814,25
W ₂ -142,79	23744,3	24190,1	24832,55	19928,97	23173,99
W ₃ -186,34	24511,3	23573,88	25357,0	25048,88	24622,77
W ₄ -237,14	17916,4	27094,23	23128,1	27841,56	23995,07
Médias	19943,7	22071,01	21702,26	21889,56	

4.8.1 Efeito das lâminas de água sobre a produtividade comercial

A análise de regressão para lâminas de água, de acordo com a Tabela 8, mostrou efeito altamente significativo, a 1% de probabilidade, tanto para o modelo linear e o quadrático. Isso mostrou que as lâminas de água aplicadas num intervalo bem amplo foram melhor representadas por uma relação polinomial de segundo grau. A equação ajustada apresentou coeficiente de determinação de 0,9848, evidenciando que mais de 98% da variação da

produção pode ser explicada pelo modelo (Figura 17). De acordo com esta equação, a máxima produtividade, 25.471,93 kg ha⁻¹, seria obtida com a aplicação de 196,76 mm de água.

Frizzzone et al. (1982), analisando a cultura do feijoeiro, num Latossolo Vermelho Escuro, constataram um aumento linear da produção com o aumento da lâmina d'água no intervalo de 350 a 530 mm.

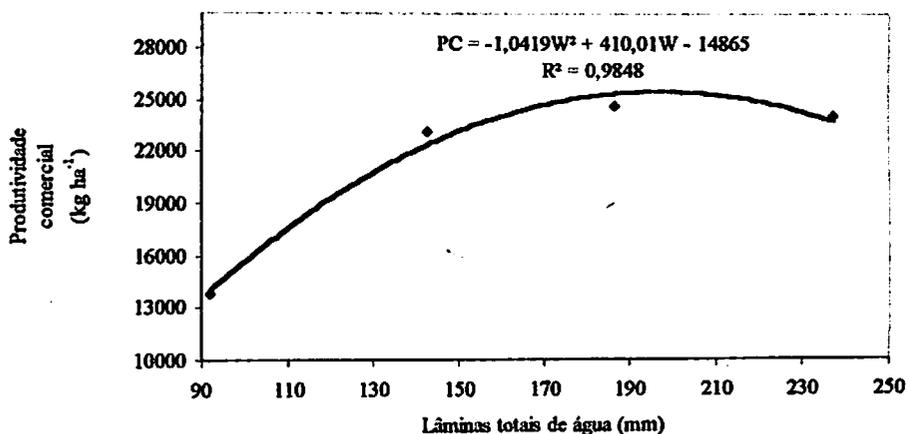


FIGURA 17. Curva de produtividade comercial da alface americana, em função das lâminas totais de água. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Uma síntese da análise de variância da regressão é apresentada na Tabela 4A, observando-se alta significância estatística para a lâmina de água dentro das doses de nitrogênio de 0, 80, 160 e 320 kg ha⁻¹, em que se verifica que o modelo polinomial quadrático se ajustou melhor aos dados exceto para a dose de 320 kg ha⁻¹, em que o modelo linear foi o mais adequado, como na Figura 18.

Os valores médios da produtividade comercial da alface americana em todas as doses de nitrogênio aumentaram com o total de água aplicado, atingindo

os máximos de 25.075,31; 26.643,44 e 26.442,8 kg ha⁻¹, respectivamente com as lâminas de 172,79; 220,95 e 186,43 mm e na doses de 0, 80 e 160 kg ha⁻¹.

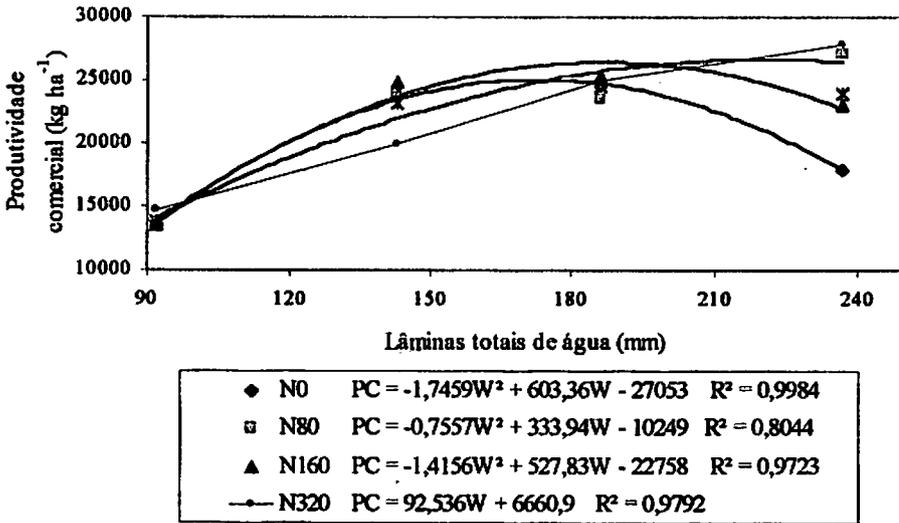


FIGURA 18. Produtividade comercial da alface americana, em função das lâminas de irrigação aplicadas, para todas as doses de nitrogênio. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.8.2 Lâmina de água economicamente ótima

Considerou-se como lâmina de água economicamente ótima aquela que conduziu a uma produtividade que proporcionou o lucro máximo. Isso foi possível derivando-se a função de produção, obtendo, assim, o produto físico marginal (PFMa) e, em seguida, igualando-se este indicador econômico a relação de preços entre fator lâmina de água e alface.

O produto físico marginal de um fator representa o acréscimo na produtividade resultante do uso de uma unidade a mais desse fator, permanecendo constante outros fatores.

Sob a hipótese de que $L(W)$ possui um máximo e que a água é o único fator variável, foram obtidos os produtos físicos marginais da água para as doses de 0, 80, 160 e 320 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Os produtos físicos marginais foram obtidos a partir das funções de produção estimadas para a produtividade comercial (ver Figura 18).

Diversos autores têm encontrado funções quadráticas, como as obtidas neste trabalho, para culturas como tomate (Alves, 1980; Cararo, 2000), feijão (Frizzone, 1986), milho (Silva et al., 1992), milho doce (Oliveira, 1993), cenoura (Carvalho, 1995), figueira (Hernandez et al., 1996), laranja (Bertonha, 1997), cana-de-açúcar (Souza et. al, 1997), melancia (Mousinho et al., 2003, Soares et al., 2002), melão (Monteiro, 2004) e trigo (Mello Júnior, 1992; Scalco, 2000) pois, nas funções quadráticas, existe um ponto de máximo, o que permite a obtenção da quantidade ótima de água e de nitrogênio. Assim, considerando que a resposta de produtividade de qualquer cultura à aplicação de água depende de muitos fatores, tais como frequência de irrigação, qualidade da água, método de aplicação de água, períodos críticos da cultura, heterogeneidade dos solos e condições climáticas, deve-se verificar a adequação dessas funções para os diferentes locais em que se deseje cultivar (Cararo, 2000). Como, para a dose 320 kg ha⁻¹, foi obtido um ajuste linear, após a derivação da equação chegou-se a um valor constante.

$$0 \text{ kg ha}^{-1}: \frac{\partial Y}{\partial W} = -3,4918 W + 603,36 = \frac{P_W}{P_Y}, \quad (24)$$

$$80 \text{ kg ha}^{-1}: \frac{\partial Y}{\partial W} = -1,5114 W + 333,94 = \frac{P_W}{P_Y}, \quad (25)$$

$$160 \text{ kg ha}^{-1}: \frac{\partial Y}{\partial W} = -2,8312 W + 527,83 = \frac{P_W}{P_Y}, \quad (26)$$

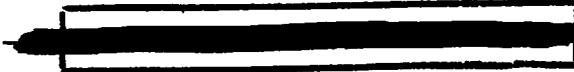
As equações de produtos físicos marginais são da forma linear. Analisando-se a Tabela 10, observa-se que, em uma mesma dose de nitrogênio, o valor do produto físico marginal da água (PFMa) foi inicialmente positivo e decrescente em relação ao da lâmina total de água aplicada.

TABELA 10. Produtos físicos marginais da água para a produtividade comercial da alface americana, considerando diferentes lâminas de água e fixando diferentes doses de nitrogênio. UFLA, Lavras, 2005.

Lâminas totais água (mm)	Produto físico marginal		
	Doses de nitrogênio (kg ha ⁻¹)		
	0	80	160
W ₁ - 91,99	282,15	194,91	267,39
W ₂ - 142,79	104,77	118,13	123,56
W ₃ - 186,34	-47,30	52,31	0,26
W ₄ - 237,14	-224,69	-24,47	-143,56

Quando o valor do PFMa atinge o valor zero, indica que, neste ponto, a lâmina total de água aplicada proporcionou a produtividade física máxima. A partir daí, a aplicação de maiores lâminas de água conduziu a valores de PFMa negativos, indicando que é antieconômico o uso da irrigação para aplicar aquelas lâminas de água. Para a obtenção da produtividade física máxima igualou-se a primeira derivada a zero, chegando a valores máximos de 25.075; 26.643 e 26.445 kg ha⁻¹, atingidos com as lâminas totais de água de 173; 221 e 186 mm e nas doses de nitrogênio de 0 (zero); 80 e 160 kg ha⁻¹.

As lâminas máximas econômicas foram calculadas igualando-se as equações dos produtos físicos marginais, nos respectivos níveis de nitrogênio, a



relação entre os preços do fator e do produto, obtendo-se, posteriormente, a produtividade máxima econômica correspondente.

De maneira a atender diferentes relações P_w/P_y , foram construídos gráficos dos valores de lâmina total de água economicamente ótima em função da relação de preços entre fator e produto (P_w/P_y), nas diferentes doses de nitrogênio (Figura 19 e Tabela 6A). Verifica-se que a lâmina economicamente ótima diminuiu à medida que aumentou a relação P_w/P_y , tendo os menores valores ocorrido para a dose zero de nitrogênio, o que se justifica pelas baixas produtividades obtidas nos tratamentos que não receberam adubação nitrogenada. Assim, não é econômico aplicar grandes lâminas de água quando o nitrogênio é o fator limitante da produção.

4.8.3 Efeito das doses de nitrogênio sobre a produtividade comercial

De acordo com os dados da Tabela 8, observa-se que não houve efeito significativo para nenhum dos modelos testados pela análise de regressão para doses de nitrogênio sobre a produtividade comercial da alface americana.

Um resumo da análise de variância da regressão é apresentado na Tabela 5ª, no qual se observou efeito significativo, a 1% de probabilidade, da dose de nitrogênio dentro das lâminas de água somente para a lâmina de 237,14 mm.

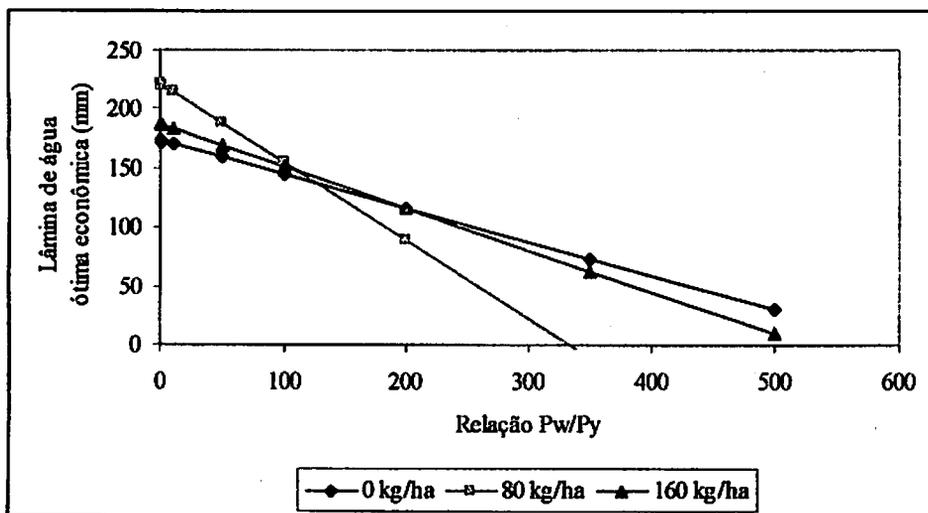


FIGURA 19. Lâmina total de água economicamente ótima em função da relação entre o preço da água e o preço da alface para a produtividade comercial da alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

4.8.4 Dose de nitrogênio economicamente ótima

Conforme a análise de variância e a análise de regressão, o efeito das doses de nitrogênio sobre a produtividade comercial da alface americana ocorreu somente para a lâmina total de 237,14 mm e foi explicado pelo modelo linear, significativo a 0,4% de probabilidade, contra 21,2% do modelo quadrático, com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,5164$. Portanto, o modelo linear foi o que melhor se adequou para explicar a variação da produtividade da alface americana em função das doses de nitrogênio e, por este motivo, tornou-se impraticável estimar a dose de nitrogênio economicamente ótima para cada lâmina de água. Os pressupostos para que se possa estimar a dose ótima econômica é que, além do modelo ser significativo e apresentar um elevado

coeficiente de determinação, o sinal da equação deve ser coerente com a teoria, a equação apresenta um máximo, que esteja dentro da zona racional de produção, além da facilidade do modelo quadrático em se obter o ótimo econômico.

4.8.5 Superfície de resposta

As discussões da eficiência econômica para doses de água e de nitrogênio ocorreram em situações em que se fixaram os níveis de um dos fatores de produção, enquanto o nível do outro era maximizado.

A obtenção das dosagens máximas econômicas de água e nitrogênio, sem que haja a fixação dos níveis de quaisquer dos fatores, leva à construção da superfície de resposta, ou seja, estima-se a produtividade comercial da alface para as duas variáveis: lâmina total de água (W) e dose de nitrogênio (N). A curva de resposta é apresentada pela expressão (27), com coeficiente de determinação (R^2) de 0,8311. Assim, 83,11% da variação da produtividade comercial da alface americana são explicados pela variação de água e dose de nitrogênio.

$$PC = -12490 + 388,1W - 6,02N - 1,042W^2 - 0,04563N^2 + 0,1564WN \quad (27)$$

em que:

PC = produtividade comercial da alface americana, em kg ha^{-1} ;

W = lâmina total de água, em mm;

N = dose de nitrogênio, em kg ha^{-1} .

Observa-se, na Figura 20, que, nas linhas da superfície, paralelas ao longo dos eixos da água e do nitrogênio, há inicialmente, uma maior inclinação positiva, a qual vai diminuindo progressivamente até atingir zero. A partir daí, a

inclinação torna-se negativa, indicando uma redução na produtividade da alface quando os níveis dos fatores excedem certos limites. Observa-se que a água foi um fator mais limitante na produtividade comercial da alface americana, fato este comprovado pela maior curvatura da linha do fator lâminas totais de água na superfície de resposta e que a resposta da produtividade às doses de nitrogênio foi menos pronunciada.

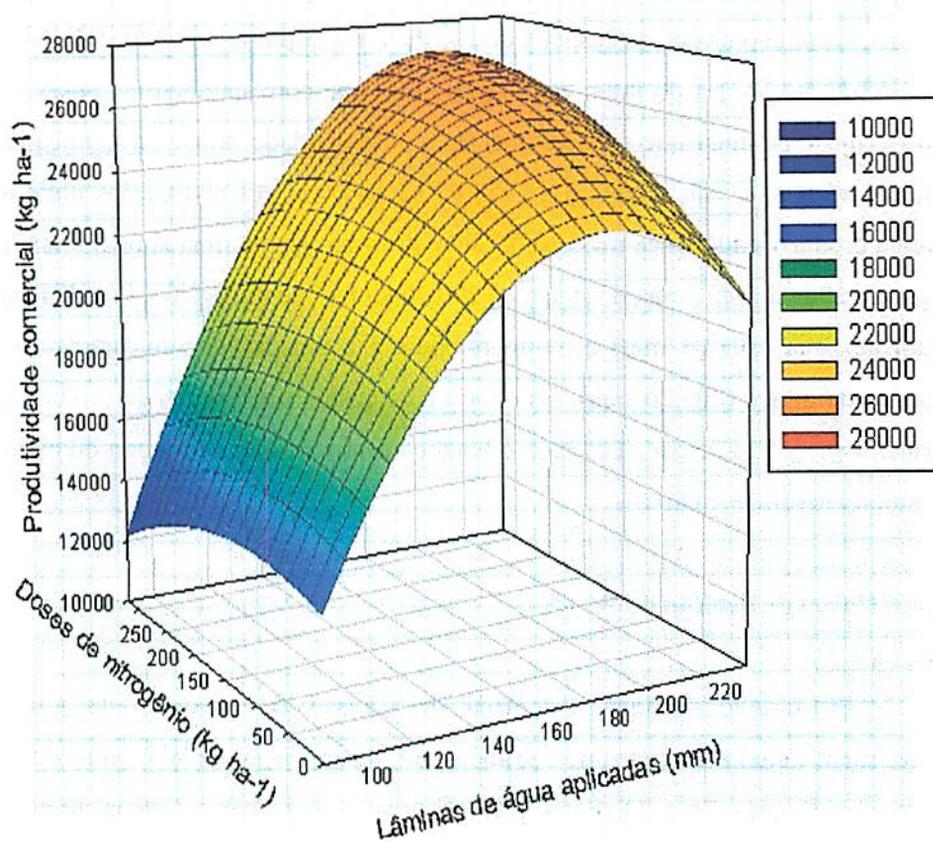


FIGURA 20. Produtividade comercial da alface americana, em função das lâminas totais de água e das doses de nitrogênio. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Conhecendo-se a função de produção (expressão 27), chega-se à derivada parcial em relação aos fatores estudados e iguala-se a relação entre o preço do fator correspondente e o preço da alface (expressões 28 e 29).

$$\frac{\partial Y}{\partial W} \cdot (388,1 - 2,084 W - 0,1564 N) = \frac{P_W}{P_Y} \quad (28)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial N} = (-6,02 - 0,09126 N + 0,1564 W) = \frac{P_N}{P_Y} \quad (29)$$

Com os valores conhecidos de P_Y , P_W e P_N , estimou-se o valor do fator N (257,14 kg ha⁻¹) e do fator W (205,26 mm), que correspondem às doses de nitrogênio e de água que proporcionaram a produtividade ótima econômica da alface americana, equivalente a 26.959,93 kg ha⁻¹, valores abaixo dos obtidos para a produtividade física máxima (27.004,49 kg ha⁻¹), com uma lâmina total de água de 208,03 mm e uma dosagem de 290,50 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Esta lâmina total de água (208,03 mm) é muito próxima à estimada economicamente no cultivo da alface (205,26 mm), isso porque os custos dos fatores de produção, principalmente a energia gasta para o bombeamento de água, ao longo do ciclo, foram relativamente baixos.

4.8.6 Curva de decisão de W e N

Procurando facilitar a tomada de decisão do produtor de alface americana, foram elaborados dois gráficos, um de aplicação de W e outro de N, conforme Figuras 21 e 22. Estes gráficos procuram indicar a lâmina de água econômica e a dose econômica de nitrogênio a ser aplicada, considerando diferentes relações de preços entre o insumo (água e nitrogênio) e o produto. A relação de preços (P_W/P_Y) foi calculada dividindo-se o preço do milímetro de água pelo preço do quilo da alface e (P_N/P_Y) pela relação entre o preço do quilo

do nitrogênio e do quilo da alfaca. Para tomar a decisão correta, é necessário que o produtor atualize a relação de preços na época da irrigação e da adubação. As lâminas de água ou doses econômicas das Figuras 21 e 22 mostram as quantidades totais a serem aplicadas, devendo os parcelamentos seguir os mesmos do experimento, sendo as doses válidas para as culturas com as mesmas características aqui descritas. A partir da primeira derivada da curva de resposta (expressão 28), foram obtidas as lâminas econômicas fixando-se o nitrogênio na dose de $257,14 \text{ kg ha}^{-1}$. O mesmo foi feito para a obtenção das doses econômicas (expressão 29), em que fixou-se a lâmina de água em $205,26 \text{ mm}$, valores estes que equivalem às dosagens ótimas de água e nitrogênio que proporcionam a produtividade ótima econômica. No Anexo B, foram feitas simulações entre relações de preço do fator e do produto e as lâminas e doses ótimas. Neste caso, foram fixados os valores de lâminas e doses de nitrogênio avaliados neste experimento.

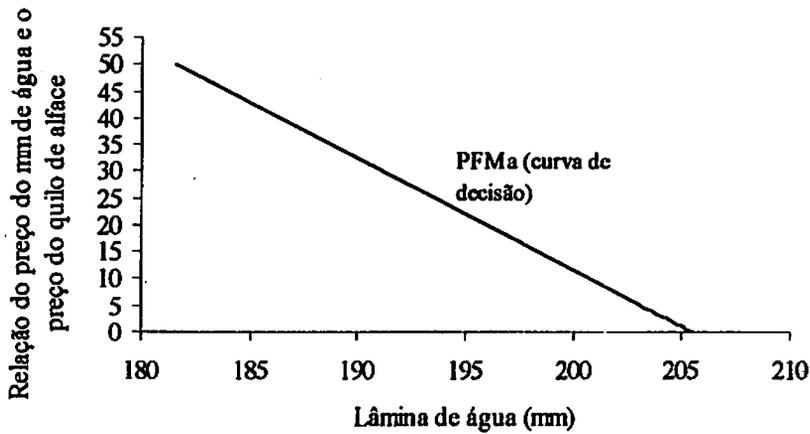


FIGURA 21. Simulação das relações de preços entre água e alface americana, e lâminas econômicas de água, fixando o nitrogênio na dose ótima econômica. UFLA, Lavras, MG, 2005.

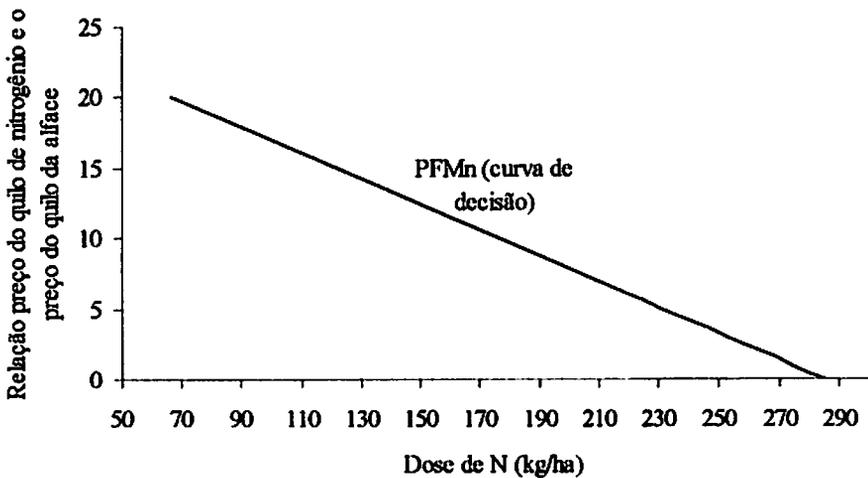


FIGURA 22. Simulação das relações de preços entre nitrogênio e alface americana, e doses econômicas de nitrogênio, fixando a água na lâmina ótima econômica. UFLA, Lavras, MG, 2005.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados observados neste trabalho, conclui-se que:

1. a aplicação de 205,26 mm de água e de 257,14 kg ha⁻¹ de nitrogênio proporcionou estimar uma produtividade máxima de 26.959,93 kg ha⁻¹ que correspondeu à obtenção do lucro máximo, considerando os preços dos fatores água (R\$ 0,44 mm⁻¹), nitrogênio (R\$ 2,09 kg⁻¹) e da alface americana (R\$ 0,80 kg⁻¹);
2. a produtividade física máxima de 27.004,49 kg ha⁻¹ foi estimada com 208,03 mm e 290,5 kg ha⁻¹ de nitrogênio;
3. o menor valor médio da produtividade comercial da alface americana (13.814,25 kg ha⁻¹) foi obtido no tratamento onde foi aplicada a menor lâmina de água (91,99 mm). Esta produtividade é inferior àquela obtida no tratamento com dose 0 kg ha⁻¹ de nitrogênio, cuja produtividade média foi de 19.943,7 kg ha⁻¹, indicando portanto, que a água é um fator altamente limitante para o desenvolvimento da alface americana.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIANUAL 2006: Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: FNP. Comércio e Consultoria, 2006. p. 147-148.

AGUIAR, J. V. **Determinação do consumo de água e da função de produção do caupi irrigado no Município de Bragança – Pará.** 1989. 106 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

ALVARENGA, M. A. R. **Crescimento, teor e acúmulo de nutrientes em alface americana (*Lactuca sativa* L.) sob doses de Nitrogênio aplicadas no solo e de níveis de Cálcio aplicado via foliar.** 1999. 117 p. Dissertação (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ALVES, D. R. B. A. **Efeito de adubação nitrogenada via fertirrigação e aplicação de forma convencional na produção de alface (*Lactuca sativa* L.) em estufa.** 1995. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

ALVES, E. M. **Efeito de diferentes lâminas d'água sobre a produção de três cultivares de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, Mill), com utilização da irrigação por gotejamento.** 1980. 72 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. de. **Manejo da irrigação na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) através do tanque classe A.** 1994. 104 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; RODRIGUES, B. H. N.; SOBRINHO, C. A.; MEIO, F. de B.; BASTOS, F. A.; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. **Influência de níveis de irrigação sobre a produtividade e qualidade de frutos de melancia.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25., 1996. Bauru-SP. Anais... Bauru: SBEA, 1996. p.141.

ANTUNES, F. Z. **Caracterização climática do estado de Minas Gerais. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 9-14, jun.1986.**

BARROS, V. da S. **Função de produção do melão (*Cucumis melo* L.) aos níveis de água e adubação nitrogenada no Vale do Curu-CE.** 1999. 91 p.

Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1995. 656 p.

BERTONHA, A. **Funções de resposta da laranja pêra a irrigação complementar e nitrogênio**. 1997. 113 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

BEZERRA, F. M. L.; MOURÃO, R. M. B. Produtividade e qualidade de frutos de melão em função de diferentes níveis de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 40., 2000, Brasília-DF. **Anais...** Brasília: SOB, 2000. p.601.

BUENO, C. R. **Adubação nitrogenada em cobertura via fertirrigação por gotejamento para a alface americana em ambiente protegido**. 1998. 54 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación**. 3. ed. Madrid:Ediciones Mundi-Prensa, 1996. 511 p.

CARARO, D. C. **Efeito de diferentes lâminas de água na presença e ausência de CO₂ injetado na água de irrigação sobre a cultura do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado em estufa**. 2000. 70 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CARVALHO, J. A. **Coefficientes de cultura, avaliação econômica da produção e análise do crescimento da cenoura (*Daucus carota* L.) irrigada**. 1995. 78 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CARVALHO, L. G. de; SAMPAIO, S. C.; SILVA, A. M. da. Determinação da umidade na capacidade de campo *in situ* de um Latossolo Roxo Distrófico. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 7, n. 1, p. 1-97, dez.1996.

CERMEÑO, Z. S. **Estufas – instalações e manejo**. Lisboa: Litexa Editora, 1990. 355 p.

CONTI, J. H. **Caracterização de cultivares de alface (*Lactuca sativa* L.) adaptadas aos cultivos de inverno e verão.** 1994. 107 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

DANTAS NETO, J. **Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água.** 1994. 125 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

DAVIS, R. M.; SUBBARAO, K. V.; RAID, R. N.; KURTZ, E. A. **Compendium of lettuce diseases.** St. Paul: The American Phytopathological Society. 1997. 79 p.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Crop response to water.** Roma: FAO, 1979. 194 p. (FAO, irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O.; **Crop water requirements.** Roma: FAO, 1977. 179 p. (Irrigate and Drenage Paper, 24).

DOURADO NETO, D.; LIER, Q. J. V.; BOTREL, T. A. Programa para confecção da curva de retenção da água no solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, n. 2, p. 92-102, dez. 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: Embrapa Produção de Informações (SPI), 1999. 412 p.

FAO. **Agricultural production, primary crops.** Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 10 abr. 2002.

FERGUSON, C. E. **Microeconomia.** 13. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1989. 610 p.

FERNANDES, A. L. T.; TESTEZLAF, R.; DRUMOND, L. C. D.; SOUZA, G. F.; SANTOS, W. O. Utilização de mini-tanque evaporimétrico para controle da irrigação da cultura do melão cultivado em estufa plástica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. p. 22.

FERNANDES, H. S.; MARTINS, R. S. Cultivo de alface em ambiente protegido. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 56-63, set./dez. 1999.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos, SP., **Anais...** São Carlos: Sociedade Internacional de Biometria, 2000. p. 255-258.

FIGUERÊDO, S. F. **Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão de água no solo para a cultura do feijoeiro**. 1998. 94 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo Manual de Olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: UFV, 2000. 402 p.

FRIZZONE, J. A.; TEODORO, R. E. F.; PEREIRA, A. S.; BOTREL, T. A. Lâminas de água e doses de nitrogênio na produção de aveia (*Avena sativa* L.) para forragem. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 578-586, set./dez. 1995.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. 42 p. (Série Didática, 6).

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação**. 1986. 133 p. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

FRIZZONE, J. A.; CASSIANO SOBRINHO, M. F. de SÁ; BUZZETTI, S. Efeito da irrigação e da adubação fosfatada sobre a produção de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 1., 1982, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Embrapa-CNPAP, 1982. p. 169-172.

FURTADO, S. C. **Nitrogênio e fósforo na produção e nutrição mineral da alface americana cultivada em sucessão ao feijão após o pousio da área**. 2001. 78 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

GARCIA, L. L. C.; HAAG, H. P.; MINAMI, K.; SARRUGE, J. R. Nutrição mineral de hortaliças. Concentração e acúmulo de micronutrientes em alface

(Lactuca sativa L.) cvs. Brasil-48 e Clause's Aurélia. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba**, v. 39, n. 1, p. 485-504, 1982.

GOMES, E. P. **Cultivo da alface (*Lactuca sativa L.*) sob diferentes lâminas de água aplicadas através de irrigação por gotejamento superficial e subsuperficial**. 2001. 71 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

GOMES, L. A. A.; SILVA, E. C. da; FAQUIN, V. **Recomendações de adubação para cultivos em ambiente protegido**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, 1999. p. 99-110.

GOMIDE, R. L. **Automação de sistemas de irrigação em fruticultura irrigada**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 16., 2000, Fortaleza, CE. **Palestra...** Fortaleza, 2000. p. 156-181.

HAMADA, E.; TESTELAF, R. **Análise de crescimento da alface (*Lactuca sativa L.*) submetida a diferentes lâminas de água, aplicadas através da irrigação**. **Revista Ecossistema, Espírito Santo do Pinhal**, v. 21, p. 62-65, dez. 1996.

HERNANDEZ, F. B. T.; SUZUKI, M. A.; FRIZZONE, J. A.; TARSITANO, M. A. A.; PEREIRA, G. T.; CORRÊA, L. de S. **Função de resposta da figueira à aplicação de doses de nitrogênio e lâminas de água**. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 16, n. 2, p. 22-30, dez. 1996.

HEXEM, R. W.; HEADY, E. O. **Water production functions for irrigated agriculture**. Ames, Iowa: The Iowa University Press, 1978. 215 p.

KATAYAMA, M. **Nutrição e adubação da alface, chicória e almeirão**. In: FERREIRA, M. E.; CASTELLANE, P. D.; CRUZ, M. C. P. da. (Ed.). **Nutrição e adubação de hortaliças**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.141-148.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1988.

MADEIRA, N. R.; YURI, J. E.; MOTA, J. H.; FREITAS, S. A. C.; RODRÍGUEZ JÚNIOR, J. C. **Fornecimento de nitrogênio, potássio e cálcio para alface americana via fertirrigação**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 40., 2000. Águas de São Pedro. **Anais...** Águas de São Pedro: SOB, 2000. p. 841-842.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MAROTO, J. V. Horticultura herbácea especial. 2.ed. Madrid: Mundi Prensa, 1986. 590 p.

MAROUELLI, W. A.; PEREIRA, W.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. Resposta da aboboreira híbrida a diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 40., 2000, Brasília-DF. Anais... Brasília: SOB, 2000. p. 609.

MEDEIROS, J. F.; NASCIMENTO, I. B. do; COSTA, M. da C.; SCALOPPI, E. J. Produção de melão sob diferentes lâminas de água com dois níveis de salinidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 40., 2000, Brasília-DF. Anais... Brasília: SOB, 2000. p.612.

MEDEIROS, J. F.; PEREIRA, F. A. C.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. Comparação entre a evaporação em tanque Classe A padrão e em minitanque, instalados em estufa e estação meteorológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. Anais... Piracicaba: ESALQ/USP, 1997. p. 228-230.

MÉLLO JUNIOR, A. V. Funções de resposta do trigo (*Triticum aestivum* L.) à níveis de irrigação e de nitrogênio. 1992. 159 p Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

MONTEIRO, R. O. C. Função de resposta da cultura do meloeiro aos níveis de água e adubação nitrogenada no vale do Curu, CE. 2004. 87 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

MOTA, J. H. Efeito do cloreto de potássio via fertirrigação na produção de alface americana em cultivo protegido. 1999. 46 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MOTA, J. H.; YURI, J. E.; FREITAS, S. A. C.; RODRIGUES JÚNIOR, J. C.; RESENDE, G. M. de; SOUZA, R. J. de. Avaliação de cultivares de alface americana durante o verão em Santana da Vargem, MG. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 2, p. 234-237, abr./jun. 2003.

MOUSINHO, F. E. P.; COSTA, R. N. T.; GOMES FILHO, R. R. Função de resposta da melancia à aplicação de água e nitrogênio para as condições

edafoclimáticas de Fortaleza, CE. Irriga, Botucatu, v. 8, n. 3, p. 264-272, set./dez. 2003.

NEVES, M. C. P. Interdependência fisiológica entre os componentes do sistema simbiótico *Rhizobium* leguminosas. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Campinas, v. 5, n. 2, p. 79-82, maio/ago. 1981.

OLIVEIRA, S. L. de. **Funções de resposta do milho doce ao uso de irrigação e nitrogênio**. 1993. 91 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEREIRA, A. L.; CRUZ, R. L.; KROLL, L. B. Efeitos de lâminas de água e doses de adubação nitrogenada em cobertura, sobre a produção do feijoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000. Fortaleza-CE. *Anais...* Fortaleza: SBEA, 2000. p. 141. 1CD-ROOM. Trabalho Eas064.doc.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PINTO, J. M.; SOARES, J. M.; PEREIRA, J. R.; BRITO, L. T. de L.; FARIAS, C. M. B. de; MACIEL, J. L. **Sistema de cultivo de melão com aplicação de fertilizantes via água de irrigação**. Brasília: Embrapa-SPI/ Petrolina: Embrapa-CPATSA, 1996. 24 p. (Circular Técnica 36).

R. Development Core Team (2005). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 2005.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw-hill do Brasil, 1978.

REICHARDT, K. O solo como um reservatório de água. In: REICHARDT, K. (Ed.). **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole, 1990. p. 27-69.

RESENDE, G. M. de. **Características produtivas, qualidade pós-colheita e teor de nutrientes em alface americana (*Jactuca sativa* L.) sob doses de nitrogênio e molibdênio, em cultivo de verão e inverno**. 2004. 134 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

RHOADES, J. D.; MIYAMOTO, S. Testing soils for salinity and sodicity. In: WESTERMAN, R. L. (Ed.) **Soil testing and plant analysis**. 3. ed. Madison: Soil Science Society of América, 1990. p. 299-336.

RHODES, D. U. S. **Head lettuce production statistics (1993-1997)**. Disponível em: <<http://newcrop.hort.produce.edu/rhodcv/hort410/lettuc/le00002.htm>>. Acesso em: 2005.

ROCIO, A. C.; FERREIRA, V. P.; LAUER, C.; ROSONE, E.; SILVA, E. L.; NICOLAUD, B. A. L. Resposta da alface à fertilização nitrogenada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 39., 1999, Tubarão. Anais... Tubarão: SOB/UNISUL, 1999. p.316.

RYDER, E. J.; WHITAKER, T. N. Lettuce. In: SIMMONDS, N. W. (Ed) **Evolution of crop plants**. New York: Longman Group, 1976. p. 39-41.

SANDERS, D. C. **Lettuce production**. Disponível em: <<http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/hil/hil-11.html>>. Acesso em: 11 out. 1999.

SANTOS, S. R. **Alface americana cultivada em ambiente protegido sob diferentes tensões de água no solo**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SCALCO, M. S. **Características agronômicas do trigo (*Triticum*)**. 2000. 143 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SGANZERLA, E. **Nova agricultura: a fascinante arte de cultivar com os plásticos**. 5. ed. Guaíba: Agropecuária, 1995. 342 p.

SILVA, A. T. da. **Sistemas Pressurizados de Irrigação: aspersão convencional e localizada**. Itaguaí: UFRRJ, 1994. 257 p.

SILVA, D. D.; LOUREIRO, B. T.; BERNARDO, S.; GALVÃO, J. D. Efeito de lâminas e doses de nitrogênio na cultura do milho, irrigado por aspersão em linha. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 39, n. 222, p. 91-104, mar./abr. 1992.

SILVA, F. M. da ; AZEVEDO, J. A. de; GUERRA, A. F.; FIGUÊREDO, S. F.; ANDRADE, I. M. de; ANTONINI, J. C. dos A. Manejo de irrigação para grandes culturas. In: **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. p.239-280.

SILVA, W. L. C.; MAROUELLI, W. A. Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poço de Caldas. **Simpósio... Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 311-348.**

SOARES, J. I.; COSTA, R. N. T.; SILVA, L. A. C.; GONDIM, R. S. Função de resposta da melancia aos níveis de água e adubação nitrogenada, no Vale do Curu, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 219-224, jul./ago. 2002.**

SOUZA, E. F.; MARTINS, D. P.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J. A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à lâmina de água em Campos de Goytacazes – RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Anais... Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997.**

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.**

WEIR, R. G.; CRESSWELL, G. C. **Plant nutrient disorders 3. Vegetable crops. Australia: Antaka, 1993. 105 p.**

YURI, J. E. **Avaliação de cultivares de alface americana em duas épocas de plantio em dois locais do Sul de Minas Gerais. 2000. 51 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.**

YURI, J. E. **Produção, nutrição e conservação pós-colheita da alface tipo americana, cv. Raider, no verão e no inverno, em função da aplicação de nitrogênio e potássio em cobertura. 2004. 139 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.**

YURI, J. E.; MOTA, J. H.; SOUZA, R. J.; RESENDE, G. M.; FREITAS, S. A. C.; RODRÍGUEZ JÚNIOR, J. C. **Alface americana – Cultivo comercial. Lavras: UFLA, 2002. 51 p. (Textos acadêmicos – Olericultura).**

ANEXOS

ANEXO A

	Página
TABELA 1A	Resumo da análise de regressão, para lâminas de água dentro das doses de nitrogênio para o diâmetro do caule de plantas de alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005. 85
TABELA 2A	Resumo da análise de variância da regressão, para lâminas de água dentro das doses de nitrogênio para a produtividade total. UFLA, Lavras, MG, 2005. 86
TABELA 3A	Resumo da análise da regressão do desdobramento referente à produtividade comercial da alface americana, para lâminas totais de água dentro das doses de nitrogênio. UFLA, Lavras, MG, 2005. 87
TABELA 4A	Resumo da análise de regressão do desdobramento referente a produtividade comercial da alface americana, para doses de nitrogênio dentro das lâminas totais de água. UFLA, Lavras, MG, 2005. 88
TABELA 5A	Lâminas de água economicamente ótimas em função da relação entre o preço da água (P_w) e o preço da alface (P_v). 89

FIGURA 1B	Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alfaca, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 0 kg ha ⁻¹ . UFLA, Lavras, MG, 2005.	90
FIGURA 2B	Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alfaca, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 80 kg ha ⁻¹ . UFLA, Lavras, MG, 2005.	90
FIGURA 3B	Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alfaca, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 160 kg ha ⁻¹ . UFLA, Lavras, MG, 2005.	91
FIGURA 4B	Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alfaca, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 320 kg ha ⁻¹ . UFLA, Lavras, MG, 2005.	91
FIGURA 5B	Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 91,99 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.	92
FIGURA 6B	Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 142,79 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.	92
FIGURA 7B	Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 186,34 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.	93
FIGURA 8B	Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 237,14 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.	93

TABELA 1A. Resumo da análise de regressão, para lâminas de água dentro das doses de nitrogênio para o diâmetro do caule de plantas de alface americana. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Causas de variação	GL	QM	F	R ²
W: 0 kg ha ⁻¹	3	13,8884	3,338*	
Linear	1	7,9641	1,914 ^{NS}	0,1911
Quadrática	1	33,701	8,099**	1,00
Cúbica	1	0,000002	0,000**	1,00
W: 80 kg ha ⁻¹	3	57,7610	13,881**	
Linear	1	141,1854	33,930**	0,8148
Quadrática	1	20,254	4,868*	0,9317
Cúbica	1	11,8436	2,846 ^{NS}	1,00
W: 160 kg ha ⁻¹	3	44,9497	10,803**	
Linear	1	78,2146	18,797**	0,58
Quadrática	1	54,6133	13,125**	0,985
Cúbica	1	2,0212	0,486 ^{NS}	1,00
W: 320 kg ha ⁻¹	3	38,039	9,142**	
Linear	1	83,1843	19,991**	0,7289
Quadrática	1	12,1807	2,927°	0,8357
Cúbica	1	18,7522	4,507*	1,00
Resíduo	30	4,161		

* e ° significativo ao nível de 1%, 5% e 10% de probabilidade, respectivamente
^{NS} não significativo

TABELA 2A. Resumo da análise de variância da regressão, para lâminas de água dentro das doses de nitrogênio para a produtividade total. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Causas de variação	GL.	QM	F	R ²
W: 0 kg ha ⁻¹	3	221044469,29	5,004**	
Linear	1	16134333,74	0,365 ^{NS}	0,0243
Quadrática	1	646964122,30	14,645**	0,9999
Cúbica	1	34951,83	0,001 ^{NS}	1,0000
W: 80 kg ha ⁻¹	3	421222970,31	9,535**	
Linear	1	1178915961,09	26,687**	0,7579
Quadrática	1	193335674,91	4,377*	0,8822
Cúbica	1	183169603,81	4,146°	1,0000
W: 160 kg ha ⁻¹	3	396018103,62	8,965**	
Linear	1	576450694,13	13,049**	0,4562
Quadrática	1	679173130,14	15,375**	0,9936
Cúbica	1	8045086,65	0,182 ^{NS}	1,0000
W: 320 kg ha ⁻¹	3	518473746,60	11,737**	
Linear	1	934072479,40	21,145**	0,7862
Quadrática	1	180402859,31	4,084*	0,9381
Cúbica	1	73578972,15	1,666 ^{NS}	1,0000
Resíduo	30	44175288,04		

** e ° significativo ao nível de 1%, 5% e 10% de probabilidade, respectivamente
^{NS} não significativo

TABELA 3A. Resumo da análise da regressão do desdobramento referente à produtividade comercial da alface americana, para lâminas totais de água dentro das doses de nitrogênio. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Causas de variação	GL	QM	F	R ²
W/N ₀	3	79624403,64	8,037**	
Linear	1	28410309,72	2,868 ^{NS}	0,1189
Quadrática	1	210080397,40	21,204**	0,9984
Cúbica	1	382503,81	0,039 ^{NS}	1,00
W/N ₁	3	106720935,92	10,772**	
Linear	1	250185498,83	25,252**	0,7814
Quadrática	1	39355746,51	3,972*	0,9044
Cúbica	1	30621562,44	3,091 ^o	1,00
W/N ₂	3	92607191,08	9,347**	
Linear	1	132002459,31	13,323**	0,4751
Quadrática	1	138109828,45	13,940**	0,9723
Cúbica	1	7709285,47	0,778 ^{NS}	1,00
W/N ₃	3	100411388,62	10,135**	
Linear	1	294974129,98	29,773**	0,9792
Quadrática	1	4317612,33	0,436 ^{NS}	0,9936
Cúbica	1	1942423,56	0,196 ^{NS}	1,00
Resíduo	30	9907558,18		

^o, * e ** significativo ao nível de 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente
^{NS} não significativo

TABELA 4A. Resumo da análise de regressão do desdobramento referente a produtividade comercial da alface americana, para doses de nitrogênio dentro das lâminas totais de água. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Causas de variação	GL	QM	F	R ²
N/W ₁	3	1151183,13	0,116 ^{NS}	
Linear	1	2419819,52	0,244 ^{NS}	0,7007
Quadrática	1	1029650,10	0,104 ^{NS}	0,9988
Cúbica	1	4079,76	0,000 ^{NS}	1,00
N/W ₂	3	14638703,03	1,478 ^{NS}	
Linear	1	25634535,51	2,587 ^{NS}	0,5837
Quadrática	1	17028453,23	1,719 ^{NS}	0,9715
Cúbica	1	1253120,34	0,126 ^{NS}	1,00
N/W ₃	3	1833258,21	0,185 ^{NS}	
Linear	1	1546768,41	0,156 ^{NS}	0,2812
Quadrática	1	2092,94	0,000 ^{NS}	0,2816
Cúbica	1	3950913,29	0,399 ^{NS}	1,00
N/W ₄	3	62102058,81	6,268 ^{**}	
Linear	1	96206200,18	9,710 ^{**}	0,5164
Quadrática	1	16134340,87	1,628 ^{NS}	0,6030
Cúbica	1	73965635,38	7,466 ^{**}	1,00
Resíduo	30	9907558,18		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade

^{NS} não significativo

TABELA 5A. Lâminas de água economicamente ótimas em função da relação entre o preço da água (P_w) e o preço da alface (P_Y).

P_w/P_Y	Doses de nitrogênio (kg ha^{-1})			
	0	80	160	320
0	172,7934	220,9475	186,4333	349,4207
0,05	172,7791	220,9144	186,4157	349,3208
0,1	172,7648	220,8813	186,398	349,2209
0,15	172,7504	220,8482	186,3803	349,1211
0,2	172,7361	220,8151	186,3627	349,0212
0,25	172,7218	220,7821	186,345	348,9213
0,3	172,7075	220,749	186,3274	348,8214
0,35	172,6932	220,7159	186,3097	348,7215
0,4	172,6788	220,6828	186,292	348,6217
0,45	172,6645	220,6497	186,2744	348,5218
0,5	172,6502	220,6166	186,2567	348,4219
0,55	172,6359	220,5836	186,2391	348,322
0,6	172,6216	220,5505	186,2214	348,2221
0,65	172,6073	220,5174	186,2037	348,1223
0,7	172,5929	220,4843	186,1861	348,0224
0,75	172,5786	220,4512	186,1684	347,9225
0,8	172,5643	220,4182	186,1507	347,8226
0,85	172,55	220,3851	186,1331	347,7227
0,9	172,5357	220,352	186,1154	347,6229
0,95	172,5213	220,3189	186,0978	347,523
1	172,507	220,2858	186,0801	347,4231

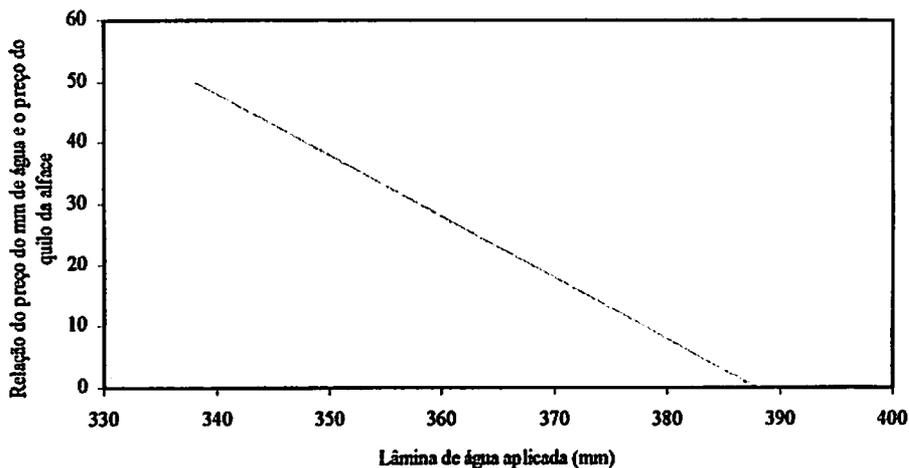


FIGURA 1B. Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alface, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 0 kg ha⁻¹. UFLA, Lavras, MG, 2005.

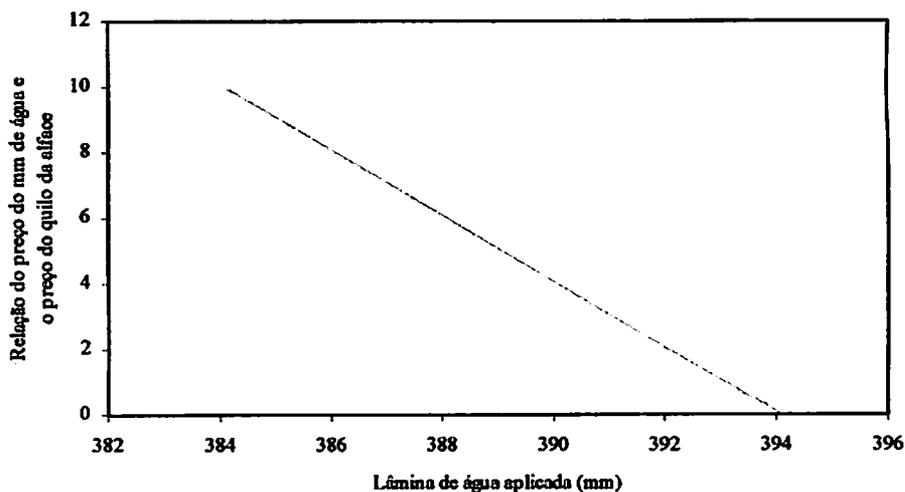


FIGURA 2B. Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alface, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 80 kg ha⁻¹. UFLA, Lavras, MG, 2005.

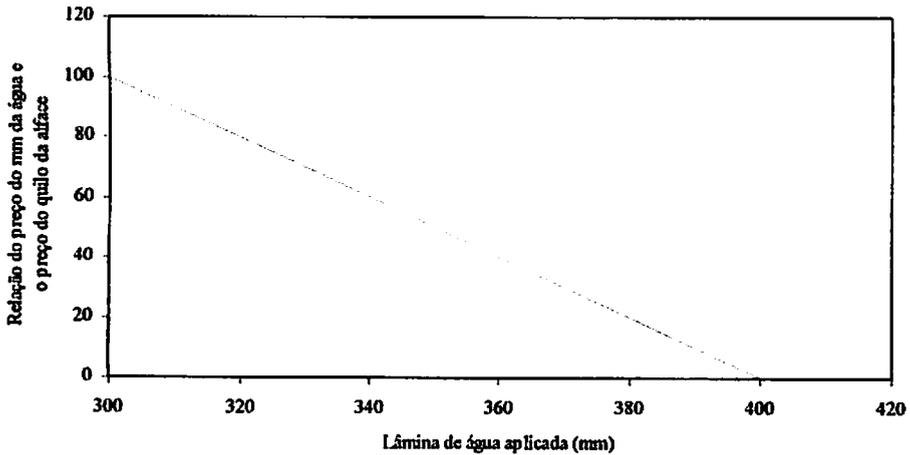


FIGURA 3B. Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alfaca, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 160 kg ha⁻¹. UFLA, Lavras, MG, 2005.

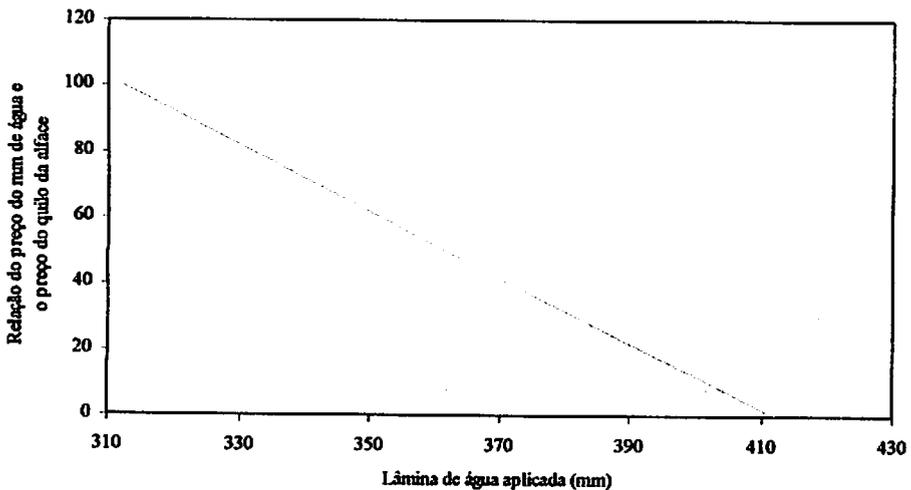


FIGURA 4B. Simulação das relações de preços entre o milímetro de água e a alfaca, e lâminas de água econômicas em mm, para a dose de 320 kg ha⁻¹. UFLA, Lavras, MG, 2005.

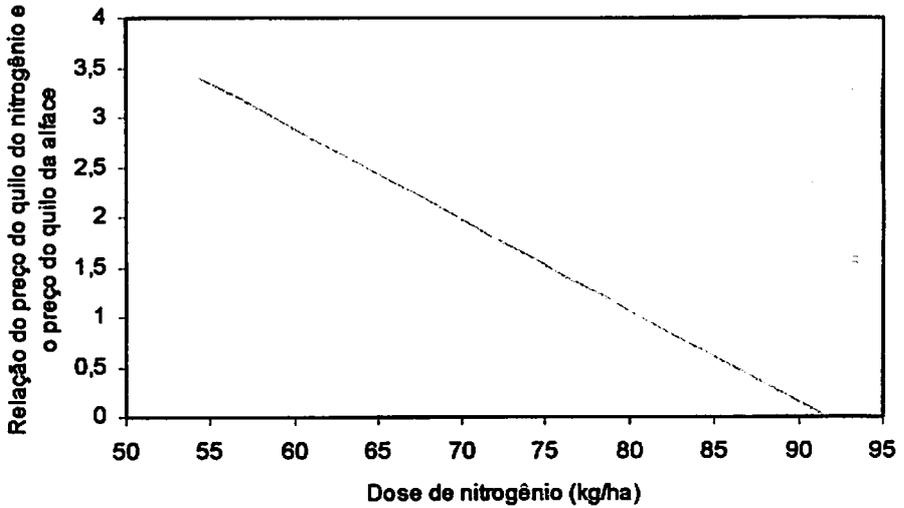


FIGURA 5B. Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 91,99 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.

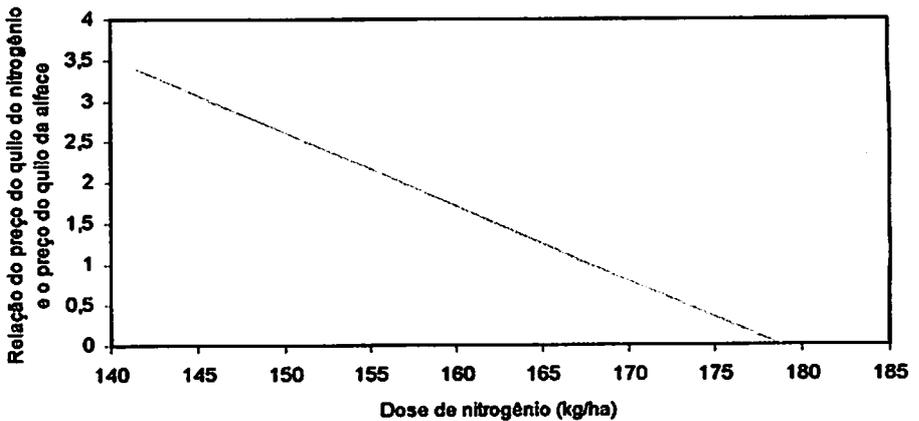


FIGURA 6B. Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 142,79 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.

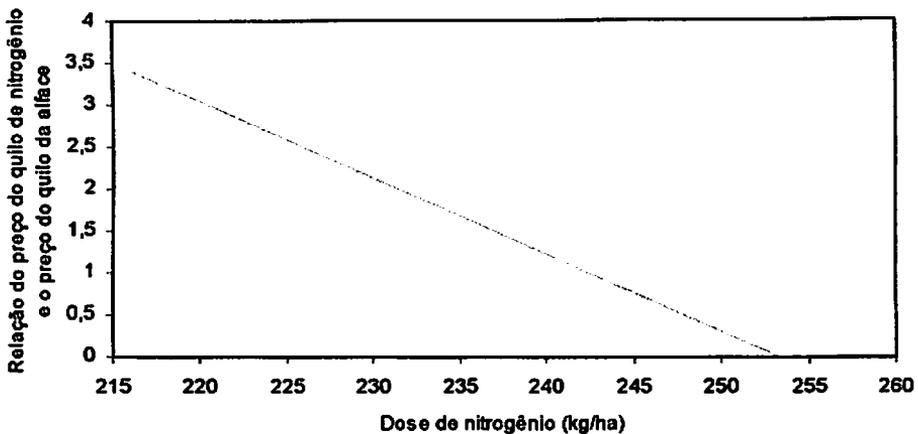


FIGURA 7B. Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 186,34 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.

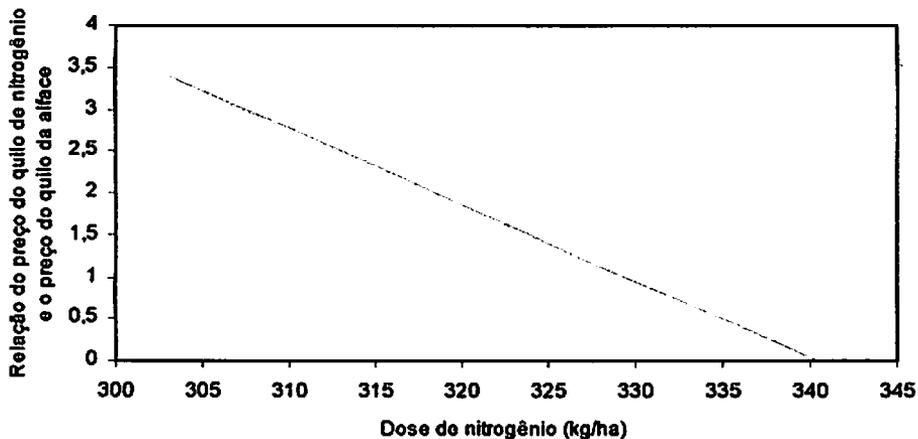


FIGURA 8B. Simulação das relações de preços entre o quilo do nitrogênio e a alfaca, e doses de nitrogênio econômicas em mm, para a lâmina de 237,14 mm. UFLA, Lavras, MG, 2005.