

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

MESTRADO

**PERFORMANCE DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA O FEIJÃO IRRIGADO
NO SERRADO**

DISSERTAÇÃO

OMAR CRUZ ROCHA

Campina Grande – Paraíba
Março - 2000

1131500
CGSC_OIE

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM
COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PERFORMANCE DE MODELOS NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) NO CERRADO**

OMAR CRUZ ROCHA

CAMPINA GRANDE - PB
2000

OMAR CRUZ ROCHA

PERFORMANCE DE MODELOS NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) NO CERRADO

Dissertação apresentada ao curso de
Mestrado em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Orientadores: Hamilton Medeiros de Azevedo (UFPB)
Antônio Fernando Guerra (Embrapa Cerrados)

CAMPINA GRANDE - PB
Março de 2000



R672p Rocha, Omar Cruz.
Performance de modelos na estimativa da evapotranspiração do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no cerrado / Omar Cruz Rocha. - Campina Grande, 2000.
90 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2000.
"Orientação : Prof. Hamilton Medeiros de Azevedo, Prof. Dr. Antônio Fernando Guerra".
Referências.

1. Feijão (*Phaseolus Vulgaris* L.). 2. Feijão - Evapotranspiração. 3. Cerrado. 4. Dissertação - Engenharia Agrícola. I. Azevedo, Hamilton Medeiros de. II. Guerra, Antônio Fernando. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 633.35(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

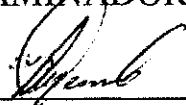
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

OMAR CRUZ ROCHA

Título: "Performance de Modelos de Estimativa de Evapotranspiração para o Feijão Irrigado no Serrado".

BANCA EXAMINADORA

PARECER



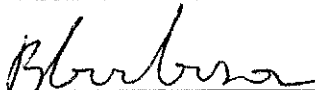
Prof. Hamilton M. de Azevedo-Orientador

APROVADO COM DISTINÇÃO



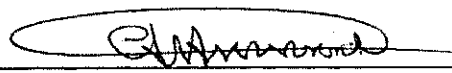
Prof. Antônio Fernando Guerra-Co-Orientador

APROVADO COM DISTINÇÃO



Prof. Bernardo Barbosa da Silva-Examinador

APROVADO COM DISTINÇÃO



Prof. Carlos Alberto Vieira de Azevedo-Examinador

APROVADO COM DISTINÇÃO

Campina Grande, 22 de março de 2000

Por sua nobre paciência e
compreensão dedico, com muito
amor, à minha esposa Maria Izabel
Barreto Rocha.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à DEUS, pela presença constante e pelo amparo espiritual nas horas difíceis;

À EMBRAPA CERRADOS, pelo recurso físico e material para realização da pesquisa, particularmente ao Dr. Euzébio Medrado da Silva por todo seu empenho e confiança;

À UFPB, particularmente à Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade e pelo esforço para consolidação do convênio;

À CAPES, pelo comprometimento e incentivo financeiro durante todo curso;

Ao Dr. Antônio Fernando Guerra, pela excelente orientação, confiança e encorajamento durante toda realização do ensaio;

Ao Prof., Hamilton Medeiros de Azevedo, pela orientação, dedicação e comprometimento durante o curso;

Ao Mestre rural Amilton da Silva Pires e ao acadêmico Marco Antônio Jacomazzi, pelo interesse e cooperação nos trabalhos de campo;

E aos demais, que de alguma forma contribuíram para a concepção e desenvolvimento dessa dissertação.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii

Capítulo

I. INTRODUÇÃO.....	13
II. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 - A região dos cerrados.....	17
2.2 - O feijão no cerrado.....	18
2.3 - Métodos de manejo de irrigação.....	19
2.4 - Evapotranspiração.....	20
2.5 - Estimativa de Evapotranspiração.....	22
2.6 - Estimativa dos parâmetros de rugosidade para superfície vegetada.....	27
2.6.1 - Parâmetros de rugosidade para momento.....	28
2.6.1 - Parâmetros de rugosidade para calor sensível.....	29
III. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 - Localização do experimento e características da área.....	31
3.2 - Condução da cultura.....	32
3.2.1 - Plantio.....	32
3.2.2 - Tratos culturais	32
3.2.3 - Manejo de irrigação	33
3.2.4 - Colheita.....	33
3.3 - Instrumentação e coleta de dados.....	34
3.3.1 - Parâmetros vegetativos.....	34
3.3.2 - Parâmetros micrometeorológicos.....	36
3.3.3 - Seleção dos parâmetros micrometeorológicos.....	40
3.4 - Coeficientes de cultura.....	41
3.4.1 - Determinação dos coeficientes.....	42
3.5 - Estimativas da Evapotranspiração.....	43
3.5.1 - Critérios utilizados nas estimativas.....	44
3.5.2 - Descrição dos modelos.....	44
3.6 - Ajuste dos modelos.....	51
3.7 - Avaliação da performance dos modelos.....	52

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 - Parâmetros de rugosidade para superfície vegetada.....	54
4.2 - Performance dos modelos.....	55
4.2.1 - Performance dos modelos com a utilização de coeficientes de cultura determinados na pesquisa.....	56
4.2.1.1 - Penman-Monteith.....	56
4.2.1.2 - Penman original.....	61
4.2.1.3 - Penman-FAO.....	63
4.2.1.4 - Jensen-Haise.....	65
4.2.1.5 - Chistiansen-Hargreaves.....	67
4.2.1.6 - Thornthwaite-Camargo.....	69
4.2.2 - Performance do modelo Penman-Monteith calculado com coeficientes de cultura obtidos na literatura.....	71
4.3 - Comparação entre os modelos.....	73
V. CONCLUSÕES	77
ANEXOS	79
BIBLIOGRAFIA	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Coefficientes de cultura para cada intervalo de irrigação: Determinados na pesquisa (k_{cD}), provenientes da FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977) (k_{cF}) e propostos pela EMBRAPA/CNPAP (Steinmetz, 1984) (k_{cE}), para o feijoeiro.....	42
TABELA 2	Erros médios na estimativa da E_t do feijoeiro obtidos com a aplicação dos seis modelos em Planaltina-DF.....	58
TABELA 3	Valores da análise de regressão simples entre a E_t estimada pelos seis modelos e a E_t do Feijão Preto Medida num lisímetro de pesagem em Planaltina-DF,.....	58
TABELA 4	Comparação entre os modelos de boa performance na estimativa da E_t do feijoeiro em Planaltina-DF,.....	74

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Evapotranspiração real do Feijão Preto em relação à dias após plantio (DAP) em Planaltina-DF.....	35
FIGURA 2	Índice de área foliar (IAF) do Feijão Preto em relação aos dias após plantio (DAP) em Planaltina-DF.....	36
FIGURA 3	Coefficiente de cultura para o Feijão Preto, variedade diamante negro, em relação aos dias após plantio (DAP) em Planaltina-DF.....	43
FIGURA 4	Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade definidos na pesquisa, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.....	59
FIGURA 5	Comparação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade definidos na pesquisa, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.....	59

FIGURA 6	Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade estimados, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	60
FIGURA 7	Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade estimados, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF.....	60
FIGURA 8	Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman Original (1948), e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	62
FIGURA 9	Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman Original (1948), e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF.....	62
FIGURA 10	Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman modificado pela FAO, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	64
FIGURA 11	Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman modificado pela FAO, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF.....	64
FIGURA 12	Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman modificado pela FAO ajustado, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	65
FIGURA 13	Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Jensen-Haise, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	66

FIGURA 14	Comparação entre a E_t estimada a partir do modelo Jensen-Haise, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF.....	66
FIGURA 15	Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Christiansen-Hagreaves, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	68
FIGURA 16	Comparação entre a E_t estimada a partir do modelo Christiansen-Hagreaves, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF.....	68
FIGURA 17	Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Christiansen-Hagreaves ajustado, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	69
FIGURA 18	Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Thornthwaite modificado por Camargo, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	70
FIGURA 19	Comparação entre a E_t estimada a partir do modelo Thornthwaite modificado por Camargo, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF.....	70
FIGURA 20	Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, calculado com coeficientes de culturas provenientes da FAO, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	74
FIGURA 21	Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, calculado com coeficientes de culturas propostos pela EMBRAPA/CNPAP, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF.....	75
FIGURA 22	Relação entre a E_{t0} estimada a partir do modelo Penman-Monteith, e estimada a partir tanque Classe A cm, em Planaltina, DF.....	75

FIGURA 23 Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman-Monteith, calculado com diferentes coeficientes de cultura, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF.....76

PERFORMANCE DE MODELOS NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) NO CERRADO

RESUMO

Os produtores de feijão da região do Cerrado contam com apenas uma tecnologia para o manejo das irrigações: A tensiometria. Muito embora essa metodologia tenha alto potencial de uso, não tem sido amplamente adotada pelos produtores. Por esta razão, a utilização de modelos de estimativa de evapotranspiração tem se mostrado bastante aplicável à realidade da região; entretanto, o uso desses modelos, sem uma prévia avaliação, pode resultar na obtenção de estimativas imprecisas. Dessa forma, esse trabalho tem o propósito de avaliar a performance de seis modelos de estimativa de evapotranspiração para a cultura do Feijão Preto no período seco do Cerrado, objetivando colocar a disposição dos produtores modelos, ajustados, que permitam um manejo eficiente da irrigação no sistema produtivo do Cerrado.

A evapotranspiração do feijoeiro foi medida com um lisímetro de pesagens. O experimento foi conduzido na Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina, DF, Brasil. Os modelos Penman original, Penman-Monteith e Jensen-Haise apresentaram, quando avaliados com coeficientes de culturas determinados na pesquisa (k_{cD}), ótima performance na estimativa da evapotranspiração estando assim, aptos ao manejo de irrigação. Por outro lado, o modelo Penman-FAO apresentou valores superestimados (16,97%), enquanto que os modelos Chistiansen-Hargreaves e Thornthwaite-Camargo apresentaram valores subestimados em -11,78% e -25,24%, respectivamente. Além disso, verificou-se que o modelo Penman-FAO (k_{cD}) com a função de vento ajustada [$f(u)=2,0(1+0,864u_2)$] apresentou ótima performance e, que o modelo Chistiansen-Hargreaves (k_{cD}) com o termo energético ajustado ($S_0 = 0,5$), otimizou significativamente as suas estimativas, podendo ambos, nessas condições, serem empregados com segurança no manejo de irrigação.

MODELS PERFORMANCE FOR ESTIMATING EVAPOTRANSPIRATION OF BEAN'S CROP (*Phaseolus vulgaris* L.) IN THE CERRADO REGION

ABSTRACT

Bean producers from the Brazilian Cerrado region have only one technology for the irrigation handling: the measurement of the water tension in the soil through the use of tensiometers. Although this methodology has high potential of use, it has not been widely adopted by the producers. Thus, the utilization of models to evapotranspiration estimate has shown to be applicable to the Cerrado region; however, the use of these models, without a previous evaluation, can result in the obtaining of imprecise estimates. So, this paper aims to evaluate the performance of six models to evapotranspiration estimate of black bean crop in the dry season of the Brazilian Cerrado region. It also aims to give adjusted models to evapotranspiration estimate to the producers which give a handling efficient to the agricultural irrigated system of the Cerrado region.

The evapotranspiration of the black bean crop was measured with the use of a weighing lysimeter. The experiment was carried in the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa Cerrados), located in Planaltina, DF, Brazil. When estimated with crop coefficient, determined in the research (k_{cD}), the original Penman, Penman-Monteith and Jensen-Haise models presented an excellent performance for estimating evapotranspiration; being like this, capable to the irrigation handling. Otherwise, Penman-FAO model resulted in values overestimated in 16,97% while Christiansen-Hargreaves and Thornthwaite-Camargo models resulted in values underestimated in -11,78% and -25,24%, respectively. In addition, results of this research showed that Penman-FAO (k_{cD}) model with an adjusted wind function [$f(u)=2,0(1+0,864u_2)$] can be applied confidently. Also it was observed, that Christiansen-Hargreaves model (k_{cD}) with $S_0 = 0,5$, improved widely its estimates.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A região de Cerrado da América do Sul representa, potencialmente, uma das mais importantes áreas aptas para a exploração agrícola. A distribuição geográfica dos seus 250 milhões de hectares abrange a Venezuela, Colômbia, Bolívia e Brasil, com 204 milhões de hectares (Macedo, 1997).

A região do Cerrado brasileiro apresenta, de acordo com a classificação de Köppen, clima do tipo AW nas suas partes baixas, e CWh₁ no Planalto Central (Espinoza et al., 1982), com precipitações médias anuais de, aproximadamente, 1500mm. Os solos dominantes da região são de baixa fertilidade natural e pertencem à classe dos latossolos, com acentuada deficiência de fósforo.

As características edafoclimáticas da região permitem o desenvolvimento, durante a estação chuvosa, da maior parte das culturas. Contudo, persistem problemas devido a existência de período seco (maio a setembro) e da irregularidade das chuvas no período de máximo desenvolvimento das culturas (“veranico”), resultando em necessidade de irrigação total no período seco e suplementar no período chuvoso.

Uma das grandes dificuldades dos produtores do Cerrado encontra-se no manejo da irrigação, já que na maioria dos casos, a água é aplicada sem nenhum critério de monitoramento, resultando no uso inadequado dos recursos hídricos.

Vários são os procedimentos possíveis de serem utilizados como critérios para o manejo de água da irrigação, teoricamente o melhor critério seria aquele que considera o maior número de fatores que determinam a transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera.

Os critérios de manejo de água normalmente utilizados são, via de regra, baseados em medidas no solo, na planta e na atmosfera. Os critérios baseados em medidas no solo fundamentam-se na determinação da umidade ou tensão de água no solo pelo método gravimétrico ou por instrumentos como tensiômetros, blocos de gesso, sonda de neutrons, sondas delta T, etc... Os baseados em medidas na planta fundamentam-se no monitoramento do potencial de hidrico, da resistência estomática, da temperatura da folha por meio de termômetro infravermelho e outros. Já os baseados em medidas climáticas variam desde simples medidas de evaporação de água de um tanque, como o Classe A, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração (quantidade de água consumida em uma área cultivada). A grande limitação dessas equações encontra-se na precisão das estimativas, que dependem diretamente da acurácia das variáveis e da precisão desses modelos, os quais vêm sendo utilizados em condições climáticas e agronômicas muito diversas daquelas em que foram concebidas.

Dentre os diversos métodos de determinação da evapotranspiração um dos mais precisos é o da utilização de lisímetros de pesagens, todavia, essa tecnologia restringe-se a instituições de pesquisa devido ter pouca aplicabilidade econômica em áreas agrícolas. Dessa forma, a estimativa a partir de modelos matemáticos tem recebido bastante atenção pelo meio agrícola, devido a praticidade e facilidade oferecidas por alguns modelos. Entretanto, existe necessidade de se ajustar esses modelos para as diversas

regiões produtoras, já que em suas formas originais pouquíssimas serão as estimativas compatíveis com as condições climáticas locais.

Nos últimos anos um grande número de trabalhos têm sido direcionados para o estudo da estimativa da evapotranspiração por meio de modelos; todavia, numa avaliação das equações mais comuns para a determinação da evapotranspiração feita pela American Association of Civil Engineers, na qual utilizou-se dados climáticos de 11 diferentes localidades do mundo, concluiu-se que não existe um método que utilize dados climáticos, que possa ser globalmente adequado, sem que exista algum tipo de calibração local ou regional, principalmente em regiões tropicais e regiões altas (Jensen et al., 1989). Informação que é validada devido ao fato de que, em condições tropicais, existe uma grande demanda de energia do sistema para o fluxo de calor latente, o que ocorre em menor intensidade em climas úmidos. Segundo Jensen et al., (1989), em climas úmidos, frios, somente de 50 a 60 por cento da radiação líquida (R_n) pode ser convertida em calor latente, enquanto em climas quentes áridos, o calor latente pode demandar toda a R_n e ainda de 10 a 50 % da energia direcionada ao aquecimento do ar (calor sensível).

Atualmente, os produtores irrigantes da região do Cerrado contam com apenas uma tecnologia, já estabelecida, para o manejo das irrigações, que é a medição da tensão de água no solo por meio de tensiômetros (Guerra & Silva, 1998). Essa metodologia, apesar de ter demonstrado alto potencial de uso, não tem sido amplamente adotada pelos produtores, por necessitar de um número expressivo de instrumentos para representar cada área irrigada. Esse problema é agravado pela necessidade constante de cuidados com os tensiômetros, o que muitas vezes os produtores não têm condição de satisfazer. Por esta razão, a utilização de modelos de estimativa de evapotranspiração tem se mostrado bastante aplicável a realidade da região, entretanto, o uso desses modelos, sem

uma prévia avaliação, pode resultar na obtenção de estimativas imprecisas, o que poderia desacreditar a tecnologia junto aos produtores.

No Brasil, a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) tem sido objeto de diversos estudos por se tratar da principal fonte da dieta alimentar nacional com um consumo “per capita” de 17 a 18 kg/ano (IBGE, 1958-1983), ocupando uma área de, aproximadamente, 3,5 milhões de hectares (BRASIL. Ministério da agricultura, 1996).

A maior parte da produção de feijão irrigado no Cerrado do Brasil central ocorre no período de maio a setembro, período caracterizado pela ausência de chuvas e por condições reduzidas de umidade relativa. Por este motivo, este trabalho tem por objetivo avaliar a performance de seis modelos de estimativa de evapotranspiração para a cultura do Feijão Preto, variedade diamante negro, nas condições climáticas do período seco do Cerrado brasileiro, almejando, por fim, colocar a disposição dos produtores do Cerrado modelos de estimativas de evapotranspiração, ajustados, que permitam um manejo eficiente da irrigação no sistema produtivo irrigado da região.

CAPÍTULO II

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – A região dos Cerrados

A região do Cerrado brasileiro se estende de 5° a 20° de lat. Sul e de 45° a 60° de long. Oeste e apresenta, de acordo com a classificação de Köppen, clima do tipo AW (tropical chuvoso) nas suas partes baixas, e CWh₁ (temperado chuvoso de inverno seco) no Planalto Central (Espinoza et al., 1982), com precipitações médias anuais de, aproximadamente, 1500 mm.

Quanto ao potencial hídrico da região, destaca-se a disponibilidade de água em diversas nascentes, caracterizadas por veredas perenes com grande variação entre a vazão máxima e mínima. Entretanto, não raramente, observa-se a exploração inadequada desses recursos, fato que vem intensificando as discussões sobre o uso racional da água no Cerrado.

Segundo Dinarte (1997) os solos dominantes no Cerrado pertencem à classe dos latossolos, com alta variação da VIB (velocidade básica de infiltração) e infiltração instantânea, variando de 100 a 200 mm, estabilizando-se perto das cinco horas de aplicação d'água.

Como característica climática principal destaca-se a presença de dois períodos bem definidos: estação chuvosa, entre outubro e abril, quando ocorrem mais de 90% das chuvas, e estação seca, com ausência quase total de chuvas, que se prolonga de maio a setembro.

No período chuvoso há ocorrências frequentes de ausência de chuvas, “veranicos”, que variam de sete a vinte dias. Segundo Dinarte (1997) os “veranicos” ocorrem, geralmente, nos meses de janeiro e fevereiro e têm ocasionado significativa diminuição da produtividade agrícola constatando-se perda superior a 70% da produção quando não irrigado.

Atualmente a área irrigada do Cerrado é superior a 300.000 ha, dos quais em sua maioria predomina culturas anuais como milho, arroz, cevada, feijão e outros, em sistema rotacionado. O feijoeiro irrigado é, normalmente, a cultura anual de maior valor econômico e dessa forma vem se destacando no sistema produtivo da região.

2.2 – O feijão no Cerrado

Nos últimos anos o cultivo do feijão nos Cerrados tem mostrado um crescimento significativo em área plantada, devido, principalmente ao aumento da área irrigada, hoje em torno de 300.000 ha, e a melhoria do nível tecnológico utilizado.

O sistema de cultivo na região é multivariado, predominando três épocas de plantio: novembro (feijão das águas), fevereiro (feijão da seca) e junho (feijão irrigado), correspondendo a uma área irrigada anual de, aproximadamente, 290.000 ha. Muito embora a produtividade média de feijão no Brasil não ultrapasse 732 kg/ha, a produtividade obtida em áreas irrigadas do Cerrado, tem ultrapassado os 2.000 kg/ha, fato

que vem justificando investimentos no cultivo do feijão irrigado e, conseqüentemente, na produção de tecnologias adequadas a cultura.

2.3 – Métodos de Manejo de Irrigação

Uma das grandes dificuldades dos produtores irrigantes do Cerrado é o manejo da irrigação, já que na maioria dos casos, a água é aplicada sem nenhum critério de monitoramento, resultando no uso inadequado dos recursos hídricos.

Vários são os procedimentos possíveis de serem utilizados como critérios para o manejo de água da irrigação. Teoricamente o melhor critério seria aquele que considera o maior número de fatores que determinam a transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera. Os critérios de manejo de água normalmente utilizados são, via de regra, baseados em medidas no solo, na planta e na atmosfera. Os critérios baseados em medidas no solo fundamentam-se na determinação da umidade ou tensão de água no solo pelo método gravimétrico ou por instrumentos como tensiômetros, blocos de gesso, sonda de neutros, sondas delta T, TDR, etc... Os baseados em medidas na planta fundamentam-se no monitoramento do potencial hídrico, da resistência estomática, da temperatura da folha por meio de termômetro infravermelho e outros; entretanto, esses monitoramentos apresentam limitações de aplicabilidade em campo, em razão da pequena disponibilidade de informações dos limites e dos índices recomendáveis para a maioria das culturas (Cairo, 1995). Muitos são os critérios baseados em medidas na atmosfera, que podem ser usados para avaliação das necessidades hídricas de uma cultura. As variáveis climáticas mais comumente utilizadas são: radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e evaporação da água em tanques padronizados. Com base nessas informações é

possível determinar a evapotranspiração de uma cultura, considerada como referência, e a partir desse dado estimar, por meio de coeficientes apropriados, o consumo de água de uma cultura específica. Esses métodos variam desde simples medidas de evaporação de água de um tanque, como o Classe A, até complexos modelos matemáticos. Esses modelos têm se destacado como uma boa alternativa para o manejo de irrigação, contudo, a grande limitação dessa metodologia encontra-se na precisão das estimativas, que dependem diretamente da acurácia das variáveis e da precisão dos modelos que, via de regra, vêm sendo utilizados em condições climáticas e agronômicas muito diversas daquelas em que foram concebidas, situação que vem justificando o aprimoramento desses modelos para as diversas regiões.

2.4 – Evapotranspiração

A evapotranspiração é um dos mais importantes componentes do ciclo hidrológico e está envolvida, até certo ponto, em necessariamente todos os estudos hidrológicos. Segundo Berlato & Molion (1981), devido ao vapor ser transportado na atmosfera, condensando e precipitando a grandes distâncias da sua origem, a mudança de fase de líquido para vapor representa o maior mecanismo para redistribuição de energia no planeta.

Nos estudos hidrológicos para o planejamento e monitoramento de recursos hídricos a evapotranspiração assume uma importância considerável, principalmente no que se refere a bacias fluviais e projetos de irrigação.

Qualquer planejamento e operação de um projeto de irrigação em que se visem a racionalização do uso da água e a máxima produtividade, requer conhecimentos específicos das relações solo-água-planta-atmosfera e manejo de irrigação.

Segundo Bernardo (1989) em regiões áridas, onde a água é fator limitante, as pesquisas devem ser desenvolvidas visando planejar irrigações em termos de máxima produção por unidade de água aplicada, observação muito correta, entretanto, o requerimento de água por parte da agricultura, segundo Carvalho (1998), é maior que o da indústria. Para se ter uma idéia, na indústria de papel consome-se 250 toneladas de água por tonelada de produto, enquanto no cultivo de uma tonelada de soja consome-se 1500 toneladas de água. Diante desses dados e apoiado no fato de que a água potável do planeta não ultrapassa 0,7% do total hídrico, deve-se estender a observação de Bernardo para todos os trabalhos de pesquisa que envolva recursos hídricos.

De acordo com Souza (1983), um calendário de irrigação adequado requer a determinação de quando irrigar e quanta água aplicar, com o propósito de minimizar a percolação de água fora da zona radicular da cultura e manter um ótimo nível de umidade do solo.

Vários métodos baseados em parâmetros do solo e da planta, e em medições de evaporação, têm sido descritos para estabelecer frequências de irrigação e quantidade de água a aplicar nas culturas. A forma mais comum para programar a irrigação é através do balanço de água do perfil do solo. Nele, a evapotranspiração é calculada, seja utilizando dados climatológicos e coeficientes das culturas, seja mediante medições diretas de água no perfil.

A evapotranspiração, desconsiderando a água para constituição dos tecidos, pode ser definida como a evaporação da água do solo mais a transpiração dos cultivos ocorridas

no campo. Thornthwaite (1948) definiu evapotranspiração potencial (ETP) como sendo “a transferência de água do solo para a atmosfera a partir de uma superfície plana de solo úmido, completamente coberta de vegetação verde, suficientemente grande para eliminar o efeito de oásis”. Para Penman (1948), “é a quantidade de água transpirada na unidade de tempo, por uma cultura de porte baixo, altura uniforme e crescimento ativo, sob condições ótimas de umidade e cobrindo totalmente o solo. Doorenbos & Pruitt (1977), reavaliando o conceito de ETP, apresentaram o termo evapotranspiração de referência (E_t) que é a “perda de água para atmosfera por evaporação e transpiração de uma superfície extensa coberta com grama verde possuindo de 8 a 15 cm de altura uniforme, em crescimento ativo e sombreando completamente um terreno sem déficit de umidade”.

Segundo Matzenauer (1990), citado por Stone e Silveira (1995), na agricultura irrigada, o conhecimento da evapotranspiração máxima ($E_{t,m}$) nos diferentes estádios de desenvolvimento das culturas é fundamental para o planejamento e manejo da irrigação. Da mesma forma, também é útil na agricultura não irrigada para adoção de práticas culturais que permitam o melhor aproveitamento das disponibilidades hídricas naturais de cada região, especialmente para o ajustamento de épocas de semeadura. Além disso, esse conhecimento é importante nos programas de zoneamento e de estimativa de rendimento das diversas culturas, baseando-se nas disponibilidades hídricas das diferentes regiões.

2.5 – Estimativa da evapotranspiração

Nos últimos anos um grande número de trabalhos tem sido direcionados para o estudo da estimativa da evapotranspiração por meio de modelos matemáticos. Entretanto, pouquíssimos trabalhos têm realmente aprimorado os modelos existentes para

as diferentes condições de clima e cultura. A maioria dos trabalhos têm se empenhado nas comparações quanto ao desempenho dos modelos na estimativa da evapotranspiração de referência (E_t).

Muito embora, a E_t seja um parâmetro de avaliação que permita opinar quanto a qualidade de um modelo, a falta de definição dos coeficientes de cultura por local e período vem causando a descrença de técnicos e produtores devido a não atingirem suas expectativas de uso.

Jensen et al., (1989), analisando a performance de diversos métodos com dados climáticos de 11 localidades do mundo, concluíram que todos os métodos combinados, a exceção do Penman (1963), que subestimou a E_t , e Penman modificado pela FAO, que a superestimou, apresentaram boas estimativas dos piques mensais em localidades áridas. De forma contrária, todos os métodos combinados, à exceção do Penman-Monteith, geralmente superestimaram a E_t , durante todos os meses do ano em locais úmidos. Em se tratando de métodos baseados na radiação solar, concluíram que o método de Jensen-Haise subestimou a E_t em localidades úmidas e a superestimou em localidades áridas. Já Thornthwaite, método que baseia-se primariamente na temperatura do ar, foi considerado, dentre todos, o mais limitado em estimar a E_t , medida por lisímetro. Para os métodos baseados na evaporação de tanques, o método de Christiansen apresentou dispersões evidentes quando plotada a E_t do modelo em relação à obtida a partir do lisímetro. Entretanto, devido a observações de uma boa performance do método em seis localidades, concluíram que a maior desvantagem dos métodos baseados em tanques de evaporação são a possibilidade de erros de leitura e a necessidade constante de manutenção nas condições locais dos tanques. Em conclusão geral, recomendaram o modelo de

Penman-Monteith, igualmente a Allen et al., (1989) que afirmam ser esse método o mais preciso para determinação da E_t diária.

Na Arábia Saudita, Mohammad (1998), desenvolveu uma função de vento específica para o local e concluiu que o modelo de Penman foi o que melhor estimou a evapotranspiração real naquela região.

Howell et al., (1997) determinando a evapotranspiração máxima diária e sazonal para trigo de inverno (*Triticum aestivum* L.), sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] e milho (*Zea mays* L.), concluíram que o modelo de Penman-Monteith apresentou a melhor performance na estimativa da evapotranspiração máxima em Bushland, Texas.

Grazhdani et al., (1998), ao estimarem E_t em grama com 0,08 a 0,15 m de altura no sudeste da Albânia, concluíram que o modelo Penman-Monteith foi o que melhor estimou a E_t , sendo que o de Penman a superestimou e o de Penman modificado pela FAO subestimou a E_t .

De forma contrária, Qian et al., (1996) estimaram a evapotranspiração da grama bermuda [*Cynodon dactylon* (L.) Pers x *transversalis* Burt - Davy] em Manhattan, KS, usando atmômetros e o modelo Penman-Monteith, concluíram que esse modelo superestimou a evapotranspiração da grama quando a atmosfera demandou pouca água e subestimou quando a demanda foi alta.

Ventura et al., (1999), comparando os modelos de Penman modificado pela FAO, Penman-Monteith em intervalos horários e Penman-Monteith modificado pela FAO para o período de 24 horas, concluíram que todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios; entretanto, o Penman modificado pela FAO demonstrou uma pequena tendência a superestimar a E_t em algumas condições climáticas do verão.

Os trabalhos com lisímetros de pesagem no Brasil são restritos e em muitos casos os equipamentos apresentam dimensões bastante reduzidas o que contribui para o aumento da potencialidade de erros de precisão. A maioria dos trabalhos realizados no País tem como referência o modelo Penman-Monteith.

Em São Paulo, Pereira et al. (1996), avaliando o desempenho do modelo de Penman-Monteith na estimativa da E_t em condições de clima subtropical úmido (Piracicaba-SP), em relação a um lisímetro de pesagens, concluíram que o modelo de Penman-Monteith apresentou uma excelente performance de desempenho tanto no período diurno como em 24 horas. A resistência de dossel da grama, estimada como resíduo de utilização do modelo Penman-Monteith, apresentou um valor médio de 92 s.m^{-1} para o período diurno e 41 s.m^{-1} em 24 horas.

Em Minas Gerais, Fernandes et al. (1997), em estudos comparativos de evapotranspiração para fins de irrigação, em Uberaba-MG, utilizando os métodos de Camargo, Makkink, Radiação solar (FAO-24), Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Penman, Penman-piche e Penman-Monteith, e considerando como padrão o método de Penman, concluíram que as melhores correlações com o modelo de Penman foram obtidas com os métodos de Hargreaves-Samani (83%), Camargo (71%) e Jensen Haise (70%).

Bomono et al. (1998), em um estudo comparativo de modelos de estimativa da E_t para as regiões cafeeiras do triângulo e noroeste de Minas Gerais, tomando-se como referência o método Penman-Monteith e utilizando os métodos de Kimberley-Penman, Penman FAO; Penman FAO sem correção; Penman original; Hargreaves & Samani; Radiação-FAO; Blaney e Criddle FAO; e Thornthwaite simplificado por camargo, concluíram que todos esses métodos indicaram boas estimativas de E_t para valores

diários, à exceção de Thonhwaite e Hargreaves, e que o modelo de Blaney-Cliddle FAO pode ser usado sem ajuste local para as duas regiões.

No Ceará, Oliveira et al. (1998), avaliando três equações de estimativa da E_t (FAO Penman-Monteith, Hargreaves 1985 e Hargreaves 1974), para Paraipaba, em relação a valores medidos em lisímetros de pesagem de precisão, concluíram que dentre as equações, a que apresentou melhor desempenho foi FAO Penman-Monteith, Hargreaves 1985 mostrou boa estimativa para o período seco; enquanto Hargreaves (1974), que é o mais utilizado na região, mostrou a necessidade de ser substituído por FAO Penman-Monteith sempre que houver disponibilidade de dados, já que apresentou o pior desempenho.

Santos et al.(1997), determinando a E_t e a ET máxima (ET_m) em diferentes fases fenológicas do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) WALP.), concluíram, que o comportamento da E_t foi semelhante em ambos os métodos. Considerando Penman-Monteith como padrão, os métodos Penman versão original e Penman corrigido pela FAO apresentaram os maiores valores em todas as fases fenológicas, constatando que esses métodos superestimam a evapotranspiração de referência em 6,98% e 16,99%, respectivamente. Por sua vez, os métodos de Radiação corrigido pela FAO e Blaney-Criddle corrigido pela FAO, subestimaram em 10,94% 18,73%, respectivamente. Quanto aos valores de ET_m, durante as fases consideradas, verificou-se que o valor máximo foi alcançado durante a fase de enchimento dos grãos.

De uma forma geral, os modelos baseados na proposta inicial de Penman têm se destacado nas estimativas de E_t , principalmente o modelo Penman-Monteith.

Monteith (1965) fechou o balanço de energia para superfícies vegetadas através do incremento dos parâmetros da resistência aerodinâmica na equação original

proposta por Penman (1948). Essa mudança foi essencial para o aprimoramento dos modelos combinados, entretanto, muitos autores têm encontrado resultados de E_t superestimados com essa equação, principalmente, em períodos de pouca demanda hídrica por parte da atmosfera. Essa situação pode estar geralmente associada a inadequada obtenção de parâmetros de rugosidade, resultando em estimativas pouco confiáveis da resistência aerodinâmica. Entretanto, essa superestimativa da E_t pode ocorrer devido ao fato de que em condições de umidades relativas mais altas a proporcionalidade do termo energético da equação fique menor em relação ao termo aerodinâmico, fato que ainda precisa ser estudado.

2.6 – Estimativa dos parâmetros de rugosidade da superfície vegetada

Em condições atmosféricas próximas da neutra o perfil da velocidade horizontal média do vento (u), medida na subcamada dinâmica, apresenta uma forma logarítmica.

De acordo com Monteith (1973) o fluxo turbulento na subcamada dinâmica, sobre um dossel uniforme de altura h , comporta-se como se os elementos do dossel da planta fossem localizados a uma certa distância do solo. Esta distância (d_m) é usualmente chamada de plano de deslocamento da superfície do solo.

Para um dossel vegetal específico, d_m representa o nível médio em que o momento é absorvido pelos elementos individuais da comunidade vegetal (Thom, 1972; Monteith, 1973; e Guerra, 1990). A distância de d_m para o nível do dossel onde a velocidade horizontal do vento torna-se zero é, usualmente, definida como comprimento de rugosidade para o momento (z_{om}). De acordo com Thom (1972), Monteith (1973),

Brutsaert (1982) e Guerra (1990), z_{om} representa a posição no interior do dossel de plantas onde a absorção do momento é efetiva.

Segundo Guerra (1990), a determinação desses parâmetros é usualmente feita por gráficos da velocidade do vento (u), medida em várias alturas (z), versus o $\ln(z-d_m)$. O valor de d_m para qualquer uma posição da reta é o valor requerido para formar o perfil logarítmico do vento com a altura. O valor de z_{om} é baseado na intercepção desta reta com o eixo vertical e o valor de u^* é baseado na declividade da reta.

2.6.1 – Parâmetros de rugosidade para momento

A rotina clássica para determinação dos parâmetros u^* , z_{om} , e d_m , é a do ajustamento do perfil da velocidade do vento medida sobre condições atmosféricas próximas de neutra por uma técnica de determinação da soma dos erros dos quadrados mínimos (Robinson, 1962). Deste modo, a complexidade envolvida na determinação do perfil de vento faz esse método inviável para aplicações práticas.

Segundo Brutsaert (1982) para superfícies vegetadas a magnitude de z_{om} e d_m é uma função da altura, densidade, estrutura, arranjo e flexibilidade dos elementos individuais do dossel. Muitas investigações têm sido conduzidas visando determinar esses parâmetros para diferentes culturas. Como consequência, várias equações foram apresentadas na literatura para estimativa de z_{om} e d_m . Uma lista com muitas dessas equações é apresentada por Abtew et al., (1989).

Em geral, os resultados dos vários estudos têm indicado que os valores de z_{om} e d_m são aproximadamente $1/10$ e $2/3$, respectivamente, da altura média do dossel (Matthias et al., 1990).

Lettau (1969) declarou que essa simples relação não avalia as diferenças na distribuição espacial entre os elementos locais e propôs que a equação $z_{om} = 0,5h(s/S)$ fosse usada para estimar z_{om} . Nessa expressão (h , cm) é a altura média dos elementos, (s , cm²) o contorno da área do obstáculo, (S , cm²) a área por planta. Apesar desta expressão apresentar a possibilidade de melhores estimativas da rugosidade da superfície, a complexidade da avaliação dos parâmetros s e S , tem restringido seu uso prático.

Thom (1972), trabalhando com uma cultura artificial em um túnel de vento, declarou que z_{om} não pode ter uma única relação com a altura do dossel (h), e sugeriu a equação $z_{om} = 0,36(h - d_m)$ com d_m sendo estimado pela relação 2/3 de h .

Vários outros trabalhos propuseram equações para determinação dos parâmetros de rugosidade para o momento (Seginer, 1974; Shaw e Pereira, 1982; Molion e Moore, 1983; De Bruin e Moore 1984; Jacobs e van Boxel, 1988; e Azevedo e Verma, 1986). Dentre os mais recentes, Abtew et al., (1989) apresentaram um método para avaliação de z_{om} e d_m baseado na geometria e fração de cobertura dos elementos rígidos da superfície. Apesar de ter obtido boas estimativas, a aplicação prática deste método é restrita devido ao requerimento da estimação da forma e fração de cobertura dos elementos do dossel.

2.6.2 – Parâmetros de rugosidade para Calor sensível.

Similar à absorção de momento, o parâmetro z_{oh} pode ser determinado também pela aplicação de uma técnica de determinação da soma dos erros dos quadrados mínimos (Robinson, 1962).

De acordo com Guerra (1990), poucos estudos sobre a determinação dos parâmetros de rugosidade para o calor sensível (z_{oh}) têm sido publicados. Sendo que a maioria dos trabalhos têm feito referências a relação entre z_{om} e z_{oh} .

Garratt e Hicks (1973), usando dados de superfícies artificiais e naturais homogêneas, observou que a relação z_{om}/z_{oh} é aproximadamente igual a 7,4. Garrett e Francey (1978) plotaram valores de $\ln(z_{om}/z_{oh})$, obtidos sobre diferentes superfícies, versus o número de Reynolds rugoso. Observaram não existir qualquer tendência significativa com o número de Reynolds rugoso, e baseados nesses resultados, Garrat (1978) recomendou o uso de $z_{oh} = z_{om} / 7$ para todas as superfícies vegetadas, similar a Guerra (1990) que sugeriu para grama bermuda $z_{oh} = z_{om} / 7,6$.

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Localização do experimento e características da área

As medidas dos parâmetros vegetativos e climáticos foram obtidas na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), Planaltina, DF - sobre Feijão Preto (*Phaseolus vulgaris L.*), cultivado em um Latossolo Vermelho Escuro Argiloso, no período de 23 de junho a 05 de setembro de 1999 (período seco).

O ensaio foi instalado em uma área com aproximadamente 9,0 hectares, dotada de um lisímetro de pesagens e irrigada por um equipamento de irrigação por aspersão do tipo pivô central.

Planaltina encontra-se localizada a uma latitude de 15° 35'30" S, longitude de 47° 42'30" W e altitude de 1007 m, apresentando clima, segundo a classificação de Köppen, do tipo CWh₁, com precipitação média anual de 1.460 mm.

3.2 - CONDUÇÃO DA CULTURA

3.2.1 - Plantio

Utilizou-se a variedade de feijão Diamante Negro, indicada para lançamento na V Reunião da comissão técnica da região II, ocorrida em Goiânia – GO na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Pesquisa do arroz e feijão (CNPAP), em junho de 1991.

A semeadura foi realizada no dia 04 de junho de 1999, manualmente no interior do lisímetro e mecanicamente no restante da área, sendo distribuídas, aproximadamente, 12 sementes viáveis por metro linear de sulco no espaçamento de 45 cm entre linhas.

3.2.2 - Tratos culturais

Com base na análise química do solo, aplicou-se, como adubação de plantio, 400 kg/ha da fórmula 4-30-16 + Zn e, via água de irrigação, 70 kg/ha de N na forma de uréia, distribuídos aos 26 e 42 dias após plantio.

Visando controlar ervas daninhas, aplicou-se, 24 dias após o plantio, 1,8 l/ha de Fusiflex, mecanicamente em toda área do pivô a exceção do interior do lisímetro onde a limpeza foi manual.

No início do estágio reprodutivo, aos 40 dias após plantio, foi aplicado, mecanicamente, 1,8 l/ha de Tamaron para controle de mosca branca

3.2.3 - Manejo da irrigação

As irrigações iniciais foram feitas, aproximadamente, a cada três dias com lâminas em torno de 10 a 12 mm com o propósito de garantir a germinação das sementes e preencher o reservatório do solo. As irrigações seguintes foram realizadas com base nas leituras diárias de três baterias de tensiômetros instalados nas profundidades de 10, 20 e 30 cm na linha de plantio. O momento de irrigar foi determinado quando a leitura média dos tensiômetros instalados a 10 cm atingia 40 kPa, conforme Figuerêdo et al. (1997).

A quantidade de água a ser aplicada por irrigação foi calculada para elevar a umidade do solo, na camada de 0 a 30 cm, até a condição de capacidade de campo, o que era possível através das curvas características de umidade do solo e das leituras dos tensiômetros, o que resultou numa eficiência de aplicação de 94%, já que dos 460 mm de água aplicados, 434 mm foram evapotranspirados, fato que contribuiu para obtenção do potencial produtivo da cultura.

3.2.4 - Colheita

Devido a variedade diamante negro apresentar uma deiscência acentuada no final do ciclo, realizou-se a colheita quando as vagens do terço médio, da maioria das plantas, atingiam a maturação fisiológica, momento em que ainda ocorria uma expressiva fotossíntese na planta.

O feijão foi colhido manualmente no interior do lisímetro e em 10 parcelas aleatórias no dia quatro setembro, no restante da área foi arrancado manualmente no dia cinco de setembro de 1999 e trilhado mecanicamente quinze dias depois.

Todo manejo da cultura foi realizado de forma a obter o potencial produtivo da variedade, o que resultou numa produtividade de, aproximadamente, 50 sacos por hectare.

3.3 - Instrumentação e coleta de dados

3.3.1 - Parâmetros vegetativos

3.3.1.1 - Evapotranspiração do feijão

A evapotranspiração do feijão foi medida, diariamente, durante todo ciclo por meio de um lisímetro de pesagem de 2,0 m de largura por 3,0 metros de comprimento e 1,2 m de profundidade. O sistema é constituído de uma caixa metálica montada sobre quatro células de carga conectadas a um indicador de balança EZ 210 e de um outro sistema com duas células de carga, ligadas a um outro indicador, para medir o excesso. A precisão das medidas foi programada nos indicadores de balança para 200 gramas, o que corresponde, em um lisímetro de 6 m², a uma precisão nas medidas de evapotranspiração de 0,03 mm.

O curva de evapotranspiração real (E_{tr}) do feijão em relação aos dias após plantio (DAP) (Figura 1), foi determinada com base nas pesagens do lisímetro registradas às 8:30 h de cada dia, dividindo-se a variação ocorrida no intervalo das irrigação pela área

do lisímetro, e baseando-se, também, na umidade do solo obtida através das leituras dos reflectômetros com domínio de tempo (TDR), instalados no lisímetro nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 e 100 cm.

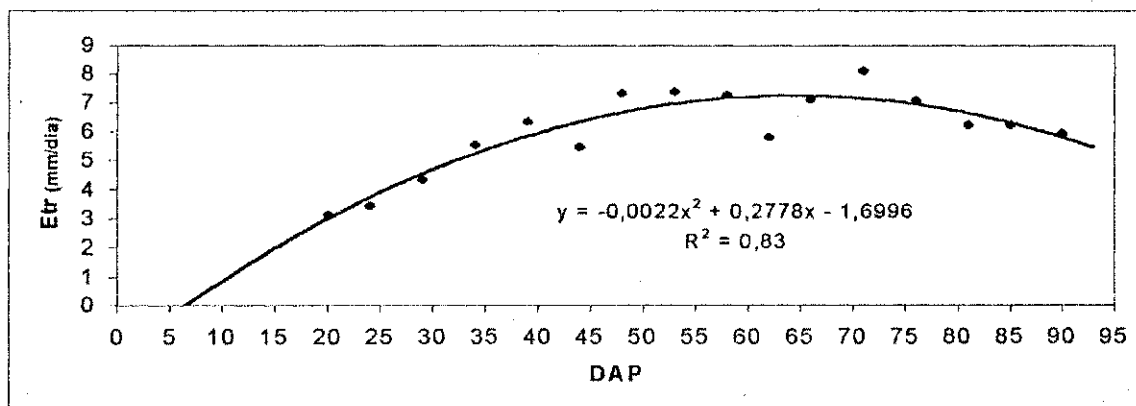


Figura 1. Evapotranspiração real do Feijão Preto em relação à dias após plantio (DAP) em Planaltina-DF

3.3.1.2 - Índice de área foliar e altura de planta

O índice de área foliar (IAF) foi medido por um analisador de dossel modelo LAI 2000, em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, no interior do lisímetro e em vinte pontos próximos ao local onde foram instalados os instrumentos. O IAF médio por intervalo foi obtido a partir da equação ajustada resultante dos índices coletados (Figura 2). Em períodos de sol intenso usou-se uma sombrinha de 2 m de diâmetro para evitar a radiação direta sobre o instrumento.

A altura de planta foi medida, em intervalos semanais a partir do fechamento do dossel, no interior do lisímetro e em vinte pontos próximos ao local onde foram instalados os instrumentos.

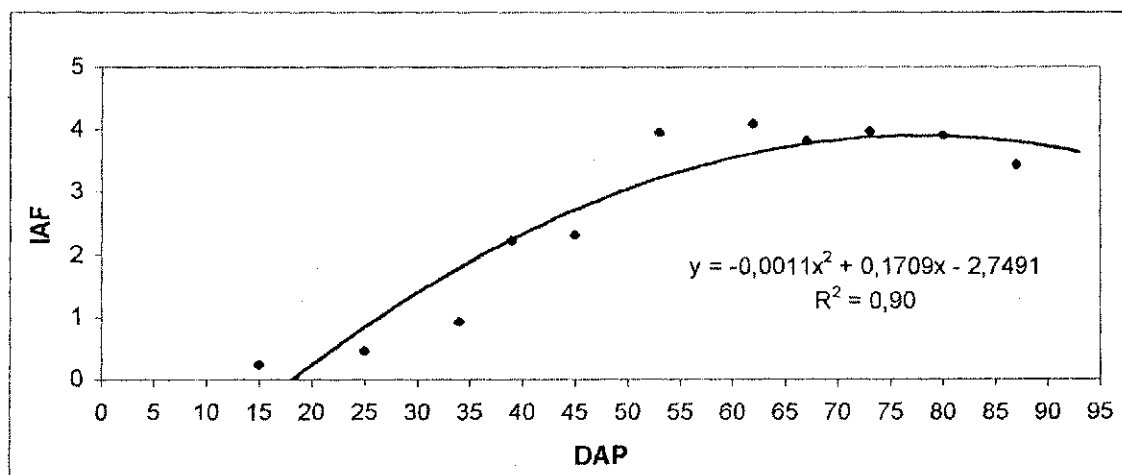


Figura 2. Índice de área foliar (IAF) do Feijão Preto em relação à dias após plantio (DAP) em Planaltina-DF

3.3.2 - Parâmetros micrometeorológicos

A finalidade de se coletar parâmetros micrometeorológicos sobre o feijão foi a de estabelecer as características da rugosidade da superfície vegetada.

A instrumentação micrometeorológica usada nesta pesquisa pode ser separada em dois tipos básicos: instrumentos de medidas de fluxo e sistemas de medida de perfis. O primeiro consistia em um radiômetro líquido, um albedômetro, um anemômetro sônico para medida do fluxo de calor sensível, e duas placas de fluxo de calor no solo. Os sistemas de medida de perfis consistiam em quatro anemômetros de microrresposta e quatro termopares de cobre-constantan.

Os instrumentos foram instalados sobre quatro mastros separados 3,0 m, em uma posição da área que resultava em um “fetch” superior a 200 m.

3.3.2.1 - Perfil da velocidade do vento

A velocidade horizontal do vento foi medida por quatro anemômetros de microrresposta modelo 014A (limiar de leitura de 0,25 m/s) posicionados, individualmente, sobre um mastro em quatro diferentes alturas à partir da superfície do solo: 2, 3, 4, e 5 m. Para facilitar a instalação cada anemômetro foi acoplado sobre uma armação independente construída para facilitar o movimento, permitindo assim um perfeito ajuste. A frequência de medição foi de 10 segundos, e a média calculada a cada 10 minutos por um sistema de aquisição de dados (CR 21X da Campbell).

Devido a altura do pivô-central ser inferior à do mastro, este foi fabricado com uma dobradiça na sua base que permitia deitá-lo no momento das irrigações, sendo apoiado em um suporte até a passagem do pivô central.

3.3.2.2 - Direção do vento

A direção do vento foi medida por um aparelho de monitoramento de direção de vento “Met One” modelo 024A, posicionado a dois metros do nível do solo. A frequência de medição foi a mesma usada na velocidade do vento.

3.3.2.3 - Perfil da Temperatura do ar

A temperatura do ar (°C) foi medida por quatro termopares de cobre-constantan, posicionados no mesmo mastro e nas mesmas alturas dos anemômetros. A

freqüência de medição também foi de 10 segundos com média calculada a cada 10 minutos pelo 21X.

3.3.2.4 - Radiação líquida

A radiação líquida (W/m^2) foi medida por um radiômetro líquido modelo Q-7 posicionado sobre um mastro a 2 m do nível do solo. A freqüência de medição foi de 10 segundos com média calculada a cada 10 minutos por um coletor de dados CR 21X da Campbell.

3.3.2.5 - Radiação incidente e refletida

As radiações solar incidente e solar refletida (W/m^2) foram medidas por um albedômetro modelo GS2 posicionado no mesmo mastro e na mesma altura do radiômetro líquido, tendo também a mesma freqüência de medição.

3.3.2.6 - Fluxo de calor no solo

A densidade de fluxo de calor no solo (W/m^2) foi medida por duas placas de fluxo de calor no solo modelo HFT3, instaladas no solo a 5 cm de profundidade, sendo uma na linha de plantio e outra entre linhas. A freqüência e medição também foi a mesma das anteriores.

3.3.2.7 - Calor sensível

As flutuações da média do componente vertical da velocidade do vento foram medidas sobre o dossel do feijão por um anemômetro sônico “Campbell Scientific Incorporated – CSI”, modelo CA27. As flutuações da média da temperatura do ar foram

medidas por um par termoelectrico do tipo E, acoplado ao aparelho CA27. O CA27 foi instalado em um mastro a 2 m da superficie do solo, sendo orientado para a direcao predominante do vento com o proposito de minimizar o efeito do mastro e de outros instrumentos no fluxo de ar. As medicoes foram feitas em intervalos de 0,2 segundos e correlacionadas a cada 10 minutos pelo 21X obtendo-se medias do calor sensivel (W/m^2). Para os dias de irrigacao o par termoelectrico era retirado com objetivo de nao danifica-lo, por essa razao, os conjuntos de parametros climaticos coletados nos dias das irrigacoes foram descartados.

3.3.2.8 - Temperatura do dossel

A temperatura da superficie do feijao ($^{\circ}C$) foi medida com um termometro infravermelho com angulo de visao de 15° . O termometro foi instalado em um mastro, individual, a 1,5 m da superficie do solo, posicionado em um angulo de aproximadamente 45° entre a superficie do dossel e a sua direcao de visao. A frequencia de medicao tambem foi de 10 segundos com media a cada 10 minutos, sendo que o aparelho permanecia ligado das 8:30 as 15:30 h.

3.2.2.9 - Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente (LE) (W/m^2) foi calculado por diferenca usando-se a equacao do balanço de energia para superficies vegetadas, através das medias de radiação líquida (R_n), densidade de fluxo de calor no solo (G) e calor sensível (H), em intervalos de 10 minutos, a partir da equação seguinte:

$$LE = R_n - (H + g) \quad (01)$$

3.3.3 - Seleção dos parâmetros micrometeorológicos

Para calcular os parâmetros de rugosidade da superfície para o momento (Z_{om}) e calor sensível (Z_{oh}), os perfis de velocidade do vento foram selecionados, nas condições atmosféricas próximas de neutra, pelos seguintes critérios:

1) $-5 < H < 5 \text{ W/m}^2$ ou $-1 < R_n < 10 \text{ W/m}^2$; semelhante a Hicks et al. (1989) e Guerra (1990), esse critério foi usado para selecionar dados de possíveis condições atmosféricas próximas de neutra.

2) Velocidade do vento do anemômetro mais baixo (u_2) maior que 2 m/s; este critério foi usado para restringir dados possivelmente afetados por erros devido à precisão dos instrumentos (Molion & Moore, 1983; Hicks et al., 1989; Guerra 1990). Para um conjunto de dados mais precisos e com base no conhecimento do perfil logarítmico do vento, só foram selecionados dados que se comportassem na seguinte ordem de velocidade do vento nas quatro alturas: $u_2 < u_3 < u_4 < u_5$.

3) $-0,015 < z/L < 0,015$; o parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov (z/L) foi usado como critério final para inferir se condições atmosféricas próximas de neutra ocorreram ou não, em média, durante os intervalos de 10 minutos.

No parâmetro de estabilidade de Monin-obukhov (z/L), z é a altura de medição da velocidade do vento (m) e L é o parâmetro de comprimento de Monin-Obukhov (m). L é positivo em condições atmosféricas estáveis, negativo em condições não estáveis, e infinitamente grande em condições de atmosfera próxima a neutra. Quanto o efeito do vapor d'água sobre a estabilidade da atmosfera é levada em consideração, L pode ser expresso como (Brutsaert, 1982):

$$L = \frac{(-u^*)^3 \rho}{kg \left(\left(\frac{H}{T_a C_p} \right) + 0,61E \right)} \quad (02)$$

onde u^* é a velocidade de fricção (m/s) definida como a relação entre o Reynolds rugoso e a densidade do ar [$u^* = (\tau/\rho)^{1/2}$], k é a constante de Von Karman (0,41); g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s); T_a , a média da temperatura de referência do ar (K); e E é a densidade de fluxo de massa evaporativa (kg/m²s). T_a foi calculada como uma média das temperaturas medidas pelos termopares, nas quatro diferentes alturas, e E foi calculado pela equação do balanço de energia para superfícies vegetadas (item 3.2.2.9). O intervalo de $|z/L| \leq 0,015$ foi considerado suficientemente próximo a zero para indicar condições atmosféricas próximas de neutra. O intervalo $\pm 0,015$ é equivalente ao intervalo $\pm 0,015$, para o número de Richardson usado por Kustas et al. (1989).

3.4 - Coeficiente de cultura

Com o objetivo de avaliar a performance dos modelos de estimativa de evapotranspiração, estabeleceu-se duas metodologias:

- A primeira, testando os modelos com os coeficientes de cultura (k_c) determinados na pesquisa, conforme item 3.4.1, com o objetivo de definir os modelos de melhor performance;
- A segunda, selecionando um dos modelos de boa performance (Penman-Monteith) e testando-o com coeficientes de cultura presentes na literatura (FAO24 e EMBRAPA/CNPAF - (Centro Nacional de Pesquisa do Arroz e Feijão) - (Tabela 1)), objetivando avaliar a compatibilidade desses coeficientes com a região, a época e a cultura pesquisadas.

Tabela 1. Coeficientes de cultura para cada intervalo de irrigação: determinados na pesquisa (kc_D), provenientes da FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977) (kc_F) e propostos pela EMBRAPA/CNPAF (Steinmetz, 1984) (kc_E)

Coef.	Irrigações (intervalos)															
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°	16°
kc_D	0,71	0,84	1,22	1,51	1,60	1,37	1,58	1,49	1,56	1,31	1,22	1,68	1,43	1,24	1,07	1,00
kc_F	0,70	0,70	0,70	0,70	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	0,25	0,25	0,25
kc_E	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	1,28	1,28	1,28	1,28	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04

3.4.1 – Determinação dos coeficientes

Com base na evapotranspiração real média obtida no lisímetro de pesagem para os intervalos de irrigação, e nas leituras do tanque classe A, para os mesmos intervalos, calculou-se os coeficientes de cultura para cada intervalo de irrigação (Tabela 1).

Para determinação dos coeficientes utilizou-se a seguinte equação:

$$kc = \frac{Et_r}{(E_{kp})} \quad (03)$$

onde:

kc = coeficiente da cultura

Et_r = evapotranspiração real da cultura do feijão obtida no lisímetro (mm/intervalo);

E = evaporação do tanque classe "A" (mm/intervalo); e

K_p = coeficiente do tanque Classe A adequado ao período e as condições locais do tanque.

Neste caso, igual a 0,75 conforme metodologia de Doorenbos e Pruitt (1977).

Muito embora a obtenção dos coeficientes de cultura para o feijão, (variedade diamante negro) possam ser obtidos a partir da equação da Figura 3, optou-se em testar os modelos com coeficientes de cultura determinados conforme a metodologia acima, com o propósito de testar os modelos sem os benefícios do ajuste dos coeficientes.

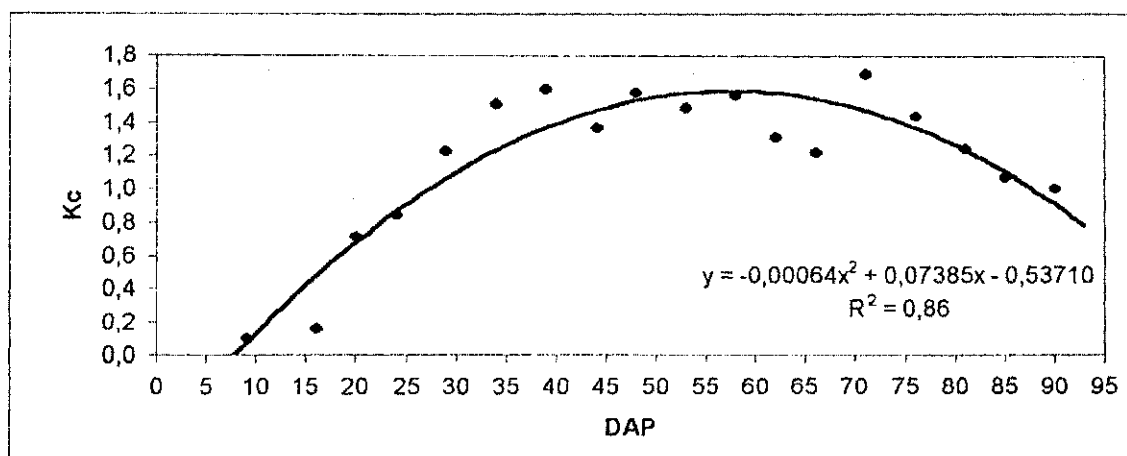


Figura 3. Coeficiente de cultura para o Feijão Preto, variedade Diamante Negro, em relação aos dias após o plantio (DAP) em Planaltina-DF.

3.5 – Estimativas da evapotranspiração

Comparou-se a evapotranspiração do feijão, obtida por um lisímetro de pesagem, com as evapotranspirações estimadas à partir de seis modelos: Penman-Monteith (PM), Penman original (PO), Penman modificado pela FAO (PF), Jensen-Haise (JH), Thornthwaite modificado por Camargo (TC) e Christiansen-Haggreaves (CH). Deve-se considerar que os dados observados e estimados de E_t , presentes nesse trabalho, correspondem aos dados médios obtidos por intervalo de irrigação.

Os parâmetros agrometeorológicos necessários às avaliações dos modelos foram obtidos no Laboratório de Biofísica Ambiental da Embrapa Cerrados, com dados provenientes de uma estação meteorológica localizada próxima a área experimental, no período de junho a setembro de 1999.

Os valores finais de evapotranspiração para o feijão, segundo cada modelo, foram obtidos multiplicando-se a evapotranspiração potencial ou de referência, resultante dos modelos, pelos coeficientes de cultura.

3.5.1 – Critérios utilizados nas estimativas

Em razão dos modelos serem testados para períodos médios de 5 dias (intervalos de irrigação), o fluxo de calor do solo (G), parâmetro sugerido por algumas equações, foi desconsiderado, já que as trocas de calor no solo ocorrem de forma periódica, sendo o ganho diurno igual à perda noturna (Ometto, 1981).

O plano de deslocamento da superfície do solo (d_m), proposto no cálculo da resistência aerodinâmica para calor sensível e transferência de calor (r_a) do modelo Penman-Monteith, foi desconsiderado. Baseando-se no fato de que em comunidades vegetais de porte baixo o parâmetro “ d_m ” torna-se dispensável, em virtude de apresentar valores negativos no ajuste dos parâmetros de rugosidade (Guerra, 1990), fato também compartilhado por Monteith (1973), Oke (1978) e Brutsaert (1982), que recomendam o uso de d_m igual a zero.

3.5.2 – Descrição dos modelos

3.5.2.1 – Penman modificado por Monteith

A evapotranspiração segundo PM foi obtida da seguinte forma:

$$\lambda E_{to} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} K_1 \frac{0,622 \lambda_p}{P} \frac{1}{r_a} (e_s - e) \quad (04)$$

onde:

$$r_a = \frac{\ln[(z_1 / z_{om}) - \psi/m] \ln[(z_2 / z_{ob}) - \psi/h]}{(k)^2 u_2} \quad (05)$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + r_c / r_a) \quad (06)$$

$$r_c = 100 / (0,51AF) \quad (07)$$

sendo:

λE_{to} = densidade de fluxo de calor latente ($MJ.m^{-2}/dia$);

λ = o calor latente de vaporização da água (MJ/kg), estimada com a equação: $(2,501 - 2,361(10^{-3})T)$, onde T é a temperatura em ° C;

Δ = tangente a curva de saturação no ponto T (° C)

$\Delta = Le_v / R_v T^2$, a declividade da reta tangente à curva de saturação (kPa/K), sendo L o calor latente de vaporização da água ($2,5 (10^6) J/kg$); “ e_s ” a pressão de saturação do vapor d’água, e “ R_v ” a constante específica do vapor d’água ($461,50 J/kg/K$) e T temperatura.

$\gamma = CpP / (0,622L)$ é uma constante psicrométrica, sendo Cp o calor específico do ar à pressão constante, P a pressão atmosférica e L o calor latente de vaporização (kPa/K);

$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ = é um fator adimensional de proporcionalidade;

$\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} = 1 - \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right)$ sendo também um fator adimensional de proporcionalidade;

γ^* = é uma constante psicrométrica modificada ($kPa/°C$);

$R_n = R_g(1 - \alpha) + B_{ol}$, o balanço diário de radiação em MJ/m^2 , sendo R_g a irradiância solar global sobre a superfície do solo, α é coeficiente de reflexão da superfície e B_{ol} é o balanço de radiação de ondas longas;

$K_1 \frac{0,622\lambda\rho}{P} = 1710 - 6,85T$, para T em ° C e ‘ u_2 ’ em m/s.

r_a e r_c = são os termos de resistência para transferência de calor sensível e para momento, respectivamente (s/m);

IAF = é o índice de área foliar;

$(e_s - e)$ = é o déficit de pressão de vapor (kPa);

z_1 = altura de medida da velocidade do vento (cm);

z_2 = altura de medida da temperatura do ar (cm);

z_{om} = é o comprimento de rugosidade para o momento (cm);

z_{oh} = é o comprimento de rugosidade para o calor sensível (cm);

u_2 = é a velocidade do vento em m/s medida na altura de 2 m;

k = constante de von Karman (0,41); e

Ψ_m e Ψ_h = são fatores de correção de estabilidade para momento e calor sensível, respectivamente, os quais são função do parâmetro (z/L) de Monin-Obukhov (Soer, 1980 e Guerra, 1990).

Como critério para avaliação do modelo proposto por Penman-Monteith determinou-se os parâmetros de rugosidade aerodinâmica (z_{om} , u^*) a partir de duas metodologias: A primeira através de uma técnica interativa para encontrar a soma dos erros dos quadrados mínimos (Robinson, 1962; Kustas et al., 1989; e Guerra, 1990), e a segunda com base na literatura, através das seguintes equações:

$$z_{om} = 0,1h \quad (\text{Matthias et al., 1990}) \quad (08)$$

onde "h" é a altura média da planta a partir do fechamento do dossel; e

$$u^* = \left(\frac{u}{\ln \left(\frac{z}{z_{om}} \right)} \right) k \quad (09)$$

onde "u" é a velocidade média do vento (m/s).

O IAF também foi determinado de duas maneiras. A primeira conforme item 3.3.1.2, e a segunda a partir da equação proposta por Allen et al. (1989):

$$IAF = 1,5 \ln(h) - 1,4 \quad (10)$$

A evapotranspiração segundo Penman-Monteith foi estimada de quatro formas diferentes:

- a) definindo os parâmetros de rugosidade aerodinâmica (método iterativo) e utilizando o k_c determinado na pesquisa (k_{cD}) por intervalo de irrigação (item 3.4.1);
- b) utilizando também o k_{cD} e definindo os parâmetros de rugosidade conforme a literatura;
- c) utilizando o k_c proposto pela FAO (k_{cF}), com os parâmetros de rugosidade definidos na pesquisa;
- d) utilizando o k_c proposto pela EMBRAPA/CNPAP (k_{cE}), com os parâmetros de rugosidade definidos na pesquisa.

Em todos os casos o parâmetro z_{oh} foi determinado com a relação $z_{oh}/7,6$ (Guerra, 1990).

3.5.1.2 – Penman original (1948)

Para obtenção da evapotranspiração segundo PO, utilizou-se a seguinte equação:

$$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (11)$$

onde:

$$E_a = 0,35(1 + 0,0098u_2)(e_s - e) \quad (12)$$

sendo:

ETP = a evapotranspiração potencial em mm/dia

$R_n = [(R_g(1-\alpha)+B_{ol})/59]$ o balanço diário de radiação em mm/dia, sendo R_g a irradiância solar global sobre a superfície do solo, α é coeficiente de reflexão da superfície e B_{ol} é o balanço de radiação de ondas longas;

E_a = a capacidade evaporativa diária do ar em mm/dia;

e_s = a pressão de saturação do vapor d'água em mmHg, determinada à temperatura média diária do ar;

e = a pressão média diária de vapor d'água, em mmHg; e

u_2 = a velocidade média diária do vento, à altura de 2 metros, em milhas/dia.

3.5.1.3 – Penman modificado pela FAO

A evapotranspiração com base no FAO-24 foi estimada da seguinte maneira:

$$ET_o = C \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e) \right] \quad (13)$$

onde:

$$f(u) = 2,7(1 + 0,864u_2) \quad (14)$$

sendo:

ET_o = a evapotranspiração de referência (mm/dia);

$R_n = [(R_g(1-\alpha)+B_{ol})/59]$ o balanço diário de radiação em mm/dia, sendo R_g a irradiância solar global sobre a superfície do solo, α é coeficiente de reflexão da superfície e B_{ol} é o balanço de radiação de ondas longas, estimado segundo Doorembos e Pruitt (1977);

$f(u)$ = função empírica relacionada a velocidade do vento;

u_2 = velocidade do vento em m/s; e

C = fator de ajustamento baseado sobre a condição climática local, ajustado conforme

Allen e Pruitt (1989) da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 C = & 0,892 - 0,0781u_d + 0,00219u_dRs + 0,000402UR_{\max}Rs + 0,000196\frac{u_d}{u_n} \\
 & u_dUR_{\max} + 0,0000198\frac{u_d}{u_n}u_dUR_{\max}Rs + 0,00000236u_d^2UR_{\max}Rs \\
 & - 0,0000086\left(\frac{u_d}{u_n}\right)^2u_dUR_{\max} - 0,0000000292\frac{u_d}{u_n}u_d^2(UR_{\max})^2Rs - \\
 & 0,0000161UR_{\max}Rs^2.
 \end{aligned} \tag{15}$$

onde:

u_d = velocidade diurna do vento (m/s);

u_n = velocidade noturna do vento (m/s);

UR_{\max} = umidade relativa máxima para o período (%); e

Rs = radiação solar recebida na superfície da terra sobre um plano horizontal(mm/dia).

3.5.1.4 – Jensen-Haise

A evapotranspiração estimada pelo modelo de Jensen e Haise (1963), fundamentou-se na seguinte equação:

$$\lambda E_{io} = C_T (T - T_x)Rs \tag{16}$$

onde:

$$C_T = \frac{1}{C_1 + C_2 + C_H} \tag{17}$$

$$C_H = \frac{5,0kPa}{(e_2 - e_1)} \tag{18}$$

$$C_1 = 38 - \left(2 \frac{\text{altitude}}{305}\right) \tag{19}$$

$$C_2 = 7.3$$

$$T_x = -2,5 - 1,4(e_2 - e_1) - \frac{\text{altitude}}{550} \quad (20)$$

sendo:

λE_{to} = a densidade de fluxo de calor latente (MJ.m⁻²/dia);

λ = a vaporização de calor latente (MJ/kg), estimada com a equação: $(2,501 - 2.361(10^{-3})T)$, onde T é a temperatura em °C;

C_T = um coeficiente de temperatura;

T_x = o ponto de interseção do eixo de temperatura;

R_s = a radiação média solar observada (MJ.m⁻²/dia);

C_1 e C_2 = constantes da equação; e

e_2 e e_1 = pressão de saturação de vapor nas temperaturas máximas médias e mínimas médias, respectivamente, para os meses mais quentes do ano (kPa).

3.5.1.5 – Chistiansen & Hargreaves

A evapotranspiração segundo CH (1969), foi calculada com base na equação seguinte:

$$E_{to} = 0,755 E_v C_{T2} C_{W2} C_{H2} C_2 \quad (21)$$

onde E_v é a evaporação do tanque classe A em mm/dia. Os demais coeficientes são adimensionais.

$$C_{T2} = 0,862 + 0,179 \left(\frac{T_c}{T_{co}} \right) - 0,041 \left(\frac{T_c}{T_{co}} \right)^2 \quad (22)$$

onde T_c é a média da temperatura em °C e $T_{co} = 20^\circ\text{C}$;

$$C_{W2} = 1,189 - 0,240 \left(\frac{W}{W_o} \right) + 0,051 \left(\frac{W}{W_o} \right)^2 \quad (23)$$

onde W é a velocidade do vento à 2 m acima do nível do solo em km/h e $W_o = 6,7$ km/h.

$$C_{H2} = 0,499 + 0,620 \left(\frac{H_m}{H_{mo}} \right) - 0,119 \left(\frac{H_m}{H_{mo}} \right)^2 \quad (24)$$

onde H_m é a umidade relativa média, expressada em decimal, na $H_{mo} = 0,60$

$$C_{s2} = 0,904 + 0,0080 \left(\frac{S}{S_o} \right) + 0,088 \left(\frac{S}{S_o} \right)^2 \quad (25)$$

onde S é a porcentagem de luz solar possível (n/N), expressada em decimal, e $S_o = 0,80$.

3.5.1.6 – Thornthwaite modificado por Camargo

Definiu-se a expressão da evapotranspirativa segundo TC foi da seguinte

forma:

$$ETP = 16D \left(10 \frac{T}{T_x} \right)^a \quad (26)$$

onde:

$$a = 0,675(10^{-6})T_x^3 - 0,771(10^{-4})T_x^2 + 1,792(10^{-2})T_x + 0,49239 \quad (27)$$

sendo:

ETP = a evapotranspiração potencial em mm/mês;

D = o fator de ajuste ao número de dias do mês e à duração do brilho solar diário, conforme latitude e meses do ano;

T = temperatura média mensal do ar (°C); e

T_x = temperatura média anual da região (°C).

3.6 – AJUSTE DOS MODELOS

Após a comparação entre a evapotranspiração observada e a estimada, segundo cada modelo, percebeu-se uma considerável, porém discreta, subestimativa por

parte do modelo de Christiansen-Hargreaves e superestimativa por parte do modelo de Penman modificado pela FAO. Visando aprimorar esses modelos para as condições do Cerrado utilizou-se procedimentos específicos para cada modelo:

3.6.1 – Christiansen e Hargreaves

Com base em diversos testes nos parâmetros da equação percebeu-se a necessidade de incrementar a contribuição do parâmetro energético (C_{S2}) através da substituição do valor de S_0 de 0,80 para 0,50.

3.6.2– Penman-FAO

Devido à superestimativa da equação Penman-FAO e com base em testes com os parâmetros da função de vento ($f(u)$), concluiu-se pela necessidade de reduzir o valor da constante de 2,7 para 2,0.

3.7 – Avaliação da performance dos modelos

A comparação entre as evapotranspirações observadas e as estimadas envolveu dois procedimentos:

O primeiro uma regressão linear quadrática dos resultados, analisando-se o comportamento das curvas estimadas em relação a curva observada, principalmente no que diz respeito ao momento de máxima aplicação de água de cada modelo, o que foi obtido a partir da derivada primeira das equações resultantes.

O segundo uma regressão linear simples analisando-se o erro médio da estimativa, a correlação entre as evapotranspirações e o teste F, proposto por Graybill

(1976). Pela aplicação do teste F, ao nível de 99% de probabilidade, analisou-se a hipótese de que a evapotranspiração estimada era similar a observada, perfazendo uma linha reta passando pela origem e de declividade igual a 45 graus, ou seja, $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Parâmetros de rugosidade para superfície vegetada

Para avaliação da performance do modelo Penman-Monteith (PM), houve a necessidade de determinar os parâmetros de rugosidade para superfície vegetada.

Segundo as análises de Guerra (1990), d_m é um parâmetro desnecessário no ajuste do perfil logarítmico do vento, semelhante a Monteith (1973), Oke (1978) e Brutsaert (1982), que recomendam o uso do d_m igual a zero em vegetações de porte reduzido. Desta forma, levando-se em conta que neste estudo a altura média do feijão foi de 53 centímetros considerou-se d_m igual a zero para todas as análises apresentadas.

A seleção de grupos de dados para condições atmosféricas próximas de neutra, necessários para ajustar u^* e z_{0m} , foi baseada nos critérios apresentados no capítulo 3. Os resultados para u^* , z_{0m} e z/L que atenderam aos primeiros dois critérios apresentaram uma grande variação nos parâmetros de Monin-Obukhov (z/L). Por esse motivo, para assegurar que esses grupos de dados representassem, realmente, condições atmosféricas próximas de neutra, levou-se em conta a estabilidade atmosférica.

Dos grupos de dados obtidos com a utilização dos primeiros dois critérios, somente 28 grupos permaneceram quando o critério final de estabilidade atmosférica foi aplicado (Anexo 5). Estes 28 grupos de dados forneceram valores médios de $z_{0m} = 0,0272$ m e $u_* = 0,2624$ m/s. O valor de 0,0272 m aproxima-se de $0,0514h$, onde h é a altura média da planta (0,53 m). É interessante notar que a relação $z_{0m} = 0,0514h$ é inferior ao valor de $0,1h$ obtido por Thom (1971) em um experimento com túnel de vento e cultura artificial, e $0,093h$ obtido por Guerra (1990) em grama bermuda com altura média de 0,03 m. Entretanto, a esta diferença é perfeitamente aceitável já que a cultura do feijão difere morfológicamente das demais, o que vem a contribuir em mudanças na resistência do dossel e, conseqüentemente, nos parâmetros de rugosidade da superfície vegetada.

Os resultados obtidos por Garratt & Hicks (1973), Garratt (1978) e Garratt & Francey (1978) mostram que a relação z_{0m}/z_{0h} demonstra pouca dependência sobre o número de Reynolds rugoso (R^*). O gráfico da relação z_{0m}/z_{0h} , proveniente de diferentes estudos (veja Garrat & Francey, 1978; Figura 1; página 404) indica que esta relação é constante sobre um grande intervalo do R^* (de 12 a 50.000). Deste modo, adotou-se neste trabalho a relação proposta por Guerra (1990), onde $z_{0h} = z_{0m}/7,6$, resultando em um z_{0h} médio de 0,0036 m (Anexo 5).

4.2 - PERFORMANCE DOS MODELOS

Visando facilitar as discussões quanto à performance dos modelos de estimativa de evapotranspiração utilizou-se dois procedimentos. Inicialmente, testou-se os modelos com a utilização de coeficientes de cultura determinados na pesquisa, e por fim,

selecionou-se um modelo, dentre os de melhor performance, e o testou com coeficientes de cultura obtidos na literatura.

As discussões foram baseadas nas Figuras 4 a 23 e Tabelas 2 e 3. Nessas Tabelas são apresentadas, respectivamente, o erro médio da estimativa e os resultados da regressão linear simples provenientes da relação entre a E_t estimada pelos seis modelos e a E_t observada em campo.

4.2.1 – Performance dos modelos com a utilização de coeficientes de cultura determinados na pesquisa (k_{cD})

4.2.1.1- Penman-Monteith

A Figura 4 apresenta a relação entre os dados médios de E_t , medidos no lisímetro e estimados a partir do modelo PM testado com os parâmetros de rugosidade obtidos na pesquisa (PM_D), conforme item 4.1. Verifica-se que houve uma correlação elevada entre as variáveis com o valor do $R^2 = 0,81$ e, alta concordância com $\beta_0 = 0,2622$ e $\beta_1 = 0,9793$.

Observando a Tabela 2 nota-se que a dispersão dos dados resultou num erro médio da estimativa de 2,27%, valor de pouca expressão já que pela aplicação do teste F (Graybill, 1976) ao nível de 99% de probabilidade (Tabela 3), concluiu-se não haver diferença significativa entre os dados medidos e estimados, evidenciando uma ótima performance do modelo.

Observando a Figura 5 que apresenta a comparação entre os dados médios de E_t , medidos no lisímetro e estimados por PM_D , em relação a dias após plantio (DAP), confirma-se a ótima performance do modelo, já que ocorreu, praticamente, o mesmo ponto

de máxima evapotranspiração para as duas curvas, ou seja, aos 63 DAP para os dados medidos e aos 62 para os dados estimados.

A Figura 6 apresenta a mesma relação da Figura 4; entretanto, com o modelo PM testado com parâmetros de rugosidade estimados (PM_E), conforme o item 3.5.2.1. Observa-se que a precisão das estimativas foi mais elevada, $R^2 = 0,90$, porém, a exatidão sofreu uma breve redução ($\beta_0 = 0,5901$ e $\beta_1 = 0,9429$), proporcionando um pequeno acréscimo no erro médio da estimativa, 4,06%. Fato que não limitou o bom desempenho do modelo nestas condições, pois os dados estimados também não diferiram significativamente dos observados, validando, também, a ótima performance do modelo PM quando submetido a essa metodologia.

Observando a Figura 7, nota-se também que o modelo PM_E apresentou o mesmo ponto de máxima demanda por água de PM_D (62 dias), o que contribui para consolidar o bom desempenho do modelo, independentemente da metodologia adotada.

Estes resultados demonstram que o modelo PM, em qualquer uma das metodologias, pode ser utilizado com bastante segurança, já que apresentou valores estimados de evapotranspiração iguais, significativamente, aos valores medidos no lisímetro. Muito embora PM_E tenha apresentado um maior erro de estimativa, deve-se levar em conta que os parâmetros de rugosidade para superfície do feijão foram, simplesmente, estimados a partir das equações descritas no capítulo 3. Por outro lado, utilizando-se para PM_D as equações sugeridas no item 4.1, pode-se também estimar os parâmetros de rugosidade da cultura (z_{om}), fato que potencializa a aplicabilidade prática do modelo PM em qualquer uma das metodologias.

Deve-se levar em conta a confirmação de que o parâmetro d_m é dispensável para o dossel da cultura do Feijão Preto, já que no ajuste do perfil logaritmico do vento considerou-se d_m igual a zero, critério que não interferiu no desempenho do modelo PM_D . Da mesma forma, deve-se atentar para a relação $z_{om}/7,6 = z_{oh}$ (Guerra, 1990), que também não limitou o desempenho do modelo.

Tabela 2. Erros médios na estimativa da E_t do feijoeiro obtidos com a aplicação dos seis modelos em Planaltina-DF.

Modelos	Evapotranspiração real* (mm)		Erro médio da estimativa (%)
	Medida	Estimada	
Penman-Monteith (PM_D)	96,70	98,89	2,27
Penman_Monteith (PM_E)	96,70	100,62	4,06
Penman_Monteith (PM_{kcl})	96,70	65,36	-32,40
Penman_Monteith (PM_{kclE})	96,70	75,01	-22,43
Penman Original	96,70	95,45	-1,29
Penman-FAO	96,70	113,10	16,97
Penman-FAO (ajustado)	96,70	99,35	2,74
Jensen-Haise	96,70	93,63	-3,17
Chistiansen-Hargreaves	96,70	85,31	-11,78
Chistiansen-Hargreaves (ajustado)	96,70	98,11	1,46
Thornthwaite-Camargo	96,70	72,29	-25,24

* E_t resultante do somatório das médias diárias observadas por intervalo de irrigação.

Tabela 3. Valores da análise de regressão simples entre a E_t estimada pelos seis modelos e a E_t do Feijão Preto medida num lisímetro de pesagem em Planaltina-DF.

Modelos	Coeficientes			F de Graybill
	β_0	β_1	R^2	
Penman-Monteith (PM_D)	0,2622	0,9793	0,81	0,29
Penman_Monteith (PM_E)	0,5901	0,9429	0,90	1,84
Penman_Monteith (PM_{kcl})	0,0299	0,671	0,28	12,66**
Penman_Monteith (PM_{kclE})	0,3029	0,7256	0,45	12,73**
Penman Original	0,6128	0,8858	0,89	1,54
Penman-FAO	0,2541	1,1276	0,90	29,52**
Penman-FAO (ajustado)	0,2506	0,9859	0,90	0,82
Jensen-Haise	0,7255	0,8483	0,74	1,76
Chistiansen-Hargreaves	0,3328	0,8272	0,95	73,14**
Chistiansen-Hargreaves (ajustado)	0,3828	0,9513	0,95	0,77
Thornthwaite-Camargo	1,1972	0,5496	0,75	159,40**

**Significativo ao nível de 99% de probabilidade

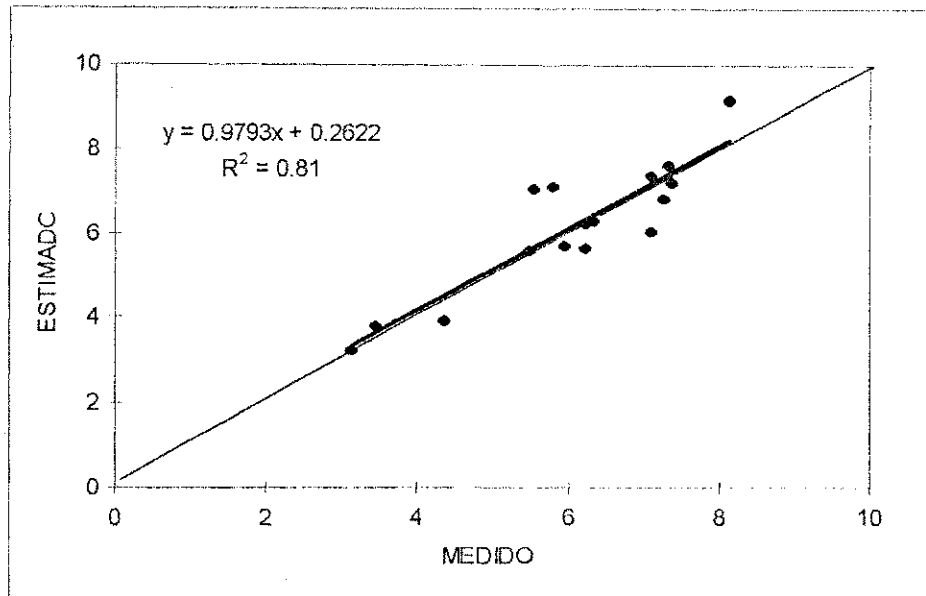


Figura 4. Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade definidos na pesquisa, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

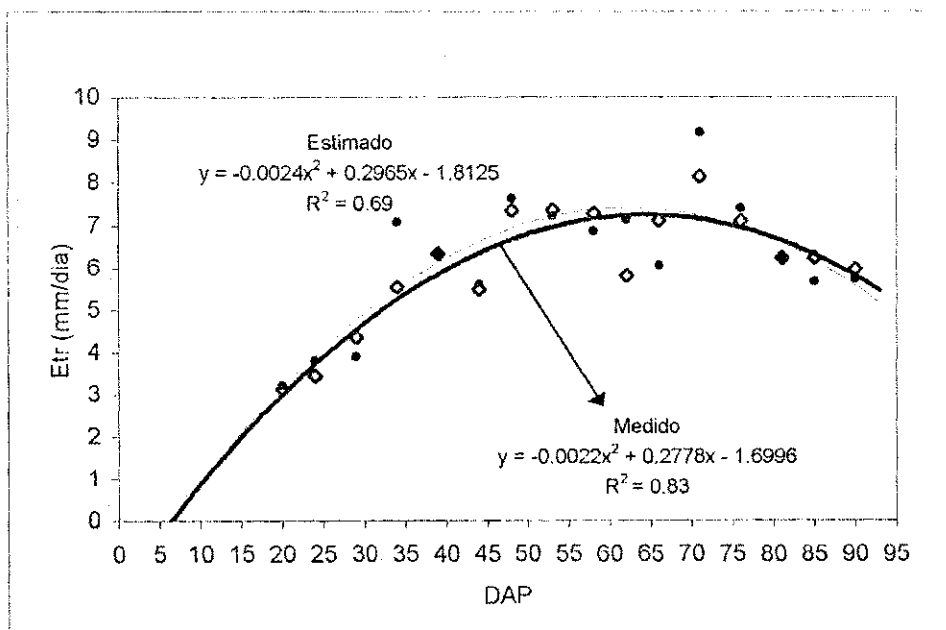


Figura 5. Comparação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade definidos na pesquisa, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

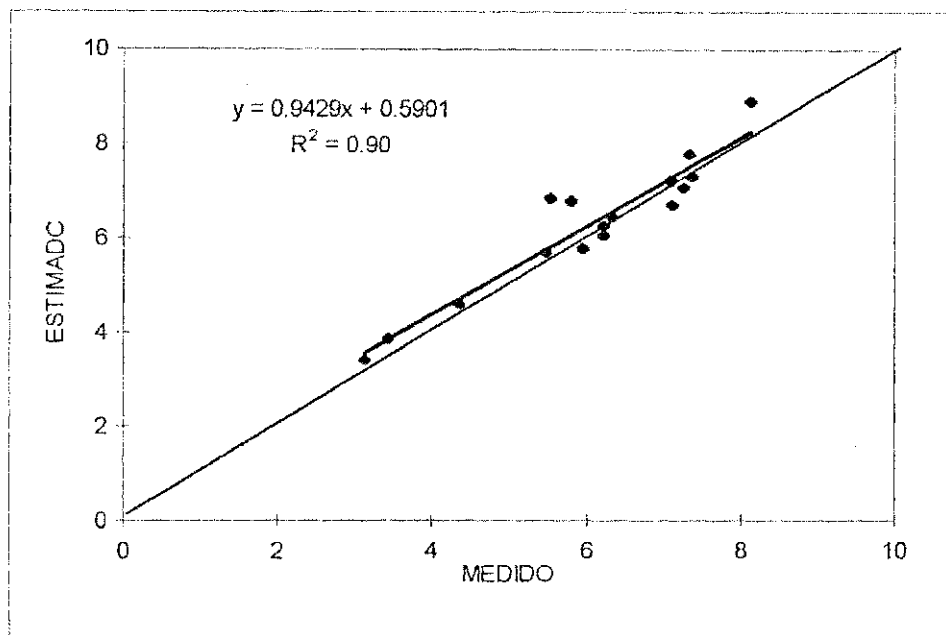


Figura 6. Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade estimados, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

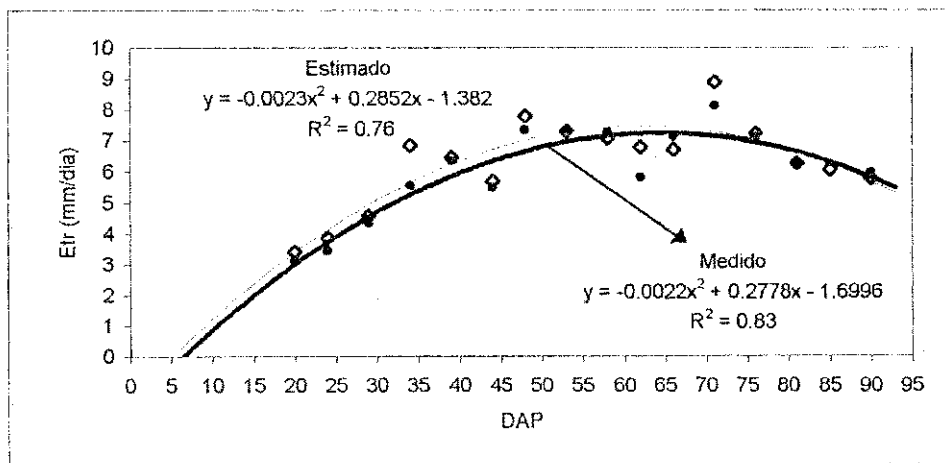


Figura 7. Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman-Monteith, com parâmetros de rugosidade estimados, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

4.2.1.2- Penman original (1948)

Observando a Figura 8, que apresenta a relação entre dados médios de E_t , medidos no lisímetro e estimados a partir do modelo original de Penman (PO), percebe-se uma alta precisão, $R^2 = 0,89$, e uma discreta exatidão ($\beta_0 = 0,6128$ e $\beta_1 = 0,8858$), mostrando uma leve tendência a subestimar E_{tr} , com um erro médio de $-1,29\%$. Tendência que não interferiu na boa performance do modelo, já que os dados estimados não diferiram significativamente dos observados, ao nível de 99% de probabilidade. Além do que, observando a Figura 9 percebe-se que o ponto de máxima evapotranspiração, obtido pelo modelo, é idêntico ao observado no lisímetro, ou seja, aos 63 DAP.

Penman (1948) foi o primeiro a derivar um método combinado para estimar a evapotranspiração. Ele combinou componentes do balanço de energia, requeridos na evapotranspiração, e mecanismos necessários para remover o vapor d'água (Jensen et al., 1990), o que resultou na combinação de um termo energético e um aerodinâmico. No termo aerodinâmico, a função de vento depende fundamentalmente das características da superfície, onde a rugosidade determina a turbulência local e o processo de transporte (Maniero, 1993). Sendo assim, verifica-se, nos resultados, uma ótima performance deste modelo, os quais sugerem que os parâmetros originais, propostos por Penman, são perfeitamente compatíveis com a superfície vegetada do Feijão Preto no período seco da região do Cerrado.

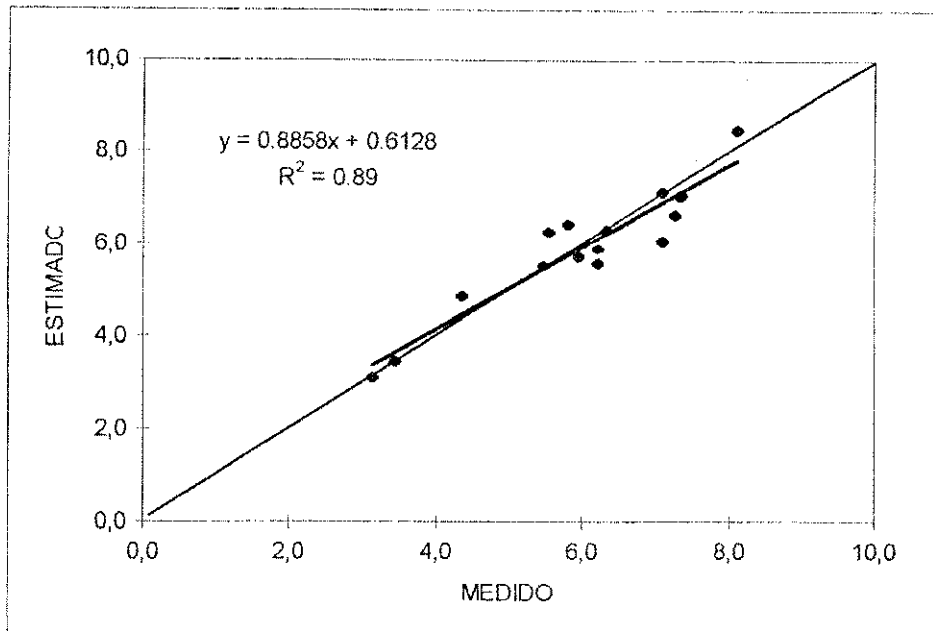


Figura 8. Relação entre a Et, estimada a partir do modelo Penman Original (1948), e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

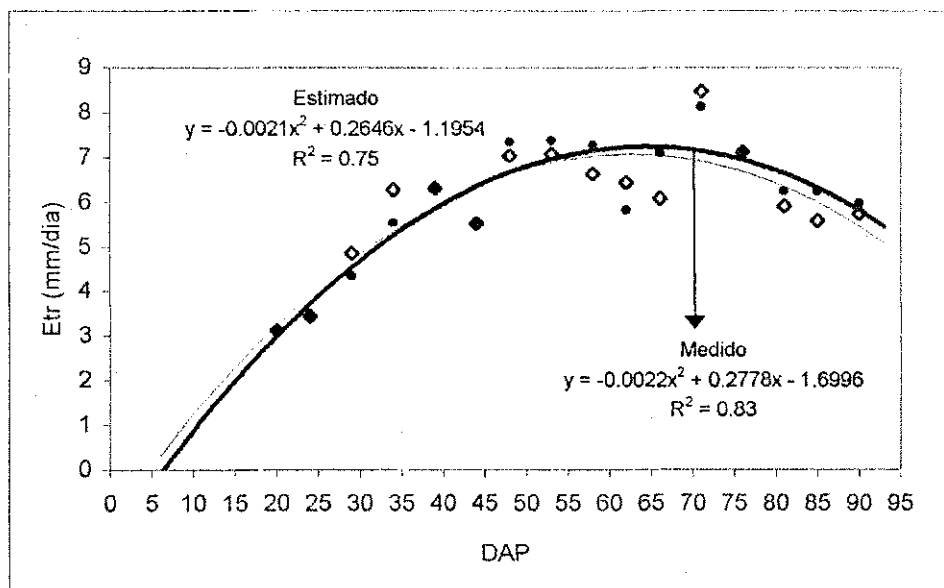


Figura 9. Comparação entre a Et, estimada a partir do modelo Penman Original (1948), e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

4.2.1.3- Penman modificado pela FAO

Pela Figura 10, que apresenta a relação entre os dados médios de E_t , medidos no lisímetros e estimados a partir do modelo PF, verifica-se uma performance pouco satisfatória do modelo, pois percebe-se que apesar de uma correlação bastante elevada, $R^2 = 0,90$, existe uma baixa concordância, $\beta_0 = 0,2541$ e $\beta_1 = 1,1276$, resultando em dados que superestimaram a E_t do feijão em 16,97%, proporcionando um F significativo. Todavia, observando a Figura 11 nota-se que o ponto de máxima evapotranspiração deste modelo ocorreu aos 62 DAP, exatamente um dia antes do observado no lisímetro, o que demonstra uma excelente conformação da curva estimada em relação a medida. Esta observação, associada a testes nos parâmetros do modelo, indicou a necessidade de redução no valor da constante da função de vento, de 2,7 para 2,0. Com esse ajuste a performance do modelo melhorou significativamente, como pode ser observado na Figura 12 onde a correlação se manteve, $R^2 = 0,90$, e a concordância aumentou ($\beta_0 = 0,2506$ e $\beta_1 = 0,9859$). Fato que proporcionou uma grande redução no erro médio da estimativa (2,74%), contribuindo para um F de Graybill não significativo, o que permite confirmar a ótima performance do modelo PF desde que tenha o valor da constante da função de vento ajustado para 2,0.

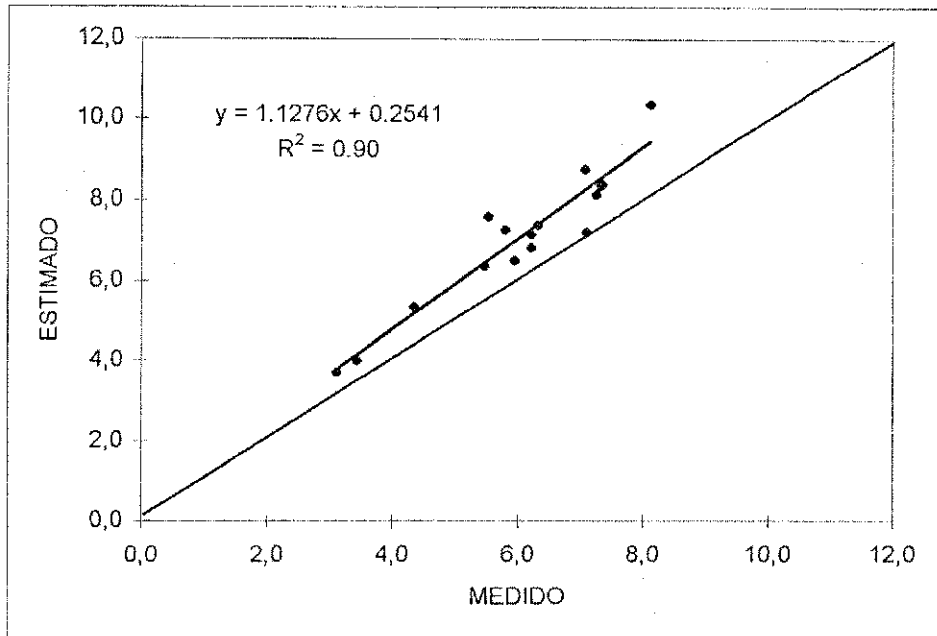


Figura 10. Relação entre a Et, estimada a partir do modelo Penman modificado pela FAO, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

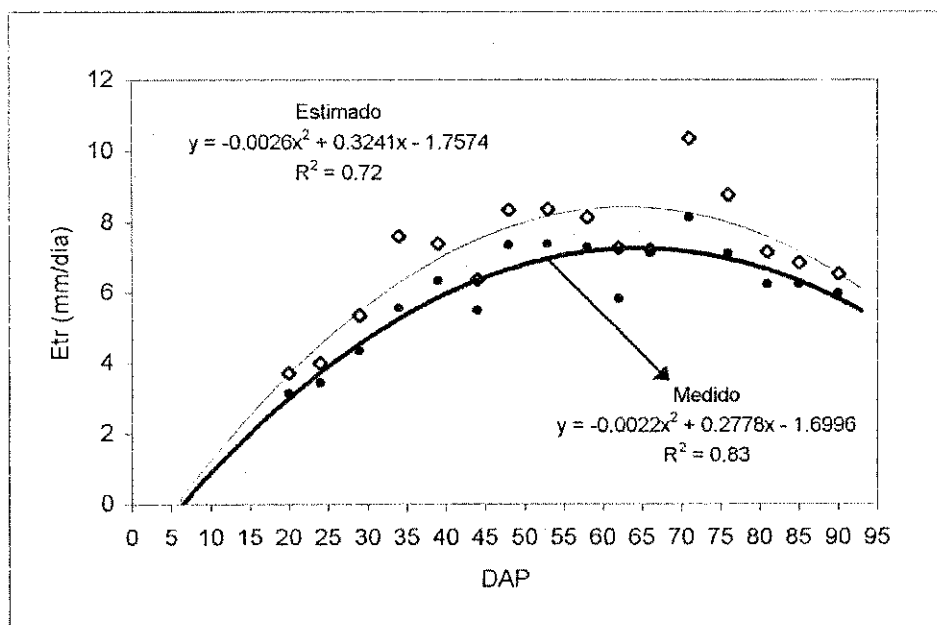


Figura 11. Comparação entre a Et, estimada a partir do modelo Penman modificado pela FAO, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

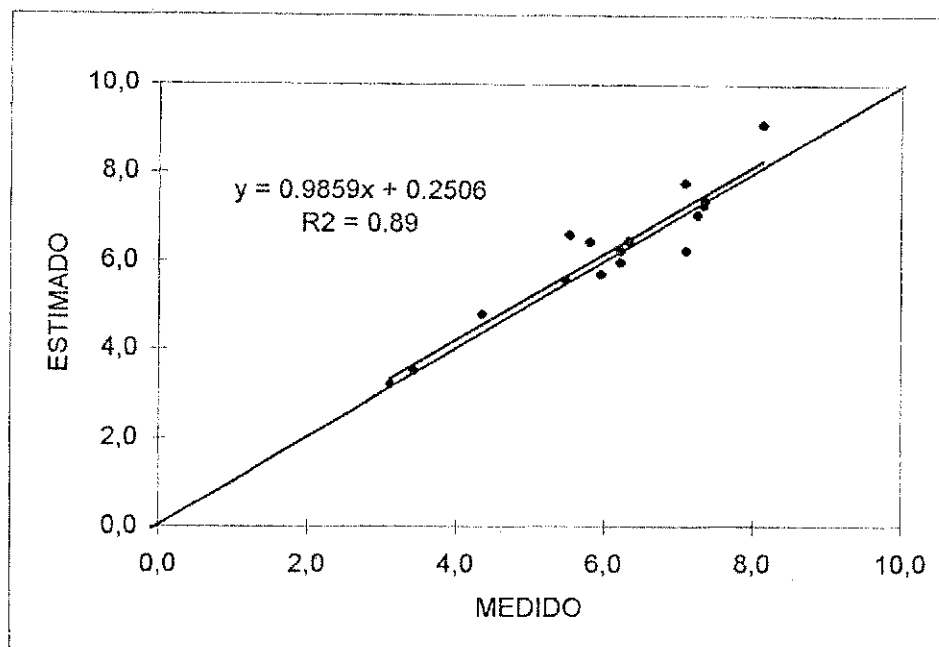


Figura 12. Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Penman modificado pela FAO ajustado, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

4.2.1.4- Jensen-Haise

A Figura 13 apresenta a relação entre os dados estimados pelo modelo JH e os medidos no lisímetro. Verifica-se uma correlação promissora, $R^2 = 0,74$, e uma concordância equilibrada ($\beta_0 = 0,7255$ e $\beta_1 = 0,8483$), com uma leve tendência de subestimar a E_t no período crítico do feijoeiro. Todavia, apesar dos resultados mostrarem-se não significativos ao nível de 99% de probabilidade e o erro médio da estimativa apresentar-se baixo, -3,17%, a performance do modelo JH poderia ter sido prejudicada pelo ponto de máxima demanda hídrica do modelo, estimado aos 68 DAP (Figura 14), justamente cinco dias após o observado. Entretanto, em razão da fase de enchimento dos grãos ter se prolongado até os 70 DAP, este fato não interferiu na boa performance do

modelo, que apresenta-se como uma interessante alternativa para o manejo de irrigação no Cerrado.

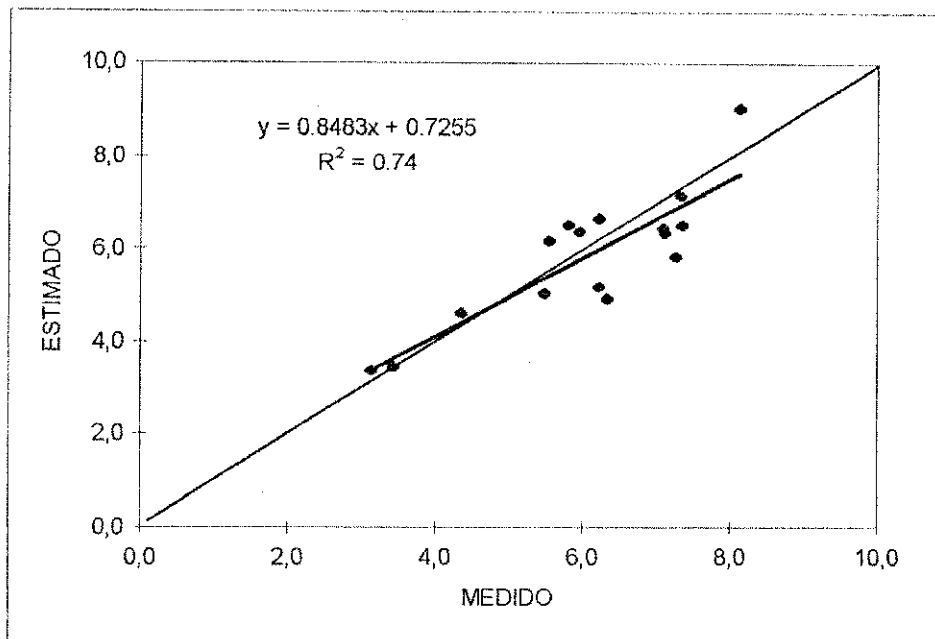


Figura 13. Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Jensen-Haise, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

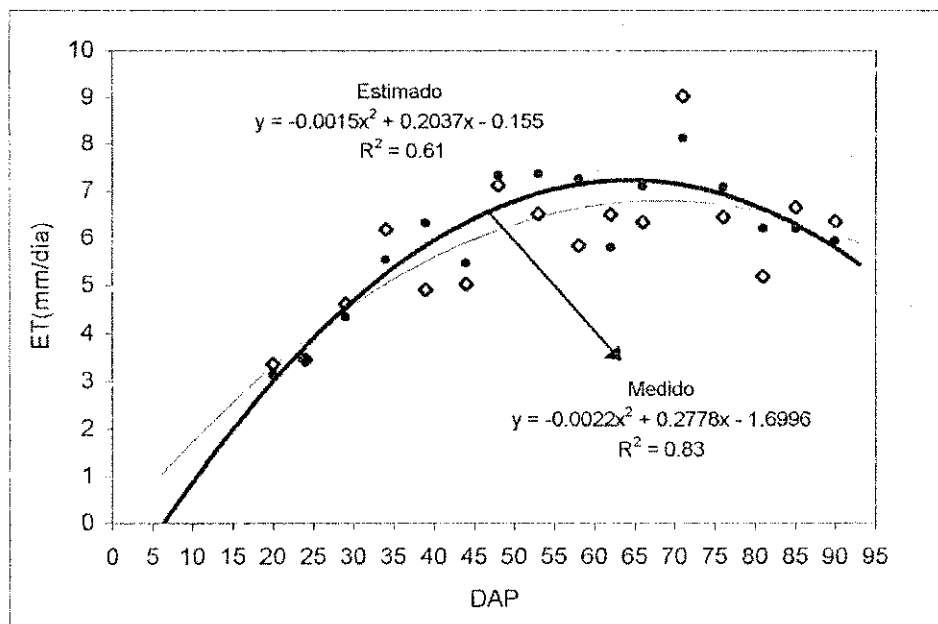


Figura 14. Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Jensen-Haise, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

4.2.1.5 - Chistiansen e Hargreaves

Pela Figura 15, verifica-se uma limitada performance do modelo Christiansen-Hargreaves (CH), pois percebe-se que apesar da ótima precisão, $R^2 = 0,95$, a exatidão foi baixa, $\beta_0 = 0,3328$ e $\beta_1 = 0,8272$, mostrando uma considerável capacidade em subestimar a E_t .

Na Tabela 2 e 3 nota-se, respectivamente, um erro médio da estimativa de -11,78% com F significativo, o que reforça o mal desempenho do modelo. Entretanto, observando a Figura 16 nota-se que o ponto de máxima evapotranspiração, ocorrido aos 63 DAP, foi exatamente igual ao observado nos dados do lisímetro, demonstrando uma perfeita conformação da curva estimada. Esta observação, associada a teste nos parâmetros do modelo, indicou a necessidade de redução no valor do parâmetro S_o , de 0,8 para 0,5, aumentando a contribuição do termo energético no modelo. Esse ajuste proporcionou uma melhoria significativa na performance, como pode ser observado na Figura 17 onde a correlação se manteve alta, $R^2 = 0,95$, e a concordância aumentou consideravelmente ($\beta_0 = 0,3828$ e $\beta_1 = 0,9513$). Esse fato proporcionou uma grande redução no erro médio da estimativa (1,46%) e um F de Graybill não significativo, o que permite confirmar a ótima performance do modelo CH, desde que a contribuição do termo energético seja incrementada através da substituição do valor do parâmetro S_o , de 0,8 para 0,5

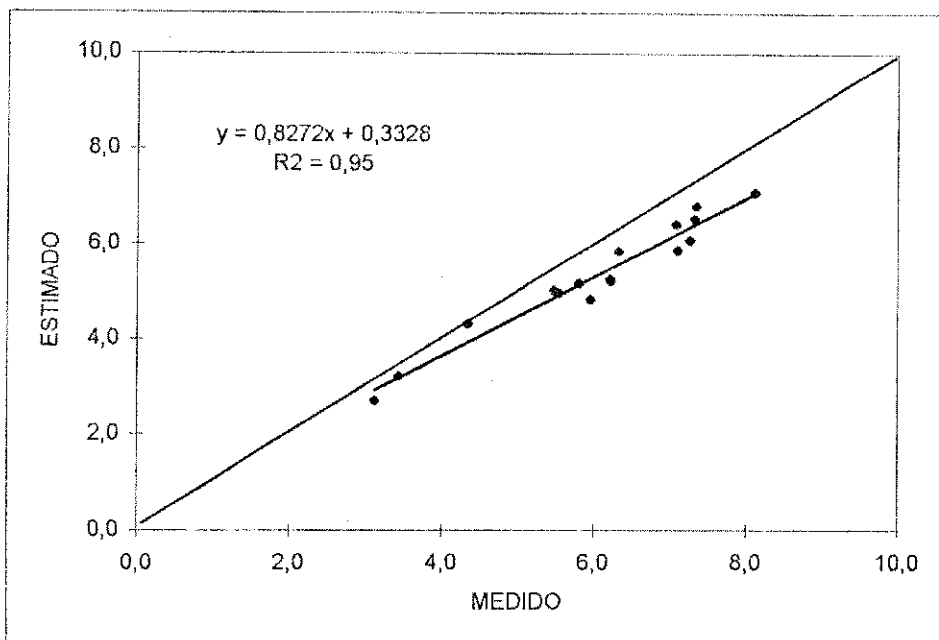


Figura 15. Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Christiansen-Haggreaves, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

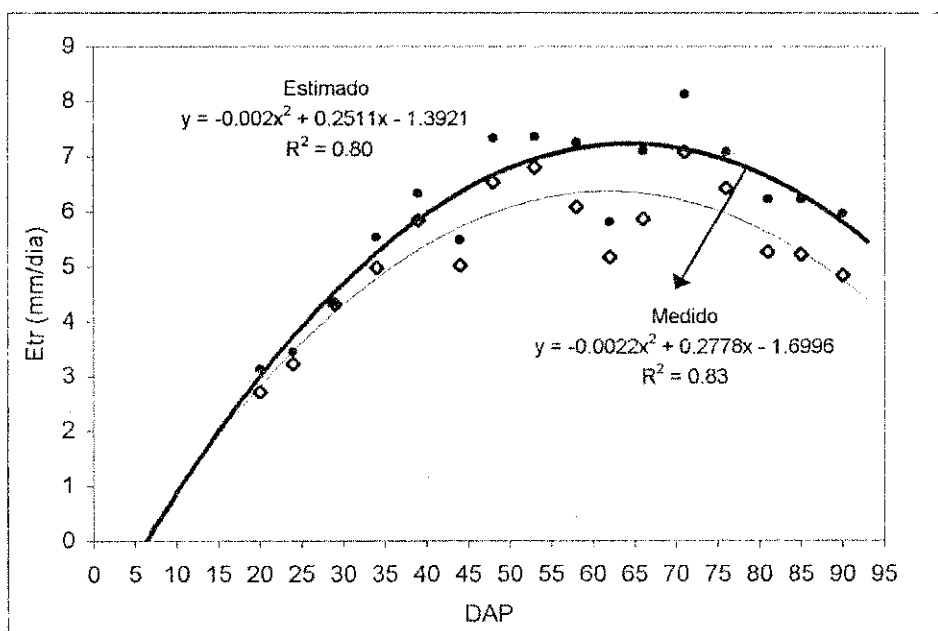


Figura 16. Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Chistiansen-Hargreaves, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

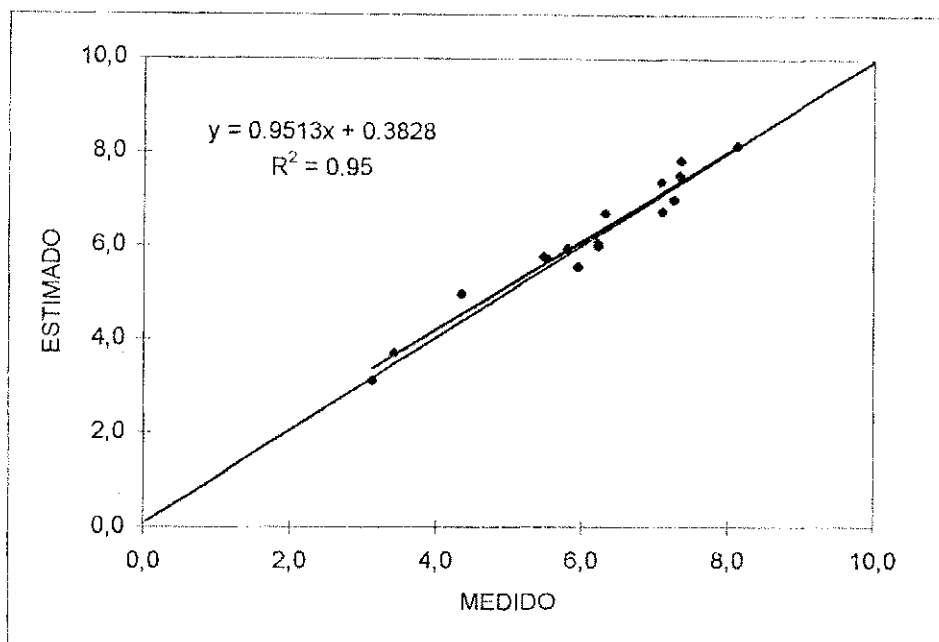


Figura 17. Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Christiansen-Hagreaves ajustado, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

4.2.1.6- Thornthwaite-Camargo

Como pode ser observado pela Figura 18, o modelo TC demonstrou uma limitada performance, apresentando uma boa correlação, $R^2 = 0,75$, e uma concordância limitada ($\beta_0 = 1,1972$ e $\beta_1 = 0,5496$). Esse modelo demonstrou uma fraca capacidade para estimar a E_t do feijoeiro, resultando em valores de evapotranspiração significativamente subestimados.

Na Tabela 2, verifica-se que o erro médio da estimativa foi de $-25,24\%$, o que resultou num F de Graybill significativo, ao nível de 99% de probabilidade. Resultado que também pode ser observado na Figura 19, onde nota-se que o ponto de máxima evapotranspiração do modelo ocorreu aos 59 DAP, 5 dias antes do observado no lisímetro.

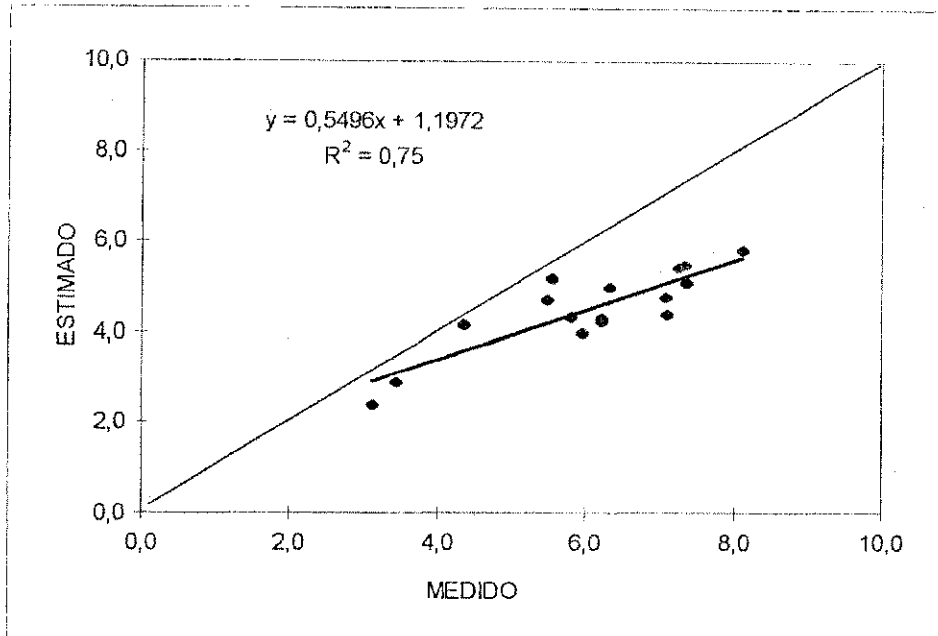


Figura 18. Relação entre a E_t , estimada a partir do modelo Thornthwaite modificado por Camargo, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

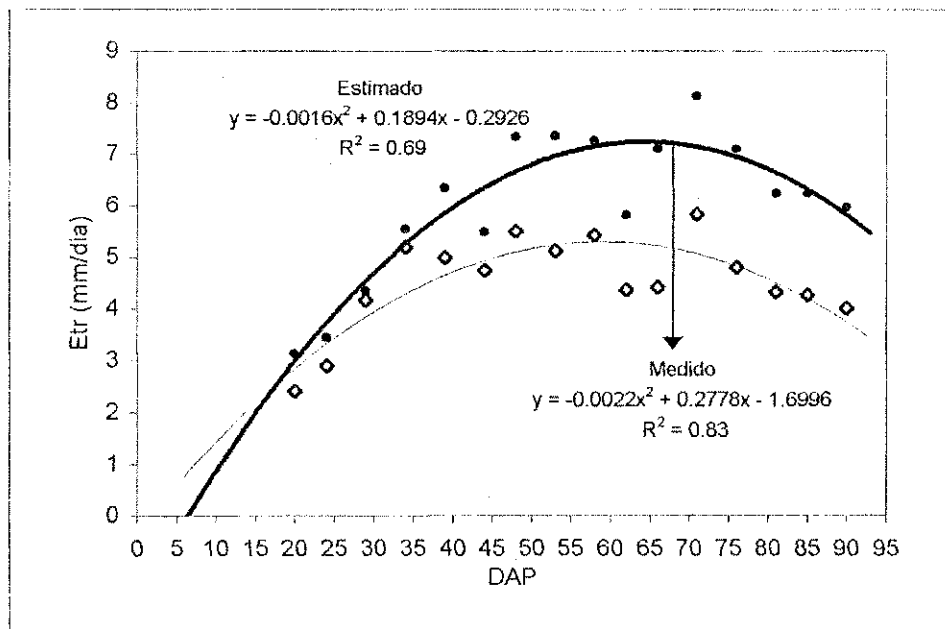


Figura 19. Comparação entre a E_t , estimada a partir do modelo Thornthwaite modificado por Camargo, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

Semelhante aos resultados de análises feitas por Jensen et al., (1989). Esses resultados permitem inferir que o modelo TC, dentre todos os analisados, foi o mais limitado em estimar a E_t . Essa limitação provavelmente ocorreu devido ao modelo empírico de Thornthwaite (1948) basear-se, primariamente, na temperatura do ar, desprezando a contribuição dos parâmetros do momento na transferência do vapor d'água. Um outro motivo deve-se ao fato de que o modelo original proposto por Thornthwaite foi proposto inicialmente para estimativas mensais, procedimento não utilizado nessa pesquisa, já que os testes foram realizados para períodos médios de cinco dias.

4.2.2 – Performance do modelo Penman-Monteith calculado com coeficientes de cultura obtidos na literatura

A Figura 20 apresenta a relação entre os dados médios de E_t medidos no lisímetro de pesagens e estimados a partir do modelo PM calculado com coeficientes de cultura obtidos à partir da metodologia da FAO – “PM- k_c ” (Doorenbos & Pruitt, 1977). Verifica-se que nestas condições o modelo apresenta uma grande capacidade em subestimar a E_t , como pode ser visto na baixa correlação entre as variáveis, $R^2 = 0,28$, e na reduzida exatidão, $\beta_0 = 0,0299$ e $\beta_1 = 0,671$. Aplicando-se o teste F de Graybill, ao nível de 99% de probabilidade, verifica-se haver diferença significativa entre os dados medidos e observados. Isso demonstra uma limitada performance do modelo PM- k_c , o que também pode ser verificado na Tabela 2, pois a dispersão dos dados, resultou num erro médio da estimativa de -32,40%.

De forma semelhante comportou-se o modelo PM calculado com coeficientes de cultura proposto pela Embrapa/CNPAF – “PM- k_E ” (Steinmetz, 1984). Pela

Figura 21, observa-se também uma pequena correlação entre as variáveis, $R^2 = 0,45$, e reduzida exatidão, $\beta_0 = 0,3029$ e $\beta_1 = 0,7256$, o que resultou num F de Graybill significativo, ao nível de 99% de probabilidade, e em um erro médio da estimativa de -22,43%, comprovando, da mesma forma, uma péssima performance do modelo PM quando submetido a esse procedimento.

Muitos trabalhos de pesquisa têm validado a grande capacidade do modelo Penman-Monteith em estimar a E_{t_0} (Jensen et al., 1990, Grazhdani et al., 1998, Ventura et al., 1999, Pereira et al., 1996, Oliveira et al., 1998), o que também foi comprovado neste trabalho (Figura 22). Entretanto, os resultados apresentados comprovam que um bom desempenho em estimar a E_{t_0} não pressupõe, necessariamente, uma boa estimativa da necessidade hídrica de uma cultura, já que para isso, além de uma boa estimativa da E_{t_0} , necessita-se de coeficientes de culturas apropriados ao período, local e cultura.

Observando a Figura 23, que apresenta a comparação entre os dados médios de E_t medidos no lisímetro e estimados por PM- kc_D , PM- kc_F e PM- kc_E em relação a dias após plantio, verifica-se que o kc_F desfavoreceu a performance do modelo PM, já que estimou um ponto de máxima evapotranspiração no momento da floração, aos 54 DAP, ao contrário do que foi observado no lisímetro, em que a maior demanda hídrica do feijociro ocorreu aos 63 DAP, exatamente no início do enchimento das vagens. Esse resultado, associado aos dados subestimados proporcionados pelo kc_F , resultariam em aplicações de lâminas d'água inferiores às requeridas pela cultura o que proporcionaria redução significativa na produtividade. Assim, pode-se inferir que para a região do Cerrado é inviável a utilização do modelo PM com os coeficientes sugeridos pela FAO. Da mesma forma, percebe-se que o kc_E limitou o desempenho do modelo PM, já que apresentou dados

subestimados durante todo ciclo da cultura e ponto de máxima evapotranspiração aos 76 DAP, aproximadamente no início da maturação fisiológica dos frutos, fato que comprometeria o desenvolvimento da cultura, prejudicando a produtividade e a qualidade dos grãos.

Apesar dos testes com os coeficientes da FAO e da Embrapa/CNPAF, terem sido feitos apenas com o modelo PM, deve-se considerar que qualquer um dos modelos de boa performance teriam seu desempenho limitado caso fossem testados com os demais coeficientes.

Além disso, o mal desempenho proporcionado pelos coeficientes propostos por Steinmetz (1984) e obtidos a partir de Doorenbos & Pruitt (1977), comprova que os coeficientes de uma cultura não podem ser generalizados para diversas regiões e períodos, o que possibilita afirmar que existe uma grande possibilidade de que os coeficientes de cultura encontrados nesta pesquisa, possam também limitar a performance dos modelos nos demais períodos do ano na região do Cerrado.

4.3 – Comparação entre os modelos

Pela Tabela 4, que apresenta a comparação entre os modelos de melhor performance na estimativa da E_t do feijoeiro verifica-se que o modelo Christiansen-Hargreaves ajustado (CHaj) demonstra apresentar, dentre os demais, o melhor desempenho o que é validado pelo ponto de máxima oferta hídrica, exatamente igual ao observado no lisímetro, pelo reduzido erro na estimativa e pela ótima correlação apresentada na Figura 17. Por outro lado, percebe-se que o modelo Jensen-Haise (JH) teve no seu desempenho um fator limitante, ou seja, um ponto de máxima oferta hídrica ocorrido aos 68 dias após plantio, exatamente cinco dias depois do observado no lisímetro,. Essa análise inicial permitiria classificar os modelos de uma forma decrescente quanto as suas capacidades em

estimar a E_t do Feijão Preto; entretanto, deve-se ter em mente que esses modelos são significativamente iguais ao nível de 99% de probabilidade, já que os valores estimados pelos modelos não diferiram dos valores medidos no lisímetro. Sendo assim, os únicos parâmetros que permitiriam definir quanto ao uso de um modelo, classificando-o como melhor, seria a disponibilidade local de variáveis.

Deve-se levar em conta que a automatização da coleta de dados de evaporação do tanque Classe A favoreceu o bom desempenho do modelo CHaj, já que a falta de manutenção na área do tanque e erros de leitura nas medidas podem representar uma grande limitação para o desempenho desse modelo (Jensen, 1989).

Tabela 4. Comparação entre os modelos de boa performance na estimativa da E_t do feijoeiro em Planaltina-DF.

Comparação entre os modelos						
Modelos	PM _D	PM _F	PO	JH	PFaj	CHaj
Ponto de máxima oferta hídrica (DAP)	62	62	63	68	62	63
Erro médio da estimativa (%)	2,27	4,06	-1,29	-3,17	2,74	1,46
Regressão simples (R^2)	0,81	0,90	0,89	0,89	0,74	0,95

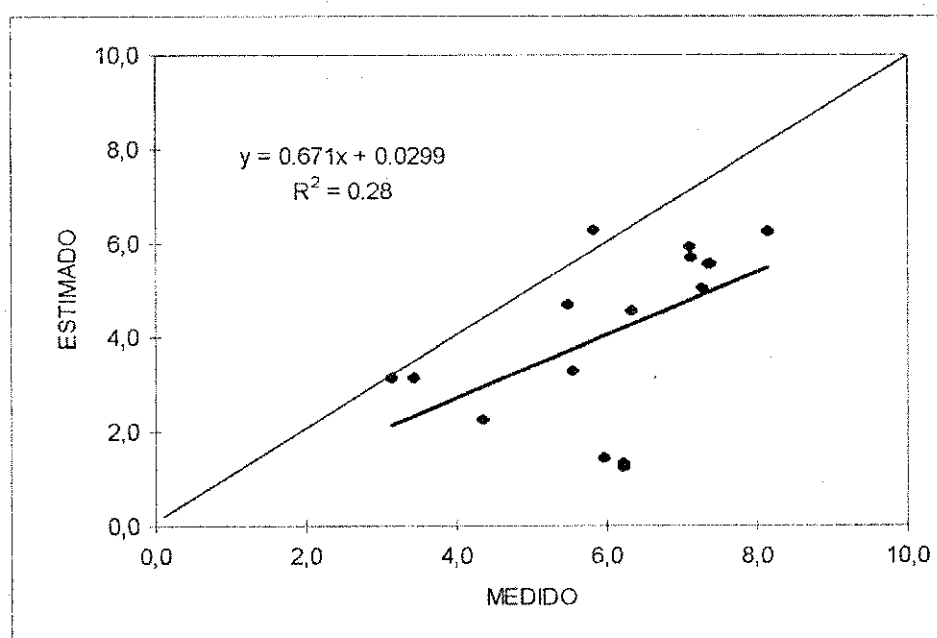


Figura 20. Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, calculado com coeficientes de culturas provenientes da FAO, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

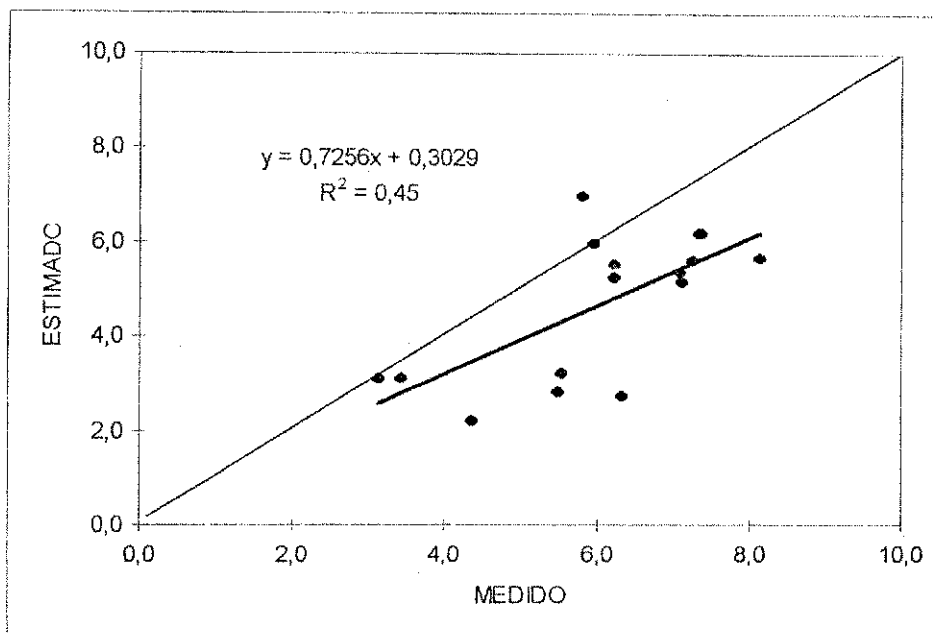


Figura 21. Relação entre a E_t estimada a partir do modelo Penman-Monteith, calculado com coeficientes de culturas propostos pela Embrapa/CNPAP, e medida em lisímetro de pesagem, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

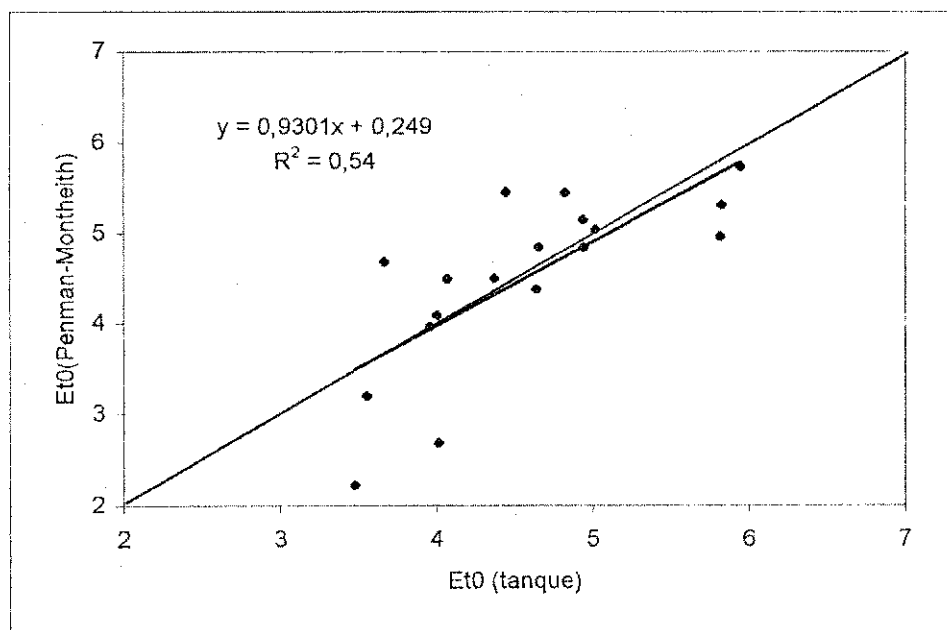


Figura 22. Relação entre a E_{t0} estimada a partir do modelo Penman-Monteith, e estimada a partir tanque classe A ($k_p=0,75$) em, em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

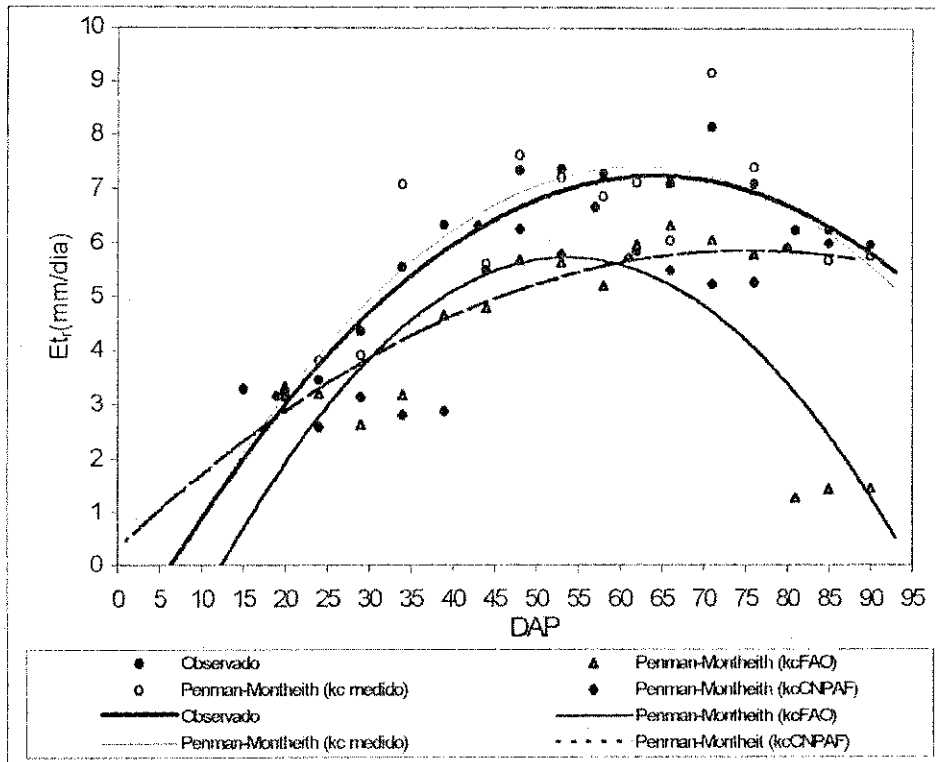


Figura 23. Comparação entre a Et, estimada a partir do modelo Penman-Monteith calculado com diferentes coeficientes de cultura, e medida em lisímetro de pesagem, em relação aos dias após plantio (DAP), em Planaltina, DF, para o Feijão Preto.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Seis modelos de estimativa de evapotranspiração foram avaliados quanto às suas performances na estimativa da evapotranspiração real do Feijão Preto (variedade Diamante Negro), para intervalos médios de cinco dias, no período seco do cerrado brasileiro.

Três dos seis modelos analisados apresentaram, em suas formas originais, ótimas performances, são eles: Penman (1948), Penman-Monteith (1981) e Jensen-Haise (1963).

O modelo de Penman modificado pela FAO (1977), apresentou uma limitada performance, superestimando a E_t medida. No entanto, apresentou uma ótima performance quando avaliado com a função de vento ajustada.

O modelo de Christiansen-Hargreaves (1969), na sua forma original, subestimou significativamente a E_t medida no lisímetro. Todavia, sua performance melhorou significativamente com o aumento da contribuição do termo energético no modelo.

O modelo de Thornthwaite modificado por Camargo (1948), foi o mais limitado em estimar a E_t do feijoeiro, subestimando-a significativamente.

A boa performance dos modelos Penman original, Penman-Monteith, Penman-FAO ajustado, Jansen-Haise e Chistiasen-Hargreaves ajustado, qualifica-os como alternativas viáveis para o manejo de irrigação do Feijão Preto no período seco da região do Cerrado. Entretanto, a utilização prática desses modelos encontra-se associada aos coeficientes de cultura determinados nessa pesquisa, os quais podem ser estimados a partir da equação apresentada na Figura 3.

Tanto os coeficientes de cultura obtidos segundo FAO-24 e propostos por Steinmetz (1984) são inadequados para as condições analisadas, pois subestimam significativamente a E_t do feijoeiro e limitam a aplicabilidade dos modelos.

Em condições adiabáticas e para velocidade de vento superior a 2 m/s, o parâmetro de rugosidade da superfície vegetada para momento pode ser calculado como uma função da altura do feijoeiro. O parâmetro de rugosidade da superfície vegetada para calor sensível pode ser calculado como uma função do parâmetro de rugosidade da superfície para o momento;

O plano de deslocamento da superfície do solo é um parâmetro desnecessário no ajuste do perfil logarítmico do vento para a cultura do Feijão Preto.

Anexo 1. Parâmetros agrometeorológicos do mês de junho de 1999 utilizados na avaliação dos modelos

SAL - Laboratório de Biofísica Ambiental

BOLETIM MENSAL DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS

Estação: Principal

Lat: 15°35'30" S

Long: 47°42' 30" W

Dia	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)			Precip. Pluv. (mm)	Veloc. Vento a 2 m (m/s)	Evap. Classe A (mm)	Radiação solar (cal/cm²/dia)	Temp. média do solo (°C)					Brilho solar (h)
	Máx	Mín.	Média	Máx	Mín.	Média					Profundidades (cm)					
											2	5	10	20	40	
1	27,7	14,5	20,1	78	31	50	0,0	2,13	5,61	444,76	21,9	22,1	22,3	22,7	23,3	10,0
2	28,1	17,0	21,6	87	36	65	0,0	2,27	4,97	454,80	22,6	22,6	22,6	22,8	23,3	9,7
3	27,7	16,7	21,6	85	37	63	0,0	2,19	4,58	415,61	22,9	22,9	22,9	23,0	23,3	9,7
4	25,5	15,2	19,8	92	40	68	0,0	1,50	2,44	184,47	22,2	22,5	22,7	23,1	23,5	3,5
5	28,6	12,3	20,0	94	22	57	0,0	1,36	4,51	455,38	21,6	21,8	22,0	22,5	23,3	10,0
6	28,2	11,8	20,8	93	28	56	0,0	1,64	4,50	413,22	21,9	22,1	22,2	22,6	23,2	9,7
7	28,0	11,1	20,4	95	22	54	0,0	1,76	6,45	424,56	21,8	22,0	22,1	22,5	23,2	9,8
8	26,4	15,6	20,3	76	30	57	0,0	3,08	5,99	433,00	21,5	21,8	22,0	22,4	23,1	9,7
9	25,3	14,8	19,4	85	37	65	0,0	2,92	4,69	411,20	21,4	21,6	21,8	22,3	23,0	8,6
10	26,3	14,9	19,9	91	33	67	0,0	2,09	4,02	432,32	21,8	21,9	22,0	22,2	22,9	8,6
11	27,3	15,0	20,6	91	33	62	0,0	2,25	5,10	455,69	22,1	22,2	22,3	22,4	22,9	9,9
12	27,5	16,0	21,2	79	35	60	0,0	2,40	4,46	378,22	22,0	22,1	22,2	22,5	23,0	9,5
13	26,5	16,2	20,7	78	27	56	0,0	2,27	5,85	424,05	22,2	22,3	22,3	22,5	23,0	9,9
14	26,4	12,4	20,1	92	33	60	0,0	1,60	4,45	356,60	21,7	21,9	22,0	22,4	23,0	6,2
15	26,8	14,1	20,6	87	33	59	0,0	1,59	3,74	334,15	21,8	21,9	22,0	22,3	22,9	7,1
16	26,7	15,4	20,1	91	33	63	0,0	2,10	4,70	349,45	22,0	22,1	22,2	22,4	22,9	7,7
17	27,6	12,8	20,6	83	24	51	0,0	1,83	4,81	414,72	21,8	21,9	22,0	22,3	22,9	9,4
18	27,9	12,2	20,5	87	22	50	0,0	1,73	5,11	438,75	21,8	21,9	22,0	22,3	22,9	9,9
19	28,6	12,9	20,3	85	22	54	0,0	1,20	4,80	434,97	22,2	22,2	22,2	22,4	22,9	8,6
20	29,8	12,9	20,8	85	26	54	0,0	2,11	5,50	418,77	22,0	22,1	22,2	22,4	22,9	9,5
21	28,8	13,4	20,3	93	25	62	0,0	1,58	4,95	396,84	22,0	22,1	22,1	22,4	22,9	8,2
22	28,3	12,8	20,9	97	32	61	0,0	1,89	6,41	373,23	22,2	22,2	22,2	22,4	22,9	7,7
23	28,0	16,1	21,5	59	22	39	0,0	2,81	7,37	450,92	22,1	22,3	22,3	22,5	22,9	9,9
24	28,0	9,7	20,6	84	12	36	0,0	2,40	5,99	466,25	21,7	21,9	22,0	22,4	22,9	10,1
25	28,1	9,1	19,0	88	13	44	0,0	1,56	4,83	460,81	21,2	21,5	21,6	22,1	22,8	9,7
26	28,6	9,0	20,2	82	19	42	0,0	2,02	5,14	454,58	21,3	21,4	21,6	22,0	22,7	9,9
27	26,9	16,3	20,9	69	30	50	0,0	2,37	5,13	433,61	21,9	21,9	21,9	22,1	22,6	9,8
28	27,1	15,3	20,4	67	28	49	0,0	1,96	5,39	447,25	22,1	22,1	22,1	23,3	22,7	9,6
29	28,4	13,8	20,8	75	22	49	0,0	1,72	5,76	437,83	22,1	22,2	22,2	22,4	22,7	9,1
30	29,9	12,8	20,2	88	25	56	0,0	1,24	3,87	384,70	22,2	22,2	22,3	22,4	22,8	7,5
Total							0,0	59,57	151,12	12380,71						268,5
Média	27,6	13,7	20,5	85	28	55		1,99		412,69	21,9	22,1	22,1	22,4	23,0	9,0
Máxima	29,8	17,0	21,6	97	40	68		3,08		466,25	22,9	22,9	22,9	23,1	23,5	10,1
Mínima	25,3	9,0	19,0	59	12	36		1,20		184,47	21,2	21,4	21,6	22,0	22,6	3,5

Anexo 2. Parâmetros agrometeorológicos do mês de julho de 1999 utilizados na avaliação dos modelos

SAL/ Laboratório de Biofísica Ambiental

BOLETIM MENSAL DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS

Estação: Principal

Lat: 15°35'30" S

Long: 47°42' 30" W

Dia	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)			Precip. Pluv. (mm)	Veloc. Vento a 2 m (m/s)	Evap. Classe A (mm)	Radiação solar (cal/cm²/dia)	Temp. média do solo (°C)					Brilho solar (h)
	Máx	Mín.	Média	Máx	Mín.	Média					Profundidades (cm)					
											2	5	10	20	40	
1	28,0	12,1	20,1	92	29	58	0,0	1,74	4,20	341,19	21,9	22,0	22,1	22,4	22,8	5,9
2	26,0	16,0	20,0	85	30	61	0,0	2,73	4,88	415,12	21,8	22,0	22,0	22,3	22,8	9,7
3	26,1	13,2	19,6	92	33	64	0,0	1,91	3,95	431,61	21,8	21,9	21,9	22,2	22,7	10,0
4	28,0	16,4	21,8	83	33	59	0,0	1,91	4,62	409,60	22,8	22,7	22,5	22,5	22,7	9,1
5	28,5	13,7	21,5	95	26	58	0,0	1,86	5,52	412,13	22,9	22,9	22,8	22,8	22,9	9,8
6	27,1	17,3	21,2	76	31	58	0,0	2,63	6,15	418,45	22,5	22,6	22,7	22,8	23,0	10,2
7	26,8	15,6	20,4	87	30	62	0,0	2,46	2,56	427,87	22,6	22,6	22,6	22,7	23,0	9,2
8	26,8	15,4	20,5	84	35	63	0,0	2,29	4,60	445,09	22,9	22,9	22,8	22,8	23,0	10,1
9	28,5	15,2	21,5	86	23	54	0,0	1,81	4,78	417,87	23,0	23,0	23,0	23,0	23,1	9,2
10	27,8	12,1	21,0	89	23	49	0,0	2,05	5,62	444,19	22,7	22,8	22,8	23,0	23,1	10,1
11	25,6	15,4	19,7	73	29	53	0,0	3,38	6,72	452,42	22,3	22,5	22,6	22,8	23,1	9,7
12	23,8	13,5	18,0	81	35	59	0,0	3,15	5,87	415,36	21,7	22,0	22,1	22,6	23,1	9,4
13	24,1	13,2	18,3	82	32	58	0,0	3,14	5,28	394,57	21,3	21,5	21,7	22,2	22,9	9,2
14	24,6	12,8	18,6	85	32	61	0,0	2,88	4,62	444,41	21,8	21,8	21,9	22,1	22,8	8,3
15	24,4	14,2	18,3	89	41	68	0,0	3,03	3,91	345,91	21,9	22,2	22,1	22,3	22,7	6,5
16	26,3	15,2	19,4	90	30	65	0,0	2,60	3,62	323,77	21,8	21,9	22,0	22,2	22,7	7,0
17	27,5	16,9	21,8	80	25	49	0,0	2,19	4,98	416,03	22,4	22,3	22,3	22,3	22,6	8,7
18	27,6	13,5	21,5	72	25	43	0,0	2,50	6,50	416,32	22,6	22,6	22,6	22,6	22,7	9,0
19	27,0	16,8	21,3	72	28	49	0,0	2,61	6,24	461,26	22,8	22,7	22,7	22,7	22,8	10,5
20	27,0	16,1	21,0	67	30	50	0,0	1,75	5,35	421,30	22,8	22,8	22,7	22,8	22,9	7,8
21	28,6	14,3	21,4	76	25	47	0,0	1,57	5,19	434,38	23,2	23,1	23,0	22,9	23,0	9,5
22	29,0	12,7	22,0	79	19	39	0,0	2,46	6,67	449,16	22,9	23,0	23,0	23,0	23,1	10,0
23	26,9	15,6	20,9	59	25	42	0,0	3,03	7,01	477,76	22,6	22,7	22,8	22,9	23,1	10,5
24	27,1	14,7	20,4	67	30	50	0,0	2,92	5,98	481,49	22,6	22,6	22,7	22,8	23,1	10,5
25	26,5	14,9	20,4	84	31	57	0,0	3,31	6,80	476,63	22,7	22,8	22,8	22,9	23,1	10,5
26	26,9	15,3	20,8	76	29	52	0,0	2,83	7,09	487,17	22,9	22,9	22,9	22,9	23,1	10,4
27	26,7	15,4	20,8	70	30	49	0,0	2,61	6,46	458,50	22,7	22,9	22,9	23,0	23,1	10,2
28	27,4	15,8	20,9	69	25	48	0,0	2,69	6,29	503,63	22,5	22,7	22,8	22,9	23,1	10,5
29	28,0	15,7	21,2	67	26	47	0,0	2,66	6,30	491,82	22,9	22,9	22,9	23,0	23,1	10,3
30	27,3	15,5	20,8	67	24	45	0,0	2,29	5,79	496,02	23,0	23,1	23,0	23,0	23,1	10,3
31	27,5	14,5	20,4	66	22	42	0,0	2,89	7,36	472,46	22,7	22,9	23,0	23,1	23,2	10,2
Total							0,0	77,88	172,91	13483,49						292,3
Média	26,9	14,8	20,5	79	29	54	0,0	2,51	5,58	434,95	22,5	22,6	22,6	22,7	23,0	9,4
Máxima	29,0	17,3	22,0	95	41	68	0,0	3,38	7,36	503,63	23,2	23,1	23,0	23,1	23,2	10,0
Mínima	23,8	12,1	18,0	59	19	39	0,0	1,57	3,62	323,77	21,3	21,5	21,7	21,1	22,6	5,9

Anexo 3. Parâmetros agrometeorológicos do mês de agosto de 1999 utilizados na avaliação dos modelos

SAL/ Laboratório de Biofísica Ambiental

BOLETIM MENSAL DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS

Estação: Principal

Lat: 15°35'30" S

Long: 47°42' 30" W

Dia	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)			Precip. Pluv. (mm)	Veloc. Vento a 2 m (m/s)	Evap. Classe A (mm)	Radiação solar (cal/cm²/dia)	Temp. média do solo (°C)					Brilho solar (h)
	Máx	Mín.	Média	Máx	Mín.	Média					Profundidades (cm)					
											2	5	10	20	40	
1	25,9	14,4	20,0	61	27	43	0,0	2,66	4,87	333,19	21,8	22,1	23,3	22,8	23,1	6,1
2	26,0	16,9	20,4	67	26	46	0,0	2,89	5,94	343,98	22,4	22,4	22,4	22,6	23,0	4,6
3	26,1	12,6	19,8	70	23	43	0,0	2,52	6,97	480,55	22,2	22,3	22,3	22,5	23,0	10,5
4	26,5	8,7	18,7	87	16	43	0,0	2,38	6,58	519,91	22,0	22,2	22,3	22,5	22,9	10,5
5	25,9	13,9	19,2	65	23	45	0,0	2,49	5,54	512,34	22,2	22,3	22,3	22,5	22,9	9,8
6	26,0	12,8	19,0	70	23	48	0,0	2,37	5,75	522,49	22,5	22,5	22,5	22,6	22,9	10,5
7	28,0	10,7	20,9	84	22	43	0,0	1,95	5,84	515,82	23,0	22,9	22,8	22,7	22,9	10,0
8	28,9	12,9	21,7	69	17	37	0,0	2,45	7,49	503,57	23,4	23,4	23,3	23,1	23,0	10,4
9	28,7	10,8	20,5	74	18	40	0,0	2,14	8,22	484,50	22,8	22,9	23,0	23,1	23,1	9,6
10	28,1	15,5	21,3	52	19	36	0,0	3,00	8,44	512,57	23,0	23,0	23,0	23,0	23,1	10,2
11	28,6	15,9	21,7	57	17	36	0,0	2,53	6,86	520,50	23,4	23,3	23,2	23,1	23,2	9,7
12	29,5	10,4	21,7	73	15	34	0,0	2,06	6,42	525,36	23,7	23,6	23,5	23,3	23,3	10,5
13	31,1	12,3	22,1	70	11	33	0,0	1,74	6,34	511,36	24,1	24,0	23,8	23,6	23,4	10,4
14	32,4	11,2	22,6	73	9	36	0,0	1,99	6,97	507,80	24,1	24,0	23,9	23,7	23,5	10,5
15	24,8	11,8	17,1	91	35	67	0,0	4,44	6,43	496,54	23,5	23,7	23,7	23,8	23,6	9,4
16	26,6	10,4	17,8	79	31	58	0,0	4,14	6,00	511,71	22,7	22,9	23,0	23,3	23,6	10,3
17	25,9	12,1	18,2	91	35	64	0,0	3,34	5,40	515,02	23,3	23,3	23,3	23,3	23,5	9,7
18	26,8	12,8	19,5	83	30	56	0,0	2,50	6,00	524,89	23,9	23,8	23,7	23,5	23,5	10,2
19	27,6	15,9	20,7	61	15	41	0,0	3,10	7,66	543,47	23,9	23,9	23,8	23,7	23,6	10,6
20	26,4	11,3	19,7	77	21	44	0,0	3,48	9,23	543,05	23,3	23,4	23,5	23,6	23,6	10,3
21	26,4	14,5	19,3	95	33	64	0,1	2,83	4,62	410,02	23,2	23,3	23,3	23,5	23,6	7,4
22	26,7	15,1	19,9	75	30	52	0,0	3,41	6,38	511,81	23,6	23,6	23,5	23,5	23,5	9,4
23	26,7	15,3	20,3	61	24	42	0,0	3,14	7,37	562,84	23,6	23,6	23,6	23,5	23,6	10,8
24	26,0	14,5	20,0	53	23	37	0,0	3,01	7,73	565,68	23,5	23,6	23,6	23,6	23,6	10,7
25	26,6	15,3	20,7	71	26	45	0,0	2,97	6,26	367,60	23,0	23,1	23,2	23,5	23,6	6,7
26	27,0	14,5	21,4	87	30	53	0,0	2,20	5,70	367,79	23,8	23,8	23,6	23,5	23,5	6,3
27	31,0	17,1	23,0	71	20	46	0,0	1,92	5,98	510,24	24,6	24,3	24,0	23,7	23,6	8,7
28	32,0	17,3	24,3	60	17	37	0,0	1,59	5,96	470,85	25,3	25,0	24,8	24,3	23,8	9,8
29	32,1	15,0	24,4	79	14	33	0,0	2,28	7,96	527,80	25,5	25,3	25,0	24,6	24,0	10,0
30	30,8	15,0	24,0	58	14	28	0,0	3,03	11,19	550,15	25,2	25,1	25,0	24,7	24,2	10,6
31	29,6	15,5	22,1	44	9	26	0,0	3,15	9,11	587,63	24,7	24,7	24,7	24,6	24,3	10,9
Total							0,1	83,70	211,21	15361,03						273,3
Média	27,9	13,6	20,7	71	22	44	0,0	2,70	6,81	495,52	23,5	23,5	23,4	23,4	23,4	9,4
Máxima	32,4	17,3	24,4	95	35	67	0,1	4,44	11,19	587,63	25,5	25,3	25,0	24,7	24,3	10,8
Mínima	24,8	8,7	17,1	44	9	26	0,0	1,59	4,62	333,19	21,8	22,1	22,3	22,5	22,9	4,6

Anexo 4. Parâmetros agrometeorológicos do mês de setembro de 1999 utilizados na avaliação dos modelos

SAL- Laboratório de Biofísica Ambiental

BOLETIM MENSAL DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS

Estação: Principal

Lat: 15°35'30" S

Long: 47°42' 30" W

Dia	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)			Precip. Pluv. (mm)	Veloc. Vento a 2 m (m/s)	Evap. Classe A (mm)	Radiação solar (cal/cm²/dia)	Temp. média do solo (°C)					Brilho solar (h)
	Máx	Mín.	Média	Máx	Mín.	Média					Profundidades (cm)					
											2	5	10	20	40	
1	28,0	18,5	21,9	43	28	37	0,0	2,34			27,2	26,8	26,1	24,8	24,3	10,9
2	29,0	15,2	22,0	63	21	37	0,0	2,27	6,89	573,47	25,0	25,0	24,8	24,6	24,2	10,8
3	31,2	17,8	23,3	49	14	34	0,0	2,23	12,33	533,72	25,5	25,4	25,1	24,8	24,3	10,4
4	32,8	13,3	24,2	67	14	33	0,0	1,87	8,23	530,74	25,7	25,5	25,3	25,0	24,4	10,2
5	33,2	15,6	24,8	56	14	30	0,0	1,81	7,48	526,32	26,1	25,9	25,6	25,2	24,6	10,0
6	32,8	19,1	25,0	51	21	35	0,0	1,97	6,81	495,61	26,2	26,0	25,8	25,4	24,7	9,1
7																6,7
8	34,1	20,7	27,8	50	19	32	0,0	1,92	7,68	378,00	28,5	27,5	26,7	25,7	25,1	8,7
9	33,4	17,6	26,0	65	22	38	0,0	1,78	6,84	438,59	26,9	26,7	28,4	25,9	25,1	6,4
10	26,7	17,4	23,0	99	33	64	1,0	2,99	4,60	473,33	26,6	26,6	26,4	26,1	25,4	7,5
11	28,4	19,5	23,2	69	35	51	0,0	2,61	5,65	256,31	25,5	25,6	25,7	25,8	25,5	1,2
12	28,3	16,7	21,6	89	34	61	4,2	2,18	5,20	376,02	24,5	24,8	25,0	25,2	25,3	3,6
13	31,8	15,5	24,0	86	25	49	0,0	1,46	5,30	449,40	24,5	24,5	24,5	24,7	25,0	6,1
14	33,3	19,2	25,2	67	24	46	0,0	2,37	7,10	506,03	25,8	25,6	25,4	25,1	24,8	7,7
15	31,9	17,0	22,6	90	31	64	0,0	2,70	5,56	351,98	25,4	25,4	25,4	25,3	24,9	5,1
16	30,8	17,8	23,3	100	37	72	2,2	2,87	5,53	439,44	25,5	25,4	25,3	25,2	25,0	6,6
17	27,4	17,3	21,5	100	44	75	5,9	2,59	4,63	296,01	24,3	24,6	24,8	25,1	25,0	0,9
18	29,9	19,2	24,1	76	34	54	0,0	3,05	8,10	479,05	24,5	24,5	24,5	24,6	24,7	6,0
19	30,3	18,2	23,5	74	33	54	0,0	2,63	7,41	540,48	25,1	25,1	24,9	24,8	24,7	7,3
20	29,3	17,6	23,3	79	33	50	0,0	2,24	5,50	354,23	24,6	24,8	24,8	24,9	24,7	1,6
21	27,1	18,8	23,0	84	37	54	0,2	1,41	6,44	221,56	24,0	24,2	24,3	24,6	24,7	0,6
22	24,5	16,8	19,3	100	63	89	32,1	1,69	1,66	230,97	23,2	23,5	23,8	24,3	24,6	1,8
23	25,0	16,2	19,2	100	61	92	1,6	1,65	2,11	305,25	22,7	22,9	23,0	23,6	24,4	3,5
24	26,8	16,7	20,3	99	51	82	0,0	2,75	4,29	409,84	23,0	23,1	23,2	23,5	24,1	5,7
25	25,3	15,6	19,6	100	49	78	0,0	2,44	3,38	277,44	22,0	22,4	22,7	23,3	24,0	3,4
26	29,6	14,2	21,1	99	28	61	0,0	1,61	5,29	577,21	22,9	22,9	22,8	23,0	23,7	10,1
27	31,4	16,3	23,9	70	24	44	0,0	1,85	6,18	553,17	23,7	23,6	23,5	23,5	23,6	9,8
28	32,1	14,9	23,8	82	23	48	0,0	1,56	6,25	523,41	24,0	24,0	23,9	23,8	23,8	9,5
29	33,3	16,6	25,6	84	24	47	0,0	2,00	8,39	570,98	24,9	24,7	24,4	24,1	23,9	9,2
30	33,2	18,5	25,7	83	26	55	0,0	1,83	6,15	424,41	25,6	25,5	25,2	24,8	24,2	6,5
Total							47,2	62,7	170,98	12111,00						196,9
Média	30,1	17,2	23,2	78	31	54	1,6	2,16	6,11	432,53	24,9	24,9	24,8	24,7	24,6	6,6
Máxima	34,1	20,7	27,8	100	63	92	32,1	3,05	12,33	577,21	28,5	27,5	26,7	26,1	25,5	10,9
Miníma	24,5	13,3	19,2	43	14	30	0,0	1,41	1,66	221,56	22,0	22,4	22,7	23,0	23,6	0,6

Anexo 5. Grupos de dados selecionados para condições atmosféricas próximas de neutra, necessários para ajustar u^* , Z_{om} e Z_{oh} .

DDA	h	u_1 (m/s)	u^* (m/s)	Z_{om} (m)	Z_{oh} (m)	z/L	R^2
212	07:20	2,075820	0,216450	0,039208	0,005159	-0,001198	0,979526
212	07:40	2,031380	0,259945	0,081199	0,010684	-0,006212	0,990722
212	07:50	2,482970	0,296905	0,064854	0,008533	-0,005974	0,997972
212	08:10	2,405290	0,262463	0,046690	0,006143	-0,012172	0,996424
212	08:20	2,841770	0,265940	0,025022	0,003292	-0,013392	0,999637
213	08:20	3,833920	0,324218	0,015684	0,002064	-0,005347	0,997662
214	08:20	2,827090	0,234953	0,014405	0,001895	-0,012876	0,998723
218	07:50	2,094330	0,200366	0,027533	0,003623	-0,011565	0,990649
228	07:40	4,039420	0,389330	0,028418	0,003739	-0,002731	0,999625
230	07:40	2,948060	0,296629	0,033991	0,004473	-0,003619	0,099874
230	08:50	3,221540	0,311500	0,028809	0,003791	-0,007657	0,991287
232	08:10	3,463670	0,251976	0,007135	0,000939	-0,011516	0,985780
233	07:20	2,145590	0,227831	0,042088	0,005538	0,004077	0,997226
233	07:50	2,092760	0,147112	0,005861	0,000771	-0,009316	0,958981
233	08:20	3,063600	0,254679	0,014424	0,001898	0,000161	0,999937
233	08:30	2,415620	0,232689	0,028348	0,003730	-0,005215	0,991878
233	08:40	2,715280	0,236222	0,017959	0,002363	-0,007469	0,999641
233	08:50	2,047790	0,182085	0,019884	0,002616	-0,014567	0,945266
233	09:00	2,085250	0,172348	0,014017	0,001844	-0,013543	0,977566
233	09:10	2,250400	0,196447	0,018250	0,002401	-0,013668	0,994971
233	10:20	3,300870	0,306752	0,024264	0,003193	-0,009619	0,997523
233	10:30	3,766750	0,331679	0,019005	0,002501	-0,008839	0,995462
235	08:10	3,286970	0,288362	0,018679	0,002458	-0,006294	0,994310
235	08:20	3,248770	0,313145	0,028426	0,003740	-0,008189	0,997063
236	08:00	2,890520	0,258411	0,020384	0,002682	-0,008087	0,999530
237	08:50	3,369870	0,336869	0,033097	0,004355	-0,009007	0,998444
238	07:40	2,764100	0,258952	0,025141	0,003308	-0,011557	0,998820
238	08:30	3,358920	0,292469	0,018032	0,002373	-0,012562	0,996009
Média	08:21	2,823869	0,262383	0,0272	0,003575	-0,008141	0,959661

BIBLIOGRAFIA

- ABTEW, W.; GREGORY, J. M.; BORRELLI, J. Wind profile: estimation of displacement height and aerodynamic roughness. *Transaction of ASAE*, v.32, p.521-527, 1989
- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of evapotranspiration. *Agro. J.*, 81:650-662, 1989
- ALLEN, R. G.; Pruitt, W. O. Closure to "Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula." *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 112(IR2):139-155, 1989
- AZEVEDO, P. V., & VERMA, S. B. Aerodynamic characteristics of grain sorghum. *Agri. For. Meteorol.* 38: 193-204. 1986
- BERLATO, M. A., MOLION, L. C. B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre, IPAGRO, 1981, p. 95. (IPAGRO. Boletim técnico, 7)
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. Viçosa: UFV, 1989. 586p.
- BONOMO, R., MANTOVANI, E. C., E SEDIYAMA, G. C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para as regiões cafeeiras do triângulo e noroeste de Minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Calda. *Anais...* Poços de Calda, 1998. P 300-309.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento de transferência e comercialização de tecnologias. Recomendações técnicas para o cultivo do feijão. Brasília, EMBRAPA-SPI, 1996. 32 p
- BRUTSAERT, W. H. Evaporation into the atmosphere. Theory, History, and Application. D. Reidel Publishing Co., Boston, 299p. 1982.
- CAIRO, P. A. R. Curso básico de relações hídricas de plantas. Vitória da Conquista: UESB, 1995. 32p.

- CARVALLO, H. O. G. Apontamentos da disciplina física do solo. Campina Grande: UFPB. 1998. (Mestrado em Engenharia Agrícola)
- CHISTIANSEN, J. E. e HARGREAVES, G. H. Irrigation requirements from evaporation. Trans. Int. Comm. on Irrig. and Drain., Vol. III, 23. 569-23. 596. 1969.
- De BRUIN, H. A. R., and MOORE, C. J. Zero-plane displacement and roughness length for tall vegetation derivad from a simple mass conservation hypothesis. **Boundary-Layer Meteorol.** 31: 39-49. 1984.
- DINARTE, A. S. C. Algumas considerações sobre agricultura irrigada na região dos Cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 07, 1995, Brasília. **Anais...** Planaltina, Embrapa-CPAC, 1997, p. 87
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. Irrigation and drainage. Paper 24. Food and Agriculture organization of the United Nations. Rome, 1977. 144p.
- DUARTE, E. N., NEVES, D. A.B. de., SANTOS, B. de. L. O. dos. S. Manual técnico para realização de trabalhos monográficos. João Pessoa, UFPB. 1994. 68p.
- ESPINOZA, W., AZEVEDO, L. G. de., JARRETA Júnior. M. O clima da região dos cerrados em relação a agricultura. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1982. P. 37. (EMBRAPA-CPAC. Circular técnica, 9)
- FERNANDES, A. L. T.; DRUMOND, L. C. D.; SILVA W. J.; OLIVEIRA, C. N. A. Estudos comparativos de evapotranspiração para fins de irrigação utilizando diferentes métodos de estimativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Trabalhos apresentados no simpósio manejo de irrigação: UFLA/SBEA, 1998. P 94-96.
- FIGUERÊDO, S. F., GUERRA, A. F., SILVA, D. B. da., ANTONINI, J. C. dos ^a, RODRIGUES, G. C. Manejo de irrigação e fertilização nitrogenada na cultura do feijão.

- In: EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Planaltina-DF). Relatório técnico anual 1991 a 1995. Planaltina, 1997. P. 95-97.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Anuário estatístico do Brasil, New York, 19(04). p. 358-368, 1965.
- GARRATT, J.R. Transfer characteristics for a heterogenous surface of large aerodynamic roughness. **Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.** 104: 491-502. 1978.
- GARRATT, J.R., and FRANCEY. R. J. In the unstable, baroclinic atmospheric boundary layer, **Boundary-layer Meteorol.** 15: 399-421. 1978.
- GARRATT, J.R., and HICKS. B. B. Momentum, heat and water vapor transfer to and from natural and artificial surfaces. **Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.** 99: 680-687. 1973.
- GOEDERT, W. J.; & SOUZA, P. M. de. Culturas anuais: situação atual e perspectivas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 07, 1995, Brasília. **Anais...** Planaltina, Embrapa-CPAC, 1997, p. 138
- GRAZHDANI, S., DHINA, S., and FERNANDEZ, J. E. Estimating reference evapotranspiration for the climatic conditions of south-eastern Albania. Albania: Agr. Univ. of Tirana, 1998, 128: 1, 76-80.
- GRAYBILL, F.A. Theory and application of the linear model. s. l. Belmont Duxdury, 1976. 704p.
- GUERRA, A. F. Analysis of for evaluation of canopy and aerodynamic resistances over turfgrass. Arizona, 1990. 233p. Dissertation (PhD. Irrigation Engineering) – University of Arizona.
- GUERRA, A. F. Manejo de irrigação da cevada sob condição de cerrado visando o potencial de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n. 7, p. 111-118, 1994

- GUERRA, A. F., SILVA, D. B. Manejo de irrigação e fertilização nitrogenada para cevada de seis fileiras na região do cerrado. In: REUNIÃO ANUAL DE PESQUISA DE CEVADA, 18, 1998, Passo Fundo. **Anais...** Passo fundo, EMBRAPA, 1998, p.365-371
- GUERRA, A. F., SILVA, E. M., AZEVEDO, J. A. Tensão de água no solo: Um critério para irrigação do trigo na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n. 4, p. 631-636, 1994
- HICKS, B. B., MATT, D. R., and McMILLEN, R. T. A micrometeorological investigation of surface exchange of trace gases: a case study. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-172, Air Resources Laboratory, Silver Spring. MD. 71p. 1989.
- HOWELL, T. A., STEINER, J. L., SCHNEIDER, A. D., and TOLK. J.A. Seazonal and maximum daily evapotranspiration of irrigated winter wheat, sorghum and corn. **Transactions of the ASAE**. 40:3, 623-634; 1997.
- JACOBS, A. F. G., and VAN BOXEL, J. H. Changes of the displacement height and roughness length of maize during a growing season. **Agri. For. Meteorol.** 42: 53-92. 1988.
- JENSEN, M. E., BURMAN, R. D. & ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requeriments. New York, ASCE. 1989. P. 332 (Manuals and reports 70)
- JENSEN, M. E., e HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **J. Irrig. and Drain. Div.**, ASCE, 89:15-41. (1963).
- KUTAS, W. P., CHOUDHURY, B. J., KUNKEL, K. E., and GAY, L. W. Estimate of the aerodynamic roghness parameteres over incomplete cover of cotton. **Agric. For. Meteorol.** 46: 91-1055. 1989
- LETTAU, H. Note on Aerodynamic roughness- element description. **J. Appl. Meteorol.** 8:828-832. 1969.

- um lisímetro de pesagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. ANAIS... UFLA/SBEA, 1998. P 121-123.
- QIAN, Y. L., FRY, J. D., WIEST, S. C., and UPHAN, N. S. Estimating turfgrass evapotranspiration using atmometers and the Penman-Monteith model. Manhattan Univesity, 1996. 36:3, p. 699-704.
- ROBINSON, S. M. Computing wind profile parameters. **J. Atmos. Sci.** 19: 189-1190. 1962
- SANTOS, J. J. A.; BEZERRA, F. M. L.; MIRANDA, E. P. de.; CORDEIRO, L. G. Determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) e evapotranspiração máxima (ET_m) em diferentes fases fisiológicas do feijão caupi (*Vigna unguiculat* (L.) WALP.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. ANAIS... UFLA/SBEA, 1998. P 184-186.
- SEGINER, I. Aerodynamic roughness of vegetated surfaces. **Boundary-layer Meteorol.** 5: 383-393. 1974.
- SHAW, R. H., and PEREIRA. 1982. Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. **Agric. Meteorol.** 26: 51-65. 1982
- SOER, G. J. R. Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. **Remote Sensing Environ.** 9: 27-44. 1980.
- SOUZA, S. L. de. Estudo da evapotranspiração em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). Campina Grande, UFPB, 1983. 73p. (Dissertação de Mestrado).
- STEINMETZ, S. Evapotranspiração máxima no cultivo do feijão de inverno. Goiânia, EMBRAPA-CNPAP, 1984. P. 11. (EMBRAPA – CNPAF Pesquisa em andamento, 47)
- STONE, L. F., e SILVEIRA, P. M. de. Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação. Goiânia, EMBRAPA-CNPAP, 1995. 49p. (EMBRAPA-CNPAP. Documento, 55).

- THOM, A. S. Momentum, mass and heat exchange of vegetation. **Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.** 97: 414-428. (1972).
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geograph. Ver.**; Washington, 38: 55-94, 1948.
- VENTURA, F., SPANO, D., DUCE, P., and SNYDER, R. L. An evaluation of common evapotranspiration equations. **Irrig. Sci.** 18: 163-170. (1999)