

GREGORIO GUIRADO FACCIOLI

**MODELAGEM DA UNIFORMIDADE E DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO NA
PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "*Doctor Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS-BRASIL
2002

GREGORIO GUIRADO FACCIOLI

**MODELAGEM DA UNIFORMIDADE E DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO NA
PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO**

**Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola,
para obtenção do título de “*Doctor
Scientiae*”.**

APROVADO: 22 de janeiro de 2002

Prof. Brauliro Gonçalves Leal
(Conselheiro)

Prof . Márcio M. Ramos

Prof. Paulo Sérgio L. de Freitas

Eng. Mauricio B. Coelho

Prof. Everardo Chartuni Mantovani
(Orientador)

À minha mãe, ao meu pai e ao meu
filho, Felipe, pelo enorme apoio, carinho
e amor e pela compreensão.

AGRADECIMENTO

À Deus.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial ao seu Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade de realização deste curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Everardo Chartuni Mantovani, pela orientação, pela dedicação, pelas sugestões, pela participação e pela amizade, o que permitiu não só a realização deste trabalho, mas também o meu fortalecimento como pessoa e profissional.

Aos professores conselheiros Luis Cláudio Costa, Antônio Alves Soares e Brauliro Gonçalves Leal, pela colaboração e pelas sugestões.

À empresa Agrosystem, pelo interesse em participar em pesquisa científica.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola e da Estação Experimental de Coimbra, pela colaboração na montagem e condução do experimento.

A todos os funcionários do Laboratório de Controle de Fitopatógenos do Departamento de Fitopatologia, pelos ensinamentos e pela contribuição na utilização dos equipamentos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos e pelo convívio diário.

A todos os amigos, em especial ao Paulo Sérgio, Marcio Takeshi e Cléia, pela ajuda na montagem e condução do experimento, e aos amigos Luis Otávio e Maurício pelo apoio, pela amizade e pelo companheirismo ao longo do curso.

A todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a conclusão deste trabalho.

BIOGRAFIA

GREGORIO GUIRADO FACCIOLI, filho de Vicente Guirado Faccioli e Neusa de Oliveira Faccioli, nasceu em São Paulo - SP, em 15 de maio de 1971.

Em 1989, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa - MG, tendo sido bolsista de Iniciação Científica no Departamento de Engenharia Agrícola. Diplomou-se em julho de 1994.

De agosto de 1994 até fevereiro de 1996, foi bolsista de Aperfeiçoamento na EMBRAPA de Milho e Sorgo, em Sete Lagoas - MG, na área de concentração de Irrigação e Drenagem.

Em março de 1996, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa - MG, defendendo tese em agosto de 1997.

Em agosto de 1997, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa - MG, defendendo tese em janeiro de 2002.

CONTEÚDO

	Páginas
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO I.....	4
INFLUÊNCIA DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO NA PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO IRRIGADO.....	4
1- INTRODUÇÃO.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. Cultura do feijão.....	6
2.2. Irrigação por aspersão.....	10
2.3. Uniformidade de irrigação.....	11
2.4. Eficiência de irrigação.....	19
2.5. Efeito da uniformidade de aplicação de água na produtividade das culturas.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Localização da área experimental.....	25
3.2. Parâmetros químicos, granulométricos e físico-hídricos do solo.....	26
3.3. Esquema experimental.....	27
3.4. Semeadura.....	30
3.5. Irrigação.....	30
3.5.1. Sistema de irrigação.....	30
3.5.2. Calendário das irrigações.....	32
3.5.3. Manejo da irrigação.....	32

3.5.4. Determinação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).....	35
3.5.5. Área adequadamente irrigada.....	36
3.6. Elementos meteorológicos.....	36
3.7. Parâmetros da cultura.....	37
3.7.1. Área foliar.....	37
3.7.2. Avaliação dos componentes de produção.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. Dados climáticos.....	39
4.2. Evapotranspiração de referência e evapotranspiração potencial da cultura.....	42
4.3. Irrigações realizadas e coeficiente de uniformidade.....	43
4.4. Área adequadamente irrigada.....	50
4.5. Área foliar.....	52
4.6. Componentes de produção.....	54
4.6.1. Matéria seca (MS).....	55
4.6.2. Número de vagens por planta (NVP).....	57
4.6.3. Produtividade (P).....	60
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	67
CAPÍTULO 2.....	69
MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO FEIJÃO EM FUNÇÃO DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO E DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	69
1. INTRODUÇÃO.....	69
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	72
2.1. Função de produção.....	72
2.1.1. Função de produção água-cultura.....	72
2.1.2. Modelagem das funções de produção água-cultura.....	74
2.1.2.1. Função de produção transpiração-cultura.....	74
2.1.2.2. Função de produção evapotranspiração-cultura.....	76
2.1.2.3. Função de produção água aplicada-cultura.....	81
2.1.3. Análise econômica de funções de produção.....	84
2.2. Modelos de simulação do crescimento das culturas.....	85
2.3. SISDA – Sistema de Suporte à Decisão Agrícola.....	87
2.4. Distribuição de água pelo aspersor.....	88
2.4.1. Modelo de distribuição linear.....	88
2.4.2. Modelo de distribuição normal.....	91
2.4.2.1. Testes estatísticos.....	96
2.4.3. Outros modelos de distribuição.....	97
2.5. Descrição matemática do modelo proposto por MANTOVANI (1993).....	98
2.5.1. Descrição matemática do coeficiente de déficit	

RESUMO

FACCIOLI, Gregorio Guirado, D.S., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2002. **Modelagem da uniformidade e da lâmina de irrigação na produtividade do feijoeiro**. Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Conselheiros: Luiz Cláudio Costa, Antônio Alves Soares e Brauliro Gonçalves Leal.

O presente trabalho teve como objetivo modelar e avaliar a influência da uniformidade de distribuição de água e de várias lâminas de irrigação sobre os componentes de produção da cultura do feijão. O experimento foi instalado com delineamento estatístico em blocos ao acaso, na Estação Experimental de Coimbra da UFV e conduzido o período de julho a dezembro de 2000. Os tratamentos constaram de três lâminas de irrigação (L1, L2 e L3) e dois níveis de uniformidade de distribuição de água, alto (A) e baixo (B). Nos tratamentos L1, L2 e L3, foram aplicadas lâminas adequadas (100% da demanda), baixa (50% da demanda) e alta (150% da demanda), totalizando seis tratamentos (L1A, L1B, L2A, L2B, L3A, L3B). Os resultados experimentais foram comparados com aqueles obtidos através da simulação, utilizando-se um modelo que incorpora os efeitos da uniformidade de distribuição de água e utiliza os coeficientes de déficit (Cd) para distribuições uniforme e normal. As funções de produção para o feijoeiro foram geradas, considerando-se três níveis de uniformidade de distribuição de água (65, 80, 95%) e cinco níveis da fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes (0, 25, 50, 75 e 95%) utilizando-se o modelo com o Cd para as distribuições da água uniforme e normal. Baseados nos resultados obtidos e nas condições sob as quais o trabalho foi realizado, pode-se

concluir que o delineamento experimental utilizado proporcionou valores de uniformidade altos e baixos, para todas as irrigações realizadas. Os resultados de produtividade obtidos nos tratamentos L3A, L3B e L1A foram semelhantes entre si e superiores aos demais. As diferenças de uniformidade não afetaram significativamente a produtividade em razão, possivelmente de terem sido realizadas somente cinco irrigações, assim como as precipitações observadas durante o ciclo da cultura foram bem distribuídas. A produtividade simulada ajustou-se melhor para os tratamentos L1A, L1B e L2B, quando foi utilizado o Cd com distribuição normal, e L3A e L3B quando se utilizou a distribuição uniforme. Para o tratamento L2A, observaram-se superestimativas de 99,5 e 98,4%, respectivamente, com o Cd com distribuições normal e uniforme. Observou-se que a maior diferença entre os valores de produtividade relativa simulada com o Cd com distribuições uniforme e normal ocorreu, quando o valor do CUC foi 65% e a fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes foi igual a zero. Nessas condições os valores de produtividade relativa simulada com o modelo de distribuições uniforme e normal estiveram muito próximas, apresentando diferença de 1,8%. Conclui-se que a utilização do Cd com distribuições uniforme e normal apresenta resultados similares, sendo que, no primeiro caso há a vantagem de se utilizar soluções matemáticas mais simples.

ABSTRACT

FACCIOLI, Gregorio Guirado, D.S., Universidade Federal de Viçosa, January 2002. **Modeling the uniformity and the irrigation depth in productivity of the beans plant.** Adviser: Everardo Chartuni Mantovani. Committee members: Luiz Cláudio Costa, Antônio Alves Soares and Brauliro Gonçalves Leal.

The present study aimed at modeling and evaluating the influence of the water distribution uniformity and several irrigation depths upon the production components in beans cropping. The experiment was set up on a randomized block statistical design at the Coimbra Experimental Station pertaining to UFV, and was carried out over the period from July to December 2000. The treatments consisted of three irrigation depths (L1, L2 and L3) and two levels of water distribution uniformity, that is, high (A) and low (B). The treatments L1, L2 and L3 were applied with: appropriate irrigation depths (100% of the demand), low (50% of the demand) and high (150% of the demand), so totalizing six treatments (L1A, L1B, L2A, L2B, L3A, L3B). The experimental results were compared to those obtained through simulation, by using a model that incorporates the effect from the water distribution uniformity with the deficit coefficients (Cd) for the uniform and normal distributions. The production functions were generated for beans plant, by considering three levels of water distribution uniformity (65, 80, 95%), as well as five levels of the maximum evapotranspiration fraction in the crop restored by other sources (0, 25, 50, 75 and 95%) by applying the model with the deficit coefficient for the uniform and normal water distributions. Based on the obtained results and the conditions

under which this study was carried out, it may be concluded that the used experimental design provided high and low uniformity values for all applied irrigations. The productivity results obtained in treatments L3A, L3B and L1A were similar to each other and superior those obtained in the other treatments. The uniformity differences did not significantly affect the productivity, probably because only five irrigations were applied and the rainfall precipitations observed during the crop cycle were well distributed. The simulated productivity was better adjusted for the treatments L1A, L1B and L2B, when the Cd with normal distribution was used, and for L3A and L3B when the Cd with uniform distribution was used. For the treatment L2A, overestimates of 99.5 and 98.4% were observed for Cd with normal and uniform distributions, respectively. The highest difference among the values of the relative productivity simulated with the Cd with both uniform and normal distributions occurred when the Christiansen's uniformity coefficient (CUC) was 65% and the fraction of the maximum evapotranspiration of the crop restored by other sources equaled zero. Under this condition, the values of the relative productivity simulated by the model with uniform and normal distributions were very close, so presenting a difference as low as 1.8%. Thus, using the Cd with uniform and normal distributions led to similar results, but the Cd with uniform distribution shows the advantage of using simpler mathematical solutions.

INTRODUÇÃO GERAL

O feijão é um dos alimentos básicos para a maioria dos brasileiros e constitui não somente base protéica, mas também base energética na alimentação. A oferta do produto nos últimos cinco anos tem sido muito variável, o que tem acarretado significativa perturbação e inconstância em seu cenário comercial. Neste contexto, o desenvolvimento de estratégias de manejo fundamentada em princípios científicos são fundamentais para os destinos de uma agricultura racional, principalmente na cultura do feijão irrigado, sendo importante avaliar e adequar cada um dos fatores que compõem o sistema de produção, incluindo a eficiência e o manejo da água de irrigação.

A irrigação consiste em atender às necessidades hídricas da cultura, permitindo o seu desenvolvimento adequado. A agricultura tem sido responsável por grande parcela da água utilizada, tornando necessária a implantação de sistemas de irrigação eficientes, além da utilização de métodos que quantifiquem as necessidades hídricas das culturas, para que não haja desperdício. Essa quantificação permite projetar sistemas de irrigação mais adequados, o que, conseqüentemente, reduz o consumo de água e de energia. O termo função de produção se aplica genericamente a qualquer relação que caracteriza a resposta da cultura a um determinado fator, como água, fertilizante, energia. Apesar da complexidade envolvida na construção dessas funções, os esforços são compensados em função de sua grande aplicabilidade.

Considerando o grande número de variáveis que influencia a produtividade das culturas agrícolas e a complexidade das relações que afetam a quantidade e qualidade do produto, a produtividade pode ser expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, com tanto que os demais fatores da produção permaneçam fixos, em nível ótimo.

Do ponto de vista do manejo da irrigação é mais interessante o estudo da relação entre rendimento e a água aplicada, embora a evapotranspiração seja o parâmetro hídrico associado mais diretamente ao rendimento das culturas. O conhecimento da relação entre rendimentos e água aplicada permite estabelecer o consumo ótimo econômico durante o ciclo da cultura.

A maioria dos modelos existentes que relacionam produção e lâmina de irrigação não consideram a uniformidade de distribuição de água. MANTOVANI (1993) desenvolveu um modelo de função de produção, que além de considerar a água aplicada, leva em conta a influência da uniformidade de distribuição de água na produção.

O conhecimento do perfil de distribuição de água pelos aspersores possibilita determinar a eficiência de aplicação de água e a fração da área que recebeu a lâmina de água requerida pela cultura. Diversos trabalhos relatam que o perfil de distribuição de água pelos aspersores seguem as distribuições uniforme e normal. A distribuição uniforme tem sido amplamente utilizada, pois suas considerações matemáticas são simples e de fácil manipulação, porém a distribuição normal, que segundo diversos autores, caracteriza melhor o perfil de distribuição de água, apresenta grande complexidade matemática.

O capítulo 1 deste trabalho foi dedicado a avaliar a influência da uniformidade de distribuição de água e de várias lâminas de irrigação nos componentes de produção da cultura do feijão. Para isto um experimento foi instalado com delineamento estatístico em blocos ao acaso, na Estação Experimental de Coimbra da UFV e conduzido no período de julho a dezembro de 2000.

No capítulo 2 dedicou-se ao desenvolvimento do coeficiente de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como um modelo normal. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados obtidos através da simulação utilizando o modelo desenvolvido por

MANTOVANI (1993) com os coeficientes de déficit uniforme e normal. Também foram geradas as funções de produção para a cultura do feijão, utilizando o modelo com os coeficientes de déficit uniforme e normal, para três níveis de uniformidade e cinco níveis da fração da evapotranspiração máxima da cultura repostas por outras fontes.

CAPÍTULO 1

INFLUÊNCIA DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO NA PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO IRRIGADO

1. INTRODUÇÃO

Um dos importantes desafios da agricultura atual é o aumento da competitividade e qualidade dos produtos, associado à preservação do meio ambiente, permitindo benefícios sustentáveis nas explorações agrícolas. Neste contexto, é importante avaliar e adequar cada um dos fatores que compõem o sistema de produção, incluindo a eficiência e o manejo da água de irrigação.

Atualmente, existe grande preocupação com a preservação dos recursos hídricos, sendo cada vez mais valorizado e cobrado o uso adequado da água. A agricultura tem sido responsável por grande parcela da água utilizada, o que torna necessária a implementação de sistemas de irrigação eficientes, além da utilização de métodos que quantifiquem as necessidades hídricas das culturas, para que não haja desperdício. Essa quantificação permite projetar sistemas de irrigação mais adequados, o que, conseqüentemente, reduz o consumo de água e de energia.

O uso da água na agricultura representa, em nível mundial, cerca de 70% de toda água-doce consumida, enquanto a indústria utiliza 23% e o abastecimento humano, 7% (SANTOS, 1988). Tal fato demonstra a necessidade dos irrigantes, seus principais usuários, em usá-la com a maior

eficiência possível, em face de as reservas de água utilizável estarem cada vez mais escassas, especialmente em regiões onde são mal distribuídas temporariamente, como na região semi-árida do Nordeste brasileiro.

O aumento do custo de energia, os períodos de seca, o crescimento da competição pela água por interesses urbanos e a preocupação crescente com os problemas da qualidade da água, associados aos fluxos de retorno da irrigação, são apenas umas poucas razões para maximizar a eficiência da irrigação. Infelizmente, mesmo se todos os outros fatores no manejo do sistema de irrigação forem precisamente conhecidos, a água não pode ser aplicada uniformemente sobre o campo, com os métodos de irrigação dos dias atuais. Um irrigante deve, portanto, ponderar as trocas entre aplicar água suficiente para irrigar adequadamente toda área (causando uma irrigação excessiva em algum outro lugar e o aumento dos custos de bombeamento e promovendo a lixiviação dos nutrientes) e aplicar menor quantidade de água e permitir que algumas áreas sejam deficientemente irrigadas (causando reduções na produção) (WALKER, 1979).

A definição de níveis de uniformidade também afeta as decisões de projeto. Um sistema caracterizado pela alta uniformidade de aplicação de água, e, portanto, maior eficiência de aplicação pode ser esperado por requerer substancialmente maiores investimentos iniciais e operacionais do que um sistema menos satisfatório. O ótimo de um projeto de irrigação e o seu manejo devem maximizar o lucro da propriedade, selecionando a estratégia que melhor equilibre estas trocas. Para avaliar o “ótimo” projeto de sistema de irrigação e as decisões de manejo, as relações entre a uniformidade de aplicação de água, eficiência da aplicação e os critérios operacionais devem ser quantitativamente expressas (WALKER, 1979).

O presente trabalho objetivou avaliar a influência da uniformidade de distribuição de água e de várias lâminas de irrigação nos componentes de produção da cultura do feijão, utilizando um sistema de aspersão convencional, no período de inverno.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do feijão

O feijão é um dos alimentos básicos dos brasileiros e de outros povos da América do Sul. Entrou largamente nos hábitos de nosso povo, tanto nas cidades como no meio rural, e constitui não somente base protéica, mas também base energética na alimentação. A totalidade da produção brasileira é consumida internamente, além das importações que se realizam quando as condições climáticas são desfavoráveis à cultura, tendo o Brasil um consumo “*per capita*” de 25 kg, um dos mais altos do mundo (VIEIRA, 1978).

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) é conhecido com diferentes nomes (alubia, feijão ou judia-francesa, alubia-de-rinon, feijão-verde, judia-trepadeira). Pode ser cultivado como cultura hortícola para vagens frescas, ou como cultura leguminosa para semente seca. A produção mundial é de aproximadamente 18,7 milhões de toneladas de feijão seco, procedente de cerca de 30 milhões de hectares, e de 2,2 milhões de toneladas de feijão-verde procedente de 0,4 milhão de hectares (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

Em função das diferentes gradações relativas ao porte, à distribuição de flores e vagens, ao grau e tipo de ramificação, à necessidade de tutoramento e ao desempenho, os hábitos de crescimento podem ser agrupados em quatro tipos principais: Tipo I (plantas de crescimento determinado – a emissão e a alongação das folhas e ramos cessam por ocasião do advento das flores);

Tipo II (plantas de crescimento indeterminado arbustivo); Tipo III (plantas de crescimento indeterminado prostrado); e Tipo IV (plantas de crescimento indeterminado trepador). Ressalta-se que as principais variedades comerciais de potencialidade produtiva satisfatória pertencem ao grupo de hábito de crescimento indeterminado (NETO et al., 2000).

O clima constitui um fator preponderante no desenvolvimento das plantas, uma vez que determina condições para manutenção da dinâmica da vida. No caso do feijoeiro, os fatores que mais interferem na duração das etapas de desenvolvimento são a temperatura e a água. A temperatura média ideal para a cultura do feijão corresponde a 21°C, sendo consideradas regiões aptas para o seu cultivo aquelas que apresentem valores médios de temperatura entre 15 e 29,5°C (NETO et al., 2000). Temperaturas elevadas aumentam o teor de fibra das vagens. A germinação necessita de uma temperatura no solo de 15 °C, ou mais, levando aproximadamente 12 dias para germinar a 18°C e cerca de 7 dias para 25°C. A maioria das variedades de feijão não é afetada pela duração do dia (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

O feijão comum desenvolve-se bem em zonas com precipitações médias, porém seu cultivo não é apropriado para zonas tropicais úmidas. Chuva excessiva e clima quente provocam a queda de flores e vagens, além de aumentar a incidência de doenças (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

Com relação à água, o feijoeiro é considerado como sendo uma espécie pouco tolerante a deficiências hídricas, o que pode afetar a duração de algumas etapas de seu desenvolvimento, culminado, freqüentemente, na redução do ciclo biológico da planta. A cultura exige um mínimo de 300 mm de precipitação para produzir a contento, sem a necessidade de utilização da prática de irrigação. Assim, as regiões cujas precipitações oscilem entre 250 e 500 mm anuais são consideradas aptas para implantação da mencionada espécie, embora tal limitação encontre-se mais diretamente condicionada à distribuição do que à quantidade total de chuvas ocorridas no período (NETO et al., 2000). As necessidades hídricas para obter produção máxima com uma cultura de 60 a 120 dias variam entre 300 e 500 mm, dependendo do clima. As necessidades hídricas durante o período de maturação dependem muito do fato de que as vagens sejam colhidas verdes ou secas. Quando se cultiva para

produção verde, o período total de crescimento da cultura é relativamente curto, e durante a maturação (que tem duração de aproximadamente dez dias), a sua evapotranspiração é relativamente baixa, devido à secagem das folhas. Quando o cultivo se destina à produção de sementes, o período de maturação é mais longo e a diminuição na evapotranspiração é relativamente maior (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

O suprimento de água necessário para o rendimento máximo, tanto para a produção de vagem verde como seca, é semelhante durante grande parte do período de crescimento, variando apenas durante o período de maturação. Durante a floração e a formação da colheita, irrigações freqüentes resultam em uma resposta máxima de produção, embora o excesso de água aumente a incidência de doenças, particularmente a podridão das raízes (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

Vários autores (DOORENBOS e PRUITT, 1977; MANTOVANI, 1986; VIEIRA, 1978) comprovaram, em diversos trabalhos, que os períodos críticos ao déficit de água são: o início da germinação, o florescimento e o enchimento das vagens. Em relação ao teor de umidade do solo, o feijoeiro é uma planta sensível ao déficit e ao excesso. As fases de florescimento e início da frutificação mostraram-se as mais sensíveis à má aeração do solo, e, que não se admite nem mesmo um mínimo de dois dias de inundação da zona radicular no feijoeiro, para que não haja perda na produção.

A cultura não tem exigências específicas quanto a solos, porém se adapta melhor aos friáveis e profundos com pH de 5,5 a 6,0. As necessidades de fertilizantes para obter produção elevada são de 20 a 40 kg.ha⁻¹ de N, de 40 a 60 kg.ha⁻¹ de P e 50 a 120 kg.ha⁻¹ de K. O feijão tem a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico para atender às suas necessidades com altos rendimentos; entretanto, uma dose em fundação é benéfica para um bom desenvolvimento inicial (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

VIEIRA (1978) afirmou que, devido ao sistema radicular pouco profundo, o feijão pode ser cultivado em terrenos rasos, desde que haja adequado arejamento, nutrientes e água.

O feijoeiro, quando cultivado em condições de alta fertilidade de solo, manifesta a tendência de alongamento de seu ciclo de vida. Em meio a elevado

teor de matéria orgânica ou acentuada disponibilidade de nitrogênio, a mencionada espécie alonga sua fase vegetativa e, conseqüentemente, a duração dos estádios de desenvolvimento relativos à essa fase, bem como promove maior taxa de retenção foliar, notadamente quando submetida a regime hídrico favorável. Ressalta-se, no entanto, que a excessiva produção de folhas freqüentemente acarreta em perda significativa no potencial de produção da espécie considerada (NETO et al., 2000).

O feijão comum é sensível à salinidade do solo. A diminuição de rendimento em relação à condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) para valores de 1,0; 1,5; 2,3; 3,6; e 6,5 dS/m é, respectivamente, de 0, 10, 25, 50 e 100% (DOOREMBOS e KASSAN, 1979).

Para a cultura do feijão, a escala fenológica mais utilizada é aquela proposta por Gepts e Fernádes (1982), citados por NETO et al. (2000). Nesta escala, o ciclo biológico do feijoeiro é constituído de 10 etapas de desenvolvimento, sendo que a designação de cada etapa é baseada em um código constituído de uma letra e um número. A letra significa a fase dentro do ciclo e os números indicam a posição da etapa de desenvolvimento da planta dentro da escala. Assim, a letra V refere-se à fase vegetativa e a letra R, a fase reprodutiva, enquanto que os números de zero a nove indicam, de forma crescente, a idade dos estádios. (germinação/emergência (V₀), cotilédones ao nível do solo (V₁), folhas primárias expandidas (V₂), primeira folha trifoliada (V₃), terceira folha trifoliada (V₄), botões Florais (R₅), abertura da primeira flor (R₆), aparecimento das primeiras vagens (R₇), primeiras vagens cheias (R₈) e modificação da cor das vagens (R₉).

A fase vegetativa tem seu início caracterizado pelo desdobramento das folhas primárias, prosseguindo até o aparecimento dos primeiros botões florais. Essa fase é favorecida pela ocorrência de temperaturas moderadamente elevadas (superior a 21,0°C e inferior a 29,5°C), por adequada disponibilidade hídrica e por abundante luminosidade. As fases de desenvolvimento na cultura do feijão não apresentam nítida separação, principalmente quando consideradas plantas de crescimento indeterminado, constatando-se sobreposições representadas pela possibilidade de emissões simultâneas de folhas, flores e vagens. Esse fato deve ser considerado por ocasião da

elaboração de recomendações técnicas de manejo. Ainda, cumpre salientar que o pleno conhecimento e a facilidade na identificação dos estádios fenológicos mencionados favorecem o estabelecimento de estratégias efetivas de manejo, objetivando a obtenção de rendimentos satisfatórios e lucrativos (NETO et al., 2000).

A fase reprodutiva transcorre desde a emissão dos botões florais até o pleno enchimento das vagens e a maturação das sementes. Nessa fase evidenciam-se a notória sensibilidade à deficiência hídrica e excesso de água (NETO et al., 2000).

2.2. Irrigação por aspersão

A irrigação por aspersão consiste em um método de aplicação de água às plantas em forma de chuva artificial, por meio de dispositivos especiais, abastecidos com água sob pressão e denominados aspersores, cuja função é pulverizar o jato de água que sai das tubulações, os quais devem assegurar uma distribuição adequada da precipitação que cai sobre a superfície do terreno cultivado (GOMES, 1994).

O método de irrigação por aspersão constitui-se de vários sistemas, dentre os quais os sistemas de aspersão convencionais. Estes sistemas de aspersão convencionais podem ser: portáteis, semiportáteis e fixos. Os sistemas portáteis, também conhecidos como sistemas móveis, são aqueles cujas tubulações de distribuição e as linhas laterais, com seus aspersores, são instaladas sobre o terreno, sendo transportadas para as várias posições de irrigação dentro da área da parcela, ao passo que os sistemas semiportáteis podem ser considerados variantes dos sistemas portáteis, nos quais as tubulações são fixas e as linhas laterais, com seus aspersores, são transportáveis. Os sistemas fixos, por sua vez, são aqueles nos quais as tubulações de distribuição e as linhas laterais cobrem toda a superfície da parcela a irrigar (GOMES, 1994).

O vento, a umidade relativa do ar e a temperatura são os principais fatores climáticos que afetam o uso da irrigação por aspersão. O vento afeta a uniformidade de distribuição dos aspersores e, juntamente com a temperatura

e a umidade relativa do ar, afeta a perda de água por evaporação (BERNARDO, 1995). KELLER (1979) relatou que em condições de baixa demanda evaporativa as perdas por evaporação e arraste estão entre 5 e 10%, chegando a valores entre 30 e 40%, sob condições de alta demanda.

Segundo KELLER e BLIESNER (1990) e MERRIAN e KELLER (1978), a avaliação de um sistema de irrigação por aspersão consiste em medir as perdas de água resultantes da evaporação, da deriva e do escoamento superficial para fora da área do projeto. Essas perdas estão relacionadas com a uniformidade de aplicação da água, com a velocidade do vento e com a capacidade evaporativa do ar, bem como com as perdas ocasionadas por vazamentos nas tubulações. Segundo os autores, as perdas por percolação da água no perfil do solo abaixo do sistema radicular da cultura e o déficit de água também devem ser considerados na avaliação dos sistemas.

2.3. Uniformidade de irrigação

A medida da qualidade de uma irrigação por aspersão é sua uniformidade de distribuição de água. Esta uniformidade, normalmente expressa em termos de um coeficiente de uniformidade, tem sido freqüentemente a base para comparações da atuação da aspersão (WALKER, 1979).

A uniformidade de distribuição é definida como a medida de uniformidade com qual a água de irrigação é distribuída em diferentes áreas em um campo. A uniformidade de distribuição é expressa em termos de lâmina infiltrada após a irrigação, desconsiderando a água interceptada pela cultura, e a evaporação durante a irrigação.

A definição de uniformidade de distribuição dever ser universal para que possa ser aplicada para todas as culturas, e esta deveria incorporar conceitos de elemento, menor porção de uma área no qual a variação da distribuição não é importante, e elemento de escala (Burt et al., 1997, citados por FREITAS, 2000).

A uniformidade de distribuição de água é primariamente uma função de projeto, de operação e de fatores climáticos. Os efeitos específicos destes

fatores sobre a uniformidade de distribuição de água podem ser resumidos como: climático (velocidade do vento e direção); projeto (distância entre aspersores e distância entre linhas laterais, diâmetros laterais, tipo e tamanho de bocais e pressão de operação do projeto); e operacional (pressões de operação e condições de manutenção) (WALKER, 1979).

Bilanski e Kidder (1958), citados por ALMEIDA (1997), verificaram que, com três diferentes diâmetros de bocal (3,18; 4,76; e 6,35 mm), o maior proporcionou melhor distribuição de água em todas as pressões de operação. Os autores constataram ainda que a uniformidade de distribuição de água tem ordem decrescente de valor em bocais com seção transversal triangular, quadrada e circular.

Segundo BERNARDO (1996), outro fator que interfere na uniformidade de distribuição é a pressão de operação, provocando nos aspersores que operam com pressões muito altas excessiva pulverização do jato de água, diminuindo seus raios de alcance e causando encharcamento próximo ao aspersor. Entretanto, aspersores que operam com pressões baixas resultam em uma inadequada pulverização do jato de água, o que torna o perfil de distribuição muito irregular.

Segundo GOMIDE (1978), a altura da haste também é importante na adequada distribuição de água. Trabalhando com aspersores ZED-30, o autor verificou que as melhores uniformidades de distribuição de água foram obtidas quando foram usados tubos de elevação mais altos, porém a uniformidade foi mais influenciada pelo vento, à medida que a altura do tubo de elevação foi aumentada.

A uniformidade de distribuição de água decresce com o aumento da não-uniformidade de rotação dos aspersores, porém essa redução é muito pequena, nunca excedendo 3% para aspersores comerciais com espaçamento dentro da faixa de uso recomendada pelo fabricante (LI e KAWANO, 1997).

GOMIDE (1978) afirmou que a ação do vento é um dos fatores ambientais que mais interferem na uniformidade de distribuição de água. Quanto maior a velocidade do vento e menor o tamanho das gotas, maior será a distorção na distribuição da água.

Segundo TARJUELO MARTÍN-BENITO (1995), os sistemas com laterais com movimento contínuo (lateral móvel) têm algumas vantagens sobre os sistemas estacionários em relação à ação do vento, pois as laterais ocupam diferentes posições ao longo do seu percurso e, portanto, cada ponto será irrigado normalmente sob distintas condições de vento em irrigações sucessivas, compensando-se as distorções produzidas pelo vento.

Segundo TARJUELO MARTÍN-BENITO (1995), um fator a ser considerado no manejo de sistemas por aspersão é a freqüente redução da velocidade do vento durante a noite, sendo assim é aconselhável alternar as irrigações diurnas e noturnas para uma mesma posição, a fim de aumentar a uniformidade de distribuição de água acumulada após várias irrigações.

BONOMO (1999) relatou que outro fator importante que deve ser considerado na avaliação da uniformidade de distribuição de água está relacionado à redistribuição da água aplicada que ocorre no perfil do solo. ROCHA et al. (1998) observaram, em ensaio de campo, pequenas variações nos elevados coeficientes de uniformidade no perfil do solo ao longo do tempo, após o término da irrigação, mesmo quando a uniformidade superficial foi abaixo da convencionalmente aceitável, o que mostra o efeito positivo da redistribuição da água no perfil do solo.

Segundo GOMES (1994) os valores recomendáveis para a uniformidade de distribuição variam também com o sistema radicular da cultura. Para o autor, com um maior desenvolvimento das raízes a planta possuirá um maior raio de alcance, diminuindo assim a dependência da cultura com relação a uma maior uniformidade de distribuição.

Para determinar a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por aspersão, instala-se um conjunto de “pluviômetros”, equidistantes em torno do aspersor a ser testado, e liga-se o sistema de irrigação por um período nunca inferior a duas horas. Durante o teste, a pressão e a vazão no bocal do aspersor, a direção e a velocidade do vento e o volume de água coletado em cada pluviômetro, são medidos no final do teste. A área em torno do aspersor é dividida em subáreas quadradas, de iguais dimensões. Os coletores de precipitação são colocados no centro de cada subárea. Assim, o volume ou lâmina coletada, em cada “pluviômetro”,

representa a precipitação em cada subárea. O número mínimo de pluviômetros a serem instalados por teste geralmente varia de 100 a 144. O tempo ideal para cada teste deve ser igual ou maior do que a metade do tempo que o sistema funcionará por posição, durante as irrigações normais (BERNARDO, 1994).

Ainda segundo BERNARDO (1996), o resultado do teste representa o desempenho de um aspersor, mas na irrigação no campo sempre existe a superposição de vários aspersores sobre mesma área. Para determinar a uniformidade de distribuição do sistema, é necessário considerar qual o tipo de arranjo dos aspersores no campo (retangular, quadrado ou triangular) e simular as diversas combinações de espaçamento entre aspersores, ao longo da linha lateral e entre a linha lateral e entre as linhas laterais; fazer a superposição, para cada combinação de espaçamento, das precipitações sobre a área entre quatro aspersores, considerando todos os aspersores periféricos que podem atingir a área; e calcular a uniformidade com os totais superpostos em cada pluviômetro.

O primeiro conceito de uniformidade foi desenvolvido por CHRISTIANSEN (1942), e é comumente chamado de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) (WALKER, 1979). É um dos mais utilizados para quantificar a uniformidade de aplicação de água por um sistema de irrigação do tipo convencional, sendo expresso pela seguinte equação:

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_m|}{n X_m} \right] \quad (1)$$

em que

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %;

N = número de coletores na área entre quatro emissores;

X_i = lâmina de água coletada no i -ésimo coletor, em mm; e

X_m = valor médio das lâminas de água coletada, em mm.

CRIDDLE et al. (1956), introduziram outra medida da uniformidade, denominada coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), considerando a razão entre a média de 25% do total de pluviômetros, com as menores precipitações, e a média das precipitações (BERNARDO, 1994). O CUD é expresso pela seguinte equação:

$$CUD = 100 \left(\frac{X_{25}}{X_m} \right) \quad (2)$$

em que

CUD = coeficiente de uniformidade de distribuição, em %;

X_{25} = valor médio das 25% menores lâminas de água coletada, em mm; e

X_m = valor médio das lâminas de água coletada, em mm.

WILCOX e SWAILES (1947) sugeriram outro coeficiente de uniformidade, denominado coeficiente estatístico de uniformidade (CUE). Os autores substituíram o valor absoluto dos desvios em relação ao valor médio do CUC pelo desvio-padrão, ou seja, pela soma dos quadrados dos desvios em relação ao valor médio (WALKER, 1979; BERNARDO, 1994). O CUE é expresso pela seguinte equação:

$$CUE = 100 \left[1 - \frac{Sd}{X_m} \right] \quad (3)$$

em que

CUE = coeficiente estatístico de uniformidade, em %;

Sd = desvio-padrão dos valores das lâminas de água coletadas, em mm; e

X_m = valor médio das lâminas de água coletadas, em mm.

HART (1961) e HART e REYNOLDS (1965) desenvolveram um coeficiente de uniformidade para a Associação dos Produtores de Açúcar Havaiano (HSPA), denominado coeficiente de uniformidade de Hart (CUH), supondo que a precipitação dos aspersores comumente usados é normalmente

distribuída e, portanto, seu modelo pode ser descrito por uma distribuição normal. Uma curva de frequência adimensional é estabelecida pela divisão da lâmina de aplicação pela lâmina de aplicação média. O CUC é igual ao CUH para uma distribuição realmente normal (WALKER, 1979). O CUH é expresso pela seguinte equação:

$$CUH = 100 \left[1 - \frac{0,798.Sd}{X_m} \right] \quad (4)$$

em que

CUH = coeficiente de uniformidade de Hart, em %;

Sd = desvio-padrão dos valores das lâminas coletadas, em mm; e

X_m = valor médio das lâminas de água coletadas, em mm.

CRIDDLE et al. (1956) propuseram ainda outro coeficiente para representar a uniformidade de distribuição de água, denominado eficiência-padrão da HSPA (UDH) (WALKER, 1979). O UDH é expresso pela seguinte equação:

$$UDH = 100 \left(1 - 1,27 \frac{Sd}{X_m} \right) \quad (5)$$

em que

UDH = eficiência padrão da HSPA, em %;

Sd = desvio-padrão dos valores das lâminas coletadas, em mm; e

X_m = valor médio das lâminas de água coletada, em mm.

Segundo BERNARDO (1996) KELLER e BLIESNER (1990) e MERRIAM e KELLER (1978), o CUC proporciona boa estimativa da distribuição de água na superfície do solo.

Segundo BERNARDO (1996) o valor mínimo recomendável para CUC é 80%, e quando um sistema de irrigação em funcionamento no campo apresenta um CUC inferior a 80%, pode-se melhorar a sua uniformidade de

duas maneiras: reestudar o espaçamento entre aspersores ou usar posições alternadas.

Segundo ALMEIDA (1997), posições alternadas representam uma técnica de manejo em irrigação por aspersão, em que são implementadas variações na posição das linhas laterais em uma distância igual à metade do seu espaçamento, entre duas irrigações sucessivas. Neste caso, durante cada irrigação o coeficiente de uniformidade seria o normal, mas ao analisar duas irrigações sucessivas o novo coeficiente de uniformidade alternado será expresso pela seguinte equação:

$$CUC_{alt} = 10\sqrt{CUC} \quad (6)$$

em que

CUC_{alt} - coeficiente de uniformidade para posições alternadas, em %; e

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %.

Segundo BERNARDO (1996) e KELLER e BLIESNER (1990), em uma avaliação de campo, como não é operacional avaliar todos os aspersores do sistema, escolhem-se determinados pontos que sejam representativos, e em função deles, calcula-se a média, sendo esta representativa de toda área. Porém, como a medida de pressão do aspersor é mais simples, mede-se em um maior número de pontos, e o cálculo do coeficiente de uniformidade do sistema pode ser expresso por meio das seguintes equações:

$$CUC_{sistema} = CUC \frac{1 + \left(\frac{P_n}{P_a}\right)^{0,5}}{2} \quad (7)$$

em que

$CUC_{sistema}$ = coeficiente de uniformidade de Christiansen para o sistema, em %;

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %;

P_n = pressão mínima nos aspersores, em kPa; e

P_a = pressão média nos aspersores, em kPa.

$$CUD_{\text{sistema}} = CUD \frac{1 + 3 \left(\frac{P_n}{P_a} \right)^{0,5}}{4} \quad (8)$$

em que

CUD_{sistema} = coeficiente de uniformidade de distribuição para o sistema, em %;

CUD = coeficiente de uniformidade de distribuição, em %;

P_n = pressão mínima nos aspersores, em kPa; e

P_a = pressão média nos aspersores, em kPa.

Pillsbury e Degan (1968), citados por GOMES (1994), indicaram os seguintes valores de CUC em função dos espaçamentos entre plantas: espaçamentos entre 0 e 2 m, CUC de 85%; espaçamentos entre 2 e 4 m, CUC de 80%; espaçamentos entre 4 e 6 m, CUC de 75%; e espaçamentos entre 6 e 8 m, CUC de 65%.

Segundo GOMES (1994), admitem-se valores de CUC menores que 80% se a área a irrigar recebe chuvas durante a campanha de irrigação, se a planta possui raízes longas, ou se a economia obtida no custo de instalação (maiores espaçamentos entre aspersores e linhas) compensa a redução do rendimento da cultura irrigada. Ainda, segundo o autor, a situação mais racional é aquela na qual se alcança um grau de uniformidade razoável, compatível com as necessidades das plantas, com os custos do investimento e operação do sistema e com os benefícios econômicos da cultura irrigada.

O valor de CUC geralmente concede maior valor de uniformidade para uma distribuição de irrigação que o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD). De acordo com Burt et al. (1997), citados por BONOMO (1999), por esta e outras razões, o CUD vem sendo cada vez mais adotado em várias partes do mundo.

BERNARDO (1996) apresentou duas relações entre o CUE e o CUC e entre o CUD e o CUC: $CUE = 1,25 CUC - 25$ e $CUD = 1,59 CUC - 59$.

Para a condição em que a distribuição de água segue a distribuição normal, KELLER e BLIESNER (1990), apresentaram a seguinte relação entre o CUC e o CUD: $CUC \cong 100 - 0,63 (100 - CUD)$.

SALES (1997), avaliando a irrigação por aspersão através dos coeficientes de uniformidade CUC, CUD, CUH, CUE e UDH, concluiu que todos eles poderiam ser usados indistintamente na determinação do desempenho do sistema. Entretanto, para FRIZZONE (1992) o CUC não é substituído com vantagem por nenhum dos demais coeficientes propostos.

TARJUELO et al. (1999) analisaram os efeitos das variações da velocidade do vento e pressão de serviço dos aspersores na uniformidade de distribuição de água, em 33 sistemas de irrigação por aspersão. Para valores de velocidade do vento menores que 2 m/s, o valor médio de CUC foi de 87,4%; para valores de velocidade do vento entre 2 e 4 m/s, o valor médio de CUC foi de 85,3%; e para valores de velocidade do vento superiores a 4 m/s, o valor médio de CUC foi de 77,2%. Os autores verificaram que, com baixa pressão (menor que 300 KPa), o fator vento pouco interferiu no CUC. Os valores de CUC se elevaram com o aumento da pressão em condições de velocidade de vento inferior a 2,5 m/s, decaindo a partir deste valor de velocidade do vento.

2.4. Eficiência de irrigação

A eficiência de aplicação de água no solo (E_a) é definida como a razão média entre a lâmina de água armazenada na zona radicular e a lâmina média de água aplicada (MERRIAM et al., 1983). Ela é somente um indicativo das perdas que ocorrem durante a aplicação da água, exprimindo a fração de água aplicada, armazenada na zona radicular, que está disponível às plantas. Assim, a eficiência de aplicação exprime parte do processo, pois não considera a forma como a água foi distribuída na área irrigada, ou seja, a uniformidade de irrigação.

Em geral, a eficiência de aplicação (E_a) da irrigação por aspersão varia durante o dia entre 60%, em zonas semi-áridas, e 75% em zonas de clima moderado. No entanto, ao realizar a irrigação durante a noite, a eficiência pode chegar a alcançar valores próximos de 90% (GOMES, 1994).

A eficiência em potencial de aplicação de água (EPa) representa a razão entre a lâmina aplicada e a lâmina coletada, indicando as perdas por evaporação direta e arraste pelo vento (KELLER e BLIESNER, 1990).

A eficiência em potencial de aplicação de água pode ser descrita de duas maneiras. Na primeira delas, descrita por BERNARDO (1996), a eficiência é medida diretamente no campo, por meio das perdas por evaporação e arraste pelo vento, fornecendo um valor momentâneo para as condições em que o teste foi realizado. A segunda, descrita por KELLER E BLIESNER (1990), permite a estimativa da EPa para as condições médias do dia da avaliação, fornecendo, portanto, um valor mais representativo das condições gerais (BONOMO, 1999).

O conceito de eficiência de irrigação (Eipad) incorpora à eficiência de aplicação os efeitos da uniformidade da irrigação, representando desta forma, de maneira adequada, as imperfeições do processo de aplicação de água nas culturas. KELLER e BLIESNER (1990) propuseram uma metodologia de cálculo da eficiência de irrigação que considera a uniformidade de aplicação de água, as perdas por evaporação e o arraste pelo vento. Nesta metodologia, os efeitos da uniformidade da irrigação são considerados no cálculo da eficiência de distribuição de água para uma porcentagem de área adequadamente irrigada (DEpa). A DEpa representa a razão entre a lâmina líquida recebida na porcentagem da área adequadamente irrigada e a lâmina média recebida na área total (KELLER e BLIESNER, 1990).

$$Eipad = Depa \cdot EPa_{Keller} \cdot Ec \quad (9)$$

em que:

Eipad = eficiência de irrigação para área adequadamente irrigada;

DEpa = eficiência de distribuição para uma porcentagem de área adequadamente irrigada, decimal;

EPa_{Keller} = eficiência potencial de aplicação, decimal; e

Ec = eficiência de condução, decimal.

2.5. Efeito da uniformidade de aplicação de água na produtividade das culturas

Segundo SEGNER et al. (1991), um fator de destacada importância, em qualquer método de irrigação a ser utilizado, é a uniformidade de aplicação, ou uniformidade de distribuição de água na superfície do solo, pois trata-se de um parâmetro que afeta a eficiência do uso da água e como consequência a quantidade e a qualidade da produção.

WALLACH (1990), afirma que a uniformidade de distribuição da água de irrigação aplicada em uma dada cultura influencia a produção e o conhecimento do efeito da uniformidade de distribuição na produção das culturas é essencial para selecionar o método de irrigação e suas especificações de projeto, manejo e avaliações econômicas.

Segundo GOMES (1994) a uniformidade de distribuição intervém na qualidade da irrigação e conseqüentemente no rendimento das culturas. Em uma irrigação com baixa uniformidade, algumas zonas recebem menos água que a quantidade necessária, o que pode acarretar prejuízos para o desenvolvimento das plantas. Da mesma forma, as zonas que recebem mais água que a quantidade necessária estarão sujeitas a encharcamentos e erosão do solo, ou no melhor dos casos a perdas de água por percolação e lavagem de nutrientes.

SOARES et al. (1993) afirmaram que a uniformidade de distribuição de água influencia diretamente a produtividade da cultura e a quantidade de energia necessária ao bombeamento da água. A produtividade tende a aumentar com o aumento da uniformidade de irrigação.

Segundo Evans et al. (1995), citados por BONOMO (1999), a uniformidade de distribuição de água para irrigação é um importante fator de projeto que afeta a produção das culturas, a eficiência e a lixiviação de fertilizantes. Um outro fator a ser considerado é, que se o sistema de irrigação for também utilizado para a aplicação de produtos químicos, via água de irrigação, a uniformidade de distribuição destes produtos na área vai estar diretamente ligada à uniformidade de aplicação da água, afetando, desse

modo, tanto a produtividade das culturas como os problemas relacionados à lixiviação de produtos químicos.

LETEY et al. (1984), concluíram que a desuniformidade de distribuição de água tem maior influência na produção quando o solo apresenta uma baixa capacidade de retenção de água, quando a cultura apresenta raízes superficiais e quando a demanda evapotranspirométrica é alta.

O aspecto econômico da uniformidade de distribuição de água nem sempre é considerado na prática. DAVIS e FRY (1963) realizaram experiências com alfafa, irrigada por aspersão convencional, com baixo coeficiente de uniformidade e conseguiram resultados favoráveis. Inicialmente eles testaram um sistema de aspersão com um espaçamento de 9 por 15 m e obtiveram um valor de CUC igual a 87%. Posteriormente ampliaram o espaçamento para 18 por 18 m e o coeficiente de uniformidade caiu para 63%, que é considerado um índice insuficiente. No entanto, devido as condições favoráveis do solo e ao bom desenvolvimento do sistema radicular da alfafa, o rendimento da cultura obtido no segundo teste, com CUC de 63%, foi pouco inferior ao rendimento obtido no primeiro teste. Através de uma avaliação econômica dos dois testes, constatou-se que o segundo sistema, com menor uniformidade de irrigação, apresentou um resultado melhor com relação à análise dos benefícios e custos de ambas as instalações (GOMES, 1994).

MATEOS et al. (1997) avaliaram a resposta da cultura do algodoeiro a duas lâminas de irrigação e a dois níveis de uniformidade de distribuição de água. Os valores de CUE foram de 90 e 67%, respectivamente, para alta e baixa uniformidade. Os resultados mostraram que não houve diferença significativa entre os tratamentos de lâmina e coeficiente de uniformidade, devido ao plantio tardio e as baixas temperaturas durante o ciclo da cultura.

LETEY et al. (1984) analisaram o efeito da uniformidade de distribuição de água na produção das culturas do milho e algodão e o impacto da uniformidade de distribuição nos níveis ótimos de água a ser aplicada. Os autores concluíram que, para cultura do milho, a produção pode ser acrescida pelo decréscimo da uniformidade quando valores muito reduzidos de lâminas de irrigação foram aplicados. Concluíram também, que nas análises

econômicas convencionais, que ignoram a uniformidade de distribuição de água, podem subestimar notavelmente os níveis ótimos de água a ser aplicada.

MANTOVANI (1993) estudou o efeito da uniformidade de distribuição de água na produtividade da cultura do milho. O autor observou que quanto maior é o valor do CUC, menor é a lâmina necessária para alcançar a produção máxima, sendo necessário 500 mm para um CUC de 95%; 700mm para um CUC de 75%; e 1000 mm para um CUC de 55%. O autor também conclui que para um dado coeficiente de uniformidade, o nível ótimo de irrigação depende da relação entre o preço do produto e o preço da água, e nos casos em que o preço da água é baixo, a estratégia usual de aumentar a lâmina de irrigação para compensar os déficits de água provocados pela baixa uniformidade é a que permite obter maiores benefícios econômicos.

Segundo MANTOVANI (1995) para uma lâmina de irrigação de 100 mm, valor este bem abaixo que o recomendado para se obter a máxima produtividade, produções mais altas foram prognosticadas com CUC de 55% em comparação a maiores valores de CUC. Segundo o autor, devido à baixa uniformidade, algumas partes da área receberam maiores lâminas de irrigação, provocando um efeito positivo na produção.

LI (1998) estudou o efeito da uniformidade de distribuição de água na produtividade das culturas e observou resultados similares a MANTOVANI (1995). O autor também observou que quanto maior é o valor do CUC, menor é a lâmina necessária para alcançar a produção máxima, sendo necessário 330 mm para um CUC de 95%; 430mm para um CUC de 75%; e 1800 mm para um CUC de 55%. O autor conclui também que a quantidade ótima de irrigação depende da uniformidade de distribuição de água e dos fatores econômicos, decrescendo com a uniformidade, mas aumentado com a razão do preço do produto e da água.

FREITAS (2000) estudou o efeito da uniformidade de distribuição de água e de lâminas de irrigação na produtividade da cultura do milho. O autor trabalhou com dois níveis de CUC, um acima (84%) e outro abaixo (67%) do recomendável para irrigação por aspersão convencional e com cinco lâminas de irrigação, 50, 75, 100, 125 e 150% da lâmina de irrigação recomendável para atender as necessidades hídricas da cultura. Para os tratamentos com

100% de reposição da lâmina recomendável para atender as necessidades hídricas da cultura e CUC de 84 e 67%, o autor observou a influência da uniformidade de distribuição na produtividade da cultura, sendo estas de 6.413 e 4.675 kg ha⁻¹, respectivamente, apresentando diferenças estatísticas ao nível de 5% probabilidade, pelo teste de Tukey. Para os tratamentos com 50% de reposição da lâmina recomendável para atender as necessidades hídricas da cultura e CUC de 84 e 67%, o autor observou uma inversão nos resultados, pois o tratamento com baixa uniformidade de aplicação apresentou uma produtividade de 3.035 kg ha⁻¹ e enquanto o tratamento com alta uniformidade 2.085 kg ha⁻¹, apresentando novamente diferenças significativas pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área experimental

Este trabalho foi realizado na Estação Experimental de Coimbra, do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, localizada no município de Coimbra - MG, latitude de 20° 51`S e longitude de 42° 47`W e altitude de 720 m, durante o período de julho a dezembro de 2000 (Figura 1).



Figura 1 – Vista geral da área experimental.

3.2. Parâmetros químicos, granulométricos e físico-hídricos do solo

As análises química e granulométrica do material de solo foram realizadas no Laboratório de Fertilidade e Física de Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

As análises químicas foram realizadas com amostras compostas na camada de 0-40 cm e as análises granulométricas foram realizadas com amostras retiradas a cada 20 cm, até 80 cm de profundidade.

A curva de retenção de água no solo foi determinada no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Os resultados das análises química e granulométricas e a curva de retenção de água no solo estão apresentados nos Quadros 1 e 2 e na Figura 2, respectivamente.

Quadro 1 - Análise química do solo

Camada (cm)	PH	P	K	Ca	Mg	Al	H+AL	SB	CTC(T)	V
	H ₂ O	mg/dm ³		cmol/dm ³						%
0 - 40	5,5	2,1	65	1,4	0,4	0,1	3,5	1,97	5,47	36

Quadro 2 - Análise granulométrica

Camada (cm)	Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
0 - 20	08	03	18	71
20 - 40	05	03	06	86
40 - 60	02	02	27	69
60 - 80	02	01	39	58

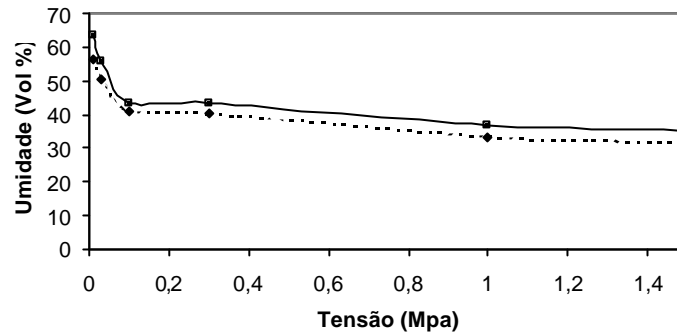


Figura 2 - Curva de retenção da água no solo para as camadas de 0-20 cm (---) e 20-40 cm (—).

3.3. Esquema experimental

Para verificar a influência da uniformidade de distribuição de água e da lâmina de irrigação na produtividade do feijoeiro irrigado, instalou-se na área experimental um experimento com delineamento estatístico em blocos ao acaso. A Figura 3 apresenta o esquema experimental com o delineamento estatístico.

Os tratamentos constaram de três lâminas de irrigação e dois níveis de uniformidade de distribuição de água, representados pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Cada tratamento ou parcela experimental possuía três blocos ou três repetições com 12 m de largura e 12 m de comprimento, totalizando 12 m de largura e 36 m de comprimento.

Os tratamentos foram denominados: L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B. Nos tratamentos L1A e L1B foi aplicada uma lâmina de água suficiente para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, com uniformidade de distribuição (CUC) maior e menor que 80%, respectivamente. Nos tratamentos L2A e L3A, as lâminas aplicadas foram respectivamente 50% e 150% da lâmina aplicada no tratamento L1A, com uniformidade de distribuição (CUC) maior que 80%. Nos tratamentos L2B e L3B, as lâminas aplicadas foram respectivamente 50% e 150% da lâmina aplicada no tratamento L1A, com uniformidade de distribuição (CUC) menor que 80%.

Foram instalados em cada bloco a uma altura de 1 m em relação ao solo, nove coletores de água espaçados 3 m um do outro, totalizando 27 em

cada parcela experimental e 162 em toda área, para a determinação da lâmina de água precipitada e do CUC (Figura 3).

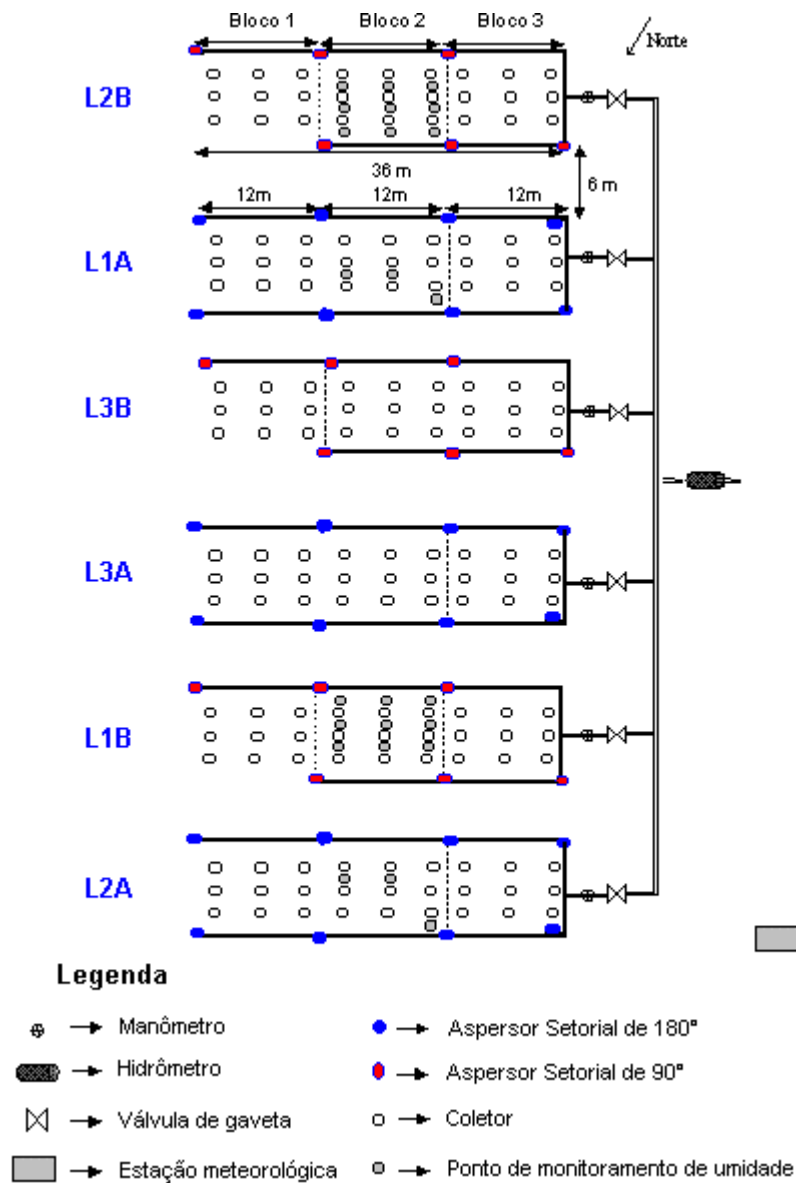


Figura 3 – Esquema experimental.

A coleta dos dados para análise dos componentes de produção foi realizada em áreas de 1 m² em torno dos coletores e para a análise estatística foram considerados os resultados obtidos em cada repetição de cada parcela experimental.

Para os tratamentos com CUC maior que 80%, ou seja, com alta uniformidade de distribuição de água, foram utilizados quatro aspersores

setoriais dentro de cada bloco, com um ângulo de giro de 180° , dispostos conforme a Figura 4 e para os tratamentos com CUC menor que 80%, ou seja, com baixa uniformidade de distribuição de água, foram utilizados dois aspersores setoriais dentro de cada bloco, com um ângulo de giro de 90° , em uma das diagonais, conforme a Figura 5. Para obter baixa uniformidade de distribuição de água, atuou-se no defletor de apenas um dos aspersores do bloco. Desta forma, o jato de água era fracionado e não alcançava todos coletores, por outro lado, o jato d'água do outro aspersor localizado na diagonal oposta, atingia todos coletores. Na irrigação seguinte, atuava-se apenas no defletor do outro aspersor, evitando-se que sempre as mesmas áreas do bloco recebessem uma lâmina muito superior.

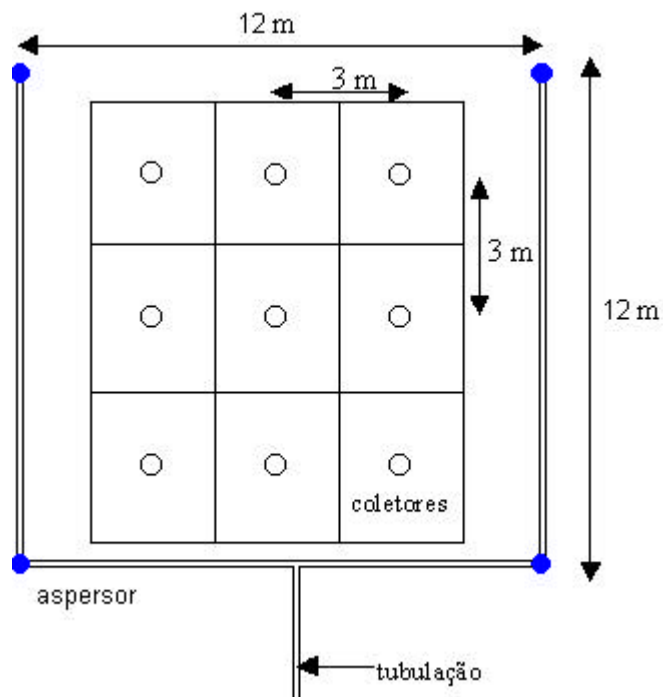


Figura 4 - Esquema do delineamento experimental com alta uniformidade de distribuição de água, com quatro aspersores nas laterais.

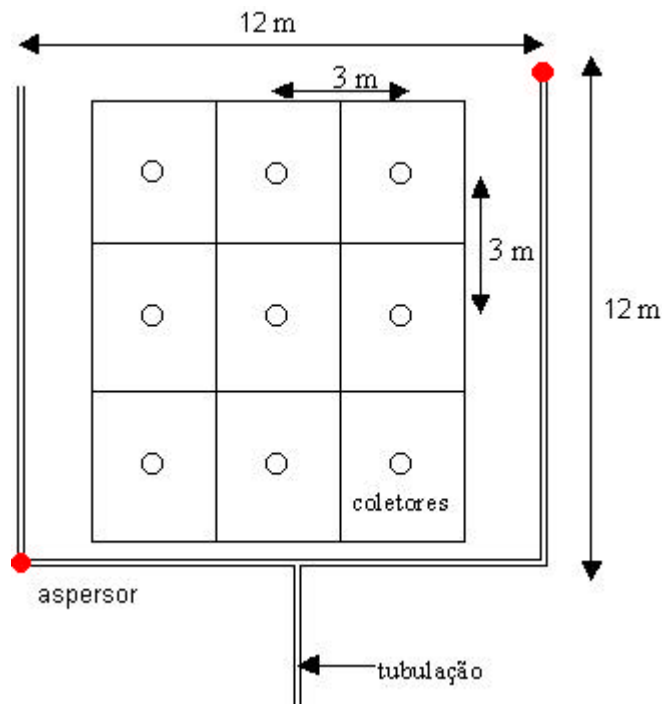


Figura 5 - Esquema do delineamento experimental com baixa uniformidade de distribuição de água, com aspersores na diagonal.

3.4. Semeadura

A semeadura da cultura do feijão, cultivar Pérola, o solo foi arado e gradeado. O plantio e a adubação com 700 kg ha^{-1} de fertilizante do formulado 4-14-8 foram mecanizados e realizados no dia 10 de agosto de 2000, com espaçamento de 50 cm entre linhas e 8 cm entre plantas, totalizando 12 sementes por metro. A emergência ocorreu no dia 20/08/2000. Aplicou-se adubação de cobertura, vinte dias após a emergência, correspondente a 100 kg ha^{-1} de uréia e 100 g ha^{-1} de molibdênio.

3.5. Irrigação

3.5.1. Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi aspersão convencional fixo, com espaçamento de $12 \times 12 \text{ m}$, entre linhas laterais e entre aspersores (Figura 3). Na entrada do sistema instalou-se um hidrômetro (Figura 6) com capacidade de $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para o monitoramento do volume de água e, na entrada de cada

parcela experimental, instalou-se uma válvula de gaveta e um manômetro (Figura 7), para o controle e monitoramento da pressão de operação do sistema.

O aspersor utilizado foi da marca NAAN modelo AG 427, setorial, com bocal de 3,5 mm, operando a uma pressão de 285 kPa e vazão de $0,68 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e foram instalados a uma altura de 1 m em relação ao solo (Figura 8).



Figura 6 – Hidrômetro.



Figura 7 – Válvula de gaveta e manômetro.



Figura 8 – Aspersor NAAN, modelo AG 427 em funcionamento.

3.5.2. Calendário das irrigações

Para o estabelecimento da cultura, todos os tratamentos foram irrigados com a mesma lâmina de irrigação, nos dias 11, 14, 18, 21 e 25 de agosto. A lâmina aplicada foi suficiente para retornar a umidade do solo à capacidade de campo.

As irrigações com as diferentes lâminas específicas para cada tratamento, foram realizadas semanalmente a partir do dia 22 de setembro. Foram realizadas cinco irrigações, nos dias 22 de setembro; 5, 13, 20 e 28 de outubro. A irrigação do dia 29 de setembro não foi realizada, pois no dia anterior ocorreu uma precipitação de 10,6 mm.

A diferenciação das lâminas de irrigação só foi realizada a partir do dia 22 de setembro, em função das chuvas ocorridas e devido a problemas operacionais. As fortes chuvas ocorridas romperam o sistema de captação de água, impossibilitando a utilização do sistema de irrigação da fazenda experimental. Foi implementado um sistema alternativo de bombeamento (motobomba a diesel), cujo funcionamento precário prejudicou a primeira irrigação realizada no dia 22 de setembro. Após a primeira irrigação, utilizou-se o sistema motobomba (elétrico) da Estação Experimental de Coimbra.

Durante o período em que não foi possível realizar as irrigações, ocorreram precipitações nos dias 02, 03, 04 e 06 de setembro de 22,8; 19,4; 2,2; e 7,4 mm, respectivamente. O período máximo sem irrigação foi de 15 dias e ocorreu durante a fase inicial do desenvolvimento vegetativo. Nesta fase a demanda evapotranspirométrica foi baixa e o solo por ter boa capacidade de armazenamento de água foi capaz de atender as necessidades hídricas da cultura.

3.5.3. Manejo da irrigação

Determinou-se a umidade do solo pelo método padrão de estufa, a partir de amostras retiradas das camadas 0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade, nos pontos de monitoramento de umidade. Como mostra a Figura 3, nos tratamentos L1A e L2A, os pontos de monitoramento de umidade

foram localizados ao lado de três coletores do bloco 2 e nos tratamentos L1B e L2B, os pontos de monitoramento foram localizados ao lado dos nove coletores do bloco 2. Existiram, portanto, 24 pontos de monitoramento de umidade em toda a unidade experimental.

A amostragem foi realizada semanalmente a partir do dia 20 de setembro, na manhã do dia anterior às irrigações, nos 24 pontos de monitoramento e nas três camadas estudadas. Imediatamente após a amostragem, os 72 recipientes, contendo o material de solo, foram levados ao Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola e colocados na estufa a 105°C, por um período de 24 horas. A umidade do solo foi determinada pela equação:

$$UA = \frac{(M1 - M2)}{(M2 - M3)} \cdot 100 \quad (10)$$

em que

UA = umidade do solo (%peso);

M1 = peso do solo + água + recipiente, em g;

M2 = peso do solo seco + recipiente, em g; e

M3 = peso do recipiente, em g.

A lâmina líquida a ser resposta ao solo, em cada irrigação, foi calculada utilizando a umidade média obtida nos três pontos de monitoramento do tratamento L1A, nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm e foi determinada pela equação:

$$L = \frac{(CC - UA)}{10} \cdot Z \quad (11)$$

em que

L = lâmina líquida de água aplicada em cada irrigação, em mm;

CC = capacidade de campo (%vol);

UA = umidade do solo no dia anterior a irrigação, no perfil do solo explorado pelas raízes da cultura (%vol); e

Z = profundidade do sistema radicular determinado pelo perfil de extração de água, cm.

Como as irrigações foram realizadas em horários semelhantes, a lâmina bruta a ser aplicada foi determinada utilizando a eficiência potencial de aplicação, estimada a partir das irrigações realizadas anteriormente.

Conhecida a lâmina bruta de irrigação a ser aplicada nos tratamentos L1A e L1B, determinou-se as demais lâminas para os outros tratamentos, sendo 50% menor para os tratamentos L2A e L2B e 50% maior para os tratamentos L3A e L3B.

O volume de água aplicado em cada tratamento foi calculado considerando a sua área de abrangência, dependente diretamente do ângulo de giro dos aspersores (Figura 3). As áreas dos tratamentos com alta e baixa uniformidade de distribuição de água foram respectivamente, 576 m² e 432 m².

O hidrômetro (Figura 6) além de permitir o monitoramento do volume de água aplicado em cada tratamento, também indicava o momento de interromper as irrigações. Neste momento atuou-se na válvula de gaveta, interrompendo a irrigação de um respectivo tratamento, e através das outras válvulas, controlou-se a pressão de operação do sistema (Figura 9).

Para a utilização adequada do hidrômetro, realizou-se sua calibração no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola. A equação abaixo apresenta o resultado da calibração:

$$VC = 1,0808V - 0,1460 \quad (12)$$

em que

VC = volume corrigido, m³; e

V = volume a ser aplicado, m³;



Figura 9 – Controle da pressão de operação do sistema.

3.5.4. Determinação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Logo após cada irrigação, o CUC foi determinado nos três blocos de cada tratamento. As lâminas precipitadas em cada coletor foram medidas com auxílio de uma proveta graduada e anotadas em planilhas de campo, na seqüência L2A, L2B, L1A, L1B, L3A e L3B, ou seja, toda vez que a irrigação de um tratamento estava concluída, os volumes precipitados foram medidos e anotados, evitando assim a possibilidade de evaporação da água precipitada nos coletores. Os detalhes da disposição dos coletores e do momento em os volumes precipitados foram medidos estão apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente.



Figura 10 – Disposição dos coletores.



Figura 11 – Coleta dos volumes precipitados nos coletores.

3.5.5. Área adequadamente irrigada

A área foi calculada com as lâminas de água precipitadas nos coletores, dos três blocos de cada tratamento, para cada irrigação e com a média das lâminas de água precipitadas nos coletores, considerando todas as irrigações.

Determinou-se a relação entre as lâminas de água coletadas em cada coletor e a lâmina líquida aplicada no tratamento L1A e a distribuição de freqüências desta relação.

Foram plotados gráficos, para a apresentação dos resultados da área adequadamente irrigada e a lâmina relativa.

3.6. Elementos meteorológicos

Instalou-se próxima à área experimental uma estação meteorológica automática Davis (Figura 3) para o monitoramento das temperaturas máxima, mínima e média, umidade relativa do ar, radiação solar incidente à superfície do solo, velocidade e direção do vento e precipitação (Figura 12). Os dados foram armazenados de 10 em 10 minutos e coletados semanalmente, utilizando um computador portátil. Os dados meteorológicos foram utilizados para o cálculo da demanda evapotranspirométrica, com o software SISDA 3.5 (Sistema de Suporte a Decisão Agrícola).



Figura 12 – Estação meteorológica automática.

3.7. Parâmetros da cultura

3.7.1. Área foliar

A área foliar da cultura foi medida 67 dias após a emergência, no final do III período de desenvolvimento da cultura. A amostragem foi realizada, selecionando-se dentro dos três blocos de cada tratamento, um metro de fileira de planta representativa do dossel da cultura. De cada metro selecionado, escolheu-se uma planta, totalizando três plantas por tratamento e dezoito plantas para toda a unidade experimental. No campo as folhas, foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e imediatamente levadas ao Laboratório de Controle de Fitopatógenos do Departamento de Fitotecnia.

A área foliar foi determinada diretamente, passando as folhas de cada planta no aparelho determinador de área foliar, que armazenava o valor da área das folhas de forma acumulativa, fornecendo no final do processo o valor total da área de cada planta em cm^2 .

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o software SAEG, considerando o delineamento em blocos ao acaso, ao nível de 5% de probabilidade.

3.7.2. Avaliação dos componentes de produção

A colheita do experimento foi realizada a partir do dia 17 de novembro de 2000, no momento em que as plantas atingiram a maturidade fisiológica, caracterizado, para a cultura do feijão, pela mudança de cor das vagens e quando ocorrem 70 a 80% da desfolha (NETO et al., 2000).

A colheita das plantas selecionadas para análise dos componentes de produção, foi realizada em áreas de 1 m^2 em torno dos coletores dos três blocos de todos os tratamentos, totalizando 27 amostras por tratamento e 162 em toda a unidade experimental (Figura 13).

As plantas, em seguida, foram levadas para o Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola, onde foram contadas e as vagens separadas. O material restante foi acondicionado em sacos de papel e

levado para uma estufa ventilada a 65°C, por um período de 72 horas, para a determinação da matéria seca. Antes da debulha manual, as vagens foram contadas. Os grãos foram pesados em balança eletrônica com 0,01g de precisão e sua umidade determinada com o equipamento Water Level, possibilitando a padronização da produtividade (grãos com 13% de umidade).

A análise estatística dos componentes de produção, como número de vagens, matéria seca (kg ha^{-1}), produtividade (kg ha^{-1}), foi realizada com o software SAEG, ao nível de 5% de probabilidade.



Figura 13 – Área ao redor de um coletor do tratamento L1A onde foi realizada a colheita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dados climáticos

No Quadro 3 estão apresentados os valores das temperaturas máximas, mínimas e médias, da umidade relativa média, da velocidade de vento média, da radiação solar média e da precipitação, ocorridos durante o ciclo da cultura. A temperatura média durante o ciclo da cultura de 19,32 °C encontrou-se dentro da faixa considerada ideal para a cultura do feijão, que segundo NETO et al. (2000) está entre 15 e 29,5°C, e ficou muito próxima da temperatura média ideal para o desenvolvimento da cultura, que segundo os quais é de 21°C.

Quadro 3 – Temperaturas máximas, mínimas e médias, umidade relativa média, velocidade de vento média, radiação solar média e precipitação ocorridas durante o ciclo da cultura.

Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	Uméd (%)	Vvmédia (m/s)	RadMédia (W/m ²)	Precipitação (mm)
32,10	5,30	19,32	67,32	1,26	202,79	246,00

As Figuras 14, 15, 16 e 17 ilustram, respectivamente, a evolução dos valores diários das temperaturas máximas, mínimas e médias, da umidade relativa média, da precipitação e da velocidade do vento média, ocorridos durante o ciclo da cultura.

Observou-se na Figura 14 que a menor temperatura registrada durante o ciclo da cultura foi de 5,30°C e ocorreu nos dias 14 e 15 de agosto, quatro e cinco dias após o plantio. A emergência ocorreu dez dias após a semeadura e durante este período, baixas temperaturas foram observadas, principalmente nos dias 13, 14 e 15 de agosto. A maior temperatura ocorreu no dia 13 de outubro e foi de 32,10°C. Os valores de umidade relativa média (Figura 15) acompanharam as variações dos valores de temperatura média, o que indica que os sensores de temperatura e umidade relativa da estação meteorológica automática funcionaram adequadamente.

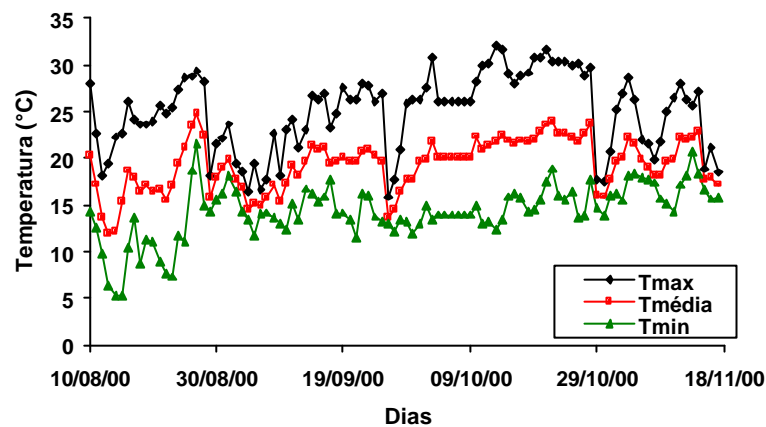


Figura 14 – Temperaturas médias, máximas e mínimas ocorridas durante o ciclo da cultura.

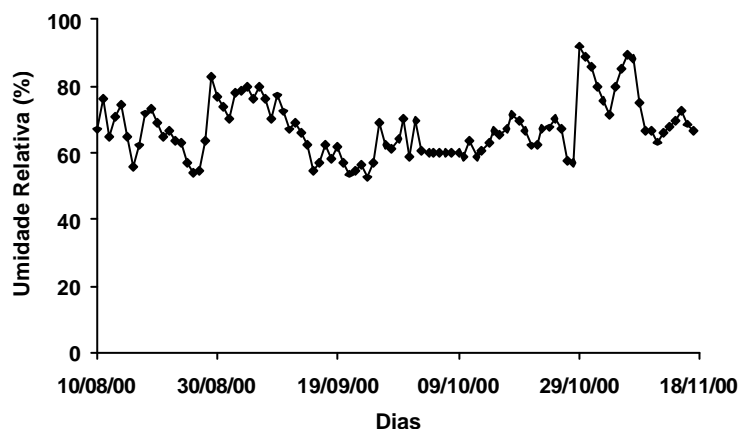


Figura 15 – Umidade relativa média ocorrida durante o ciclo da cultura.

Observou-se na Figura 16 que o total precipitado foi de 246 mm. O máximo período em que não ocorreu precipitação foi de 17 dias, entre os dias 2 e 18 de outubro.

Verificou-se na Figura 17 que a velocidade do vento média, durante o ciclo da cultura, variou bastante. Os valores máximos e mínimos observados foram de 2,90 e 0,15 m.s⁻¹, nos dias 26 de agosto e 26 de outubro, respectivamente.

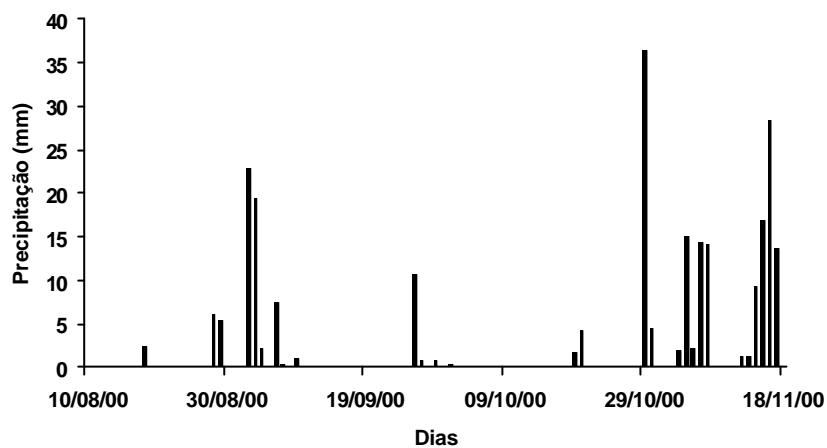


Figura 16 – Precipitação ocorrida durante o ciclo da cultura.

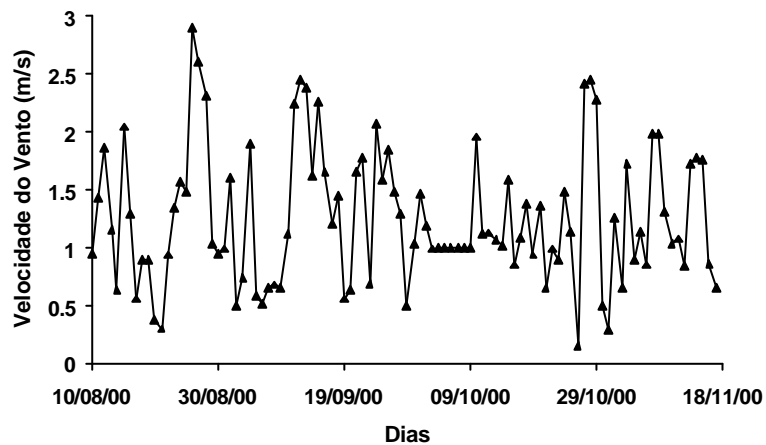


Figura 17 – Velocidade do vento média ocorrida durante o ciclo da cultura.

A Figura 18 ilustra a evolução dos valores diários da radiação solar média e da precipitação, ocorridos durante o ciclo da cultura.

Observa-se na Figura 18 que a radiação solar incidente na superfície média, durante o ciclo da cultura, oscilou bastante. Esta oscilação foi provocada pela alternância de dias nublados e chuvosos para dias de céu limpo.

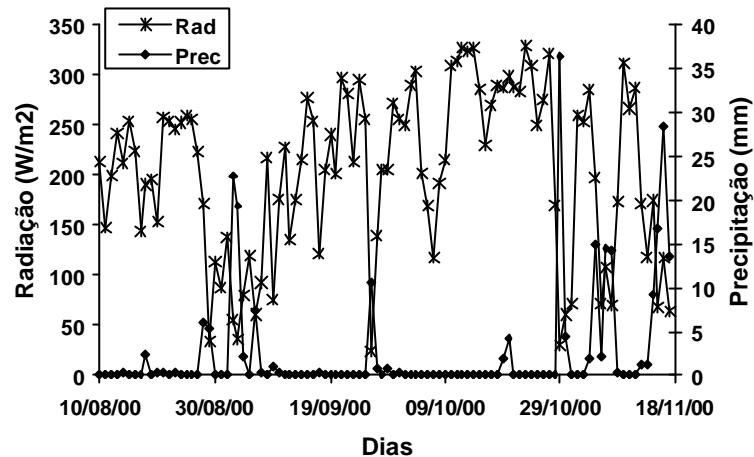


Figura 18 – Radiação solar média e precipitação ocorrida durante o ciclo da cultura.

Os valores diários das temperaturas máximas, mínimas e médias, da umidade relativa média, da velocidade do vento média, da precipitação e da radiação solar média, durante o período de 10 de agosto a 17 de novembro, estão apresentados no Quadro 1A.

4.2. Evapotranspiração de referência e evapotranspiração potencial da cultura

A Figura 19 ilustra a evolução dos valores diários da evapotranspiração de referência (ET_o) e da evapotranspiração potencial da cultura (ETP_c), ocorridos durante o ciclo da cultura.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada pelo método de Penman-Monteith, com o uso do software SISDA 3.5, utilizando as variáveis meteorológicas medidas na estação meteorológica automática instalada na área experimental.

A evapotranspiração potencial da cultura (ETP_c) foi calculada pelo produto da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo coeficiente de cultivo (K_c). Para a cultura do feijão, os valores recomendados por

ALLEN et al. (1998) são 0,4; 0,75; 1,15; e 0,4, para os estádios fenológicos inicial, desenvolvimento vegetativo, floração/maturação e final, respectivamente.

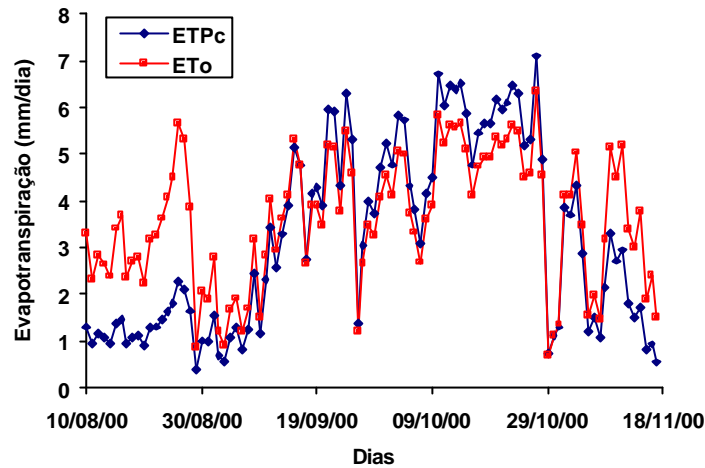


Figura 19 – Evapotranspiração de referência e evapotranspiração potencial da cultura ocorrida durante o ciclo da cultura.

Observou-se que os valores de ETo e ETPc acompanharam as variações da radiação solar incidente na superfície (Figura 18), decorrente da alternância de dias nublados e chuvosos para dias de céu limpo. Durante o período do dia 10 a 28 de outubro, a demanda evapotranspirométrica aumentou, o que gerou maior consumo de água pela cultura e, conseqüentemente, maiores lâminas de irrigação para atender às necessidades da cultura. Os menores valores de ETo e ETPc foram de 0,70 e 0,39 mm dia⁻¹, respectivamente, e ocorreram nos dias 29 de outubro e 29 de setembro. Os maiores valores foram de 6,33 e 7,10 mm/dia, respectivamente, e ocorreu no dia 27 de outubro. A demanda evapotranspirométrica potencial da cultura, durante o ciclo, foi de 318,45 mm.

4.3. Irrigações realizadas e coeficiente de uniformidade

No Quadro 4 estão apresentados os valores das lâminas brutas aplicadas, das lâminas líquidas de irrigação, das lâminas médias, máximas e mínimas coletadas, da eficiência média, do CUC médio, do CUC acumulado e do coeficiente de variação, para todos os tratamentos.

Quadro 4 – Valores de lâminas d'água aplicadas durante o ciclo, coeficiente de uniformidade de Christiansen e eficiência para os tratamentos

Trat.	Lâmina Bruta Aplicada (mm)	Lâmina Líquida (mm)	Lâmina Média Coletada (mm)	Lâmina Máxima Coletada (mm)	Lâmina Mínima Coletada (mm)	Eficiência Média (%)	CUC Médio (%)	CUC Acum. (%)	CV (%)
L1A	154,76	134,95	111,50	139,21	78,63	72,04	84,39	87,86	15,41
L1B	154,76	134,95	110,19	142,90	51,65	71,20	69,45	82,57	19,46
L2A	77,38	67,48	60,27	74,56	41,74	77,88	86,17	88,71	14,82
L2B	77,38	67,48	50,42	72,42	21,55	65,15	67,30	81,66	24,42
L3A	232,14	202,43	161,71	188,34	113,58	69,66	88,64	91,64	11,74
L3B	232,14	202,43	162,89	207,75	76,11	70,16	69,62	83,76	17,89

Os valores de lâminas brutas aplicadas e das lâminas líquidas de irrigação apresentados no Quadro 4 são valores totais e representam a soma das lâminas brutas e líquidas das irrigações realizadas nos dias 22 de setembro e 5, 13, 20 e 28 de outubro. Conforme metodologia descrita anteriormente, os tratamentos L2A e L2B receberam 50% da lâmina bruta determinada para o tratamento L1A, que correspondia à lâmina para retornar a umidade do solo à capacidade de campo, e os tratamentos L3A e L3B, receberam uma lâmina de 150%. Foram aplicados 154,76; 77,38; e 232,14 mm, aos tratamentos L1A e L1B, L2A e L2B, L3A e L3B, respectivamente.

A lâmina média coletada, apresentada no Quadro 4, foi determinada por meio da média das lâminas acumuladas nos 27 coletores instalados em cada tratamento (Figura 3). As lâminas médias, máximas e mínimas coletadas, em cada tratamento, durante o ciclo da cultura, estão apresentadas na Figura 20. Observou-se na Figura 20 que nos tratamentos em que foi aplicada a mesma quantidade de água a diferença entre as lâminas máxima e mínima coletadas foi maior para o tratamento em que a irrigação foi realizada com menor uniformidade. Tal fato ocorreu em virtude de nestes tratamentos, a baixa uniformidade ter sido induzida, atuando no defletor do aspersor, o que proporcionou maiores lâminas coletadas nos coletores localizados próximos aos aspersores e menores nos coletores mais distantes. O coeficiente de variação apresentado no Quadro 4 confirma o que foi discutido anteriormente, ou seja, para os tratamentos em que as irrigações foram realizadas com menor uniformidade o coeficiente de variação das lâminas totais coletadas foi superior

ao coeficiente de variação para o tratamento em que foi aplicada a mesma quantidade de água, porém com alta uniformidade. Os tratamentos L1A e L1B, L2A e L2B, L3A e L3B apresentaram um coeficiente de variação das lâminas totais coletadas de 15,41 e 19,46%, 14,82 e 24,42% e 11,74 e 17,89%, respectivamente.

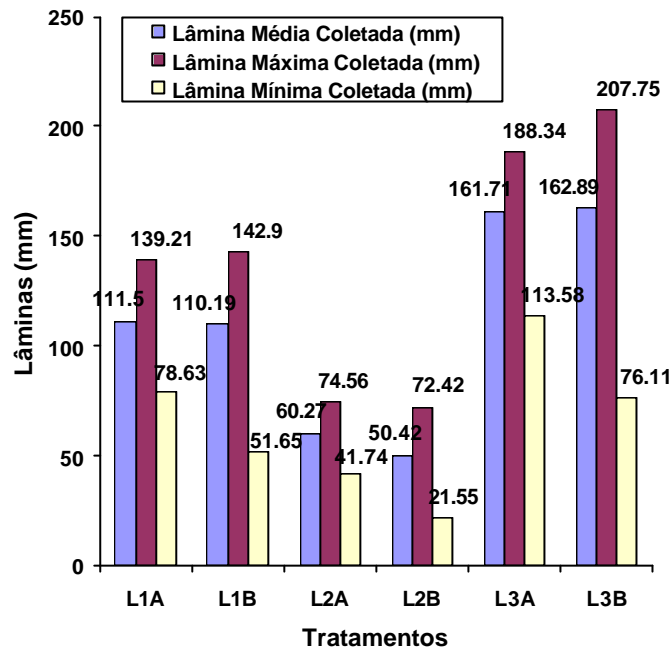


Figura 20 – Lâminas médias, máximas e mínimas coletadas durante o ciclo da cultura para os tratamentos.

Determinou-se a eficiência média através da relação entre a lâmina média coletada e a lâmina bruta aplicada. Esperava-se obter em campo irrigações com maior eficiência de aplicação, porém, devido a problemas operacionais ocorridos na primeira irrigação, e às altas velocidades de vento observadas durante as irrigações, as eficiências médias obtidas ficaram abaixo da considerada ideal ($> 80\%$) para sistemas de irrigação por aspersão convencional. Para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, as eficiências médias foram, respectivamente, de 72,04; 71,20; 77,88; 65,15; 69,66; e 70,16%.

As lâminas brutas aplicadas, médias coletadas e a diferença relativa, em cada tratamento, estão apresentadas na Figura 21.

Neste trabalho definiu-se a diferença relativa como a relação da diferença entre a lâmina bruta de irrigação e a lâmina média coletada pela lâmina bruta de irrigação. Observou-se na Figura 21 que a menor e a maior diferença relativa, ocorreram nos tratamentos L2A e L2B, propiciando, respectivamente, a maior e a menor eficiência média de aplicação entre todos os tratamentos. Para estes tratamentos, as diferenças relativas foram de 0,221 e 0,348.

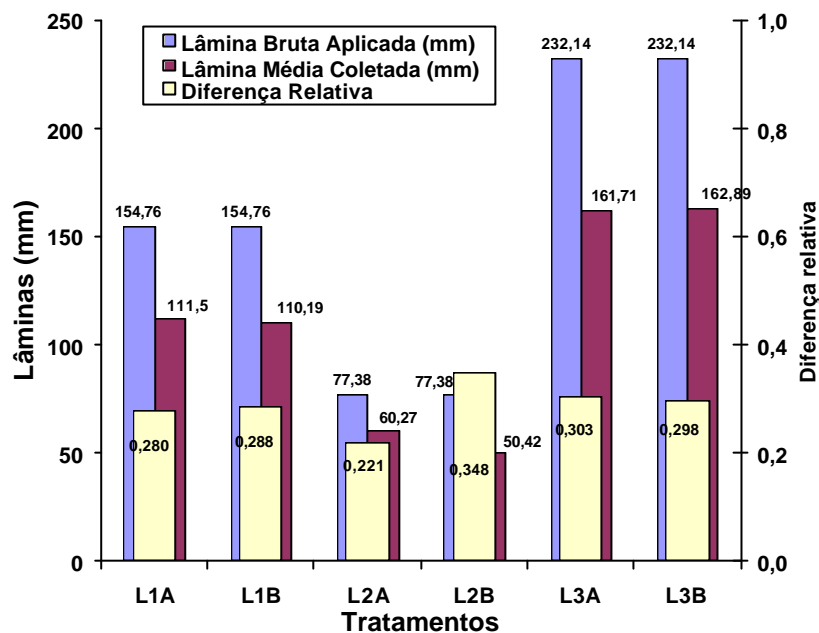


Figura 21 - Lâminas brutas de irrigação, lâminas médias coletadas e diferenças relativas para os tratamentos.

A Figura 22 ilustra os valores do CUC médio e do CUC acumulado, determinados durante o ciclo da cultura, para todos os tratamentos.

Os valores do CUC médios apresentados no Quadro 4 foram calculados com as médias dos CUC das cinco irrigações realizadas durante o ciclo da cultura. Conforme metodologia descrita, as irrigações nos tratamentos L1A, L2A e L3A propiciaram maior uniformidade de distribuição e, conseqüentemente, maiores valores de CUC. Para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, os CUC médios determinados foram, 84,39; 69,45; 86,17; 67,30; 88,64; e 69,62%, respectivamente.

O CUC acumulado apresentado no Quadro 4, calculado com as lâminas acumuladas nos 27 coletores de cada tratamento, apresentou valores superiores aos dos CUC médios. Observou-se na Figura 22 maior acréscimo no valor do CUC médio para o CUC acumulado nos tratamentos em que as irrigações foram realizadas com baixa uniformidade. Nesses tratamentos, a posição do defletor de um dos aspersores do bloco foi modificada semanalmente, evitando-se que sempre as mesmas áreas dentro do bloco recebessem uma lâmina muito superior. Portanto, as lâminas totais coletadas nos 27 coletores de cada tratamento apresentaram menor variação, quando comparadas às lâminas coletadas em cada irrigação, o que promoveu altos valores de CUC acumulados. Para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, os CUC acumulados determinados foram 87,86; 82,57; 88,71; 81,66; 91,64; e 83,76%, respectivamente.

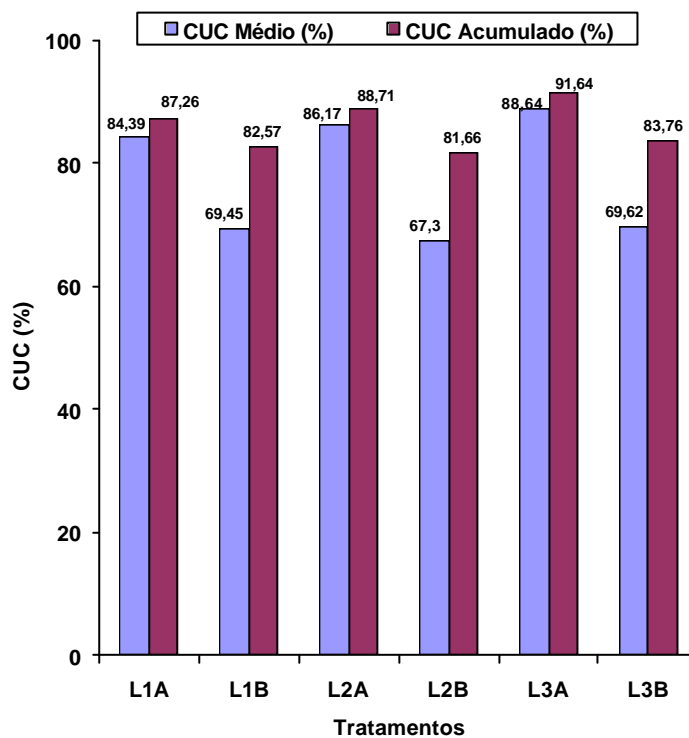


Figura 22 – CUC médio e CUC acumulado, determinados durante o ciclo da cultura para, os tratamentos.

No Quadro 2A estão apresentados os valores das lâminas brutas aplicadas, das lâminas líquidas de irrigação, das lâminas médias, máximas e

mínimas coletadas, da eficiência média, do CUC médio e do CUC acumulado, por bloco, para todos os tratamentos.

As lâminas médias, máximas e mínimas coletadas durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L1A e L1B; L2A e L2B; e L3A e L3B, estão apresentadas nas Figuras 1A, 3A e 5A, respectivamente.

O CUC médio, o CUC acumulado e a eficiência média ocorridos durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L1A e L1B; L2A e L2B; e L3A e L3B, estão apresentados nas Figuras 2A, 4A e 6A, respectivamente.

No Quadro 5 estão apresentados os valores das lâminas brutas aplicadas, das lâminas líquidas de irrigação, das lâminas médias, máximas e mínimas coletadas, da eficiência média, da velocidade do vento ocorrida durante as irrigações e do CUC médio, por irrigação, para todos os tratamentos.

Observou-se no Quadro 5 que a irrigação realizada no dia 22 de setembro apresentou uma eficiência média de aplicação muito baixa, de 42,76; 42,34; 64,43; 43,96; 46,49; e 43,16%, para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, respectivamente. Como discutido, no item 3.5.2, esta primeira irrigação foi realizada com um sistema motobomba a diesel, e foi verificado que durante a irrigação a pressão de operação do sistema oscilou entre 20 e 35 mca, afetando significativamente a mesma. Também foi verificado que a velocidade do vento média ocorrida durante a irrigação foi de 3,07; 2,96; 3,48; 2,70; 3,02; e 2,91 m s⁻¹, para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, respectivamente. Estes altos valores de velocidade do vento também afetaram a qualidade da irrigação realizada nessa data.

A irrigação realizada no dia 5 de outubro apresentou a mais alta eficiência média de aplicação, para os tratamentos L1A, L1B, L3A e L3B, e os valores foram 98,14; 81,48; 88,78; e 86,72%, respectivamente. Também foi verificado que a velocidade do vento média ocorrida durante a irrigação foi de 0,71; 0,69; 0,81; e 0,75 m s⁻¹, para os tratamentos L1A, L1B, L3A e L3B, respectivamente. Estes baixos valores de velocidade do vento afetaram positivamente a qualidade da irrigação realizada nesta data. Para os tratamentos em que 50% da lâmina necessária ao solo para retornar à capacidade de campo foi aplicada, problemas operacionais foram verificados,

pois no tratamento L2A a lâmina média aplicada foi 2,04% superior à lâmina bruta de irrigação, e no tratamento L2B a eficiência média de aplicação apresentou-se baixa.

Quadro 5 – Valores de lâminas d'água aplicadas durante cada irrigação, coeficiente de uniformidade de Christiansen e eficiência para os tratamentos

Trat.	Irrigações	Lâmina Bruta Aplicada (mm)	Lâmina Líquida (mm)	Lâmina Média Coletada (mm)	Lâmina Máxima Coletada (mm)	Lâmina Mínima Coletada (mm)	Eficiência Média (%)	Velocidade de Vento Durante as Irrigações (m s ⁻¹)	CUC Médio (%)
L1A	22/09/2000	21,21	17,00	9,07	12,81	5,63	42,76	3,07	80,97
	05/10/2000	22,57	20,31	22,15	28,54	15,34	98,14	0,71	89,52
	13/10/2000	22,50	18,00	15,72	26,02	7,77	69,87	3,28	79,18
	20/10/2000	44,27	39,85	30,80	40,77	19,80	69,57	2,79	85,95
	28/10/2000	44,21	39,79	33,76	42,52	23,11	76,36	1,59	86,34
L1B	22/09/2000	21,21	17,00	8,98	15,53	1,94	42,34	2,96	67,02
	05/10/2000	22,57	20,31	18,39	28,15	7,77	81,48	0,69	73,29
	13/10/2000	22,50	18,00	17,17	23,69	3,30	76,31	2,57	75,54
	20/10/2000	44,27	39,85	31,17	41,55	12,23	70,41	2,79	66,73
	28/10/2000	44,21	39,79	34,48	42,72	11,65	77,99	1,59	64,69
L2A	22/09/2000	10,60	8,50	6,83	9,71	3,69	64,43	3,48	86,53
	05/10/2000	11,29	10,16	11,49	14,17	8,74	100,00	0,67	90,66
	13/10/2000	11,25	9,00	8,74	12,62	4,47	77,69	3,50	82,54
	20/10/2000	22,14	19,93	15,80	21,94	8,93	71,36	2,96	84,14
	28/10/2000	22,11	19,90	17,40	22,33	11,65	78,70	1,41	86,98
L2B	22/09/2000	10,60	8,50	4,66	7,57	2,33	43,96	2,70	66,53
	05/10/2000	11,29	10,16	7,13	13,59	3,30	63,15	0,73	63,85
	13/10/2000	11,25	9,00	8,06	11,84	0,97	71,64	3,03	73,24
	20/10/2000	22,14	19,93	14,85	23,11	4,27	67,07	2,96	66,23
	28/10/2000	22,11	19,90	15,73	21,36	3,49	71,14	1,41	66,66
L3A	22/09/2000	31,81	25,50	14,79	19,42	6,80	46,49	3,02	83,93
	05/10/2000	33,86	30,47	30,06	34,95	23,88	88,78	0,81	93,18
	13/10/2000	33,75	27,00	23,96	31,07	12,43	70,99	2,86	83,94
	20/10/2000	66,41	59,78	45,05	53,59	31,65	67,84	2,64	90,26
	28/10/2000	66,32	59,69	47,85	58,05	36,70	72,15	1,46	91,91
L3B	22/09/2000	31,81	25,50	13,73	31,07	1,94	43,16	2,91	62,86
	05/10/2000	33,86	30,47	29,43	52,42	9,71	86,92	0,75	72,20
	13/10/2000	33,75	27,00	24,24	34,95	8,93	71,82	2,24	77,14
	20/10/2000	66,41	59,78	45,66	57,86	14,17	68,75	2,64	68,16
	28/10/2000	66,32	59,69	49,83	60,38	16,50	75,14	1,46	67,72

As velocidades do vento ocorridas durante as irrigações dos dias 13, 20 e 28 de outubro afetaram negativamente a qualidade da irrigação, e os valores da eficiência média de aplicação oscilaram bastante, ficando sempre abaixo do valor considerado ideal para o sistema de irrigação por aspersão convencional.

Conforme discutido anteriormente, foi verificado, em todas as irrigações, que nos tratamentos em que foi aplicada a mesma quantidade de água a

diferença entre as lâminas máxima e mínima coletadas foi maior para o tratamento em que a irrigação foi realizada com menor uniformidade, porém as amplitudes dessas diferenças foram maiores, uma vez que os resultados apresentados no Quadro 5 se referem às lâminas coletadas em cada irrigação, e não às lâminas totais.

Os valores dos CUC médios apresentados no Quadro 5 correspondem à média dos CUC determinados nos três blocos de cada tratamento. O menor valor observado em todas as irrigações realizadas no tratamento em que a água foi aplicada com baixa uniformidade ocorreu no dia 22 de setembro, no tratamento L3B. O CUC médio determinado foi de 62,86%. O maior valor observado nos tratamentos em que a água foi aplicada com alta uniformidade ocorreu no dia 5 de outubro, no tratamento L3A. O CUC médio determinado foi de 93,18%. Nesse dia, a velocidade média do vento durante a irrigação neste tratamento foi de $0,81 \text{ m s}^{-1}$.

As lâminas brutas aplicadas, líquidas e médias, máximas e mínimas, coletadas em cada tratamento durante as irrigações realizadas nos dias 22/9/2000, 05/10/2000, 13/10/2000, 20/10/2000 e 28/10/2000, estão apresentadas nas Figuras 7A, 8A, 9A, 10A e 11A, respectivamente.

Os valores do CUC médio e da eficiência média ocorridos em cada irrigação e os valores da velocidade média do vento ocorrida durante cada irrigação, para todos os tratamentos estão apresentados nas Figuras 12A, 13A e 14A, respectivamente.

4.4. Área adequadamente irrigada

Conforme metodologia descrita anteriormente, cada um dos três blocos de cada tratamento possuía 9 coletores. Trabalhou-se com valores acumulados, ou seja, a lâmina total coletada em cada coletor corresponde à soma das cinco lâminas precipitadas, decorrentes das cinco irrigações. A lâmina média acumulada em cada coletor foi determinada pela média dos tratamentos.

Considerando os valores totais médios, a área adequadamente irrigada em cada tratamento foi determinada, utilizando a relação da lâmina média total coletada e da lâmina líquida de irrigação, determinada no tratamento L1A, conforme metodologia já descrita. Posteriormente, esses valores foram ordenados. A menor relação correspondeu a uma área adequadamente irrigada de 100% e a maior relação correspondeu a uma área de 11,11%. A Figura 23 ilustra a área adequadamente irrigada por tratamento.

Devido aos baixos valores da eficiência média de aplicação, a área adequadamente irrigada para os tratamentos L1A e L1B foi de 22 e 17 %, respectivamente. Para os tratamentos (L3A e L3B) em que foi aplicado 50% a mais da lâmina aplicada no tratamento L1A, a área adequadamente irrigada foi de 100 e 91%, respectivamente. Para os tratamentos (L2A e L2B) em que foi aplicado 50% a menos da lâmina aplicada no tratamento L1A, em nenhum ponto da área foi aplicada a lâmina requerida pela cultura.

Verifica-se na Figura 23 que mesmo com os baixos valores da eficiência de aplicação, nos tratamentos em que foi aplicada a lâmina necessária para retornar a umidade do solo à capacidade de campo (L1A e L1B), em 80% da área, respectivamente, 74 e 77% da lâmina requerida pela cultura atingiu o solo.

Comparando os tratamentos que receberam a mesma lâmina bruta de irrigação, observou-se na Figura 23 o efeito da alta e da baixa uniformidade na composição da curva. Em condições de baixas uniformidades, as diferenças entre os maiores e os menores valores da razão entre a lâmina média acumulada e a lâmina líquida de irrigação foram maiores do que as diferenças apresentadas em condições de altas uniformidades.

A área adequadamente irrigada por tratamento, desconsiderando a irrigação realizada no dia 22/9/2000, está apresentada na Figuras 15A.

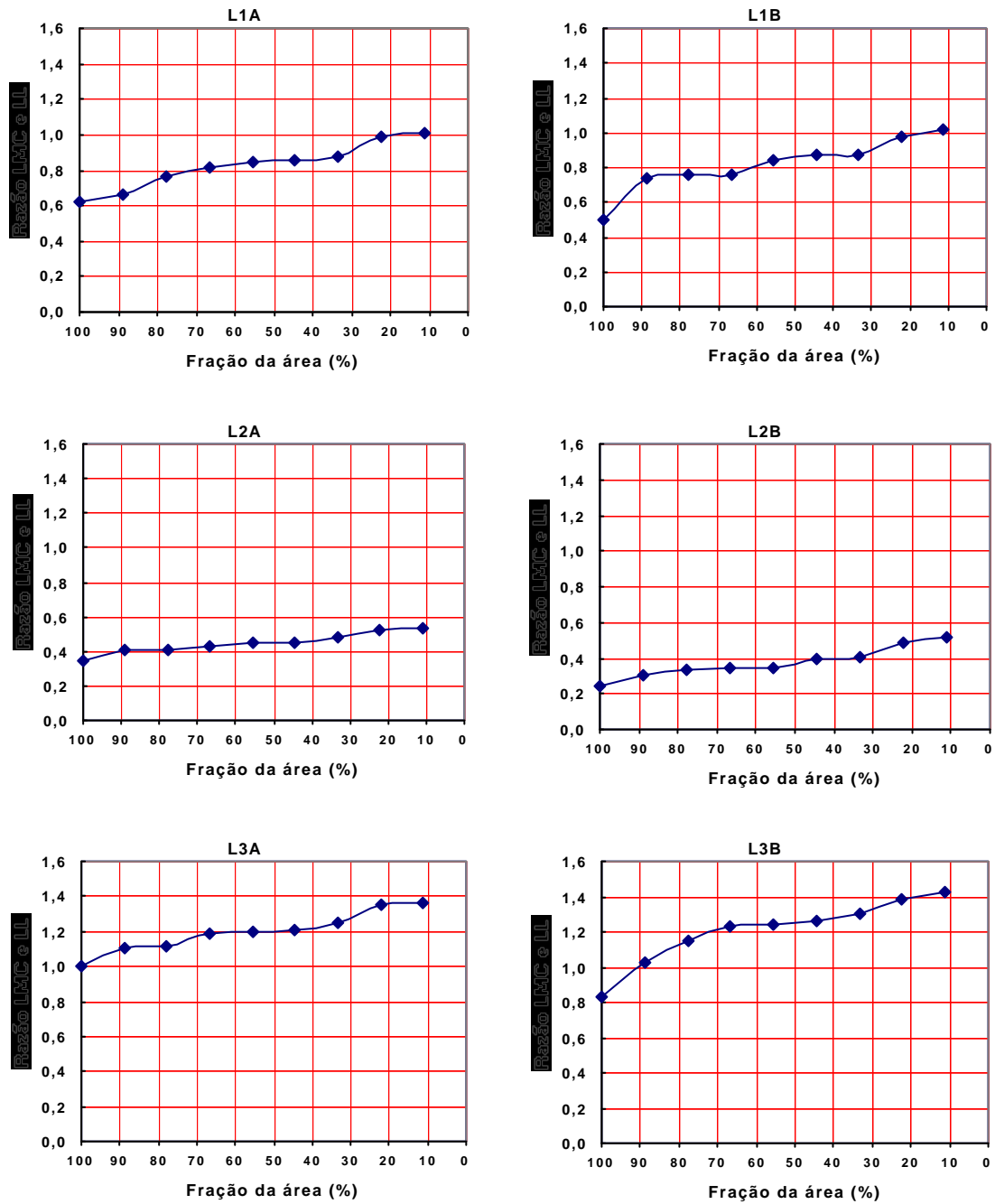


Figura 23 – Área adequadamente irrigada para os tratamentos.

4.5. Área foliar

A área foliar da cultura foi medida no dia 25 de outubro, 67 dias após a emergência, no final do III período de desenvolvimento da cultura.

No Quadro 6 estão apresentados os valores do número de folhas por planta e da área foliar, medida a 67 DAE, para todos os tratamentos.

Quadro 6 – Número de folhas por planta (NFP) e área foliar (AF), medida a 67 DAE, para os tratamentos

	NFP			AF (cm ²)		
	1	2	3	1	2	3
L1A	69	63	53	1.460,9	1.373,1	1.340,2
L1B	53	43	72	1.273,0	700,9	1.820,9
L2A	47	43	56	1.046,2	875,5	997,4
L2B	63	42	40	964,40	1.506,5	802,2
L3A	64	71	58	1.262,0	1.593,3	1.380,3
L3B	63	57	63	1.438,4	1.515,0	1.564,0

A Figura 24 ilustra o número médio de folhas por planta e a área foliar média (cm²), medida a 67 DAE, para todos os tratamentos.

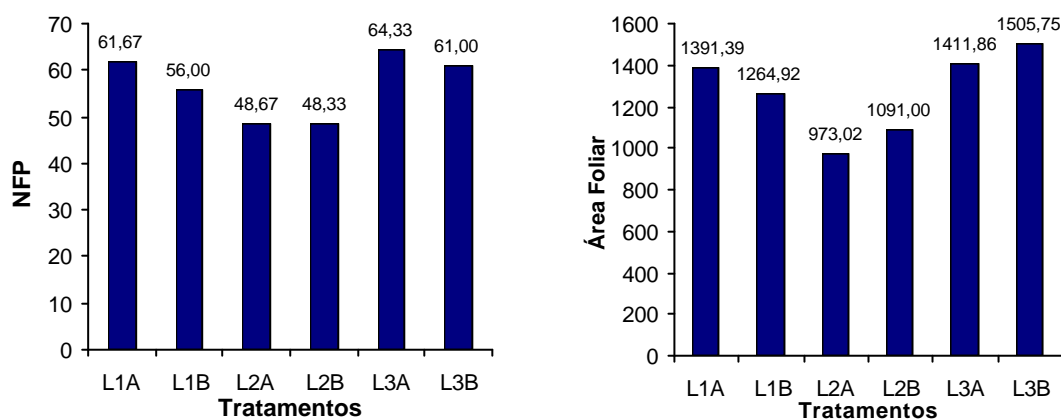


Figura 24 – Número de folhas por planta e área foliar, medidos a 67 DAE, para os tratamentos.

Nos Quadros 7 e 8 está apresentada a comparação das médias de NFP e de AF, medidos a 67 DAE, através da análise de variância.

Quadro 7 – Comparação das médias de NFP, medidos a 67 DAE, através da análise de variância

Tratamentos	NFP
L1A	61,7 a
L1B	56,0 a
L2A	48,7 a
L2B	48,3 a
L3A	64,3 a
L3B	61,0 a

Quadro 8 – Comparação das médias de AF, medidos a 67 DAE, através da análise de variância

Tratamentos	AF(cm ²)
L1A	1.391,4 a
L1B	1.264,9 a
L2A	973,0 a
L2B	1.091,0 a
L3A	1.411,9 a
L3B	1.505,7 a

Verifica-se pelos Quadros 7 e 8 que não existiram diferenças significativas, a 5% de probabilidade, no número de folhas e na área foliar, entre os seis tratamentos utilizados. É importante ressaltar, que quando a amostragem foi realizada somente quatro irrigações tinham sido executadas, totalizando uma lâmina bruta de irrigação de 110,54 mm nos tratamentos que receberam a quantidade de água requerida pela cultura e as precipitações observadas do plantio até a data da amostragem totalizaram 86,8mm. Portanto, a aplicação de lâminas 50% inferior e 50% superior à lâmina requerida pela cultura, com diferentes níveis de uniformidade de distribuição, não afetou o crescimento vegetativo da cultura. Estes resultados coincidem com aqueles apresentados por DOORENBOS e PRUITT (1977) e VIEIRA (1978). Estes autores comprovaram que para a cultura do feijão o período vegetativo não é um período crítico ao déficit de água no solo.

4.6. Componentes de produção

A colheita das plantas selecionadas para análise dos componentes de produção foi realizada em áreas de 1 m² em torno dos coletores dos três

blocos de todos os tratamentos, totalizando 27 amostras por tratamento e 162 em toda a unidade experimental.

4.6.1. Matéria seca (MS)

No Quadro 9 estão apresentados os valores de matéria seca (MS) máxima, mínima e média, do desvio-padrão e do coeficiente de variação, para todos os tratamentos.

Quadro 9 – Valores de matéria seca (MS), kg ha^{-1} , desvio-padrão e coeficiente de variação para os tratamentos

Tratamentos	MS Máxima (kg ha^{-1})	MS Mínima (kg ha^{-1})	MS Média (kg ha^{-1})	Desvio-padrão	CV (%)
L1A	1.748,00	821,00	1.084,74	202,89	18,70
L1B	1.338,00	789,00	1.018,70	162,37	15,94
L2A	1.187,00	624,00	861,00	134,09	15,57
L2B	1.636,00	889,00	1.134,11	191,53	16,89
L3A	1.420,00	954,00	1.145,89	144,43	12,60
L3B	1.761,00	756,00	1.105,96	214,65	19,41

Observou-se no Quadro 9 que nos tratamentos que receberam uma lâmina bruta de irrigação 50% inferior e 50% superior à lâmina requerida pela cultura (L2A e L2B, L3A e L3B, respectivamente) os valores de matéria seca, apresentaram maior variabilidade em condições de baixa uniformidade. Para os tratamentos L1A e L1B, o coeficiente de variação foi maior em condição de alta uniformidade.

A Figura 25 ilustra os valores da matéria média por bloco nos tratamentos.

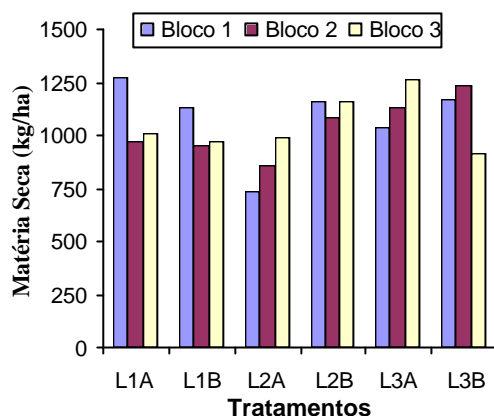


Figura 25 – Matéria seca média por bloco nos tratamentos.

Verifica-se na Figura 25 que nos tratamentos L1B, L2B e L3A os valores médios da matéria seca por bloco não apresentaram grandes variações. No tratamento L1A o resultado obtido no bloco 1 foi superior aos demais, no tratamento L2A o resultado do bloco 1 foi inferior aos demais e no tratamento L3B o resultado do bloco 3 foi inferior aos demais.

No Quadro 10 está apresentada a comparação das médias de MS, utilizando o teste de Tukey com um nível de 5% de probabilidade.

Quadro 10 – Comparação das médias de MS utilizando o teste de Tukey a 5%

Tratamentos	MS (kg ha)
L1A	1.084,74 a
L1B	1.018,70 a
L2A	861,00 a
L2B	1.134,11 a
L3A	1.145,89 a
L3B	1.105,96 a

Verifica-se pelo Quadro 10 que não existiram diferenças significativas, na matéria seca, a 5% de probabilidade, entre os seis tratamentos utilizados. Portanto, a aplicação de lâminas 50% inferior e 50% superior à lâmina requerida pela cultura não provocou mudanças morfológicas na cultura. É importante ressaltar que durante o ciclo da cultura a lâmina bruta de irrigação aplicada nos tratamentos que receberam a quantidade de água requerida pela

cultura foi de 154,76 mm e que as precipitações observadas do plantio até a colheita foram bem distribuídas e totalizaram 246 mm.

No Quadro 11 está apresentado o resultado do teste F para os contrastes de MS entre os tratamentos CUC alto e baixo.

Quadro 11 – Teste F para os contrastes de MS entre os tratamentos CUC alto e baixo

FV	GL	Quadrado médio
		MS
L2A vs L2B	1	111.884,52 *
L1A vs L1B	1	6.541,34 ns
L3A vs L3B	1	2.391,12 ns
Resíduo	10	18.592,84

* F significativo a 5% de probabilidade.
ns F não-significativo a 5% de probabilidade.

Verifica-se no Quadro 11 que o teste F, para o contraste entre os tratamentos L2A e L2B, foi significativo a 5% de probabilidade. Apesar de não ter havido diferenças significativas na matéria seca quando a análise foi realizada com todos os tratamentos, a diferença de uniformidade nestes tratamentos promoveu diferenças na matéria seca observada, e os resultados obtidos em condição de baixa uniformidade promoveram maiores valores da matéria seca.

4.6.2. Número de vagens por planta (NVP)

No Quadro 12 estão apresentados os valores do número máximo, mínimo e médio de vagens por planta (NVP), do desvio-padrão e do coeficiente de variação, para todos os tratamentos.

Quadro 12 – Valores de número de vagens por planta (NVP), desvio-padrão e coeficiente de variação, para os tratamentos

Tratamentos	NVP Máximo	NVP Mínimo	NVP Médio	Desvio-Padrão	CV (%)
L1A	12,03	7,85	9,60	0,99	10,36
L1B	12,08	6,71	8,90	1,22	13,71
L2A	8,20	4,40	6,75	1,07	15,88
L2B	9,50	5,69	7,65	0,85	11,12
L3A	14,21	8,56	11,39	1,20	10,50
L3B	14,08	8,19	11,53	1,40	12,15

Observou-se no Quadro 12 que nos tratamentos que receberam uma lâmina bruta de irrigação igual e 50% superior à lâmina requerida pela cultura (L1A e L1B, L3A e L3B, respectivamente) o número de vagens por planta, apresentou maior variabilidade em condições de baixa uniformidade, pois, nessas condições, os coeficientes de variação foram maiores. Para os tratamentos L2A e L2B, o coeficiente de variação foi maior em condição de alta uniformidade.

A Figura 26 ilustra os valores do número médio de vagens por planta, por bloco nos tratamentos.

Verifica-se na Figura 26 que em todos os tratamentos os valores médios do número de vagens por bloco não apresentaram grandes variações.

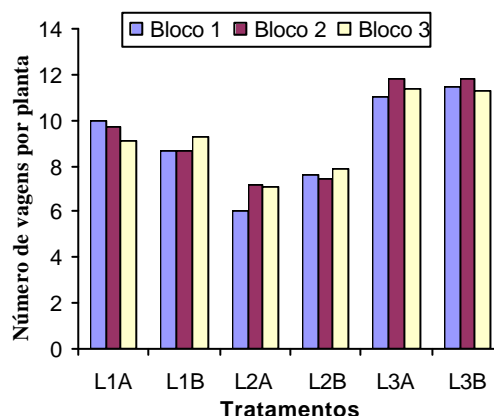


Figura 26 – Número de vagens por planta média para os tratamentos e média por bloco nos tratamentos.

No Quadro 13 está apresentada a comparação das médias de NVP, utilizando o teste de Tukey com um nível de 5% de probabilidade.

Quadro 13 – Comparação das médias de NVP, utilizando o teste de Tukey a 5%

Tratamentos	NVP
L3A	11,39 a
L3B	11,53 a
L1A	9,60 b
L1B	8,90 b
L2A	6,75 c
L2B	7,65 c

No Quadro 13, os tratamentos seguidos pela mesma letra não apresentam diferenças significativas a 5% de probabilidade. Os resultados encontrados do número de vagens por planta nos tratamentos L3A e L3B foram superiores aos resultados dos tratamentos L1A e L1B, e estes foram superiores aos resultados dos tratamentos L2A e L2B.

Tais resultados coincidem com os resultados apresentados por DOORENBOS e PRUITT (1977) e VIEIRA (1978). Estes autores comprovaram que, para a cultura do feijão, a terceira fase fenológica (floração e formação de vagens) é muito sensível ao déficit de água no solo.

É importante ressaltar que todas as irrigações foram realizadas durante esta fase. Enquanto as lâminas brutas de irrigação aplicadas foram de 154,76 mm para os tratamentos L1A e L1B, 77,38 mm para os tratamentos L2A e L2B e 232,14 mm para os tratamentos L3A e L3B, as precipitações observadas neste período totalizaram 18,6 mm.

Portanto, a aplicação de lâminas 50% inferior e 50% superior à lâmina requerida pela cultura e os baixos índices pluviométricos observados durante a terceira fase fenológica afetaram significativamente, a 5% de probabilidade, o número de vagens por planta entre os tratamentos.

No Quadro 14 está apresentado o resultado do teste F para os contrastes de NVP, entre os tratamentos CUC alto e baixo.

Quadro 14 – Teste F para os contrastes de NVP entre os tratamentos CUC alto e baixo

FV	GL	Quadrado médio
		NVP
L2A vs L2B	1	1,2067 *
L1A vs L1B	1	0,7330 ns
L3A vs L3B	1	0,0315 ns
Resíduo	10	0,1789

* F significativo a 5% de probabilidade.
ns F não-significativo a 5% de probabilidade.

Verifica-se no Quadro 14 que o teste F para o contraste entre os tratamentos L2A e L2B foi significativo a 5% de probabilidade. A diferença de uniformidade nesses tratamentos que receberam uma lâmina bruta de irrigação 50% inferior à requerida pela cultura promoveu diferenças significativas no número de vagens por planta, e os resultados obtidos em condição de baixa uniformidade promoveram maiores valores do número de vagens. Para os tratamentos L1A e L1B, L3A e L3B, as diferenças de uniformidade não promoveram diferenças significativas no número de vagens por planta, pois o teste F para o contraste entre estes tratamentos não foi significativo, a 5% de probabilidade.

4.6.3. Produtividade (P)

No Quadro 15 estão apresentados os valores de produtividade (P) máxima, mínima e média, do desvio-padrão e do coeficiente de variação, para todos os tratamentos.

Observou-se no Quadro 15 que nos tratamentos que receberam uma lâmina bruta de irrigação 50% superior à lâmina requerida pela cultura (L3A e L3B) a produtividade, apresentou maior variabilidade em condições de baixa uniformidade, pois nessas condições os coeficientes de variação foram maiores. Para os tratamentos L1A e L1B; e L2A e L2B, o coeficiente de variação foi maior em condição de alta uniformidade.

Quadro 15 – Valores de produtividade (P), desvio-padrão e coeficiente de variação, para os tratamentos

Tratamentos	P Máxima (kg ha ⁻¹)	P Mínima (kg ha ⁻¹)	P Média (kg ha ⁻¹)	Desvio-Padrão	CV (%)
L1A	4.497,99	1.785,90	2.576,42	592,71	23,01
L1B	2.886,80	1.475,37	2.228,68	402,01	18,04
L2A	1.624,20	773,04	1.206,85	250,17	20,73
L2B	2.600,93	1.106,91	1.693,22	309,52	18,28
L3A	4.617,57	2.283,84	3.401,44	569,08	16,73
L3B	4.115,69	1.725,61	3.189,63	600,98	18,84

As produtividades obtidas nos tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B foram 2.576,42; 2.228,68; 1.206,85; 1.693,22; 3.401,44 e 3.189,63 kg ha⁻¹, respectivamente, e os valores encontrados para os tratamentos (L1A e L1B) em que foi aplicada a lâmina de água necessária para a umidade do solo a retornar à capacidade de campo apresentaram-se adequados, estando dentro da faixa de produtividade esperada em condições de agricultura irrigada.

A Figura 27 ilustra os valores da produtividade média por bloco nos tratamentos.

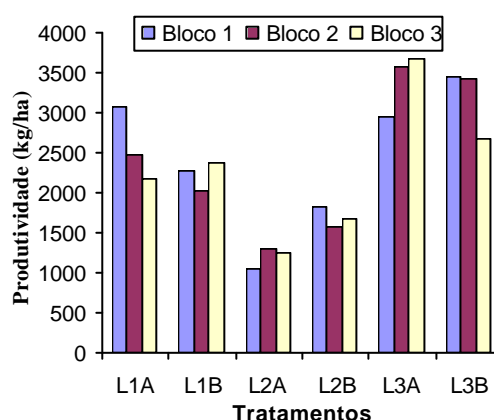


Figura 27 – Produtividade média por bloco nos tratamentos.

Verifica-se na Figura 27 que nos tratamentos L1B, L2A e L2A os valores médios da produtividade por bloco não apresentaram grandes variações. No tratamento L1A o resultado obtido no bloco 1 foi superior aos demais, no

tratamento L3A o resultado do bloco 1 foi inferior aos demais e no tratamento L3B o resultado do bloco 3 foi inferior aos demais.

No Quadro 16 está apresentada a comparação das médias de P, utilizando o teste de Tukey com um nível de 5% de probabilidade.

Quadro 16 – Comparação das médias de produtividade, utilizando o teste de Tukey a 5%

Tratamentos	Produtividade (kg ha⁻¹)
L3A	3.401,44 a
L3B	3.189,63 a b
L1A	2.576,42 a b c
L1B	2.228,68 b c
L2B	1.693,22 c d
L2A	1.206,85 d

No Quadro 16, os tratamentos seguidos pela mesma letra não apresentam diferenças significativas a 5% de probabilidade. Os resultados de produtividade obtidos nos tratamentos L3A, L3B e L1A foram semelhantes entre si e superiores aos demais. Conclui-se que a lâmina bruta de irrigação aplicada no tratamento L1A necessária para a umidade no solo retornar à capacidade de campo foi adequada, pois a produtividade obtida neste tratamento foi estatisticamente semelhante às produtividades obtidas nos tratamentos que receberam uma lâmina bruta de irrigação 50% superior.

Os resultados de produtividade obtidos nos tratamentos L3B, L1A e L1B foram semelhantes entre si e superiores às produtividades obtidas nos tratamentos L2A e L2B.

Os resultados de produtividade obtidos nos tratamentos L1A, L1B e L2B foram semelhantes entre si e superiores à produtividade obtida no tratamento L2A.

Foi observado que durante a quarta fase fenológica, correspondente ao enchimento de grãos e colheita, ocorreram precipitações bem distribuídas. O total precipitado foi 159,2 mm. Porém, a aplicação de lâminas 50% inferior e 50% superior à lâmina requerida pela cultura durante a terceira fase fenológica, a mais sensível a déficit hídrico, e os baixos índices pluviométricos observados durante a terceira fase fenológica afetaram significativamente, a 5%, a produtividade entre os tratamentos.

No Quadro 17 está apresentado o resultado do teste F para os contrastes de produtividade entre os tratamentos CUC alto e baixo.

Quadro 17 – Teste F para os contrastes de produtividade entre os tratamentos CUC alto e baixo

FV	GL	Quadrado médio
		P
L2A vs L2B	1	354.827,21 ns
L1A vs L1B	1	181.385,49 ns
L3A vs L3B	1	67.296,66 ns
Resíduo	10	120.065,80
* F significativo a 5% de probabilidade. ns F não-significativo a 5% de probabilidade.		

Verifica-se no Quadro 17 que o teste F para o contraste entre os tratamentos de alta e baixa uniformidade de distribuição de água não foi significativo a 5% de probabilidade. Para todos os tratamentos, as diferenças de uniformidade não promoveram diferenças significativas na produtividade. É importante ressaltar que foram realizadas somente cinco irrigações e que as precipitações observadas durante o ciclo da cultura foram bem distribuídas e totalizaram 246 mm.

As lâminas de água coletadas em cada coletor e as produtividades da cultura do feijão, para os tratamentos L1A e L1B; L2A e L2B; e L3a e L3B, estão apresentadas nas Figuras 28, 29 e 30, respectivamente.

Observa-se nas Figuras 28, 29 e 30 grande dificuldade em relacionar a lâmina coletada com a produtividade. Estas dificuldades também foram encontradas por FREITAS (2000) e MATEOS et al. (1997). É importante ressaltar que este resultado foi influenciado pelas chuvas ocorridas durante a fase inicial e final do ciclo da cultura. Para os tratamentos com baixa uniformidade de distribuição de água (L1B, L2B e L3B), as relações lâminas coletadas e produtividade apresentaram-se mais adequadas.

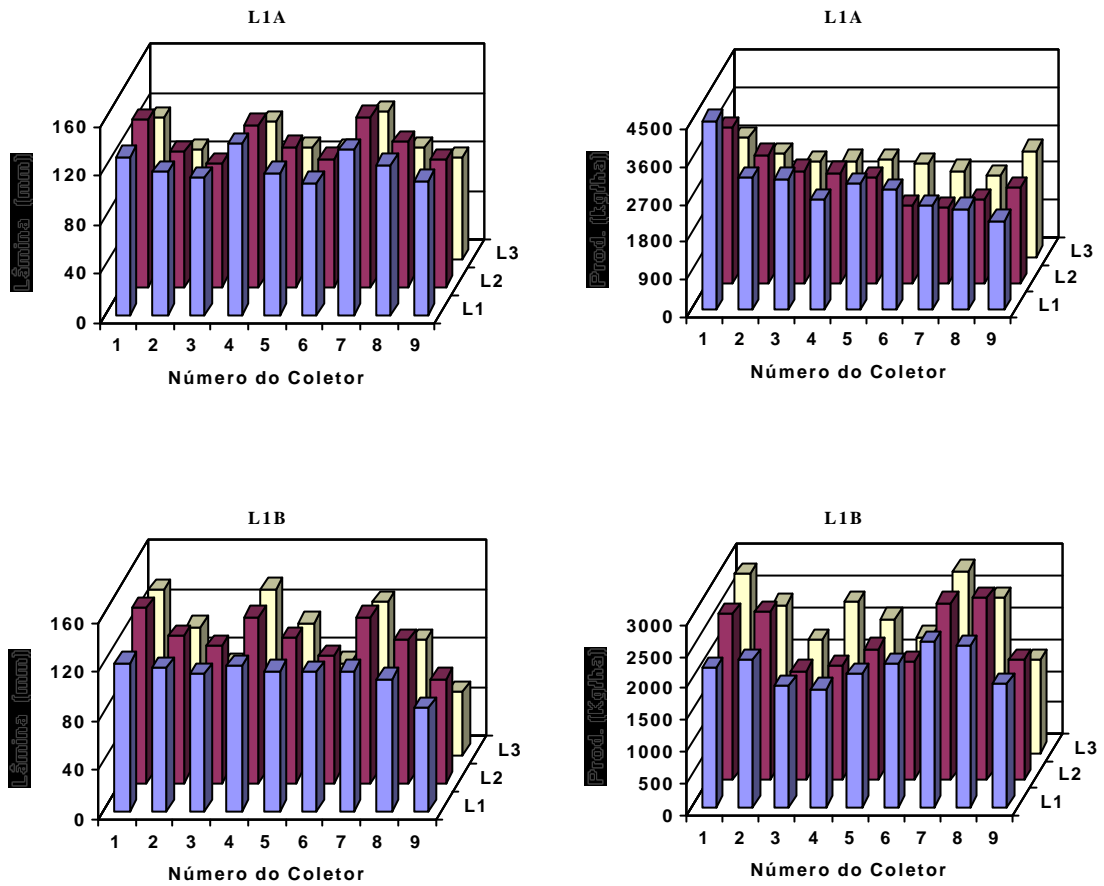


Figura 28 – Lâminas de água coletadas e produtividade da cultura do feijão, para os tratamentos L1A e L1B.

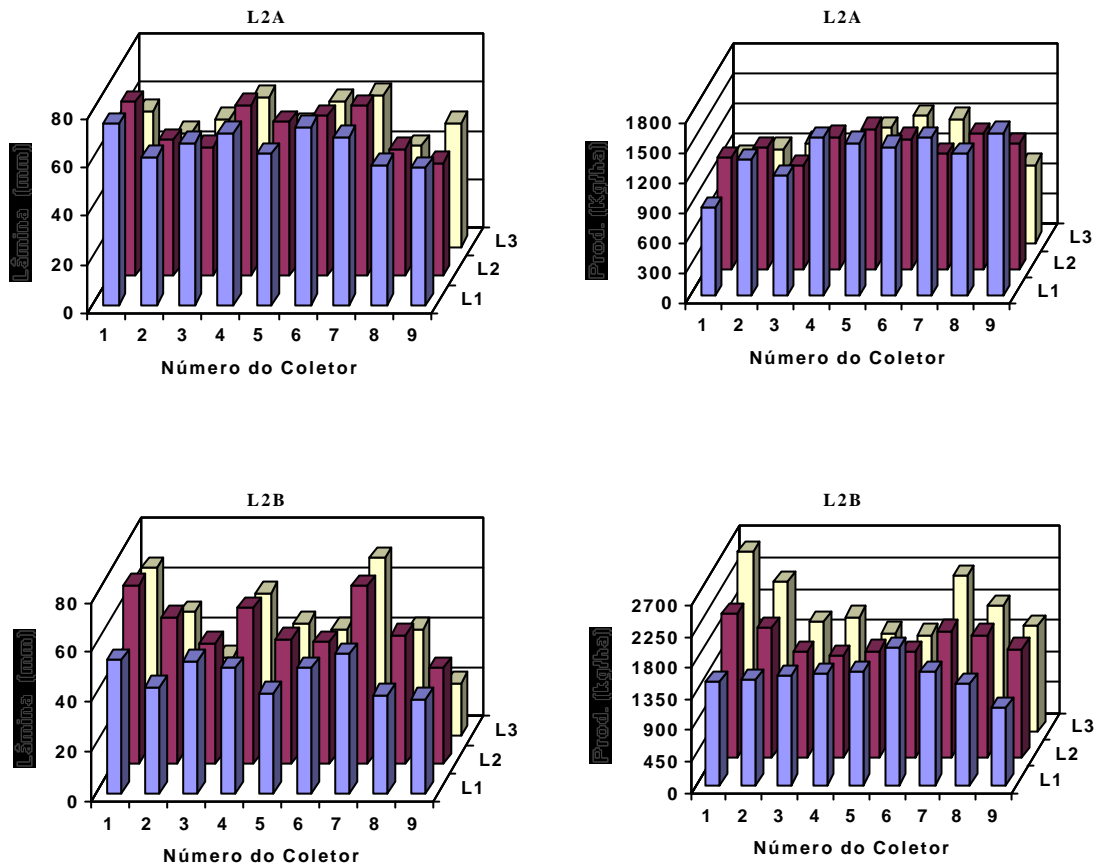


Figura 29 – Lâminas de água coletadas e produtividade da cultura do feijão, para os tratamentos L2A e L2B.

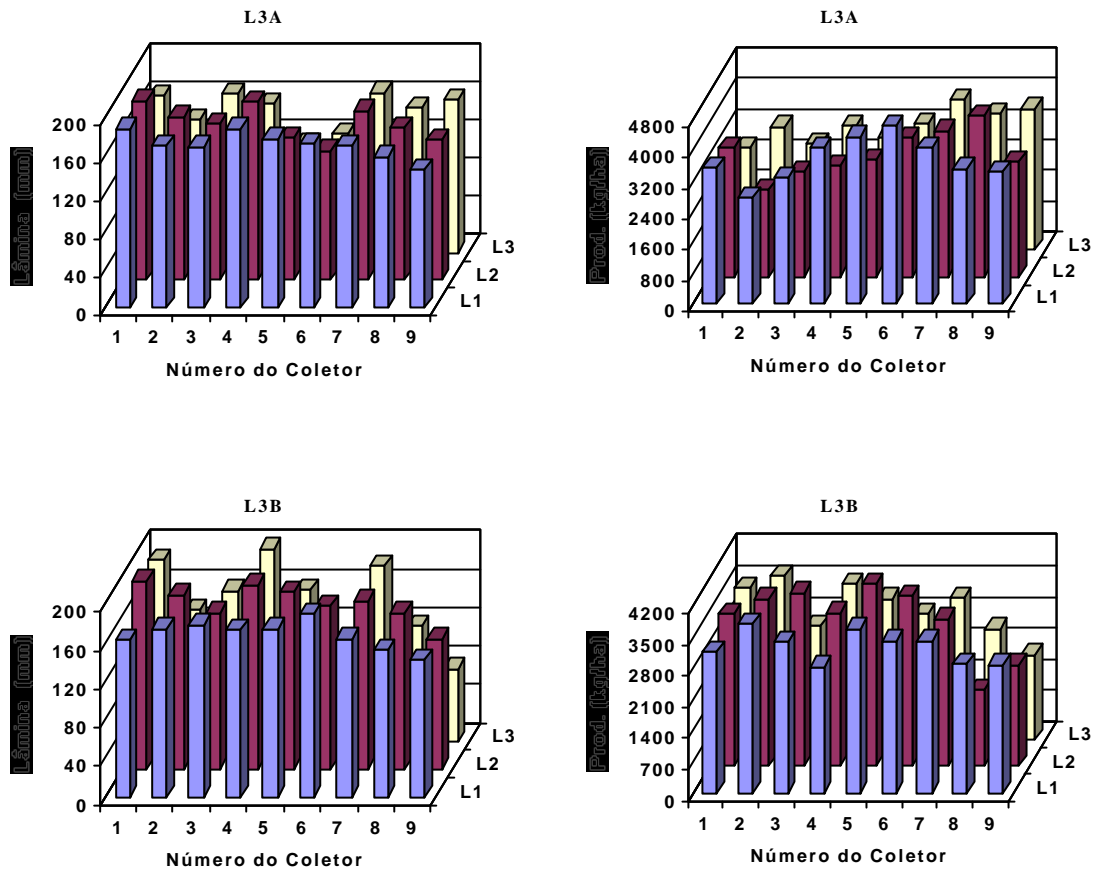


Figura 30 – Lâminas de água coletadas e produtividade da cultura do feijão, para os tratamentos L3A e L3B.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da uniformidade de distribuição de água e de três lâminas de irrigação nos componentes de produção da cultura do feijão, utilizando um sistema de aspersão convencional, no período de inverno.

Para verificar a influência da uniformidade de distribuição de água e da lâmina de irrigação na produtividade do feijoeiro irrigado, instalou-se na Estação Experimental de Coimbra, do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, localizada no município de Coimbra - MG, latitude de 20° 51`S e longitude de 42° 47`W e altitude de 720 m, um experimento com delineamento estatístico em blocos ao acaso, durante o período de julho a dezembro de 2000.

Os tratamentos constaram de três lâminas de irrigação e dois níveis de uniformidade de distribuição de água, representados pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), e foram denominados: L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B. Nos tratamentos L1A e L1B foi aplicada uma lâmina de água suficiente para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, com uniformidade de distribuição (CUC) maior e menor que 80%, respectivamente. Nos tratamentos L2A e L3A, as lâminas aplicadas foram, respectivamente, 50% e 150% da lâmina aplicada no tratamento L1A, com uniformidade de distribuição (CUC) maior que 80%. Nos tratamentos L2B e L3B, as lâminas

aplicadas foram, respectivamente, 50% e 150% da lâmina aplicada no tratamento L1A, com uniformidade de distribuição (CUC) menor que 80%.

A partir dos resultados obtidos, e com base nas condições em que foi realizado o presente trabalho, pode-se concluir que:

- O modelo experimental utilizado foi capaz de proporcionar valores de uniformidade altos e baixos, em todas as irrigações realizadas.
- Não existiram diferenças significativas, a 5% de probabilidade, no número de folhas e na área foliar, entre os seis tratamentos utilizados, em função das chuvas ocorridas até a data da amostragem.
- Não existiram diferenças significativas, a 5% de probabilidade, na matéria seca, entre os seis tratamentos utilizados. O teste F para o contraste entre os tratamentos de alta e baixa uniformidade com 50% de reposição da lâmina requerida pela cultura foi significativo a 5% de probabilidade.
- Observou-se diferenças significativas, a 5% de probabilidade entre os tratamentos com 150, 100 e 50% de reposição da lâmina requerida pela cultura, do número de vagens por planta. O teste F para o contraste entre os tratamentos de alta e baixa uniformidade com 50% de reposição da lâmina requerida pela cultura foi significativo a 5% de probabilidade.
- Os resultados de produtividade obtidos nos tratamentos de alta e baixa uniformidade com 150% de reposição da lâmina requerida pela cultura e no tratamento de alta uniformidade com 100% de reposição, foram semelhantes entre si e superiores aos demais.
- O teste F para o contraste entre os tratamentos de alta e baixa uniformidade de distribuição de água não foi significativo a 5% de probabilidade. Para todos os tratamentos, as diferenças de uniformidade não promoveram diferenças significativas na produtividade. É importante ressaltar que foram realizadas somente cinco irrigações e que as precipitações observadas durante o ciclo da cultura foram bem distribuídas e totalizaram 246 mm.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO FEIJÃO EM FUNÇÃO DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO E DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

1. INTRODUÇÃO

Vários fatores referentes ao solo, à planta e à atmosfera interagem entre si, determinando a produtividade das culturas agrícolas. Certamente existe uma relação funcional entre esses fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental (FRIZZONE, 1998).

O termo função de produção se aplica genericamente a qualquer relação que caracteriza a resposta da cultura a um determinado fator, como água, fertilizante e energia. Genericamente, as funções de produção em relação à água analisam a produção total de matéria seca ou matéria comercial das culturas em relação à transpiração, evapotranspiração ou quantidade de água aplicada pela irrigação. O conhecimento dessas relações é necessário para avaliação de estratégias de irrigação (MANTOVANI, 1993).

As funções de produção água-cultura são particularmente importantes para as análises de produção agrícola, quando a água é escassa. Para o processo de planejamento, essas funções constituem o elemento básico de decisão dos planos de desenvolvimento e, em relação à operação de projetos de irrigação, permitem tomar decisões sobre planos ótimos de cultivo e

ocupação de área para produção econômica com base na água disponível (FRIZZONE, 1998).

Uma ferramenta importante no estudo das funções de produção são os modelos de simulação de crescimento das culturas, que integram submodelos dos distintos processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, para previsão de crescimento, desenvolvimento e produção das culturas. Os modelos são dinâmicos e funcionais, uma vez que descrevem mudanças periódicas (normalmente diárias) nas variáveis da cultura e consideram, embora de forma simplificada, os principais processos morfológicos que ocorrem na cultura (GEDANKEN, 1998).

Segundo JONES e RITCHE (1990), os usuários de modelos podem realizar a simulação de cenários em computador para estimar o que poderia acontecer em várias situações. Pode-se modificar a estratégia de irrigação para prever mudanças no rendimento e outras variáveis, como evapotranspiração e requerimento de água nas culturas, sendo possível também combinar os resultados do modelo com fatores econômicos, para comparações de segurança e riscos associados a cada estratégia.

Apesar da complexidade envolvida na construção de modelos, os esforços são compensados em função de sua grande aplicabilidade, que auxilia o agricultor na tomada de decisão, permitindo uma organização racional de questões que envolvem distribuição, armazenamento, comercialização do produto agrícola, entre outras (GEDANKEN, 1998).

Os modelos de simulação apresentam potencial de uso para responder questões em pesquisa, manejo de culturas e planejamento, auxiliando no entendimento sobre as interações genéticas, fisiológicas e do ambiente, como também nas decisões de práticas culturais antes e durante o período da cultura no campo, como aplicações de fertilizantes e irrigação (Boote et al., 1996, citados por FREITAS, 2000).

Do ponto de vista do manejo da irrigação, é mais interessante o estudo da relação entre o rendimento e a água aplicada. Apesar dos grandes avanços realizados no desenvolvimento e na fabricação de sistemas de irrigação, estes se caracterizam, por um certo grau de desuniformidade de distribuição de água, associados ao próprio sistema, ao seu manejo e à interação com o meio

ambiente. A maioria dos modelos existentes que relacionam produção e lâmina de irrigação (HOWELL, 1990; VAUX e PRUITT, 1983) não considera a uniformidade de distribuição de água (MANTOVANI, 1993).

MANTOVANI (1993) desenvolveu um modelo de função de produção, denominado Combinado, que além de considerar a água aplicada leva em conta a influência da uniformidade de aplicação de água na produção.

O presente trabalho teve como objetivos:

- Desenvolver um coeficiente de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como um modelo normal, a ser utilizado no modelo de simulação da produtividade desenvolvido por MANTOVANI (1993).

- Comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos através da simulação, utilizando o modelo desenvolvido por MANTOVANI (1993) com os coeficientes de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como uniforme e normal, nas condições do experimento realizado em campo, ou seja, com três lâminas de irrigação e dois níveis de uniformidade de distribuição de água.

- Desenvolver as funções de produção para a cultura do feijão, utilizando o modelo desenvolvido por MANTOVANI (1993) com os coeficientes de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como uniforme e normal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Função de produção

Segundo FRIZZONE (1998), o termo função de produção pode ser definido como uma relação física entre as quantidades utilizadas de certo conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que se pode obter do produto, para uma dada tecnologia conhecida, e pode ser representado por uma função matemática contínua com derivadas de primeira e segunda ordem.

2.1.1. Função de produção água-cultura

Considerando o grande número de variáveis que influenciam a produtividade das culturas agrícolas e a complexidade das relações que afetam a quantidade e qualidade do produto, a produtividade pode ser expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, contanto que os demais fatores da produção permaneçam fixos, em nível ótimo (FRIZZONE, 1998).

As variáveis da função de produção água-cultura podem ser expressas de diferentes maneiras. A variável independente água pode ser representada pela transpiração, pela evapotranspiração, pela lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura, pelo estado da água no solo etc. É mais interessante que o usuário utilize a lâmina de água aplicada à parcela como variável

independente. Em geral, a variável dependente refere-se à produtividade agrícola comercial: grãos, frutos, matéria verde, matéria seca total e outros (FRIZZONE, 1998).

Segundo FRIZZONE (1998), as aplicações das funções de produção água-cultura são freqüentemente criticadas por serem empíricas, específicas de um local e incompletas, omitindo efeitos de muitos outros fatores e suas interações com a água. Porém, segundo VAUX e PRUITT (1983) e HOWELL et al. (1992), as funções de produção são necessárias para prever, sob condições dadas de clima, cultivo e operação, as produtividades físicas marginais da água a serem utilizadas nas análises econômicas.

FRIZZONE e OLITTA (1990), afirmaram que, para muitas culturas, o estágio de desenvolvimento no qual ocorre deficiência hídrica e a interdependência entre a resposta da cultura e o déficit aplicado em diferentes estádios de desenvolvimento são aspectos importantes na determinação da relação funcional entre produtividade e uso de água.

BERNARDO (1996) relatou que na obtenção dos dados de campo para se ajustar uma função de produção deve-se trabalhar com um mínimo de seis lâminas distintas, distribuídas uniformemente ao longo do ciclo da cultura, ou distribuídas por fase ou estágio da cultura. Ainda segundo o autor, quando se utiliza lâmina total por ciclo não é possível a otimização da lâmina aplicada por fase ou estágio da cultura, sendo muitas vezes mais interessante utilizar lâmina por estágio da cultura.

Segundo FRIZZONE (1998), alguns modelos de função de produção água-cultura se baseiam em aproximações fisiológicas, porém a maioria deles é empírica ou semi-empírica, não relacionando as condições do solo, da planta e do clima com os aspectos fisiológicos das plantas.

MANTOVANI (1993) afirmou que o principal inconveniente dos modelos de função de produção de natureza empírica reside na sua intransferibilidade para condições distintas daquelas em que foram ajustados.

Segundo VAUX e PRUITT (1983), o tipo de formulação necessita ser justificado em termos fisiológicos e econômicos. No entanto, as aproximações fisiológicas são complexas, pois a resposta das plantas é o resultado da

interação de muitos processos que podem ser afetados diferentemente pela deficiência hídrica na planta.

GEDANKEN (1998) relatou que apesar das vantagens dos modelos mecanísticos, isto é, modelos que consideram os mecanismos envolvidos na descrição do processo, em relação aos empíricos, que apenas descrevem os dados observados, a complexidade dos diversos fenômenos biológicos envolvidos faz com que os modelos apresentem a combinação de ambos, sendo esta amplamente utilizada nos modelos existentes.

HOWELL et al. (1992) afirmaram que os modelos de crescimento das culturas podem ser utilizados no desenvolvimento de funções de produção, entretanto os autores consideram que as suposições básicas de tais modelos podem limitar mais as aplicações que as formulações simples e empíricas.

Segundo FRIZZONE (1998), as primeiras pesquisas sobre a relação água-produção apresentam estimativas da produção de matéria seca em função da transpiração. Contudo, segundo HANKS e RASMUSSEN (1982), existe dificuldade para estimar a transpiração a partir da evapotranspiração total, porém como a evapotranspiração é o processo que pode ser mais facilmente medido em campo, muitas aproximações foram desenvolvidas com base na relação produção-evapotranspiração.

2.1.2. Modelagem das funções de produção água-cultura

2.1.2.1. Função de produção transpiração-cultura

De Wit (1958), citado por FRIZZONE (1998), encontrou uma relação linear entre a produção de matéria seca e a razão transpiração/evaporação medida em uma superfície de água livre, para regiões áridas e semi-áridas, que é expressa pela seguinte equação:

$$MS = m \left[1 - \frac{T}{E_o} \right] \quad (1)$$

em que

MS= matéria seca total acumulada, em kg/vaso;

T= transpiração total, em kg/vaso;

E_o = evaporação medida em uma superfície de água livre, em mm/dia; e
 M = coeficiente de proporcionalidade (mm/dia).

O coeficiente de proporcionalidade depende da disponibilidade de água do solo e, principalmente, da espécie e variedade cultivada. O autor concluiu também que esta relação, válida para plantas cultivadas em vasos, pode ser aplicada em culturas a campo, desde que os valores de M sejam reduzidos em aproximadamente 10%. Para regiões de clima temperado, o autor encontrou que, sob condições não-limitantes de água, a relação T/E_o não varia consideravelmente.

Arkley (1963), citado por FRIZZONE (1998), considerando que a produção das culturas e a transpiração são afetadas pela advecção, modificou a relação proposta por De Wit. Analisando os mesmos dados, introduziu um fator de correção climático para substituir a evaporação da água medida em uma superfície livre, com base na umidade relativa média mensal. O autor também investigou a relação entre produção de matéria seca, transpiração e déficit de pressão de vapor, o que permitiu combinar os resultados de produção e transpiração das regiões úmidas e áridas. A relação proposta é expressa pela seguinte equação:

$$MS = \frac{KT}{(100 - UR)} = 0,01KT \left(\frac{e_o}{e_o - e_a} \right) \quad (2)$$

em que

MS = matéria seca total acumulada, em kg/vaso;

T = transpiração total, em kg/vaso;

UR = umidade relativa média diária, em %;

K = constante empírica, em %;

e_o = pressão de saturação do vapor de água à temperatura média do ar;

e_a = pressão parcial atual de vapor de água na atmosfera.

HANKS (1974), utilizou a equação de De Wit e desenvolveu um modelo que relaciona transpiração relativa e produtividade relativa de matéria seca. MANTOVANI (1993) relatou que o modelo foi desenvolvido a partir de

informações de frequência e lâmina de irrigação, chuva e conteúdo inicial de umidade no solo, sendo avaliado para milho e sorgo, simulando adequadamente os valores encontrados em campo. Ainda segundo o autor, o modelo apresenta problemas relacionados com a sensibilidade em função do conteúdo de água no solo e não considera a uniformidade de distribuição de água. A relação proposta é expressa pela seguinte equação:

$$\frac{MS}{MS_m} = \frac{T}{T_m} \quad (3)$$

em que

MS= matéria seca quando a transpiração acumulada é T;

MS_m= matéria seca quando a transpiração acumulada é máxima;

T= transpiração total; e

T_m= transpiração máxima, que ocorre quando não há restrição no desenvolvimento da planta.

FRIZZONE (1998) afirmou que a utilização do valor relativo T/T_m, no lugar de valores absolutos de T, facilita a generalização dos modelos de função de produção, permitindo um certo grau de sua transferibilidade.

2.1.2.2. Função de produção evapotranspiração-cultura

Segundo FRIZZONE (1998), muitas pesquisas sustentam a hipótese de relação linear entre produtividade comercial com evapotranspiração (HOWELL e HILER, 1975; STEWART et al., 1977; HOWELL, 1990a; VAUX e PRUITT, 1983). Segundo os autores, quando a evapotranspiração real é menor do que a evapotranspiração máxima, ocorre redução na produtividade da cultura. Porém, MANTOVANI (1993) afirmou que a relação T/T_m é melhor que ET/ET_m como indicador das respostas relacionadas à fotossíntese e transpiração, pois a transpiração relativa é um claro indicador das quantidades relativas de trocas gasosas que ocorrem na superfície das folhas, através dos estômatos.

MANTOVANI (1993) citou que para culturas de crescimento indeterminado as funções de produção que relacionam evapotranspiração com rendimento não são lineares, e estão associadas em uma diminuição do índice de colheita quando a evapotranspiração se aproxima da máxima.

FRIZZONE (1998) afirmou que a utilização do valor relativo ET/ET_m , no lugar de valores absolutos de ET, novamente facilita a generalização dos modelos de função de produção, permitindo um certo grau de sua transferibilidade.

Para TARJUELO e JUAN (1999), as funções de produção evapotranspiração–cultura assumem que os nutrientes necessários ao pleno desenvolvimento da cultura são fornecidos adequadamente.

LI (1998), apresentou um modelo que relaciona a produção ao déficit de evapotranspiração a partir de uma função de produção. As simulações realizadas mostraram que a quantidade ótima de irrigação depende da uniformidade de irrigação e dos fatores econômicos, decrescendo com a uniformidade, mas aumentado com a razão do preço do produto e da água.

STEWART et al. (1977), mencionaram sobre vários estudos que mostram a relação linear entre redução do rendimento das culturas e déficit estacional de evapotranspiração. Segundo o autores, o coeficiente angular (β) é uma medida da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, diferindo muito entre culturas e também entre variedades. Embora a relação linear tenha representado bem a redução do rendimento relativo em função do déficit de evapotranspiração relativa, os autores destacaram a necessidade de cuidados na extrapolação dos resultados.

Com base nessas evidências experimentais, STEWART et al. (1977) apresentaram o seguinte modelo geral para funções de produção:

$$1 - \frac{Y}{Y_m} = \beta \left(1 - \frac{ET}{ET_m} \right) \quad (4)$$

em que

Y= rendimento atual;

Y_m = rendimento máximo;

β = coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico;

ET = evapotranspiração total; e

ET_m: evapotranspiração máxima, que ocorre quando não há restrição no desenvolvimento da planta.

Segundo HANKS (1983), o problema de uso do modelo proposto por STEWART et al. (1977) deve-se à necessidade de determinar o valor de β em experimentos de campo.

HANKS e RAMUSSEN (1982) desenvolveram uma relação semelhante à proposta por STEWART et al. (1977):

$$\frac{MS}{MS_m} = \left[1 - \beta^* \left(1 - \frac{ET}{ET_m} \right) \right] \quad (5)$$

em que

MS = matéria seca quando a transpiração acumulada é T;

MS_m = matéria seca quando a transpiração acumulada é máxima;

β^* = fator de proporcionalidade;

ET = evapotranspiração total; e

ET_m = evapotranspiração máxima, que ocorre quando não há restrição no desenvolvimento da planta.

DOORENBOS e KASSAN (1979) utilizaram o modelo de STEWART et al. (1977) para desenvolver um método para estabelecer a relação entre água e rendimento das culturas. Propuseram que o cálculo de rendimento máximo fosse realizado pela aproximação de De Wit modificada com alguns fatores de correção, e o cálculo da evapotranspiração total e máxima pelos métodos apresentados por DOORENBOS e PRUITT (1977). Os autores consideraram que um déficit hídrico de certa magnitude pode ocorrer tanto de forma contínua durante todo o período de crescimento da cultura como durante qualquer uma das fases específicas do crescimento. Geralmente, as culturas são mais sensíveis ao déficit hídrico durante a emergência, a floração e na fase inicial de formação da colheita do que durante o período vegetativo, após o estabelecimento, e a maturação. Tal fato implica que a programação do

momento de aplicação de água é tão importante quanto o nível de suprimento de água durante o período total de crescimento. Portanto, o planejamento do suprimento estacional deve considerar o fornecimento ótimo de água à cultura durante as fases do ciclo fenológico (FRIZZONE, 1998).

As relações apresentadas pela metodologia proposta por DOORENBOS e KASSAN (1979) referem-se a variedades altamente produtivas, bem adaptadas ao ambiente de crescimento, desenvolvendo-se em grandes áreas onde as práticas agrônômicas e o manejo de irrigação são realizados sob condições ótimas, incluindo o fornecimento adequado de insumos, com exceção da água (FRIZZONE, 1998).

Os valores do coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico foram determinados, supondo-se que a relação entre o rendimento relativo e a evapotranspiração relativa é linear e válida para déficits hídricos até 50% (DOORENBOS e KASSAN, 1979).

Segundo FRIZZONE (1998), os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento das culturas dependem da espécie cultivada e do estágio fenológico em que ocorre, existindo ainda estádios mais sensíveis ao déficit que outros. Ainda segundo o autor, a literatura trata com frequência de culturas que respondem negativamente ao déficit hídrico em determinado estágio fenológico, ou seja, culturas cujo rendimento é fortemente reduzido quando ocorre déficit hídrico em estádios específicos. Por exemplo, o milho é mais sensível durante a floração do que durante o enchimento de grãos. Contudo, DENMEAD e SHAW (1962) já observaram que a sensibilidade do milho ao déficit hídrico durante a floração pode ser menor caso tenha ocorrido déficit anterior a este estágio, evidenciando a possível interação entre os déficits hídricos ocorridos em diferentes estádios fenológicos. Entretanto, para algumas culturas, existem evidências de que o déficit hídrico durante um determinado estágio pode aumentar o rendimento ou a qualidade do produto colhido. DOORENBOS e KASSAN (1979), citaram o algodão, a soja, o abacaxi e a cana-de-açúcar como exemplos dessas culturas.

Downey (1972), citado por FRIZZONE (1998) sugeriu a inexistência de períodos sensíveis ao déficit hídrico para espécies vegetais com hábito de crescimento indeterminado, cultivadas para produção de massa seca como

alfafa e outras culturas forrageiras. Estas culturas podem tolerar situações de deficiência hídrica repetidas, reduzindo a taxa de crescimento com conseqüente diminuição no rendimento, proporcional ao déficit hídrico medido pela relação ET/ET_m . Neste caso, o autor sugere a independência entre os efeitos dos déficits hídricos ocorridos em diferentes estádios fenológicos.

Segundo FRIZZONE (1998), para os casos em que o efeito do déficit entre estádios é independente, propõe-se que os modelos aditivos de função de produção sejam mais apropriados, e quando existe dependência entre efeitos dos déficits hídricos ocorridos em diferentes estádios fenológicos, são mais indicados os modelos multiplicativos. A seguir estão apresentados alguns modelos aditivos (HOWELL e HILER, 1975 (6); SUDAR et al., 1981 (7)) e alguns modelos multiplicativos (JENSEN, 1968 (8); MINHAS et al., 1974 (9); RAO et al., 1988 (10)).

$$\frac{Y}{Y_m} = \frac{\sum_{i=1}^n (ET)_i}{\sum_{i=1}^n (ET_m)_i} \quad (6)$$

$$\frac{Y}{Y_m} = Y_m \sum_{i=1}^n Y_{s_i} \left(1 - \frac{ET}{ET_m} \right)_i \quad (7)$$

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET}{ET_m} \right)_i^2 \quad (8)$$

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left[1 - \left(1 - \frac{ET}{ET_m} \right)_i^2 \right]^{b_i} \quad (9)$$

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left[1 - K_{y_i} \left(1 - \frac{ET}{ET_m} \right)_i \right] \quad (10)$$

2.1.2.3. Função de produção água aplicada-cultura

FRIZZONE (1998), afirmou que os estudos relativos às funções de produção que relacionam lâmina líquida ou total de irrigação com rendimento limitam-se a aplicar um tipo de curva, selecionada através de análise de regressão, aos dados obtidos em experimentos de campo. Ainda segundo o autor, a adoção de tais aproximações empíricas, mesmo que oferecendo escassa possibilidade de explicar a natureza das relações que regulam o processo, justifica-se pela necessidade de encontrar indicadores de caráter agroeconômico, sem necessidade de recorrer a modelos complexos, de difícil operacionalidade.

STEWART e HAGAN (1973) afirmam que, embora a evapotranspiração seja o parâmetro hídrico associado mais diretamente ao rendimento das culturas, a quantidade de água aplicada por irrigação é a variável independente que mais interessa aos engenheiros, aos irrigantes e aos economistas. O conhecimento da natureza da relação entre rendimentos e água aplicada, permite estabelecer o consumo ótimo econômico de água durante o ciclo da cultura.

Segundo FRIZZONE (1998), a natureza da relação água aplicada-rendimento está determinada não só pela espécie vegetal, como também pela variedade, pela idade da planta e pelas condições ambientais, edáficas e culturais. O autor afirma que com base em experimentos de campo, repetidos por vários anos, em que se fixam todas as outras variáveis, obtêm-se funções que representam rendimentos médios em função da quantidade estacional de água aplicada.

Hexem e Heady (1978), citados por FRIZZONE (1998), apresentaram uma revisão sobre teoria econômica aplicada às funções de produção água-rendimento e técnicas estatísticas comumente utilizadas para estimá-las. Estes autores concluíram que as funções polinomiais são mais adequadas para expressar analiticamente as relações entre água aplicada e rendimento.

MANTOVANI (1993), citando Stewart e Hagan (1973), relatou que, ao contrário da relação entre rendimento e evapotranspiração, a relação entre rendimento e água aplicada não é linear, uma vez que uma parte da água

aplicada não é utilizada pela cultura. O autor citou ainda que a forma dessa função depende, portanto, da uniformidade de distribuição de água de irrigação.

Segundo HARGREAVES e SAMANI (1984), a relação água aplicada-rendimento pode ser considerada linear até aproximadamente 50% da quantidade de água que proporciona rendimento máximo. Para valores maiores, os acréscimos na produção são progressivamente menores, refletindo as várias perdas de água que ocorrem próximas da condição de máximo rendimento.

STEGMAN et al. (1980), afirmaram que a curva rendimento em função da água aplicada está próxima da reta rendimento em função da evapotranspiração, para pequenas lâminas de irrigação, mas se afasta progressivamente para maiores lâminas de irrigação. A redução do rendimento por excesso de água está associada à falta de aeração no solo, à lixiviação de nutrientes e às doenças que se desenvolvem em solo úmido.

Em decorrência, SOLOMON (1985), sugeriu que um polinômio do segundo grau, devido à simetria, não deve ser o modelo mais adequado. Possivelmente, uma função raiz quadrada, como utilizou algumas vezes HEXEM e HEADY (1978), possa representar melhor o processo.

TARJUELO e JUAN (1999), afirmaram que existem evidências de que a função de produção água aplicada é de forma convexa, em contraste com a forma linear de produção em função de evapotranspiração. As formas lineares e convexas coincidem até certo ponto, e posteriormente divergem com o aumento da quantidade de água aplicada. A diferença entre as duas curvas é a água não utilizada para evapotranspiração. A relação entre matéria seca ou produção e lâminas de irrigação depende principalmente da função de evapotranspiração, da salinidade proveniente da água de irrigação, da irrigação e da uniformidade de irrigação.

SEGINER (1978), desenvolveu um modelo que possibilitou gerar um diagrama que relaciona a produção com a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por aspersão e o preço da água. Este diagrama permite a determinação da lâmina ótima de água e o retorno econômico esperado. Apresenta como inconveniente o fato de sua aplicação requerer o

conhecimento de uma função de produção específica para cada cultivo e ambiente.

Stern e Bresler (1983), citado por MANTOVANI (1993), estudaram a influência da uniformidade de distribuição de água na variação do conteúdo de água no solo e na produção de milho. Trabalharam com duas parcelas experimentais, diferentes na textura e característica hidráulicas. Os autores utilizaram funções de autocorrelação para avaliar o efeito conjunto entre a lâmina aplicada e a sua redistribuição no solo. O trabalho apresenta uma relação entre o rendimento relativo e as lâminas de água aplicada, uniformidade de irrigação e um fator empírico derivado da diferença das características hidráulicas dos dolos avaliados.

FEINERMAN et al. (1983), apresentaram uma análise geral dos aspectos econômicos da uniformidade de irrigação na produção, determinando a aplicação ótima de água para uma determinada função de produção.

Segundo MANTOVANI (1993) a maioria dos modelos que incluem uniformidade de distribuição de água normalmente apresenta um requerimento de dados de entrada que dificultam a sua utilização em nível de fazenda.

MANTOVANI et al. (1993), desenvolveram um modelo de função de produção, apresentado na equação 11, que considera a influência da uniformidade de aplicação de água na produção. Esses autores observaram que a lâmina d'água necessária para obter a produtividade máxima aumenta com a redução da uniformidade de aplicação, e que, dado um coeficiente de uniformidade, o nível ótimo de irrigação depende da relação entre o preço do produto e o da água.

$$Y = Y_{Max} [1 - \beta C_D (1-p)] \quad (11)$$

em que

Y = produção real, em kg ha^{-1} ;

Y_m = produtividade máxima, em kg ha^{-1} ;

β = coeficiente empírico, que representa a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, adimensional;

p = fração da evapotranspiração máxima que provém de outras fontes além da irrigação, adimensional; e

C_D = coeficiente de déficit, adimensional.

A determinação do C_d depende do modelo de distribuição adotado, sendo comumente utilizadas as distribuições normal e uniforme. Em ambos os casos o C_d é função das lâminas líquida e bruta de irrigação e da uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação.

Para o modelo de distribuição uniforme, MANTOVANI et al. (1993) deduziram a seguinte equação para o coeficiente de déficit:

$$C_D = \left[\frac{\left(1 - 2CUC + \frac{H_R}{H_G} \right)}{(8 - 8CUC)} \right] \left[1 - \left(\frac{H_G}{H_R} \right) (2CUC - 1) \right] \quad (12)$$

em que

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen;

H_G = lâmina bruta aplicada, mm; e

H_R = lâmina requerida pela cultura, mm.

Quando não existem perdas na irrigação, a lâmina máxima aplicada é menor que a requerida, e o valor de C_D é assim calculado:

$$C_D = 1 - \frac{H_G}{H_R} \quad (13)$$

2.1.3. Análise econômica de funções de produção

Segundo FRIZZONE (1998) para definir estratégias ótimas de irrigação, durante muitos anos as pesquisas tentaram relacionar produção das culturas e quantidade de água, guiadas por várias idéias sobre o nível desejável de uso de água. O autor relatou que, conforme VAUX e PRUITT (1983), três conceitos gerais podem ser identificados: estabelecimento do nível de irrigação para se

alcançar o rendimento máximo, ficando implícito que a disponibilidade de água não é fator limitante; máxima eficiência de uso de água, ficando implícito que a disponibilidade de água é fator limitante da produção, e que a quantidade de água a ser utilizada na irrigação seja selecionada no ponto da região econômica de produção onde a produtividade marginal da água for igual a seu preço, ficando implícito que a disponibilidade de terra é fator limitante da produção e que a estratégia ótima de irrigação consiste em maximizar a receita líquida por unidade de área.

HARGREAVES e SAMANI (1984) afirmaram que, quando a terra é fator limitante da produção, a quantidade econômica da irrigação torna-se muito sensível ao preço do produto, sendo inviável para preços baixos. Os autores, também relataram que, quando são feitas irrigações para produção máxima, é mais provável serem obtidas rentabilidades máximas quando a terra é limitante e a água abundante; a cultura é de alto valor econômico e apresenta elevado rendimento; a chuva pouco contribui para suprir as necessidades de água da planta; e os custos da irrigação são baixos.

Segundo Queiroz et al. (1996), citado por FRIZZONE (1998), uma relação entre o preço da água e o preço do produto inferior a 1 é um indicativo da viabilidade econômica da irrigação, e quanto menor for essa relação, menor deverá ser o déficit de água no manejo da irrigação.

2.2. Modelos de simulação do crescimento das culturas

Os estudos de produção de culturas são tradicionalmente conduzidos por meio de experimentos agronômicos de campo, e as funções de produção são derivadas de análises estatísticas, sem o entendimento dos princípios biológicos e físicos envolvidos no processo. Recentemente, as aplicações de conhecimentos com base em sistemas de manejos de culturas têm obtido popularidade em razão da expansão do conhecimento dos processos envolvidos no crescimento de plantas (Jame e Cutforth, 1996, citados por FREITAS, 2000).

Segundo MANTOVANI (1993), os modelos de simulação, uma vez verificados, podem ser utilizados para simular experimentos que avaliem

mudanças na produtividade das culturas associadas a qualquer variável, inclusive irrigação. Ainda segundo o autor, os modelos de simulação são mais exigentes nos dados necessários, porém permitem a transferibilidade dos resultados para outras condições.

Segundo GEDANKEN (1998), os modelos podem evidenciar os benefícios de novas técnicas de manejo sugeridas por pesquisas recentes e, desta forma, estimular a adoção de métodos mais eficientes de produção. Ainda segundo o autor, embora os modelos de simulação tenham grande aplicabilidade e seu custo seja inferior àquele dos experimentos convencionais, eles não podem ser considerados substitutos dos experimentos, e sim uma técnica que os complementa.

Alguns modelos de simulação utilizam coeficientes genéticos como dados de entrada, e estes permitem que os modelos simulem o desempenho de cultivares em diferentes solos, clima e ambientes.

Um dos modelos de simulação mais utilizados no mundo é o modelo CERES (*Crop Environment Resource Synthesis*). O modelo foi desenvolvido pelo *Grassland Soil and Water Research Laboratory* (JONES e KINIRY, 1986) e permite simulações dos principais processos físicos e fisiológicos: fotossíntese, respiração, acumulação e partição de biomassa, fenologia, crescimento foliar, de caules e de raízes, extração de água do solo e evapotranspiração. Os modelos de simulação da família CERES estão agrupados em um Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), no qual se encontram os vários modelos, para as diferentes culturas.

No Brasil, o modelo CERES-Maize foi testado por LIMA (1995), para as condições de Piracicaba – SP. Os dados simulados foram comparados com os obtidos em experimento de campo. Os resultados obtidos mostraram que o modelo estimou satisfatoriamente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho. GEDANKEN (1998) utilizou o modelo para avaliar estratégias de irrigação em duas localidades de Minas Gerais: Sete Lagoas e Janaúba.

O modelo CERES não permite avaliar o efeito da uniformidade de distribuição de água na produtividade das culturas. Pang et al. (1997a), citado por FREITAS (2000), avaliaram as relações entre manejo da irrigação e do nitrogênio na produção da cultura do milho, utilizando o modelo CERES-Maize para várias combinações de lâminas d'água, uniformidade de distribuição de água e quantidade de nitrogênio. Os efeitos da irrigação foram simulados, assumindo o CUC de 100, 90 e 75%. Os resultados foram suavemente afetados para CUC de 90, quando comparado com os de 100. O CUC de 75% causou redução na produção e aumentou a perda de nitrogênio por lixiviação.

2.3. SISDA – Sistema de Suporte à Decisão Agrícola

COSTA e MANTOVANI (1998), em parceria com a Secretaria de Recursos Hídricos/MMA e o Departamento de Engenharia Agrícola/UFV, desenvolveram um programa computacional para auxiliar no manejo da irrigação. O programa, através do cadastramento de todos os fatores que compõem o sistema solo-água-planta-atmosfera, calcula a evapotranspiração e o balanço de água no solo em tempo real, fornecendo recomendações de quanto e quando irrigar.

Para concepção do sistema, COSTA e MANTOVANI (1998) consideraram três aspectos fundamentais: rigor científico, sem perder de vista a praticidade na utilização; um sistema de fácil comunicação e interação com o usuário, tanto do ponto de vista de manusear o programa quanto das informações, dos resultados e dos serviços prestados; e um sistema que considera o gerenciamento integrado dos recursos hídricos, com visão ampla dos aspectos água, solo, clima, planta e sistema de irrigação.

Segundo aqueles autores, o SISDA possui dois objetivos: manejo e simulação. No módulo manejo, o usuário alimenta periodicamente o programa com as informações climáticas, e o sistema calcula a disponibilidade atual de água para cultura, fornecendo relatórios, gráficos e orientações padronizadas e personalizadas. Considerando uma base histórica de dados climáticos disponíveis no programa, o sistema faz a previsão de chuva e orienta o usuário quanto ao momento de irrigar e quanto à lâmina de água a ser aplicada,

diminuindo as chances de perdas de água por aplicações desnecessárias. Na simulação, o usuário define as condições a serem simuladas para uma determinada cultura como época de plantio e localidade. A partir disto, o sistema gera uma base de dados correspondente ao consumo de água, ao déficit hídrico, à probabilidade de doenças e à duração do ciclo da cultura.

2.4. Distribuição de água pelo aspersor

2.4.1. Modelo de distribuição linear

Karmeli et al. (1978), citados por WALKER (1979), desenvolveram um modelo de distribuição linear, tornando possível a caracterização dos padrões de precipitação dos aspersores, da eficiência e outros parâmetros da irrigação. O modelo é baseado na curva de frequência acumulada, relacionando a lâmina infiltrada adimensionalizada (Y) e a fração da área que recebeu a lâmina (X), através de uma função de regressão linear.

$$Y = a.X + b \tag{14}$$

em que

Y = lâmina infiltrada adimensionalizada; e

X = fração da área que recebeu a lâmina;

a, b = coeficientes da regressão linear.

Segundo WALKER (1979), minimizando a soma de quadrados dos desvios dos valores estimados em relação aos observados, é possível ajustar uma reta à curva de frequência.

O autor afirma que a curva de frequência acumulada das lâminas infiltradas geralmente toma a forma de "S", enquanto o padrão de distribuição de água tende para uma distribuição normal. Ainda segundo o autor, o coeficiente de variação tem um valor relativamente pequeno quando o padrão de distribuição é bem uniforme e a maior parte da distribuição está mais ou menos na média. Entretanto, quando o padrão de distribuição tende a ser menos uniforme, o coeficiente de variação aumenta quando os desvios em

relação à média são maiores, e a forma “S” da curva de distribuição se estenderia, comportando-se mais como uma reta.

Para ele o ajuste normal seria mais apropriado para distribuições cujo coeficiente de variação tende a ser menor, entretanto o ajuste linear pode ser utilizado, pois a maior parte da curva de distribuição tenderia a se concentrar ao redor da média, e os erros nos dois extremos da curva de frequência seriam limitados. Para distribuições cujo coeficiente de variação é maior, o ajuste linear se encaixaria melhor para prever o padrão de distribuição global, enquanto erros nos dois extremos da curva de frequência seriam de magnitude menor.

Ainda segundo o autor, do modelo sugerido por KARMELI et al. (1978) pode-se obter um coeficiente de uniformidade de distribuição (UCL). O coeficiente de regressão (b) é uma indicação do desvio ao redor da média. Para WALKER (1979), o desvio médio é 0,25 b.

$$UCL = 1 - 0,25b \quad (15)$$

ou

$$UCL = 0,011 + 0,985CUC \quad (16)$$

em que

UCL = coeficiente de uniformidade proposto por KARMELI et al. (1978);

b = coeficiente de regressão; e

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %.

Segundo WALKER (1979), a utilização do modelo de distribuição linear permite ao irrigante concluir se o manejo adotado está correto ou não, uma vez que é possível identificar, através do gráfico da função linear (Figura1), a fração da área que está com déficit de água e a fração da área que está com percolação profunda.

De acordo com o autor, a análise das várias áreas representadas no gráfico da função linear (Figura 1) de distribuição acumulada permite derivar expressões para várias eficiências, baseadas no perfil de distribuição de água.

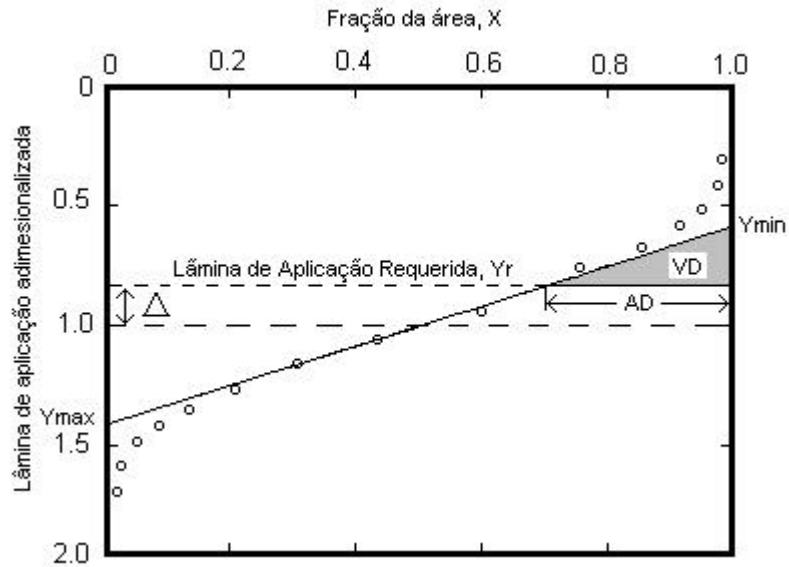


Figura 1 – Gráfico do modelo de distribuição linear.

Partindo da Figura 1, WALKER (1979) mostrou as equações para eficiência de aplicação de água. O autor considerou que b é dado pelas características do sistema e Δ , que representa a diferença entre a lâmina média de aplicação adimensionalizada e a lâmina de água requerida pelas culturas, depende do manejo de irrigação. Para $\Delta=0$, a lâmina média aplicada é igual à lâmina requerida, então em 50% da área ocorrerá percolação da água e nos outros 50%, subirrigação. As relações estão apresentadas a seguir:

$$b = Y_{MAX} - Y_{MIN} \quad (17)$$

$$Y_{MAX} = 1 + 0,5b \quad (18)$$

$$Y_{MIN} = 1 - 0,5b \quad (19)$$

$$A_D = 0,5 - \frac{\Delta}{b} \quad (20)$$

$$V_D = \frac{(0,5b - \Delta)^2}{2b} \quad (21)$$

$$E_a = \frac{\text{água armazenada na zona radicular}}{\text{água aplicada}} = \frac{1 - \Delta - V_D}{1} = 1 - \Delta - \frac{(0,5b - \Delta)^2}{2b} \quad (22)$$

$$E_r = \frac{\text{água armazenada na zona radicular}}{\text{déficit de água na zona radicular}} = \frac{1 - \Delta - V_D}{1 - \Delta} = 1 - \frac{V_D}{1 - \Delta} \quad (23)$$

em que

b = coeficiente angular da regressão linear;

Y_{\max} = máxima lâmina adimensionalizada aplicada;

Y_{\min} = mínima lâmina adimensionalizada aplicada;

A_D = fração da área com déficit de água;

V_D = volume da área com déficit;

Δ = diferença entre a lâmina média adimensionalizada e a lâmina de água requerida pelas culturas;

E_a = eficiência de aplicação; e

E_r = eficiência de necessidade de água.

BARRAGAN (2000), citando Seginer (1978); Solomon e Keller (1978); Karmeli et al. (1978); Wu (1988), afirmou que, quando a uniformidade de um sistema de microirrigação é projetada para um nível de 70% ou quando apresenta um coeficiente de variação de 30% ou menor, a distribuição de água pode ser representada como uma função linear.

2.4.2. Modelo de distribuição normal

WALKER (1979) relatou que a distribuição normal acumulada pode ser utilizada para descrever as eficiências de irrigação e as uniformidades de distribuição de água e para caracterizar os padrões de precipitação dos aspersores. O modelo novamente é baseado na curva de frequência acumulada, relacionando a lâmina infiltrada adimensionalizada (Y) e a fração da área que recebeu a lâmina (X), através de uma função densidade de probabilidade acumulada.

Segundo WALKER (1979), o ajuste normal seria mais apropriado para distribuições cujo coeficiente de variação tende a ser menor.

De acordo com SMESRUD et al (2001), a eficiência de aplicação, o volume de déficit e o déficit médio na área podem ser determinados pela integração da função densidade de probabilidade acumulada para a distribuição normal. Para eles as novas aproximações encontradas pela

integração da função densidade de probabilidade acumulada foram significativamente mais precisas do que as aproximações publicadas por WALKER (1979).

ANYOJI (1994), citando Solomon (1984), Bralts e Kesner (1983), Wu e Gitlin (1983) e Wu (1988), afirmou que para altas uniformidades a distribuição normal pode ser utilizada para descrever os padrões de vazão de um sistema de irrigação localizada, bem como o padrão de precipitação de aspersores.

BARRAGAN (2000), citando Hart e Reynolds (1965), Nakayama et al. (1979), relatou que para altas uniformidades a distribuição de vazão de um emissor de um sistema de microaspersão pode ser considerada uma distribuição normal.

Segundo ANYOJI (1994), quando uma população é normalmente distribuída, com a média e o desvio-padrão representados, por μ e σ , respectivamente, a função densidade de probabilidade da população apresenta o formato representado na a Figura 2. A média da população é μ e os desvios em relação à média valem $\mu \pm \alpha\sigma$, em que α especifica o desvio em termos do desvio-padrão σ . O autor citou que quando a extensão da população está compreendida entre $\mu - 3\sigma$ e $\mu + 3\sigma$, os limites de confiança estarão fixados em 99%.

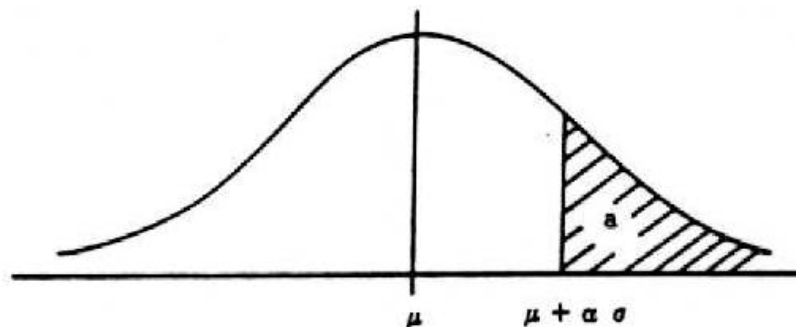


Figura 2 – Função densidade de probabilidade da distribuição normal.

Segundo ANYOJI (1994), com base na distribuição normal, a função densidade de probabilidade acumulada para uma população maior que $\mu + \alpha\sigma$ é expressa por:

$$a = \int_{m+as}^{\infty} f(y) dy \quad (24)$$

$$f(y) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-m}{s}\right)^2} \quad (25)$$

em que

a = função densidade de probabilidade acumulada ou curva de freqüência acumulada para a distribuição normal;

$f(y)$ = função de probabilidade da distribuição normal; e

y = variável de estudo na população.

ANYOJI (1994) afirmou que, quando uma lâmina requerida é especificada como $\mu + \alpha\sigma$, quatro áreas podem ser definidas (A, B, C e D) na curva de freqüência acumulada para a distribuição normal (Figura 3). Essas quatro áreas representam a quantidade total de água aplicada na área, com base em suas proporções relativas. A quantidade de água armazenada na zona radicular é representada por A+C; a água percolada é representada por B; e o déficit de água no solo é representado por D. A integração dessas áreas permite descrever as eficiências de irrigação. Por meio da integração dessas áreas, o autor deduziu uma equação para a eficiência de aplicação em função da vazão do emissor.

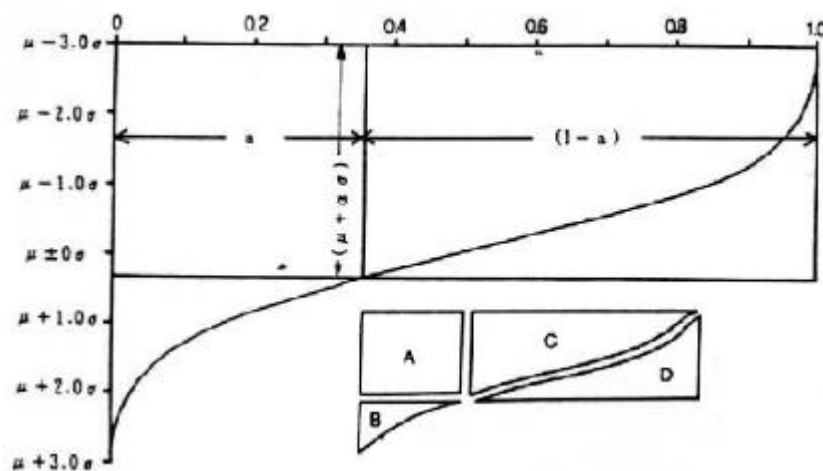


Figura 3 – Densidade de probabilidade acumulada da distribuição normal.

Segundo WALKER (1979), a análise das várias áreas representadas no gráfico da função densidade de probabilidade acumulada da distribuição normal (Figura 4) permite derivar expressões para várias eficiências, com base no perfil de distribuição de água.

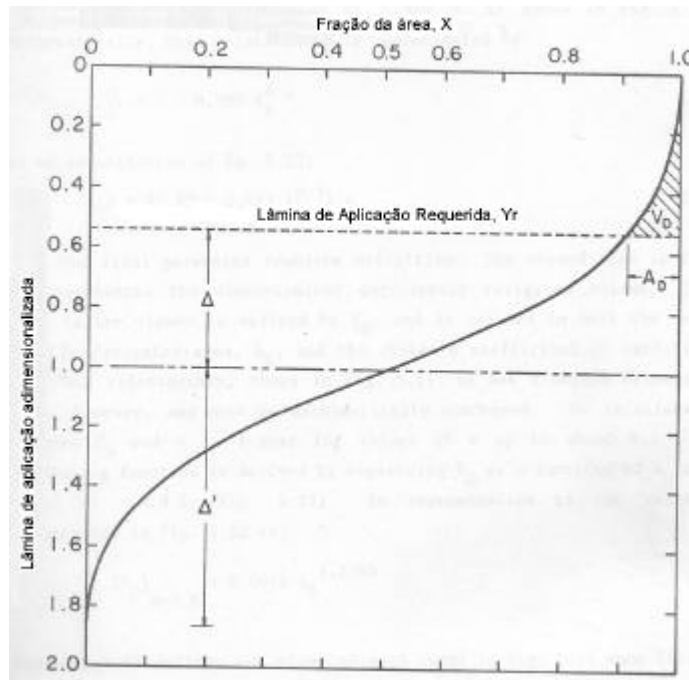


Figura 4 – Gráfico do modelo de distribuição normal.

Partindo da Figura 4, WALKER (1979), mostrou as equações para eficiência de aplicação de água. O autor afirmou que é necessário adimensionalizar os valores de precipitação dos aspersores, dividindo-os pela média, uma vez que tal procedimento possibilita trabalhar com valores adimensionalizados entre 0 e 2, correspondente a um coeficiente de variação entre 0 e 0,5.

WALKER (1979), citou que um sistema de irrigação por aspersão, caracterizado pelo coeficiente de variação maior que 0,5 e um coeficiente de uniformidade de Christiansen menor ou igual a 60%, é um sistema mal projetado e, ou, operado.

Observa-se na Figura 4 que a lâmina média de irrigação, em termos adimensionais, é definida no valor da ordenada para $y = 1$ e que a lâmina de

água requerida pela cultura é uma fração da média, sendo definida como a quantidade $1 - \Delta$, em que Δ é a diferença entre a lâmina média de aplicação adimensionalizada e a lâmina de água requerida pelas culturas. Segundo WALKER (1979), a função densidade de probabilidade acumulada não é definida em $x = 0$ ou $x = 1,0$, sendo, portanto, necessário definir um parâmetro, (Δ') dependente do coeficiente de variação.

Observa-se ainda na Figura 4 que a interseção da linha correspondente à lâmina de água requerida pela cultura e a da linha correspondente à função densidade de probabilidade acumulada definem duas áreas, a subirrigada (A_D) e a adequadamente irrigada ($1 - A_D$), e que o volume adimensional com déficit de água é definido por V_D , estando relacionado com a área subirrigada A_D e com o coeficiente de variação do sistema. WALKER (1979) definiu A_D (em porcentagem) como sendo uma função de Δ e Δ' . Segundo o autor, a relação entre o V_D e o coeficiente de variação é linear para valores em torno de 0,5. As relações estão apresentadas a seguir.

$$\Delta' = 3,63cv \quad (26)$$

$$\Delta = \left(3,63 - 1,123.A_D^{0,3} \right) cv \quad (27)$$

$$V_D = 0,003A_D^{1,2325} cv \quad (28)$$

em que

Δ' = diferença entre a lâmina média adimensionalizada e a convergência da função densidade de probabilidade acumulada em $x=0$;

Δ = diferença entre a lâmina média adimensionalizada e a lâmina de água requerida pelas culturas;

A_D = fração da área com déficit de água;

cv = coeficiente de variação; e

V_D = volume da área com déficit.

Por meio das relações apresentadas pelas equações 26, 27 e 28, WALKER (1979) definiu a eficiência de aplicação (E_a), e a eficiência de necessidade de água (E_r).

$$E_a = 100(1 - \Delta - V_D) = 100\left(1 - cv\left(3,63 - 1,123A_D^{0,3} + 0,003A_D^{1,2325}\right)\right) \quad (29)$$

$$E_r = 100\left[\frac{1 - \Delta - V_D}{1 - \Delta}\right] = 100\frac{E_a}{1 - cv\left(3,63 - 1,123A_D^{0,3}\right)} \quad (30)$$

em que

E_a = eficiência de aplicação; e

E_r = eficiência de necessidade de água.

2.4.2.1. Testes estatísticos

Muitos testes estatísticos requerem a pressuposição de normalidade. Portanto, metodologias para avaliar se os dados são advindos de uma distribuição normal são necessários (CECON, 2001).

Segundo CECON (2001), através de um histograma de resíduos pode-se verificar a normalidade de um grupo de dados. Para ele, os testes qui-quadrado para aderência, Kolmogorov-Smirnov e o Shapiro-Wilks também podem ser utilizados.

Segundo, GOMIDE (1976), quando uma distribuição postulada não é inteiramente especificada, isto é, quando há necessidade de estimação de parâmetros, o teste qui-quadrado para aderência é aplicável para verificar a normalidade da distribuição, desde que se altere o número de graus de liberdade, levando-se em consideração o número de parâmetros estimados. Além disto, os parâmetros devem ser estimados pelo método da máxima verossimilhança, sendo os cálculos efetuados com base em dados agrupados.

De acordo com GOMIDE (1976), um outro teste muito utilizado para verificar a normalidade de uma distribuição é o de Kolmogorov-Smirnov. Este

teste, segundo o autor, é menos geral que o teste qui-quadrado, pois é aplicável apenas para testar a adequação do ajuste de distribuições contínuas completamente especificadas, isto é, quando não há parâmetros a estimar.

Seniwongse et al. (1972), citados por WALKER (1979), usaram o teste qui-quadrado, com 95% de nível de confiança, para comparar o ajuste normal aos valores de precipitação dos aspersores. Os autores encontraram que o ajuste normal foi adequado para todos os valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen avaliados.

2.4.3. Outros modelos de distribuição

WARRICK (1983), relatou que as distribuições densidade de probabilidade acumulada log-normal, potencial, beta e gama podem ser utilizadas para descrever as eficiências de irrigação e as uniformidades de distribuição de água e para caracterizar os padrões de precipitação dos aspersores. Nesse trabalho, estão apresentadas as considerações matemáticas de cada uma das distribuições citadas anteriormente.

O autor apresenta também diversas equações que relacionam o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) com o coeficiente de variação, para as funções densidade de probabilidade acumulada normal, log-normal, uniforme ou linear, potencial, beta e gama.

Seniwongse et al. (1972) e Chaudry (1976), citados por WALKER (1979), estudaram as distribuições gama, Poisson e exponencial como possíveis maneiras de caracterizar os padrões de precipitação dos aspersores. Ambos encontraram que a distribuição gama foi a que apresentou melhor ajuste.

ELLIOTT et al. (1981), ajustaram as distribuições uniforme (função linear), normal e beta a 2.450 padrões de distribuição de água, com diferentes níveis de uniformidades. Para cada ajuste de cada padrão de distribuição de água, o desvio médio quadrático do modelo de distribuição foi calculado. Segundo os autores, o desvio médio quadrático, que corresponde à raiz quadrada do segundo momento de um conjunto de observações tomadas em

relação a uma origem arbitrária, deve ser utilizado para definir qual modelo de distribuição apresenta melhor ajuste. Os autores concluíram que a distribuição beta foi a que apresentou melhor ajuste e que para um coeficiente de uniformidade acima de 65% a distribuição normal apresentou melhor ajuste que a distribuição uniforme.

ELLIOTT et al. (1981) concluíram que para descrever as eficiências de irrigação as distribuições normal e uniforme são mais práticas, porém se os coeficientes de ajuste para a distribuição beta forem desenvolvidos os resultados são mais precisos.

2.5. Descrição matemática do modelo proposto por MANTOVANI (1993)

MANTOVANI (1993) denominou lâmina bruta de irrigação, lâmina requerida pela cultura e lâmina de déficit de água no solo, como H_B , H_R e H_D , respectivamente. Segundo o autor, a lâmina bruta de irrigação é aplicada para compensar o déficit de água no solo ou para atender às necessidades da cultura. Para ele, o coeficiente de déficit é definido pela razão entre o déficit de água (H_D) e a lâmina requerida pela cultura (H_R).

$$Cd = \frac{H_D}{H_R} \quad (31)$$

Segundo MANTOVANI (1993), o déficit de evapotranspiração sazonal da cultura, isto é, a diferença entre a evapotranspiração máxima acumulada da cultura e a evapotranspiração total ocorrida no ciclo da cultura, é igual ao somatório das lâminas de déficit.

$$ET_{\max} - ET = \sum_{i=1}^n H_D \quad (32)$$

Dividindo a equação 32, por ET_{\max} , temos:

$$\frac{ET_{\max}}{ET_{\max}} - \frac{ET}{ET_{\max}} = \frac{\sum H_D}{ET_{\max}} \quad (33)$$

Simplificando a equação 33, temos:

$$1 - \frac{ET}{ET_{\max}} = \frac{\sum H_D}{ET_{\max}} \quad (34)$$

Multiplicando e dividindo a equação 34 por $\sum H_R$, temos:

$$1 - \frac{ET}{ET_{\max}} = \frac{\sum H_D}{ET_{\max}} \times \frac{\sum H_R}{\sum H_R}$$

$$1 - \frac{ET}{ET_{\max}} = \frac{\sum H_D}{\sum H_R} \times \frac{\sum H_R}{ET_{\max}} \quad (35)$$

em que:

$$\frac{\sum H_D}{\sum H_R} = Cd_{med} - \text{m\u00e9dia sazonal do coeficiente de d\u00e9ficit} \quad (36)$$

$$\frac{\sum H_R}{ET_{\max}} = \text{fra\u00e7\u00e3o da } ET_{\max} \text{ que \u00e9 reposta pela irriga\u00e7\u00e3o} \quad (37)$$

Segundo MANTOVANI (1993), a rela\u00e7\u00e3o apresentada na equa\u00e7\u00e3o 37 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\sum H_R}{ET_{\max}} = (1 - p) \quad (38)$$

em que

p = fra\u00e7\u00e3o da ET_{\max} que \u00e9 reposta por outras fontes que n\u00e3o a irriga\u00e7\u00e3o, como, por exemplo, a precipita\u00e7\u00e3o efetiva e a \u00e1gua do len\u00e7ol fre\u00e1tico, via ascens\u00e3o capilar.

Substituindo as equa\u00e7\u00f5es 36 e 38 na equa\u00e7\u00e3o 35, temos:

$$1 - \frac{ET}{ET_{\max}} = Cd_{med}(1 - p) \quad (39)$$

Considere o modelo proposto por STEWART et al. (1977), apresentado na equação 40.

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = \beta \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}} \right) \quad (40)$$

em que

Y = rendimento atual;

Y_{\max} = rendimento máximo;

β = coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico;

ET = evapotranspiração total;

ET_{\max} = evapotranspiração máxima, que ocorre quando não há restrição no desenvolvimento da planta; e

Reorganizando a equação 40, temos:

$$1 - \frac{ET}{ET_{\max}} = \frac{1}{b} \left(1 - \frac{Y}{Y_{\max}} \right) \quad (41)$$

Substituindo a equação 39 na equação 41, temos:

$$\frac{1}{b} \left(1 - \frac{Y}{Y_{\max}} \right) = Cd_{med}(1 - p) \quad (42)$$

Reorganizando a equação 42, obtém-se o modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993).

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = b Cd_{med}(1 - p) \quad (43)$$

em que

Y = rendimento atual;

Y_{\max} = rendimento máximo;

β = coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico;

$Cd_{méd}$ = média sazonal do coeficiente de déficit; e

p = fração da ET_{max} que é reposta por outras fontes que não a irrigação.

2.5.1. Descrição matemática do coeficiente de déficit proposto por MANTOVANI (1993)

Segundo MANTOVANI (1993), a relação entre o coeficiente de déficit (Cd) e a lâmina bruta de irrigação (H_G) é uma função do CUC e pode ser definida para sistemas de irrigação por aspersão.

Para o desenvolvimento do coeficiente de déficit, o autor considerou que o perfil de distribuição de água pelos aspersores segue uma distribuição uniforme (função linear) e que 50% da área recebe uma lâmina de água igual ou superior à lâmina bruta (H_G) (Figura 5).

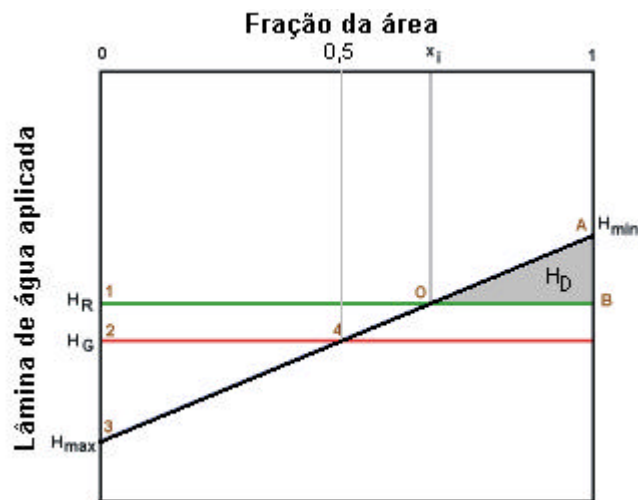


Figura 5 – Modelo uniforme de distribuição de água pelos aspersores.

Segundo MANTOVANI (1993), um dos termos do CUC pode ser representado pela razão entre o somatório do módulo dos desvios em relação à lâmina bruta de aplicação e a lâmina bruta. Na Figura 5 observa-se que, a metade do somatório do módulo dos desvios corresponde à área do triângulo 2,3,4.

$$\Delta_{234} = 0,5 \frac{H_{\max} - H_G}{2} \quad (44)$$

Pela equação 44 tem-se que, o somatório do módulo dos desvios é representado por:

$$2 \cdot (\Delta_{234}) = 2 \left(0,5 \frac{H_{\max} - H_G}{2} \right) = \frac{H_{\max} - H_G}{2} \quad (45)$$

e

$$CUC = 1 - \frac{H_{\max} - H_G}{2H_G} \quad (46)$$

em que

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen;

H_{\max} = lâmina máxima aplicada; e

H_G = lâmina bruta de irrigação.

Na Figura 5 verifica-se que, a lâmina de déficit corresponde à área do triângulo OAB.

$$H_D = \frac{(1 - x_i) \cdot (H_R - H_{\min})}{2} \text{ ou } 0,5 (1 - x_i) (H_R - H_{\min}) \quad (47)$$

O coeficiente de déficit, definido por MANTOVANI (1993), como a razão entre o déficit de água e a lâmina de água requerida pela cultura, é igual a:

$$C_D = \frac{0,5(1 - x_i)(H_R - H_{\min})}{H_R} \quad (48)$$

Simplificando a equação 48, temos:

$$C_D = (0,5)(1 - x_i) \left(\frac{1 - H_{\min}}{H_R} \right) \quad (49)$$

em que

C_D = coeficiente de déficit;

H_{min} = lâmina mínima aplicada; e

H_R = lâmina de água requerida pela cultura.

Para o autor, quando o perfil de distribuição de água pelos aspersores segue uma distribuição uniforme (função linear), a lâmina bruta de irrigação (H_G) é a média entre as lâminas máximas e mínimas, daí tem-se:

$$H_G = \frac{(H_{max} + H_{min})}{2} \quad (50)$$

Na Figura 5, pode ser observado que a fração da área que recebeu uma lâmina de irrigação maior que a requerida é x_i . Pela semelhança dos triângulos 013 e OAB, obtém-se o valor de x_i .

$$\Delta 013 \approx \Delta OAB$$

$$\frac{H_R - H_{min}}{H_{max} - H_R} = \frac{1 - x_i}{x_i} \quad (51)$$

então

$$x_i H_R - x_i H_{min} = H_{max} - H_R - H_{max} x_i + H_R x_i \quad (52)$$

Simplificando a equação 52, temos:

$$x_i (H_R - H_{min} + H_{max} - H_R) = H_{max} - H_R \quad (53)$$

e

$$x_i (H_{max} - H_{min}) = H_{max} - H_R \quad (54)$$

e

$$x_i = \frac{H_{\max} - H_R}{(H_{\max} - H_{\min})} \quad (55)$$

em que

x_i = fração da área que recebeu uma lâmina de irrigação maior que a requerida;

H_{\max} = lâmina máxima aplicada;

H_{\min} = lâmina mínima aplicada; e

H_R = lâmina de água requerida pela cultura.

Isolando H_{\max} da equação a seguir (equação 46), temos:

$$2H_G \cdot CUC = 1.2H_G - H_{\max} + H_G \quad (56)$$

e

$$H_{\max} = 2H_G + H_G - 2H_G \cdot CUC \quad (57)$$

e

$$H_{\max} = 3H_G - 2H_G \cdot CUC \quad (58)$$

e

$$H_{\max} = H_G(3 - 2 \cdot CUC) \quad (59)$$

Isolando H_{\min} na equação abaixo (equação 50), temos:

$$2H_G = H_{\max} + H_{\min} \quad (60)$$

e

$$H_{\min} = 2H_G - H_{\max} \quad (61)$$

Substituindo as equações 59 e 61 na equação 55, temos:

$$x_i = \frac{H_G(3 - 2CUC) - H_R}{H_G(3 - 2CUC) - (2H_G - H_{\max})} \quad (62)$$

e

$$x_i = \frac{H_G(3-2CUC)-H_R}{3H_G-2CUC H_G-2H_G+H_{MAX}} \quad (63)$$

Substituindo a equação 59 na equação 63, temos:

$$x_i = \frac{H_G(3-2CUC)-H_R}{3H_G-2CUC H_G-2H_G+3H_G-2CUC H_G} \quad (64)$$

e

$$x_i = \frac{H_G(3-2CUC)-H_R}{4H_G-4CUC H_G} \quad (64)$$

Dividindo a equação 64 por H_G , temos:

$$x_i = \frac{\frac{H_G}{H_G}(3-2CUC)-\frac{H_R}{H_G}}{\frac{4H_G}{H_G}-\frac{4CUC H_G}{H_G}} \quad (65)$$

e

$$x_i = \frac{(3-2CUC)-\left(\frac{H_R}{H_G}\right)}{4-4CUC} \quad (66)$$

e

$$x_i = \frac{1}{(4-4CUC)} \left[3-2CUC-\left(\frac{H_R}{H_G}\right) \right] \quad (67)$$

Substituindo na equação do coeficiente de déficit (equação 49) o valor de x encontrado na equação 67 e o valor de H_{min} encontrado na equação 61, chega-se a:

$$C_D = \frac{\left\{ 1 - \left[\frac{\left(3 - 2CUC - \frac{H_R}{H_G} \right)}{4 - 4CUC} \right] \right\} \left[1 - \left(\frac{2CUC H_G - H_G}{H_R} \right) \right]}{2} \quad (68)$$

e

$$C_D = \frac{\left[\frac{4 - 4CUC - 3 + 2CUC + \frac{H_R}{H_G}}{4 - 4CUC} \right] \left[1 - \left(\frac{H_G(2CUC - 1)}{H_R} \right) \right]}{2} \quad (69)$$

e

$$C_D = \left[\frac{1 - 2CUC + \frac{H_R}{H_G}}{8 - 8CUC} \right] \left[1 - \left(\frac{H_G(2CUC - 1)}{H_R} \right) \right] \quad (70)$$

em que

C_D = coeficiente de déficit, adimensional.

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen;

H_G = lâmina bruta aplicada, mm; e

H_R = lâmina requerida pela cultura, mm.

Segundo MANTOVANI (1993), quando não ocorrem perdas na irrigação, ou seja, $H_{max} < H_R$, a equação 58 não pode ser aplicada, pois o valor de x fica negativo e não existe fração de área negativa. Segundo o autor, neste caso, o valor de C_D é facilmente calculado como:

$$C_D = \frac{H_D}{H_R} \quad (71)$$

e

$$H_D = H_R - H_G \quad (72)$$

e

$$C_D = \frac{H_R - H_G}{H_R} \quad (73)$$

e

$$C_D = 1 - \frac{H_G}{H_R} \quad (74)$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, durante o período de junho a outubro de 2001. Para resolver as integrações matemáticas necessárias ao desenvolvimento do coeficiente de déficit, foi utilizado o software Derive 5.0. As simulações foram realizadas com o modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993), para as condições do experimento de campo apresentado no Capítulo 1. As funções de produção para a cultura do feijão foram desenvolvidas com o uso do modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993) com os coeficientes de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como uniforme e normal.

3.1. Coeficiente de déficit

Para o desenvolvimento do coeficiente de déficit em função do CUC, da lâmina bruta (H_G) e da lâmina requerida pela cultura (H_R), foram determinados o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e o déficit de água no solo (H_D), para a função densidade de probabilidade acumulada do modelo de distribuição normal.

ANYOJI (1994), apresentou a solução matemática das integrações das áreas definidas na Figura 3. Estas soluções foram utilizadas como suporte para a definição do déficit de água no solo (H_D).

Os resultados das integrações das áreas definidas no gráfico da função densidade de probabilidade acumulada para a distribuição normal (Figura 3), segundo ANYOJI (1994), estão apresentados a seguir:

$$A + B = \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} + m x_i \quad (75)$$

$$A = x_i (m + a s) \quad (76)$$

$$B = \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} - x_i \cdot a \cdot s \quad (77)$$

$$A + B + C = m \quad (78)$$

$$A + C = m + x_i \cdot a \cdot s - \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} \quad (79)$$

$$C = m(1 - x_i) - \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} \quad (80)$$

$$C + D = (1 - x_i) \cdot (m + a s) \quad (81)$$

$$D = (1 - x_i) a s + \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} \quad (82)$$

em que

σ = desvio-padrão;

α = desvios em termos do desvio-padrão;

μ = média; e

x_i = densidade de probabilidade acumulada.

WALKER (1979), apresentou a solução matemática das integrações das áreas definidas na Figura 4. Estas soluções foram utilizadas como suporte para a definição da fração da área em que foi aplicada a lâmina requerida pela cultura.

Segundo WALKER (1979), a fração da área onde não foi aplicada a lâmina requerida pela cultura (A_D ou $100-x_i$) pode ser definida como:

$$\Delta = \left(3,63 - 1,123 \cdot A_D^{0,301} \right)_{cv} \quad (83)$$

em que

Δ = a diferença entre a lâmina média de aplicação adimensionalizada e a lâmina de água requerida pela cultura;

A_D = fração da área onde não foi aplicada a lâmina requerida pela cultura, em %; e

cv = coeficiente de variação.

3.2. Simulações utilizando o modelo proposto por MANTOVANI (1993)

As simulações foram realizadas com o modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993), para as condições do experimento de campo apresentado no Capítulo 1, utilizando os coeficientes de déficit desenvolvidos para o perfil de precipitação de água dos aspersores como uniforme (MANTOVANI, 1993) e normal. Como os tratamentos constaram de três lâminas de irrigação e dois níveis de uniformidade de distribuição de água, foram realizadas 12 simulações; seis utilizando o coeficiente de déficit desenvolvido para o perfil de distribuição uniforme e seis para o perfil normal.

Os dados necessários à realização das simulações foram: rendimento máximo da cultura (Y_{max}), coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (β), lâmina bruta (H_G), coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), lâmina requerida pela cultura (H_R) e a fração da evapotranspiração máxima que é repostada por outras fontes que não a irrigação (p).

O período considerado para a realização das simulações foi do dia 22 de setembro ao dia 28 de outubro de 2000. Definiu-se trabalhar com a terceira fase fenológica da cultura, pois foi o período em que ocorreram as irrigações. Caso fosse considerado o período total do desenvolvimento da cultura, compreendido entre 10 de agosto a 17 de novembro, a lâmina total de irrigação aplicada seria menor que a lâmina requerida pela cultura, devido a precipitações ocorridas no período anterior as irrigações. Neste caso, o coeficiente de déficit apresentado na equação 59, que não incorpora o efeito da uniformidade, deveria ser empregado.

3.2.1. Transformação linear do modelo proposto por MANTOVANI (1993)

Só foi possível realizar as simulações utilizando um período do ciclo total da cultura porque, matematicamente, o modelo proposto por MANTOVANI (1993) é uma transformação linear. Uma função é uma transformação linear quando:

- $f(0) = 0$;
- $f(x+y) = f(x) + f(y)$; e
- $f(Kx) = K.f(x)$, $K \in \mathbb{R}$.

Considerando o modelo desenvolvido por MANTOVANI (1993), apresentado na equação 43, algumas substituições matemáticas foram realizadas, com o objetivo de demonstrar que a função é uma transformação linear.

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = \mathbf{b} C d_{med} (1 - p)$$

em que:

U = {plantio em qualquer lugar e tempo}; e

A = {plantio em Coimbra, na data D};

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = b C d_{\text{med}} (1 - p) \varepsilon A$$

$a = \beta \varepsilon R$, constante;

$Cd' = Cd_{\text{med}}.(1-p) \varepsilon R$; e

$f = Y/Y_{\max} \varepsilon R$.

Substituindo as considerações apresentadas anteriormente na equação 43, temos:

$$1 - f = a C d' \tag{84}$$

Fazendo:

$1 - f = F$, temos:

$$F = a C d' \tag{85}$$

A equação 85 é uma função do tipo, $F(x) = aX$, então:

$F(0) = 0$;

$F(x_1 + x_2) = F(x_1) + F(x_2)$; e

$F(Kx) = K.f(x)$.

Para qualquer $x_1, x_2 \varepsilon R$ e K constante, a função de produção desenvolvida por MANTOVANI (1993) é uma transformação linear.

3.2.2. Rendimento máximo da cultura (Y_{\max})

Segundo DOORENBOS e KASSAM (1979), o rendimento máximo (Y_{\max}) para a cultura do feijão seco (grão), considerando variedades altamente produtivas, adaptadas às condições climáticas do período de crescimento

disponível, com suprimento de água satisfatório e alto nível de utilização de insumos agrícolas, sob condições de agricultura irrigada, é de 2.500 kg ha.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), o rendimento máximo (Y_{max}) para a cultura do feijão seco (grão) variedade Pérola, para a região da Zona da Mata, é de 3.000 kg ha⁻¹.

Para realização das simulações, o valor do rendimento máximo (Y_{max}) considerado foi de 3.000 kg ha⁻¹.

3.2.3. Coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (β)

Segundo DOORENBOS e KASSAM (1979), a resposta do suprimento de água sobre o rendimento da cultura é quantificada por meio do coeficiente de sensibilidade da cultura (β), que relaciona a queda de rendimento relativo com o déficit de evapotranspiração relativa.

Os autores apresentaram o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (β) por fase fenológica e para o período total de crescimento, para diversas culturas. Para a cultura do feijão seco (grãos), os autores recomendam um valor de (β) de 1,15 para o período total de crescimento. Para os períodos vegetativo, floração, formação de colheita e maturação, os valores recomendados são de 0,2; 1,1; 0,75; e 0,2, respectivamente.

Para realização das simulações, o valor do coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (β) considerado foi de 1,15.

3.2.4. Lâmina bruta (H_G)

Conforme metodologia apresentada no Capítulo 1, a lâmina líquida a ser resposta ao solo, em cada irrigação, foi calculada por meio da umidade média obtida nos três pontos de monitoramento do tratamento L1A, nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, e a lâmina bruta (H_G) a ser aplicada foi determinada por meio da eficiência potencial de aplicação, estimada a partir das irrigações realizadas anteriormente. Conhecida a lâmina bruta de irrigação a ser aplicada nos tratamentos L1A e L1B, foram determinadas as demais

lâminas para os tratamentos L2A, L2B, L3A e L3B. O volume de água aplicado em cada tratamento foi monitorado pelo hidrômetro.

Utilizou-se a lâmina coletada total (H_c) de cada tratamento, obtida com a soma das lâminas coletadas de cada irrigação. Como descrito no Capítulo 1, ao longo do experimento foram realizadas cinco irrigações, nos dias 22 de setembro e nos dias 5, 13, 20 e 28 de outubro.

3.2.5. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Conforme metodologia apresentada no Capítulo 1, logo após cada irrigação o CUC foi determinado nos três blocos de cada tratamento. Para realização das simulações, utilizou-se o CUC médio de cada tratamento, obtido com a média dos CUC, determinados em cada bloco dentro do tratamento e determinados em cada irrigação.

3.2.6. Lâmina requerida (H_R)

Segundo MANTOVANI (1993), a lâmina requerida pela cultura ao longo do ciclo pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\sum H_R = \sum ET_c \quad (86)$$

em que

$\sum H_R$ = lâmina requerida pela cultura ao longo do ciclo, ou em um período específico; e

$\sum ET_c$ = evapotranspiração real da cultura ao longo do ciclo, ou em um período específico.

Os cálculos da evapotranspiração real da cultura (ET_c) foram efetuados com o software SISDA 3.5. O SISDA 3.5 utiliza o método FAO para a estimativa da evapotranspiração da cultura.

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \cdot K_s \quad (87)$$

em que

ET_0 = evapotranspiração de referência;

K_c = coeficiente de cultura; e

K_s = coeficiente de ajuste da evapotranspiração, em função conteúdo de água no solo.

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi estimada pelo SISDA 3.5, que utiliza a equação de Penman-Monteith. Os valores diários de temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar, radiação solar incidente à superfície do solo, velocidade e direção do vento e precipitação foram cadastrados para todo o período de crescimento da cultura.

$$ET_0 = \frac{d}{d+g} (R_n - G) \frac{1}{I} + \frac{g}{d+g} \frac{900}{T+275} U_2 (e_a - e_d) \quad (88)$$

em que

ET_0 = evapotranspiração de referência (mm/dia);

R_n = saldo de radiação à superfície ($MJ\ m^2$ /dia);

G = fluxo de calor no solo ($MJ\ m^2$ /dia);

T = temperatura ($^{\circ}C$);

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura (m/s);

$(e_a - e_d)$ = déficit de pressão de vapor (Kpa);

δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação (Kpa/ $^{\circ}C$);

λ = calor latente de evaporação (MJ /kg); e

γ = constante psicrométrica modificada (Kpa / $^{\circ}C$).

ALLEN et al. (1998), apresentaram os valores de coeficientes de cultura para diversas espécies. Para o feijão, os valores recomendados pelos autores são 0,4; 0,75; 1,15; e 0,4, para os estádios fenológicos inicial, desenvolvimento vegetativo, floração/maturação e final, respectivamente. Os valores de coeficiente de cultura recomendados foram cadastrados no SISDA 3.5.

Além do cadastro das informações referentes à cultura (coeficiente de cultura, duração dos estádios fenológicos e profundidade efetiva) e das informações referentes ao clima, também foram cadastradas as informações referentes ao solo (características físico-químicas) e ao sistema de irrigação.

Como a evapotranspiração real da cultura depende do conteúdo de água no solo, os valores das irrigações realizadas em cada tratamento e os valores semanais de umidade do solo, determinados em 24 pontos, a três profundidades (metodologia descrita no Capítulo 1), foram cadastrados no SISDA 3.5.

Foram cadastradas como irrigações no SISDA 3.5 as lâminas de água que atingiram o solo, ou seja, as lâminas líquidas. Isto só foi possível porque em todos os tratamentos foram instalados coletores espaçados de 3 em 3 m, para determinação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) (metodologia descrita no Capítulo 1).

O cadastro de lâminas líquidas e de valores de umidades (determinados semanalmente) permitiu melhor representação do cenário existente em campo e, desta forma, os valores de evapotranspiração real da cultura, determinados pelo SISDA 3.5, se aproximaram muito dos valores reais ocorridos no campo.

Para que o cadastro fosse realizado desta maneira, foi necessário alterar o SISDA 3.5. Portanto, a eficiência potencial de aplicação (E_a) foi fixada em 100%. Normalmente cadastra-se a lâmina bruta de irrigação e o SISDA 3.5 calcula uma eficiência potencial de aplicação (E_a), segundo a metodologia proposta por KELLER e BLIESNER (1990), e de acordo com as perdas uma lâmina líquida é estimada.

3.2.7. Fração da evapotranspiração máxima que é repostada por outras fontes (p)

Segundo MANTOVANI (1993), a fração da ET_{max} que é repostada por outras fontes, como a precipitação efetiva e a água de ascensão capilar, pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\frac{\sum (PE + AAC + AAS)}{ET_{max}} = p \quad (89)$$

em que

PE = precipitação efetiva;

AAC = água de ascensão capilar;

AAS = água armazenada no solo; e

ET_{max} = evapotranspiração máxima da cultura.

Os cálculos da precipitação efetiva (PE) foram efetuados com o software SISDA 3.5, mediante o uso da seguinte equação:

$$PE = 0,9177 + 1,8111 \cdot \log(P_i) - 0,0097 \cdot \log(P_i) \left(\frac{S_{i-1}}{S_i} \cdot 100 \right) \quad (90)$$

em que

PE = precipitação efetiva do dia i;

P_i = precipitação do dia i;

S_{i-1} = água disponível no solo da primeira camada no dia i-1; e

S_i = capacidade de água total na primeira camada no dia i.

No SISDA 3.5, quando a precipitação ocorrida for menor que 25 mm, esta é considerada efetiva. Foram observadas precipitações menores que 25 mm ocorridas após as irrigações. Como o programa considera estas precipitações como efetivas, foi necessário utilizar os resultados de percolação profunda, fornecidos pelo programa, para verificar a verdadeira contribuição dessas precipitações no desenvolvimento da cultura.

O programa calcula o escoamento superficial pela diferença entre a precipitação e a precipitação efetiva, porém no experimento não foi observado escoamento superficial. Para que os valores de escoamento superficial estimados pelo programa não fossem considerados, foi necessário alterar novamente o SISDA 3.5. Para isto, o escoamento superficial foi fixado em 0 (zero). Caso esta alteração não fosse realizada, o valor do escoamento superficial estimado pelo programa seria considerado no balanço de água no solo, o que afetaria os valores de evapotranspiração real da cultura e, conseqüentemente, a lâmina requerida pela cultura.

Para verificar se existiu a contribuição da água de ascensão capilar, proveniente de camadas mais profundas, foram elaborados gráficos com os valores de umidade do solo determinados semanalmente em 24 pontos, a três profundidades, referentes às camadas exploradas pelas raízes e às camadas mais profundas.

O valor da água armazenada no solo (AAS) foi considerado 0 (zero), pois no plantio e na colheita o solo se encontrava na capacidade de campo. A colheita foi realizada no dia 17 de novembro, e nos dias 14, 15, 16 e 17 as precipitações ocorridas foram de 9,2; 16,8; 28,4; e 13,6 mm, respectivamente.

Os cálculos da evapotranspiração máxima da cultura (ET_{max}) foram efetuados com o software SISDA 3.5, por meio da seguinte equação:

$$ET_{max} = ET_0 \cdot Kc \quad (91)$$

em que

ET_0 = evapotranspiração de referência (mm/dia); e

Kc = coeficiente de cultura.

3.2.8. Comparação dos resultados

Os resultados de produtividade ($kg\ ha^{-1}$) dos tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, obtidos no experimento realizado na Estação Experimental de Coimbra, conforme a metodologia descrita no Capítulo 1, foram comparados com os resultados simulados pela função de produção, utilizando os coeficientes de déficit determinados para um perfil de precipitação de água dos aspersores uniforme (MANTOVANI, 1993) e normal.

3.3. Funções de produção

As funções de produção para a cultura do feijão foram desenvolvidas com o uso do modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993) com os coeficientes de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como uniforme e normal.

Trabalhou-se com três níveis de uniformidade de distribuição de água, correspondente aos valores de CUC de 65, 80 e 95%, respectivamente; com

cinco níveis da fração da evapotranspiração máxima que é repostada por outras fontes, correspondente aos valores de p de 0; 0,25; 0,5; 0,75; e 0,95, respectivamente; e com um intervalo de 0 a 2 da relação entre a lâmina bruta de irrigação e a lâmina requerida pelas culturas.

O coeficiente de sensibilidade da cultura do feijão ao déficit hídrico (β) considerado foi de 1,15, conforme a recomendação de DOORENBOS e KASSAM (1979).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Descrição matemática do coeficiente de déficit

A Figura 6 apresenta o gráfico da função densidade de probabilidade acumulada para o modelo de distribuição normal, com as áreas A, B, C e D definidas. A quantidade de água armazenada na zona radicular é representada por A+C; a água percolada é representada por B; e o déficit de água no solo é representado por D.

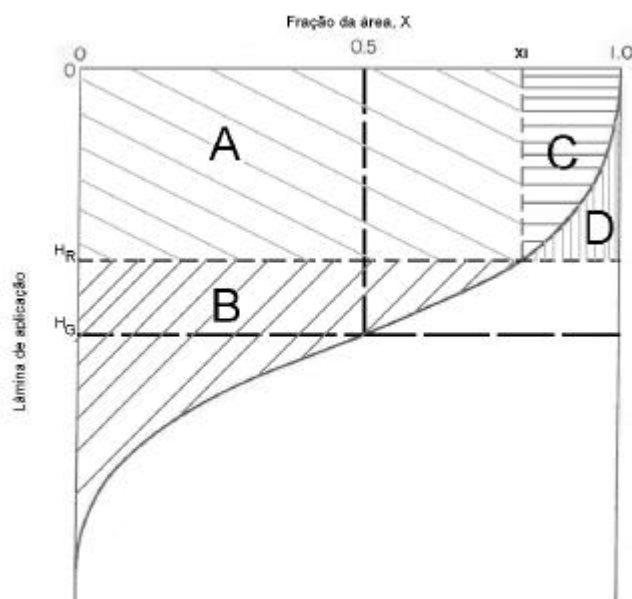


Figura 6 – Gráfico da função densidade de probabilidade acumulada para o modelo de distribuição normal, com as áreas A, B, C e D.

Segundo MANTOVANI (1993), um dos termos do CUC pode ser representado pela razão entre o somatório do módulo dos desvios em relação à lâmina bruta de aplicação e a lâmina bruta. Quando o perfil de distribuição de água pelos aspersores segue uma distribuição normal, 50% da área recebe uma lâmina de água igual à lâmina bruta (H_G), ou à lâmina média coletada (WALKER, 1979). Pela Figura 6, tem-se:

$$CUC = 1 - \frac{\int_0^{0.5} [H(x) - H_G] dx + \int_{0.5}^{1.0} [H_G - H(x)] dx}{H_G} \quad (92)$$

e

$$CUC = 1 - \frac{\int_0^{0.5} H(x) dx - \int_0^{0.5} H_G dx + \int_{0.5}^1 H_G dx - \int_{0.5}^{1.0} H(x) dx}{H_G} \quad (93)$$

e

$$\int_0^{x_i} [H(x)] dx = A + B \quad (94)$$

ANYOJI (1994) apresentou os resultados das integrações das áreas, definidas no gráfico da função densidade de probabilidade acumulada para a distribuição normal:

$$\int_0^{x_i} [H(x)] dx = A + B = \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} + mx_i \quad (95)$$

e

$$\int_0^1 [H(x)] dx = A + B + C = m \quad (96)$$

Substituindo a equação 79 na equação 80, temos:

$$\int_{x_i}^1 [H(x)] dx = C = m(1 - x_i) - \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} \quad (97)$$

A soma das áreas A+B+C é igual à lâmina média aplicada μ , pois:

$$\int_0^1 [H(x)] dx = \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} + m \quad (98)$$

e

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a^2}{2}} \text{ ou } \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{s}{\sqrt{2p}} \frac{1}{e^{\frac{a^2}{2}}} = 0, \text{ porque } e^{\infty} \rightarrow \infty \quad (99)$$

daí

$$\int_0^1 [H(x)] dx = m \quad (100)$$

Substituindo nas equações 95, 96 e 97, μ por H_G (WALKER, 1979) e o

termo $\frac{s}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{a}{2}}$ por I, tem-se:

$$\int_0^{x_i} [H(x)] dx = I + H_G \cdot x_i \quad (101)$$

e

$$\int_0^1 [H(x)] dx = H_G \quad (102)$$

e

$$\int_{x_i}^1 [H(x)] dx = H_G \cdot (1 - x_i) - I \quad (103)$$

Substituindo as equações 101, 102 e 103 na equação 93, tem-se:

$$CUC = 1 - \frac{(I + H_G \cdot x_i)_{0,5}^{0,5} - (H_G)_{0,5}^{0,5} + (H_G)_{0,5}^{1,0} - [H_G(1 - x_i) - I]_{0,5}^{1,0}}{H_G} \quad (104)$$

e

$$CUC = 1 - \frac{(I + 0,5H_G) - (0,5H_G) + (0,5H_G) - [(1 - 0,5)H_G - I]}{H_G} \quad (105)$$

e

$$CUC = 1 - \frac{I + 0,5H_G - 0,5H_G + 0,5H_G - 0,5H_G + I}{H_G} \quad (106)$$

e

$$CUC = 1 - \frac{2I}{H_G} \quad (107)$$

Na Figura 6, o déficit de água no solo corresponde à área D, e pode ser definido como:

$$H_D = \int_{x_i}^1 [H_R - H(x)] dx \quad (108)$$

e

$$H_D = \int_{x_i}^1 H_R dx - \int_{x_i}^1 H(x) dx \quad (109)$$

Substituindo a equação 103 na equação 109, tem-se:

$$H_D = (H_R) \Big|_{x_i}^1 - [H_G(1 - x_i) - I] \quad (110)$$

e

$$H_D = (1 - x_i)H_R - H_G(1 - x_i) + I \quad (111)$$

e

$$H_D = (1 - x_i)(H_R - H_G) + I \quad (112)$$

Isolando o termo A_D (fração da área em que não foi aplicada a lâmina requerida pela cultura) da equação 83 proposta por WALKER (1979), tem-se:

$$\Delta = 3,63.cv - 1,123.A_D^{0,301}.cv \quad (113)$$

e

$$1,123.A_D^{0,301}.cv = 3,63.cv - \Delta \quad (114)$$

e

$$A_D^{0,301} = \frac{3,63.cv - \Delta}{1,123.cv} \quad (115)$$

e

$$A_D = \left(\frac{3,63.cv - \Delta}{1,123.cv} \right)^{\frac{1}{0,301}} \quad (116)$$

Substituindo $\Delta = \frac{H_G - H_R}{H_G}$ (WALKER, 1979) na equação 116, tem-se:

$$A_D = \left(\frac{3,63.cv - \frac{H_G - H_R}{H_G}}{1,123.cv} \right)^{\frac{1}{0,301}} \quad (117)$$

e

$$A_D = \left(\frac{3,63.cv - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,123.cv} \right)^{\frac{1}{0,301}} \quad (118)$$

Considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como um modelo normal, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) relaciona-se com o coeficiente de variação, através da seguinte relação (BERNARDO,1996; WARRICK, 1983):

$$CUC = 1 - 0,798.cv \quad (119)$$

e

$$cv = \frac{1 - CUC}{0,798} \quad (120)$$

Substituindo a equação 120 na equação 118, tem-se:

$$A_D = \left(\frac{3,63 \cdot \left(\frac{1-CUC}{0,798} \right) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,123 \cdot \left(\frac{1-CUC}{0,798} \right)} \right)^{\frac{1}{0,301}} \quad (121)$$

e

$$A_D = \left(\frac{4,548 \cdot (1-CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1-CUC)} \right)^{3,322} \quad (122)$$

Como $A_D = 100 - x_i$, tem-se:

$$100 - x_i = \left(\frac{4,548 \cdot (1-CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1-CUC)} \right)^{3,322} \quad (123)$$

e

$$x_i = 100 - \left(\frac{4,548 \cdot (1-CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1-CUC)} \right)^{3,322} \quad (124)$$

em que

x_i = fração da área em que foi aplicada a lâmina requerida pela cultura, em porcentagem.

Dividindo a equação 124 por 100, obtém-se x_i compreendido entre 0 e 1.

$$x_i = \frac{100 - \left(\frac{4,548 \cdot (1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} \quad (125)$$

e

$$x_i = 1 - \frac{\left(\frac{4,548 \cdot (1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} \quad (126)$$

Substituindo a equação 126 na equação 112, temos:

$$H_D = \left[1 - \left(1 - \frac{\left(\frac{4,548 \cdot (1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} \right) \right] (H_R - H_G) + I \quad (127)$$

e

$$H_D = \frac{\left(\frac{4,548 \cdot (1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} (H_R - H_G) + I \quad (128)$$

Isolando I na equação 107, tem-se:

$$I = \frac{(1 - CUC).H_G}{2} \quad (129)$$

Substituindo a equação 129 na equação 128, tem-se:

$$H_D = \left(\frac{\left(\frac{4,548.(1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407.(1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} \right) \left(H_R - H_G \right) + \frac{(1 - CUC).H_G}{2} \quad (130)$$

O coeficiente de déficit foi definido por MANTOVANI (1993) como a razão entre o déficit de água (H_D) no solo e a lâmina de água requerida pela cultura (H_R). Substituindo a equação 130 nesta relação, obtém-se o coeficiente de déficit definido quando o perfil de distribuição de água pelos aspersores segue uma função densidade de probabilidade acumulada normal.

$$C_D = \frac{\left(\frac{\left(\frac{4,548.(1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407.(1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} \right) \left(H_R - H_G \right) + \frac{(1 - CUC).H_G}{2}}{H_R} \quad (131)$$

Simplificando a equação 131, tem-se:

$$C_D = \left(\frac{\left(\frac{4,548 \cdot (1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} \right) \left(1 - \frac{H_G}{H_R} \right) + \frac{(1 - CUC)}{2} \cdot \frac{H_G}{H_R} \quad (132)$$

em que

C_D = coeficiente de déficit, adimensional;

H_R = lâmina de água requerida pela cultura, em mm;

H_G = lâmina bruta aplicada, em mm; e

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %.

4.2. Simulações utilizando o modelo proposto por MANTOVANI (1993)

4.2.1. Lâmina bruta (H_G)

No Quadro 1 estão apresentadas as lâminas brutas aplicadas e lâminas coletadas em cada irrigação e em cada tratamento durante o ciclo da cultura. Os tratamentos L2A e L2B receberam 50% da lâmina bruta determinada para o tratamento L1A, que correspondia à lâmina para retornar a umidade do solo à capacidade de campo, e os tratamentos L3A e L3B receberam uma lâmina de 150%. As irrigações dos dias 20 e 28 de outubro foram superiores às anteriores, devido ao aumento da demanda evapotranspirométrica em decorrência do desenvolvimento da cultura e das condições meteorológicas. As lâminas brutas totais e as lâminas coletadas totais em cada tratamento foram 154,76; 77,38; e 232,14 mm, aos tratamentos L1A e L1B, L2A e L2B, L3A e L3B, respectivamente e 111,50; 110,19; 60,27; 50,42; 161,71 e 162,89 mm, aos tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, respectivamente.

Quadro 1 – Lâminas brutas aplicadas (HG) e Lâminas coletas (HGc) em cada irrigação e durante o ciclo da cultura para os tratamentos

	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B
HG 22/09/2000	21,21	21,21	10,60	10,60	31,81	31,81
HG 05/10/2000	22,57	22,57	11,29	11,29	33,86	33,86
HG 13/10/2000	22,50	22,50	11,25	11,25	33,75	33,75
HG 20/10/2000	44,27	44,27	22,14	22,14	66,41	66,41
HG 28/10/2000	44,21	44,21	22,11	22,11	66,32	66,32
Hc 22/09/2000	9,07	8,98	6,83	4,66	14,79	13,73
Hc 05/10/2000	22,15	18,39	11,49	7,13	30,06	29,43
Hc 13/10/2000	15,72	17,17	8,74	8,06	23,96	24,24
Hc 20/10/2000	30,80	31,17	15,80	14,85	45,05	45,66
Hc 28/10/2000	33,76	34,48	17,40	15,73	47,85	49,83

4.2.2. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

No Quadro 2 está apresentado o coeficiente de uniformidade de Christiansen, determinado imediatamente após cada irrigação, para cada tratamento. As irrigações nos tratamentos L1A, L2A e L3A propiciaram maior uniformidade de distribuição e, conseqüentemente, maiores valores de CUC. Os valores apresentados no Quadro 2 correspondem à média dos CUCs determinados nos três blocos de cada tratamento. Os CUCs médios de cada tratamento estão apresentados na Figura 7. Para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, o CUC médio determinado foi, 84,39; 69,45; 86,17; 67,30; 88,64; e 69,62%, respectivamente.

Quadro 2 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen em cada irrigação para os tratamentos

	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B
CUC – 1ª irrigação	80,97	67,02	86,53	66,53	83,93	62,86
CUC – 2ª irrigação	89,52	73,29	90,66	63,85	93,18	72,20
CUC – 3ª irrigação	79,18	75,54	82,54	73,24	83,94	77,14
CUC – 4ª irrigação	85,95	66,73	84,14	66,23	90,26	68,16
CUC – 5ª irrigação	86,34	64,69	86,98	66,66	91,91	67,72

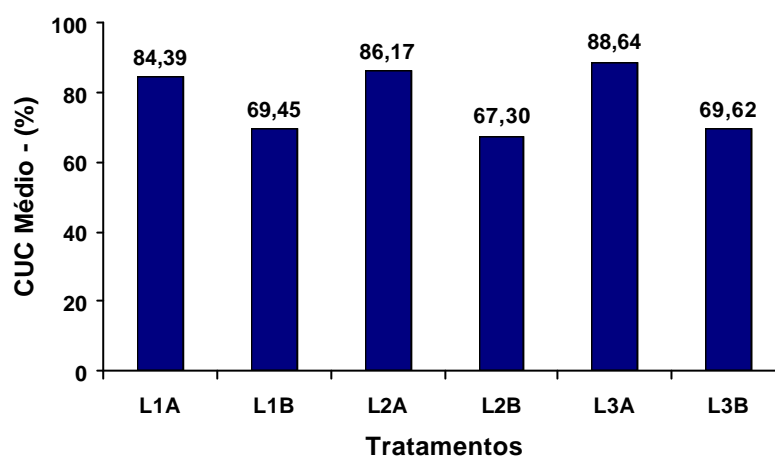


Figura 7 – CUC médios ocorridos durante o ciclo da cultura para os tratamentos.

4.2.3. Lâmina requerida (H_R)

Conforme metodologia descrita no item 3.2.6, a lâmina requerida pela cultura foi determinada com o software SISDA 3.5.

A evapotranspiração de referência (E_{To}) foi calculada pelo método de Penman-Monteith, através do software SISDA 3.5, utilizando as variáveis meteorológicas armazenadas na estação meteorológica automática instalada na área experimental.

A Figura 8 ilustra a evolução dos valores diários de E_{To} , correspondente ao período de 22 de setembro a 28 de outubro. Observou-se que até o dia 10 de outubro a E_{To} oscilou bastante. Esta oscilação foi provocada pela alternância de dias nublados e chuvosos para dias de céu

limpo. A partir dessa data a demanda evapotranspirométrica aumentou, o que propiciou maior consumo de água pela cultura e, conseqüentemente, maiores lâminas de irrigação para atender às necessidades da cultura. O menor valor foi de 1,20 mm/dia e ocorreu no dia 26 de setembro, já o maior valor foi de 6,33 mm/dia e ocorreu no dia 27 de outubro.

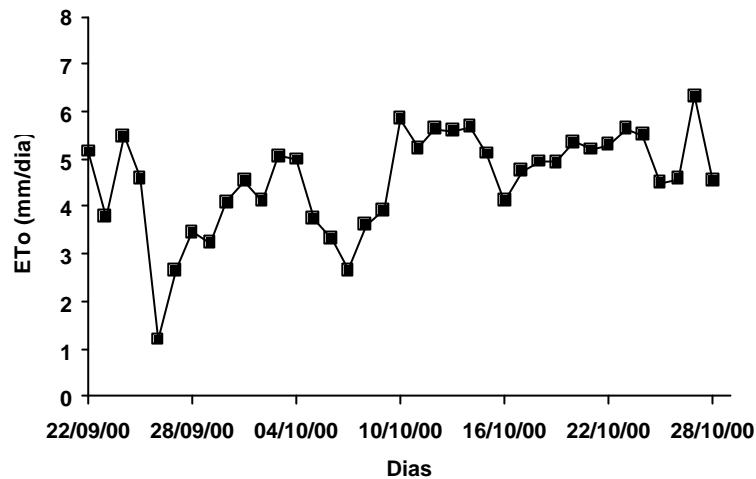


Figura 8 – Evapotranspiração de referência ocorrida entre 22/09/2000 e 28/10/2000.

A Figura 9 ilustra a evolução dos valores diários de evapotranspiração real da cultura (ETr), correspondente ao período de 22 de setembro a 28 de outubro, para todos os tratamentos.

Conforme mencionado, o cadastro de lâminas líquidas e de valores de umidades (determinados semanalmente) no SISDA 3.5 permitiu melhor representação do cenário existente em campo e, desta forma, os valores de evapotranspiração real da cultura, determinados pelo SISDA 3.5, aproximaram-se muito dos valores reais ocorridos no campo.

Como a primeira irrigação foi realizada no dia 22 de setembro, observou-se na Figura 10 que os valores de ETr do dia 22 a 25 de setembro para todos os tratamentos apresentaram valores similares. Durante o período de 26 de setembro a 29 de setembro ocorreram precipitações, o que manteve novamente os valores de ETr, em todos os tratamentos, similares até o dia 29 de setembro. A segunda irrigação foi realizada no dia 5 de outubro, e durante o período de 1^o a 5 de outubro os valores de Etr, para todos os tratamentos, dependeram do conteúdo de água no solo de cada parcela. No período de 6 a

28 de outubro foram realizadas as irrigações dos dias 13, 20 e 28, e ocorreram pequenas precipitações de 1,2 e 4,2 mm no dias 19 e 20. Após o dia 5 de outubro, os valores de ETr para os tratamentos L2A e L2B foram inferiores aos valores dos tratamentos L1A e L2B, e estes inferiores aos valores dos tratamentos L3A e L3B. Como os tratamentos L2A e L2B receberam 50% da lâmina aplicada nos tratamentos L1A e L1B e os tratamentos L3A e L3B receberam 150% da lâmina aplicada nos tratamentos L1A e L1B, conseqüentemente os valores de Ks determinados pelo SISDA 3.5 foram maiores para os tratamentos que receberam mais água, propiciando maiores valores da ETr.

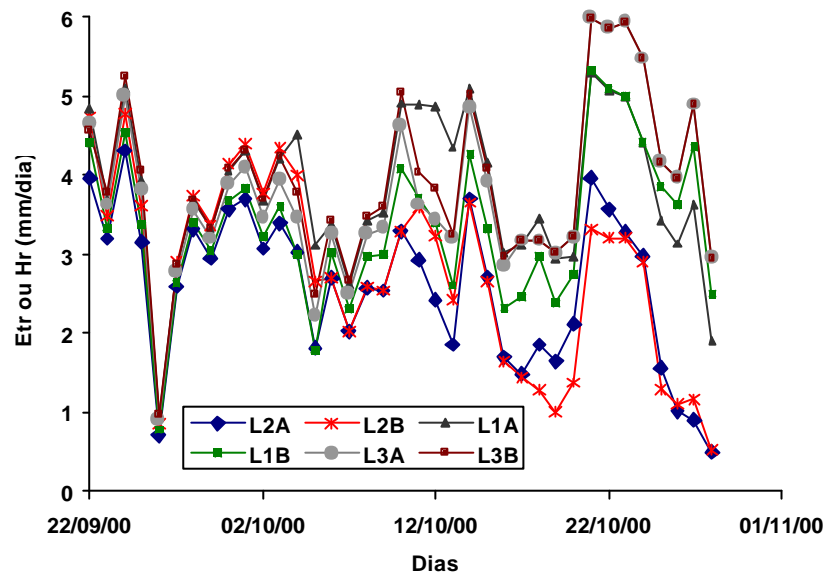


Figura 9 – Evapotranspiração real da cultura ou lâmina requerida ocorrida entre 22/09/2000 e 28/10/2000, para os tratamentos.

As Figura 10, 11 e 12 ilustram a evolução dos valores diários de evapotranspiração real da cultura (ETr), correspondente ao período de 22 de setembro a 28 de outubro, para os tratamentos L1A e L1B; L2A e L2B; e L3A e L3B, respectivamente.

Observou-se na Figura 10 que os valores da ETr para os tratamentos L1A e L1B foram similares. O tratamento L1A apresentou valores pouco superiores aos do tratamento L1B, com exceção aos valores dos dias 25, 26, 27 e 28 de outubro. Os dois tratamentos receberam a mesma lâmina bruta, porém com coeficientes de uniformidade diferentes, ou seja, no tratamento L1B

algumas áreas receberam maior quantidade de água que outras. A diferença na uniformidade de distribuição propiciou conteúdos médios de umidade no solo diferentes para os dois tratamentos, e como esses e as lâminas líquidas foram cadastrados no SISDA 3.5, os valores de Ks gerados não foram iguais. O mesmo comportamento foi observado na Figura 11 para os tratamentos L2A e L2B, porém o tratamento L2B apresentou valores pouco superiores aos do tratamento L2A até o dia 13 de outubro.

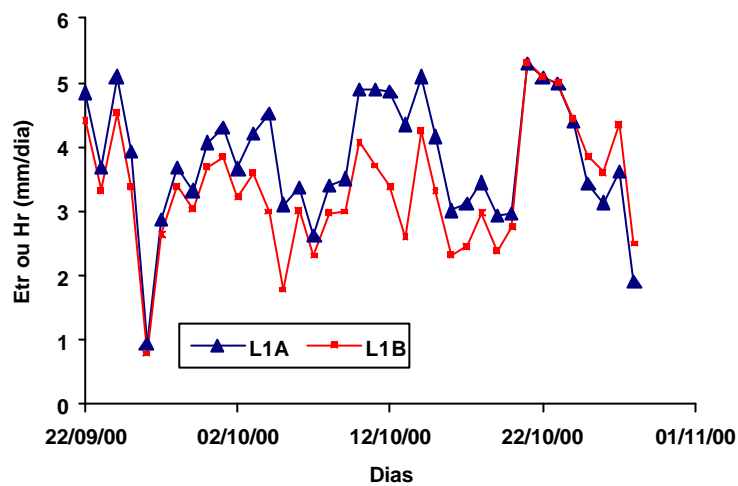


Figura 10 – Evapotranspiração real da cultura ou lâmina requerida ocorrida entre 22/09/2000 e 28/10/2000, para os tratamentos.

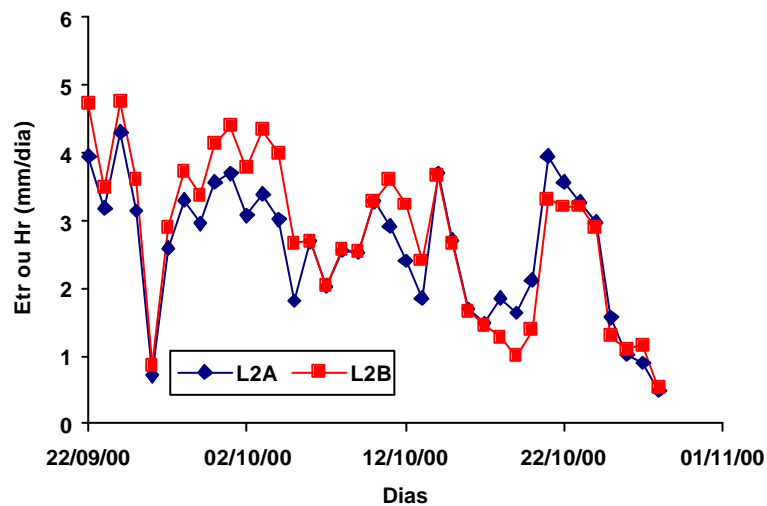


Figura 11 – Evapotranspiração real da cultura ou lâmina requerida ocorrida entre 22/09/2000 e 28/10/2000, para os tratamentos L2A e L2B.

Observou-se na Figura 12 que os valores da ETr para os tratamentos L3A e L3B foram praticamente iguais. Nestes dois tratamentos não foram coletadas amostras de solo, uma vez que a lâmina aplicada foi 150% da lâmina aplicada ao tratamento L1A. No SISDA 3.5 apenas foi cadastrada a lâmina líquida média de cada tratamento, após cada irrigação, e os valores de Ks gerados foram praticamente iguais.

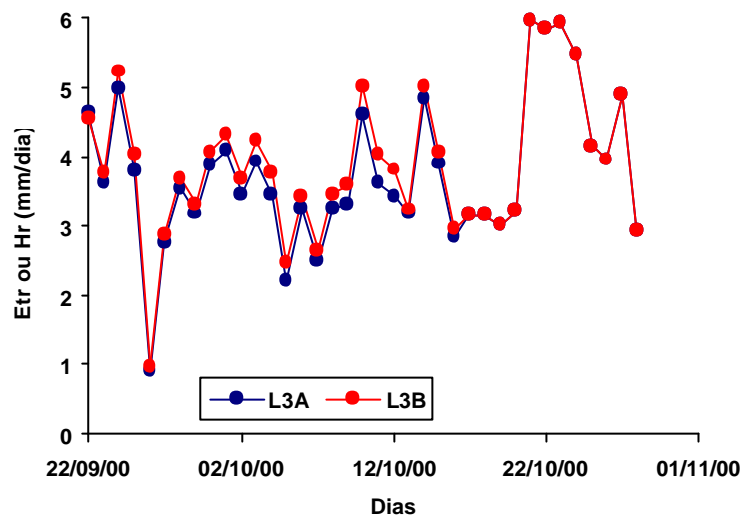


Figura 12 – Evapotranspiração real da cultura ou lâmina requerida ocorrida entre 22/09/2000 e 28/10/2000, para os tratamentos L3A e L3B.

As lâminas requeridas totais durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro, em cada tratamento, estão apresentadas na Figura 14. Os valores de lâmina requerida foram 140,62; 124,14; 95,93; 102,82; 139,11; e 144,11 mm, referentes aos tratamentos L1A e L1B, L2A e L2B, L3A e L3B, respectivamente.

Os valores diários da evapotranspiração de referência e lâmina requerida para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A, L3B, durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro, estão apresentados no Quadro 1B.

Observou-se na Figura 13 que não houve aumento significativo da lâmina requerida entre os tratamentos L1A e L3A. Como no tratamento L1A foi aplicada a lâmina necessária para a umidade do solo retornar à capacidade de campo e no tratamento L3A a lâmina aplicada foi 50% superior, os valores de

Ks gerados pelo SISDA 3.5 foram similares. É importante ressaltar que nos tratamentos L3A e L3B não foram coletadas amostras de solo, ficando impossível o cadastro semanal no SISDA 3.5 do conteúdo de água no solo, como foi efetuado nos outros tratamentos.

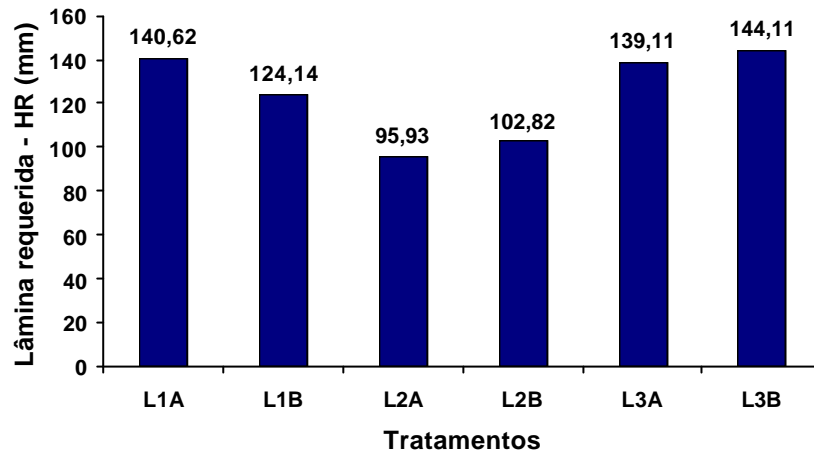


Figura 13 – Lâminas requeridas durante o período de 22/09/2000 a 28/10/2000, para os tratamentos.

4.2.4. Fração da evapotranspiração máxima que é repostada por outras fontes (p)

Conforme metodologia descrita no item 3.2.7, a fração da evapotranspiração máxima que é repostada por outras fontes diferentes da irrigação foi determinada mediante o uso do software SISDA 3.5.

As Figuras 14, 15, 16 e 17 ilustram os valores da umidade no solo determinados semanalmente, nas profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, entre o período de 22 de setembro a 28 de outubro, para os tratamentos L1A, L1B, L2A e L2B, respectivamente. Os valores do teor de umidade no solo para os tratamentos L3A e L3B não foram determinados, pois nestes tratamentos a lâmina aplicada foi 50% superior à requerida pela cultura.

O perfil de umidade no solo apresentado nas Figuras 14, 15, 16 e 17 permite verificar se houve ou não ascensão de água proveniente de camadas mais profundas que a explorada pela zona radicular. Por meio das amostras

retiradas em todos os blocos de todos os tratamentos durante a condução do experimento, verificou-se que a profundidade explorada pelas raízes foi de 33 cm. Como o conteúdo de água no solo foi determinado até a profundidade de 60 cm, foi possível verificar se o conteúdo de água no solo da camada de 40 a 60 cm de profundidade se deslocou para as camadas superiores.

Observou-se na Figura 14 que durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro a umidade do solo na camada de 40 a 60 cm do tratamento L1A manteve-se praticamente inalterado e próximo à capacidade de campo e acompanhou as pequenas alterações ocorridas na camada de 20 a 40 cm. No dia 27 de setembro o conteúdo de água no solo das camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm se igualaram, devido à precipitação de 10,6 mm ocorrida no dia 26 de setembro. Comportamento semelhante foi observado na Figura 15, para os tratamentos L1B, porém mesmo com a precipitação ocorrida no dia 26 de setembro a umidade do solo da camada de 0 a 20 cm não se igualou ao da camada de 20 a 40 cm. A redução do conteúdo de água no solo ocorrida na camada de 40 a 60 cm, do dia 4 de outubro para o dia 11 de outubro, não representou contribuição para a camada de 20 a 40 cm, pois a umidade nesta camada manteve-se praticamente constante e o conteúdo de água no solo da camada de 40 a 60 cm no dia 4 de outubro estava acima da capacidade de campo, o que indica que esta redução pode ter sido provocada pela percolação dessa água para camadas mais profundas.

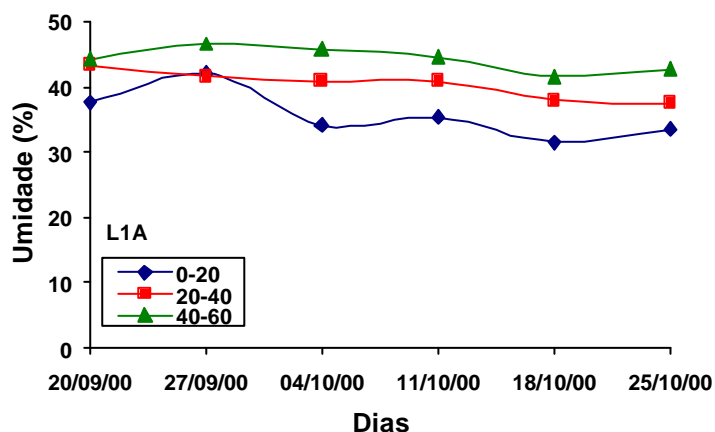


Figura 14 – Teor de umidade do solo medido semanalmente, durante o período de 22/09/2000 a 28/10/2000, para o tratamento L1A.

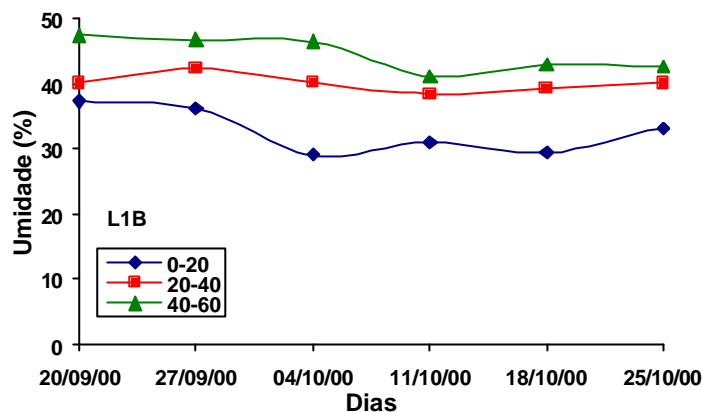


Figura 15 – Teor de umidade do solo medido semanalmente, durante o período de 22/09/2000 a 28/10/2000, para o tratamento L1B.

Observou-se na Figura 16 que durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro o teor de umidade no solo na camada de 40 a 60 cm do tratamento L2A manteve-se praticamente inalterado e próximo à capacidade de campo. Novamente, no dia 27 de setembro, o conteúdo de água no solo das camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm se igualaram, devido à precipitação de 10,6 mm ocorrida no dia 26 de setembro. A redução do conteúdo de água no solo ocorrida na camada de 40 a 60 cm, do dia 11 de outubro para o dia 18 de outubro, também não representou contribuição para a camada de 20 a 40 cm, pois a umidade nessa camada manteve-se praticamente constante e o conteúdo de água no solo da camada de 40 a 60 cm no dia 11 de outubro estava acima da capacidade de campo, o que indica também que esta redução pode ter sido provocada pela percolação dessa água para as camadas mais profundas. O mesmo comportamento foi observado na Figura 17, para os tratamentos L2B, porém também mesmo com a precipitação ocorrida no dia 26 de setembro o conteúdo de umidade no solo da camada de 0 a 20 cm não se igualou ao da camada de 20 a 40 cm. A redução do conteúdo de água no solo ocorrida na camada de 40 a 60 cm, do dia 4 de outubro para o dia 11 de outubro, também não representou contribuição para a camada de 20 a 40 cm, pois a umidade nessa camada manteve-se praticamente constante e o conteúdo de água no solo da camada de 40 a 60 cm no dia 4 de outubro estava acima da capacidade de campo, indicando também que esta redução

pode ter sido provocada pela percolação dessa água para camadas mais profundas.

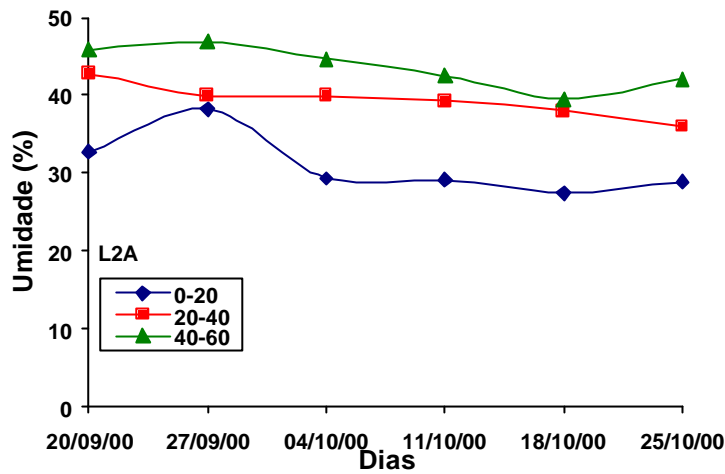


Figura 16 – Teor de umidade do solo medido semanalmente, durante o período de 22/09/2000 a 28/10/2000, para o tratamento L2A.

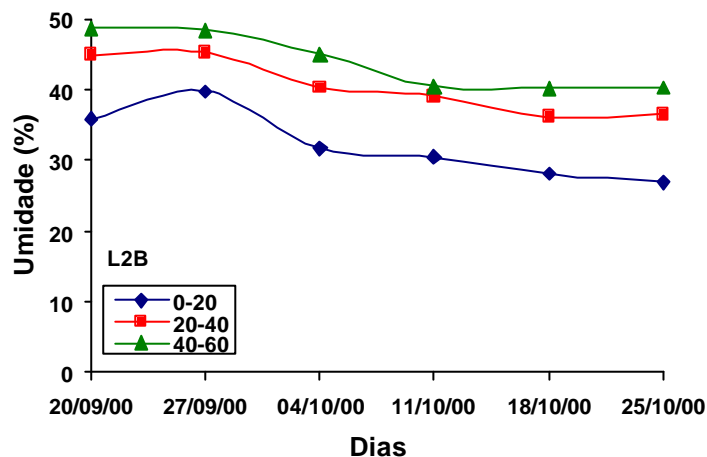


Figura 17 – Teor de umidade do solo medido semanalmente, durante o período de 22/09/2000 a 28/10/2000, para o tratamento L2B.

Por meio da discussão apresentada das Figuras 14, 15, 16 e 17, conclui-se que não ocorreu ascensão de água de camadas mais profundas para as camadas exploradas pela zona radicular da cultura.

A evapotranspiração máxima da cultura (ETM) foi calculada pelo produto da evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo método de Penman-Monteith, através do software SISDA 3.5, pelo coeficiente de cultivo (K_c).

A Figura 18 ilustra a evolução dos valores diários da ETM, correspondente ao período de 22 de setembro a 28 de outubro. A ETM acompanhou o comportamento da ETo, discutido anteriormente. O menor valor foi de 1,38 mm/dia e ocorreu no dia 26 de setembro, o maior valor foi de 7,1 mm/dia e ocorreu no dia 27 de outubro.

Os valores diários da evapotranspiração máxima da cultura, durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro, estão apresentados no Quadro 2B.

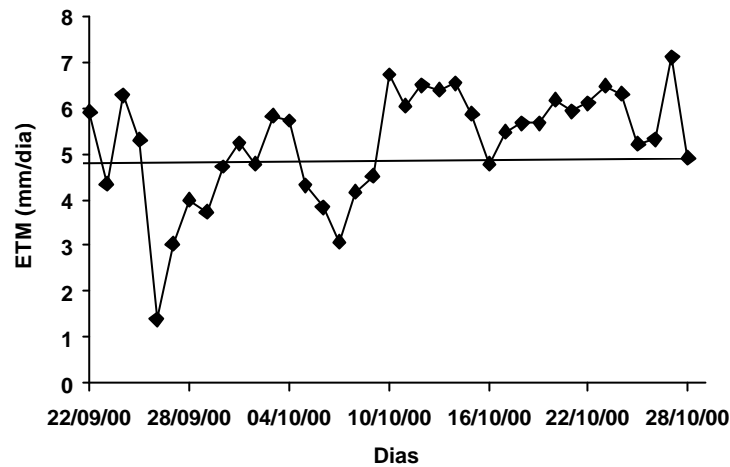


Figura 18 – Evapotranspiração máxima da cultura ocorrida entre 22/09/2000 e 28/10/2000.

A Figura 19 ilustra as precipitações ocorridas durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro.

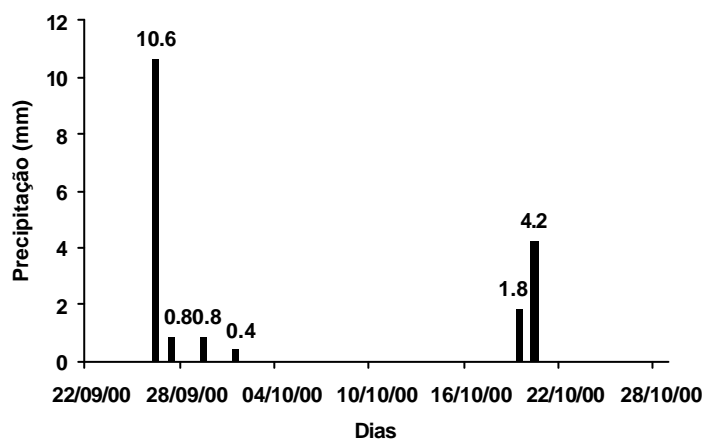


Figura 19 – Precipitação ocorrida entre 22/09/2000 e 28/10/2000.

Observou-se na Figura 19 que durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro ocorreram precipitações nos dias 26, 27 e 29 de setembro e nos dias 19 e 20 de outubro, de 10,6; 0,8; 0,8; 0,4; 1,8; e 4,2 mm, respectivamente. Foi necessário verificar a quantidade de água proveniente da precipitação que foi aproveitada pela cultura em cada tratamento, pois eles apresentavam conteúdos de águas no solo específicos, em função da lâmina de irrigação aplicada e da uniformidade.

As Figuras 20, 21 e 22 ilustram as precipitações efetivas ocorridas durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro e o excesso de água no solo, para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B; L3A, e L3B, respectivamente.

Os valores de precipitação efetiva e o excesso de água no solo (percolação) foram determinados pelo software SISDA 3.5, conforme metodologia descrita no item 3.2.7. O cadastro de lâminas líquidas de irrigação e de valores de umidades (determinados semanalmente em cada tratamento), no SISDA 3.5, possibilitou uma boa estimativa dos valores de excesso de água no solo para cada tratamento.

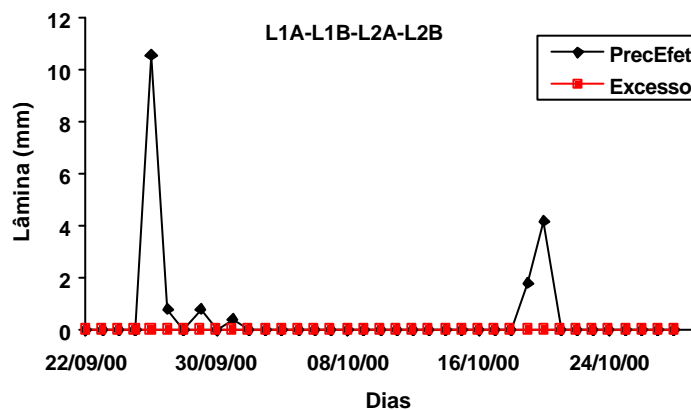


Figura 20 – Precipitação efetiva e excesso de água no solo ocorridos entre 22/09/2000 e 28/10/2000, para os tratamentos L1A, L1B, L2A e L2B.

Observou-se na Figura 20 que durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro, para os tratamentos L1A, L1B, L2A e L2B, o excesso de água no solo foi nulo, e conclui-se que não ocorreram percolações de água para as camadas mais profundas, portanto toda a precipitação ocorrida no período foi aproveitada pela cultura.

Observou-se na Figura 21 que durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro, para o tratamento L3A, ocorreu percolação de água para as camadas mais profundas nos dias 20 e 28 de outubro, respectivamente de 12,64 e 8,67 mm, provocada principalmente pelas grandes lâminas de água aplicadas nesses dias. Neste tratamento a lâmina aplicada foi 50% superior à lâmina requerida pela cultura, ou seja, 50% superior à lâmina aplicada no tratamento L1A. Como no dia 20 de outubro ocorreu precipitação de 4,2 mm, esta não foi aproveitada pela cultura.

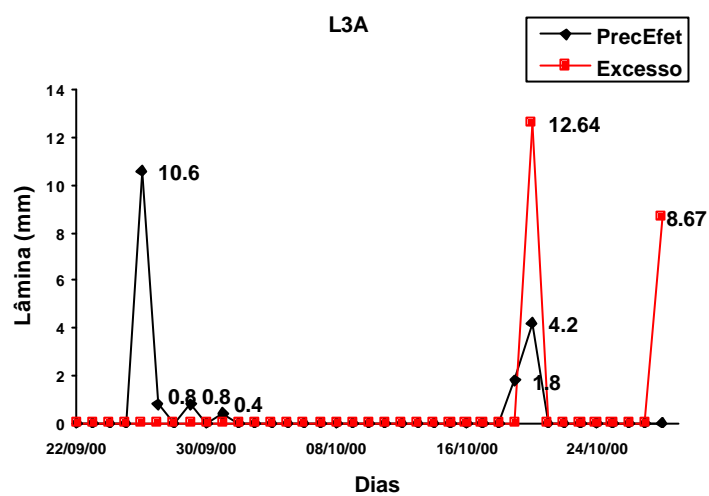


Figura 21 – Precipitação efetiva e excesso de água no solo ocorridos entre 22/09/2000 e 28/10/2000, para o tratamento L3A.

Observou-se na Figura 22 que durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro, para o tratamento L3B, também ocorreu percolação de água a camadas mais profundas nos dias 20 e 28 de outubro, respectivamente de 13,25 e 10,65 mm, também provocada principalmente pelas grandes lâminas de água aplicadas nestes dias. Neste tratamento a lâmina aplicada foi igual à aplicada no tratamento L3A, porém com baixa uniformidade de distribuição de água. Novamente a precipitação de 4,2 mm ocorrida no dia 20 de outubro não foi aproveitada pela cultura.

Como não ocorreu ascensão de água de camadas mais profundas para as camadas exploradas pela zona radicular, além da irrigação, a outra fonte de água que contribuiu para o desenvolvimento da cultura foi a água proveniente

da diferença entre a precipitação efetiva e o excesso de água no solo ocorridos no dia da precipitação.

No Quadro 3 estão apresentados os valores totais da evapotranspiração máxima da cultura (ETM), as diferenças entre a precipitação efetiva e o excesso de água no solo, a fração da evapotranspiração máxima repostada por outras fontes de água (p) e a fração da evapotranspiração máxima repostada pela irrigação (1-p), para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro.

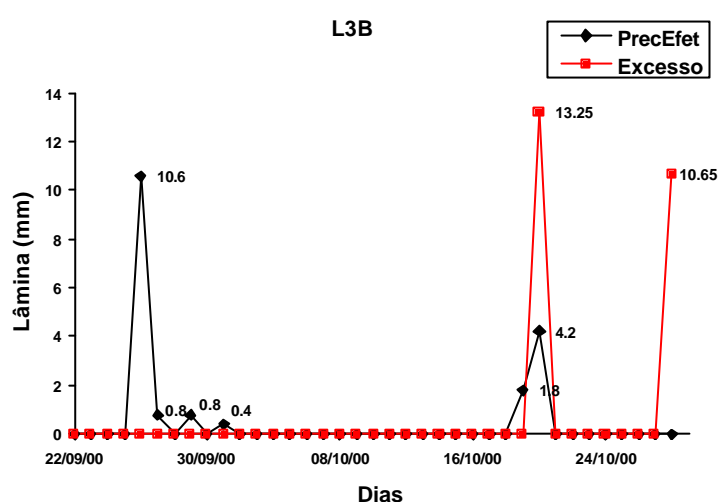


Figura 22 – Precipitação efetiva e excesso de água no solo ocorridos entre 22/09/2000 e 28/10/2000, para o tratamento L3B.

Quadro 3 – Evapotranspiração máxima da cultura (ETM), precipitação efetiva, excesso de água no solo, fração da evapotranspiração máxima repostada por outras fontes de água (p) e fração da evapotranspiração máxima repostada pela irrigação, para os tratamentos (1-p)

	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B
ETM (mm)	192,97	192,97	192,97	192,97	192,97	192,97
PrecEfet – Excesso (mm)	18,60	18,60	18,60	18,60	14,40	14,40
P	0,0964	0,0964	0,0964	0,0964	0,0746	0,0746
1-p	0,9036	0,9036	0,9036	0,9036	0,9254	0,9254

Verificou-se no Quadro 3 que a irrigação contribuiu com 90,36% de toda a água precipitada nos tratamentos L1A, L1B, L2A e L2B e com 92,54% nos tratamentos L3A e L3B, durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro.

4.2.5. Coeficiente de déficit

Devido aos problemas operacionais ocorridos durante as irrigações os coeficientes de déficit, considerando o perfil de distribuição de água pelos aspersores como uniforme (Cd Uniforme) e normal (Cd Normal), foram estimados para todos os tratamentos, com os valores de lâmina bruta de irrigação e lâmina requerida pela cultura e o coeficiente de uniformidade de Christiansen apresentados anteriormente e estão apresentados no Quadro 4. Recomenda-se estimar os coeficientes de déficit com os valores de lâmina coletada, pois os efeitos da evaporação e arraste devem ser considerados. Caso utilizasse a lâmina coletada o valor de (x_i) seria negativo e as equações 71 e 126 não poderiam ser utilizadas e o coeficiente de déficit deveria ser estimado com o uso da equação 74, conforme metodologia descrita anteriormente.

Considerando o perfil de distribuição de água pelos aspersores como uniforme, os coeficientes de déficit para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B foram calculados com a equação 70. Foi necessário verificar se o valor da área adequadamente irrigada (x_i) , calculada pela equação 67, não era negativo ou maior do que 1. Caso o valor de (x_i) fosse negativo, a equação 70 não poderia ser utilizada e o coeficiente de déficit deveria ser estimado com o uso da equação 74, conforme metodologia descrita anteriormente. Caso o valor de (x_i) fosse maior do que 1, a equação 70 poderia ser utilizada, porém seria necessário considerar uma área adequadamente irrigada (x_i) igual a 1. Para o tratamento L3A foi verificado que o valor de (x_i) foi maior que 1, por isto o coeficiente de déficit foi estimado com a equação 70 e com uma relação lâmina bruta e requerida pela cultura que proporcionasse um valor de x igual ou muito próximo de 1.

Considerando o perfil de distribuição de água pelos aspersores como normal, os coeficientes de déficit para os tratamentos L1A, L1B, L2B, L3A e

L3B foram obtidos por meio da equação 132. Para o tratamento L2A, o coeficiente foi obtido pela equação 74, pois o valor da área adequadamente irrigada (x_i) calculado pela equação 126 ficou negativo.

Foi verificado que o coeficiente de déficit desenvolvido, considerando o perfil de distribuição de água pelos aspersores como normal, pode apresentar valores incoerentes, à medida que o valor de x_i se aproxima de 1. Tal fato ocorre pois o modelo de distribuição normal não apresenta valores mínimos e máximos, a função é definida entre $-\infty$ e $+\infty$ e o resultados das integrações propostas por WALKER (1979) e ANYOJI (1994) apresentam um nível de erro deslocado para estas extremidades. Foi verificado no tratamento L3A, com uma relação entre lâmina bruta e lâmina requerida de 1,67, uma área adequadamente irrigada (x_i) calculada pela equação 126 de 0,9965 e um CUC de 88,64%, que o valor do coeficiente de déficit gerado pela equação 132 foi de 0,0926. Porém, para o valor de x de 0,9965, o coeficiente de déficit gerado estava dentro da faixa de imprecisão do modelo. O coeficiente de déficit deve diminuir à medida que o valor de x aumenta, e dentro da faixa de imprecisão do modelo, o coeficiente aumenta com o aumento de x . Para o tratamento L3A, o coeficiente de déficit considerado foi o menor coeficiente gerado pela equação 132, antes que o modelo se tornasse instável. Para isso, o coeficiente de déficit foi gerado ao considerar um CUC de 88,64% e uma relação lâmina bruta e lâmina requerida variando de 1 a 2. O valor do coeficiente encontrado, antes que o modelo se torne instável, foi de 0,0362. Também foi verificado para o tratamento L3B, que o valor do coeficiente de déficit gerado pela equação 132, encontrava-se dentro da faixa de imprecisão do modelo. Neste tratamento, o coeficiente de déficit considerado foi o menor coeficiente gerado pela equação 132, antes que o modelo se tornasse instável. Para isto o coeficiente de déficit foi gerado ao considerar um CUC de 69,62% e uma relação lâmina bruta e lâmina requerida variando de 1 a 2. O valor do coeficiente encontrado, antes que o modelo se torne instável, foi de 0,1165.

Quadro 4 – Coeficiente de déficit uniforme e normal para os tratamentos

	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B
Cd Uniforme	0,0430	0,0870	0,1944	0,2779	0,000018	0,0346
Cd Normal	0,0544	0,1171	0,1900	0,3608	0,0362	0,1165

Observou-se no Quadro 4 que os valores do Cd Normal gerados pela equação 132 apresentaram valores superiores aos valores do Cd Uniforme, para os tratamentos L1A, L1B, L2B, L3a e L3B. Para o tratamento L2A, o Cd Normal foi gerado pela equação 74, e foi 2,26% inferior ao Cd Uniforme. Comparando as Figuras 5 e 6, conclui-se que a área de déficit para o modelo de distribuição normal é maior do que a área de déficit para o modelo de distribuição uniforme, pois o modelo normal é definido entre $-\infty$ e $+\infty$. Como o coeficiente de déficit é definido como a razão entre déficit de água (H_D) no solo e a lâmina de água requerida pela cultura (H_R), era de se esperar maiores valores para o Cd Normal.

A Figura 23 ilustra o coeficiente de déficit uniforme e normal para os tratamentos. Observou-se nessa figura que as maiores diferenças entre os coeficientes de déficit normal e uniforme ocorreram nos tratamentos L2B e L3B, que apresentaram relação lâmina bruta e requerida pela cultura de 0,75 e 1,61 e um coeficiente de uniformidade de 67,30 e 69,62%, respectivamente. Para os tratamentos L1A, L2A e L3A, com uniformidade acima de 80%, os valores dos coeficientes de déficit normal e uniforme ficaram mais próximos.

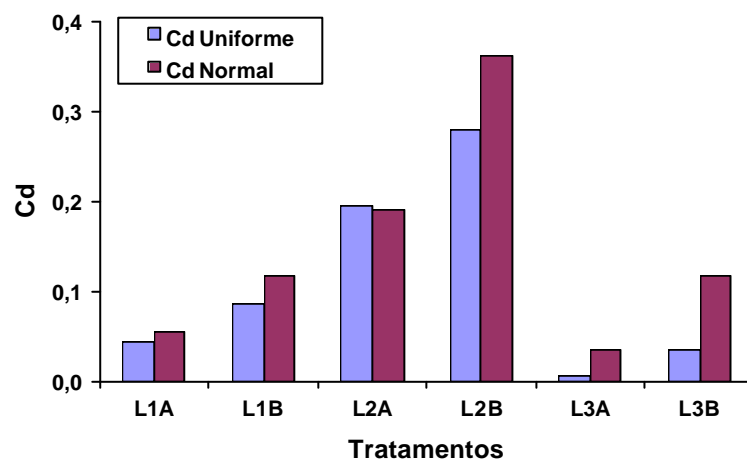


Figura 23 – Coeficiente de déficit uniforme e normal para os tratamentos.

4.2.6. Comparação dos resultados

Os resultados da produtividade dos tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B, obtida no experimento realizado na Estação Experimental de

Coimbra, durante o período de 10 de agosto a 17 de novembro de 2000, foram comparados com os resultados obtidos ao utilizar o modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993), utilizando o coeficiente de déficit, considerando o perfil de distribuição da água pelos aspersores como uniforme e normal.

Conforme metodologia apresentada, o rendimento máximo da cultura (Y_{max}) e o coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (β) considerados foram de 3.000 kg ha e 1,15, respectivamente. Os valores da fração da evapotranspiração máxima repostada por outras fontes (p) e dos coeficientes de déficit uniforme e normal utilizados no modelo de função de produção foram os valores apresentados anteriormente.

No Quadro 5 estão apresentados os valores da produtividade obtida no experimento, a produtividade simulada com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, os erros e o rendimento relativo simulado com os coeficientes de déficit uniforme e normal, para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B.

A Figura 24 ilustra a produtividade obtida no experimento e a produtividade simulada com o modelo, utilizando coeficiente de déficit uniforme e normal, para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B.

A Figura 25 ilustra o erro dos valores de produtividade simulados comparados aos obtidos experimentalmente, para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A e L3B.

A Figura 26 ilustra o rendimento relativo simulado com os coeficientes de déficit uniforme e normal.

Quadro 5 – Produtividade obtida no experimento, produtividade simulada com o modelo, utilizando coeficiente de déficit uniforme e normal, erro e rendimento relativo simulado com os coeficientes de déficit uniforme e normal, para os tratamentos

	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B
Produtividade-Campo (kg ha)	2.576,4	2.228,7	1.206,9	1.693,2	3.401,4	3.189,6
Produtividade- Cd Uniforme (kg ha)	2.866,0	2.728,6	2.393,9	2.133,7	2.999,9	2.889,6
Produtividade- Cd Normal (kg ha)	2.830,4	2.634,9	2.407,7	1.875,1	2.884,5	2.628,1
Erro-Cd Uniforme (%)	11,2	22,4	98,4	26,0	-11,8	-9,4
Erro-Cd Normal (%)	9,9	18,2	99,5	10,7	-15,2	-17,6
Y/Ymax-Cd Uniforme	0,9553	0,9095	0,7980	0,7112	0,99998	0,9632
Y/Ymax-Cd Normal	0,9435	0,8783	0,8026	0,6250	0,9615	0,8760

Observou-se no Quadro 5 que para os tratamentos L1A, L1B e L2B, os valores de produtividade simulada pelo modelo, utilizando o Cd Normal, foram mais próximos aos obtidos em campo do que os valores simulados, utilizando o Cd Uniforme. As produtividades simuladas pelo modelo, utilizando o Cd Uniforme e Normal, foram respectivamente para o tratamento L1A de 2866,0 e 2830,4 kg ha⁻¹, para o tratamento L1B de 2728,6 e 2634,9 kg ha⁻¹ e para o tratamento L2B de 2133,7 e 1875,1 kg ha. Conforme apresentado anteriormente, o Cd Normal apresentou maiores valores do que o Cd Uniforme, o que significa que os valores de produtividade simulada com o Cd Normal serão sempre inferiores aos valores simulados com o Cd Uniforme. Como o rendimento máximo considerado foi de 3.000 kg ha e os tratamentos L1A, L1B, L2B apresentaram um rendimento experimental de 2.576,4; 2.228,7; e 1.693,2 kg ha⁻¹, respectivamente, os valores de produtividade simulada com o Cd Uniforme se aproximaram mais do rendimento máximo e se distanciaram mais dos valores obtidos experimentalmente do que os valores simulados com o Cd Normal. Para o tratamento L2A, que apresentou um rendimento experimental de 1206,9 kg ha, o Cd Normal gerado pela equação 74 foi inferior ao Cd Uniforme, portanto a produtividade simulada com o Cd Uniforme apresentou melhor resultado. Neste tratamento, as produtividades simuladas pelo modelo, utilizando o Cd Uniforme e Normal, foram de 2.393,9 e 2.407,7 kg ha⁻¹, respectivamente.

Para os tratamentos L3A e L3B, os valores de produtividade simulada pelo modelo, utilizando o Cd Uniforme, foram mais próximos aos obtidos em campo do que os valores simulados com o Cd Normal. As produtividades simuladas pelo modelo, utilizando o Cd Uniforme e Normal, foram respectivamente para o tratamento L3A de 2.999,9 e 2.884,5 kg ha e para o tratamento L3B de 2.889,6 e 2.628,1 kg ha. Neste caso, os tratamentos L3A, L3B apresentaram um rendimento experimental de 3.401,4 e 3.189,6 kg ha, respectivamente, e os valores de produtividade simulada com o Cd Uniforme, que se aproximam mais do rendimento máximo de 3.000 kg ha, se aproximaram mais dos valores obtidos experimentalmente do que os valores simulados com o Cd Normal.

Observou-se nas Figuras 24 e 25 que as maiores diferenças entre as produtividades simuladas pelo modelo, utilizando o Cd Normal e Uniforme, e a produtividade experimental ocorreram no tratamento L2A. Estas simulações superestimaram os resultados experimentais, apresentando um erro de 99,5 e 98,4%, respectivamente. As melhores simulações com o Cd Normal e Uniforme ocorreram nos tratamentos L1A e L3B, respectivamente, superestimando e subestimando em 9,9 e 9,4%.

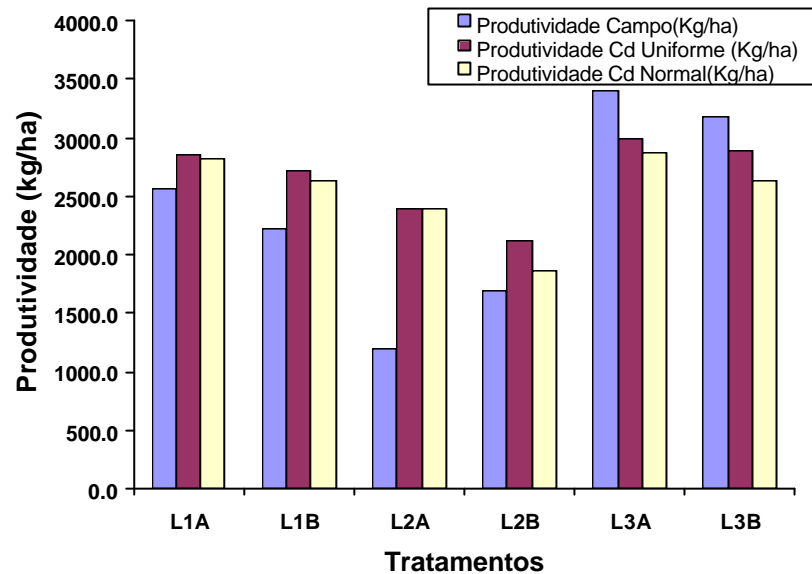


Figura 24 – Produtividade obtida no experimento e produtividade simulada com o modelo, utilizando coeficiente de déficit uniforme e normal, para os tratamentos.

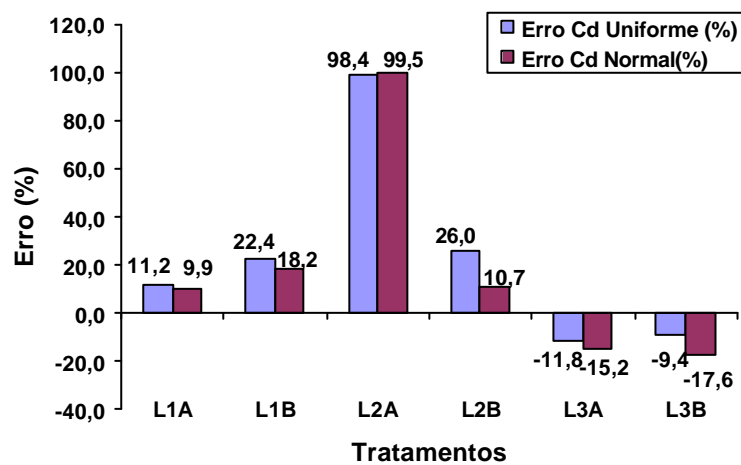


Figura 25 – Erro dos valores de produtividade simulados, comparados aos obtidos experimentalmente, para os tratamentos.

Observou-se na Figura 26 que o rendimento relativo simulado com o Cd Normal foi menor do que o simulado com o Cd Uniforme, para os tratamentos L1A, L1B, L2B, L3A e L3B. Conforme discutido anteriormente, o Cd Normal apresentou maiores valores do que o Cd Uniforme, o que significa que o rendimento relativo simulado com o Cd Normal será sempre inferior ao valor simulado com o Cd Uniforme. Para o tratamento L2A, o Cd Normal gerado pela equação 74 foi inferior ao Cd Uniforme, portanto o rendimento relativo simulado com o Cd Uniforme foi menor. Como para os tratamentos L1A, L2A e L3A, com uniformidade acima de 80%, os valores dos coeficientes de déficit normal e uniforme ficaram mais próximos, os rendimentos relativos simulados com o Cd Normal e Uniforme apresentaram as menores diferenças.

Para os tratamentos em que foi aplicada a mesma quantidade de água, o aumento da uniformidade propiciou o aumento do rendimento relativo, ou seja, os valores do rendimento relativo simulados com o Cd Normal e Uniforme foram superiores aos rendimentos relativos simulados para condições de maior uniformidade. Estes resultados coincidem com os resultados encontrados por MANTOVANI et al (1995) e LI (1998).

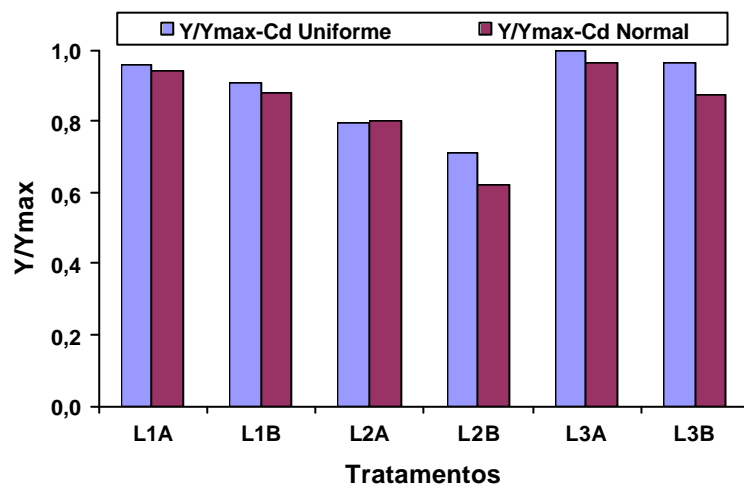


Figura 26 – Rendimento relativo simulado com os coeficientes de déficit uniforme e normal, para os tratamentos.

4.3. Função de produção

As funções de produção para a cultura do feijão foram desenvolvidas com o uso do modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI

(1993), com os coeficientes de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como uniforme e normal. Foram considerados três níveis de uniformidade de distribuição de água, correspondente aos valores de CUC de 65, 80 e 95%, respectivamente, cinco níveis da fração da evapotranspiração máxima que é repostada por outras fontes, correspondente aos valores de p de 0; 0,25; 0,5; 0,75; e 0,95, respectivamente, e um coeficiente de sensibilidade da cultura do feijão ao déficit hídrico (β) de 1,15. As funções foram geradas nessas condições, para um intervalo de 0 a 2 da relação entre a lâmina bruta ou lâmina coletada de irrigação e a lâmina requerida pelas culturas.

4.3.1. Rendimento relativo (Y/Y_{max})

Para gerar o rendimento relativo por meio do modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993), foi necessário calcular os valores de Cd Normal e Cd Uniforme para os três níveis de uniformidade descritos anteriormente e dentro do intervalo de 0 a 2 da relação entre a lâmina bruta de irrigação e a lâmina requerida pelas culturas. Novamente, verificou-se se o valor da área adequadamente irrigada (x_i), calculada pela equação 67 e 126, respectivamente, para um perfil de distribuição de água dos aspersores uniforme e normal, não era negativo ou maior do que 1. Quando os valores de (x_i) foram negativos, as equações 70 e 132 não foram aplicadas e os valores do Cd Normal e Cd Uniforme foram gerados pela equação 74, conforme metodologia descrita anteriormente. Quando o valor de (x_i) foi maior que 1, os valores do rendimento relativo simulado com o Cd Uniforme não foram considerados. Como foi verificado que o coeficiente de déficit desenvolvido, considerando o perfil de distribuição de água pelos aspersores como normal, apresenta valores incoerentes à medida que o valor de x se aproxima de 1, conforme descrito anteriormente, os valores do rendimento relativo simulados nesta faixa de imprecisão do modelo também não foram considerados.

As Figuras 27, 28, 29, 30 e 31 ilustram o rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para três níveis de uniformidade de distribuição de água (CUC de 65, 80 e 95%) e para a fração da

evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes, p de 0; 0,25; 0,5; 0,75; e 0,95, respectivamente.

Nos Quadros 3B, 4B, 5B, 6B e 7B estão apresentados os valores do rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para três níveis de uniformidade de distribuição de água (CUC de 65, 80 e 95%) e para a fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes, p de 0; 0,25; 0,5; 0,75; e 0,95, respectivamente.

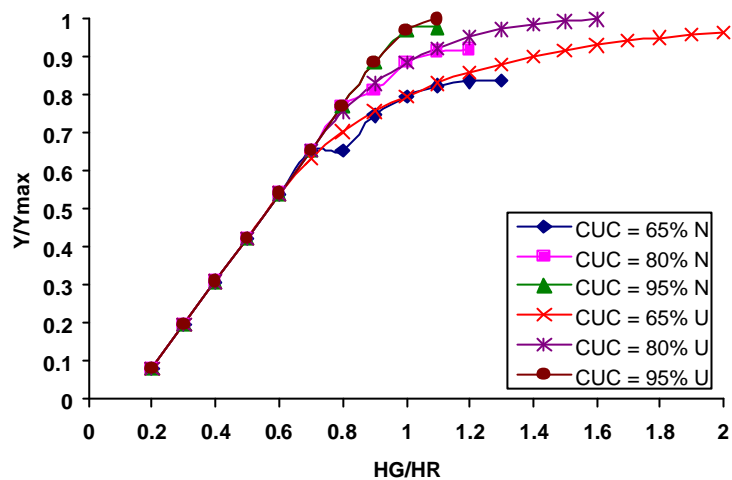


Figura 27 – Rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0$.

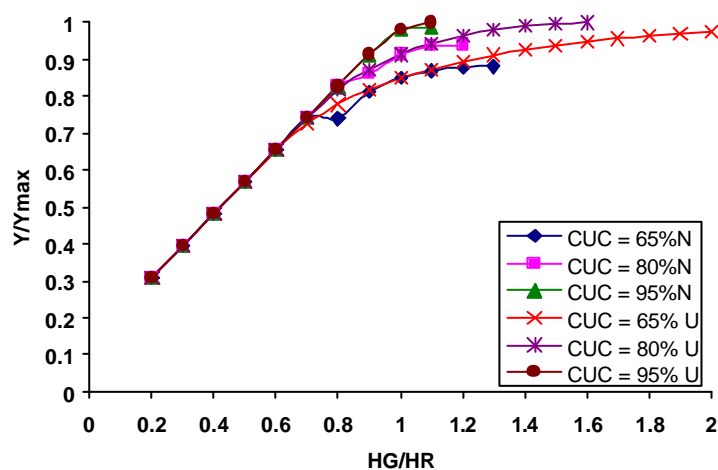


Figura 28 – Rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,25$.

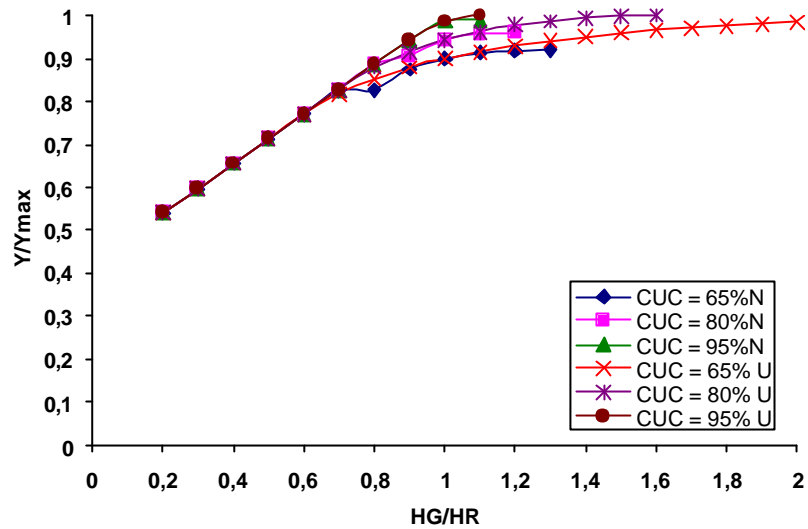


Figura 29 – Rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,5$.

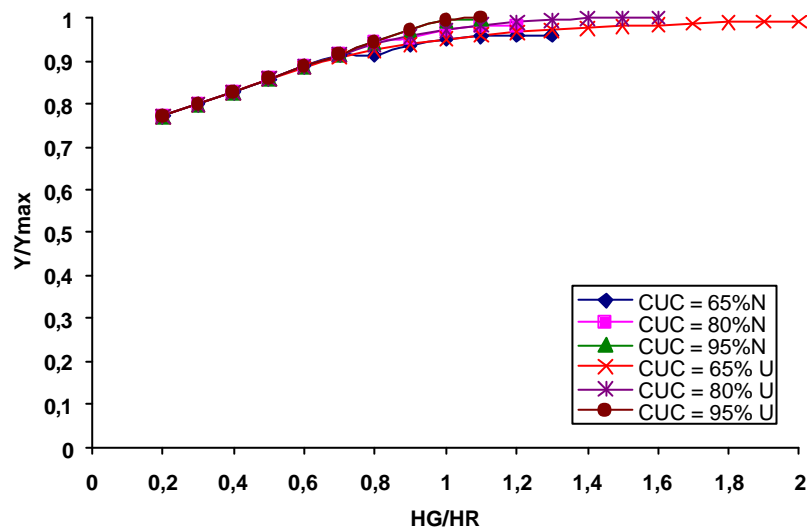


Figura 30 – Rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,75$.

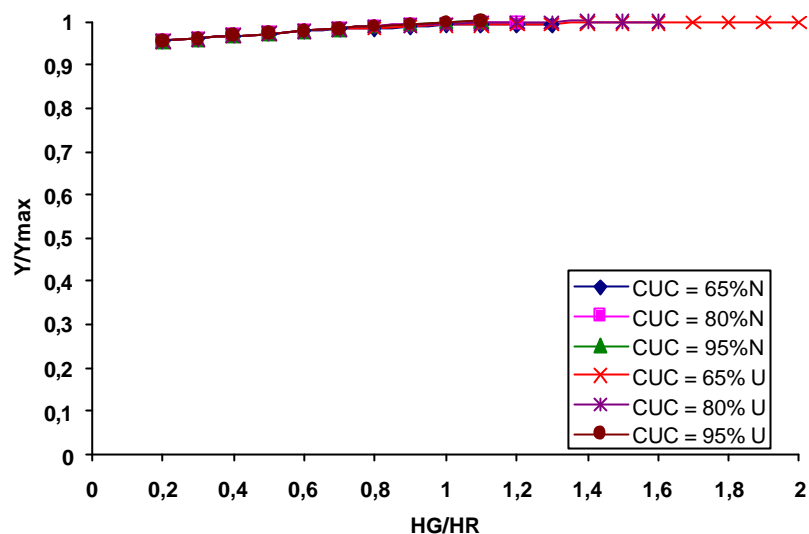


Figura 31 – Rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,95$.

Observou-se nas Figuras 27, 28, 29, 30 e 31 que os valores do rendimento relativo simulados pelo modelo, utilizando o Cd Normal gerado pela equação 132, foram sempre inferiores aos valores simulados com o Cd Uniforme gerado pela equação 70. Com este resultado conclui-se que o Cd Normal gerado pela equação 132 foi sempre superior ao Cd Uniforme gerado pela equação 70, pois para simular o rendimento relativo o coeficiente de déficit foi a única variável dependente do CUC e da relação lâmina bruta de irrigação e requerida pela cultura. Quando o Cd Normal e o Cd Uniforme foram gerados pela equação 74, não houve diferença entre os valores de rendimento relativo simulados com Cd Normal e Cd Uniforme.

Para um mesmo valor da fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes (p), essas diferenças diminuíram com o aumento da uniformidade, e para um mesmo nível de uniformidade estas diferenças diminuíram com o aumento do valor de (p).

Observou-se também nas Figuras 27, 28, 29, 30 e 31 que para uma mesma relação lâmina bruta de irrigação e lâmina requerida pela cultura o aumento da uniformidade propiciou o aumento do rendimento relativo simulado tanto com o Cd Normal como com o Cd Uniforme, e que em condições de

baixa uniformidade é necessário aumentar muito a lâmina bruta de irrigação para que o valor do rendimento simulado seja igual aos valores simulados para alta uniformidade. Estes resultados coincidem com os resultados encontrados por MANTOVANI et al (1995) e LI (1998).

Os valores do rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o Cd Normal e o Cd Uniforme, cresceram à medida que o valor de p cresceu, para todos os níveis de uniformidade e para todos os valores da relação lâmina bruta de irrigação e lâmina requerida pela cultura. Este resultado mostra a contribuição no rendimento relativo de outras fontes de água, como, por exemplo, a precipitação, e que quando a fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes (p) é igual a 95%, o rendimento relativo não é influenciado pela relação lâmina bruta de irrigação e lâmina requerida pela cultura.

Observou-se também nas Figuras 28, 29, 30, 31 e 32 que os valores do rendimento relativo simulado com o Cd Normal apresentaram um grau de descontinuidade na transição, quando o rendimento relativo foi simulado com o Cd Normal calculado pelas equações 74 e 132. Esta descontinuidade, para um mesmo valor de p, diminui com o aumento da uniformidade, e para um mesmo valor de CUC diminui com o aumento de p.

4.3.2. Análise quantitativa do rendimento relativo (Y/Y_{max})

As análises anteriormente apresentadas permitem uma visualização qualitativa das estimativas dos rendimentos relativos simulados pelo modelo, utilizando o coeficiente de déficit normal e uniforme, que apesar de importantes limitam as conclusões. Para permitir uma análise quantitativa, fez-se um estudo comparativo com base em uma análise de regressão entre os valores simulados para um mesmo nível de uniformidade e um mesmo valor p, utilizando o coeficiente de déficit normal e uniforme.

$$\frac{Y}{Y_{Max}}(Cd Uniforme) = a \cdot \frac{Y}{Y_{Max}}(Cd Normal) \quad (133)$$

No Quadro 6 estão apresentados os resultados da análise de regressão linear forçada pela origem, com o respectivo coeficiente da regressão linear e o coeficiente de determinação.

As Figuras 1B, 2B, 3B, 4B e 5B ilustram a comparação entre o rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para três níveis de uniformidade de distribuição de água (CUC de 65, 80 e 95%) e para a fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes, p de 0; 0,25; 0,5; 0,75; e 0,95, respectivamente.

Quadro 6 – Coeficiente a da regressão linear forçada pela origem, com respectivo coeficiente de determinação, para diferentes valores de CUC e p.

	CUC (%)	a	R²
p=0	65	1,0180	0,9954
	80	1,0094	0,9987
	95	1,0047	0,9996
p=0,25	65	1,0114	0,9952
	80	1,0059	0,9986
	95	1,0030	0,9996
p=0,5	65	1,0064	0,9951
	80	1,0033	0,9985
	95	1,0016	0,9996
p=0,75	65	1,0027	0,9949
	80	1,0013	0,9985
	95	1,0006	0,9996
p=0,95	65	1,0005	0,9948
	80	1,0002	0,9984
	95	1,0001	0,9996

Observou-se no Quadro 6 que o coeficiente a da regressão linear forçada pela origem foi maior do que 1, para todos os níveis de uniformidade e para todos os valores de p, indicando que os valores do rendimento relativo simulado com o modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993), utilizando o Cd Uniforme, superestimaram os valores simulados com o Cd Normal.

Para um mesmo valor da fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes (p), as superestimativas diminuíram com o

aumento da uniformidade, e para um mesmo nível de uniformidade as superestimativas diminuíram com o aumento do valor de (p).

A maior diferença entre os valores de rendimento relativo simulado com o Cd Uniforme e Normal ocorreu quando o valor do CUC foi de 65% e a fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes (p) foi igual a zero. Nesta situação, os valores do rendimento relativo simulado com o Cd Uniforme superestimaram os valores simulados com o Cd Normal em 1,8%. Apesar de o modelo normal de distribuição de água pelos aspersores, segundo a literatura, ser o mais indicado, este resultado mostra que a utilização do Cd Uniforme no modelo de simulação do rendimento relativo pode ser utilizado, na prática, apresentando a vantagem de suas soluções matemáticas serem mais simples.

A menor diferença entre os valores de rendimento relativo simulado com o Cd Uniforme e Normal ocorreu quando o valor do CUC foi de 95% e a fração da evapotranspiração máxima da cultura repostada por outras fontes (p) foi igual a 0,95. Nesta situação, os valores do rendimento relativo simulado com o Cd Uniforme superestimaram os valores simulados com o Cd Normal em 0,01%. Em tais condições, o rendimento relativo simulado pelo modelo com o Cd Uniforme e Normal não é influenciado pela relação lâmina bruta de irrigação e lâmina requerida pela cultura, uma vez que 95% da fonte de água necessária para atender à evapotranspiração máxima da cultura provém de outras fontes, principalmente da precipitação.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

A uniformidade de distribuição de água na agricultura irrigada é um importante aspecto a ser considerado na modelagem de funções de produção. O presente trabalho teve como objetivos o desenvolvimento do coeficiente de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como um modelo normal em função do coeficiente de uniformidade de Christiansen e da relação entre a lâmina bruta de irrigação e a lâmina requerida pela cultura.

Também objetivou a comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos por meio da simulação com o uso do modelo desenvolvido por MANTOVANI (1993) com os coeficientes de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como uniforme e normal, e o desenvolvimento das funções de produção para a cultura do feijão, utilizando o modelo desenvolvido por MANTOVANI (1993) com os coeficientes de déficit, considerando o padrão de distribuição de água pelo aspersor como uniforme e normal para três níveis de uniformidade de distribuição de água, equivalente aos valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen de 65, 80 e 95% e para cinco níveis da fração da evapotranspiração máxima da cultura repostas por outras fontes, equivalente aos valores de p de 0; 0,25; 0,5; 0,75; e 0,95.

Para resolver as integrações matemáticas necessárias ao desenvolvimento do coeficiente de déficit, foi utilizado o software Derive 5.0. As simulações foram realizadas com o modelo de função de produção desenvolvido por MANTOVANI (1993), utilizando o coeficiente de déficit normal e uniforme, para as condições do experimento de campo realizado na Estação

Experimental de Coimbra, do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, localizada no município de Coimbra - MG, latitude de 20° 51`S e longitude de 42° 47`W e altitude de 720 m, durante o período de julho a dezembro de 2000.

A partir dos resultados obtidos e com base nas condições em que foi realizado o presente trabalho, pode-se concluir que:

- O coeficiente de déficit desenvolvido, considerando o perfil de distribuição de água pelos aspersores como uma distribuição normal, em função do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e as lâminas requerida (H_r) e bruta (H_g) foi:

$$C_D = \left(\frac{\left(\frac{4,548 \cdot (1 - CUC) - 1 + \frac{H_R}{H_G}}{1,407 \cdot (1 - CUC)} \right)^{3,322}}{100} \right) \left(1 - \frac{H_G}{H_R} \right) + \frac{(1 - CUC)}{2} \cdot \frac{H_G}{H_R}$$

- Os valores do coeficiente de déficit normal foram superiores aos valores do coeficiente de déficit uniforme, para todos os tratamentos.
- Os resultados de produtividade simulada com o coeficiente de déficit desenvolvido (distribuição normal), foram mais ajustados aos medidos em campo para os tratamentos L1A, L1B e L2B.
- Nos tratamentos em que a lâmina aplicada foi superior a lâmina requerida (L3A e L3B) a produtividade simulada com o coeficiente de déficit uniforme apresentou resultados mais ajustados com os valores medidos em campo.

- O rendimento relativo simulado com o coeficiente de déficit para um perfil de distribuição normal foi menor do que o simulado com o coeficiente de déficit uniforme, para todos os tratamentos.
- Para os tratamentos de alta uniformidade (L1A, L2A e L3A), os valores dos coeficientes de déficit normal e uniforme ficaram mais próximos, e os rendimentos relativos simulados com o Cd Normal e Uniforme apresentaram as menores diferenças.
- Para os tratamentos em que foi aplicado a mesma quantidade de água, o aumento da uniformidade propiciou o aumento do rendimento relativo, simulados com o coeficiente de déficit normal e uniforme.

A partir dos resultados das funções de produção geradas, pode-se concluir que:

- Os valores do rendimento relativo simulados pelo modelo, utilizando o coeficiente de déficit normal, foram sempre inferiores aos valores simulados com o coeficiente de déficit uniforme, para todos os níveis de uniformidade e para todos os valores da fração da evapotranspiração máxima da cultura repostas por outras fontes (p). Para um mesmo p , estas diferenças diminuíram com o aumento da uniformidade, e para um mesmo nível de uniformidade estas diferenças diminuíram com o aumento do valor de p .
- Para uma mesma relação lâmina bruta de irrigação e lâmina requerida pela cultura, o aumento da uniformidade propiciou o aumento do rendimento relativo, simulado tanto com o coeficiente de déficit normal como com o coeficiente de déficit uniforme, e que em condições de baixa uniformidade é necessário aumentar muito a lâmina de bruta de irrigação para que o valor do rendimento simulado seja igual aos valores simulados para alta uniformidade.
- Os valores do rendimento relativo simulado com o modelo, utilizando o coeficiente de déficit normal e uniforme, cresceram à medida que o valor de p cresceu, para todos os níveis de uniformidade e para todos os valores da relação lâmina bruta de irrigação e lâmina requerida pela cultura.

- Os valores do rendimento relativo simulado com o modelo de função de produção utilizando o Cd Normal são sempre inferiores aos simulados com o Cd Uniforme.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. T. **Avaliação dos sistemas de irrigação pressurizados e do manejo da água na cultura da banana no Projeto Gorutuba**. Viçosa:, MG, UFV, 1997. 100p. (Dissertação de mestrado).
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requeriments – FAO Irrigation and drainage paper 56**. Roma, p.307, 1998.
- ANYOJI, H., WU, I. P., **Normal Distribution Water Application for Drip Irrigation Schedules** . Transactions of the ASAE, v.37, p.159-164. 1994.
- ARKLEY, R. J. **Relationships between plant growth and transpiration**. Hilgardia, v.34, p.559-584.1963.
- BARRAGAN, J., WU, I. P., **Design Criteria for Microirrigation Systems**. Transactions of the ASAE, v.43(5), p.1145-1154. 2000.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa, MG., UFV, 1996. 657p.
- BILANSKI, W. K., KIDDER, E. H. **Factors that effect the distribution of water from a medium-pressure rotary irrigation sprinkler**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.1, n.1, p. 19-28, 1958.
- BONOMO, R. **Análise da Irrigação na Cafeicultura em Áreas de Cerrado de Minas Gerais**. Viçosa, MG, UFV, 1999. 224p. (Dissertação de doutorado).

- BOOTE, K. J.; JONES, J. W. ; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy J.** v.88 , p. 704-716, 1996.
- BRALTS, V. F., KESNER, C. D., **Drip Irrigation field uniformity estimation.** Transactions of the ASAE, v.26(5), p.1369-1374. 1983.
- BURT, C. M.; CLEMENTS, A.J. ; STRELKOFF, T. S. ; SOLOMON, K. H. BLISNER, R. D. ; HARDY, L. A. ; HOWELL, T. A. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Journal Irrigation and Drainage.** V.123, n.6, p.423-442, 1997.
- CECON, P. R. **Apostila de INF 662.** Viçosa, MG, UFV, 2001. 203p.
- CHAUDRY, F. H. **Sprinkler Measures and Skewness.** Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 102 (IR4), December, 1976.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling.** Berkeley. University California, 1942. 124 p. (California Agricultural Experimental Station Bulletin, 670).
- COSTA, L. C. Agrometeorologia. In: MANTOVANI, E. C., COSTA, L. C. (ed).**Workshop Internacional sobre manejo integrado das culturas e recursos hídricos**,1, Resumos. Brasília, 1998, p. 3-21.
- DAVIS, J. R., FRY, A. W. **What price Sprinkler Uniformity.** Irrig. Eng. And Maintenance. XIII(3), 1963.
- DENMEAD, O. T.; SHAW, R. H. **Avaliability of soil water to plant as affected by soil moisture content and meteorological condictions.** Agronomy Journal, v.54, p.385-390.1962.
- De WIT, C. T. **Transpiration and crop yields.** Instituut Voor Biologisch en Scheikundig Onderzoek van Landbouwgewassen, Verslagen Landbouwk. Onderz. 64.6, Wageningen, Netherlands. 1958
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requeriments.** Roma: FAO, 1977. 179p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO 1979. 193p. (irrigation and drainage Paper 33)
- DOWNEY, L. A. **Water yield relations for non-forage crops**. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, v.98, p.107-115. 1972.
- ELLIOTT, R. L., NELSON, J. D., LOFTIS, J. C., HART, W. E. **Statistical Distributions of Sprinkler Application Depths**. 1981.
- EVANS, R.G., HAN, S. KROEGER, M. W. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots. **Transaction of the ASAE**, v.38, n.1, p. 85-92, 1995.
- FEINERMAN, E., LETEY, J., VAUX, H. J. **The economics of irrigation with nonuniform infiltration**. Water Resourc. Res. 19: p.1410-1414, 1983.
- FREITAS, P. S. L. **Uniformidade de Aplicação de Água, Produtividade da Cultura do Milho e Efeito da Presença de Diferentes Resíduos de Cultura na Evaporação de Água no Solo**. Viçosa, MG, UFV, 2000. 189p. (Dissertação de doutorado).
- FRIZZONE, J. A.; OLITTA, A. F. L.; BOTREL, T. A.; FOLEGATTI, M. V **Efeito do déficit contínuo de água nas fases de reprodução sobre a produção de trigo**. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., Piracicaba, 1990. Anais. Piracicaba, 1990. v. 1, p.505-524.
- FRIZZONE, J. A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Engenharia Rural, 1992. 53 p (Série Didática, 3).
- FRIZZONE, J. A. **Manejo de irrigação**. XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, item 1.3. Poços de Caldas, MG. 1998.
- GEDAKEN, A. **Utilização do modelo Ceres-Maize para avaliar estratégias de irrigação em duas regiões de Minas Gerais**. Viçosa, MG, UFV, 1998. 74p. (Dissertação de mestrado).
- GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação**. Universidade Federal da Paraíba, 1994, 1ª ed.

- GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. Editora Edgard Blucher LTDA. Apêndice - 278p, 1976.
- GOMIDE, R. L. **Determinação e análise da uniformidade de distribuição de água no sistema de irrigação por aspersão**. Viçosa, MG: UFV, 1978. 87. (Dissertação de mestrado).
- HANKS, R. J. **Model for predicting plant yield as influenced by water use**. Agronomy Journal, v.66, p.660-665. 1974.
- HANKS, R. J., RASMUSSEN, V. P. **Predicting crop production as related to water stress**. Advances in Agronomy, v.35, p.193-215. 1982.
- HANKS, R. J. **Yield and water-use relationships: An overview**. In: TAYLOR, H. M. et al. (ed.). **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of American, Soil Science Society of American, 1983. p.393-411.
- HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. **Economics considerations on deficit irrigation**. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering. New York, v.110, n.4, p. 343-235, 1984.
- HART, W. E. 1961. **Overhead Irrigation Pattern Parameters**. Agricultural Engineering 42(7): 354-355.
- HART, W. E. and W. N. REYNOLDS, 1965. **Analytical Design of Sprinkler Systems**. Transactions of the ASCE 8(1):83-85, 89.
- HEXEM, R. W.; HEADY, E. O. **Water production function for irrigated agriculture**. Ames, Iowa: Iowa State University Press, 1978. 215p.
- HOWELL, T. A.; CUENCA, R. H.; SOLOMON, K. H. **Crop yield response**. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1992. p. 93-122.
- HOWELL, T. A. **Relationships between crop production and transpiration, evapotranspiration, and irrigation**. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (ed.). Irrigation of agricultural crops. Madison: American Society of Agronomy, 1990a. p.391-434.

- HOWELL, T. A., HILER, E.A. **Optimization of water use efficiency under high frequency irrigation - I. Evapotranspiration and yield relationship.** Transactions of the ASAE, v18, p.873-875, 1975.
- KARMELI, D., L. J. SALAZAR and W. R. WALKER, 1978. **Assessing the Spatial Variability of Irrigation Water Applications.** Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.
- JAME, Y. M., CUTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Can. j. plant Sci.** v. 76, p.9-19, 1996.
- JONES, C. A., KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development.** College Station: Texas A&M University Press, 1986. 194p.
- JONES, J. W. RITCHIE, J. T. Crop growth models. In: HOFFMANN, G.L. et al. (eds) **Management of farm irrigation system.** S.L. : s.n., 1990. P.63-89.
- KELLER, J. **Sprinkle Irrigation.** Logan: Utah State University, 1979. s. p.
- KELLER, J., BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.
- LETEY, J.; VAUX, H. J. ; FEINERMAN, E. Optimum crop water as affected by uniformity of water infiltration. **Agron. Journal.** V.76 p.435-441, 1984.
- LI, J. S. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler system. **Agricultural Water Management.** v. 38,n.2 p.135-146, 1998.
- LI, J.S., KAWANO, H. Sprinkler rotation nonuniformity and water distribution. **Transaction of the ASAE.** v. 39,n.6 p.2027-2031, 1997.
- MANTOVANI, E. C. **Determinação do Coeficiente de Cultura para o Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Irrigado, em duas Épocas de Plantio.** Viçosa, MG: UFV, 1986. 73p. (Dissertação de mestrado).

- MANTOVANI, E. C. **Desarrollo y evaluacion de modelos para el manejo del riego: estimacion de la evapotranspiracion y efectos de la uniformidad de aplicacion del riego sobre la produccion de los cultivos.** Córdoba: Universidad de Cordoba, 1993. 184p.
- MANTOVANI, E. C.; VILLALOBOS, F. J. ; ORGAZ, F ; FERERES, E. Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity in crop yield. **Agricultural Water Management.** v. 27, p.243-257, 1995
- MATEOS, L; MANTOVANI, E.C.; VILLALOBOS, F.J. Cotton response to non-uniformity of convencional sprinkler irrigation. **Irrg. Sci.** V. 17, p. 47-52, 1997.
- MERRIAN, J. L., KELLER, J **Farm irrigation system evaluation: a guide for management.** Logan: Agricultural an Irrigation Engineering Department, 1978. 217p.
- MERRIAN, J. L., SHEARER, M. N., BURT, C. M. Evaluating irrigation systems and practices. In: JENSEN, M. E. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems.** St. Joseph: ASAE, 1983. p.721-762. Monograph, 3).
- MINHAS, B. S.; PARIKH, K. S.; SRINIVASAN, T. N. **Towards the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water.** Water Resource Research, v.10, p.383-393. 1974.
- NAKAYAMA, F. S., BUCKS, A. D., CLEMMENS, A. J. **Assessing trickle emitter application uniformity.** Transactions of the ASAE, v. 22(4), p.816-821. 1979.
- NETO, D. D.; FANCELLI, A. L. **Produção de Feijão.** Guaíba, RS, Livraria e Editora Agropecuária Ltda., 2000. 386p.
- PANG, X. P.; LETEY, J. ; WU, L. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching. **Soil Science.** V. 61, n.1 p.257-261, 1997.
- PILLSBURY, A. F. y DEGAN, A.- **El empleo del Riego por Aspersion.** FAO. Roma, 1968.

- QUEIROZ, J. E., CALHEIROS, C. B. M., PESSOA, P. C. S., FRIZZONE, J. A. **Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: Terra como fator limitante de produção.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 31, n.1, p.55-61, 1996.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. **A simple dated water production function for use in irrigated agriculture.** Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 13, p.25t32. 1988.
- ROCHA, E. M. M., MAPURUNGA, S. M. S., COSTA, R. N. T., CASTRO, P. T., AGUIAR, O. S. **Uniformidade e eficiência de aplicação de água da irrigação por aspersão convencional na superfície e perfil do solo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas, MG, 1998. Anais. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. V. 1, p.325.
- SANTOS, N. C. **Uniformidade de distribuição e eficiência em potencial de aplicação de água em um sistema de irrigação do tipo pivô central, em condições de cerrado.** Viçosa, MG, UFV, 1988. 80p. (Dissertação de mestrado).
- SEGINER, I. A note on the economic significance of uniform water application. **Irrig. Sci.** v.19, p. 19-25, 1978.
- SEGINER, I, NIR, D., Von BERNUTH, R. D. Simulation of wind-distorted. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**, v.117, n. 2, p. 285-308, 1991.
- SENIWONGSE, C., WU I. P., REYNOLDS, W. N. **Skew ness and Kurtosis Influence on Uniformity Coefficient and Application to Sprinkler Irrigation Design.** Transactions of the ASAE 15(2): 266-271. 1972.
- SMESRUD, J. K.; SELKER, J. S. **Analytical Solution for Normal Irrigation Distribution Parameters.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.127, No.1, January/February, p. 45-48. 2001.
- SOARES, A. A., RAMOS, M., M., LUCATO JÚNIOR, J. **Uso racional da energia elétrica em sistemas de irrigação tipo pivô central no Estado de Minas Gerais.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, Ilhéus, BA, 1993. Anais. Ilhéus: SBEA, 1993. P. 2688-2702.

- SOLOMON, K., KELLER, J. **Trickle Irrigation uniformity and efficiency.** Journal of the Irrigation and Drainage Division, v.104, n.IR3, p. 293-306. 1978.
- SOLOMON, K. H. **Yield related interpretations of irrigations uniformity and efficiency measures.** Irrg. Sci. V.5. p. 161-172, 1984.
- SOLOMON, K. H. **Typical water production function.** In: WINTER MEETING, Chicago, 1985. Proceedings, Paper 85-2596. Chicago: Americam. Society of Agriculture Engineers, 1985, p. 17-20.
- STEGMAN, E. C.; MUSICK, J. T.; STEWART, J. 1. **Irrigation water management.** In: JENSEN, M. E. (ed.). **Design and operation of farm irrigation systems.** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1980. p.763-816. (ASAE monograph n.3).
- STERN, J., BRESLER, E. **Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield.** Irrg. Sci. V.4. p. 17-29, 1983.
- STEWART, J. I.; HAGAN, R. M. **Functions to predict effects of crop water deficits.** Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, v.99, n.IR4, p. 421-439. 1973.
- STEWART, J. I.; HAGAN, R. M. et al. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil.** Utah Water Reserch Laboratoty. Publ, No. PRWW 15 1 - 1, Utah State University, Logan. 1977. 191p.
- SUDAR, R. A.; SAXTON, K. E.; SPOMER, R. G. **A predictive model of water stress in corn and soybean.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.24, p.97-102. 1981.
- TARJUELO MARTÍN-BENITO, J.M. **El riego por aspersion y su tecnologia.** Madri: Mundi-Prensa, 1995, 491 p.
- TARJUELO, J. M. et al. **Analysis of Uniformity of Sprinkle Irrigation in a semi-arid area.** Agricultural Water Management 40, 1999, p. 315-331.
- VAUX, H. J.; PRUITT, W. O. **Crop-water production functions.** In: HILLEL, D. (ed.). Advances in irrigation. New York: Academic Press, v.2, 1983. p.61-97.

- VIEIRA, C. **Cultura do Feijão**. Viçosa, Imprensa Universitária - UFV, 1978. 146p.
- WALKER, R. W. **Sprinkler & Trickle irrigation**. Department of Agricultural and Chemical Engineering – Colorado State University, 3 ed. Chap. 5., 1979.
- WALLACH, R. Effective irrigation uniformity as related to root zone depth. **Irrig. Sci.** v.11, p. 15-21, 1990
- WARRICK ,A .W ; GARDNER, W. R. Crop yield affected by spatial variations of soil and irrigations. **Water Resour. Res.** V.19, n.1 p.181-186, 1983.
- WILCOX, J. C. and G. E. SWAILES. **Uniformity of Water Distribution by Some Under-tree Orchard Sprinklers**. Scientific Agriculture 27(11):565-583, 1947.
- WU, I. P., GITLIN, H. M., **Drip irrigation application efficiency and schedules**. Transactions of the ASAE, v.26(1), p.92-909. 1983.
- WU, I. P., **Linearized water aplication function for drip Irrigation schedules**. Transactions of the ASAE, v.31(6), p.1743-1749. 1988.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A – Dados climáticos do período de 10 de agosto a 17 de novembro, da Estação Experimental Coimbra, localizada no município de Coimbra-MG.

Data	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Velocidade de Vento (m s ⁻¹)	Umidade Relativa (%)	Precipitação (mm)	Radiação (W m ⁻²)
10/08/00	28,10	20,35	14,30	0,95	66,88	0,00	213,27
11/08/00	22,70	17,19	12,60	1,44	76,14	0,00	147,30
12/08/00	18,10	13,71	9,80	1,87	64,63	0,00	198,78
13/08/00	19,50	11,98	6,30	1,15	70,62	0,00	242,70
14/08/00	22,30	12,17	5,30	0,64	74,47	0,20	212,57
15/08/00	22,70	15,35	5,30	2,05	64,75	0,00	253,90
16/08/00	26,10	18,67	10,50	1,30	55,66	0,00	223,65
17/08/00	24,10	18,04	13,60	0,56	62,04	0,00	144,14
18/08/00	23,60	16,45	8,80	0,90	71,76	2,40	190,86
19/08/00	23,60	17,18	11,20	0,89	73,19	0,00	196,63
20/08/00	23,90	16,47	11,10	0,37	68,86	0,20	153,77
21/08/00	25,70	16,55	8,90	0,30	64,81	0,20	258,49
22/08/00	24,80	15,45	7,70	0,94	66,27	0,00	254,15
23/08/00	25,40	17,09	7,30	1,35	63,41	0,20	245,92
24/08/00	27,40	19,45	11,80	1,57	63,03	0,00	252,70
25/08/00	28,70	21,26	11,10	1,48	57,04	0,00	259,33
26/08/00	28,80	23,54	18,70	2,90	53,82	0,00	256,19
27/08/00	29,40	24,78	21,60	2,61	54,84	0,00	223,48
28/08/00	28,30	22,45	14,90	2,32	63,48	6,00	170,71
29/08/00	18,10	15,73	14,30	1,04	82,82	5,40	34,08
30/08/00	21,60	18,01	15,60	0,95	76,78	0,00	113,48
31/08/00	22,10	18,98	16,20	0,99	74,03	0,00	87,12
01/09/00	23,60	19,95	18,10	1,61	70,14	0,00	137,95
02/09/00	19,40	17,77	16,40	0,50	77,79	22,80	55,93
03/09/00	18,60	16,89	14,40	0,75	78,86	19,40	36,71
04/09/00	16,40	14,57	13,40	1,90	79,80	2,20	79,90
05/09/00	19,40	15,16	11,80	0,58	75,99	0,00	119,38
06/09/00	16,60	14,92	14,10	0,52	79,58	7,40	60,78
07/09/00	17,80	15,72	14,20	0,65	75,97	0,40	92,89
08/09/00	22,70	17,20	13,70	0,68	70,31	0,00	217,58
09/09/00	18,20	15,37	13,10	0,66	77,12	1,00	74,86
10/09/00	23,10	17,24	12,30	1,12	72,33	0,20	176,21
11/09/00	24,20	19,32	15,20	2,24	66,83	0,00	227,77
12/09/00	21,20	18,14	13,50	2,46	69,09	0,00	134,78
13/09/00	23,10	19,76	16,80	2,38	65,78	0,00	175,10
14/09/00	26,70	21,31	16,30	1,63	62,28	0,00	215,39
15/09/00	26,20	20,87	15,40	2,26	54,63	0,00	277,03
16/09/00	26,90	21,13	15,90	1,66	56,90	0,00	254,33
17/09/00	23,30	19,40	17,70	1,20	62,33	0,20	120,76
18/09/00	24,80	19,75	14,10	1,45	58,33	0,00	205,58
19/09/00	27,60	20,05	14,20	0,56	61,47	0,00	240,49
20/09/00	26,40	19,64	13,40	0,63	57,09	0,00	201,46
21/09/00	26,20	19,76	11,60	1,66	53,74	0,00	296,90
22/09/00	28,10	20,77	16,30	1,78	54,85	0,00	281,07

Quadro 1A, Cont.

Data	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Velocidade de Vento (m s ⁻¹)	Umidade Relativa (%)	Precipitação (mm)	Radiação (W m ⁻²)
23/09/00	27,80	20,88	16,10	0,69	56,35	0,00	212,98
24/09/00	26,00	20,27	13,80	2,07	52,51	0,00	295,86
25/09/00	27,00	19,59	13,30	1,59	56,72	0,00	255,86
26/09/00	15,90	13,60	13,00	1,85	69,03	10,60	24,38
27/09/00	17,70	14,47	12,10	1,48	62,22	0,80	138,79
28/09/00	20,90	16,51	13,40	1,29	60,97	0,00	205,56
29/09/00	25,90	17,75	13,30	0,49	64,36	0,80	205,45
30/09/00	26,30	17,78	11,90	1,04	70,38	0,00	271,65
01/10/00	26,20	19,60	13,10	1,47	58,74	0,40	256,19
02/10/00	27,60	19,81	15,00	1,19	69,83	0,00	250,26
03/10/00	30,80	21,88	13,40	0,99	60,76	0,00	290,51
04/10/00	26,00	20,00	14,00	1,00	60,00	0,00	304,64
05/10/00	26,00	20,00	14,00	1,00	60,00	0,00	202,21
06/10/00	26,00	20,00	14,00	1,00	60,00	0,00	169,47
07/10/00	26,00	20,00	14,00	1,00	60,00	0,00	117,26
08/10/00	26,00	20,00	14,00	1,00	60,00	0,00	191,69
09/10/00	26,00	20,00	14,00	1,00	60,00	0,00	215,68
10/10/00	28,30	22,32	15,00	1,96	58,73	0,00	309,96
11/10/00	30,00	20,86	13,10	1,12	63,62	0,00	314,16
12/10/00	30,20	21,45	13,20	1,13	58,62	0,00	327,45
13/10/00	32,10	21,83	12,30	1,07	60,46	0,00	324,22
14/10/00	31,70	22,47	13,50	1,02	62,92	0,00	327,83
15/10/00	29,10	21,94	15,90	1,59	66,26	0,00	286,21
16/10/00	28,10	21,58	16,20	0,85	65,51	0,00	230,60
17/10/00	28,90	21,93	15,80	1,09	67,17	0,00	269,78
18/10/00	29,20	21,69	14,40	1,38	71,29	0,00	289,80
19/10/00	30,80	22,07	14,60	0,94	69,45	1,80	287,36
20/10/00	30,80	22,82	15,60	1,36	66,44	4,20	298,75
21/10/00	31,60	23,66	17,50	0,66	62,09	0,00	288,80
22/10/00	30,30	24,00	18,90	0,99	62,51	0,00	283,70
23/10/00	30,40	22,61	16,10	0,90	67,39	0,00	329,28
24/10/00	30,30	22,69	15,60	1,49	67,52	0,00	309,87
25/10/00	29,90	22,27	16,40	1,14	70,10	0,00	250,46
26/10/00	30,20	21,86	13,60	0,15	67,40	0,00	275,05
27/10/00	28,90	22,76	13,90	2,42	57,47	0,00	321,15
28/10/00	29,80	23,67	17,80	2,46	57,01	0,00	170,48
29/10/00	17,70	16,11	14,70	2,28	92,13	36,40	29,86
30/10/00	17,50	15,92	13,90	0,49	88,72	4,40	60,58
31/10/00	20,70	17,64	16,00	0,29	85,63	0,00	71,40
01/11/00	25,20	19,62	16,30	1,26	79,80	0,00	260,50
02/11/00	26,90	20,05	15,50	0,66	75,63	0,00	253,70
03/11/00	28,70	22,18	18,10	1,72	71,44	2,00	285,39
04/11/00	26,40	21,55	18,40	0,89	79,54	15,00	197,19
05/11/00	22,00	19,84	17,90	1,14	85,40	2,20	70,76
06/11/00	21,60	18,95	17,70	0,85	89,23	14,40	108,22
07/11/00	19,90	18,23	17,40	1,98	88,33	14,20	70,04
08/11/00	21,80	18,09	15,70	1,98	74,89	0,20	173,61

Quadro 1A, Cont.

Data	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Velocidade de Vento (m s ⁻¹)	Umidade Relativa (%)	Precipitação (mm)	Radiação (W m ⁻²)
09/11/00	24,90	19,74	15,20	1,31	66,26	0,00	312,17
10/11/00	26,50	19,88	14,40	1,03	66,64	0,00	266,84
11/11/00	28,10	22,23	17,20	1,08	63,22	0,00	287,49
12/11/00	26,20	21,98	18,20	0,84	66,06	1,20	170,53
13/11/00	25,60	22,28	20,70	1,72	67,60	1,20	118,33
14/11/00	27,20	22,94	18,30	1,78	69,53	9,20	174,74
15/11/00	18,90	17,76	16,70	1,76	72,74	16,80	67,79
16/11/00	21,20	17,96	15,70	0,86	68,57	28,40	116,83
17/11/00	18,50	17,18	15,80	0,66	66,59	13,60	64,10

Quadro 2A – Valores de lâminas d'água aplicadas durante o ciclo, coeficiente de uniformidade de Christiansen e eficiência, por bloco, para os tratamentos.

T	B	Lâmina Bruta Aplicada (mm)	Lâmina Líquida (mm)	Lâmina Média Coletada (mm)	Lâmina Máxima Coletada (mm)	Lâmina Mínima Coletada (mm)	Eficiência Média (%)	CUC Médio (%)	CUC Acum. (%)
L1A	1	154,76	134,95	109,6	136,30	78,63	70,81	84,1	87,6
	2	154,76	134,95	111,6	139,21	89,50	72,11	83,9	89,1
	3	154,76	134,95	113,6	138,63	82,71	73,40	85,1	86,9
L1B	1	154,76	134,95	115,4	142,90	69,10	74,56	69,9	82,9
	2	154,76	134,95	113,6	135,72	64,07	73,40	71,2	82,8
	3	154,76	134,95	101,6	125,43	51,65	65,65	67,3	82,1
L2A	1	77,38	67,48	60,00	74,56	47,38	77,54	85,0	87,4
	2	77,38	67,48	64,30	73,20	50,48	83,09	88,1	92,0
	3	77,38	67,48	56,50	70,09	41,74	73,01	85,4	86,7
L2B	1	77,38	67,48	53,20	72,42	31,84	68,75	68,0	81,9
	2	77,38	67,48	50,00	63,10	30,48	64,61	67,7	85,1
	3	77,38	67,48	48,00	71,84	21,55	62,03	66,2	78,0
L3A	1	232,14	202,43	169,10	188,34	139,80	72,84	92,4	94,5
	2	232,14	202,43	156,20	180,14	113,58	67,28	82,0	85,6
	3	232,14	202,43	159,80	177,66	144,07	68,83	91,6	94,8
L3B	1	232,14	202,43	170,7	195,33	109,94	73,53	72,7	84,8
	2	232,14	202,43	172,5	207,75	84,85	74,31	67,4	82,6
	3	232,14	202,43	145,5	182,51	76,11	62,67	68,4	83,8

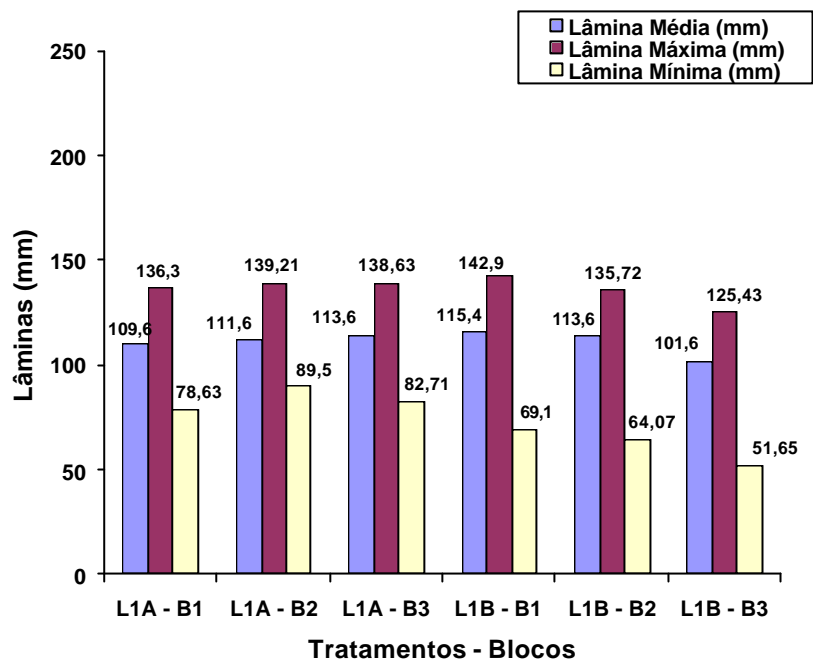


Figura 1A – Lâminas médias, máximas e mínimas coletadas durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L1A e L1B.

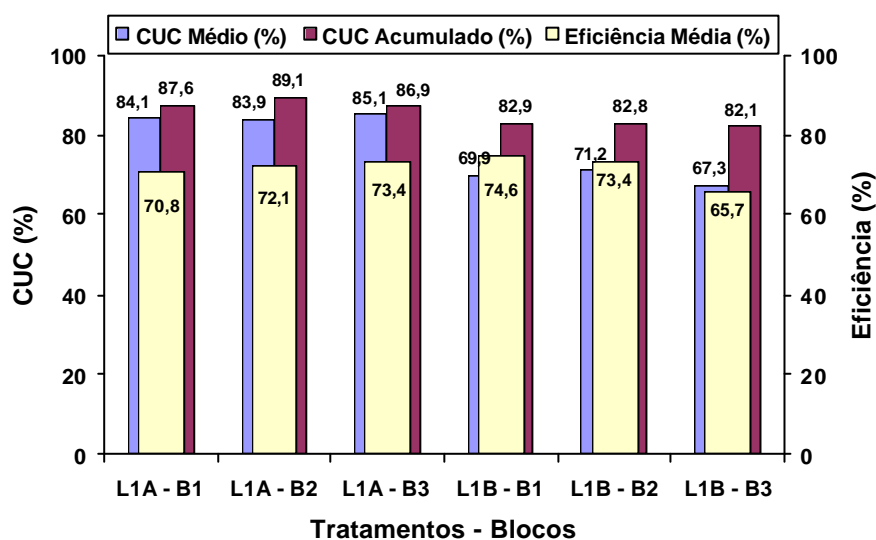


Figura 2A – CUC médio, CUC acumulado e eficiência média ocorridos durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L1A e L1B.

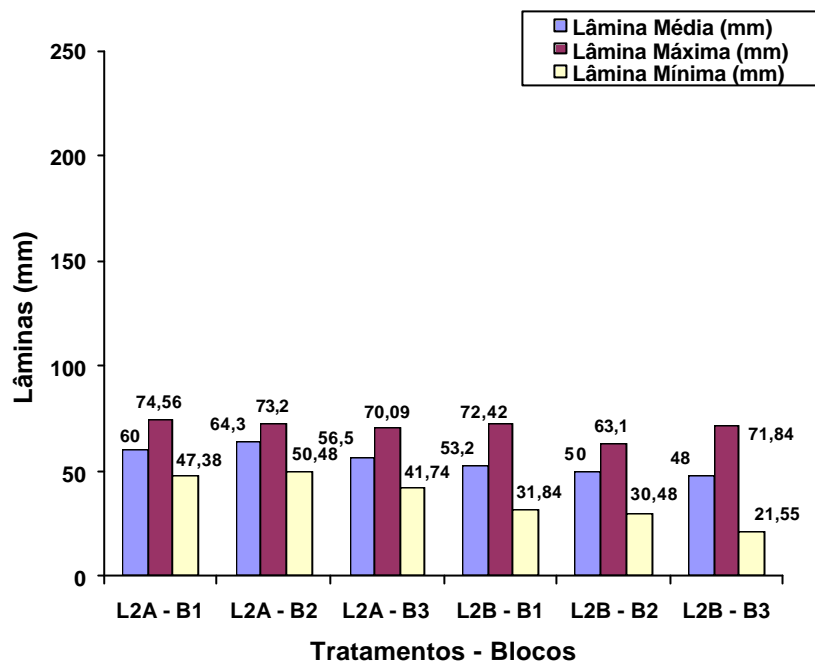


Figura 3A – Lâminas médias, máximas e mínimas coletadas durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L2A e L2B.

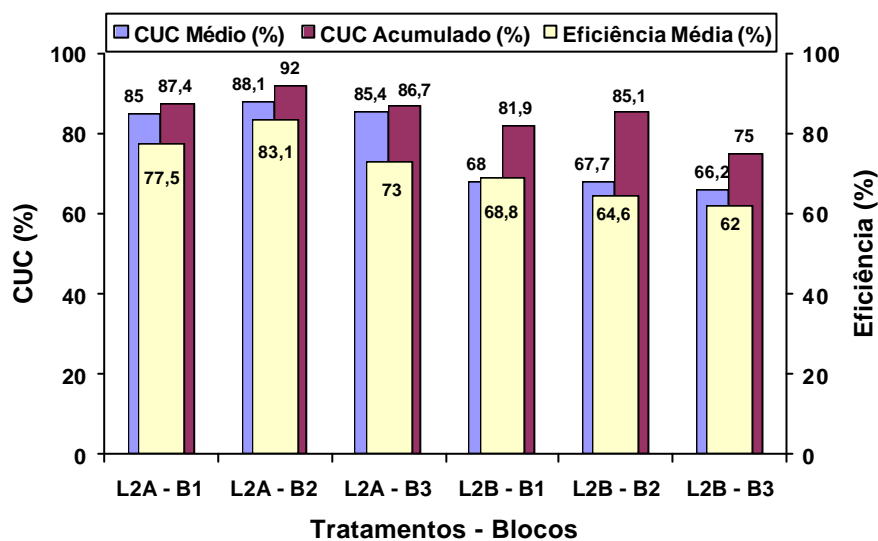


Figura 4A – CUC médio, CUC acumulado e eficiência média ocorridos durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L2A e L2B.

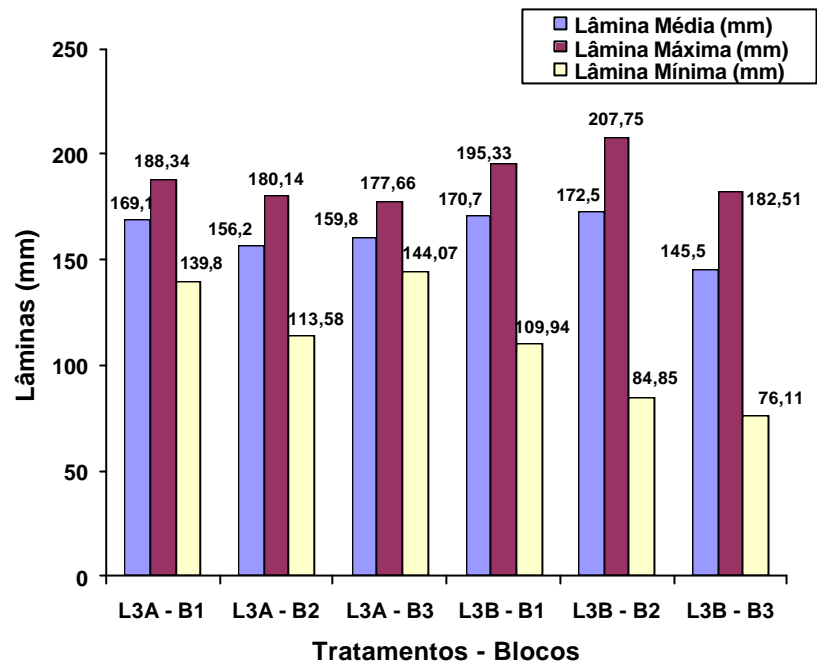


Figura 5A – Lâminas médias, máximas e mínimas coletadas durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L3A e L3B.

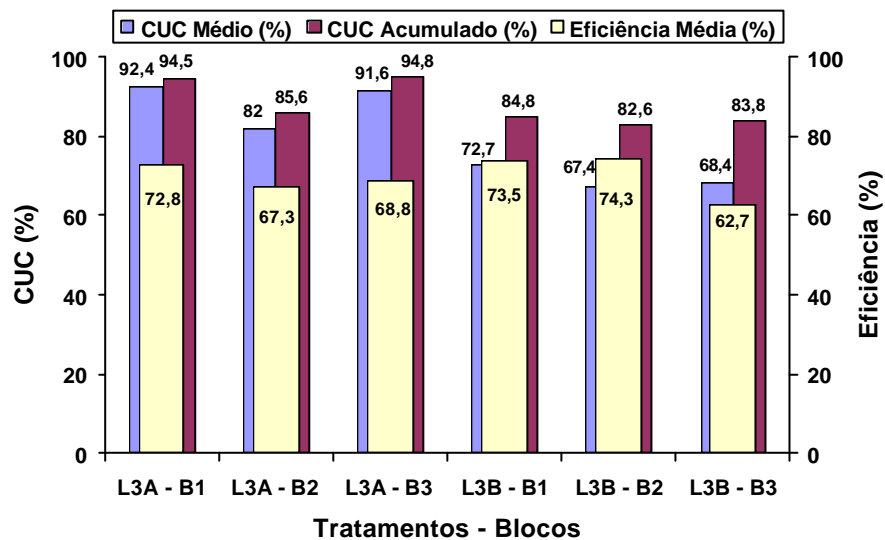


Figura 6A – CUC médio, CUC acumulado e eficiência média ocorridos durante o ciclo da cultura, por bloco, para os tratamentos L3A e L3B.

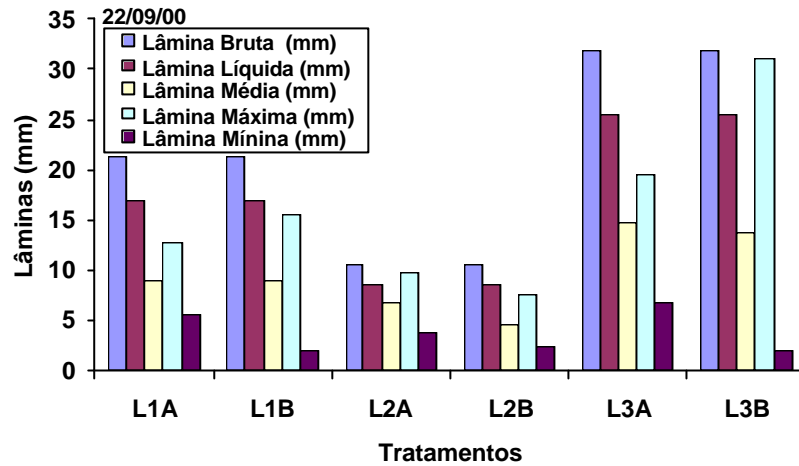


Figura 7A – Lâminas brutas, líquidas, médias, máximas e mínimas aplicadas na irrigação do dia 22/09/2000, para os tratamentos.

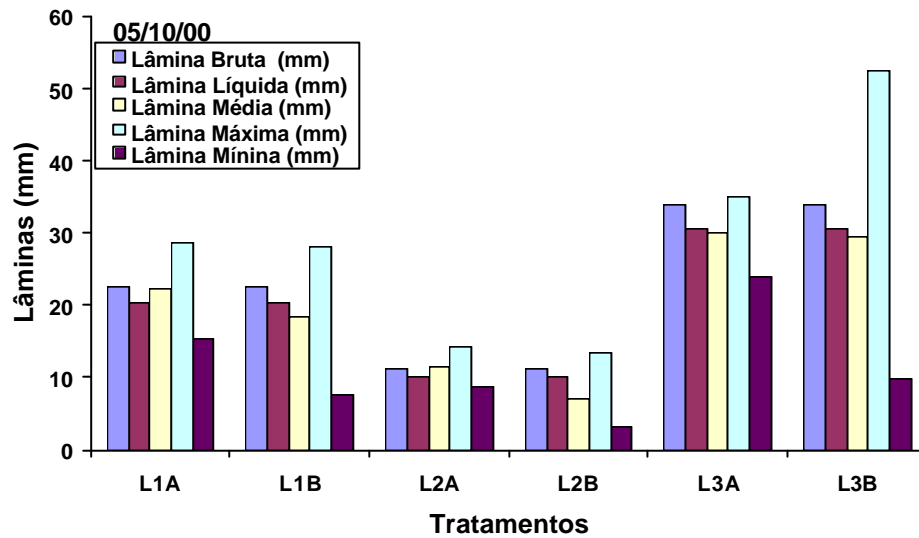


Figura 8A – Lâminas brutas, líquidas, médias, máximas e mínimas aplicadas na irrigação do dia 05/10/2000, para os tratamentos.

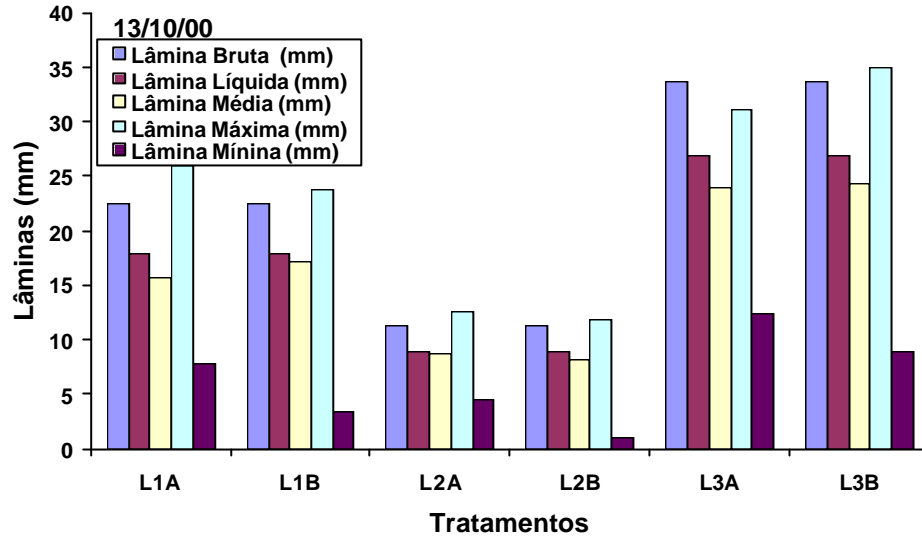


Figura 9A – Lâminas brutas, líquidas, médias, máximas e mínimas aplicadas na irrigação do dia 13/10/2000, para os tratamentos.

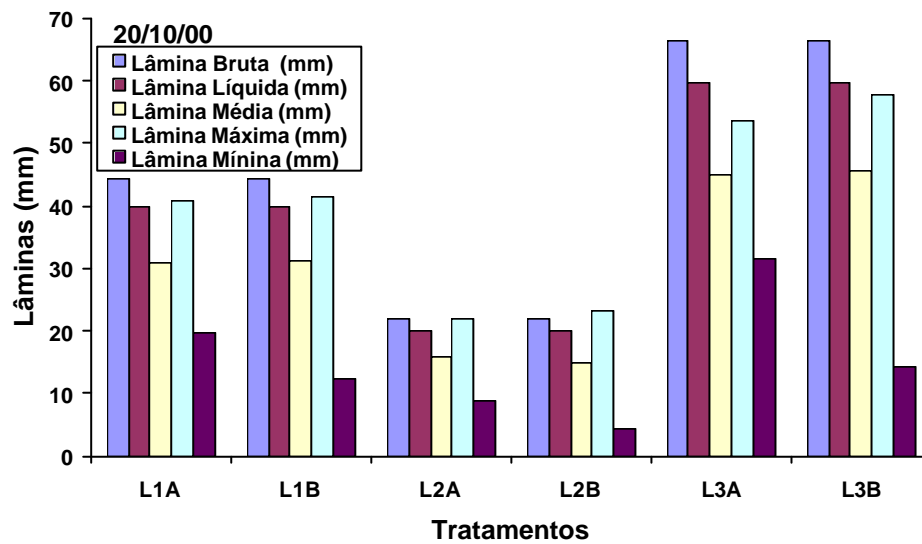


Figura 10A – Lâminas brutas, líquidas, médias, máximas e mínimas aplicadas na irrigação do dia 20/10/2000, para os tratamentos.

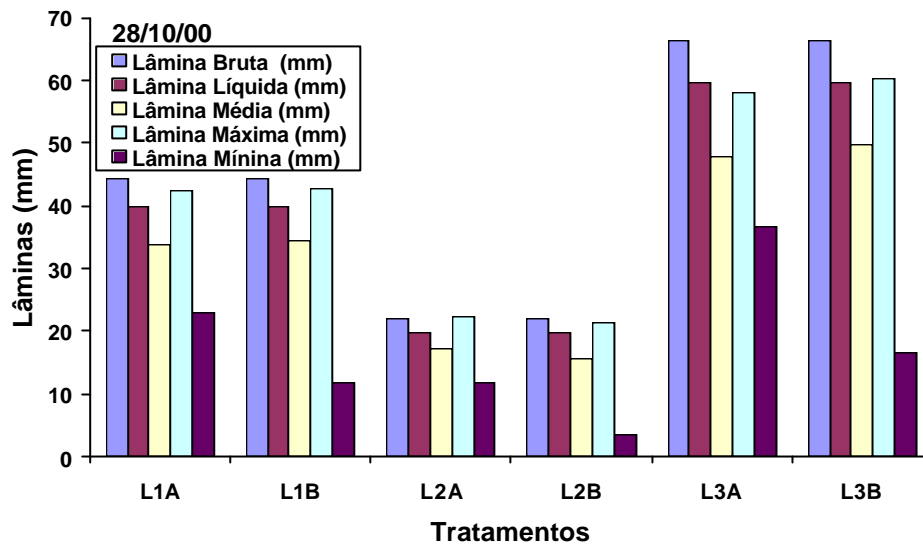


Figura 11A – Lâminas brutas, líquidas, médias, máximas e mínimas aplicadas na irrigação do dia 28/10/2000, para os tratamentos.

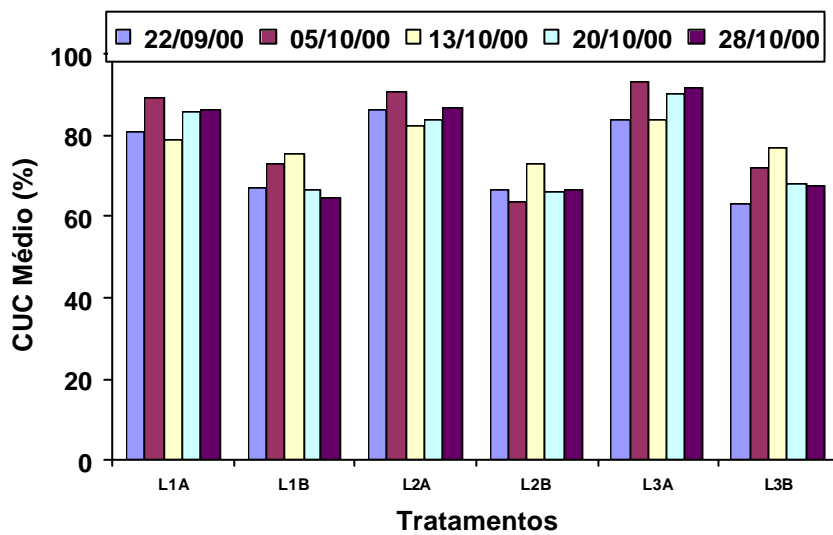


Figura 12A – CUC médio ocorrido em cada irrigação, para os tratamentos.

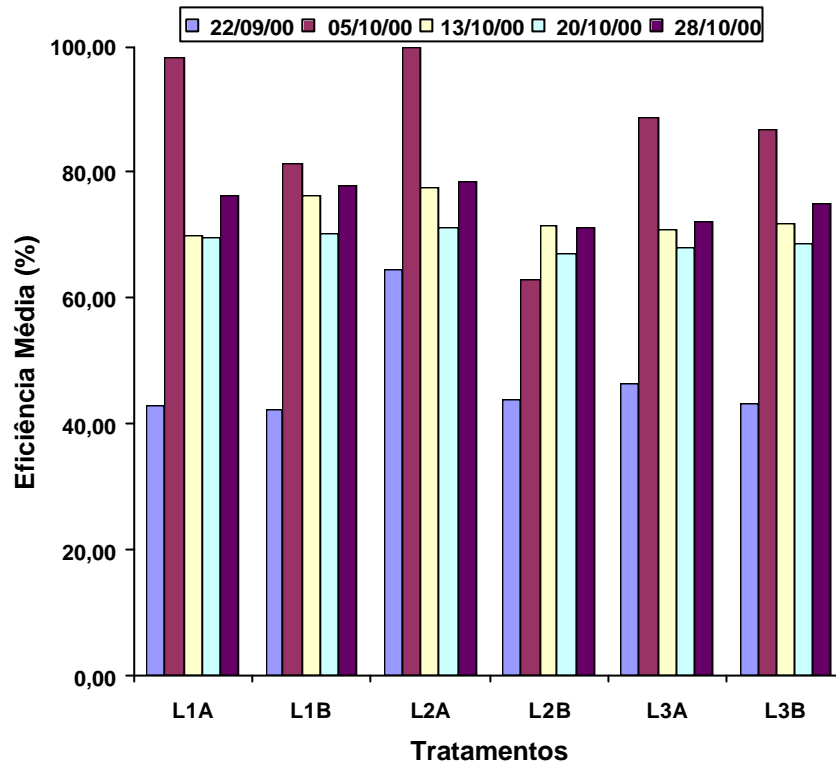


Figura 13A – Eficiência média ocorrida em cada irrigação, para os tratamentos.

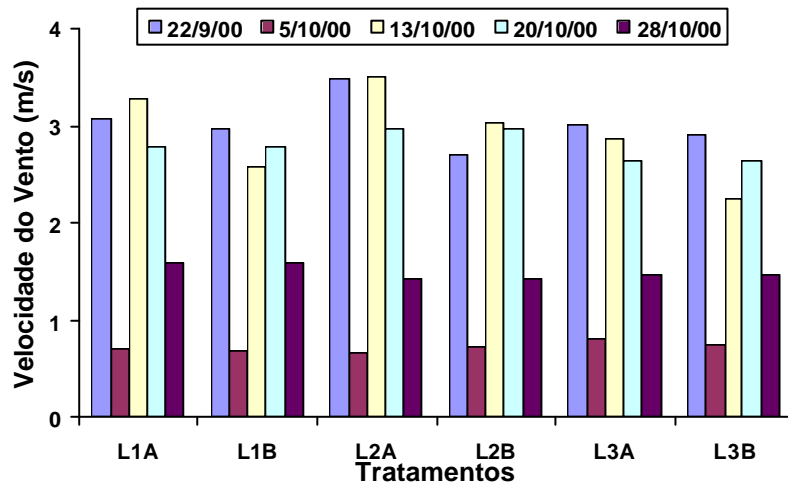


Figura 14A – Velocidade média ocorrida durante cada irrigação, para os tratamentos.

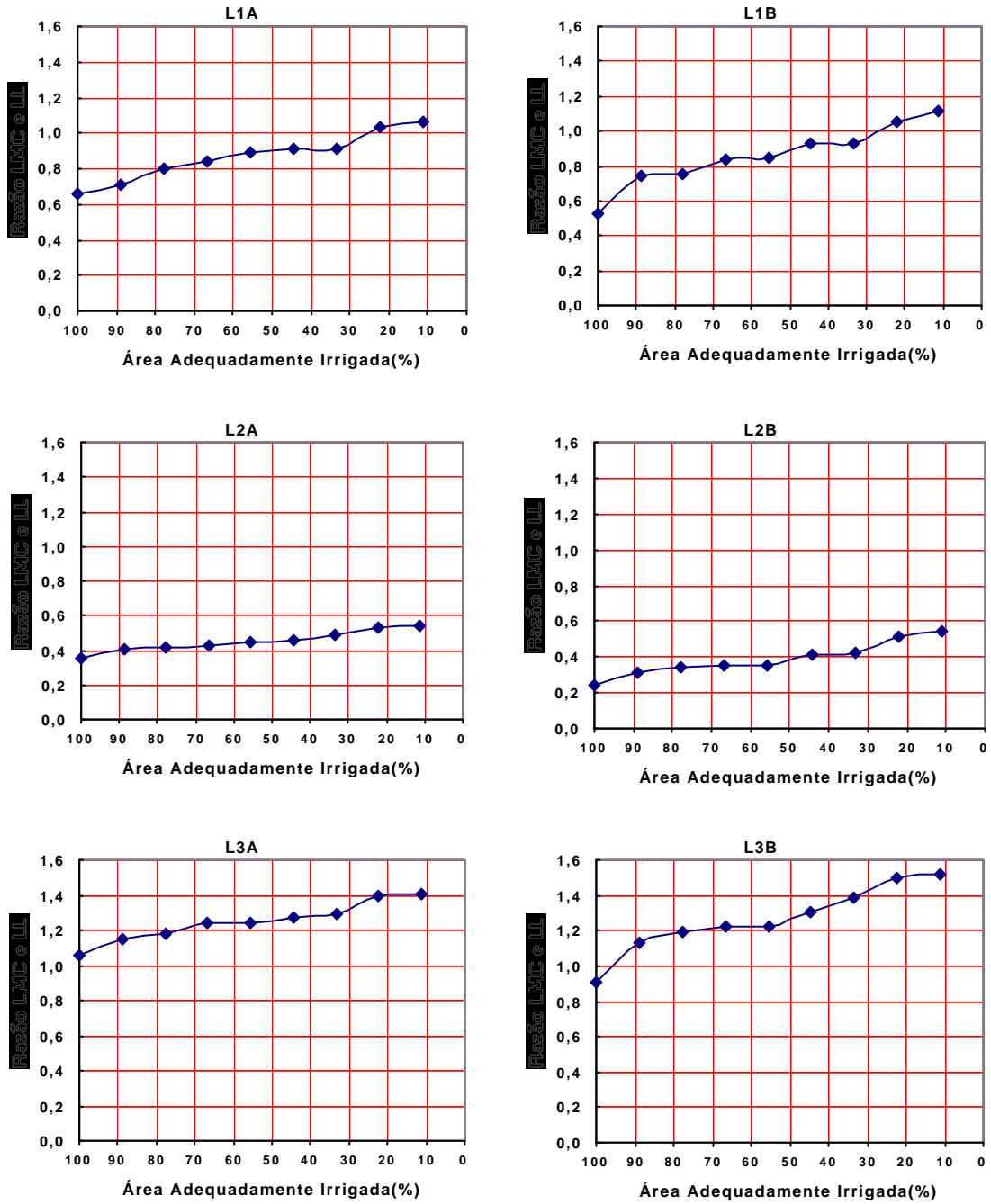


Figura 15A – Área adequadamente irrigada para os tratamentos, desconsiderando a irrigação do dia 22/09/2000.

APÊNDICE B

Quadro 1B – Evapotranspiração de referência e lâmina requerida para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B, L3A, L3B, durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro.

Data	ET _o	H _R L1A	H _R L1B	H _R L2A	H _R L2B	H _R L3A	H _R L3B
22/09/00	5,16	4,84	4,41	3,96	4,73	4,64	4,56
23/09/00	3,78	3,69	3,33	3,19	3,48	3,63	3,77
24/09/00	5,49	5,09	4,53	4,30	4,76	5,00	5,23
25/09/00	4,59	3,92	3,37	3,15	3,60	3,81	4,05
26/09/00	1,20	0,94	0,78	0,71	0,85	0,91	0,98
27/09/00	2,65	2,86	2,64	2,59	2,90	2,77	2,87
28/09/00	3,47	3,68	3,39	3,31	3,73	3,55	3,69
29/09/00	3,24	3,32	3,03	2,95	3,37	3,19	3,33
30/09/00	4,08	4,06	3,68	3,56	4,13	3,89	4,07
01/10/00	4,54	4,29	3,83	3,69	4,39	4,09	4,31
02/10/00	4,12	3,67	3,22	3,07	3,77	3,47	3,69
03/10/00	5,05	4,20	3,59	3,39	4,34	3,94	4,23
04/10/00	5,00	4,52	2,99	3,02	4,00	3,45	3,78
05/10/00	3,73	3,10	1,78	1,81	2,66	2,21	2,48
06/10/00	3,32	3,37	3,01	2,70	2,70	3,25	3,43
07/10/00	2,67	2,61	2,30	2,03	2,03	2,50	2,66
08/10/00	3,61	3,41	2,97	2,57	2,58	3,25	3,47
09/10/00	3,91	3,51	2,99	2,53	2,53	3,33	3,59
10/10/00	5,83	4,90	4,07	3,29	3,29	4,61	5,03
11/10/00	5,23	4,89	3,71	2,92	3,59	3,62	4,03
12/10/00	5,62	4,86	3,39	2,41	3,23	3,44	3,82
13/10/00	5,58	4,34	2,60	1,86	2,41	3,20	3,24
14/10/00	5,67	5,09	4,25	3,70	3,65	4,85	5,02
15/10/00	5,11	4,16	3,31	2,71	2,66	3,91	4,07
16/10/00	4,13	3,01	2,31	1,69	1,65	2,85	2,96
17/10/00	4,74	3,11	2,45	1,48	1,45	3,17	3,17
18/10/00	4,94	3,45	2,97	1,85	1,27	3,17	3,17
19/10/00	4,92	2,94	2,38	1,64	1,00	3,01	3,01
20/10/00	5,36	2,96	2,75	2,11	1,37	3,22	3,22
21/10/00	5,19	5,29	5,31	3,96	3,32	5,97	5,97
22/10/00	5,30	5,07	5,08	3,56	3,21	5,85	5,85
23/10/00	5,62	4,98	5,00	3,28	3,21	5,93	5,93
24/10/00	5,50	4,40	4,42	2,97	2,89	5,47	5,47
25/10/00	4,49	3,43	3,85	1,56	1,29	4,16	4,16
26/10/00	4,57	3,13	3,61	1,02	1,10	3,96	3,96
27/10/00	6,33	3,62	4,35	0,90	1,16	4,89	4,89
28/10/00	4,56	1,91	2,49	0,49	0,52	2,95	2,95

Quadro 2B – Evapotranspiração máxima da cultura, durante o período de 22 de setembro a 28 de outubro.

Data	Evapotranspiração máxima da cultura
22/09/00	5,90
23/09/00	4,34
24/09/00	6,28
25/09/00	5,30
26/09/00	1,38
27/09/00	3,04
28/09/00	4,00
29/09/00	3,73
30/09/00	4,72
01/10/00	5,23
02/10/00	4,77
03/10/00	5,83
04/10/00	5,72
05/10/00	4,31
06/10/00	3,83
07/10/00	3,07
08/10/00	4,16
09/10/00	4,50
10/10/00	6,71
11/10/00	6,04
12/10/00	6,48
13/10/00	6,38
14/10/00	6,53
15/10/00	5,86
16/10/00	4,78
17/10/00	5,46
18/10/00	5,66
19/10/00	5,65
20/10/00	6,17
21/10/00	5,94
22/10/00	6,11
23/10/00	6,47
24/10/00	6,29
25/10/00	5,20
26/10/00	5,31
27/10/00	7,10
28/10/00	4,90

Quadro 3B – Valores do rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0$.

HG/HR	Y/Ymax Cd Normal CUC = 65%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 80%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 95%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 65%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 80%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 95%
0,2	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
0,3	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195
0,4	0,310	0,310	0,310	0,310	0,310	0,310
0,5	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425
0,6	0,540	0,540	0,540	0,539	0,540	0,540
0,7	0,655	0,655	0,655	0,633	0,655	0,655
0,8	0,654	0,770	0,770	0,703	0,757	0,770
0,9	0,747	0,813	0,885	0,756	0,831	0,885
1	0,798	0,885	0,971	0,798	0,885	0,971
1,1	0,825	0,913	0,978	0,832	0,924	0,999
1,2	0,837	0,920		0,859	0,953	
1,3	0,839			0,882	0,973	
1,4				0,901	0,986	
1,5				0,917	0,995	
1,6				0,930	0,999	
1,7				0,941		
1,8				0,951		
1,9				0,960		
2				0,967		

Quadro 4B – Valores do rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,25$.

HG/HR	Y/Ymax Cd Normal CUC = 65%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 80%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 95%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 65%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 80%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 95%
0,2	0,310	0,310	0,310	0,310	0,310	0,310
0,3	0,396	0,396	0,396	0,396	0,396	0,396
0,4	0,482	0,482	0,482	0,482	0,482	0,482
0,5	0,568	0,568	0,568	0,568	0,568	0,568
0,6	0,655	0,655	0,655	0,654	0,655	0,655
0,7	0,741	0,741	0,741	0,725	0,741	0,741
0,8	0,741	0,827	0,827	0,777	0,817	0,827
0,9	0,810	0,859	0,913	0,817	0,873	0,913
1	0,849	0,913	0,978	0,849	0,913	0,978
1,1	0,869	0,935	0,984	0,874	0,943	0,999
1,2	0,877	0,940		0,894	0,964	
1,3	0,879			0,911	0,979	
1,4				0,925	0,990	
1,5				0,937	0,996	
1,6				0,947	0,999	
1,7				0,956		
1,8				0,963		
1,9				0,970		
2				0,975		

Quadro 5B – Valores do rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,5$.

HG/HR	Y/Ymax Cd Normal CUC = 65%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 80%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 95%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 65%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 80%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 95%
0,2	0,540	0,540	0,540	0,540	0,540	0,540
0,3	0,597	0,597	0,597	0,597	0,597	0,597
0,4	0,655	0,655	0,655	0,655	0,655	0,655
0,5	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712
0,6	0,770	0,770	0,770	0,769	0,770	0,770
0,7	0,827	0,827	0,827	0,816	0,827	0,827
0,8	0,827	0,885	0,885	0,851	0,878	0,885
0,9	0,873	0,906	0,942	0,878	0,915	0,942
1	0,899	0,942	0,985	0,899	0,942	0,985
1,1	0,912	0,956	0,989	0,916	0,962	0,999
1,2	0,918	0,960		0,929	0,976	
1,3	0,919			0,941	0,986	
1,4				0,950	0,993	
1,5				0,958	0,997	
1,6				0,965	0,999	
1,7				0,970		
1,8				0,975		
1,9				0,980		
2				0,983		

Quadro 6B – Valores do rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,75$.

HG/HR	Y/Ymax Cd Normal CUC = 65%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 80%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 95%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 65%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 80%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 95%
0,2	0,770	0,770	0,770	0,770	0,770	0,770
0,3	0,798	0,798	0,798	0,798	0,798	0,798
0,4	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827	0,827
0,5	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856
0,6	0,885	0,885	0,885	0,885	0,885	0,885
0,7	0,913	0,913	0,913	0,908	0,913	0,913
0,8	0,913	0,942	0,942	0,925	0,939	0,942
0,9	0,936	0,953	0,971	0,939	0,957	0,971
1	0,949	0,971	0,992	0,949	0,971	0,992
1,1	0,956	0,978	0,994	0,958	0,981	0,999
1,2	0,959	0,980		0,964	0,988	
1,3	0,959			0,970	0,993	
1,4				0,975	0,996	
1,5				0,979	0,998	
1,6				0,982	0,999	
1,7				0,985		
1,8				0,987		
1,9				0,990		
2				0,991		

Quadro 7B – Valores do rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,95$.

HG/HR	Y/Ymax Cd Normal CUC = 65%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 80%	Y/Ymax Cd Normal CUC = 95%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 65%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 80%	Y/Ymax Cd Uniforme CUC = 95%
0,2	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954
0,3	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959
0,4	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965
0,5	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
0,6	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977
0,7	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
0,8	0,983	0,988	0,988	0,985	0,987	0,988
0,9	0,987	0,990	0,994	0,987	0,991	0,994
1	0,989	0,994	0,9985	0,989	0,994	0,998
1,1	0,9912	0,995	0,9989	0,991	0,996	0,999
1,2	0,9918	0,996		0,992	0,997	
1,3	0,9919			0,994	0,998	
1,4				0,9950	0,9993	
1,5				0,9958	0,9997	
1,6				0,9965	0,9999	
1,7				0,9970		
1,8				0,9975		
1,9				0,9980		
2				0,9983		

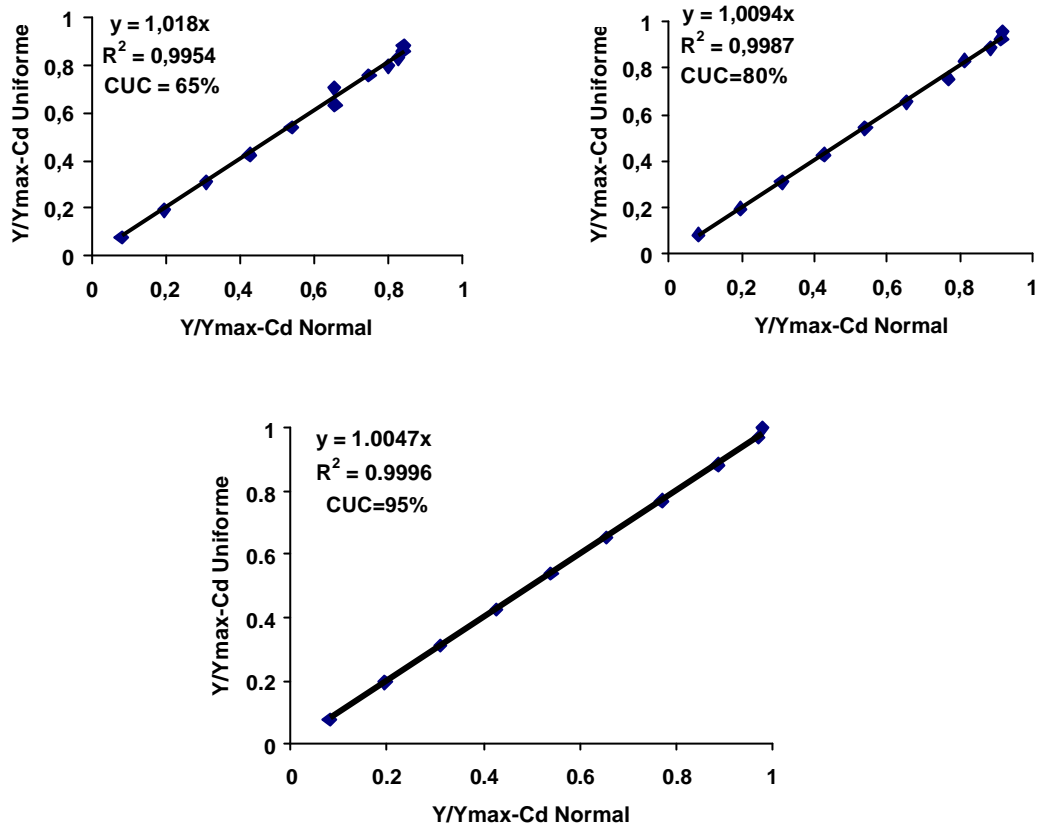


Figura 1B – Comparação entre o rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0$.

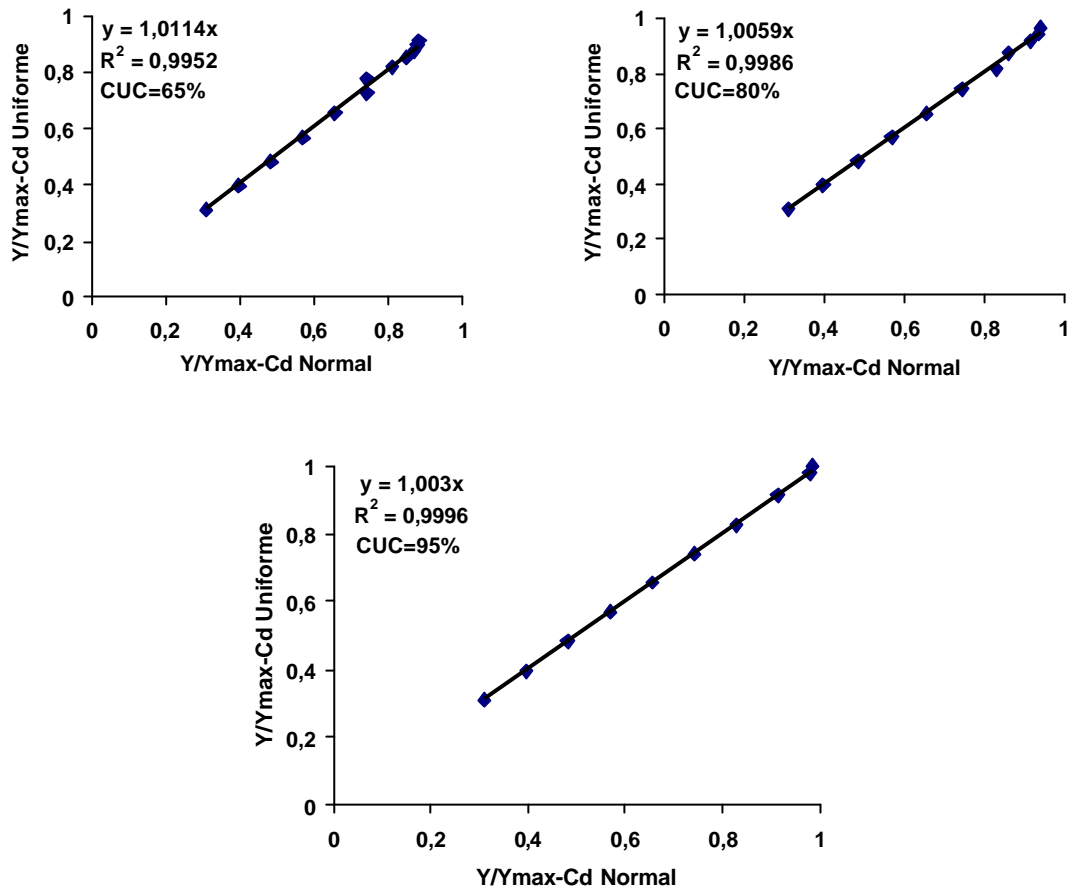


Figura 2B – Comparação entre o rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,25$.

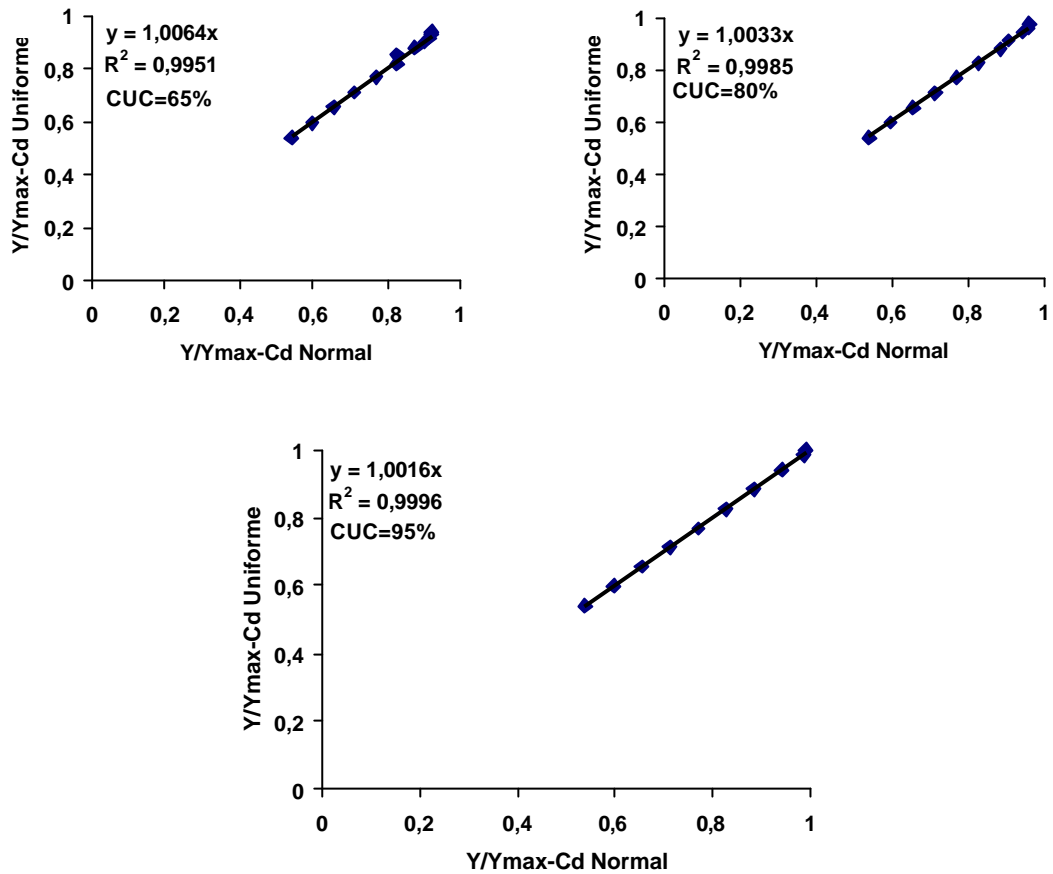


Figura 3B – Comparação entre o rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,5$.

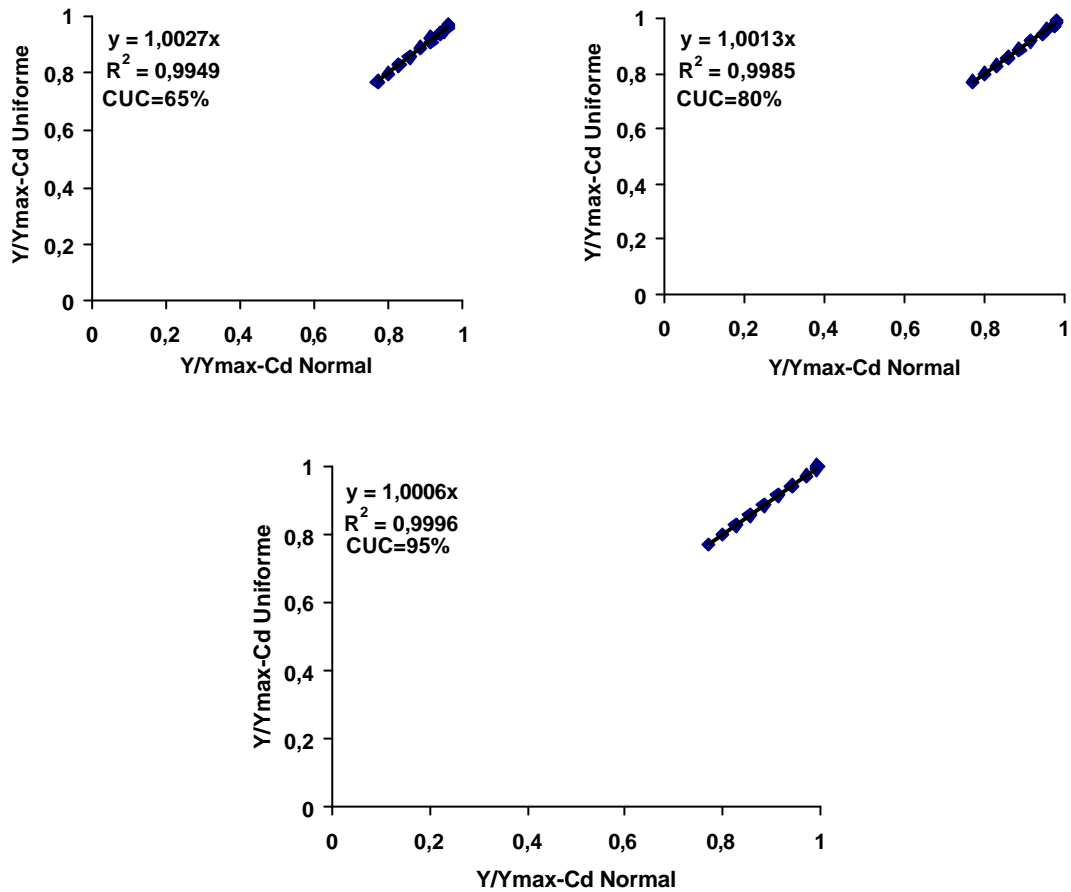


Figura 4B – Comparação entre o rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,75$.

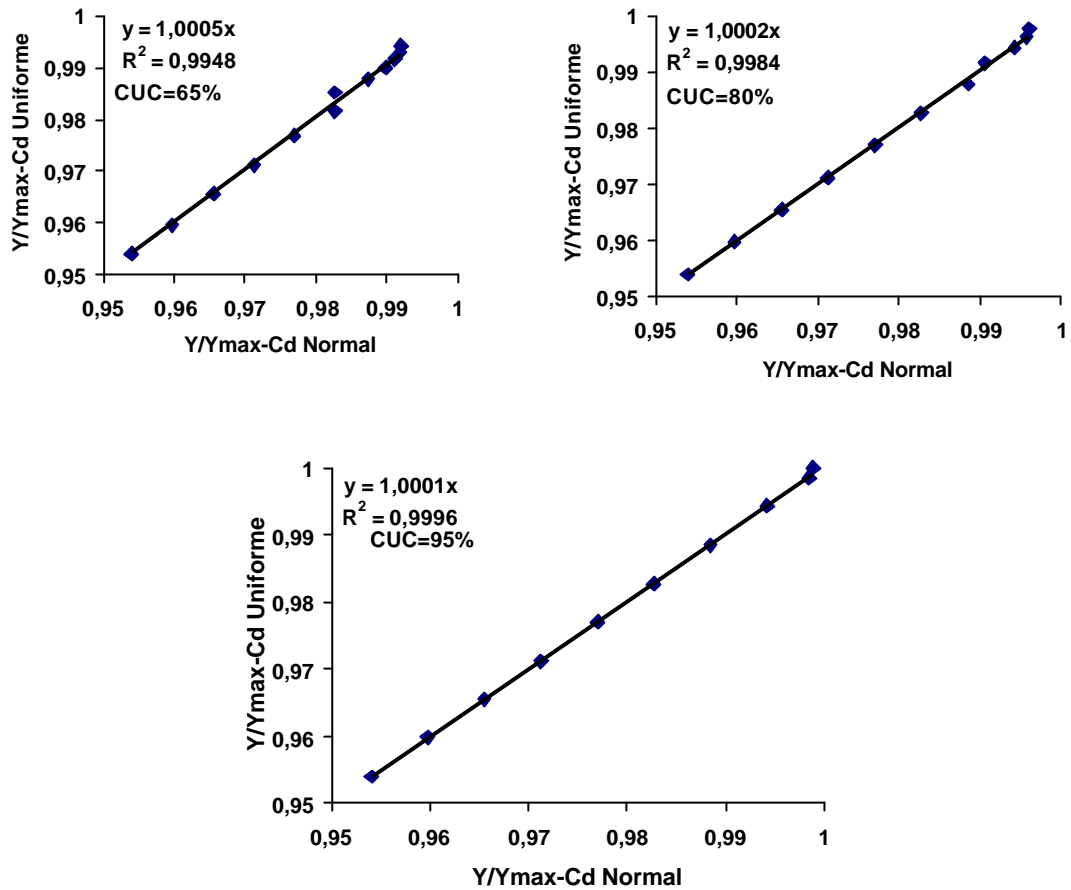


Figura 5B – Comparação entre o rendimento relativo simulado com o modelo utilizando o coeficiente de déficit uniforme e normal, em função da relação lâmina bruta e lâmina requerida, para diferentes valores de CUC e para um $p = 0,95$.