PREVISÃO DO RENDIMENTO DA CULTURA DE FEIJÃO
(*Phaseolus vulgaris* L.)

DURVAL DOURADO NETO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

Tese apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz
de Queiroz", da Universidade de
São Paulo, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia,
Área de Concentração: Solos e
Nutrição de Plantas.

Piracicaba
Estado de São Paulo - Brasil
Outubro - 1992

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Dourado Neto, Durval
D739p Previsão do rendimento da cultura de feijão (Phaseolus
vulgaris L.). Piracicaba, 1992.
124p. ilus.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Feijão - Rendimento - Previsão 2. Modelo matemático
3. Relação solo-planta-atmosfera I. Escola Superior de A
gricoltura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 635.652
518.8

PREVISÃO DO RENDIMENTO DA CULTURA DE FEIJÃO
(*Phaseolus vulgaris* L.)

DURVAL DOURADO NETO

Aprovada em: 30.10.1992

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi	ESALQ/USP
Prof. Dr. Sérgio Oliveira Moraes	ESALQ/USP
Dr. Otávio Camargo	IAC
Prof. Dr. Eloy Antônio Pauletto	UFPeI
Dr. Hermano Vaz Arruda	IAC

Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI
Orientador

Ao meu pai,
Dr. Adahilton Dourado,
Ao meu irmão,
Engenheiro Agrônomo Adahilton Dourado Júnior,
e ao Professor e amigo,
Dr. Paulo Leonel Libardi,

DEDICO.

À minha esposa,
Valéria Nóbrega Dourado,
aos nossos filhos,
Manuella Nóbrega Dourado,
Mateus Nóbrega Dourado
e Mário Vítor Nóbrega Dourado,
e aos nossos pais,
Adahilton Dourado
e Maria Amélia Brandão Dourado,
e Mário Nóbrega de Araújo (*in memoriam*)
e Aída Pereira de Araújo,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos às pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste trabalho:

- . Ao Professor Dr. Paulo Leonel Libardi pela orientação;
- . Ao Dr. Eliseu Roberto de Andrade Alves e aos Professores Dr. Rubens Scárdua, Dr. Júlio Marcos Filho e Silvio Moure Cicero pelo apoio oferecido;
- . Ao Prof. Dr. Sérgio Oliveira Moraes, à Engenheira Agrônoma Rita Carla Boeira e ao Engenheiro Agrônomo Quirijn de Jong van Lier pela colaboração;
- . Ao Dr. Otávio Camargo pelas análises químicas das amostras do solo;
- . Ao Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi pela cessão de microcomputador;
- . À bibliotecária Eliana Maria Garcia Sabino pela conferência do item REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS;
- . Aos Departamentos de Física e Meteorologia, de Ciência do Solo e de Agricultura da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo;
- . e a todos aqueles que contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade.

SUMÁRIO

	página
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxv
RESUMO.....	xxxii
SUMMARY.....	xxxiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método do Tanque Classe A (United States Weather Bureau)	2
2.2. Estimativa da evapotranspiração ótima da cul- tura de interesse.....	2
2.3. Capacidade de campo.....	5
2.4. Ponto de murchamento permanente.....	6
2.5. Profundidade efetiva do sistema radicular....	6
2.6. Capacidade de água disponível.....	10
2.7. Fator de água disponível.....	11
2.8. Balanço hídrico para previsão da armazenagem de água disponível segundo metodologia proposta por THORNTHWAITE & MATHER (1955)....	14
2.8.1. Hipótese básica.....	14
2.8.2. Estimativa de evapotranspiração de re- ferência.....	15
2.8.3. Critérios para iniciar o balanço hí- drico	16
2.9. Modificações da metodologia proposta por THORNTHWAITE & MATHER (1955)	20
2.9.1. Hipótese básica.....	20
2.9.2. Estimativa da armazenagem da água no solo.....	20

2.10. Cálculo do potencial mátrico através de tensiômetro.....	21
2.11. Curva de retenção de água no solo.....	22
2.12. Desenvolvimento relativo	24
2.13. Condições químicas do solo favoráveis ao feijoeiro.....	25
2.14. Estimativa de rendimento.....	26
2.15. Estimativa de rendimento potencial.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1. Local.....	30
3.2. Delineamento experimental.....	30
3.3. Cultura agrícola.....	30
3.4. Modelo proposto.....	31
3.4.1. Evapotranspiração ótima da cultura, fator de água disponível e ponto de maturidade fisiológica.....	39
3.4.2. Valores iniciais da armazenagem e ne- gativo acumulado.....	48
3.4.3. Profundidade efetiva do sistema radi- cular.....	54
3.5. Aferição do modelo.....	56
3.6. Fator empírico adimensional referente aos atributos químicos do solo.....	64
3.7. Evapotranspiração real e déficit hídrico.....	67
3.8. Rendimento da cultura de feijão.....	67
3.9. Critérios adotados.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4.1. Produtividade e rendimento.....	74
4.2. O modelo universal.....	78
4.2.1. Redução do rendimento devido à limita- ção de água.....	78

4.2.2. Redução do rendimento devido à limitação química.....	78
4.2.3. O terceiro e o quarto estádios de desenvolvimento.....	79
4.2.4. O quinto estágio de desenvolvimento...	79
4.2.5. Estimativa da armazenagem da água: modelo co-senoidal.....	80
4.2.6. Primeira aferição do modelo universal.	84
4.2.6.1. Parâmetros da equação de GENUCHTEN (1980).....	84
4.2.6.2. Verificação da estimativa da armazenagem.....	90
4.2.7. Segunda aferição do modelo universal..	95
4.3. Aferição do método apresentado por DOORENBOS et al. (1979).....	101
4.4. Modelo específico.....	106
4.5. Época de colheita.....	111
4.6. Limitações do modelo universal.....	112
4.6.1. Capacidade de campo.....	112
4.6.2. Fator de água disponível.....	113
4.6.3. Outras limitações.....	114
4.7. Considerações finais.....	115
5. CONCLUSÃO.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

LISTA DE FIGURAS

página

- Figura 1 - Variação do coeficiente de cultura em função dos estádios de desenvolvimento segundo as equações (3) a (7) (Tabela 1).. 3
- Figura 2 - Variação da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e), ao longo do ciclo de uma cultura anual qualquer, da semeadura ($t=0$) ao ponto de maturidade fisiológica ($t=t_{pmf}$) (DRIESSEN, 1986)..... 7
- Figura 3 - Variação da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e), ao longo do ciclo de uma cultura anual qualquer, com as diferentes curvas de crescimento do sistema radicular: (1) sigmoidal ($F=0,5$); (2) sigmoidal ($F=1,0$); (3) sigmoidal ($F=2,0$); (4) potencial ($F=0,5$); (5) linear ($F=1,0$), da semeadura (S) à colheita (C), passando pelo ponto de maturidade fisiológica (F) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991)..... 9
- Figura 4 - Variação da evapotranspiração da cultura em função da armazenagem de água disponível (Arm) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992c)..... 12
- Figura 5 - Fluxograma para determinação da armazenagem crítica (Arm_{crit})..... 14

- Figura 6 - Esquema geral do modelo proposto (modelo universal) para previsão do rendimento e da época de colheita, em função dos dados apresentados na Tabela 3..... 32
- Figura 7 - Fluxograma para a determinação da evapotranspiração ótima da cultura, do fator de água disponível crítico e do ponto de maturidade fisiológica (ver itens 2.1., 2.2., 2.7. e 2.12)..... 47
- Figura 8 - Fluxograma para determinação do valor inicial (dia da semeadura) do negativo acumulado por unidade de capacidade de água disponível, na k-ésima parcela experimental utilizando modificação proposta por DOURADO NETO et al. (1991) para iniciar o balanço hídrico pelo método THORNTHWAITE & MATHER (1955) (ver item 2.8.3.)..... 49
- Figura 9 - Fluxograma para determinação da armazenagem e negativo acumulado, segundo equações propostas por THORNTHWAITE & MATHER (1955), na k-ésima parcela experimental (ver item 2.8.3.) utilizando critério de iniciar o balanço hídrico proposto por DOURADO NETO et al. (1991)..... 50

- Figura 10 - Fluxograma para estimativa de α , m , n , θ_s e θ_r da equação de GENUCHTEN (1980) de acordo com o item 2.11..... 51
- Figura 11 - Fluxograma para determinação dos valores iniciais (dia da semeadura) da armazenagem ($Arm_{o,k}$) e do negativo acumulado ($L_{o,k}$), na k -ésima parcela experimental, utilizando a modificação proposta por DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1991) na equação da hipótese básica do método de THORNTHWAITE & MATHER (1955) (ver item 2.9)..... 52
- Figura 12 - Fluxograma para determinação dos valores da armazenagem e do negativo acumulado no j -ésimo dia após a semeadura na k -ésima parcela experimental, utilizando a modificação de DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1992c) do método de THORNTHWAITE & MATHER (1955) (ver item 2.9)..... 53
- Figura 13 - Fluxograma referente ao procedimento de determinação da profundidade efetiva do sistema radicular no j -ésimo dias após a semeadura na k -ésima parcela experimental ($Z_{e,j,k}$) (ver item 2.5.)..... 55

- Figura 14 - Fluxograma referente à comparação (primeira aferição do modelo) entre os valores de umidade, à base de volume, estimados através do balanço hídrico ($\theta_{j,k}$) e os determinados a através de tensiômetro e curva de retenção ($\theta_{j,k}$)... 57
- Figura 15 - Fluxograma para a determinação do fator de correção dos atributos químicos do solo..... 66
- Figura 16 - Fluxograma para determinação do déficit hídrico ($DH_{j,k}$) no j-ésimo dia após a semeadura na k-ésima parcela experimental pelo método de THORNTHWAITE & MATHER (1955)..... 67
- Figura 17 - Fluxograma para estimativa do rendimento relativo da cultura de feijão, e segunda aferição do modelo universal de previsão do rendimento..... 70
- Figura 18 - Fluxograma para estimativa do rendimento relativo da cultura de feijão, e segunda aferição do modelo específico de previsão de rendimento..... 71

Figura 19 - Representação esquemática: da produtividade (1); do rendimento potencial (2); do rendimento com limitação climática e de água (3); do rendimento com limitação climática, hídrica e de nutrientes (4); do rendimento máximo econômico (5); do rendimento atual com custo excessivo (6); do rendimento atual com deficiência de nível de manejo (7); e do rendimento ótimo (8).....	77
Figura 20 - Relações propostas entre a evapotranspiração relativa e armazenagem segundo diferentes autores: (1) Veihmeyer e Hendrickson; (2) Thornthwaite & Mather; (3) Havens; (4) Pierce; (5) Penman, Marlatt et al. e Holmes & Robertson (Tanner, 1967 citado por BERLATO & MOLION, 1981).....	82
Figura 21 - Transpiração em função da armazenagem e da demanda evapotranspirativa da atmosfera (Chang, 1968 citado por BERLATO & MOLION, 1981).....	83

Figura 22 - Primeira aferição do modelo universal: teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimentalmente, nas 250 parcelas experimentais nas diferentes datas de leitura através de tensiômetros e curva de retenção, estimando a armazenagem de água no solo pelo modelo co-senoidal, adotando crescimento do sistema radicular, nos três primeiros estádios, do tipo sigmoidal ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992a)..... 92

Figura 23 - Primeira aferição do modelo universal: teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimentalmente, nas 250 parcelas experimentais nas diferentes datas de leitura através de tensiômetros e curva de retenção, estimando a armazenagem de água no solo pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1975), adotando crescimento do sistema radicular, nos três primeiros estádios, do tipo sigmoidal ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992a)..... 93

- Figura 24 - Primeira aferição do modelo universal: Teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimentalmente, nas 250 parcelas experimentais nas diferentes datas de leitura através de tensiômetros e curva de retenção, estimando a armazenagem de água no solo pelo modelo de THORNTHWAITE & MATHER (1955), adotando crescimento do sistema radicular, nos três primeiros estádios, do tipo sigmoidal ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992a)..... 94
- Figura 25 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo universal versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$), sendo a armazenagem estimada pelo modelo co-senoidal (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992a)..... 97
- Figura 26 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo universal versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992a), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979)..... 98

- Figura 27 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo universal versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de THORNTHWAITE & MATHER (1955)..... 99
- Figura 28 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo apresentado por DOORENBOS et al. (1979), considerando um único valor de K_y para todo o ciclo, versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979)..... 104
- Figura 29 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo apresentado por DOORENBOS et al. (1979), considerando um valor de K_y para cada estádio de desenvolvimento, versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979)..... 105

LISTA DE TABELAS

página

Tabela 1 - Coeficiente de cultura (K_c) e duração (dias) dos estádios de desenvolvimento do feijoeiro (DOORENBOS et al., 1979).....	4
Tabela 2 - Índice de área foliar máximo (IAFm), número de dias para atingir o ponto de maturidade fisiológica (t_{pmf} , dias), duração do ciclo (D_c , dias), número de cultivares (n), rendimento obtido (Y_a , kg/ha) e rendimento potencial (Y_{potm} , kg/ha) da cultura de feijão.....	28
Tabela 3 - Dados necessários ao modelo proposto (Modelo Universal).....	33
Tabela 4 - Atributos químicos do solo nas 250 parcelas experimentais. FONTE: Seção de Pedologia do Instituto Agronômico de Campinas (IAC).....	34
Tabela 5 - Coeficientes de cultura, K_c (DOORENBOS et al., 1979); tempos de duração dos estádios fenológicos (t_e , dias) e do ciclo total (D_c , dias); e temperaturas basal (T_b , °C) e máxima (T_{max} , °C), para a cultura de feijão, utilizados no modelo.....	40

Tabela 6 - Temperatura média diária do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), chuva (C , mm), evaporação do Tanque Classe A (ECA, mm), velocidade do vento (v , km/dia) e umidade relativa (UR, %) do ano de 1988, da região de Piracicaba, SP. FONTE: Posto Agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Universidade de São Paulo).....	41
Tabela 7 - Critérios utilizados para estimar os valo- res iniciais de armazenagem e negativo acumulado.....	48
Tabela 8 - Número de ordem dos 22 períodos (5 dias/período) considerados durante o ciclo da cultura de feijão.....	56
Tabela 9 - Umidade, à base de volume, nos diferentes pontos experimentais das 250 curvas de retenção elaboradas por MORAES (1991).....	58
Tabela 10 - Datas das 77 leituras dos 250 tensiôme- tros para o cálculo do potencial mátrico nos 5 estádios (E) de desenvolvimento da cultura de feijão.....	63
Tabela 11 - Fatores multiplicativos de déficit (x) e excedente hídrico (λ) utilizados no modelo nos diferentes estádios de desenvolvimento do feijoeiro.....	69

Tabela 12 - Valores mínimo (L_0) e máximo (L_1) utilizados para o cálculo do fator incrementador-redutor referente ao pH, à quantidade relativa de bases (V), ao teor de carbono (C, %), à quantidade relativa de alumínio (m), à relação cálcio-CTC (ω), à relação cálcio-magnésio, à relação cálcio-potássio, e à quantidade relativa de aplicação de nitrogênio (η) referente à quantidade aplicada e requerida pelo feijoeiro.....	72
Tabela 13 - Critérios utilizados referentes ao solo..	73
Tabela 14 - Estimativa do rendimento potencial de grãos (Y_{pot} , kg/ha), pelo método de De Wit (1965) (DOORENBOS et al., 1979; BARBIERI & TUON, 1992), referente à cultura de feijão, cultivar Carioca, semeado em 2 de maio de 1988 e colhido em 16 de agosto de 1988, em Piracicaba, SP (latitude sul: 22°43').....	75
Tabela 15 - Parâmetros da equação de GENUCHTEN (1980) para as 250 curvas de retenção utilizadas.....	85

Tabela 16 - Primeira aferição do modelo universal: teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimental- mente através de tensiômetros e curva de retenção, para os diferentes modelos de estimativa de armazenagem e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).....	91
--	----

Tabela 17 - Verificação da correlação entre o rendi- mento estimado (t/ha) pelo modelo universal (considerando cinco estádios de desenvolvimento) e o rendimento medido (t/ha), contemplando o déficit hídrico, o excedente hídrico e o fator químico, para três métodos de estimativa da armazenagem (Arm) da água no solo, C: co-senoidal (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992); F: Rijtema & Abouckhaled (1975) e T: THORNTHWAITE & MATHER (1955), e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).....	100
--	-----

Tabela 18 - Verificação da correlação entre o rendimento estimado (t/ha) pelo método apresentado por DOORENBOS et al. (1979) (apenas um parâmetro para todo o ciclo) e o rendimento medido (t/ha), contemplando o déficit hídrico para três métodos de estimativa da armazenagem (Arm) de água no solo, C: co-senoidal (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992); F: DOORENBOS et al. (1979) e T: THORNTHWAITE & MATHER (1955), e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986)..... 102

Tabela 19 - Verificação da correlação entre o rendimento estimado (t/ha) pelo método apresentado por DOORENBOS et al. (1979) (considerando 4 estádios) e o rendimento medido (t/ha), contemplando o déficit hídrico, para três métodos de estimativa da armazenagem (Arm) de água no solo, C: co-senoidal (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992); F: DOORENBOS et al. (1979) e T: THORNTHWAITE & MATHER (1955), e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986)..... 103

Tabela 20 - Constantes de rendimento (Kr) relativas ao excedente hídrico, considerando cinco estádios de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (met: C=CO-SENOIDAL, F=Rijtema & Aboukhaled e T=THORNTHWAITE) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).....	107
--	-----

Tabela 21 - Constantes de rendimento (Kr) relativas ao déficit hídrico, considerando cinco estádios de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (met: C=CO-SENOIDAL, F=Rijtema & Aboukhaled e T=THORNTHWAITE) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).....	108
--	-----

Tabela 22 - Coeficiente de correlação (r) e valor F referentes à estimativa das constantes de rendimento (Kr) relativas ao déficit e excedente hídrico, considerando cinco estádios de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (met) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=2); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986), alusivos ao método específico.....	109
---	-----

Tabela 23 - Coeficiente de correlação (r), valor F e constantes de rendimento (Kr) relativos ao déficit e excedente hídrico, considerando quatro estádios (Es) de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (m: C=CO-SENOIDAL, F=Rijtema & Aboukhaled e T=THORNTHWAITE) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986), alusivos ao método específico.....	110
--	-----

Tabela 24 - Dados relativos ao modelo de DRIESSEN (1986) para previsão da época de colheita de feijão.....	111
--	-----

Tabela 25 - Relação dos atributos do sistema agrícola utilizáveis no modelo universal com possibilidade de interferência do ho- mem.....	114
---	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

a: Variável auxiliar;

a_0, a_1, a_2 e a_9 : Coeficientes empíricos referentes à equação de estimativa do índice térmico anual segundo THORNTHWAITE (1948);

Al: Teor de alumínio (Al^{3+} , eqmg/100g);

Amax: Variável auxiliar ao cálculo dos valores extremos de umidade;

Amin: Variável auxiliar ao cálculo dos valores extremos de umidade;

Arm: Armazenagem de água disponível no solo (mm);

Armrit: Armazenagem crítica de água disponível no solo (mm);

C: Chuva (mm.período⁻¹);

Ca: Teor de cálcio (Ca^{2+} , eqmg/100g);

c.a.: Coeficiente de ajuste;

cca: Centímetros de coluna de água (unidade de energia específica);

CTC: Capacidade de troca catiônica a pH neutro (pH = 7) (eqmg/100g);

$\bar{d}$: Diâmetro médio do tubo de náilon do manômetro do tensiômetro (cm);

$\bar{D}$: Diâmetro médio da cuba de vidro do manômetro do tensiômetro (cm);

dB/dt: Lâmina de água evapotranspirada por unidade de tempo (mm.período⁻¹);

Dc: Duração do ciclo da cultura de feijão (dias);

Dr_n : Desenvolvimento relativo acumulado da cultura até o n-ésimo período após a semeadura ($0 \leq Dr_n \leq 1$);

DH: Déficit hídrico (mm.período⁻¹);

e: Índice referente ao número de ordem do estágio de desenvolvimento da cultura de feijão ($e \in \mathbb{N} / 1 \leq e \leq 5$);

- ECA: Evaporação do Tanque Classe A (mm.período^{-1});
- EH: Excedente hídrico (mm.período^{-1});
- ET: Evapotranspiração real da cultura de feijão (mm.período^{-1});
- ETo: Evapotranspiração da cultura de referência (*Paspalum notatum* L.) (mm.período^{-1});
- ETm: Evapotranspiração ótima da cultura de feijão correspondente ao seu rendimento máximo (mm.período^{-1});
- F: Fator incrementador-redutor relativo ao x -ésimo atributo químico do solo na k -ésima parcela experimental;
- FDef: Fator referente ao déficit hídrico;
- FExc: Fator de excedente hídrico;
- FTer: Fator térmico indicativo do grau de desenvolvimento relativo da cultura;
- fr: Fator de rendimento da cultura dependente dos atributos químicos do solo ($fr \in \mathbb{R} / 0 \leq fr \leq 1$);
- frad: Fator de forma do sistema radicular do feijoeiro;
- Hn: Número máximo possível de horas de brilho solar no dia mediano do n -ésimo período considerado (horas);
- h: Altura de mercúrio lida no manômetro do tensiômetro (cm);
- hc: Altura da cuba do tensiômetro referente (distância entre a superfície do solo e a superfície livre de mercúrio dentro da cuba de vidro) (cm);
- I: Índice de calor anual segundo THORNTHWAITE (1948);
- I: Lâmina de irrigação (mm.período^{-1});
- IAFm: Índice de área foliar máximo ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$);
- lt: Índice térmico da cultura dado pelo somatório das temperaturas médias acima da temperatura basal durante o ciclo da cultura de interesse (semeadura-ponto de maturidade fisiológica) ($^{\circ}\text{C.dia}$);
- j: Índice relativo ao número de ordem do número de períodos após a semeadura ($j \in \mathbb{N}$);

- k: Índice relativo ao número de ordem da parcela experimental;
- K: Teor de potássio (K^+ , eqmg/100g);
- K: Fator de correção para estimativa do fator de excedente hídrico;
- K_c : Coeficiente de cultura no e-ésimo estágio de desenvolvimento (DOORENBOS et al., 1979);
- K_p : Coeficiente do Tanque U.S.W.B. Classe A referente ao j-ésimo período após a semeadura;
- Kr^D e Kr^E : Fatores de rendimento relativo referentes ao déficit hídrico e ao excedente hídrico, respectivamente;
- K_y : Coeficiente de rendimento;
- $\bar{I}$: Lâmina de água que fica sobre o mercúrio, dentro da cuba de vidro, após a fluxagem (cm);
- Lo e Li : Limites inferior e superior da faixa ótima à cultura de feijão do atributo químico considerado;
- L: Perda ou ganho de água referente à diferença entre chuva, irrigação e evapotranspiração ($mm.período^{-1}$);
- m: Parâmetro empírico do modelo de GENUCHTEN (1980) estimado através de análise de regressão não linear;
- m: Quantidade relativa de alumínio (m);
- Mg: Teor de magnésio (Mg^{2+} , eqmg/100g);
- N: Soma de todos os saldos de água (S) negativos referentes à estação seca ($mm.período^{-1}$);
- n: Parâmetro empírico do modelo de GENUCHTEN (1980) estimado através de análise de regressão não linear;
- N_n : Número de dias do n-ésimo período considerado;
- N_{apl} : Quantidade aplicada de nitrogênio ($kg.ha^{-1}$);
- N_{req} : Quantidade requerida de nitrogênio pelo feijoeiro para um rendimento desejado ($kg.ha^{-1}$);

- P: Soma de todos os saldos positivos referentes à estação úmida (mm.período^{-1});
- p_{crit} : Fator de água disponível;
- Pfe: Produtório dos excedentes hídricos nos decêndios correspondentes ao início do florescimento até o início da maturação;
- ReCaK: Relação cálcio-potássio;
- ReCaMg: Relação cálcio-magnésio;
- Rr: Rendimento relativo estimado da cultura em porcentagem ($0 \leq Rr(\%) \leq 100$);
- S: Saldo de água dado pela diferença entre a precipitação (chuva e irrigação) e a evapotranspiração real (mm.período^{-1});
- $SF_{z,q,k}$: Sub-fator de correção referente ao sétimo fator incrementador-redutor da q-ésima variável;
- Sgd: Somatório das temperaturas acima da temperatura basal para cada época de semeadura específica durante o ciclo da cultura de interesse ($^{\circ}\text{C.dia}$);
- SQReg: Soma dos quadrados da regressão;
- SQTot: Soma dos quadrados totais;
- T: Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);
- T_b : Temperatura basal da cultura ($^{\circ}\text{C}$);
- t_e : Número de dias de duração do e-ésimo estágio de desenvolvimento da cultura de feijão ($t_e \in \mathbb{N}^*$);
- T_m : Temperatura máxima referente à cultura de feijão, acima da qual a fotossíntese líquida se torna negativa ($^{\circ}\text{C}$);
- t_{pmf} : Número de dias após a semeadura correspondente ao ponto de maturidade fisiológica ($t_{pmf} \in \mathbb{N}^*$);
- v: Velocidade do vento (km.dia^{-1});
- V: Quantidade relativa de bases;
- x: Índice relativo ao número de ordem do atributo químico considerado;

- x: Negativo acumulado por unidade de capacidade de água disponível no último período da estação úmida considerada;
- $X_{x,k}$: x-ésimo atributo químico na k-ésima parcela experimental;
- $X_{7,q,k}$: q-ésima variável, referente ao sétimo fator incrementador-redutor, na k-ésima parcela experimental ($X_{7,1,k} = \text{ReCaMg}$ e $X_{7,2,k} = \text{ReCaK}$);
- Y: Capacidade de água disponível (mm);
- Y_a : Rendimento obtido referente à cultura de feijão ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- Y_{est} : Rendimento estimado da cultura ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- Y_{pot} : Rendimento potencial com limitação climática (energia radiante) da cultura de feijão ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- Z: Profundidade de instalação do tensiômetro referente à distância entre a superfície do solo e o centro geométrico da cápsula porosa de cerâmica na k-ésima parcela experimental (cm);
- $Z_{e_{ini}}$: Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura de feijão, no período que contém o dia da semeadura na k-ésima parcela experimental (cm);
- $Z_{e_{max}}$: Profundidade efetiva máxima do sistema radicular da cultura de feijão na k-ésima parcela experimental (cm);
- Z_e : Profundidade efetiva do sistema radicular;
- $Z_{r_{max}}$: Profundidade real (cm) máxima do sistema radicular da cultura de feijão (cm);
- α : Parâmetro empírico estimado através de análise de regressão não linear, utilizando o modelo de GENUCHTEN (1980) (cca^{-1});
- α_t : Porosidade total do solo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);
- $\beta_{ótima}$: Porosidade livre de água ótima para a cultura de interesse referente à k-ésima parcela experimental ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

xxx.

- η : Relação nitrogênio aplicado-nitrogênio requerido;
- θ : Umidade, à base de volume ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- $\bar{\theta}$: Umidade média, à base de volume (para cada curva de retenção) ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_{cc} : Capacidade de campo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_{crit} : Umidade, à base de volume, correspondente ao potencial mátrico (cca) crítico ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_{inf} : Umidade, à base de volume, correspondente ao ponto de inflexão da curva de retenção, assumindo o modelo de GENUCHTEN (1980), utilizando dados transformados adotando-se como variável dependente o logaritmo do módulo do potencial mátrico referente à k-ésima parcela experimental ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_m : Umidade de manejo, à base de volume ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_{max} : Maior valor de umidade, à base de volume, determinado experimentalmente ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_{min} : Menor valor de umidade, à base de volume, determinado experimentalmente ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_{pmp} : Umidade, à base de volume, correspondente ao potencial mátrico de -15.000 cca, assumida como a referente ao ponto de murchamento permanente ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_r : Umidade residual, à base de volume, do modelo de GENUCHTEN (1980) ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- θ_s : Umidade, à base de volume, correspondente ao solo saturado em condições de campo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$);
- λ : Fator multiplicativo de excedente hídrico;
- ξ_n : Declinação solar no n-ésimo período considerado segundo equação mencionada por PALTRIDGE & PLATT (1976);
- ρ_a : Massa específica da água a uma dada temperatura (g.cm^{-3});
- ρ_m : Massa específica do mercúrio a uma dada temperatura (g.cm^{-3});

ϕ : Latitude local (radianos);
 κ : Fator multiplicativo de déficit hídrico;
 ψ_m : Potencial mátrico (cca);
 ω : Relação cálcio-CTC.

PREVISÃO DO RENDIMENTO DA CULTURA DE FEIJÃO
(*Phaseolus vulgaris* L.)

Autor: DURVAL DOURADO NETO

Orientador: Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

RESUMO

Com o objetivo de apresentar uma metodologia de previsão do rendimento para a cultura de feijão, desenvolveu-se um modelo universal onde são considerados o solo, a planta e a atmosfera conjuntamente. Para sua utilização é necessário conhecer capacidade de campo, ponto de murchamento permanente, profundidade efetiva do sistema radicular, análise química do solo, duração dos estádios de desenvolvimento e coeficiente de cultura, índice de área foliar, latitude, insolação, temperatura média do ar, umidade relativa, velocidade do vento e evaporação do Tanque Classe A. Foram estimados os déficits e os excedentes hídricos utilizando o procedimento para realização do balanço hídrico proposto por Thornthwaite & Mather, considerando a profundidade efetiva do sistema radicular variando segundo três tipos básicos de curva de crescimento: sigmoidal (com três variações), potencial e linear, além de estimar a armazenagem por três diferentes procedimentos. Verificou-se, em função dos resultados de estimativa do teor de água e do rendimento da cultura de feijão, que não houve diferença entre os métodos utilizados. Constatou-se que a não consideração do efeito dos atributos químicos do solo leva à superestimativa de rendimento. Concluiu-se que o modelo universal é utilizável para o que foi proposto.

PREDICTION OF YIELD OF COMMON BEAN (*Phaseolus vulgaris* L.)

Author: DURVAL DOURADO NETO

Adviser: Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

SUMMARY

With the purpose to present a model for the prediction of yield of common bean, a universal model was developed in which the different phases of the agricultural system (soil-plant-atmosphere) are considered. The following input data are requested by the model: field capacity, permanent wilting point, effective rooting depth, data from chemical soil analysis, duration of the development stages, crop coefficient, leaf area index, latitude, insolation, mean air temperature, relative humidity, wind speed and Class A pan evaporation. The water deficits and excesses were estimated using the procedure for the calculation of the water balance proposed by Thornthwaite & Mather, considering that root growth occurs following three basic types of curves: a sigmoid (with three variations), a potential and a linear equation, the soil water storage being estimated by three different methods. Considering the results of the soil water and the bean yield estimates, it was verified that there was no difference between the methods. It was observed that non-consideration of the effect of the chemical attributes relative to the soil leads to a yield superestimation. It was concluded that the universal model is applicable for its purpose.

1. INTRODUÇÃO

A elaboração de modelos determinísticos com o objetivo específico de prever o comportamento de um determinado fenômeno de interesse é de importância primordial na pesquisa. Para tanto, é necessário conhecer como se relacionam as causas dos atributos intrínsecos do sistema em estudo, a fim de que ele seja bem caracterizado. A luz dos conhecimentos atuais, entretanto, não é possível obter modelos determinísticos para a previsão do rendimento exato de quaisquer culturas agrícolas.

Por outro lado, no planejamento de uma empresa agrícola é fundamental que se conheçam previamente a época de colheita em função da data de semeadura, e o rendimento em função do nível tecnológico adotado e das peculiaridades do sistema agrícola.

O presente trabalho tem por hipóteses básicas de que o rendimento da cultura de feijão é previsível em função do conhecimento de alguns atributos do sistema solo-planta-atmosfera (análise química do solo, capacidade de campo, ponto de murchamento permanente, profundidade efetiva inicial e máxima do sistema radicular, duração dos estádios de desenvolvimento e os respectivos valores dos coeficientes da cultura de feijão, índice de área foliar, latitude, insolação, umidade relativa, velocidade do vento e evaporação do Tanque Classe A) e do comportamento de alguns processos macroscópicos que nele ocorrem (relação funcional entre armazenagem de água no solo e negativo acumulado, variação temporal da profundidade efetiva do sistema radicular e do coeficiente de cultura).

Com base nessas informações é que se desenvolveu o presente trabalho com o objetivo de elaborar um modelo para estimar o rendimento especificamente para a cultura de feijão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método do Tanque Classe A (United States Weather Bureau)

A evapotranspiração (ET_o , mm.período⁻¹) da cultura de referência, grama batatais (*Paspalum notatum* L.), é estimada, pelo método do Tanque Classe A, pela seguinte expressão (DOORENBOS & PRUITT, 1975):

$$ET_o = K_p.ECA \quad (1)$$

onde K_p é o coeficiente do Tanque Classe A (DOORENBOS & PRUITT, 1975), e ECA é a evaporação (mm.período⁻¹) medida diariamente nesse Tanque.

SEDIYAMA (1988) afirma que o Tanque Classe A oferece uma estimativa bastante representativa da evapotranspiração de referência para períodos de dez dias, desde que sejam selecionados valores de coeficiente de Tanque Classe A apropriados.

Segundo OMETTO (1981), as correlações entre evaporação do Tanque Classe A e evapotranspiração real são melhores quando se utiliza um período mínimo de confronto de cinco dias.

2.2. Estimativa da evapotranspiração ótima da cultura de interesse

A evapotranspiração ótima da cultura de interesse (ET_m , mm.período⁻¹) pode ser estimada, utilizando o coeficiente de cultura (K_c) proposto por Van Wijk & de Vries (SEDIYAMA, 1988), por:

$$ET_m = K_c.ET_o \quad (2)$$

Esse coeficiente é dependente do estágio fenológico de desenvolvimento da cultura conforme se pode ver na Tabela 1 que apresenta seus valores para a cultura de feijão.

A partir das equações (3) a (7), pode-se elaborar um gráfico ilustrando a variação temporal de K_c durante o ciclo da cultura, o qual pode ser visto para a cultura de feijão, numa condição de baixa umidade relativa e vento forte, na Figura 1.

Figura 1 - Variação do coeficiente de cultura em função dos estádios de desenvolvimento segundo as equações (3) a (7) (Tabela 1).

Tabela 1 - Coeficiente de cultura (K_c) e duração (dias) dos estádios de desenvolvimento do feijoeiro (DOORENBOS et al., 1979).

Est	Desenvolvimento relativo	Coeficiente de cultura (Eq)				
1	emergência a 10% do desenvolvimento vegetativo (DV)	$K_{c_j} = K_{c_1} \quad (0 \leq j < t_1) \quad (3)$				
2	10% do DV a 80% do DV	$K_{c_j} = \frac{K_{c_2} - K_{c_1}}{t_2} (j - t_1) + K_{c_1} \quad (4)$ $\left[t_1 \leq j < \sum_{o=1}^2 t_o \right]$				
3	80% do DV ao florescimento	$K_{c_j} = K_{c_2} \left[\sum_{o=1}^2 t_o \leq j < \sum_{o=1}^3 t_o \right] \quad (5)$				
4	florescimento ao ponto de maturidade fisiológica	$K_{c_j} = \frac{K_{c_4} - K_{c_2}}{t_4} (j - \sum_{o=1}^3 t_o) + K_{c_2} \quad (6)$ $\left[\sum_{o=1}^3 t_o \leq j < \sum_{o=1}^4 t_o \right]$				
5	ponto de maturidade fisiológica à colheita	$K_{c_j} = K_{c_4} \left[\sum_{o=1}^4 t_o \leq j \leq \sum_{o=1}^5 t_o \right] \quad (7)$				
estádio de desenvolvimento		duração (dias) dos estádios				
K_{c_1}	K_{c_2}	K_{c_4}	t_1	t_2	t_3	t_4
0,30 ^a -0,40 ^b	1,05-1,20	0,25-0,30	15-20	15-20	35-45	20-25

a. Primeiro número: sob alta umidade relativa (superior a 70%) e vento fraco (inferior a 432 km/dia).

b. Segundo número: sob baixa umidade relativa (inferior a 20%) e vento forte (superior a 5 m/s).

t_1 Duração do primeiro estágio de desenvolvimento (dias);

t_2 Duração do segundo estágio de desenvolvimento (dias);

t_3 Duração do terceiro estágio de desenvolvimento (dias);

t_4 Duração do quarto estágio de desenvolvimento (dias);

t_5 Duração do quinto estágio de desenvolvimento (dias).

2.3. Capacidade de campo

Esse atributo é utilizado para determinação da capacidade de água disponível no solo, lâmina líquida de irrigação e umidade crítica.

VEIHMEYER & HENDRICKSON (1949), conceituaram capacidade de campo (θ_{cc} , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) como sendo "a quantidade máxima de água que o solo retém contra a ação da gravidade".

Devido à sua grande utilidade prática e ao conceito imensurável de VEIHMEYER & HENDRICKSON (1949), surgiram outros critérios.

Dentre os diversos critérios existentes, os mais usuais são: (i) fixar um potencial mátrico na curva de retenção e adotar o teor de água correspondente como capacidade de campo (usualmente se adotam os seguintes valores de potencial mátrico: -60, -100 ou -300 cca); (ii) determinar o teor de água no campo após sua saturação no exato instante em que a densidade de fluxo de água no solo se torna desprezível; ou (iii) utilizar o valor da umidade correspondente ao ponto de inflexão (θ_{inf} , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) da curva de retenção utilizando como variável dependente o logaritmo do módulo do potencial mátrico (pF) (MARCOS, 1968). DOURADO NETO et al. (1990), adotando o último critério e a equação de ajuste da curva de retenção proposta por GENUCHTEN (1980), deduziram a seguinte expressão para o cálculo de θ_{inf} :

$$\theta_{inf} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{m}{1 + m} \right)^m \quad (8)$$

onde θ_r é a umidade residual ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), θ_s a umidade do solo saturado ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), e m um dos parâmetros empíricos da equação de GENUCHTEN (1980).

2.4. Ponto de murchamento permanente

Tem-se adotado como ponto de murchamento permanente (θ_{pmp} , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) o teor de água correspondente ao potencial mátrico na faixa de -25000 a -5000 cca (BERNARDO, 1982), sendo o valor mais usual -15000 cca.

2.5. Profundidade efetiva do sistema radicular

Assume-se que a profundidade máxima efetiva do sistema radicular (Z_{max} , mm) é uma fração (frad) da profundidade real máxima (Z_{rmax} , mm) do sistema radicular observável em condições de campo, quando a cultura se encontra no quarto estágio de desenvolvimento (DRIESSEN, 1986). Portanto:

$$Z_{\text{max}} = \text{frad} \cdot Z_{\text{rmax}} \quad (9)$$

De acordo com DRIESSEN (1986), a profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e , mm) varia linearmente a partir de um valor inicial ($Z_{e_{\text{ini}}}$, mm) até atingir um valor máximo (Z_{max} , mm) (ver equação 10), o qual ocorre no final do terceiro estágio, permanecendo constante e igual ao valor máximo (ver equação 11) até ser atingido o ponto de maturidade fisiológica (Figura 2):

$$Z_e = Z_{e_{\text{ini}}} + \frac{Z_{\text{max}} - Z_{e_{\text{ini}}}}{\sum_{o=1}^3 t_o} \cdot j; \quad \left(0 \leq j < \sum_{o=1}^3 t_o \right) \quad (10)$$

e

$$Z_e = Z_{\text{max}}; \quad \left(\sum_{o=1}^3 t_o \leq j < t_{\text{pmf}} \right) \quad (11)$$

onde t_{pmf} é o tempo gasto, a partir da sementeira, para que seja atingido o ponto de maturidade fisiológica no final do quarto estágio de desenvolvimento. Segundo esse mesmo autor, no caso específico de feijão, a profundidade máxima efetiva do sistema radicular ($Z_{e_{max}}$, mm) ocorre no instante em que a planta apresenta o máximo valor de índice de área foliar, $Z_{e_{ini}}$ oscila entre 7 e 10 cm e $Z_{r_{max}}$ entre 90 e 150 cm. HALTERLEIN (1983) também apresenta a faixa de 90 a 150 cm para $Z_{r_{max}}$.

Figura 2 - Variação da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e), ao longo do ciclo de uma cultura anual qualquer, da sementeira ($t=0$) ao ponto de maturidade fisiológica ($t=t_{pmf}$) (DRIESSEN, 1986).

DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1991) sugerem modificações na expressão de cálculo proposta por DRIESSEN (1986) para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e , mm). Segundo esses autores, durante os três primeiros estádios de desenvolvimento, a profundidade efetiva do sistema radicular pode crescer linearmente (DRIESSEN, 1986), potencialmente ou sigmoidalmente (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991) a partir de um valor inicial até atingir um valor máximo, o qual ocorre no final do terceiro estádio, permanecendo constante e igual ao valor máximo até ser atingido o ponto de maturidade fisiológica no final do quarto estádio; no quinto estádio, a profundidade efetiva do sistema radicular pode decrescer também linearmente, potencialmente ou sigmoidalmente, o que DRIESSEN (1986) não previu, a partir do valor máximo até atingir novamente o valor inicial (Figura 3). As equações sugeridas para as curvas linear ($F=1$) e potencial são a equação (12), para os estádios I, II e III, e a equação (14), para o estádio V. A equação (13) refere-se ao valor constante de Z_e durante o estádio IV:

$$Z_e = Z_{e_{ini}} + (Z_{e_{max}} - Z_{e_{ini}}) \cdot \left[\frac{j}{\sum_{e=1}^3 t_e} \right]^F ; \left(0 \leq j < \sum_{e=1}^3 t_e \right) \quad (12)$$

$$Z_e = Z_{e_{max}} ; \left(\sum_{e=1}^3 t_e \leq j < t_{pmf} \right) \text{ (pois } t_{pmf} = \sum_{e=1}^4 t_e \text{)} \quad (13)$$

$$Z_e = Z_{e_{max}} + (Z_{e_{ini}} - Z_{e_{max}}) \cdot \left[\frac{j - t_{pmf}}{\sum_{e=1}^5 t_e - t_{pmf}} \right]^F ; \left(t_{pmf} \leq j < \sum_{e=1}^5 t_e \right) \quad (14)$$

O expoente F nessas equações refere-se ao fator de forma da

curva de crescimento do sistema radicular. Se $F=1$, o sistema radicular cresce e decresce segundo uma função linear com o tempo (número de dias após a semeadura ou o plantio). Quando $0 < F < 1$ o sistema radicular cresce e decresce segundo uma função potencial com o tempo.

Figura 3 - Variação da profundidade efetiva do sistema radicular (Ze), ao longo do ciclo de uma cultura anual qualquer, com as diferentes curvas de crescimento do sistema radicular: (1) sigmoide ($F=0,5$); (2) sigmoide ($F=1,0$); (3) sigmoide ($F=2,0$); (4) potencial ($F=0,5$); (5) linear ($F=1,0$), da semeadura (S) à colheita (C), passando pelo ponto de maturidade fisiológica (F) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991).

Analogamente, para as curvas sigmoidais, as equações sugeridas são:

para $\left\{0 \leq j < \sum_{o=1}^3 t_o\right\}$ (estádios I, II, e III):

$$Ze = Ze_{ini} + \left[\frac{Ze_{max} - Ze_{ini}}{2} \right] \left\{ 1 - \cos \left[\pi \frac{\frac{1}{F} j}{\sum_{o=1}^3 t_o} \right]^F \right\} \quad (15)$$

para $\left\{ \sum_{o=1}^3 t_o \leq j < t_{pmf} \right\}$ (estádio IV):

$$Ze = Ze_{max} \quad (16)$$

e para $\left\{ t_{pmf} \leq j < \sum_{o=1}^5 t_o \right\}$ (estádio V):

$$Ze = Ze_{ini} + \left[\frac{Ze_{max} - Ze_{ini}}{2} \right] \left\{ 1 + \cos \left[\pi \frac{\frac{1}{F} [j - t_{pmf}]}{\sum_{o=1}^5 t_o - t_{pmf}} \right]^F \right\} \quad (17)$$

2.6. Capacidade de água disponível

A equação geral para o cálculo da capacidade de água disponível (Y, mm), de uma camada de solo limitada pela sua superfície e a profundidade efetiva do sistema radicular, é dada por:

$$Y = \int_{\theta_{pmp}}^{\theta_{cc}} \int_0^{Ze} dZ \cdot d\theta \quad (18)$$

Essa expressão pode ser simplificada, quando se utilizam valores médios de capacidade de campo (θ_{cc}) e

ponto de murchamento permanente, (θ_{pmp}) para:

$$Y = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot Ze \quad (19)$$

2.7. Fator de água disponível

O fator de água disponível depende de fatores tanto do solo, como da planta e da atmosfera.

Entende-se por armazenagem crítica de água disponível (Ar_{crit} , mm) a armazenagem de água no perfil de solo, da sua superfície até a profundidade efetiva do sistema radicular, desde o ponto de murchamento permanente (θ_{pmp} , $cm^3 \cdot cm^{-3}$) até a umidade crítica (θ_{crit} , $cm^3 \cdot cm^{-3}$), isto é:

$$Ar_{crit} = (\theta_{crit} - \theta_{pmp}) \cdot Ze \quad (20)$$

A umidade crítica é definida como o teor de água limítrofe entre as zonas seca e ótima de umidade (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992), a partir do qual começa a haver redução da evapotranspiração conforme o solo seca (Figura 4).

Figura 4 - Variação da evapotranspiração da cultura em função da armazenagem de água disponível (Arm) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992c).

A partir das equações (19) e (20), verifica-se que:

$$\frac{(\theta_{cc} - \theta_{crit}) \cdot Z_0}{Y} = 1 - \frac{Ar_{crit}}{Y}$$

ou

$$p_{crit} = 1 - \frac{Ar_{crit}}{Y} \quad (21)$$

ou seja, p_{crit} é um fator que multiplicado pela capacidade de água disponível dá o quanto dela é consumido entre θ_{cc} e θ_{crit} , sendo por isso denominado fator de água disponível.

O fator de água disponível proposto em 1975 por Rijtema & Aboukhaled¹ (DOORENBOS et al., 1979) é dependente da evapotranspiração ótima da cultura. Para o caso específico da cultura de feijão, DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1992a) obtiveram as seguintes expressões:

$$p_{crit} = 0,8 \quad (ET_m \leq 2 \text{ mm.dia}^{-1}) \quad (22)$$

$$p_{crit} = -0,1 \cdot ET_m + 1,0 \quad (2 < ET_m \leq 5 \text{ mm.dia}^{-1}) \quad (23)$$

$$p_{crit} = -0,048 \cdot ET_m + 0,7 \quad (5 < ET_m < 10 \text{ mm.dia}^{-1}) \quad (24)$$

$$p_{crit} = 0,3 \quad (ET_m \geq 10 \text{ mm.dia}^{-1}) \quad (25)$$

¹ RIJTEMA, P.E. & ABOUKHALED, A. Crop water use. In: ABOUKHALED, A.; ARAR, A.; A.M.; BISHAY, B.G.; KADRY, L.T.; RIJTEMA, P.E.; TAHER, A. Research on crop use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt. Rome, FAO, 1975. p.5-61.

Conhecendo o fator de água disponível em função da evapotranspiração ótima da cultura de interesse, determina-se a armazenagem crítica (Figura 5) a partir da equação (21) por:

$$\text{Armerit} = (1 - p_{\text{crit}}) \cdot Y \quad (26)$$

A Figura 5 mostra, de forma reduzida, os passos a serem seguidos para a determinação desta armazenagem crítica.

Figura 5 - Fluxograma para determinação da armazenagem crítica (Armerit).

2.8. Balanço hídrico para previsão da armazenagem de água disponível segundo metodologia proposta por THORNTHWAITE & MATHER (1955)

2.8.1. Hipótese básica

A hipótese básica do método de THORNTHWAITE & MATHER (1955) é a de que a perda de água pelo processo de

evapotranspiração é diretamente proporcional ao teor de água no solo, sendo máxima na capacidade de campo e nula no ponto de murchamento permanente, isto é:

$$\frac{dB}{dt} = y \cdot A_{rm} \quad (27)$$

onde dB/dt é a taxa de perda de água do solo por evapotranspiração ($\text{mm} \cdot \text{período}^{-1}$), y o coeficiente empírico de proporcionalidade (período^{-1}) e A_{rm} a armazenagem de água disponível no solo (mm).

2.8.2. Estimativa da evapotranspiração de referência

Para estimativa da evapotranspiração de referência do n -ésimo período (ET_{on} , $\text{mm} \cdot \text{período}^{-1}$) pelo procedimento proposto por THORNTHWAITE (1948), necessita-se apenas dos dados de temperatura (T_n , $^{\circ}\text{C}$) média mensal dos 12 meses do ano e da latitude local (ϕ , radianos):

$$ET_{on} = 16 \left(\frac{10 \cdot T_n}{I} \right)^a \cdot \left(\frac{H_n}{12} \right) \cdot N_n \quad (28)$$

sendo:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_n}{5} \right)^{1,514}, \quad (29)$$

$$a = \sum_{k=0}^9 a_k \cdot I^k, \quad (30)$$

e

$$H_n = \frac{24}{\pi} \cdot \arccos[-\text{tg}(\xi_n) \cdot \text{tg}(\phi)] \quad (31)$$

onde I é o índice térmico anual; a_0 , a_1 , a_2 e a_9 os

coeficientes empíricos da equação; H_n o número máximo possível de horas de brilho solar no dia mediano do n -ésimo período; N_n o número de dias do n -ésimo período; e ξ_n a declinação solar no n -ésimo período, que pode ser calculada pela equação mencionada por PALTRIDGE & PLATT (1976):

$$\begin{aligned} \xi_n = & 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(2\pi \cdot dm_n/365) + 0,070257 \cdot \\ & \cdot \sin(2\pi \cdot dm_n/365) - 0,006758 \cdot \cos(4\pi \cdot dm_n/365) + \\ & + 0,000907 \cdot \sin(4\pi \cdot dm_n/365) - 0,002697 \cdot \\ & \cdot \cos(6\pi \cdot dm_n/365) + 0,00148 \cdot \sin(6\pi \cdot dm_n/365) \end{aligned} \quad (32)$$

na qual dm_n é o número de ordem do dia mediano do n -ésimo período, considerando que o ano possui 365 dias sempre. A utilização de sete termos dessa série é suficiente para estimativa da declinação solar com boa exatidão.

2.8.3. Critérios para iniciar o balanço hídrico

No método do balanço hídrico cíclico mensal de THORNTHWAITE & MATHER (1955) calculam-se, para cada mês, os saldos (S) positivos ou negativos de água, subtraindo da precipitação pluvial ou chuva (C) o valor de ET_m, ao mesmo tempo que se calcula o que se chama de "negativo acumulado" (L, mm) e a armazenagem (Arm, mm). A coluna referente ao negativo acumulado inicia-se no mês em que aparece um valor negativo de C-ET_m após uma série de valores positivos que permitam concluir que no mês anterior a armazenagem tenha sido a máxima, isto é:

$$Arm = Y \quad (33)$$

A partir desse primeiro valor de negativo acumulado, calcula-se a armazenagem a ele correspondente através da equação empírica (34) abaixo, proposta pelos autores:

$$Arm = Y.e^{-\frac{L}{Y}} \quad (34)$$

Sendo o saldo negativo do mês subsequente, calcula-se o valor do negativo acumulado a ele correspondente, somando-se ao primeiro valor do negativo acumulado o módulo do saldo referente ao mês subsequente e assim sucessivamente enquanto o saldo for negativo, sendo a armazenagem calculada pela expressão (34).

Quando o valor do saldo for positivo, obtém-se o valor da armazenagem correspondente ao mês em que isso ocorre, somando-se ao valor da armazenagem do mês anterior esse saldo, ao mesmo tempo em que, com base na armazenagem obtida, calcula-se através da equação (35) o valor do negativo acumulado correspondente, e assim sucessivamente até fechar o ciclo.

$$L = -Y.Ln \frac{Arm}{Y} \quad (35)$$

Portanto, segundo THORNTHWAITE & MATHER (1955), inicia-se o balanço hídrico mensal cíclico quando o solo se encontra na capacidade de campo no último período da estação úmida, a qual é caracterizada por apresentar saldo positivo.

Entretanto, devido ao número excessivo de iterações, especialmente nos casos de regiões áridas e semi-áridas, no balanço hídrico cíclico originalmente proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955), MENDONÇA (1958) propôs, com base no trabalho daqueles autores, que o valor do negativo no final do único período úmido (L_1) seja dado por:

$$L_1 = -Y \cdot \ln \left[\frac{\frac{P}{Y}}{1 - e^{-\frac{N}{Y}}} \right] \quad (36)$$

onde:

$$P = \sum_{i=p+1}^u (C_i - ET_i), [se (C_i - ET_i) > 0] \quad (37)$$

e

$$N = \sum_{i=p+1}^a (C_i - ET_i), [se (C_i - ET_i) < 0] \quad (38)$$

sendo P o somatório dos saldos positivos $[(C_i - ET_i) > 0]$ durante a estação úmida; e N o somatório dos saldos negativos $[(C_i - ET_i) < 0]$ durante a estação seca. A equação (36) só se aplica quando:

$$\frac{P}{Y} < 1 - e^{-\frac{N}{Y}} \quad (39)$$

caso contrário, utiliza-se o procedimento normal de THORNTHWAITE & MATHER (1955).

Quando se deseja elaborar o balanço hídrico utilizando um número maior de períodos secos e úmidos, com um número menor de dias para sua composição é necessário generalizar o critério de iniciar o balanço hídrico proposto por MENDONÇA (1958). Nesse sentido, DOURADO NETO et al. (1991) propuseram, seguindo a linha de MENDONÇA (1958), uma expressão que é válida para qualquer número de estações úmidas (j) para estimativa do negativo acumulado (L_1 , mm), no último período de qualquer estação úmida:

$$L_1 = -Y \cdot \ln \left[p_1 + e^{\left\{ -x_j + \frac{N_j}{Y} \right\}} \right] \quad (40)$$

onde:

$$x_j = - \ln \left[\frac{\frac{P_j}{Y} + \sum_{i=1}^{j-1} p_i \cdot e^{\left\{ \sum_{k=i}^{j-1} \frac{N_k}{Y} \right\}}}{1 - e^{\left\{ \sum_{k=1}^j \frac{N_k}{Y} \right\}}} \right] \quad (41)$$

desde que:

$$\frac{P_1}{Y} + e^{\left\{ -x_j + \frac{N_j}{Y} \right\}} < 1 \quad (42)$$

e

$$\left[\frac{P_j}{Y} + \sum_{i=1}^{j-1} p_i \cdot e^{\left\{ \sum_{k=j-1}^i \frac{N_k}{Y} \right\}} \right] < \left[1 - e^{\left\{ \sum_{k=1}^j \frac{N_k}{Y} \right\}} \right] \cdot Y, \quad (i, j, k \in \mathbb{N}^*) \quad (43)$$

onde x_j é o negativo acumulado por unidade de capacidade de água disponível no último período da j -ésima estação úmida.

Caso as condições estabelecidas não sejam satisfeitas, é porque o solo se encontra na capacidade de campo no final da estação úmida.

A partir do conhecimento do valor do negativo acumulado no último período da estação chuvosa, faz-se o balanço hídrico conforme propuseram THORNTHWAITE E MATHER (1955).

2.9. Modificações da metodologia proposta por THORNTWHAITE & MATHER (1955)

2.9.1. Hipótese básica

Levando em consideração quatorze condições necessárias à aceitação de um modelo para a previsão de água disponível no solo, DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1992a,c) propuseram a utilização da equação (44) abaixo para estimativa da taxa de perda de água por evapotranspiração (dB/dt , mm.período^{-1}):

$$\frac{dB}{dt} = \frac{K}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot \text{Arm}}{(1-p)Y} \right) \right] \quad (44)$$

2.9.2. Estimativa da armazenagem da água no solo

Como consequência da hipótese básica, a estimativa do negativo acumulado em função da armazenagem durante o secamento do solo a partir do ponto limítrofe das zonas ótima e seca de umidade é obtida por:

se $0 \leq \text{Arm} \leq (1-p)Y$:

$$L = Y \cdot \left[p + \frac{2}{\pi} (1-p) \text{tg} \left\{ \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{\text{Arm}}{(1-p)L} \right] \right\} \right] \quad (45)$$

e se $(1-p)Y < \text{Arm} \leq Y$:

$$L = Y - \text{Arm} \quad (46)$$

Para o molhamento, tem-se as equações inversas de (43) e (44), respectivamente:

se $L \geq p.Y$:

$$Arm = (1-p).Y. \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctg \left\{ \frac{\pi}{2} \left[\frac{(L/Y)-p}{1-p} \right] \right\} \right] \quad (47)$$

e se $0 \leq L < p.Y$:

$$Arm = Y - L \quad (48)$$

2.10. Cálculo do potencial mátrico através de tensiômetro

A equação de cálculo do potencial mátrico da água no solo (ψ_m , cca) utilizando tensiômetro com manômetro de mercúrio é dada pela seguinte expressão:

$$\psi_m = - \left\{ \left[\frac{\rho_m}{\rho_a} - 1 \right] \right\} . h + h_c + z \quad (49)$$

onde ρ_m é a massa específica (g.cm^{-3}) do mercúrio, ρ_a é a massa específica (g.cm^{-3}) da água, h é a altura de ascensão de mercúrio (cm) lida no manômetro do tensiômetro, h_c é a distância (cm) vertical entre a superfície do solo e a superfície livre de mercúrio dentro da cuba do tensiômetro, z é a profundidade (cm) de instalação do tensiômetro (distância entre a superfície do solo e o centro geométrico da cápsula porosa de cerâmica).

Como lê-se diariamente apenas a altura de mercúrio ($h_{j,k}$, cm), DOURADO NETO (1989), à semelhança de PAULETTO (1986), corrigiu a expressão de cálculo do potencial mátrico:

$$\psi_m = - \left\{ \left[\frac{\rho_m}{\rho_a} - 1 \right] \left[1 + \frac{\bar{d}^2}{\bar{D}^2 - \bar{d}^2} \right] + \frac{\bar{d}^2}{\bar{D}^2 - \bar{d}^2} \right\} h + h_c + z + \bar{l} \quad (50)$$

onde $\bar{d}$ é o diâmetro (cm) médio do tubo de náilon do manômetro do tensiômetro, $\bar{D}$ é o diâmetro (cm) médio da cuba do manômetro do tensiômetro e $\bar{l}$ é a lâmina (cm) de água que fica sobre o mercúrio dentro da cuba de vidro após a fluxagem do tensiômetro.

2.11. Curva de retenção de água no solo

Por não existir uma solução analítica para a relação funcional entre o potencial mátrico (ψ_m) e o teor de água no solo (θ), conhecida como curva de retenção, a prática rotineira é a elaboração dessa curva em condições de laboratório, utilizando funis de placa porosa e câmaras de pressão de Richards (LIBARDI, 1989).

GENUCHTEN (1980), assumindo relação unívoca entre umidade (θ) e potencial mátrico (ψ_m), propôs a seguinte equação de ajuste para a curva de retenção:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\psi_m|)^n]^m} \quad (51)$$

onde θ é a umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) correspondente ao potencial mátrico ψ_m (cca); θ_r é a umidade residual ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), θ_s é a umidade correspondente à saturação do solo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), e α (cca $^{-1}$), m e n são os parâmetros da equação. GENUCHTEN (1980) propôs também a seguinte relação de dependência entre os parâmetros m e n :

$$n = \frac{1}{1 - m} \quad (52)$$

DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1992b) desenvolveram um programa de computador (programa

CURVARET), o qual foi utilizado no presente trabalho, onde são estimados os parâmetros da equação, sendo que m e n podem ser determinados com e a essa relação de dependência (equação 52). A estimativa é feita através de regressão não linear, pelo método dos quadrados mínimos. Os valores extremos de umidade (umidade residual θ_r e umidade de saturação θ_s) também são estimados, bem como um coeficiente de ajuste (c.a.) definido por:

$$c.a. = \frac{SQReg}{SQTot} \quad (53)$$

$$SQReg = \sum_{i=1}^k (\hat{\theta}_i - \bar{\theta})^2 \quad (54)$$

$$SQTot = \sum_{i=1}^k (\theta_i - \bar{\theta})^2 \quad (55)$$

onde $SQReg$ ($cm^6.cm^{-6}$) é a soma dos quadrados dos desvios entre os k valores estimados e o valor médio de umidade, e $SQTot$ ($cm^6.cm^{-6}$) é a soma dos quadrados dos desvios entre os k valores medidos e o valor médio de umidade.

A estimativa dos valores extremos de umidade por extrapolação dos valores medidos máximo (θ_{max} , $cm^3.cm^{-3}$) e mínimo (θ_{min} , $cm^3.cm^{-3}$) de umidade, e dos parâmetros α , m e n (JONG-van-LIER & DOURADO NETO, 1991) é feita por:

$$\theta_s = \frac{(1-A_{min}).\theta_{max} - (1 - A_{max}).\theta_{min}}{A_{max} - A_{min}} \quad (56)$$

e

$$\theta_r = \frac{A_{max}.\theta_{min} - A_{min}.\theta_{max}}{A_{max} - A_{min}} \quad (57)$$

sendo:

$$A_{\max} = \{1 + [\alpha(-\psi_{m,\max})]^n\}^{-m} \quad (58)$$

$$A_{\min} = \{1 + [\alpha(-\psi_{m,\min})]^n\}^{-m} \quad (59)$$

onde $\psi_{m,\min}$ e $\psi_{m,\max}$ referem-se aos valores mínimo e máximo, respectivamente, de potencial mátrico (cca) determinados experimentalmente.

2.12. Desenvolvimento relativo

As variedades comerciais disponíveis de feijão não dependem do fotoperíodo para florescer. A temperatura, no entanto, é um dos fatores de produção de grande relevância para essa cultura, afetando não somente o rendimento, mas também a duração do ciclo. O desenvolvimento relativo, em termos da temperatura, pode, então, ser expresso por:

$$D_{r_n} = \frac{\sum_{j=1}^n (T_j - T_b)}{I_t} \quad (T_b \leq T_j \leq T_m) \quad (60)$$

onde D_{r_n} é o desenvolvimento relativo acumulado da cultura até o n-ésimo dia após a semeadura ($0 \leq D_{r_n} \leq 1$); I_t é o índice térmico ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$) da cultura; j é o número de dias após a semeadura ($j \in \mathbb{N}$); T_m é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) máxima; T_b é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) basal da cultura; T_j é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no j-ésimo dia após a semeadura. O desenvolvimento relativo é unitário quando a cultura atinge seu ponto de maturidade fisiológica (t_{pmf}). Portanto, quando $D_{r_n} = 1$, $t_{pmf} = n$, onde t_{pmf} é o número de dias após a semeadura correspondente ao

ponto de maturidade fisiológica ($t_{pmf} \in \mathbb{N}$) (DRIESSEN, 1986).

Entende-se por temperatura basal (T_b , °C) de uma determinada espécie de planta, a temperatura abaixo da qual não há crescimento observável, e por temperatura máxima (T_m , °C) a temperatura acima da qual a fotossíntese líquida é negativa. Segundo DRIESSEN (1986), a temperatura basal oscila entre 5 e 10 °C e a temperatura máxima entre 27 e 28 °C.

Entende-se por índice térmico (It , °C.dia) de uma determinada espécie, a soma de todos os ganhos diários de temperatura, acima da temperatura basal e abaixo da temperatura máxima, a partir da semeadura, para que seja atingido o ponto de maturidade fisiológico. O índice térmico da cultura de feijão oscila entre 885 e 1100 °C.dia (DRIESSEN, 1986).

2.13. Condições químicas do solo favoráveis ao feijoeiro

As condições químicas do solo são importantes por favorecer o equilíbrio nutricional à planta. A faixa de pH adequada ao feijoeiro é $5,6 \leq pH \leq 6,5$, sendo que a tolerável é $4,2 \leq pH \leq 8,7$. O teor de fósforo (P) no solo deve ser superior a 10 ppm, o de potássio superior a 60 ppm, e o de cálcio e magnésio (Ca + Mg) superior a 3 eqmg/100 g. A porcentagem de saturação por alumínio não deve exceder 20% e o teor de matéria orgânica deve estar entre 2,5 a 6 % (KLUTHCOUSKI, 1982; FANCELLI, 1986).

Para avaliar o equilíbrio nutricional, torna-se necessário conhecer os níveis críticos dos nutrientes na folha do feijoeiro. COBRA NETO (1967) apresenta os seguintes níveis críticos: 2,6% de nitrogênio, 0,36% de fósforo, 4,4% de potássio, 4% de cálcio, 0,86% de magnésio e 0,81% de enxofre. HOWELER (1975) apresenta os seguintes níveis críticos: 0,35% de fósforo, 4,4% de

potássio, 0,3% de enxofre e 250 ppm de manganês. KLUTHCOUSKI (1982), revisando alguns trabalhos, apresenta o nível crítico de 2% para cálcio, 0,35% para Mg e 386 ppm para manganês.

2.14. Estimativa de rendimento

CAMARGO et al. (1986) propuseram um modelo agrometeorológico para estimativa do rendimento para a cultura da soja no estado de São Paulo:

$$Y_{est} = Y_{pot} \cdot F_{Ter} \cdot F_{Def} \cdot F_{Exc} \quad (61)$$

onde Y_{est} é o rendimento estimado em grãos (kg/ha) e Y_{pot} o rendimento potencial do cultivar (kg/ha). F_{Ter} é um fator térmico indicativo do grau de desenvolvimento relativo da cultura:

$$F_{Ter} = \frac{S_{gd}}{I_t} \quad (62)$$

sendo S_{gd} somatório das temperaturas acima da temperatura basal para cada época de semeadura específica durante o ciclo e I_t o somatório das temperaturas médias acima da temperatura basal durante o ciclo semeadura-ponto de maturidade fisiológica, relativa a qualquer cultivar para os três anos agrícolas estudados em diferentes épocas de semeadura. F_{Def} é um fator referente ao déficit hídrico:

$$F_{Def} = \left[\prod_{i=0}^n \frac{ET_{r_i}}{ET_{m_i}} \right]^{1/2} \quad (63)$$

sendo ET_{r_i}/ET_{m_i} a relação entre a evapotranspiração real e ótima no i -ésimo período decendial entre o início do

florescimento e o início da maturação. FExc é um fator referente ao excedente hídrico:

$$FExc = 1 - K(1 - Pfe) \quad (64)$$

sendo K o fator de correção e Pfe o produtório dos decêndios correspondentes ao início do florescimento até início da maturação.

Já BRUNINI et al. (1982) propuseram, especificamente para a cultura da soja, a seguinte expressão para o cálculo do fator de excedente hídrico (FExc):

$$FExc = 1 - \frac{EH - ET_m}{EH} \quad (65)$$

onde EH é o excedente hídrico.

No método de estimativa do rendimento de culturas de DOORENBOS et al. (1979), utiliza-se a seguinte expressão:

$$1 - \frac{Y_{est}}{Y_{pot}} = Ky \cdot \left[1 - \frac{E - Tr}{ET_m} \right] \quad (66)$$

onde Yest é o rendimento estimado da cultura (kg/ha), Ypot o rendimento potencial (kg/ha), e Ky o coeficiente de rendimento.

A utilização da relação entre evapotranspiração real e evapotranspiração ótima tem sido bastante utilizada no estudo de previsão do rendimento das culturas (NIX & FITZPATRICK, 1969; CORSI & SHAW, 1971; YAO, 1974; DOORENBOS et al., 1979; MASON et al., 1980; CAMARGO et al., 1986).

2.15. Estimativa do rendimento potencial

Rendimento potencial com limitação climática pode ser definido como sendo o máximo rendimento que se pode obter numa dada localidade, onde as únicas limitações são o potencial de produção do cultivar e a energia (radiação) solar disponível. A fertilidade do solo, a disponibilidade de água, as pragas e as doenças não são limitantes. (WHITE, 1981; DRIESSEN, 1986).

Na estimativa do rendimento potencial, assume-se que as práticas agronômicas são ótimas no contexto de sistemas agrícolas existentes, não havendo fertilização com dióxido de carbono, radiação suplementar ou quaisquer outros suportes artificiais (WHITE, 1981).

O modelo proposto por De Wit em 1965 é de ampla utilização em nosso meio (DOORENBOS et al., 1979).

O índice de área foliar é um atributo da planta de grande importância à obtenção de elevados rendimentos (Tabela 2).

Tabela 2 - Índice de área foliar máximo (IAFm), número de dias para atingir o ponto de maturidade fisiológica (t_{pmf} , dias), duração do ciclo (Dc, dias), número de cultivares (n), rendimento obtido (Y_a , kg/ha) e rendimento potencial (Y_{pot} , kg/ha) da cultura de feijão.

IAFm	t_{pmf}	Dc	n	Y_a	Y_{pot}	Fonte
2,7-4,0	69-95	-	1	2772-4123	-	CIAT(1976)
3,4-6,4	-	-	4	2423-3653	-	CIAT(1977)
2,8	78	108	2	2637	-	CIAT(1979)
			9	1823-3577	5266-6261	IZQUIERDO(1981)
-	-	75-113	8	3705-5500	-	WHITE(1981)

Verificou-se experimentalmente que a ordem de grandeza do índice de área foliar máximo, para algumas cultivares de feijão, é em torno de 4 com radiação solar na faixa de 16 a 18 MJ.m⁻².dia⁻¹ (LAING et al., 1984).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Física e Meteorologia, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, em Piracicaba, São Paulo, a qual está localizada geograficamente a 22° 43' de latitude sul, a 47° 25' de longitude oeste e a 580 metros de altitude.

Segundo as normas da EMBRAPA-SNLCS (1988), o solo foi classificado por VIDAL TORRADO (1992)² como Terra Roxa Estruturada Latossólica. Pela classificação americana é um Kandudalfic Eutrudox (ESTADOS UNIDOS, 1990).

O clima da região é do tipo Cwa segundo classificação de Köppen (VILLA NOVA, 1989).

3.2. Delineamento experimental

A área experimental possui 6.250 m², 125 m de comprimento (sentido NW-SE) e 50 m de largura (sentido SW-NE), a qual foi quadriculada em 250 malhas de 5x5 metros que consistiram nos 250 pontos de amostragem para avaliação dos atributos físicos e químicos do solo.

3.3. Cultura agrícola

Foi utilizada semente básica de feijão, cultivar Carioca (lote BSB-082/87: i. germinação: 93%; ii. pureza: 99,9%) proveniente do Serviço de Produção de

2 VIDAL TORRADO, P. (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba, SP). Comunicação pessoal, 1992.

Semente Básica (SPSB), de Brasília (Distrito Federal) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

3.4. Modelo proposto

Para previsão de época de colheita, segundo DRIESSEN (1986) e do rendimento da cultura de feijão, desenvolveu-se um modelo universal onde são considerados conjuntamente parâmetros do solo, da planta e da atmosfera.

Para sua utilização é necessário conhecer os seguintes atributos: capacidade de campo, ponto de murchamento permanente, profundidade efetiva do sistema radicular, análise química do solo, adubações realizadas pelo homem, duração dos estádios de desenvolvimento e coeficiente de cultura, temperatura basal, índice térmico, índice de área foliar, latitude, insolação, temperatura média do ar, umidade relativa, velocidade do vento, evaporação do Tanque Classe A e chuva.

Foram estimados os déficits e os excedentes hídricos utilizando o procedimento para realização de balanço hídrico proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955), considerando a profundidade efetiva do sistema radicular variando segundo três tipos básicos de curva de crescimento: 1. sigmoidal (com três variações), 2. potencial e 3. linear.

Foram utilizados três diferentes métodos para estimar a armazenagem: 1. THORNTHWAITE & MATHER (1955), 2. Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979) e 3. DOURADO NETO & JONG-VAN-LIER (1992a,c).

Foram utilizados os seguintes atributos químicos do solo: pH em água, teores de cálcio (Ca^{2+} , eqmg/100g), magnésio (Mg^{2+} , eqmg/100g), potássio (K^{+} , eqmg/100g), alumínio (Al^{3+} , eqmg/100g), hidrogénio (H^{+} , eqmg/100g), capacidade de troca catiônica (CTC, eqmg/100g), soma de bases (S, eqmg/100g), porcentagem de saturação por

bases (V, %) e porcentagem por saturação alumínio (m, %) em pH = 7 e teor de carbono (C, %).

Figura 6 - Esquema geral do modelo proposto (modelo universal) para previsão do rendimento e da época de colheita, em função dos dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados necessários ao modelo proposto (Modelo Universal).

fase	atributo	Tabela
solo	.profundidade de molhamento	7
	.análise química: Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Potás sio (K); Fósforo (P); Carbono (C); pH; Alumínio (Al); Hidrogênio (H)	4
	.curva de retenção ^a da água no solo: -parâmetros: α , m e n e os valores extremos de umidade (θ_r e θ_s) da equação de GENUCHTEN (1980)	9 e 15
	.capacidade de campo .ponto de murchamento permanente	13
	.adubação nitrogenada	12
planta	.coeficiente de cultura	1 e 5
	.tempo de duração dos estádios fenoló gicos da cultura	
	.profundidade efetiva do sistema radicular inicial e final	5
	.índice térmico	
	.temperatura basal e máxima	
atmosfera	.temperatura média do ar	
	.velocidade do vento	
	.evaporação do Tanque Classe A	6
	.umidade relativa	
	.chuva	
homem ^b	.irrigação ^c	6

^a necessário à aferição do modelo.

^b homem: fator externo ao sistema agrícola.

^c adicionou-se à chuva a altura de irrigação.

Tabela 4 - Atributos químicos do solo nas 250 parcelas experimentais. FONTE: Seção de Pedologia do Instituto Agronômico de Campinas (IAC).

ponto	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC	S	V	m	C
		eqmg/100g						(%)			
1	5,8	3,6	0,8	0,50	0,0	3,1	8,00	4,90	61,25	0,00	1,2
2	5,9	3,4	0,8	0,44	0,0	3,2	7,84	4,64	59,18	0,00	1,1
3	5,9	3,7	0,9	0,59	0,0	2,5	7,69	5,19	67,49	0,00	1,2
4	5,8	3,7	0,8	0,52	0,0	3,5	8,52	5,02	58,92	0,00	1,3
5	5,8	4,2	0,9	0,56	0,0	3,4	9,06	5,66	62,47	0,00	1,4
6	6,1	4,1	0,9	0,56	0,0	3,1	8,66	5,56	64,20	0,00	1,2
7	6,1	3,9	0,9	0,60	0,0	3,3	8,70	5,40	62,06	0,00	1,3
8	5,9	3,8	0,9	0,55	0,0	2,6	7,85	5,25	66,87	0,00	1,2
9	5,9	3,9	0,9	0,53	0,0	2,9	8,23	5,33	64,76	0,00	1,3
10	5,9	4,2	0,9	0,51	0,0	3,2	8,81	5,61	63,67	0,00	1,4
11	6,1	4,2	0,8	0,52	0,0	2,9	8,42	5,52	65,55	0,00	1,3
12	6,1	4,1	0,9	0,56	0,0	3,0	8,56	5,56	64,95	0,00	1,3
13	6,0	3,9	0,9	0,57	0,0	2,5	7,87	5,37	68,23	0,00	1,2
14	6,9	3,8	0,9	0,52	0,0	3,0	8,22	5,22	63,50	0,00	1,1
15	5,9	3,5	0,9	0,42	0,0	3,6	8,42	4,82	57,24	0,00	1,1
16	5,7	3,5	0,8	0,48	0,0	3,7	8,48	4,78	56,36	0,00	1,2
17	5,8	3,4	0,8	0,48	0,0	3,7	8,38	4,68	55,84	0,00	1,0
18	5,7	3,6	0,9	0,50	0,0	3,7	8,70	5,00	57,47	0,00	1,2
19	5,9	3,3	0,8	0,49	0,0	3,7	8,29	4,59	55,36	0,00	1,2
20	5,8	3,3	0,9	0,65	0,0	3,8	8,65	4,85	56,06	0,00	1,2
21	5,7	2,9	0,8	0,42	0,0	3,9	8,02	4,12	51,37	0,00	1,0
22	5,7	2,9	0,9	0,51	0,0	3,8	8,11	4,31	53,14	0,00	1,1
23	5,7	3,4	0,9	0,58	0,1	3,5	8,48	4,88	57,54	2,01	1,2
24	5,8	3,3	0,9	0,47	0,0	3,4	8,07	4,67	57,86	0,00	1,1
25	5,7	3,3	0,9	0,46	0,0	3,6	8,26	4,66	56,41	0,00	1,1
26	5,7	3,3	0,8	0,42	0,0	3,5	8,02	4,52	56,35	0,00	1,1
27	5,9	3,3	0,8	0,62	0,0	3,6	8,32	4,72	56,73	0,00	1,1
28	5,8	3,3	0,9	0,58	0,0	3,4	8,18	4,78	58,43	0,00	1,2
29	5,8	3,3	0,8	0,58	0,0	3,1	7,78	4,68	60,15	0,00	1,1
30	5,9	3,6	0,8	0,47	0,0	3,0	7,87	4,87	61,88	0,00	1,1
31	5,9	3,8	0,9	0,56	0,0	3,2	8,46	5,26	62,17	0,00	1,2
32	6,0	3,9	1,0	0,58	0,0	3,5	8,98	5,48	61,02	0,00	1,2
33	5,7	3,7	0,9	0,54	0,0	3,1	8,24	5,14	62,37	0,00	1,2
34	5,9	3,8	0,8	0,55	0,0	3,3	8,45	5,15	60,94	0,00	1,1
35	6,0	3,9	0,8	0,51	0,0	3,5	8,71	5,21	59,81	0,00	1,1
36	6,1	3,8	0,8	0,56	0,0	3,2	8,36	5,16	61,72	0,00	1,0
37	6,1	4,2	0,9	0,60	0,0	2,7	8,40	5,70	67,85	0,00	1,1
38	6,2	4,3	0,9	0,55	0,0	3,3	9,05	5,75	63,53	0,00	1,1
39	6,1	4,3	0,9	0,47	0,0	3,6	9,27	5,67	61,16	0,00	1,0
40	6,1	3,9	0,9	0,49	0,0	2,9	8,19	5,29	64,59	0,00	1,1
41	6,0	3,4	0,8	0,44	0,0	3,1	7,74	4,64	59,94	0,00	0,9
42	5,9	3,3	0,8	0,40	0,0	3,5	8,00	4,50	56,25	0,00	1,0
43	5,9	3,1	0,8	0,45	0,0	3,7	8,05	4,35	54,03	0,00	1,0
44	5,8	3,2	0,9	0,45	0,0	3,5	8,05	4,55	56,52	0,00	1,0
45	5,7	3,0	0,8	0,39	0,0	3,9	8,09	4,19	51,79	0,00	1,1
46	5,7	3,1	0,8	0,39	0,0	3,4	7,69	4,29	55,78	0,00	1,2
47	5,6	3,0	0,8	0,43	0,0	3,1	7,33	4,23	57,70	0,00	1,1
48	5,7	3,3	0,9	0,48	0,0	3,5	8,18	4,68	57,21	0,00	1,2
49	5,7	3,5	1,0	0,51	0,0	3,5	8,51	5,01	58,87	0,00	1,3
50	5,7	3,3	1,0	0,45	0,0	3,4	8,15	4,75	58,28	0,00	1,2

Tabela 4 (Cont.)

ponto	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC	S	V	m	C
		eqmg/100g							(%)		
51	5,7	2,8	0,7	0,34	0,0	2,5	6,34	3,84	60,56	0,00	1,0
52	5,7	3,1	0,8	0,35	0,0	2,0	6,25	4,25	68,00	0,00	1,0
53	5,7	3,1	0,8	0,40	0,0	2,6	6,90	4,30	62,31	0,00	1,1
54	5,8	3,2	0,8	0,41	0,0	1,3	5,71	4,41	77,23	0,00	1,1
55	5,9	3,4	0,8	0,38	0,0	2,6	7,18	4,58	63,78	0,00	1,0
56	5,9	3,7	0,9	0,48	0,0	2,6	7,68	5,08	66,14	0,00	1,1
57	6,0	3,7	0,9	0,54	0,0	2,4	7,54	5,14	68,17	0,00	1,2
58	5,8	3,7	1,0	0,53	0,0	1,9	7,13	5,23	73,35	0,00	1,2
59	5,7	3,4	0,9	0,47	0,0	2,2	6,97	4,77	68,43	0,00	1,1
60	5,9	3,6	0,9	0,74	0,0	1,9	7,14	5,24	73,38	0,00	1,2
61	5,9	3,6	0,9	0,56	0,0	2,2	7,26	5,06	69,69	0,00	1,2
62	6,0	3,8	0,9	0,54	0,0	2,3	7,54	5,24	69,49	0,00	1,2
63	6,4	3,8	1,0	1,05	0,0	2,4	8,25	5,85	70,90	0,00	1,1
64	5,9	4,0	0,9	0,51	0,0	3,0	8,41	5,41	64,32	0,00	1,1
65	6,1	3,8	0,8	0,38	0,0	2,6	7,58	4,98	65,69	0,00	1,2
66	6,2	4,1	0,9	0,38	0,0	3,3	8,68	5,38	61,98	0,00	1,1
67	5,9	3,4	0,9	0,40	0,0	3,4	8,10	4,70	58,02	0,00	1,1
68	5,9	3,2	0,8	0,47	0,0	3,0	7,47	4,47	59,83	0,00	1,1
69	5,9	2,8	0,8	0,42	0,0	1,9	5,92	4,02	67,90	0,00	1,1
70	5,8	2,9	0,8	0,39	0,0	3,5	7,59	4,09	53,88	0,00	1,1
71	5,8	2,8	0,8	0,37	0,0	3,2	7,17	3,97	55,37	0,00	1,1
72	5,9	3,1	0,9	0,34	0,0	3,8	8,14	4,34	53,31	0,00	1,1
73	5,9	3,1	0,9	0,39	0,0	3,2	7,59	4,39	57,83	0,00	1,1
74	5,9	3,1	0,9	0,43	0,0	2,6	7,03	4,43	63,01	0,00	1,1
75	5,8	3,0	0,9	0,44	0,0	3,2	7,54	4,34	57,56	0,00	1,1
76	5,7	3,0	0,8	0,30	0,0	3,0	7,10	4,10	57,74	0,00	1,0
77	5,8	3,1	0,8	0,38	0,0	2,9	7,18	4,28	59,61	0,00	1,1
78	5,9	3,3	0,8	0,50	0,0	2,5	7,10	4,60	64,78	0,00	1,2
79	6,0	3,4	0,8	0,47	0,0	3,1	7,77	4,67	60,10	0,00	1,1
80	6,0	3,3	0,8	0,47	0,0	3,1	7,67	4,57	59,58	0,00	1,0
81	6,2	3,7	0,9	0,48	0,0	2,4	7,48	5,08	67,91	0,00	1,1
82	6,2	4,0	0,9	0,50	0,0	3,0	8,40	5,40	64,28	0,00	1,1
83	5,7	3,8	0,9	0,58	0,0	3,0	8,28	5,28	63,76	0,00	1,2
84	6,1	3,5	0,9	0,47	0,0	3,1	7,97	4,87	61,10	0,00	1,1
85	6,1	3,6	0,9	0,56	0,0	3,5	8,56	5,06	59,11	0,00	1,2
86	5,9	3,5	0,9	0,50	0,0	3,5	8,40	4,90	58,33	0,00	1,1
87	6,0	3,5	0,9	0,51	0,0	2,8	7,71	4,91	63,68	0,00	1,1
88	6,1	3,6	0,9	0,54	0,0	3,1	8,14	5,04	61,91	0,00	1,1
89	6,1	3,7	0,8	0,56	0,0	2,7	7,76	5,06	65,20	0,00	1,2
90	6,1	3,7	0,9	0,52	0,0	3,4	8,52	5,12	60,09	0,00	1,0
91	6,0	3,7	0,8	0,42	0,0	3,4	8,32	4,92	59,13	0,00	1,1
92	5,9	3,7	0,8	0,44	0,0	3,0	7,94	4,94	62,21	0,00	1,2
93	5,8	3,6	0,8	0,60	0,0	2,9	7,90	5,00	63,29	0,00	1,2
94	5,9	3,6	0,9	0,53	0,0	3,3	8,33	5,03	60,38	0,00	1,3
95	5,9	3,1	0,8	0,46	0,0	2,8	7,16	4,36	60,89	0,00	1,0
96	5,9	3,3	0,9	0,53	0,0	3,0	7,73	4,73	61,19	0,00	1,2
97	5,8	2,8	0,8	0,45	0,0	2,9	6,95	4,05	58,27	0,00	1,2
98	5,8	3,0	0,8	0,45	0,0	2,9	7,15	4,25	59,44	0,00	1,2
99	5,9	3,1	0,8	0,46	0,0	2,8	7,16	4,36	60,89	0,00	1,2
100	5,9	3,2	0,9	0,47	0,0	2,6	7,17	4,57	63,73	0,00	1,2

Tabela 4 (Cont.)

ponto	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC	S	V	m	C
eqmg/100g								(%)			
101	5,9	3,1	0,7	0,39	0,0	2,4	6,59	4,19	63,58	0,00	1,1
102	5,8	3,3	0,8	0,43	0,0	2,5	7,03	4,53	64,43	0,00	1,2
103	5,9	3,2	0,7	0,38	0,0	2,4	6,68	4,28	64,07	0,00	1,1
104	5,9	3,2	0,8	0,61	0,0	2,5	7,11	4,61	64,83	0,00	1,1
105	5,9	3,3	0,8	0,62	0,0	2,5	7,22	4,72	65,37	0,00	1,3
106	6,0	3,5	0,8	0,41	0,0	2,3	7,01	4,71	67,19	0,00	1,2
107	6,2	4,3	0,8	0,62	0,0	2,2	7,92	5,72	72,22	0,00	1,0
108	6,1	4,3	0,9	0,59	0,0	2,3	8,09	5,79	71,57	0,00	1,2
109	6,1	4,0	0,9	0,53	0,0	2,4	7,83	5,43	69,34	0,00	1,2
110	5,9	3,6	0,8	0,59	0,0	2,6	7,59	4,99	65,74	0,00	0,8
111	5,9	3,7	0,8	0,55	0,0	2,6	7,65	5,05	66,01	0,00	1,3
112	5,9	3,4	0,8	0,49	0,0	2,5	7,19	4,69	65,22	0,00	1,2
113	6,0	3,4	0,9	0,54	0,0	2,6	7,44	4,84	65,05	0,00	1,0
114	6,1	3,8	0,9	0,60	0,0	2,4	7,70	5,30	68,83	0,00	1,2
115	6,2	3,7	0,9	0,67	0,0	2,0	7,27	5,27	72,49	0,00	1,3
116	6,1	3,8	0,9	0,65	0,0	2,2	7,55	5,35	70,86	0,00	1,4
117	6,0	4,0	0,8	0,61	0,0	2,3	7,71	5,41	70,16	0,00	1,4
118	5,9	4,0	0,8	0,64	0,0	2,4	7,84	5,44	69,38	0,00	1,2
119	6,1	3,7	0,8	0,61	0,0	2,4	7,51	5,11	68,04	0,00	1,3
120	6,0	3,5	0,9	0,63	0,0	2,4	7,43	5,03	67,69	0,00	1,3
121	5,9	3,0	0,8	0,52	0,0	2,6	6,92	4,32	62,42	0,00	1,4
122	5,9	3,1	0,9	0,49	0,0	2,6	7,09	4,49	63,32	0,00	1,4
123	5,7	3,4	0,9	0,55	0,0	2,6	7,45	4,85	65,10	0,00	1,3
124	5,8	3,6	0,9	0,63	0,0	2,4	7,53	5,13	68,12	0,00	1,5
125	5,6	3,7	0,8	0,59	0,0	2,4	7,49	5,09	67,95	0,00	1,3
126	5,8	3,0	0,7	0,44	0,0	1,9	6,04	4,19	68,54	0,00	1,1
127	5,8	2,9	0,7	0,43	0,0	2,0	6,03	4,03	66,83	0,00	1,1
128	5,7	2,7	0,7	0,38	0,0	2,1	5,88	3,78	64,28	0,00	1,0
129	5,7	2,8	0,8	0,48	0,0	2,1	6,18	4,08	66,01	0,00	1,2
130	5,6	2,7	0,7	0,41	0,0	2,4	6,21	3,81	61,35	0,00	1,2
131	5,7	3,0	0,8	0,33	0,0	2,1	6,23	4,13	66,29	0,00	1,2
132	6,0	3,4	0,9	0,56	0,0	2,0	6,86	4,86	70,84	0,00	1,2
133	5,8	3,3	0,8	0,47	0,0	2,3	6,87	4,57	66,52	0,00	1,3
134	5,6	3,2	0,8	0,51	0,0	2,5	7,01	4,51	64,33	0,00	1,3
135	5,6	3,4	0,9	0,46	0,0	2,3	7,06	4,76	67,42	0,00	1,2
136	5,6	3,1	0,8	0,44	0,1	2,2	6,64	4,34	65,36	2,25	1,3
137	5,7	3,1	0,8	0,43	0,0	2,4	6,73	4,33	64,33	0,00	1,3
138	5,6	2,9	0,7	0,42	0,1	2,8	6,92	4,02	58,09	2,42	1,4
139	5,7	3,6	0,8	0,49	0,0	2,2	7,09	4,89	68,97	0,00	1,2
140	5,7	3,3	0,7	0,55	0,1	2,3	6,95	4,55	65,46	2,15	1,4
141	5,8	3,3	0,7	0,58	0,1	2,2	6,88	4,58	66,57	2,13	1,3
142	5,8	3,3	0,7	0,55	0,1	2,1	6,75	4,55	67,40	2,15	1,2
143	5,8	3,6	0,8	0,56	0,0	2,2	7,16	4,96	69,27	0,00	1,3
144	5,8	3,7	0,8	0,64	0,0	2,2	7,34	5,14	70,02	0,00	1,3
145	5,8	3,5	0,7	0,59	0,0	2,1	6,89	4,79	69,52	0,00	1,2
146	5,8	3,2	0,7	0,53	0,0	2,2	6,63	4,43	66,81	0,00	1,3
147	5,7	3,2	0,8	0,53	0,0	2,2	6,73	4,53	67,31	0,00	1,2
148	5,6	3,1	0,8	0,53	0,0	2,2	6,63	4,43	66,81	0,00	1,2
149	5,7	3,0	0,8	0,60	0,0	2,3	6,70	4,40	65,67	0,00	1,3
150	5,6	3,0	0,7	0,53	0,0	2,5	6,73	4,23	62,85	0,00	1,3

Tabela 4 (Cont.)

ponto	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC	S	V	m	C
eqmg/100g							(%)				
151	5,6	2,7	0,7	0,38	0,0	1,5	5,28	3,78	71,59	0,00	0,9
152	5,5	2,5	0,7	0,26	0,1	1,6	5,16	3,46	67,05	2,81	1,0
153	5,4	2,7	0,7	0,16	0,1	1,8	5,46	3,56	65,20	2,73	1,0
154	5,4	2,4	0,6	0,18	0,1	2,0	5,28	3,18	60,22	3,05	1,1
155	5,4	2,6	0,7	0,20	0,1	2,3	5,90	3,50	59,32	2,78	1,2
156	5,5	2,7	0,7	0,19	0,1	2,2	5,89	3,59	60,95	2,71	1,2
157	5,6	3,0	0,8	0,35	0,0	2,1	6,25	4,15	66,40	0,00	1,2
158	5,5	3,1	0,7	0,32	0,0	2,4	6,52	4,12	63,19	0,00	1,1
159	5,7	3,0	0,8	0,40	0,0	2,3	6,50	4,20	64,61	0,00	1,3
160	5,5	2,8	0,6	0,34	0,1	2,6	6,44	3,74	58,07	2,60	1,3
161	5,4	2,9	0,7	0,39	0,1	2,6	6,69	3,99	59,64	2,45	1,2
162	5,4	2,9	0,6	0,31	0,1	2,6	6,51	3,81	58,52	2,56	1,3
163	5,5	2,8	0,7	0,37	0,1	2,6	6,57	3,87	58,90	2,52	1,2
164	5,6	3,0	0,7	0,43	0,0	2,4	6,53	4,13	63,24	0,00	1,1
165	5,8	3,4	0,7	0,50	0,0	2,3	6,90	4,60	66,66	0,00	1,2
166	5,8	3,1	0,7	0,52	0,0	2,2	6,52	4,32	66,25	0,00	1,1
167	5,7	3,0	0,7	0,59	0,0	2,1	6,39	4,29	67,13	0,00	1,3
168	5,9	3,4	0,8	0,75	0,0	2,0	6,95	4,95	71,22	0,00	1,2
169	5,7	3,4	0,7	0,51	0,0	2,0	6,61	4,61	69,74	0,00	1,2
170	6,0	3,5	0,9	1,00	0,0	2,0	7,40	5,40	72,97	0,00	1,3
171	5,9	3,4	0,8	0,57	0,0	2,0	6,77	4,77	70,45	0,00	1,3
172	5,7	3,1	0,7	0,50	0,0	2,2	6,50	4,30	66,15	0,00	1,1
173	5,6	3,2	0,7	0,46	0,0	2,1	6,46	4,36	67,49	0,00	1,2
174	5,6	2,9	0,7	0,49	0,0	2,4	6,49	4,09	63,02	0,00	1,2
175	5,6	3,0	0,7	0,52	0,0	3,4	7,62	4,22	55,38	0,00	1,2
176	5,5	2,4	0,7	0,24	0,1	2,9	6,34	3,34	52,68	2,91	1,0
177	5,4	2,4	0,6	0,20	0,1	3,0	6,30	3,20	50,79	3,03	1,0
178	5,4	2,3	0,6	0,27	0,1	3,0	6,27	3,17	50,55	3,06	1,1
179	5,4	2,3	0,6	0,25	0,1	2,9	6,15	3,15	51,22	3,08	1,0
180	5,5	2,5	0,7	0,24	0,1	3,1	6,64	3,44	51,80	2,83	1,1
181	5,5	3,0	0,7	0,18	0,0	3,2	7,08	3,88	54,80	0,00	1,2
182	5,7	3,3	0,8	0,31	0,0	3,0	7,41	4,41	59,51	0,00	1,1
183	5,5	3,0	0,8	0,32	0,0	3,5	7,62	4,12	54,06	0,00	1,1
184	5,4	2,6	0,7	0,31	0,1	3,7	7,41	3,61	48,71	2,70	1,1
185	5,2	2,5	0,6	0,24	0,1	3,7	7,14	3,34	46,77	2,91	0,8
186	5,3	2,7	0,7	0,28	0,1	3,4	7,18	3,68	51,25	2,65	1,0
187	5,4	2,8	0,6	0,24	0,1	3,2	6,94	3,64	52,45	2,67	1,1
188	5,4	2,8	0,6	0,27	0,1	3,2	6,97	3,67	52,65	2,65	1,0
189	5,5	2,9	0,7	0,41	0,0	3,3	7,31	4,01	54,85	0,00	1,1
190	5,6	2,9	0,7	0,46	0,0	3,4	7,46	4,06	54,42	0,00	1,1
191	5,5	3,0	0,7	0,45	0,0	3,4	7,55	4,15	54,96	0,00	1,1
192	5,6	3,1	0,7	0,52	0,0	3,4	7,72	4,32	55,95	0,00	1,2
193	5,5	2,9	0,8	0,55	0,0	3,3	7,55	4,25	56,29	0,00	1,2
194	5,6	3,1	0,7	0,52	0,0	3,3	7,62	4,32	56,69	0,00	1,2
195	5,8	3,3	0,7	0,54	0,0	3,2	7,74	4,54	58,65	0,00	1,2
196	5,6	3,2	0,7	0,47	0,0	3,2	7,57	4,37	57,72	0,00	1,1
197	5,7	3,2	0,7	0,48	0,0	3,1	7,48	4,38	58,55	0,00	1,2
198	5,7	3,0	0,7	0,43	0,0	3,3	7,43	4,13	55,58	0,00	1,1
199	5,7	3,2	0,7	0,49	0,0	3,3	7,69	4,39	57,08	0,00	1,1
200	5,5	2,9	0,7	0,45	0,0	3,5	7,55	4,05	53,64	0,00	1,2

Tabela 4 (Cont.)

ponto	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC	S	V	m	C
		eqmg/100g							(%)		
201	5,3	2,2	0,7	0,18	0,1	3,3	6,48	3,08	47,53	3,15	1,0
202	5,4	2,2	0,7	0,20	0,1	3,1	6,30	3,10	49,20	3,13	1,0
203	5,4	2,4	0,7	0,28	0,1	3,0	6,48	3,38	52,16	2,87	0,9
204	5,8	2,7	0,8	0,32	0,1	2,6	6,52	3,82	58,58	2,55	1,0
205	5,9	2,9	0,9	0,40	0,0	2,5	6,70	4,20	62,68	0,00	1,0
206	5,8	3,1	0,9	0,22	0,0	2,7	6,92	4,22	60,98	0,00	1,0
207	5,9	3,1	0,9	0,48	0,0	2,7	7,18	4,48	62,39	0,00	1,2
208	5,7	3,4	0,8	0,41	0,0	3,3	7,91	4,61	58,28	0,00	1,2
209	5,7	2,8	0,8	0,51	0,0	3,3	7,41	4,11	55,46	0,00	1,2
210	5,4	2,5	0,6	0,35	0,1	3,5	7,05	3,45	48,93	2,82	1,1
211	5,5	2,8	0,7	0,38	0,1	3,5	7,48	3,88	51,87	2,51	1,3
212	5,4	2,8	0,7	0,32	0,1	3,6	7,52	3,82	50,79	2,55	1,2
213	5,4	2,7	0,7	0,42	0,1	3,6	7,52	3,82	70,79	2,55	1,1
214	5,4	2,7	0,6	0,49	0,1	3,6	7,49	3,79	50,60	2,57	1,3
215	5,5	2,7	0,6	0,45	0,1	3,7	7,55	3,75	49,66	2,60	1,2
216	5,6	2,7	0,6	0,53	0,1	3,7	7,63	3,83	50,19	2,55	1,3
217	5,6	3,1	0,7	0,53	0,0	3,7	8,03	4,33	57,92	0,00	1,4
218	5,6	3,2	0,7	0,53	0,0	3,8	8,23	4,43	53,82	0,00	1,4
219	5,6	3,1	0,7	0,43	0,0	3,6	7,83	4,43	54,02	0,00	1,4
220	5,6	3,0	0,7	0,43	0,0	3,8	7,93	4,13	52,08	0,00	1,4
221	5,5	3,0	0,6	0,48	0,0	3,7	7,78	4,08	52,44	0,00	1,4
222	5,6	3,1	0,7	0,58	0,0	3,6	7,98	4,38	54,88	0,00	1,4
223	5,6	3,4	0,7	0,52	0,0	3,4	8,02	4,62	57,60	0,00	1,3
224	5,6	3,2	0,7	0,52	0,0	3,4	7,82	4,42	56,52	0,00	1,4
225	5,6	3,2	0,6	0,45	0,0	3,4	7,65	4,25	55,55	0,00	1,3
226	5,5	2,5	0,7	0,28	0,0	3,0	6,48	3,48	53,70	0,00	1,1
227	5,7	2,7	0,9	0,59	0,0	2,8	6,99	4,19	59,94	0,00	1,2
228	5,8	2,8	0,8	0,52	0,0	2,4	6,52	4,12	63,19	0,00	1,0
229	5,8	2,7	0,8	0,52	0,0	2,8	6,82	4,02	58,94	0,00	1,1
230	5,7	3,1	0,8	0,37	0,0	2,7	6,97	4,27	61,26	0,00	1,2
231	5,7	2,9	0,8	0,26	0,0	3,0	6,96	3,96	56,89	0,00	1,1
232	5,7	3,2	0,8	0,35	0,0	3,0	7,35	4,35	59,18	0,00	1,3
233	5,7	3,6	0,8	0,52	0,0	3,1	8,02	4,92	61,34	0,00	1,3
234	5,4	3,0	0,7	0,46	0,1	3,5	7,76	4,16	53,60	2,35	1,4
235	5,5	2,8	0,6	0,41	0,1	3,9	7,81	3,81	48,78	2,56	1,3
236	5,4	3,0	0,6	0,34	0,1	3,9	7,94	3,94	49,62	2,48	1,3
237	5,4	2,7	0,6	0,40	0,1	3,9	7,70	3,70	48,05	2,63	1,3
238	5,4	2,7	0,7	0,39	0,1	4,0	7,89	3,79	48,03	2,57	1,4
239	5,4	2,7	0,7	0,43	0,1	3,8	7,73	3,83	49,54	2,55	1,3
240	5,5	2,7	0,6	0,45	0,1	3,9	7,75	3,75	48,38	2,60	1,2
241	5,4	2,7	0,6	0,43	0,1	3,9	7,73	3,73	48,25	2,61	1,3
242	5,4	2,8	0,6	0,44	0,1	3,9	7,84	3,84	48,98	2,54	1,3
243	5,4	2,9	0,6	0,48	0,1	3,9	7,98	3,98	49,87	2,45	1,4
244	5,5	3,0	0,7	0,55	0,1	3,8	8,15	4,25	52,14	2,30	1,5
245	5,6	3,1	0,7	0,54	0,1	3,8	8,24	4,34	52,67	2,25	1,4
246	5,8	3,2	0,7	0,60	0,0	3,9	8,40	4,50	53,57	0,00	1,3
247	5,8	3,4	0,7	0,52	0,0	3,6	8,22	4,62	56,20	0,00	1,4
248	5,9	3,8	0,7	0,58	0,0	3,1	8,18	5,08	62,10	0,00	1,2
249	5,8	3,5	0,7	0,59	0,0	4,1	8,89	4,79	53,88	0,00	1,3
250	5,7	3,2	0,6	0,54	0,0	3,5	7,84	4,34	55,35	0,00	1,4

3.4.1. Evapotranspiração ótima da cultura, fator de água disponível e ponto de maturidade fisiológica

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método do Tanque Classe A (DOORENBOS et al., 1979), utilizando os dados de evaporação coletados no Posto Agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, campus de Piracicaba, São Paulo.

A evapotranspiração ótima foi estimada utilizando o procedimento apresentado por DOORENBOS et al. (1979).

O número de dias para que o ponto de maturidade fisiológica fosse atingido (t_{pmf}) foi determinado experimentalmente (Tabela 5). Adotando-se valores sugeridos por DRIESSEN (1986) de temperatura basal (T_b) e temperatura máxima (T_{max}) (Tabela 5), e a partir dos valores medidos de temperatura média do ar (Tabela 6), foi estimado o índice térmico (It) do cultivar de feijão utilizado.

Tabela 5 - Coeficientes de cultura, K_c (DOORENBOS et al., 1979); tempos de duração dos estádios fenológicos (t_i , dias) e do ciclo total (D_c , dias); e temperaturas basal (T_b , °C) e máxima (T_{max} , °C), para a cultura de feijão, utilizados no modelo.

t_1	t_2	t_3	t_4^a	t_5	D_c	T_b	T_{max}
dias						(°C)	
20 ^{b,c}	15 ^c	40 ^c	20 ^c	12 ^c	107	7,5 ^c	28
K_{c_1}	K_{c_3}	K_{c_5}	$Z_{e_{ini}}$	$Z_{r_{max}}$		f_{rad}	$Z_{e_{max}}$
			(mm)				(mm)
0,40	1,20	0,30	70 ^c	400		0,75 ^d	300

^a Ponto de maturidade fisiológica: 90 dias (t_{pmf}).

^b Período de germinação: intervalo de tempo entre a sementeira até que 50% das plântulas apareçam ao nível do solo (5 dias) (CIAT, 1981).

^c Centre for World Food Studies. Wageningen, Holanda.

^d fator de forma do sistema radicular (DRIESSEN, 1986).

Tabela 6 - Temperatura média diária do ar (T, °C), chuva (C, mm), evaporação do Tanque Classe A (ECA, mm), velocidade do vento (v, km/dia) e umidade relativa (UR, %) do ano de 1988, da região de Piracicaba, SP. FONTE: Posto Agrometeorológico do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Universidade de São Paulo).

janeiro						fevereiro					
dia	T	C	ECA	v	UR	dia	T	C	ECA	v	UR
1	26,40	0,0	10,32	312,0	62	1	24,90	0,0	8,06	304,8	71
2	25,60	0,0	7,83	276,0	65	2	25,00	0,0	6,91	292,8	72
3	25,20	0,0	6,72	204,0	65	3	24,70	0,0	6,78	196,8	71
4	26,10	0,0	8,55	216,0	69	4	24,50	21,1	7,13	163,2	82
5	26,60	33,9	0,00	266,4	74	5	23,00	0,0	3,46	292,8	78
6	23,40	66,0	0,00	184,8	90	6	23,70	0,0	4,13	196,8	81
7	23,80	0,0	4,48	261,6	78	7	23,10	8,3	4,24	276,0	81
8	20,30	0,5	0,73	160,8	88	8	22,10	1,9	2,25	153,6	87
9	22,75	17,1	4,03	199,2	83	9	23,50	86,7	0,00	139,2	81
10	23,60	7,8	4,87	172,8	83	10	22,50	6,4	1,80	136,8	87
11	23,70	0,0	7,33	151,2	71	11	22,30	0,0	4,39	292,8	79
12	24,10	0,0	5,95	168,0	70	12	22,90	0,0	6,35	300,0	72
13	26,00	0,1	7,04	240,0	69	13	24,50	39,2	0,00	199,2	71
14	27,10	0,0	7,92	220,8	70	14	24,25	1,1	3,93	196,8	82
15	27,45	1,0	6,20	156,0	78	15	25,85	0,7	5,38	170,4	74
16	27,50	0,4	7,79	192,0	69	16	25,70	12,4	4,81	146,4	79
17	28,20	0,0	7,63	163,2	70	17	25,30	1,3	6,53	218,4	78
18	28,60	3,2	10,73	240,0	68	18	26,10	0,0	5,89	165,6	76
19	28,10	0,0	7,63	206,4	66	19	25,80	18,5	0,00	240,0	86
20	28,70	0,0	7,58	163,2	67	20	23,50	1,5	1,41	180,0	87
21	28,20	6,8	8,39	211,2	80	21	25,50	3,0	6,67	232,8	73
22	27,40	0,0	7,87	199,2	71	22	25,20	0,0	7,56	223,2	72
23	25,55	4,5	7,17	204,0	77	23	25,80	0,0	7,14	194,4	71
24	26,70	1,1	4,73	196,8	81	24	25,10	0,0	5,29	163,2	74
25	27,00	38,4	0,00	163,2	75	25	26,30	66,6	0,00	144,0	74
26	27,00	0,0	7,25	175,2	70	26	25,20	0,0	3,46	132,0	80
27	27,60	0,0	7,14	182,4	69	27	26,00	19,1	7,81	172,8	77
28	28,20	0,0	8,46	189,6	72	28	25,90	15,5	7,33	105,6	83
29	28,20	4,5	6,10	192,0	72	29	26,00	25,0	0,00	189,6	81
30	26,60	0,0	7,37	213,6	76						
31	26,80	0,0	7,91	199,2	69						

Tabela 6 (Cont.)

março						abril					
dia	T	C	ECA	v	UR	dia	T	C	ECA	v	UR
1	25,90	26,5	0,00	206,4	84	1	24,85	2,2	4,69	184,8	76
2	25,20	36,3	0,00	184,8	83	2	24,50	0,0	5,11	292,8	76
3	25,20	1,7	3,41	153,6	84	3	24,60	0,0	4,92	175,2	72
4	25,95	0,0	5,66	216,0	75	4	24,10	0,0	5,87	141,6	73
5	25,30	7,7	4,39	139,2	76	5	24,40	0,0	5,49	259,2	70
6	26,05	0,0	6,09	194,4	75	6	23,90	0,0	4,84	127,2	70
7	26,30	0,0	7,39	285,6	72	7	24,40	6,6	4,59	223,2	77
8	24,40	0,0	7,51	314,4	66	8	23,10	0,0	2,88	261,6	75
9	24,00	0,0	6,69	345,6	71	9	20,70	0,0	6,02	290,4	68
10	25,10	0,0	6,56	249,6	67	10	21,40	0,0	3,82	129,6	66
11	25,20	0,0	6,76	252,0	69	11	21,90	1,8	3,97	117,6	80
12	23,25	0,0	7,99	256,8	61	12	24,00	11,6	4,34	170,4	76
13	23,10	0,0	6,39	168,0	61	13	22,00	38,4	0,00	199,2	86
14	24,00	0,0	6,48	122,4	64	14	22,40	0,0	4,07	223,2	74
15	25,20	0,0	4,69	148,8	72	15	22,10	0,0	4,21	112,8	68
16	26,20	43,5	0,00	201,6	72	16	20,40	17,6	3,14	124,8	78
17	22,10	30,2	0,00	115,2	88	17	21,55	0,0	3,83	218,4	75
18	24,00	48,4	0,00	196,8	86	18	22,90	24,1	0,00	218,4	77
19	25,45	0,0	5,13	184,8	72	19	20,50	3,1	1,52	213,6	85
20	24,05	0,0	6,76	292,8	64	20	22,80	0,3	1,14	112,8	82
21	22,40	0,0	7,34	148,8	65	21	24,60	1,6	2,27	122,4	79
22	22,80	0,0	5,58	177,6	65	22	25,20	0,0	3,41	156,0	77
23	22,70	0,0	5,50	175,2	62	23	24,70	0,0	5,20	242,4	72
24	23,80	0,0	5,93	160,8	61	24	24,40	0,0	3,70	139,2	74
25	24,45	0,0	6,11	134,4	63	25	24,30	23,6	9,33	175,2	80
26	24,55	0,0	7,44	196,8	58	26	24,50	4,2	4,09	129,6	76
27	24,65	0,0	4,91	156,0	69	27	25,10	0,0	5,24	266,4	71
28	25,20	0,0	7,77	144,0	65	28	22,00	4,9	4,14	391,2	72
29	25,10	0,0	5,73	158,4	69	29	18,05	0,0	2,79	326,4	74
30	26,10	0,0	5,31	108,0	67	30	19,25	0,0	4,63	292,8	70
31	26,25	0,0	6,00	170,4	64						

Tabela 6 (Cont.)

maio						junho					
dia	T	C	ECA	v	UR	dia	T	C	ECA	v	UR
1	20,50	0,0	3,27	146,4	71	1	10,90	0,0	2,57	235,2	64
2	21,30	11,4	6,70	134,4	75	2	12,65	0,0	1,98	136,8	66
3	23,20	0,0	3,93	156,0	63	3	13,10	13,0	3,43	220,8	76
4	22,60	13,5	5,50	201,6	75	4	13,30	0,3	2,73	451,2	64
5	19,70	0,9	1,95	184,8	79	5	9,70	0,0	2,18	158,4	59
6	19,35	0,0	2,70	213,6	76	6	12,30	0,0	2,64	160,8	63
7	21,85	0,0	3,00	110,4	69	7	16,80	0,0	1,79	201,6	66
8	21,15	0,0	4,16	252,0	73	8	21,20	0,0	3,31	187,2	66
9	22,60	0,0	3,81	182,4	70	9	21,10	0,0	3,76	172,8	65
10	17,90	0,0	3,33	129,6	66	10	19,75	0,0	3,04	240,0	73
11	19,30	0,0	3,96	148,8	62	11	17,10	0,0	2,00	192,0	70
12	20,30	8,9	5,36	247,2	62	12	19,40	0,0	2,75	156,0	67
13	21,70	0,0	2,99	146,4	70	13	19,25	11,7	5,41	256,8	61
14	21,60	0,0	4,03	208,8	72	14	16,00	0,0	2,32	206,4	78
15	21,60	0,0	3,34	160,8	71	15	14,90	0,0	2,54	172,8	69
16	22,50	0,0	4,32	170,4	71	16	12,80	0,0	3,37	343,2	63
17	18,70	31,1	0,00	187,2	87	17	14,40	0,0	3,11	204,0	62
18	19,60	0,0	3,15	91,2	79	18	13,65	0,0	2,39	192,0	64
19	21,50	0,0	2,55	151,2	73	19	14,70	0,0	3,02	240,0	57
20	21,50	0,0	1,55	98,4	73	20	14,20	1,3	1,45	148,8	67
21	23,00	6,7	3,38	148,8	74	21	20,30	0,0	2,36	216,0	66
22	23,40	3,2	3,06	148,8	71	22	16,20	0,0	2,46	144,0	65
23	21,05	0,0	2,28	151,2	78	23	20,90	0,0	4,77	266,4	50
24	18,00	3,7	0,66	160,8	82	24	18,30	0,5	3,33	240,0	65
25	18,90	0,0	2,29	117,6	70	25	15,60	0,0	1,91	266,4	69
26	17,30	0,0	2,53	151,2	70	26	15,45	0,0	3,74	276,0	67
27	17,25	0,0	2,86	72,0	71	27	17,30	0,0	2,18	201,6	65
28	17,45	0,0	1,13	93,6	75	28	18,80	0,0	2,87	192,0	63
29	17,60	18,4	3,17	115,2	80	29	21,25	0,0	2,67	136,8	65
30	17,90	6,5	1,13	170,4	82	30	20,25	0,0	3,71	199,2	59
31	15,90	0,0	2,63	192,0	68						

Tabela 6 (Cont.)

julho						agosto					
dia	T	C	ECA	v	UR	dia	T	C	ECA		UR
1	18,00	0,0	3,78	230,4	57	1	14,50	0,0	3,90	211,2	56
2	17,20	0,0	3,98	268,8	54	2	15,60	0,0	3,49	165,6	53
3	17,80	0,0	3,64	220,8	55	3	15,70	0,0	4,20	216,0	60
4	18,60	0,0	4,46	223,2	59	4	17,80	0,0	3,00	124,8	56
5	19,15	0,0	3,10	208,8	62	5	17,80	0,0	3,99	165,6	52
6	17,85	0,0	2,65	230,4	61	6	19,60	0,0	3,92	180,0	49
7	18,85	0,0	3,65	225,6	59	7	20,20	0,0	5,06	220,8	50
8	16,85	0,0	3,43	194,4	67	8	21,80	0,0	5,21	199,2	51
9	17,65	0,0	2,16	170,4	71	9	21,40	0,0	6,51	352,8	53
10	17,90	0,0	3,14	182,4	72	10	14,90	0,0	5,32	446,4	67
11	16,00	0,0	4,24	268,8	66	11	15,60	0,0	5,51	345,6	67
12	12,70	0,0	3,04	340,8	66	12	16,50	0,0	3,20	199,2	65
13	10,10	0,0	3,21	432,0	62	13	17,00	0,0	4,08	208,8	63
14	12,30	0,0	4,34	336,0	60	14	17,20	0,0	4,08	163,2	59
15	11,30	0,0	5,70	225,6	59	15	18,30	0,0	5,35	204,0	48
16	12,50	0,0	1,54	194,4	59	16	19,10	0,0	4,97	223,2	47
17	13,10	0,0	3,21	230,4	64	17	19,50	0,0	5,24	283,2	64
18	13,50	0,0	4,12	187,2	59	18	19,20	0,0	4,63	211,2	57
19	15,00	0,0	2,50	172,8	60	19	18,90	0,0	4,71	184,8	51
20	16,45	0,0	5,14	187,2	58	20	19,90	0,0	5,67	199,2	47
21	16,40	0,0	2,80	139,2	53	21	20,10	0,0	4,89	208,8	53
22	17,70	0,0	2,80	196,8	50	22	20,60	0,0	6,26	192,0	52
23	18,20	0,0	3,36	139,2	59	23	20,80	0,0	5,08	177,6	44
24	14,20	0,0	1,82	211,2	76	24	20,55	0,0	7,83	297,6	29
25	11,60	0,0	4,65	288,0	57	25	22,60	0,0	6,53	220,8	43
26	11,80	0,0	3,64	357,6	67	26	20,80	0,0	3,89	151,2	54
27	13,30	0,0	3,86	261,6	63	27	22,10	0,0	4,29	158,4	56
28	13,90	0,0	2,81	204,0	55	28	23,00	0,0	6,10	201,6	44
29	14,10	0,0	3,69	160,8	57	29	23,20	0,0	7,32	225,6	42
30	14,75	0,0	3,70	158,4	57	30	22,90	0,0	5,84	220,8	44
31	15,20	0,0	3,71	158,4	53	31	22,40	0,0	5,35	208,8	48

Tabela 6 (Cont.)

setembro						outubro					
dia	T	C	ECA	v	UR	dia	T	C	ECA	v	UR
1	23,00	0,0	6,75	321,6	48	1	23,30	0,0	6,20	156,0	52
2	18,70	0,0	5,18	364,8	69	2	25,20	0,2	6,53	244,8	48
3	19,00	0,0	5,04	304,8	64	3	26,25	0,0	9,00	273,6	47
4	19,25	0,0	4,67	225,6	62	4	26,10	0,0	7,54	319,2	62
5	19,65	0,0	6,45	276,0	62	5	23,30	2,7	1,68	175,2	69
6	20,10	0,0	4,50	172,8	50	6	23,35	0,0	7,47	384,0	58
7	21,00	0,0	6,58	208,8	40	7	23,05	0,0	7,65	268,8	58
8	21,65	0,0	6,09	201,6	45	8	22,75	0,0	7,78	211,2	45
9	22,90	0,0	7,55	201,6	34	9	23,65	0,0	6,72	280,8	47
10	23,35	0,0	10,10	314,4	24	10	21,30	0,0	7,42	487,2	56
11	24,80	0,0	7,59	271,2	34	11	21,90	1,9	4,74	312,0	57
12	24,95	0,0	8,62	225,6	38	12	18,80	41,2	0,00	146,4	77
13	26,50	0,0	9,41	276,0	34	13	19,60	1,7	2,02	225,6	73
14	22,80	2,7	1,27	304,8	72	14	20,25	0,0	6,20	211,2	55
15	15,90	0,4	1,26	336,0	72	15	21,15	0,0	8,45	252,0	41
16	16,30	0,0	2,29	379,2	73	16	21,80	0,0	5,40	400,8	56
17	17,10	1,0	0,84	266,4	76	17	20,20	0,0	3,78	292,8	69
18	19,50	0,0	3,06	230,4	68	18	22,15	0,0	5,36	187,2	60
19	21,60	0,0	6,69	280,8	64	19	24,30	47,9	0,00	408,0	65
20	23,70	0,0	9,00	223,2	60	20	21,00	1,9	0,66	264,0	75
21	24,80	0,0	6,48	213,6	57	21	22,80	0,0	4,74	292,8	65
22	25,05	0,0	6,17	206,4	49	22	20,00	9,3	0,00	278,4	73
23	26,90	0,0	9,20	235,2	36	23	18,40	4,3	2,84	153,6	84
24	27,30	0,0	7,59	0,0	36	24	21,70	0,0	5,30	184,8	61
25	28,50	0,0	8,32	218,4	40	25	22,70	39,8	0,00	367,2	73
26	28,30	0,0	9,16	216,0	36	26	21,20	17,9	0,00	276,0	77
27	28,30	0,0	9,58	283,2	49	27	16,50	0,4	0,81	369,6	70
28	23,50	0,0	8,68	525,6	62	28	19,60	0,0	3,28	223,2	66
29	19,70	0,0	4,48	367,2	66	29	22,30	0,0	4,03	177,6	68
30	21,60	0,0	4,82	194,4	66	30	22,30	6,7	3,84	249,6	78
						31	24,80	21,0	0,00	336,0	67

Tabela 6 (Cont.)

novembro						dezembro					
dia	T	C	ECA	v	UR	dia	T	C	ECA	v	UR
1	22,20	3,0	0,94	357,6	73	1	19,65	1,1	1,62	194,4	74
2	17,60	0,0	6,52	516,0	61	2	22,30	0,0	3,32	228,0	74
3	19,30	0,0	5,29	357,6	59	3	21,50	0,0	7,99	348,0	56
4	19,00	0,0	7,31	516,0	56	4	23,00	0,0	7,08	204,0	57
5	17,80	0,2	5,46	412,8	57	5	24,05	0,0	8,49	220,8	56
6	20,80	0,0	6,93	319,2	61	6	23,05	0,0	9,60	249,6	53
7	21,70	0,4	4,78	223,2	68	7	22,90	0,0	7,26	240,0	56
8	22,90	0,0	6,38	182,4	54	8	23,90	0,0	9,51	242,4	47
9	24,80	0,0	8,33	211,2	45	9	23,70	0,0	8,91	268,8	53
10	26,30	0,0	8,07	225,6	57	10	24,20	0,0	7,73	264,0	58
11	26,00	0,4	6,81	192,0	61	11	25,65	0,0	7,19	192,0	58
12	26,60	16,1	12,25	374,4	49	12	25,80	0,0	8,52	216,0	55
13	22,70	0,6	1,84	211,2	72	13	25,15	10,3	3,25	254,4	80
14	23,70	0,0	4,46	232,8	67	14	25,40	0,6	3,03	196,8	76
15	23,30	0,0	8,18	465,6	60	15	26,75	0,0	7,90	273,6	61
16	24,10	0,0	8,15	352,8	59	16	25,70	0,0	10,49	326,4	51
17	23,50	0,0	7,42	237,6	59	17	25,80	1,1	7,16	252,0	54
18	23,70	0,6	5,06	160,8	59	18	25,30	0,0	7,45	208,8	58
19	23,80	40,5	0,00	254,4	74	19	25,30	0,2	7,27	300,0	66
20	22,10	4,5	1,36	230,4	80	20	25,40	68,9	0,00	280,8	77
21	23,60	3,2	5,10	304,8	73	21	20,80	1,3	1,59	304,8	80
22	25,00	9,4	6,34	261,6	74	22	23,90	0,9	4,19	165,6	67
23	25,00	0,0	8,56	312,0	61	23	24,20	50,5	0,00	204,0	78
24	22,00	0,0	7,55	321,6	56	24	22,40	16,9	8,58	208,8	78
25	21,70	0,0	7,22	218,4	56	25	20,80	44,4	0,00	144,0	87
26	23,00	7,1	0,00	187,2	60	26	23,00	3,4	0,00	180,0	79
27	22,30	0,0	7,03	338,4	66	27	25,20	0,8	3,42	117,6	60
28	20,10	0,0	8,21	504,0	61	28	25,60	0,0	5,78	192,0	66
29	20,20	0,0	7,85	247,2	55	29	26,15	0,0	5,99	242,4	70
30	21,40	0,0	7,53	230,4	55	30	24,80	0,0	4,05	216,0	69
						31	22,80	0,0	2,43	153,6	76

a. Dados necessários ao modelo;
 c. Expressões de cálculo dos diversos parâmetros do modelo.

Figura 7 - Fluxograma para a determinação da evapotranspiração ótima da cultura, do fator de água disponível crítico e do ponto de maturidade fisiológica (ver itens 2.1., 2.2., 2.7. e 2.12).

3.4.2. Valores iniciais da armazenagem e negativo acumulado

Os critérios utilizados para estimar os valores iniciais de armazenamento e negativo acumulado estão descritos na Tabela 7 e nas Figuras 8 e 9.

Tabela 7 - Critérios utilizados para estimar os valores iniciais de armazenagem e negativo acumulado.

item	critério
.período	.5 dias
.evapotranspiração de referência	.método do Tanque Classe A
.Coeficiente do tanque (Kp)	.DOORENBOS & PRUITT (1975)
.valores de evaporação do Tanque Classe A	.evaporação acumulada (mm/período) ^a
.início do balanço hídrico cíclico anual	.item 2.8.3.
.coeficiente de cultura	.constante e igual ao valor inicial da cultura de feijão
.profundidade de molhamento	.constante e igual ao valor máximo da profundidade efetiva do sistema radicular do feijoeiro
.balanço hídrico	.método de THORNTHWAITE & MATHER (1955)

^a Departamento de Física e Meteorologia. Posto agrometeorológico (Tabela 6).

Entende-se por profundidade máxima de molhamento a profundidade que a água pode atingir no perfil do solo após uma chuva ou irrigação. Essa profundidade é sempre superior, ou no mínimo igual, à profundidade máxima efetiva do sistema radicular.

Figura 8 - Fluxograma para determinação do valor inicial (data de semeadura) do negativo acumulado por unidade de capacidade de água disponível, na k-ésima parcela experimental utilizando modificação proposta por DOURADO NETO et al. (1991) para iniciar o balanço hídrico pelo método THORNTHWAITE & MATHER (1955) (ver item 2.8.3.).

Figura 8

Figura 9 - Fluxograma para determinação da armazenagem e negativo acumulado, segundo equações propostas por THORNTHWAITE & MATHER (1955), na k -ésima parcela experimental (ver item 2.8.3.) utilizando critério de iniciar o balanço hídrico proposto por DOURADO NETO et al. (1991).

Figura 10 - Fluxograma para estimativa de α , m , n , θ_s e θ_r da equação de GENUCHTEN (1980) de acordo com o item 2.11.

a. Dados necessários ao modelo;

c. Expressões de cálculo dos diversos parâmetros do modelo.

Figura 11 - Fluxograma para determinação dos valores iniciais (data de semeadura) da armazenagem ($Arm_{o,k}$) e do negativo acumulado ($L_{o,k}$), na k-ésima parcela experimental, utilizando a modificação proposta por DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1991) na equação da hipótese básica do método de THORNTHWAITE & MATHER (1955) (ver item 2.9).

a. Dados necessários ao modelo;

c. Expressões de cálculo dos diversos parâmetros do modelo.

Figura 12 - Fluxograma para determinação dos valores da armazenagem e do negativo acumulado no j -ésimo dia após a semeadura na k -ésima parcela experimental, utilizando a modificação de DOURADO NETO & JONG-van-LIER (1992c) do método de THORNTHWAITE & MATHER (1955) (ver item 2.9).

3.4.3. Profundidade efetiva do sistema radicular

Conforme mostra a Figura 3, assumiu-se, no presente trabalho, que a variação da profundidade efetiva do sistema radicular em função da idade da planta, possui três etapas.

A primeira etapa refere-se ao crescimento da profundidade efetiva do sistema radicular, a partir de um valor inicial correspondente ao dia do término do período de germinação, até um valor máximo correspondente ao dia em que termina o terceiro estágio de desenvolvimento vegetativo, segundo as funções sigmoidal, potencial e linear.

Na segunda etapa, coincidindo com o quarto estágio de desenvolvimento vegetativo, a profundidade efetiva do sistema radicular permanece constante e igual ao valor máximo.

Na terceira etapa assume-se, para efeito de uso consuntivo, decrescimento também segundo as funções sigmoidal, potencial e linear, a partir do valor máximo, correspondente ao dia em que foi atingido o ponto de maturidade fisiológica, até o valor inicial correspondente ao dia em que termina o quinto e último estágio de desenvolvimento vegetativo.

LEGENDA:

Figura 14

a. Dados necessários ao modelo;

c. Expressões de cálculo dos diversos parâmetros do modelo.

Figura 13 - Fluxograma referente ao procedimento de determinação da profundidade efetiva do sistema radicular no j -ésimo dias após a semeadura na k -ésima parcela experimental ($Ze_{j,k}$) (ver item 2.5.).

3.5. Aferição do modelo

Para aferição do modelo de estimativa de armazenagem (Figura 14) foram determinados sistematicamente nos 250 pontos da área experimental os atributos físicos: curva de retenção (MORAES, 1991) (Tabela 9) e potencial mátrico medido em 77 dias (Tabelas 10) durante o ciclo da cultura através de tensiômetros (DOURADO NETO, 1989).

Os parâmetros da equação de GENUCHTEN (1980) foram determinados pelo ajuste desta equação aos dados experimentais dos 250 pontos de amostragem obtidos por MORAES (1991), pelo método de extrapolação proposto por JONG-van-LIER & DOURADO NETO (1991) e sem relação de dependência entre os parâmetros m e n , utilizando recursos computacionais.

Tabela 8 - Número de ordem dos 22 períodos (5 dias/período) considerados durante o ciclo da cultura de feijão.

mês	dia	período	mês	dia	período
maio	1- 5	1	junho	25-29	12
	6-10	2		30- 4	13
	11-15	3	julho	5- 9	14
	16-20	4		10-14	15
	21-25	5		15-19	16
	26-30	6		20-24	17
	31- 4	7		25-29	18
junho	5- 9	8	agosto	30- 3	19
	10-14	9		4- 8	20
	15-19	10		9-13	21
	20-24	11		13-16	22

Os valores de potencial mátrico ($\psi_{m,j,k}$) no j -ésimo dia após a semeadura, na k -ésima parcela experimental, foram calculados conforme expressão proposta por DOURADO NETO (1989).

Os valores de umidade ($\theta_{j,k}$) foram estimados utilizando a equação de GENUCHTEN (1980).

LEGENDA:

Figura 14 - Fluxograma referente à comparação (primeira aferição do modelo) entre os valores de umidade, à base de volume, estimados através do balanço hídrico ($\theta_{j,k}$) e os determinados a através de tensiômetro e curva de retenção ($\theta_{j,k}^t$).

Tabela 9 - Umidade, à base de volume, nos diferentes pontos experimentais das 250 curvas de retenção elaboradas por MORAES (1991).

pon to	potencial mátrico (cca)							
	-5	-10	-60	-100	-306	-816	-3060	-15300
1	0,4869	0,4707	0,4043	0,3945	0,3590	0,3491	0,2820	0,3000
2	0,4973	0,4784	0,4067	0,3949	0,3605	0,3551	0,2932	0,3016
3	0,4757	0,4563	0,4168	0,4104	0,3770	0,3551	0,3172	0,3223
4	0,4729	0,4676	0,4259	0,4173	0,3908	0,3470	0,3012	0,3202
5	0,4740	0,4748	0,4244	0,4159	0,3875	0,3495	0,2958	0,3222
6	0,4835	0,4780	0,4187	0,4071	0,3718	0,3287	0,2850	0,3212
7	0,4586	0,4569	0,4141	0,4046	0,3738	0,3439	0,2922	0,3162
8	0,4744	0,4597	0,4385	0,4342	0,4136	0,3906	0,3406	0,3611
9	0,4993	0,5072	0,4408	0,4304	0,3974	0,3864	0,3110	0,3375
10	0,4484	0,4510	0,4077	0,3970	0,3741	0,3402	0,2853	0,3087
11	0,5021	0,4790	0,4321	0,4196	0,4019	0,3600	0,3186	0,3188
12	0,4958	0,4713	0,4452	0,4355	0,4031	0,3796	0,3275	0,3476
13	0,4881	0,4863	0,4408	0,4107	0,4041	0,3773	0,3678	0,2896
14	0,4883	0,4843	0,4419	0,4318	0,4035	0,3677	0,3279	0,3442
15	0,5158	0,5018	0,4413	0,4289	0,3923	0,3884	0,3370	0,3378
16	0,5074	0,5023	0,4431	0,4432	0,4114	0,4123	0,3513	0,3431
17	0,5128	0,5021	0,4308	0,4175	0,3824	0,3720	0,3412	0,3314
18	0,4748	0,4795	0,4330	0,4246	0,3948	0,3874	0,3439	0,3397
19	0,5239	0,5185	0,4440	0,4235	0,3911	0,3569	0,2923	0,2637
20	0,4861	0,4909	0,4510	0,4357	0,4311	0,4610	0,3998	0,2898
21	0,4866	0,4417	0,4292	0,4180	0,4011	0,3955	0,3090	0,3165
22	0,4928	0,4963	0,4554	0,4455	0,4349	0,3966	0,3202	0,2819
23	0,4690	0,4716	0,4290	0,4156	0,4189	0,3975	0,4021	0,2848
24	0,4916	0,4968	0,4401	0,4205	0,4214	0,3642	0,3504	0,2935
25	0,4879	0,4875	0,4232	0,4084	0,3893	0,3380	0,3081	0,2654
26	0,4437	0,4505	0,3908	0,3734	0,3526	0,3203	0,2863	0,2460
27	0,4458	0,4572	0,4035	0,3891	0,3852	0,3476	0,3036	0,2603
28	0,4694	0,4706	0,4286	0,4193	0,4051	0,3630	0,3344	0,2767
29	0,4494	0,4474	0,3902	0,3736	0,3631	0,3610	0,2956	0,2419
30	0,4491	0,4590	0,4182	0,4037	0,3825	0,3817	0,3347	0,2576
31	0,4514	0,4559	0,3995	0,3938	0,3800	0,3260	0,3073	0,2332
32	0,4561	0,4619	0,4158	0,4079	0,3848	0,3473	0,3220	0,2622
33	0,4973	0,4922	0,4307	0,4198	0,4016	0,3475	0,3516	0,2586
34	0,5236	0,5259	0,4550	0,4501	0,4346	0,3862	0,3490	0,2857
35	0,4816	0,4827	0,4331	0,4184	0,4002	0,3472	0,3259	0,2653
36	0,4461	0,4596	0,4060	0,4052	0,3702	0,3544	0,2919	0,3111
37	0,4735	0,4824	0,4329	0,4227	0,4013	0,3563	0,3184	0,3356
38	0,4769	0,4757	0,4167	0,3883	0,3845	0,3707	0,3372	0,2951
39	0,4647	0,4737	0,4194	0,4120	0,3896	0,3309	0,2988	0,3148
40	0,4488	0,4595	0,4085	0,4021	0,3687	0,3728	0,2961	0,3088
41	0,4691	0,4803	0,4281	0,4193	0,4035	0,3818	0,3181	0,3352
42	0,4795	0,4708	0,4104	0,4097	0,3905	0,3400	0,3073	0,3149
43	0,4910	0,4798	0,3925	0,3797	0,3670	0,3716	0,2980	0,3090
44	0,4771	0,4885	0,4444	0,4403	0,4189	0,3677	0,3234	0,3269
45	0,4701	0,4800	0,4228	0,4097	0,4240	0,4083	0,3151	0,3240
46	0,4569	0,4675	0,4265	0,4185	0,3900	0,3659	0,3198	0,3259
47	0,4758	0,4891	0,4322	0,4178	0,4043	0,3660	0,3077	0,3262
48	0,4704	0,4774	0,4344	0,4419	0,3892	0,3594	0,3094	0,3257
49	0,4829	0,4932	0,4329	0,4187	0,4099	0,3845	0,3219	0,3362
50	0,4797	0,4904	0,4372	0,4228	0,3977	0,3383	0,3023	0,3131

Tabela 9 (cont.)

pon to	potencial mátrico (cca)							
	-5	-10	-60	-100	-306	-816	-3060	-15300
51	0,4589	0,4706	0,4192	0,4190	0,3874	0,3547	0,3044	0,3163
52	0,4985	0,5123	0,4565	0,4464	0,2382	0,3702	0,3171	0,3222
53	0,4760	0,4795	0,4263	0,3962	0,3814	0,3713	0,3598	0,2877
54	0,4507	0,4450	0,3920	0,3671	0,3577	0,3616	0,3507	0,2471
55	0,4875	0,4918	0,4112	0,3752	0,3502	0,3288	0,3036	0,2470
56	0,4647	0,4538	0,4209	0,4067	0,3979	0,3729	0,3383	0,2732
57	0,4635	0,4473	0,4164	0,4009	0,3834	0,3606	0,3391	0,2659
58	0,4744	0,4753	0,4202	0,4055	0,3985	0,3838	0,3590	0,2865
59	0,4708	0,4716	0,4193	0,3982	0,3845	0,3680	0,3351	0,2748
60	0,4674	0,4711	0,4211	0,4063	0,3941	0,3829	0,3691	0,2910
61	0,4675	0,4661	0,4118	0,4033	0,3909	0,3711	0,3391	0,2656
62	0,4898	0,4909	0,4243	0,3978	0,3872	0,3799	0,3740	0,2753
63	0,5027	0,4996	0,4411	0,4040	0,3907	0,3529	0,3169	0,2731
64	0,4591	0,4575	0,4134	0,3931	0,3901	0,3720	0,3481	0,2688
65	0,4612	0,4690	0,4121	0,3988	0,3945	0,3896	0,3663	0,2807
66	0,5079	0,5108	0,4459	0,4113	0,4015	0,3712	0,3547	0,2605
67	0,4452	0,4421	0,3989	0,3786	0,3669	0,3542	0,3302	0,2472
68	0,5082	0,5054	0,4493	0,4331	0,3895	0,3776	0,3547	0,2646
69	0,4732	0,4717	0,4311	0,4092	0,3656	0,3456	0,3200	0,2426
70	0,4618	0,4634	0,4302	0,4111	0,3915	0,3742	0,3251	0,3397
71	0,4766	0,4792	0,4385	0,4125	0,3923	0,3671	0,3407	0,3186
72	0,4750	0,4774	0,4387	0,4169	0,4017	0,3825	0,3556	0,3290
73	0,4769	0,4792	0,4294	0,4057	0,3863	0,3778	0,3435	0,3376
74	0,4714	0,4736	0,4018	0,3754	0,3554	0,3449	0,3007	0,3132
75	0,6846	0,6861	0,3962	0,3717	0,3447	0,3249	0,2695	0,2847
76	0,4735	0,4775	0,4177	0,3950	0,3681	0,3413	0,2961	0,3190
77	0,4962	0,4927	0,4531	0,4281	0,3982	0,3669	0,3260	0,3412
78	0,4349	0,4352	0,3990	0,3788	0,3621	0,3442	0,3016	0,3175
79	0,4550	0,4572	0,4139	0,3941	0,3747	0,3497	0,3134	0,3217
80	0,4677	0,4712	0,4329	0,4091	0,3813	0,3520	0,3573	0,3538
81	0,5035	0,5035	0,4644	0,4437	0,4144	0,3796	0,3275	0,3386
82	0,4662	0,4664	0,4304	0,4157	0,4001	0,3756	0,3296	0,3458
83	0,4178	0,4085	0,3825	0,3685	0,3606	0,3668	0,2834	0,2931
84	0,4747	0,4717	0,4498	0,4369	0,4098	0,3728	0,3345	0,3485
85	0,4969	0,5044	0,4511	0,4252	0,4011	0,3835	0,3311	0,3466
86	0,5098	0,5150	0,4580	0,4237	0,4076	0,3604	0,3580	0,3357
87	0,4789	0,4800	0,4304	0,4058	0,3812	0,3584	0,3415	0,2848
88	0,4999	0,4925	0,4330	0,3977	0,3977	0,3720	0,3594	0,3106
89	0,4552	0,4626	0,4366	0,4147	0,3878	0,3659	0,3382	0,2887
90	0,4713	0,4484	0,3871	0,3651	0,3465	0,3472	0,3332	0,2557
91	0,4492	0,4472	0,4067	0,3864	0,3649	0,3612	0,3619	0,2876
92	0,4549	0,4512	0,4035	0,3811	0,3604	0,3448	0,3491	0,2987
93	0,4530	0,4443	0,4040	0,3846	0,3625	0,3492	0,3658	0,2897
94	0,4458	0,4388	0,4416	0,4163	0,3756	0,3458	0,3419	0,2639
95	0,4341	0,4262	0,4239	0,3987	0,3746	0,3604	0,3556	0,3059
96	0,4365	0,4292	0,4136	0,3947	0,3782	0,3842	0,3589	0,2988
97	0,4429	0,4492	0,4020	0,3816	0,3655	0,3516	0,3426	0,2864
98	0,4776	0,4844	0,4395	0,4094	0,3828	0,3612	0,3414	0,2695
99	0,4737	0,4787	0,4156	0,3910	0,3700	0,3501	0,3257	0,2922
100	0,4427	0,4571	0,4110	0,3902	0,3712	0,3706	0,3517	0,3199

Tabela 9 (cont.)

pon to	potencial mátrico (cca)							
	-5	-10	-60	-100	-306	-816	-3060	-15300
101	0,4914	0,4914	0,4136	0,3920	0,3723	0,3758	0,3390	0,3086
102	0,4959	0,4936	0,4464	0,4259	0,4003	0,3737	0,3405	0,3028
103	0,4695	0,4414	0,3463	0,3274	0,3047	0,2942	0,2670	0,2316
104	0,4816	0,4769	0,4125	0,3887	0,3577	0,3457	0,3164	0,2926
105	0,4548	0,4548	0,4012	0,3826	0,3599	0,3497	0,3242	0,2926
106	0,4657	0,4635	0,4084	0,3889	0,3791	0,3423	0,3207	0,2904
107	0,4656	0,4662	0,4197	0,4015	0,3758	0,3438	0,3160	0,2845
108	0,4755	0,4763	0,4086	0,3882	0,3749	0,3501	0,3175	0,2868
109	0,4642	0,4636	0,4203	0,4049	0,3868	0,3636	0,3355	0,3007
110	0,4768	0,4753	0,4246	0,4069	0,3874	0,3575	0,3261	0,2965
111	0,4687	0,4678	0,4242	0,4059	0,3816	0,3639	0,3329	0,3025
112	0,4717	0,4701	0,4144	0,3948	0,3692	0,3603	0,3306	0,2979
113	0,4294	0,4300	0,3836	0,3695	0,3524	0,3465	0,3131	0,2806
114	0,4267	0,4263	0,3752	0,3567	0,3400	0,3311	0,3033	0,2589
115	0,4441	0,4434	0,3724	0,3540	0,3312	0,3247	0,2959	0,2607
116	0,4301	0,4286	0,3723	0,3564	0,3381	0,3239	0,3064	0,2644
117	0,4720	0,4607	0,3799	0,3604	0,3452	0,3174	0,2800	0,2523
118	0,4782	0,4737	0,4133	0,3799	0,3651	0,3449	0,3323	0,2444
119	0,4296	0,4292	0,3922	0,3654	0,3595	0,3330	0,3405	0,2520
120	0,4848	0,4813	0,4062	0,3781	0,3682	0,3265	0,3107	0,2593
121	0,4581	0,4545	0,4007	0,3832	0,3765	0,3506	0,3185	0,2767
122	0,5004	0,4980	0,4080	0,3781	0,3702	0,3522	0,3391	0,2785
123	0,5030	0,5010	0,4317	0,4028	0,3859	0,3890	0,3501	0,2682
124	0,4519	0,4560	0,3974	0,3677	0,3642	0,3611	0,3256	0,2768
125	0,4513	0,4464	0,3745	0,3622	0,3447	0,3507	0,2870	0,2367
126	0,4430	0,4466	0,4127	0,3998	0,3838	0,3063	0,2760	0,2904
127	0,4612	0,4617	0,4068	0,3877	0,3629	0,3393	0,2929	0,2807
128	0,5008	0,4942	0,4152	0,3933	0,3710	0,3401	0,2964	0,2905
129	0,5234	0,5171	0,4332	0,4074	0,3856	0,3815	0,3112	0,3015
130	0,4474	0,4412	0,3960	0,3749	0,3541	0,3232	0,2821	0,2759
131	0,4352	0,4212	0,3922	0,3768	0,3500	0,3153	0,2766	0,2686
132	0,4997	0,4926	0,4100	0,4090	0,3507	0,3204	0,2749	0,2689
133	0,4138	0,4111	0,3856	0,3763	0,3582	0,3318	0,2884	0,2879
134	0,4834	0,4849	0,4310	0,4115	0,3782	0,3507	0,3084	0,3032
135	0,4383	0,4412	0,3891	0,3768	0,3687	0,3480	0,2942	0,2808
136	0,4597	0,4554	0,4021	0,3883	0,3738	0,3468	0,3061	0,3019
137	0,4373	0,3948	0,3478	0,3413	0,3447	0,3261	0,2890	0,2657
138	0,5113	0,5093	0,4346	0,3991	0,3934	0,3746	0,3473	0,2753
139	0,4563	0,4539	0,3960	0,3735	0,3538	0,3430	0,3355	0,2908
140	0,4396	0,4396	0,3883	0,3714	0,3496	0,3382	0,3403	0,2489
141	0,4753	0,4765	0,4022	0,3698	0,3488	0,3315	0,2867	0,2890
142	0,4304	0,4358	0,3941	0,3820	0,3597	0,3443	0,3099	0,3187
143	0,4517	0,4577	0,4001	0,3770	0,3519	0,3315	0,2975	0,2998
144	0,4530	0,4696	0,3885	0,3647	0,3361	0,3200	0,2829	0,2859
145	0,4730	0,4632	0,3918	0,3841	0,3537	0,3323	0,2995	0,2818
146	0,4595	0,4593	0,4194	0,4098	0,3818	0,3480	0,3103	0,3026
147	0,4567	0,4519	0,4054	0,3887	0,3623	0,3370	0,2984	0,2936
148	0,4456	0,4377	0,4037	0,3926	0,3682	0,3341	0,2987	0,2928
149	0,4385	0,4348	0,4123	0,3894	0,3637	0,3321	0,2911	0,2828
150	0,4351	0,4263	0,3939	0,3756	0,3445	0,3146	0,2825	0,2652

Tabela 9 (cont.)

pon to	potencial mátrico (cca)							
	-5	-10	-60	-100	-306	-816	-3060	-15300
151	0,4756	0,4719	0,4192	0,3925	0,3991	0,3626	0,3163	0,3281
152	0,4847	0,4693	0,3959	0,3735	0,3481	0,3338	0,2883	0,3028
153	0,4825	0,4747	0,4215	0,3987	0,3831	0,3728	0,3052	0,3153
154	0,5046	0,5056	0,4356	0,4097	0,3750	0,3506	0,3157	0,3106
155	0,4606	0,4597	0,4103	0,3862	0,3641	0,3412	0,2815	0,2709
156	0,4375	0,4321	0,3922	0,3716	0,3567	0,3082	0,2613	0,2817
157	0,4873	0,4888	0,4166	0,3920	0,3484	0,3249	0,2785	0,2806
158	0,4745	0,4757	0,4163	0,3974	0,3659	0,3346	0,2867	0,2929
159	0,4529	0,4422	0,3943	0,3835	0,3746	0,3301	0,2887	0,3052
160	0,5170	0,5122	0,4406	0,4196	0,3840	0,3564	0,3005	0,3125
161	0,4702	0,4470	0,4008	0,3870	0,3737	0,3549	0,2942	0,3030
162	0,5082	0,5076	0,4304	0,4103	0,3778	0,3708	0,3099	0,3174
163	0,4744	0,4717	0,4117	0,3819	0,3724	0,3581	0,3528	0,2646
164	0,4733	0,4722	0,4250	0,4084	0,3858	0,3510	0,3132	0,3164
165	0,4445	0,4422	0,3919	0,3688	0,3448	0,3592	0,2755	0,3059
166	0,4664	0,4550	0,4066	0,3883	0,3774	0,3610	0,3001	0,3316
167	0,4632	0,4624	0,4143	0,3991	0,3822	0,3619	0,3197	0,3228
168	0,4571	0,4494	0,4011	0,3866	0,3642	0,3456	0,3011	0,3182
169	0,4382	0,4313	0,3808	0,3646	0,3521	0,3317	0,2834	0,2965
170	0,4616	0,4592	0,4014	0,3826	0,3535	0,3320	0,2859	0,3163
171	0,5028	0,5004	0,4350	0,4113	0,3630	0,3317	0,2793	0,2777
172	0,4258	0,4121	0,3553	0,3485	0,3329	0,3170	0,2756	0,3034
173	0,4847	0,4842	0,4120	0,3935	0,3628	0,3287	0,2750	0,3141
174	0,5078	0,5023	0,4473	0,4295	0,3939	0,3663	0,3213	0,3396
175	0,3742	0,3882	0,3960	0,4087	0,3617	0,3254	0,2786	0,3084
176	0,4646	0,4612	0,4192	0,4070	0,3846	0,3613	0,3158	0,3375
177	0,4717	0,4701	0,4270	0,4125	0,3893	0,3671	0,3186	0,3387
178	0,4819	0,4825	0,4356	0,4202	0,4011	0,3712	0,3198	0,3379
179	0,4105	0,4112	0,3881	0,3757	0,3642	0,3418	0,2957	0,3195
180	0,4252	0,4240	0,3882	0,3766	0,3518	0,3353	0,2905	0,3067
181	0,4434	0,4197	0,4031	0,3995	0,3717	0,3335	0,2806	0,2917
182	0,4821	0,4596	0,4168	0,4088	0,3869	0,3616	0,3087	0,3327
183	0,4739	0,4726	0,4018	0,3869	0,3523	0,3242	0,2767	0,3046
184	0,5049	0,4961	0,4242	0,4053	0,3749	0,3490	0,3009	0,3150
185	0,4971	0,4910	0,4203	0,4065	0,3797	0,3387	0,2892	0,3137
186	0,4500	0,4398	0,3813	0,3798	0,3648	0,3362	0,2857	0,3085
187	0,5022	0,4888	0,4145	0,4031	0,3829	0,3431	0,2956	0,3190
188	0,4912	0,4831	0,4106	0,3898	0,3822	0,3590	0,3352	0,2982
189	0,4579	0,4430	0,3849	0,3788	0,3582	0,3185	0,2697	0,2896
190	0,5065	0,5018	0,4319	0,4158	0,3729	0,3365	0,2883	0,3090
191	0,4829	0,4793	0,4040	0,3871	0,3456	0,3147	0,2694	0,2933
192	0,4948	0,4951	0,4309	0,4152	0,3791	0,3526	0,2986	0,3253
193	0,4700	0,4738	0,4145	0,4104	0,3560	0,3138	0,2645	0,2945
194	0,4881	0,4834	0,4216	0,4036	0,3828	0,3263	0,2820	0,3069
195	0,4837	0,4831	0,4234	0,4086	0,3844	0,3426	0,2977	0,3222
196	0,4863	0,4863	0,4209	0,4018	0,3739	0,3374	0,2922	0,3229
197	0,5364	0,5167	0,4274	0,4196	0,3577	0,3277	0,2843	0,3111
198	0,5241	0,5182	0,4397	0,4141	0,3906	0,3345	0,2885	0,3081
199	0,4924	0,4914	0,4304	0,4189	0,3927	0,3537	0,3032	0,3272
200	0,5068	0,5022	0,4122	0,3915	0,3575	0,3337	0,2872	0,3095

Tabela 9 (cont.)

pon to	potencial mátrico (cca)							
	-5	-10	-60	-100	-306	-816	-3060	-15300
201	0,4374	0,4326	0,3900	0,3784	0,3606	0,3281	0,2859	0,3114
202	0,4096	0,4091	0,3750	0,3743	0,3499	0,3216	0,2938	0,3080
203	0,4230	0,4205	0,3864	0,3889	0,3583	0,3322	0,3006	0,3095
204	0,4367	0,4362	0,4003	0,3981	0,3548	0,3271	0,2960	0,3034
205	0,4154	0,4180	0,3864	0,3828	0,3553	0,3127	0,2859	0,3015
206	0,4567	0,4555	0,4058	0,4081	0,3736	0,2828	0,2511	0,2713
207	0,4536	0,4489	0,3796	0,3809	0,3449	0,2874	0,2565	0,2712
208	0,4875	0,4847	0,4052	0,3966	0,3710	0,2980	0,2739	0,2907
209	0,4666	0,4533	0,4084	0,4194	0,3735	0,3060	0,2871	0,2981
210	0,4613	0,4646	0,4219	0,4138	0,3987	0,3326	0,3110	0,3279
211	0,4616	0,4620	0,4251	0,4138	0,3630	0,3182	0,3025	0,3168
212	0,4471	0,4460	0,3956	0,3901	0,3531	0,3014	0,2752	0,2858
213	0,4488	0,4417	0,3733	0,3548	0,3457	0,3202	0,2807	0,2507
214	0,5049	0,5028	0,4600	0,4474	0,4243	0,3674	0,3144	0,3268
215	0,4661	0,4584	0,4145	0,4189	0,3737	0,3210	0,3020	0,3112
216	0,4480	0,4436	0,4095	0,3971	0,3571	0,3090	0,2987	0,3050
217	0,4824	0,4799	0,4191	0,4188	0,3770	0,3217	0,3021	0,3176
218	0,4474	0,4454	0,3983	0,4036	0,3343	0,3044	0,2832	0,2941
219	0,4959	0,4994	0,4078	0,4072	0,3711	0,3217	0,2915	0,2928
220	0,4663	0,4632	0,4271	0,4042	0,3936	0,3624	0,3204	0,2810
221	0,4575	0,4590	0,4333	0,4134	0,4142	0,4029	0,3136	0,2955
222	0,4640	0,4597	0,4061	0,3863	0,3750	0,3573	0,2933	0,2696
223	0,4483	0,4512	0,3994	0,3749	0,3746	0,3657	0,2783	0,2627
224	0,4309	0,4359	0,4074	0,3867	0,3759	0,3845	0,2854	0,2675
225	0,5036	0,4952	0,4347	0,4129	0,4078	0,3707	0,3331	0,2953
226	0,4316	0,4295	0,4049	0,3918	0,3826	0,3746	0,3362	0,3017
227	0,4458	0,4261	0,3892	0,3697	0,3530	0,3445	0,2873	0,2669
228	0,4179	0,4023	0,3683	0,3488	0,3404	0,3322	0,2708	0,2529
229	0,4184	0,3991	0,3633	0,3407	0,3442	0,3368	0,2818	0,2697
230	0,4008	0,3918	0,3693	0,3440	0,3536	0,3395	0,3016	0,2859
231	0,4513	0,4493	0,3863	0,3664	0,3553	0,3612	0,2627	0,2412
232	0,4589	0,4617	0,4085	0,3841	0,3672	0,3304	0,2697	0,2445
233	0,4536	0,4526	0,4049	0,3866	0,3735	0,3629	0,2853	0,2606
234	0,4869	0,4730	0,4205	0,4031	0,3888	0,3634	0,2882	0,2733
235	0,4715	0,4588	0,4230	0,4037	0,3829	0,3535	0,2948	0,2828
236	0,4793	0,4763	0,4235	0,3812	0,3564	0,3305	0,2882	0,2877
237	0,4717	0,4574	0,3957	0,3912	0,3574	0,3309	0,2843	0,2849
238	0,4812	0,4773	0,4149	0,3898	0,3863	0,3596	0,3606	0,2719
239	0,4453	0,4470	0,4159	0,3947	0,3679	0,3289	0,2829	0,2853
240	0,4766	0,4790	0,4564	0,4091	0,3817	0,3503	0,2989	0,2977
241	0,4278	0,4280	0,3687	0,3689	0,3382	0,3106	0,2669	0,2704
242	0,4370	0,4358	0,3960	0,3821	0,3602	0,3088	0,2660	0,2726
243	0,4298	0,4419	0,4183	0,3986	0,3600	0,3254	0,2815	0,2860
244	0,5193	0,5191	0,4391	0,4018	0,3676	0,3301	0,2858	0,2913
245	0,4471	0,4496	0,4192	0,4068	0,3874	0,3364	0,3040	0,3010
246	0,3155	0,3377	0,3352	0,3962	0,3841	0,3092	0,2656	0,2706
247	0,4438	0,4485	0,4110	0,3877	0,3499	0,3205	0,2679	0,2767
248	0,4539	0,4611	0,4084	0,3880	0,3816	0,3263	0,2726	0,2786
249	0,4375	0,4399	0,3749	0,3647	0,3306	0,2915	0,2408	0,2466
250	0,4277	0,4117	0,3783	0,3659	0,3466	0,3173	0,2776	0,3134

Tabela 10 - Datas das setenta e sete leituras dos 250 tensiômetros para o cálculo do potencial mátrico nos 5 estádios (E) de desenvolvimento da cultura de feijão.

E dia mês			E dia mês			E dia mês			E dia mês		
1	02	maio	01	junho		01	julho		01	agosto	
	04	^a	02			02			02		
	05		03			04			03		
	06		3 06			05			5 04		
	09		07			06			05		
	10		08			07			08		
	11		09			08			09		
	12		10			11			10		
	13		13			12			11		
	16		14			13			12		
	17		15			14			15		
	18		16		4	15					
	19		19			18					
	20		20			19					
2	23		21			20					
	24		22			21					
	25		23			22					
	26		24			25					
	27		26			26					
	30		27			27					
	31		28			28					
			29			29					
			30								

^a Dias utilizados na primeira aferição do modelo (último dia do período de cinco dias): os dias 16 de maio, 3 de junho, 8 e 25 de julho e 12 de agosto foram utilizados como base de cálculo, apesar de ser, a rigor, o dia anterior (ou posterior) a data de referência de cálculo.

3.6. Fator empírico adimensional referente aos atributos químicos do solo

As quantidades relativas de bases (V) e de alumínio (m), bem como as relações cálcio-magnésio (ReCaMg), cálcio potássio (ReCaK), cálcio-CTC (ω), e nitrogênio aplicado-nitrogênio requerido (η) são assim calculadas:

$$V = \frac{Ca+Mg+K}{CTC} \quad (67)$$

$$m = \frac{Al}{CTC} \quad (68)$$

$$ReCaMg = \frac{Ca}{Mg} \quad (69)$$

$$ReCaK = \frac{Ca}{K} \quad (70)$$

$$\omega = \frac{Ca}{CTC} \quad (71)$$

$$\eta = \frac{Napl}{Nreq} \quad (72)$$

onde CTC é a capacidade de troca catiônica (eqmg/100g) em pH neutro (pH = 7), Ca o teor de cálcio (Ca^{2+} , eqmg/100g), Mg o teor de magnésio (Mg^{2+} , eqmg/100g), K o teor de potássio (K^+ , eqmg/100g), Al o teor de alumínio (Al^{3+} , eqmg/100g), Napl a quantidade aplicada de nitrogênio (kg/ha) e Nreq a quantidade requerida de nitrogênio pelo feijoeiro (kg/ha) para um rendimento desejado.

Foi proposto neste trabalho o fator incrementador-redutor referente aos atributos químicos do solo, o qual é calculado utilizando as seguintes expressões:

$$\text{para } 0 \leq X_{x,k} < L_0: \quad F_{x,k} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi \cdot X_{x,k}}{L_0} \right] \quad (73)$$

$$\text{para } L_0 \leq X_{x,k} < L_1: \quad F_{x,k} = 1 \quad (74)$$

$$\text{para } X_{x,k} \geq L_1: \quad F_{x,k} = \frac{\pi - 2 \arctg(X_{x,k} - L_1)}{\pi} \quad (75)$$

onde $F_{x,k}$ é o fator incrementador-redutor relativo ao x -ésimo atributo químico do solo na k -ésima parcela experimental; $X_{x,k}$ é o x -ésimo atributo químico na k -ésima parcela experimental, e L_0 e L_1 são os limites inferior e superior da faixa ótima à cultura de feijão do atributo químico considerado.

No caso do fator referente a V (sétimo fator: $X_{7,k}=V$) há correção. O sub-fator de correção do fator incrementador-redutor referente a esse atributo é assim calculado:

$$\text{para } 0 \leq X_{7,q,k} < L_0 \quad SF_{7,q,k} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi \cdot X_{7,q,k}}{L_0} \right] \quad (76)$$

$$\text{para } L_0 \leq X_{7,q,k} < L_1 \quad SF_{7,q,k} = 1 \quad (77)$$

$$\text{para } X_{7,q,k} \geq L_1 \quad SF_{7,q,k} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi X_{7,q,k} - \pi}{L_1 - 1} \right] \quad (78)$$

$$F_{7,k} = F_{7,k} \cdot \prod_{q=1}^2 SF_{7,q,k} \quad (79)$$

onde $SF_{7,q,k}$ é o sub-fator de correção referente ao sétimo fator incrementador-redutor da q -ésima variável na k -ésima parcela experimental; $X_{7,q,k}$ é a q -ésima variável, referente ao sétimo fator incrementador-redutor, na k -ésima parcela experimental ($X_{7,1,k} = \text{ReCaMg}$ e $X_{7,2,k} = \text{ReCaK}$).

a. Dados necessários ao modelo;

c. Expressões de cálculo dos diversos parâmetros do modelo;

Figura 15 - Fluxograma para a determinação do fator de correção dos atributos químicos do solo.

Sendo assim, o fator adimensional de correção do rendimento (fr_k), referente a todos os atributos químicos do solo na k -ésima parcela experimental, pode assim ser calculado:

$$fr_k = \prod_{x=1}^7 F_{x,k}^c \quad (80)$$

3.7. Evapotranspiração real e déficit hídrico

c. Expressões de cálculo dos diversos parâmetros do modelo.

Figura 16 - Fluxograma para determinação do déficit hídrico ($DH_{j,k}$) no j -ésimo dia após a sementeira na k -ésima parcela experimental pelo método de THORNTHWAITE & MATHER (1955)

3.8. Rendimento da cultura de feijão

Para estimativa do rendimento relativo da cultura de feijão pelo modelo proposto (modelo universal),

utiliza-se a seguinte expressão:

$$Rr_k = \left[1 - \frac{\sum_{e=1}^{nec} DH_{e,k} \cdot Kr_e^D}{\sum_{e=1}^{nec} ETm_e \cdot Kr_e^D} \right] \left[1 - \frac{\sum_{e=1}^{nec} EH_{e,k} \cdot Kr_e^E}{\sum_{e=1}^{nec} (C_j + I_{j,k} - ETm_j - \Delta Arm_{j,k}) Kr_e^E} \right] fr_k \quad (81)$$

onde Rr_k é o rendimento relativo na k -ésima parcela experimental; nec o número de estádios considerados; fr_k o fator adimensional empírico dos atributos químicos do solo; $DH_{e,k}$ o déficit hídrico no e -ésimo estádio de desenvolvimento na k -ésima parcela experimental; $EH_{e,k}$ o excedente hídrico no e -ésimo estádio de desenvolvimento na k -ésima parcela experimental; $\Delta Arm_{j,k}$ a variação de armazenagem no j -ésimo período após a semeadura na k -ésima parcela experimental; Kr_e^D e Kr_e^E os fatores de rendimento relativo no e -ésimo estádio de desenvolvimento referentes ao déficit hídrico e ao excedente hídrico; respectivamente e ETm_e a evapotranspiração ótima no e -ésimo estádio de desenvolvimento da cultura de feijão.

Pelo modelo universal, os fatores de rendimento relativo (Kr_e^D e Kr_e^E), no e -ésimo estádio de desenvolvimento, referentes ao déficit hídrico e ao excedente hídrico, respectivamente, podem assim ser calculados:

$$Kr_e^D = \kappa_e \cdot Kc_{e,j} \quad (82)$$

$$Kr_e^E = \lambda_e \cdot Kc_{e,j} \quad (83)$$

onde κ e λ são os fatores multiplicativos de déficit e excedente hídrico, respectivamente, no e -ésimo estádio de desenvolvimento do feijoeiro (Tabela 11).

O rendimento da cultura de feijão pode ser estimado em função do rendimento potencial através da seguinte expressão:

$$Yest_k = Rr_k \cdot Ypot \quad (84)$$

onde $Yest_k$ é o rendimento estimado na k -ésima parcela

experimental (kg.ha^{-1}) e Y_{pot} o rendimento potencial estimado (kg.ha^{-1}) para a cultura de feijão, na região de Piracicaba, especificamente no ano de 1988.

Tabela 11 - Fatores multiplicativos de déficit (κ) e excedente hídrico (λ) utilizados no modelo nos diferentes estádios de desenvolvimento do feijoeiro.

estádio de desenvolvimento	fator multiplicativo	
	κ	λ
I	1	1
II	1	1
III	10	1
IV	10	1
V	0	1

a. Dados necessários ao modelo;
 c. Expressões de cálculo dos diversos parâmetros do modelo;
 e. Dados necessários à aferição do modelo.

Figura 17 - Fluxograma para estimativa do rendimento relativo da cultura de feijão, e segunda aferição do modelo universal de previsão do rendimento.

Alternativamente foi testado um modelo específico, onde os fatores de rendimento relativo (Kr_e^D e Kr_e^E), no e-ésimo estágio de desenvolvimento, referentes ao déficit hídrico e ao excedente hídrico, respectivamente,

são determinados estatisticamente pelo método dos quadrados mínimos.

Figura 18 - Fluxograma para estimativa do rendimento relativo da cultura de feijão, e segunda aferição do modelo específico de previsão de rendimento.

3.9. Critérios adotados

Para utilização do modelo foram usados critérios referentes à planta e ao solo, baseados em dados de experimentação (DOURADO NETO, 1989; MORAES, 1991) e literatura (DRIESSEN, 1986; DOORENBOS et al., 1979).

Tabela 12 - Valores mínimo (L_0) e máximo (L_1) utilizados para o cálculo do fator incrementador-redutor referente ao pH, à quantidade relativa de bases (V), ao teor de carbono (C, %), à quantidade relativa de alumínio (m), à relação cálcio-CTC (ω), à relação cálcio-magnésio, à relação cálcio-potássio, e à quantidade relativa de aplicação de nitrogênio (η) referente à quantidade aplicada e requerida pelo feijoeiro.

atributo químico	unidade	valor	
		mínimo (L_0)	máximo (L_1)
pH	-	5,0	6,5
V	-	0,60	0,75
C	%	1,45 ^a	2,62 ^b
m	-	0,0	0,2
ω	-	0,50	0,65
Ca/Mg	-	3	6
Ca/K	-	7	15
atributo químico	unidade	quantidade (kg/ha)	
		aplicada	requerida
η	-	48	60

^a teor de matéria orgânica equivalente: 2,5 %

^b teor de matéria orgânica equivalente: 4,5 %

Tabela 13 - Critérios utilizados referentes ao solo.

item	descrição
curva de retenção	<p>.modelo: VAN GENUCHTEN (1980)</p> <p>.parâmetros α, m, n estimados sem relação de dependência através de análise de regressão não linear (métodos dos mínimos quadrados) utilizando o programa CURVARET (DOURADO NETO & JONG VAN LIER, 1992).</p> <p>.estimativa dos valores extremos de umidade pelo método de extrapolação proposto por JONG VAN LIER & DOURADO NETO (1991)</p>
"capacidade de campo"	.potencial mátrico fixo: -100 cca
"ponto de murchamento permanente"	.potencial mátrico fixo: -15000 cca
balanço hídrico	<p>.inicialmente faz-se o balanço hídrico cíclico anual, utilizando o critério de iniciar de DOURADO NETO et al. (1991) com o valor do coeficiente de cultura correspondente ao primeiro estágio de desenvolvimento da cultura de feijão e profundidade de molhamento equivalente à profundidade máxima do sistema radicular.</p> <p>.profundidade de molhamento: assumiu-se, para efeito da estimativa de armazenagem da água no solo, que a altura de chuva infiltrará até a profundidade efetiva atual do sistema radicular, se a camada de solo superficial, compreendida entre a superfície do solo e a profundidade efetiva do sistema radicular atual, estiver com umidade média inferior à da camada subsuperficial, compreendida entre a profundidade efetiva do sistema radicular atual e a profundidade máxima do sistema radicular. Caso contrário, assume-se que a altura de chuva infiltrará até a profundidade máxima do sistema radicular.</p>

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Produtividade e rendimento

Entende-se por produtividade da cultura de feijão a quantidade teórica máxima produzível por unidade de área dependente unicamente do potencial genético do material utilizado, onde todas as condições de clima (englobando o meio e a atmosfera), solo e água são ideais (Figura 19).

Define-se rendimento potencial como sendo a quantidade teórica máxima produzível por unidade de área dependente apenas do potencial genético e das condições de clima, em função da localidade (latitude e altitude, principalmente) (Figura 19).

Estimou-se o rendimento potencial de grãos de feijão (cultivar: Carioca) (Ypot, kg/ha), pelo método de De Wit (1965)⁹, especificamente para Piracicaba, São Paulo (Latitude sul: 22° 43'), utilizando os valores medidos de temperatura e insolação fornecidos pelo Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, utilizando o programa computacional intitulado PRODUÇÃO (BARBIERI & TUON, 1992) (Tabela 14).

⁹ De Wit, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. Agric. Res. Rep 663. Pudoc, Wageningen, 1965. 57p.

Tabela 14 - Estimativa do rendimento potencial de grãos (Ypot, kg/ha), pelo método de De Wit (1965) (DOORENBOS et al., 1979; BARBIERI & TUON, 1992), referente à cultura de feijão, cultivar Carioca, semeado em 2 de maio de 1988 e colhido em 16 de agosto de 1988, em Piracicaba, SP (latitude sul: 22°43').

mês	n ¹	T ¹	N	Ra	Rse	Rs	yo	yc
maio	5,5	20,2	10,8	618,1	238,0	160,3	167,1	329,9
junho	7,2	16,4	10,6	571,2	219,9	173,1	156,8	313,0
julho	8,3	15,3	10,7	595,8	229,4	194,9	162,2	321,9
agosto	9,5	19,3	11,2	691,5	266,2	239,5	183,1	356,4

mês	cTo	cTc	F	IAF	cL	cN	ym	Ypot
maio	1,00	0,99	0,49	0,6	0,23	0,50	19,90	239,01
junho	1,01	1,01	0,32	1,8	0,57	0,60	20,50	1007,70
julho	1,00	1,00	0,23	3,9	0,94	0,60	20,14	2358,78
agosto	1,00	1,01	0,15	4,2	0,96	0,60	20,30	3970,61

T: temperatura (°C); n: número de horas de brilho solar; N: número máximo possível de horas de insolação; Ra: radiação extraterrestre expresso em evaporação equivalente (mm/mês); Rse: recepção máxima de radiação ativa de onda curta ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); Rs: radiação ao nível da cultura estimada em função do número máximo possível de insolação e do número de horas de brilho solar; yo: rendimento de matéria seca bruta (dia nublado); yc: rendimento de matéria seca bruta (dia claro); cTo e cTc fatores de correção de rendimento de grãos relativos à temperatura referentes aos dias nublado e claro, respectivamente; IAF: índice de área foliar ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$); $F = (Rse - 0,5Rs) / (0,8.Rse)$; cL: fator de correção dependente do IAF; cN: fator de correção de rendimento de matéria seca; ym: taxa horária de rendimento ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{hora}^{-1}$).

1 FONTE: Departamento de Física e Meteorologia. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP.

Entende-se por rendimento com limitação climática e de água, a quantidade produzível, por unidade de área, quando há redução do rendimento potencial exclusivamente por falta de água, sendo que os demais fatores de produção não são limitantes.

Entende-se por rendimento máximo econômico a quantidade máxima produzível, por unidade de área, com interferência do homem, que resulte em máximo lucro.

Entende-se que o rendimento atual apresenta custo excessivo quando esse é superior ao máximo econômico, e que o mesmo apresenta deficiência de nível de manejo quando esse apresenta rendimento inferior ao máximo econômico. O rendimento será ótimo quando esse for exatamente o rendimento econômico.

Figura 19 - Representação esquemática: da produtividade (1); do rendimento potencial (2); do rendimento com limitação climática e de água (3); do rendimento com limitação climática, hídrica e de nutrientes (4); do rendimento máximo econômico (5); do rendimento atual com custo excessivo (6); do rendimento atual com deficiência de nível de manejo (7); e do rendimento ótimo (8).

4.2. O modelo universal

No presente trabalho, o modelo proposto (modelo universal) estima o rendimento com limitação climática, hídrica e de nutrientes, assumindo que não houve quaisquer outras limitações.

4.2.1. Redução do rendimento devido à limitação de água

Haverá redução do rendimento estimado pelo modelo universal, devido a limitação de água, quando houver déficit ou excesso hídrico.

No caso de déficit hídrico a redução de rendimento é verificável devido à redução da transpiração da planta, com conseqüente redução de absorção de água e nutrientes minerais e trocas gasosas (consumo de dióxido de carbono), o que implica na diminuição do acúmulo de matéria seca e da fotossíntese líquida, com redução de rendimento.

No caso de excedente hídrico, há redução da porosidade livre de ar, com conseqüente redução da disponibilidade de ar à planta, prejudicando a aeração do solo (a difusão de oxigênio na água é baixíssima) e a respiração ao nível do sistema radicular. Havendo redução da produção de energia química metabólica nas raízes, há diminuição no processo de absorção de nutrientes e alteração na atividade metabólica da planta, ocasionando desequilíbrio nutricional e perda de rendimento.

4.2.2. Redução do rendimento devido à limitação química

O fator adimensional relativo aos atributos químicos será unitário quando não houver nenhuma limitação de ordem química.

A proposição do fator adimensional relativo

aos atributos químicos é válida para quaisquer culturas e localidades. Porém, para que esse atributo seja de utilização universal e adequadamente estimado, torna-se necessário definir a faixa ótima de cada atributo, definida pelos limites inferior e superior, a qual é específica para cada espécie e localidade, e que depende fundamentalmente da observação de comportamento (informação de pesquisa). Portanto, esses fatores estão sujeitos a ajustes.

4.2.3. O terceiro e o quarto estádios de desenvolvimento

No terceiro e quarto estádios de desenvolvimento (DOORENBOS et al., 1979), o feijoeiro é sensível ao déficit hídrico. Segundo FANCELLI (1992), períodos de déficit hídrico de uma semana por ocasião da floração podem ocasionar perda de rendimento ao redor de 48%. GARRIDO et al. (1979) constataram perda correspondente a 58 % quando a limitação hídrica ocorreu no período efetivo de formação de vagens. Devido a esses fatos foi assumido que o fator de déficit hídrico deve possuir um maior peso nesses estádios. Fixou-se empiricamente, para os dois estádios, valores das constantes de rendimento igual a 10.

4.2.4. O quinto estágio de desenvolvimento

Apesar do feijoeiro já ter atingido o ponto de maturidade fisiológica, as condições climáticas durante o quinto e último estágio de desenvolvimento podem influenciar o rendimento, pois há respiração pelo embrião com conseqüente consumo de reservas e perda de peso da semente ou grão.

4.2.5. Estimativa da armazenagem da água: modelo cosenoidal

No procedimento proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955) para realização do balanço hídrico, a evapotranspiração real é estimada assumindo que só será a ótima quando o solo se encontrar na capacidade de campo.

Em 1975, Rijtema & Aboukhaled propuseram o fator de água disponível que permite estimar a umidade crítica do solo, indicando, no processo de secamento, o instante a partir do qual a evapotranspiração real deixa de ser a evapotranspiração ótima em função da espécie considerada e de sua demanda evapotranspirativa ótima, que por sua vez é dependente das condições climáticas.

A generalização proposta por Rijtema & Aboukhaled viabiliza a obtenção de modelos que estimem a zona de umidade ótima no solo que faz com que a evapotranspiração real seja a ótima para quaisquer casos de demanda evapotranspiratória.

A Figura 20 mostra de forma ilustrativa a variação da evapotranspiração relativa, dada pela relação entre a evapotranspiração real e a ótima, em função do teor de água no solo, segundo diferentes autores. Nessa Figura há dois aspectos a serem observados: 1. a zona ótima de umidade, e 2. a forma como a evapotranspiração relativa varia em função da umidade do solo.

Considerando o primeiro aspecto na Figura 20, o comportamento observado por Veihmeyer & Hendrickson é o caso particular de baixíssima demanda evapotranspiratória. Já os comportamentos observados por Thornthwaite & Mather e Havens é o caso particular de altíssima demanda evapotranspiratória. Os comportamentos sugeridos por Pierce, Penman, Marlatt et al., Holmes & Robertson, Rijtema & Aboukhaled e Dourado Neto & Jong-van-Lier são concordantes nesse aspecto.

Considerando o segundo aspecto ainda na Figura 20, Veihmeyer & Hendrickson, Thornthwaite & Mather e Havens consideram variação linear da evapotranspiração relativa em função da umidade do solo, tal como sugeriram Rijtema & Aboukhaled. Já Pierce, Penman, Marlatt et al., Holmes & Robertson sugerem uma variação potencial, o que a rigor pode ser contemplado por um modelo mais geral, o modelo co-senoidal que apresenta um comportamento sigmoidal, o que concorda com os dados obtidos por Chang (1968), citado por BERLATO & MOLION (1981) (Figura 21).

Observa-se na Figura 21 que no caso de baixa demanda evapotranspiratória, o comportamento, relativo à variação da transpiração com a umidade do solo, tende a ser potencial (caso particular do comportamento sigmoidal), enquanto que em condições de média e alta demanda atmosférica fica mais evidente o comportamento sigmoidal.

A suposição de que a variação da evapotranspiração real é sigmoidal, na faixa de umidade entre o ponto de murchamento permanente e a umidade crítica, deve-se ao fato de que quando o solo está muito seco, o que limita a densidade de fluxo de água no solo é a condutividade hidráulica. A medida que o teor de água aumenta, aumenta a capacidade do solo de transmitir água e conseqüentemente há atendimento de uma fração cada vez maior da demanda evapotranspiratória ótima.

Pelo modelo co-senoidal, no processo de secamento, a evapotranspiração real não diminui abruptamente quando a umidade do solo fica abaixo da umidade crítica, pois há limitações da planta em termos de tempo de resposta para o fechamento de estômatos. Porém, esse modelo apresenta a limitação de que esse tempo de resposta é variável de espécie para espécie.

Por outro lado, a taxa de variação da evapotranspiração real em função da umidade do solo não é constante. Conseqüentemente a sua variação não é linear

quando se considera toda a faixa de armazenagem em que a evapotranspiração real difere da evapotranspiração ótima da cultura de interesse.

Figura 20 - Relações propostas entre a evapotranspiração relativa e armazenagem segundo diferentes autores: (1) Veihmeyer e Hendrickson; (2) Thornthwaite & Mather; (3) Havens; (4) Pierce; (5) Penman, Marlatt et al. e Holmes & Robertson (Tanner, 1967⁴ citado por BERLATO & MOLION, 1981).

⁴ TANNER, C.B. Measurement of evapotranspiration. *Agronomy*, 11:534-74. 1967.

Figura 21 - Transpiração em função da armazenagem e da demanda evapotranspirativa da atmosfera (Chang, 1968⁵ citado por BERLATO & MOLION, 1981).

⁵ CHANG, J.H. Climate and agriculture; an ecological survey. Chicago, Aldine, 1968. 304p.

4.2.6. Primeira aferição do modelo universal

A primeira aferição do modelo universal foi feita confrontando os valores estimados de umidade, à base de volume, com os valores determinados experimentalmente através de tensiômetros e da curva de retenção da água no solo, onde foi utilizada a equação de GENUCHTEN (1980).

4.2.6.1. Parâmetros da equação de GENUCHTEN (1980)

A Tabela 15 mostra os valores estimados dos parâmetros α (cca^{-1}), m e n da equação de GENUCHTEN (1980), os valores extremos de umidade (umidade residual θ_r e umidade de saturação θ_s), o coeficiente de ajuste (c.a.) e o nível de significância (ns, %) pelo Teste F.

Verifica-se pelo Teste F que a equação de GENUCHTEN (1980) pode ser utilizada extrapolando os valores extremos de umidade.

Convém salientar que no programa computacional CURVARET há uma sub-rotina que cessa o procedimento iterativo de Newton-Raphson, quando a umidade residual começa a assumir valores negativos, tornando-a nula.

Os parâmetros m e n foram estimados sem relação de dependência, possibilitando maior minimização da soma dos quadrados dos desvios residuais.

Os valores extremos de umidade foram extrapolados, em vez de estimados, a fim de se ter um maior número de graus de liberdade do resíduo.

Tabela 15 - Parâmetros da equação de GENUCHTEN (1980) para as 250 curvas de retenção utilizadas.

cur va	α 1/cm	m	n	θ_r cm ³ /cm ³	θ_a cm ³ /cm ³	c.a.	Teste F ns, %
1	0,0125	1,1613	0,5670	0,293	0,535	0,968	0,15
2	0,1272	0,1367	1,9022	0,268	0,509	0,976	0,09
3	0,0051	1,4457	0,5754	0,318	0,504	0,985	0,05
4	0,0024	1,7472	0,8117	0,319	0,480	0,970	0,13
5	0,0031	1,6011	0,8419	0,321	0,481	0,959	0,21
6	0,0042	1,8527	0,8785	0,321	0,494	0,954	0,26
7	0,0036	1,4651	0,8694	0,315	0,465	0,963	0,18
8	0,0029	1,4877	0,7513	0,360	0,482	0,937	0,43
9	0,0346	0,2120	1,9287	0,324	0,501	0,940	0,39
10	0,0023	1,6866	0,8284	0,308	0,455	0,957	0,22
11	0,0043	1,5007	0,4553	0,307	0,555	0,981	0,07
12	0,0034	1,6352	0,6754	0,346	0,512	0,956	0,24
13	0,0947	0,0335	1,8860	0,000	0,492	0,956	0,24
14	0,0033	1,5653	0,8218	0,343	0,496	0,977	0,09
15	0,0967	0,1413	1,8186	0,304	0,523	0,984	0,06
16	0,1398	0,0520	1,9283	0,195	0,514	0,969	0,14
17	0,0918	0,1540	1,9525	0,307	0,519	0,997	0,01
18	0,0467	0,1135	2,0220	0,301	0,476	0,982	0,06
19	0,0884	0,0535	1,9059	0,020	0,529	0,994	0,02
20	0,0004	0,4919	1,9872	0,255	0,486	0,767	5,56
21	0,3101	0,0289	1,8936	0,000	0,504	0,887	1,23
22	0,0139	0,0805	1,2989	0,000	0,494	0,975	0,10
23	0,0004	0,4675	1,9694	0,251	0,469	0,555	9,80
24	0,0671	0,0373	1,8811	0,000	0,494	0,970	0,13
25	0,0763	0,0443	1,9404	0,000	0,491	0,992	0,02
26	0,0687	0,0302	2,7368	0,000	0,444	0,994	0,02
27	0,0063	0,2675	0,4536	0,000	0,469	0,979	0,08
28	0,0006	0,5191	0,3264	0,000	0,507	0,992	0,02
29	0,0763	0,0421	1,8437	0,000	0,453	0,947	0,31
30	0,0242	0,0433	1,8224	0,000	0,450	0,937	0,43
31	0,0016	0,5001	0,3588	0,000	0,491	0,980	0,07
32	0,0086	0,2339	0,4928	0,000	0,478	0,990	0,03
33	0,0805	0,0440	1,8365	0,000	0,501	0,957	0,22
34	0,0035	0,4956	0,2982	0,000	0,598	0,986	0,04
35	0,0226	0,1854	0,5737	0,000	0,505	0,989	0,04
36	0,0040	1,0850	0,9060	0,309	0,450	0,946	0,33
37	0,0033	1,4186	0,9277	0,335	0,478	0,964	0,17
38	0,2225	0,0303	1,9571	0,000	0,489	0,974	0,10
39	0,0029	1,5280	0,9439	0,314	0,469	0,963	0,18
40	0,0356	0,1276	1,9081	0,270	0,450	0,928	0,53
41	0,0325	0,1570	1,8886	0,310	0,470	0,932	0,49
42	0,0040	1,5164	0,6141	0,311	0,503	0,970	0,13
43	0,1640	0,1345	1,9597	0,280	0,506	0,945	0,33
44	0,0016	1,5131	0,9454	0,325	0,480	0,977	0,09
45	0,0664	0,0302	1,7969	0,000	0,472	0,863	1,81
46	0,0027	1,2482	0,8772	0,324	0,461	0,976	0,09
47	0,0265	0,2016	1,8625	0,309	0,477	0,940	0,39
48	0,0026	1,3877	1,0838	0,325	0,472	0,972	0,12
49	0,0465	0,1335	1,9403	0,303	0,484	0,940	0,40
50	0,0022	1,6956	0,9158	0,312	0,484	0,976	0,10

a ns: nível de significância (%)

Tabela 15 (Cont.)

cur va	α 1/cm	m	n	θ_r cm ³ /cm ³	θ_s cm ³ /cm ³	c.a.	Teste F ns, %
51	0,0023	1,4506	0,8758	0,315	0,463	0,968	0,14
52	0,0068	1,7960	3,0140	0,322	0,499	0,840	2,47
53	0,1344	0,0313	1,9168	0,000	0,482	0,952	0,27
54	0,2157	0,0320	1,8903	0,000	0,464	0,870	1,61
55	0,1053	0,0316	3,1801	0,027	0,489	0,984	0,06
56	0,0007	0,5250	0,3121	0,000	0,506	0,986	0,05
57	0,0009	0,5916	0,2648	0,000	0,530	0,979	0,08
58	0,0995	0,0313	1,8920	0,000	0,478	0,945	0,33
59	0,0840	0,0360	1,8993	0,000	0,474	0,976	0,10
60	0,0876	0,0296	1,8752	0,000	0,471	0,933	0,48
61	0,0679	0,0377	1,8483	0,000	0,470	0,954	0,25
62	0,2070	0,0322	1,9171	0,000	0,503	0,910	0,80
63	0,0985	0,0433	1,9256	0,000	0,508	0,992	0,02
64	0,0673	0,0349	1,8404	0,000	0,461	0,934	0,45
65	0,0767	0,0304	1,8462	0,000	0,464	0,891	1,16
66	0,0860	0,0423	1,9044	0,000	0,512	0,957	0,23
67	0,0665	0,0379	1,8609	0,000	0,448	0,939	0,40
68	0,0687	0,0436	1,8879	0,000	0,511	0,969	0,14
69	0,0433	0,0499	1,8714	0,000	0,475	0,984	0,06
70	0,0253	0,2282	1,9060	0,330	0,462	0,959	0,21
71	0,0512	0,0602	2,9356	0,248	0,477	0,996	0,01
72	0,0761	0,0279	2,9140	0,141	0,476	0,995	0,01
73	0,0608	0,0953	2,9245	0,313	0,477	0,989	0,03
74	0,0520	0,1787	2,6888	0,307	0,472	0,979	0,08
75	0,0836	0,1075	6,4796	0,282	0,685	0,991	0,03
76	0,0269	0,3250	1,9424	0,315	0,475	0,968	0,15
77	0,0039	1,4874	0,8642	0,340	0,504	0,983	0,06
78	0,0285	0,2598	1,8982	0,311	0,436	0,961	0,19
79	0,0305	0,2314	1,9184	0,312	0,456	0,979	0,08
80	0,0170	0,5075	1,9997	0,353	0,468	0,991	0,03
81	0,0020	1,7047	0,7957	0,337	0,511	0,984	0,06
82	0,0044	1,2191	0,8022	0,344	0,473	0,961	0,19
83	0,0965	0,0263	1,8723	0,000	0,420	0,877	1,44
84	0,0018	1,8826	0,9700	0,348	0,477	0,982	0,06
85	0,0297	0,2426	1,9480	0,338	0,498	0,967	0,15
86	0,0412	0,1521	2,3220	0,316	0,511	0,985	0,05
87	0,0894	0,0282	2,4220	0,000	0,481	0,988	0,04
88	0,3330	0,0346	1,9614	0,043	0,521	0,968	0,14
89	0,0285	0,0379	1,8877	0,000	0,456	0,991	0,02
90	0,5790	0,0341	2,0653	0,000	0,512	0,937	0,42
91	0,1706	0,0264	1,9043	0,000	0,457	0,925	0,57
92	0,1866	0,0416	1,9353	0,115	0,464	0,960	0,21
93	0,4047	0,0255	1,9686	0,000	0,474	0,916	0,70
94	0,0193	0,0350	2,3951	0,000	0,446	0,963	0,18
95	0,0398	0,0269	1,9010	0,000	0,435	0,960	0,20
96	0,0495	0,0260	1,8527	0,000	0,437	0,920	0,64
97	0,1063	0,0259	2,1037	0,000	0,446	0,966	0,16
98	0,0527	0,0404	1,9283	0,000	0,479	0,977	0,09
99	0,0868	0,0357	3,7576	0,181	0,474	0,993	0,02
100	0,0761	0,0325	2,6640	0,174	0,443	0,958	0,21

Tabela 15 (Cont.)

cur- va	α	m	n	θ_r	θ_s	c.a.	Teste F
	1/cm			$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$			ns, %
101	0,1372	0,0644	2,4869	0,230	0,497	0,970	0,13
102	0,0813	0,0296	2,3293	0,000	0,498	0,999	0,01
103	0,5068	0,0975	2,0249	0,169	0,535	0,988	0,04
104	0,0898	0,0783	2,6410	0,237	0,484	0,997	0,01
105	0,1093	0,0376	2,7811	0,153	0,457	0,992	0,02
106	0,1108	0,0463	2,1165	0,123	0,470	0,991	0,02
107	0,0611	0,0417	2,6344	0,123	0,466	0,999	0,01
108	0,1126	0,0359	2,9563	0,129	0,478	0,991	0,03
109	0,0886	0,0303	1,9671	0,000	0,467	0,997	0,01
110	0,0883	0,0329	2,5420	0,077	0,478	0,997	0,01
111	0,0857	0,0272	2,7273	0,065	0,470	0,998	0,01
112	0,1193	0,0463	2,1871	0,142	0,476	0,992	0,02
113	0,1301	0,0273	2,0152	0,000	0,434	0,986	0,05
114	0,1440	0,0316	1,9742	0,000	0,433	0,983	0,06
115	0,1346	0,0502	2,5222	0,145	0,449	0,983	0,06
116	0,2396	0,0307	1,9735	0,000	0,442	0,985	0,05
117	0,1834	0,0654	2,0949	0,134	0,486	0,992	0,02
118	0,1368	0,0408	1,9050	0,000	0,487	0,958	0,22
119	0,0782	0,0331	1,8822	0,000	0,432	0,913	0,75
120	0,1782	0,0357	2,2356	0,000	0,495	0,985	0,05
121	0,1323	0,0337	1,9024	0,000	0,464	0,986	0,05
122	0,2782	0,0487	2,0029	0,085	0,523	0,955	0,24
123	0,1584	0,0373	1,9149	0,000	0,514	0,946	0,33
124	0,0884	0,0329	1,8890	0,000	0,455	0,965	0,16
125	0,1667	0,0399	1,9083	0,000	0,462	0,953	0,26
126	0,0016	1,9953	1,1091	0,290	0,444	0,966	0,16
127	0,0581	0,0928	2,0201	0,210	0,463	0,991	0,02
128	0,0800	0,1334	1,9861	0,252	0,506	0,991	0,03
129	0,1231	0,0750	2,3300	0,218	0,530	0,976	0,09
130	0,0494	0,1294	1,8743	0,232	0,449	0,989	0,03
131	0,0020	1,4964	0,6136	0,262	0,451	0,994	0,01
132	0,0076	1,0744	0,6652	0,260	0,529	0,992	0,02
133	0,0021	1,2323	0,7497	0,283	0,419	0,985	0,05
134	0,0356	0,1678	1,9112	0,275	0,485	0,993	0,02
135	0,0938	0,0329	1,8895	0,000	0,441	0,972	0,12
136	0,0787	0,1032	1,9150	0,249	0,463	0,984	0,05
137	0,8675	0,0636	2,1440	0,179	0,495	0,934	0,46
138	0,2057	0,0371	1,9613	0,000	0,526	0,965	0,16
139	0,1754	0,0549	1,9567	0,160	0,466	0,971	0,12
140	0,1177	0,0337	1,8921	0,000	0,445	0,921	0,64
141	0,0583	0,1320	2,7856	0,272	0,476	0,987	0,04
142	0,0294	0,2388	1,9344	0,312	0,431	0,975	0,10
143	0,0396	0,1625	2,5517	0,288	0,452	0,989	0,03
144	0,0456	0,1234	3,4965	0,275	0,453	0,983	0,06
145	0,1204	0,0767	2,3918	0,216	0,478	0,997	0,01
146	0,0021	1,3915	0,6911	0,297	0,469	0,995	0,01
147	0,0422	0,1849	1,5857	0,264	0,460	0,992	0,02
148	0,0027	1,3100	0,6566	0,287	0,458	0,994	0,02
149	0,0022	1,2446	0,7737	0,278	0,445	0,995	0,01
150	0,0052	0,8914	0,6666	0,251	0,450	0,999	0,01

Tabela 15 (Cont.)

cur va	α	m	n	θ_r	θ_s	c.a.	Teste F
	1/cm			$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$			ns, %
151	0,0711	0,1446	1,9259	0,303	0,479	0,947	0,31
152	0,0674	0,2882	1,6155	0,295	0,494	0,983	0,06
153	0,0829	0,1159	1,9138	0,271	0,487	0,959	0,21
154	0,0458	0,1483	2,5466	0,293	0,505	0,996	0,01
155	0,0547	0,0827	1,9097	0,170	0,463	0,984	0,05
156	0,0024	1,7521	0,7806	0,281	0,447	0,964	0,17
157	0,0354	0,2232	1,9480	0,266	0,489	0,992	0,02
158	0,0336	0,2031	1,9136	0,275	0,476	0,984	0,06
159	0,0047	1,4478	0,6303	0,302	0,474	0,956	0,23
160	0,0415	0,2157	1,8932	0,297	0,519	0,982	0,06
161	0,3245	0,0749	1,8894	0,221	0,495	0,959	0,21
162	0,0626	0,1407	2,3291	0,295	0,510	0,978	0,08
163	0,2156	0,0336	1,9163	0,000	0,488	0,934	0,46
164	0,0333	0,1936	1,8830	0,298	0,474	0,983	0,06
165	0,0498	0,2045	1,9360	0,295	0,447	0,899	0,99
166	0,0591	0,2285	1,8795	0,324	0,470	0,921	0,64
167	0,0530	0,1448	1,9192	0,297	0,465	0,979	0,08
168	0,0087	1,2092	0,7156	0,316	0,475	0,971	0,12
169	0,0665	0,1649	1,8959	0,278	0,441	0,963	0,18
170	0,0222	0,5330	1,5512	0,315	0,464	0,957	0,23
171	0,0064	1,0235	0,7724	0,271	0,519	0,994	0,02
172	0,0769	0,2856	1,8466	0,300	0,432	0,940	0,39
173	0,0270	0,3887	1,9152	0,312	0,486	0,947	0,32
174	0,0062	1,3015	0,8347	0,338	0,520	0,981	0,07
175	0,0021	0,7664	2,2018	0,308	0,374	0,795	4,34
176	0,0046	1,4532	0,7855	0,337	0,474	0,961	0,20
177	0,0045	1,4000	0,7839	0,337	0,481	0,964	0,17
178	0,0284	0,2522	1,7346	0,327	0,483	0,957	0,23
179	0,0032	1,3479	0,9424	0,319	0,413	0,925	0,57
180	0,0047	1,2689	0,8188	0,305	0,432	0,967	0,15
181	0,0017	1,6737	0,7546	0,289	0,451	0,959	0,21
182	0,0087	1,3464	0,5896	0,329	0,515	0,949	0,30
183	0,0287	0,3758	1,7881	0,302	0,476	0,965	0,16
184	0,0142	0,9773	0,7580	0,311	0,530	0,983	0,06
185	0,0042	1,7558	0,6894	0,312	0,520	0,969	0,13
186	0,0771	0,1760	1,8831	0,293	0,454	0,938	0,42
187	0,0088	1,4379	0,6286	0,317	0,541	0,966	0,16
188	0,2797	0,0521	1,9969	0,145	0,511	0,983	0,06
189	0,0041	1,7013	0,5820	0,287	0,490	0,963	0,18
190	0,0045	1,6124	0,7853	0,308	0,523	0,982	0,06
191	0,0079	1,3007	0,8786	0,292	0,498	0,979	0,08
192	0,0082	1,1109	0,9227	0,324	0,505	0,967	0,15
193	0,0032	1,7347	0,9985	0,294	0,475	0,969	0,14
194	0,0039	1,6420	0,7742	0,306	0,503	0,964	0,17
195	0,0039	1,6618	0,7868	0,321	0,496	0,965	0,16
196	0,0082	1,2320	0,9471	0,322	0,496	0,961	0,19
197	0,0070	1,6843	0,7860	0,311	0,564	0,981	0,07
198	0,0057	1,4518	0,7300	0,306	0,548	0,976	0,09
199	0,0048	1,4106	0,7875	0,326	0,505	0,964	0,17
200	0,0421	0,3092	1,9483	0,305	0,510	0,980	0,07

Tabela 15 (Cont.)

cur va	α	m	n	θ_r	θ_a	c.a.	Teste F
	1/cm			cm^3/cm^3			ns, %
201	0,0046	1,5320	0,7974	0,311	0,447	0,950	0,29
202	0,0042	1,3414	0,9354	0,307	0,413	0,968	0,15
203	0,0031	1,4204	0,8552	0,308	0,428	0,979	0,08
204	0,0028	1,5900	0,9455	0,303	0,440	0,990	0,03
205	0,0027	1,5850	1,0970	0,301	0,417	0,971	0,12
206	0,0018	2,0153	1,0633	0,271	0,459	0,961	0,19
207	0,0035	1,6918	0,7709	0,270	0,468	0,973	0,11
208	0,0040	1,7320	0,7701	0,290	0,505	0,966	0,16
209	0,0025	1,8404	0,9406	0,298	0,472	0,965	0,17
210	0,0025	1,7593	0,9820	0,328	0,465	0,951	0,28
211	0,0031	1,9094	1,1953	0,317	0,464	0,988	0,04
212	0,0028	1,7598	0,8898	0,285	0,454	0,983	0,06
213	0,2449	0,0378	1,9676	0,000	0,465	0,988	0,04
214	0,0015	1,8572	0,8170	0,325	0,511	0,977	0,09
215	0,0027	1,8134	0,9428	0,311	0,471	0,979	0,08
216	0,0029	1,8760	1,0460	0,305	0,451	0,990	0,03
217	0,0034	1,8360	0,9023	0,317	0,490	0,974	0,10
218	0,0037	1,7073	1,1506	0,294	0,450	0,985	0,05
219	0,0459	0,1986	1,9450	0,275	0,498	0,979	0,08
220	0,0212	0,1912	0,4973	0,000	0,492	0,993	0,02
221	0,0146	0,0531	1,5218	0,000	0,458	0,925	0,57
222	0,0918	0,0395	1,8924	0,000	0,468	0,977	0,09
223	0,0599	0,0414	1,8592	0,000	0,450	0,935	0,44
224	0,0167	0,0536	1,5889	0,000	0,431	0,908	0,83
225	0,1556	0,0362	1,9077	0,000	0,513	0,988	0,04
226	0,0005	0,4076	0,2898	0,000	0,461	0,988	0,04
227	0,2054	0,0346	1,8937	0,000	0,457	0,979	0,08
228	0,1371	0,0354	1,8538	0,000	0,424	0,963	0,18
229	0,4842	0,0282	1,9587	0,000	0,441	0,950	0,29
230	0,1842	0,0227	1,8966	0,000	0,407	0,949	0,30
231	0,0842	0,0447	1,8794	0,000	0,455	0,932	0,49
232	0,0518	0,0506	1,8750	0,000	0,461	0,987	0,04
233	0,0364	0,1177	0,7802	0,000	0,466	0,967	0,15
234	0,0904	0,0429	1,8887	0,000	0,491	0,973	0,11
235	0,0028	1,0776	0,5230	0,258	0,496	0,988	0,04
236	0,0365	0,2083	1,9719	0,272	0,481	0,989	0,04
237	0,0060	1,3425	0,5075	0,275	0,517	0,988	0,04
238	0,2396	0,0325	1,9273	0,000	0,497	0,934	0,46
239	0,0016	1,6962	0,8339	0,284	0,450	0,990	0,03
240	0,0197	0,1826	2,2048	0,278	0,477	0,981	0,07
241	0,0454	0,1531	1,9022	0,243	0,429	0,976	0,10
242	0,0019	1,6549	0,8115	0,271	0,443	0,983	0,06
243	0,0027	1,0902	1,2391	0,285	0,431	0,987	0,04
244	0,0360	0,2450	1,9462	0,279	0,521	0,990	0,03
245	0,0016	1,5708	0,8966	0,300	0,450	0,989	0,03
246	0,0008	0,4997	1,9999	0,267	0,316	0,187	3,71
247	0,0036	1,1628	0,9468	0,275	0,448	0,986	0,05
248	0,0017	1,5780	0,7251	0,275	0,463	0,966	0,16
249	0,0024	1,6442	0,6805	0,243	0,454	0,985	0,05
250	0,0093	1,3085	0,9171	0,313	0,437	0,911	0,78

4.2.6.2. Verificação da estimativa da armazenagem

Para verificar a viabilidade da utilização das equações de estimativa da armazenagem da água no solo (modelos co-senoidal, Rijtema & Aboukhaled e Thornthwaite & Mather), foram calculados os teores de água correspondentes aos respectivos valores de armazenagem e feitos quinze estudos comparativos, adotando como variável independente os valores de umidade determinados experimentalmente e como variável dependente os valores de umidade estimados (utilizando a equação do armazenamento: $Arm = (\theta_a - \theta_{pmp}) Z_\theta$). Os valores dos coeficientes lineares e angulares estão apresentados na Tabela 16.

Em função do número de dias de leituras dos tensiômetros (vinte e um), do número de tensiômetros instalados (duzentos e cinquenta) e do número de dados perdidos, foram obtidos três mil e oitocentos e seis pares de pontos (umidade estimada versus umidade determinada experimentalmente). Sendo assim, nessa comparação o número de graus de liberdade da relação, do resíduo e total foi um, três mil oitocentos e quatro e três mil oitocentos e cinco, respectivamente.

Pelos resultados obtidos (Tabela 16), verifica-se que não houve diferença estatística, ao nível de significância de 1%, entre as quinze possibilidades estudadas.

Observa-se nesse caso específico que a equação de THORNTHWAITE & MATHER (1955) para estimativa de armazenagem foi a que apresentou coeficiente angular mais próximo da unidade e coeficiente linear mais próximo de zero, apesar de que em todos os quinze casos estudados não houve diferença estatística entre os valores estimados e determinados experimentalmente.

Devido não haver diferença estatística entre

os resultados obtidos (Tabela 16), optou-se por apresentar graficamente apenas o caso em que o sistema radicular cresce sigmoidalmente ($F=0,5$) para cada uma das equações de estimativa de armazenagem (Figuras 22 a 24).

Tabela 16 - Primeira aferição do modelo universal: teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimentalmente através de tensiômetros e curva de retenção, para os diferentes modelos de estimativa de armazenagem e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal ($F=0,5$); 2. sigmoidal ($F=1$); 3. sigmoidal ($F=3$); 4. potencial ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear ($F=1$) (DRIESSEN, 1986).

estimativa da armazenagem	raiz	coeficiente		r	tcalc
		lin.	ang.		
Dourado Neto & Jong-van-Lier ^a	1	-0,10	1,40	0,75	70,77
	2	-0,09	1,35	0,72	64,47
	3	-0,07	1,27	0,65	52,43
	4	-0,10	1,40	0,75	69,15
	5	-0,09	1,37	0,72	64,52
Rijtema & Aboukhaled	1	-0,10	1,41	0,75	70,74
	2	-0,09	1,36	0,72	64,56
	3	-0,07	1,28	0,65	52,57
	4	-0,10	1,41	0,75	69,16
	5	-0,10	1,38	0,72	64,59
Thorntwaite & Mather	1	0,00	1,14	0,76	71,31
	2	0,01	1,10	0,73	65,18
	3	0,03	1,04	0,66	54,88
	4	0,00	1,14	0,75	70,27
	5	0,01	1,11	0,73	65,72

^a Co-senoidal

Figura 22 - Primeira aferição do modelo universal: teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimentalmente, nas 250 parcelas experimentais nas diferentes datas de leitura através de tensiômetros e curva de retenção, estimando a armazenagem de água no solo pelo modelo co-senoidal, adotando crescimento do sistema radicular, nos três primeiros estádios, do tipo sigmoidal ($F=0,5$).

Figura 23 - Primeira aferição do modelo universal: teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimentalmente, nas 250 parcelas experimentais nas diferentes datas de leitura através de tensiômetros e curva de retenção, estimando a armazenagem de água no solo pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1975), adotando crescimento do sistema radicular, nos três primeiros estádios, do tipo sigmoidal ($F=0,5$).

Figura 24 - Primeira aferição do modelo universal: Teor de água estimado pelo modelo versus teor de água determinado experimentalmente, nas 250 parcelas experimentais nas diferentes datas de leitura através de tensiômetros e curva de retenção, estimando a armazenagem de água no solo pelo modelo de THORNTHWAITE & MATHER (1955), adotando crescimento do sistema radicular, nos três primeiros estádios, do tipo sigmoidal ($F=0,5$).

4.2.7. Segunda aferição do modelo universal

A partir do valor estimado do rendimento potencial de grãos de feijão em Piracicaba (3970,61 kg/ha) (Tabela 14) e do rendimento relativo estimado pelo modelo universal, para as 250 parcelas experimentais, calculou-se o rendimento (kg/ha) com limitação climática, hídrica e de nutrientes.

Os valores de rendimento estimados pelo modelo universal, para as quinze possibilidades estudadas (três equações de estimativa de armazenagem de água disponível no solo e cinco equações de estimativa de profundidade efetiva do sistema radicular), foram confrontados com os valores medidos experimentalmente. Os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Pelos resultados obtidos, verifica-se que não houve diferença estatística, ao nível de significância de 1%, entre os valores estimados pelo modelo universal e os valores medidos de rendimento (Tabela 17). Em função desses resultados, optou-se por apresentar graficamente apenas o caso em que o sistema radicular cresce sigmoidalmente ($F=0,5$) para cada uma das equações de estimativa de armazenagem (Figuras 25 a 27).

Apesar de não ter havido diferença estatística entre os valores estimados e medidos de rendimento, o modelo de estimativa de armazenagem de água de THORNTHWAITE & MATHER (1955) foi o que apresentou o menor coeficiente angular, enquanto nos outros dois modelos (co-senoidal e Rijtema & Aboukhaled) os coeficientes angulares são mais próximos da unidade.

Os coeficientes lineares nos quinze casos estudados apresentaram valores próximos, oscilando entre 0,54 e 0,57 $t.ha^{-1}$. Verifica-se portanto que o modelo universal superestimou os valores de rendimento, talvez por não considerar todos os nutrientes minerais essenciais ao

feijoeiro: fósforo, enxofre e micronutrintes (cloro, cobre, zinco, molibdênio, boro, manganês e ferro).

Cabe ressaltar que nesse caso específico, assume-se que não houve perda de rendimento devido a pragas e doenças.

Figura 25 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo universal versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$), sendo a armazenagem estimada pelo modelo co-senoidal.

Figura 26 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo universal versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992a), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979).

Figura 27 - Rendimento estimado (kg/ha) através da modelo universal versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992a), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de THORNTHWAITE & MATHER (1955).

Tabela 17 - Verificação da correlação entre o rendimento estimado (t/ha) pelo modelo universal (considerando cinco estádios de desenvolvimento) e o rendimento medido (t/ha), contemplando o déficit hídrico, o excedente hídrico e o fator químico, para três métodos de estimativa da armazenagem (Arm) da água no solo, C: co-senoidal (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992); F: Rijtema & Abouckhaled (1975) e T: THORNTHWAITE & MATHER (1955), e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).

raiz	Arm	Linear	Angular	r	tcalc
1	C	0,58	0,93	0,70	15,35
2		0,56	0,91	0,70	15,26
3		0,54	0,88	0,70	15,14
4		0,58	0,92	0,70	15,25
5		0,56	0,90	0,70	15,21
1	F	0,59	0,93	0,70	15,33
2		0,57	0,91	0,70	15,22
3		0,55	0,88	0,70	15,16
4		0,58	0,92	0,70	15,29
5		0,57	0,90	0,70	15,29
1	T	0,60	0,81	0,71	15,74
2		0,58	0,80	0,71	15,70
3		0,54	0,77	0,70	15,42
4		0,59	0,81	0,71	15,67
5		0,57	0,79	0,71	15,63

Rendimento máximo observado: 2017 kg/ha
 Produtividade: 3971 kg/ha.n₁=1.n₂=245.n=247.

4.3. Aferição do método apresentado por DOORENBOS et al. (1979)

O modelo apresentado por DOORENBOS et al. (1979) estima o rendimento com limitação climática e de água assumindo que não há redução do rendimento potencial por outros fatores de produção.

Verifica-se que não houve diferença estatística, ao nível de 1 % de significância, entre os valores estimados e medidos de rendimento, utilizando apenas um único valor de K_y para todo o ciclo (Tabela 18), ou considerando quatro valores de K_y (um valor específico para cada estágio) (Tabela 19).

Pelos resultados obtidos (Tabelas 18 e 19) referentes aos coeficientes lineares, verifica-se que o rendimento foi superestimado em relação aos valores medidos e aos valores estimados pelo modelo universal. Porém, o rendimento foi superestimado por todos os modelos considerados, sendo que o modelo apresentado por DOORENBOS et al. (1979) apresentou a maior superestimativa por não considerar as limitações referentes aos atributos químicos, as quais ocorreram em todas as parcelas experimentais.

Verifica-se que em todos os quinze casos o coeficiente angular foi muito próximo da unidade, reforçando o argumento de que a diferença de estimativa é relativa aos atributos químicos do solo.

Por não haver diferença estatística entre os resultados obtidos (Tabelas 18 e 19), optou-se por apresentar graficamente apenas o caso em que o sistema radicular cresce sigmoidalmente ($F=0,5$) para a equação de estimativa de armazenagem proposta por Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979) (Figuras 28 e 29).

Pelos resultados obtidos, verifica-se, pelos coeficientes angulares, que as curvas referentes às comparações entre os valores estimados por todos os modelos

e os valores medidos são sempre paralelas.

Tabela 18 - Verificação da correlação entre o rendimento estimado (t/ha) pelo método apresentado por DOORENBOS et al. (1979) (apenas um parâmetro para todo o ciclo) e o rendimento medido (t/ha), contemplando o déficit hídrico para três métodos de estimativa da armazenagem (Arm) de água no solo, C: co-senoidal (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992); F: DOORENBOS et al. (1979) e T: THORNTHWAITE & MATHER (1955), e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).

raiz	Arm	Linear	Angular	r	tcalc
1	C	1,57	1,08	0,65	13,30
2		1,57	1,08	0,65	13,35
3		1,57	1,07	0,65	13,54
4		1,57	1,08	0,65	13,35
5		1,57	1,07	0,65	13,41
1	F	1,58	1,08	0,65	13,32
2		1,57	1,08	0,65	13,37
3		1,58	1,07	0,65	13,56
4		1,58	1,08	0,65	13,36
5		1,58	1,07	0,65	13,43
1	T	1,57	0,95	0,66	13,89
2		1,56	0,94	0,67	13,94
3		1,55	0,93	0,67	14,06
4		1,57	0,94	0,66	13,92
5		1,55	0,94	0,67	13,97

Rendimento máximo observado: 2017 kg/ha
 Produtividade: 3971 kg/ha. $n_1=1$. $n_2=245$. $n=247$.

Tabela 19 - Verificação da correlação entre o rendimento estimado (t/ha) pelo método apresentado por DOORENBOS et al. (1979) (considerando 4 estádios) e o rendimento medido (t/ha), contemplando o déficit hídrico, para três métodos de estimativa da armazenagem (Arm) de água no solo, C: co-senoidal (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1992); F: DOORENBOS et al. (1979) e T: THORNTWHAITE & MATHER (1995), e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).

raiz	Arm	Linear	Angular	r	tcalc
1	C	1,75	0,99	0,66	13,64
2		1,74	0,99	0,66	13,71
3		1,75	0,97	0,67	13,99
4		1,75	0,99	0,66	13,71
5		1,73	0,99	0,66	13,83
1	F	1,76	0,99	0,66	13,66
2		1,76	0,99	0,66	13,72
3		1,76	0,96	0,67	13,98
4		1,76	0,99	0,66	13,72
5		1,75	0,98	0,66	13,83
1	T	1,75	0,84	0,68	14,35
2		1,73	0,84	0,68	14,41
3		1,71	0,82	0,68	14,55
4		1,74	0,84	0,68	14,38
5		1,71	0,84	0,68	14,46

Rendimento máximo observado: 2017 kg/ha
 Produtividade: 3971 kg/ha.n₁=1.n₂=245.n=247.

Figura 28 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo apresentado por DOORENBOS et al. (1979), considerando um único valor de K_y para todo o ciclo, versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estádios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979).

Figura 29 - Rendimento estimado (kg/ha) através do modelo apresentado por DOORENBOS et al. (1979), considerando um valor de K_y para cada estágio de desenvolvimento, versus rendimento medido (kg/ha), adotando curva de crescimento do sistema radicular nos três primeiros estágios de desenvolvimento do tipo sigmoidal ($F=0,5$), sendo a armazenagem estimada pelo modelo de Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979).

4.4. Modelo específico

O modelo específico se resume na determinação estatística das constantes de rendimento explicitadas da equação 81 (página 68), referente ao modelo universal, especificamente para o caso estudado: estimativa do rendimento da cultura de feijão com limitação climática, hídrica e de nutrientes para a Terra Roxa Estruturada Latossólica localizada na região de Piracicaba nas condições climáticas do ano de 1988.

Para esse caso específico, foram determinadas as constantes de rendimento relativas ao excedente hídrico (Tabelas 20 e 22) e ao déficit hídrico (Tabelas 21 e 22), considerando quatro e cinco estádios de desenvolvimento.

Os valores de F e coeficientes de correlação estão apresentados nas Tabelas 22 e 23. Pelo teste F, verifica-se que para esse caso específico esse modelo pode ser utilizado para estimativa de rendimento.

Tabela 20 - Constantes de rendimento (K_r) relativas ao excedente hídrico, considerando cinco estádios de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (met: C=CO-SENOIDAL, F=Rijtema & Aboukhaled e T=THORNTHWAITE) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986).

met	Raiz	estádio				
		1	2	3	4	5
C	1	-2,42	2,75	-0,15	0,47	1,16
	2	-1,25	0,80	-0,06	0,45	2,23
	3	-0,86	0,19	-0,03	0,52	2,05
	4	-1,33	1,34	-0,11	0,39	2,06
	5	0,66	-1,19	-0,03	0,16	1,31
F	1	-2,41	2,66	-0,23	0,64	1,88
	2	-1,10	0,57	-0,07	0,46	2,36
	3	-0,58	0,11	-0,03	0,37	1,55
	4	-1,11	0,91	-0,20	0,56	3,11
	5	0,94	-1,62	-0,05	0,19	1,62
T	1	0,06	-0,30	-0,11	0,20	2,64
	2	0,89	-1,52	-0,06	0,15	1,72
	3	-0,04	-0,33	0,03	0,11	0,98
	4	0,48	-0,87	-0,12	0,19	2,40
	5	0,95	-1,58	-0,06	0,13	1,67

Tabela 21 - Constantes de rendimento (K_r) relativas ao déficit hídrico, considerando cinco estádios de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (met: C=CO-SENOIDAL, F=Rijtema & Aboukhaled e T=THORNTHWAITE) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal ($F=0,5$); 2. sigmoidal ($F=1$); 3. sigmoidal ($F=3$); 4. potencial ($F=0,5$) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear ($F=1$) (DRIESSEN, 1986).

met	Raiz	estádio				
		1	2	3	4	5
C	1	-1,72	1,68	0,07	-0,05	0,01
	2	1,28	-1,40	0,18	-0,13	1,63
	3	0,95	-1,18	0,26	-0,17	1,05
	4	-0,10	-0,09	0,29	-0,20	2,35
	5	1,57	-1,67	0,14	-0,10	1,01
F	1	-1,74	1,71	0,06	-0,04	0,49
	2	1,23	-1,38	0,19	-0,14	1,68
	3	0,28	-0,62	0,34	-0,25	2,28
	4	-0,17	-0,05	0,30	-0,21	2,34
	5	1,53	-1,64	0,14	-0,10	0,96
T	1	-0,83	0,56	0,33	-0,40	2,24
	2	-0,36	0,10	0,34	-0,45	2,44
	3	0,91	-1,08	0,30	-0,41	2,06
	4	-1,50	1,30	0,22	-0,28	1,54
	5	-0,79	0,55	0,31	-0,42	2,21

Tabela 22 - Coeficiente de correlação (r) e valor F referentes à estimativa das constantes de rendimento (Kr) relativas ao déficit e excedente hídrico, considerando cinco estádios de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (met) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=2); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986), alusivos ao método específico.

raiz	Dourado Neto & Jong-van-Lier ^a		Rijtema & Aboukhaled		Thornthwaite & Mather	
	r	F	r	F	r	F
1	0,75	34,9	0,75	34,2	0,75	32,9
2	0,76	35,1	0,75	33,4	0,74	31,8
3	0,73	30,5	0,72	28,6	0,74	31,7
4	0,76	35,1	0,75	34,0	0,74	32,7
5	0,75	34,2	0,75	33,0	0,74	32,2

^a Modelo Co-senoidal

Tabela 23 - Coeficiente de correlação (r), valor F e constantes de rendimento (Kr) relativos ao déficit e excedente hídrico, considerando quatro estádios (Es) de desenvolvimento da cultura de feijão, três métodos (m: C=CO-SENOIDAL, F=Rijtema & Aboukhaled e T=THORNTHWAITE) de estimativa de armazenagem de água no solo e cinco tipos de curvas de crescimento do sistema radicular: 1. sigmoidal (F=0,5); 2. sigmoidal (F=1); 3. sigmoidal (F=3); 4. potencial (F=0,5) (DOURADO NETO & JONG-van-LIER, 1991); e 5. linear (F=1) (DRIESSEN, 1986), alusivos ao método específico.

m	R	Excedente hídrico				Déficit hídrico				r	F
		Es=1	Es=2	Es=3	Es=4	Es=1	Es=2	Es=3	Es=4		
C	1	-0,71	1,20	-0,14	-0,07	-0,60	-0,54	1,79	0,89	0,69	30,7
	2	-0,60	1,00	-0,08	-0,04	-0,91	-0,42	1,86	0,49	0,70	32,1
	3	-0,65	1,04	-0,02	-0,01	-0,84	-0,09	1,94	0,25	0,67	27,7
	4	-0,74	1,24	-0,12	-0,06	-0,56	-0,56	1,85	0,79	0,69	29,9
	5	-0,60	1,00	-0,09	-0,03	-0,84	-0,46	1,88	0,49	0,68	29,1
F	1	-0,71	1,21	-0,14	-0,07	-0,58	-0,52	1,77	0,95	0,69	30,4
	2	-0,54	0,9	-0,08	-0,04	-0,95	-0,40	1,83	0,55	0,69	31,8
	3	-0,62	0,99	-0,02	-0,01	-0,90	-0,11	1,91	0,26	0,67	27,5
	4	-0,72	1,21	-0,12	-0,06	-0,57	-0,55	1,82	0,85	0,68	29,5
	5	-0,53	0,88	-0,08	-0,03	-0,88	-0,44	1,85	0,55	0,68	28,8
T	1	-0,09	0,15	-0,02	0,00	-1,77	0,33	1,25	-0,20	0,73	39,8
	2	-0,11	0,19	-0,02	0,00	-1,90	0,69	0,98	-0,28	0,74	42,2
	3	-0,35	0,56	-0,02	0,00	-1,46	-0,15	1,51	-0,66	0,75	43,2
	4	-0,20	0,34	-0,04	0,00	-1,76	0,30	1,31	-0,27	0,73	39,9
	5	-0,05	0,09	-0,01	0,00	-1,8	0,54	1,16	-0,34	0,73	38,5

4.5. Época de colheita

Em função dos resultados obtidos durante a experimentação, foram determinados os parâmetros para utilização do modelo proposto por DRIESSEN (1986) para previsão da época de colheita especificamente para a cultura de feijão, cultivar Carioca (Tabela 24).

Tabela 24 - Dados relativos ao modelo de DRIESSEN (1986) para previsão da época de colheita de feijão.

resultados obtidos durante a experimentação	
data da semeadura	2 de maio de 1988
data em que atingiu o ponto de maturidade fisiológica	4 de agosto de 1988
data da colheita	16 de agosto
número de dias para atingir o ponto de maturidade fisiológica	95 dias
duração do ciclo	107 dias
duração do estágio 1	20 dias
duração do estágio 2	15 dias
duração do estágio 3	40 dias
duração do estágio 4	20 dias
duração do estágio 5	12 dias
dados necessários ao modelo de DRIESSEN (1986)	
temperatura máxima	28,0 °C
temperatura basal	7,5 °C
índice térmico	915 °C.dia

Os dados necessários (temperaturas máxima e mínima e índice térmico) ao modelo matemático para previsão da época de colheita estão na faixa proposta por DRIESSEN (1986).

4.6. Limitações do modelo universal

4.6.1. Capacidade de campo

A rigor capacidade de campo é conceitual e imensurável. Adotou-se um valor fixo de potencial mátrico (-100 cca) em função da experiência local. Esse atributo é de suma importância no cálculo da capacidade de água disponível. No caso específico do presente estudo, os valores numéricos de déficit e excedente hídrico são dependentes da umidade correspondente à capacidade de campo.

Dentre várias limitações, o conceito de VEIHMEYER & HENDRICKSON (1949) não leva em consideração a planta e os processos a ela relacionados, principalmente aeração.

Sendo assim, torna-se necessário definir um atributo alternativo à capacidade de campo.

Apesar do presente estudo não ter por objetivo obter um atributo definível para substituir o conceito de capacidade de campo, apresentar-se-á uma sugestão para nortear pesquisas futuras.

Define-se como umidade de manejo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) o teor de água ótimo para cultura de interesse correspondente ao máximo rendimento econômico dependente de atributos do solo (tamanho, forma, arranjo, natureza e distribuição relativa das partículas sólidas), da planta (espécie, variedade cultivada, idade, estado nutricional e fitossanitário) e da atmosfera (umidade relativa, temperatura, velocidade do vento e radiação solar).

Em função do acúmulo de matéria seca no tempo correspondente ao rendimento máximo econômico da cultura de interesse, conhecido através de estudo de mercado e do potencial genético da variedade cultivada da

espécie de interesse, pode-se estimar a quantidade ótima de oxigênio consumida, ao longo do ciclo, para produção de energia química metabólica equivalente.

Conhecendo-se a quantidade demandada ótima de oxigênio pela cultura de interesse e a concentração de oxigênio no ar do solo, calcula-se a porosidade livre de água ótima ($\beta_{\text{ótima}}, \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). Sendo assim, com a porosidade total ($\alpha, \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) determina-se a umidade de manejo ($\theta_m, \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$):

$$\theta_m = \alpha - \beta_{\text{ótima}} \quad (85)$$

4.6.2. Fator de água disponível

O fator de água disponível foi o artifício proposto por Rijtema & Aboukhaled (DOORENBOS et al., 1979) para considerar concomitantemente o solo, a planta e a atmosfera.

A limitação dessa proposição é a de que a definição é feita com base na umidade do solo e na demanda evapotranspiratória ótima em função de um grupo de espécies, quando, a rigor, deveria ser feita considerando além dessa demanda evapotranspiratória, o potencial total de água no solo e na planta, a condutividade hidráulica, a curva de retenção, a superfície radicular efetiva ótima e a zona de umidade dependente do sistema radicular para prever o atendimento da demanda transpiratória ótima pelo processo de absorção de água.

4.6.3. Outras limitações

Apesar do modelo universal ser geral, os valores numéricos limites referentes aos diversos atributos químicos e físicos do solo devem ser específicos para cada localidade.

A Tabela 25 mostra a relação dos atributos do sistema agrícola utilizados no modelo universal com possibilidade de interferência pelo homem. Essas relações são complexas e não foram consideradas no modelo proposto.

Tabela 25 - Relação dos atributos do sistema agrícola utilizáveis no modelo universal com possibilidade de interferência do homem.

Fase do sistema agrícola	Interferência
solo	.adubação orgânica .adubação química: Nitrogênio (N); Fósforo (P); Potássio (K); Enxofre (S); Magnésio (Mg) e micronutrientes .calagem Cálcio (Ca); Magnésio (Mg) e Enxofre (S) .gessagem Cálcio (Ca) e Enxofre (S)
planta	.controle fitossanitário .controle nutricional
atmosfera	.irrigação .quebra-vento

Não foi levada em consideração a interferência de pragas e doenças durante o experimento, porque houve controle fitossanitário eficiente.

Apesar de ser possível utilizar os

micronutrientes no modelo universal, os seus respectivos teores no solo não foram contemplados por não terem sido determinados. Porém, há limitações metodológicas para sua determinação. No caso de micronutrientes, a determinação na planta é preferível.

Não foi levada em consideração o histórico da área experimental. Nesse caso, há possibilidade de interferência no comportamento do objeto de estudo (planta).

4.7. Considerações finais

Em função dos resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes considerações:

1. déficit hídrico, excedente hídrico e deficiência nutricional limitam o rendimento da cultura de feijão de forma complexa;
2. apesar de não ter havido diferença estatística entre os três métodos de estimativa de armazenagem para esse caso específico, sugere-se utilizar o modelo co-senoidal por considerar o fator de água disponível e não apresentar taxa evapotranspiratória constante independentemente do teor de água no solo;
3. a simulação deve contemplar a variação temporal da profundidade efetiva do sistema radicular. Nesse caso, maiores estudos devem ser feitos para determinar o fator de forma de crescimento do sistema radicular para cada espécie. Ainda devem ser levadas em consideração as limitações de ordem física (soleira de grade, por exemplo), química (alumínio e manganês, por exemplo) e biológica (nematóide, por exemplo).
4. todos os modelos estudados (universal, específico e DOORENBOS et al., 1979) superestimaram o rendimento da cultura de feijão;
5. o modelo apresentado por DOORENBOS et al. (1979) foi o

que mais superestimou o rendimento por não considerar a limitação de nutrientes;

6. os modelos propostos (universal e específico) superestimaram o rendimento, principalmente, por não considerarem todos os atributos químicos do solo que limitam o rendimento da cultura de feijão;

7. a época de colheita da cultura de feijão, para esse cultivar específico, é previsível utilizando o procedimento apresentado por DRIESSEN (1986) e os valores de temperatura básica, máxima e índice térmico ajustados no presente trabalho.

5. CONCLUSÃO

Em função dos resultados obtidos e do que foi discutido, conclui-se que o modelo universal é utilizável para prever o rendimento para a cultura de feijão.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBIERI, V. & TUON, R. L. *Produção; programa computacional*. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Física e Meteorologia, 1992. (Disquete).

BERLATO, M.A. & MOLION, L.C.B. *Evaporação e evapotranspiração*. Porto Alegre, IPAGRO, 1981. 96p. (Boletim Técnico, 7).

BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 2.ed. Viçosa, UFV, 1982. 463p.

BRUNINI, O.; MIRANDA, M.A.C.; MASCARENHAS, H.A.A.; PEREIRA, J.C.V.N; SCHMIDT, N.C. *Teste de um modelo agroclimático que relacione o regime pluviométrico com as variações da produtividade agrícola*. In: SEGOVIA, R.M. *Determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola*. Brasília, CFP, 1982. p.21-46 (Coleção Análise e Pesquisa. 24).

CAMARGO, M.B.P. de; BRUNINI, O.; MIRANDA, M.A.C. de. *Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no estado de São Paulo*. Bragantia, Campinas, 45(2):279-92, 1986.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. *Abstracts on field beans (Phaseolus vulgaris L.)*. Cali, 1976. 5v.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. *Bean production program; annual report 1976*. Cali, 1977. p.A1-A91.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. *Bean production program; annual report 1978*. Cali, 1979. p.C1-C75.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. Morfología de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Cali, 1981. 50p. (Guia de Estudio).

COBRA NETO, A. Absorção e deficiências dos macronutrientes pelo feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Roxinho. Piracicaba, 1967. 67p. (Doutorado-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

CORSI, W.C. & SHAW, R.H. Evaluation of stress indices for corn in Iowa. Iowa State Journal of Science, Ames, 46 (1):79-85, 1971.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. Crop water requirements. Rome, FAO, 1975. 179p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H.; BENTVELSEN, C.L.M.; BRANSCHIED, V.; PLUSJÊ, J.M.G.A.; SMITH, M.; UITTENBOGAARD, G.O.; VANDERWAL, H.K. Yield response to water. Rome, FAO, 1979. 193p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo. Piracicaba, 1989. 180p. (Mestrado-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

DOURADO NETO, D. & JONG-van-LIER, Q. de. Programa para elaboração do balanço hídrico para culturas anuais e perenes. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Agricultura, 1991. 58p. (Manual do usuário).

DOURADO NETO, D. & JONG-van-LIER, Q. de. Hídrico; programa computacional. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Agricultura, 1992a. (Disquete).

DOURADO NETO, D. & JONG-van-LIER, Q. de. Curvaret; programa computacional. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Agricultura, 1992b. (Disquete).

DOURADO NETO, D. & JONG-van-LIER, Q. de. Proposta de uma nova equação para estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Agricultura, 1992c. 25p.

DOURADO NETO, D.; JONG-van-LIER, Q. de.; OMETTO, J.C. Generalização do critério de iniciar o balanço hídrico referente ao método de THORNTHWAITE & MATHER. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7., Viçosa, 1991. Anais. Viçosa, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1991. p.105-8.

DOURADO NETO, D.; JONG-van-LIER, Q. de.; BOTREL, T.A.; LIBARDI, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. Engenharia Rural, Piracicaba, 1(2):92-102, 1990.

DRIESSEN, P.M. A first introduction to quantified land evaluation procedures. Wageningen, Centre for World Food Studies, 1986. 116p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Critérios para distinção de classes de solo e de fases de unidade de mapeamento: normas em uso pelo SNLCS. Rio de Janeiro, 1988. 67p.

- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Staff. *Keys to soil taxonomy*. 4.ed. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1990. 422p. (SMSS. Technical Monograph, 19).
- FANCELLI, A.L. *Plantas alimentícias*. Piracicaba, CALQ, 1986. 131p.
- FANCELLI, A.L. Fenologia e exigências climáticas do feijoeiro. In: FANCELLI, A.L. & DOURADO NETO, D., ed. *Feijão irrigado*. 3.ed. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Agricultura, 1992. p.5-22.
- GARRIDO, M.A.T.; PURCINO, J.R.C.; LIMA, C.A.S. Efeitos de diferentes regimes de irrigação sobre o rendimento do feijoeiro na região norte de Minas Gerais. In: EPAMIG. *Projeto feijão*. Belo Horizonte, 1979. p.27-29. (relatório 77/78).
- GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society America Journal*, Madison, 41:892-8, 1980.
- HALTERLEIN, A.J. Bean. In: TEARE, I.D. & PEET, M.M., ed. *Crop water relations*. New York, John Wiley, 1983. cap. 5, p.157-85.
- HOWELER, R. La fertilización en el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.): elementos mayores y secundarios. In: CURSO INTENSIVO DE FRIJOL, Cali, 1975. Cali, CIAT, 1975.

- IZQUIERDO, J.A. The effect of accumulation and remobilization of carbon assimilate and nitrogen on abscission, seed development, and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) with different architectural forms. East Lansing, 1981. 205p. (Ph.D.-Michigan State University).
- JONG-van-LIER, Q. de & DOURADO NETO, D. Estimativa dos valores extremos de umidade referentes ao modelo de van Genuchten. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., Porto Alegre, 1991. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. p.69.
- KLUTHCOUSKI, J. Requerimentos nutricionais do feijoeiro. Goiânia, EMBRAPA/CNPAP, 1982. 45p.
- LAING, D.R.; JONES, P.G.; DAVIS, H.C. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: GOLDSWORTHY, P.R. & FISHER, N.M., ed. The physiology of tropical field crops. New York, Wiley-Interscience, 1984. cap. 9, p.305-49.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Piracicaba, CENA, 1989. 232p.
- MARCOS, Z.Z. Estrutura, agregação e água do solo. Piracicaba, 1968. 55p. (Doutorado-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- MASON, W.K.; CONSTABLE, G.A.; SMITH, R.C.G. Irrigation for crops in a sub-humid environment: the water requirements of soybeans. Irrigation Science, Berlin, 2:13-22, 1980.
- MENDONÇA, P.V.E. Sobre o novo método de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather. In: CONGRESSO LUSO-ESPANHOL PARA O PROGRESSO DAS CIÊNCIAS, 24., Madrid, 1958. p.415-25.

- MORAES, S.O. Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada. Piracicaba, 1991. 141p. (Doutorado-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- NIX, F.S. & FITZPATRICK, E.A. An index for crop water stress related to wheat and grain sorghum yield. Agricultural Meteorology, Amsterdam, 6:32-7, 1969.
- OMETTO, J.C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, CERES, 1981. 440p.
- PALTRIDGE, G.W. & PLATT, C.M.R. Radiative processes in meteorology and climatology. Amsterdam, Elsevier Scientific, 1976. 318p. (Developments in Atmospheric Science, 5).
- PAULETTO, E.A. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. Piracicaba, 1986. p.49. (Doutorado-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- SEDIYAMA, G.C. Necessidade de água para os cultivos. Brasília, ABEAS, 1988. 143p. (ABEAS. Curso da Engenharia da Irrigação. Módulo 4).
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, New York, 38 (1):55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C.W. & MATHER, J.R. The water balance. Centerton, Drexel Institute of Technology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, 8).

- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Science*, Baltimore, 68:75-94, 1949.
- VILLA NOVA, N.A. Dados meteorológicos do município de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/Depto. de Física e Meteorologia, 1989.
- WHITE, J.W. A quantitative analysis of the growth and development of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). Berkeley, 1981. 291p. (Ph.D. - University of California).
- YAO, A.Y.M. Agricultural potential estimated from the ratio of actual to potential evapotranspiration. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, 13(3):405-17, 1974.