

**MARCOS OLIVEIRA SANTANA**

**SISTEMA DE GEOESPACIALIZAÇÃO DA DEMANDA DE  
IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR PARA O ESTADO DE MINAS  
GERAIS EM TEMPO QUASE REAL**

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

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
OUTUBRO DE 2000**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S232s  
2000 Santana, Marcos Oliveira, 1973-  
Sistema de geoespacialização da demanda de irrigação  
suplementar para o Estado de Minas Gerais em tempo qua-  
se real / Marcos Oliveira Santana. – Viçosa : UFV, 2000.  
69p. : il.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

1. Irrigação. 2. Balanço Hídrico. 3. Sistemas de informa-  
ção geográfica. 4. Evapotranspiração. 5. IRG-NET. I. Uni-  
versidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD. 19.ed. 631.7

CDD. 20.ed. 631.587

**MARCOS OLIVEIRA SANTANA**

**SISTEMA DE GEOESPACIALIZAÇÃO DA DEMANDA DE  
IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR PARA O ESTADO DE MINAS  
GERAIS EM TEMPO QUASE REAL**

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

APROVADA: 11 de fevereiro de 2000

---

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama  
(Conselheiro)

---

Prof. José Maria Nogueira da Costa  
(Conselheiro)

---

Prof. Demétrius David da Silva

---

Prof. Marcos Heil Costa

---

Prof. Aristides Ribeiro  
(Orientador)

À minha família,  
especialmente à  
minha mãe, ao  
meu pai (*in memoriam*) e ao  
meu tio Nicodemos.

## **AGRADECIMENTO**

Aos meus pais, princípio de tudo, pela vida.

À Universidade Federal de Viçosa, pelos conhecimentos adquiridos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo imprescindível apoio financeiro.

Ao professor e amigo Aristides Ribeiro, pela valiosa orientação e dedicação.

Aos conselheiros Gilberto Sedyama e José Maria Nogueira da Costa, pelas críticas e sugestões.

Aos professores Demétrius David da Silva e Marcos Heil Costa, pelas críticas e sugestões.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela amizade e pelo companheirismo.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela amizade.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

MARCOS OLIVEIRA SANTANA, filho de Roque Pereira Santana (*in memoriam*) e de Ninfá Oliveira, nasceu na cidade de Itabuna, BA, em 16 de novembro de 1973.

Em julho de 1997, concluiu o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG.

Em agosto de 1997, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na UFV, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2000.

Em fevereiro de 2000, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Doutorado, da UFV.

## CONTEÚDO

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....	vii
LISTA DE QUADROS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xi
EXTRATO .....	xiv
ABSTRACT .....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. Manejo de irrigação .....	4
2.2. Balanço de água no solo .....	6
2.3. Sistema de informações geográficas .....	9
2.4. Uso da Internet na agricultura .....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	14
3.1. Região de estudo .....	14
3.2. Base de dados .....	15
3.3. Desenvolvimento do sistema IRG–NET .....	20
3.3.1. Cálculo da evapotranspiração de referência .....	21
3.3.2. Espacialização dos resultados .....	25
3.3.3. Cálculo do balanço de água no solo .....	27
3.4. Balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971).....	29
3.5. Estimativa do volume da água para irrigação .....	30
3.6. Análise da estimativa de evapotranspiração de referência .....	31



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
4.1. O sistema computacional IRG–NET .....	34
4.1.1. Descrição da página do sistema IRG–NET na Internet .....	34
4.1.2. Descrição do programa Balanço 1.0 .....	39
4.2. Espacialização da demanda de irrigação suplementar .....	44
4.2.1. Balanço hídrico diário .....	44
4.2.2. Balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) .....	46
4.2.3. Diferença entre o balanço hídrico diário e o balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971).....	48
4.3. Estimativa do volume total de água para irrigação .....	50
4.4. Comparação da evapotranspiração de referência .....	56
5. RESUMO E CONCLUSÕES .....	59
6. DIFICULDADES ENCONTRADAS E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
APÊNDICE A .....	68
APÊNDICE B .....	69

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- $\lambda$  = calor latente de evaporação
- $\gamma$  = coeficiente psicrométrico
- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann
- $\delta$  = declinação solar
- $\varphi$  = latitude
- $\gamma^*$  = coeficiente psicrométrico modificado
- $\omega_s$  = ângulo horário do pôr-do-sol
- $a = 0,25$  (coeficiente empírico)
- $AD_{(i)}$  = água disponível no período  $i$
- $AD_{(i-1)}$  = água disponível no período  $i-1$
- ASEE = erro-padrão de estimativa ajustado
- $b = 0,50$  (coeficiente empírico)
- CAD = capacidade de água disponível no solo
- $C_c$  = capacidade de campo
- CMCD = centro de missão de coleta de dados
- CRA = capacidade real de água no solo
- CTA = capacidade total de água no solo
- $d$  = deslocamento do plano zero
- $D$  = número de dias do período

Da = densidade aparente do solo  
DA<sub>(i-1)</sub> = *deficit* de água no período anterior a i  
DA<sub>i</sub> = *deficit* de água no período i  
Dr = distância relativa Terra – Sol  
ea = pressão de vapor de saturação  
ed = pressão parcial de vapor  
ETr = evapotranspiração real da cultura  
ETr<sub>i</sub> = evapotranspiração real da cultura no período i  
ETo = evapotranspiração de referência  
F = fator de ajuste (função da temperatura média anual)  
f = fator de disponibilidade  
FAO = organização das nações unidas para alimentação e agricultura  
G = fluxo de calor no solo  
INMET = instituto nacional de meteorologia  
INPE = instituto nacional de pesquisas espaciais  
INTERNET = rede mundial de computadores  
J = dia juliano  
kc = coeficiente de cultura  
ks = coeficiente de umidade do solo  
LAA = lâmina real de água no solo  
N = duração astronômica do dia  
n = horas de brilho solar  
n' = número de observações  
P = pressão atmosférica  
PCDs = plataformas de coleta de dados  
Pi = precipitação no período i  
Pm = ponto de murchamento  
Pp<sub>i</sub> = perda por percolação no período i  
Pr = profundidade do sistema radicular  
Q<sub>o</sub> = radiação solar extraterrestre  
r = coeficiente de reflexão da superfície

$R_{(i)}$  = rega no período  $i$   
 $R_a$  = radiação solar no topo da atmosfera  
 $R_b$  = saldo de radiação de ondas longas  
 $R_n$  = saldo de radiação na superfície da grama  
 $R_{ns}$  = saldo de radiação de ondas curtas  
 $R_s$  = radiação solar incidente na superfície  
 $s$  = declividade da curva de pressão de vapor  
SCD-2 = satélite de coleta de dados de segunda geração  
SEE = erro-padrão de estimativa  
SIMGE = sistema de meteorologia e recursos hídricos de minas gerais  
 $T$  = temperatura média do período considerado  
 $T_i$  = temperatura média do dia  $i$   
 $T_{i-1}$  = temperatura média do dia  $i-1$   
 $T_{kn}$  = temperatura mínima do ar  
 $T_{kx}$  = temperatura máxima do ar  
 $T_m$  = temperatura média  
 $U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura  
 $U_a$  = umidade atual do solo  
 $U_z$  = velocidade do vento a  $z$  metros de altura  
 $\hat{Y}_i$  = estimativa de ETo (FAO Tanque Classe A)  
 $Y_i$  = estimativa de ETo padrão no dia  $i$   
 $Z$  = altitude  
 $z$  = altura do anemômetro  
 $z_o$  = rugosidade da superfície

## LISTA DE QUADROS

1 –	Localização geográfica das plataformas de coleta de dados do SIMGE utilizadas no sistema IRG–NET .....	16
2 –	Localização geográfica das estações automáticas da CEMIG utilizadas para avaliação do sistema IRG–NET .....	18
3 –	Localização geográfica das estações climatológicas principais do INMET utilizadas para a avaliação do sistema IRG–NET .....	19
4 –	Porcentagem da área ocupada por classes da diferença entre a demanda de irrigação suplementar calculada pelo balanço hídrico de CAMARGO (1971) e pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 1 <sup>o</sup> de maio e 15 de setembro de 1999 .....	50
5 –	Resumo estatístico da análise de regressão da estimativa da evapotranspiração de referência calculada pelo método FAO-Tanque Classe A .....	58
1B –	Porcentagem da área ocupada por classes de demanda de irrigação suplementar calculada pelo balanço hídrico de Camargo e pelo balanço hídrico diário da cultura do feijoeiro plantado em 1 <sup>o</sup> de maio e 15 de setembro de 1999 .....	69

## LISTA DE FIGURAS

1 –	Mesorregiões geográficas do Estado de Minas Gerais .....	15
2 –	Localização espacial das estações meteorológicas utilizadas .....	19
3 –	Fluxograma do sistema IRG–NET .....	20
4 –	Fluxograma das etapas realizadas no programa Idrisi 2.0 para confecção dos mapas de ETo e de precipitação diária em Minas Gerais .....	26
5 –	Fluxograma das etapas realizadas para confecção dos mapas de área irrigada por município .....	33
6 –	Página inicial do sistema IRG–NET na Internet .....	35
7 –	Formulário de cadastro com informações para cálculo do balanço hídrico .....	36
8 –	Mapa de evapotranspiração de referência do dia 21:12:1999 em Minas Gerais .....	37
9 –	Mapa de precipitação do dia 24:12:1999 em Minas Gerais .....	38
10 –	Página com os arquivos para serem transferidos .....	39
11 –	Tela inicial do programa Balanço 1.0 .....	41
12 –	Tela de entrada dos dados de precipitação do programa Balanço 1.0 ...	41
13 –	Tela de saída com os resultados do balanço hídrico .....	42

14 –	Relatório com os resultados no formato de página da Internet .....	43
15 –	Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 1º de maio de 1999 .....	45
16 –	Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999 .....	45
17 –	Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) para a cultura do feijão plantado em 1º de maio de 1999 .....	47
18 –	Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) para a cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999 .....	47
19 –	Diferença entre o balanço hídrico de CAMARGO (1971) e o balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 1º de maio de 1999 .....	49
20 –	Diferença entre o balanço hídrico de CAMARGO (1971) e o balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999 .....	49
21 –	Área cultivada utilizando irrigação nos municípios de Minas Gerais ...	51
22 –	Requerimento de água para irrigação, por município, da cultura do feijão plantado em 1º de maio de 1999 .....	52
23 –	Requerimento de água para irrigação, por município, da cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999 .....	52
24 –	Evapotranspiração de referência acumulada no período de 1º de maio a 30 de julho de 1999 .....	54
25 –	Evapotranspiração de referência acumulada no período de 15 de setembro a 14 de dezembro de 1999 .....	54
26 –	Precipitação acumulada no período de 1º de maio a 30 de julho de 1999 .....	55
27 –	Precipitação acumulada no período de 15 de setembro a 14 de dezembro de 1999 .....	55
28 –	Histogramas de frequência das classes de evapotranspiração de referência acumulada e da precipitação acumulada nos períodos de 1º de maio a 30 de julho de 1999 (1) e (2), respectivamente, e de 15 de setembro a 14 de dezembro de 1999 (3) e (4), respectivamente .....	56

29 –	Comparação da estimativa da evapotranspiração de referência calculada pelo método FAO-Tanque Classe A e FAO-Penman Monteith para o ano de 1999 .....	57
1A –	Histogramas de frequência das classes de lâmina de irrigação suplementar total do ciclo calculada pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 15 de maio (1) e 15 de setembro (2) e pelo balanço hídrico de Camargo da cultura do feijão plantado em 15 de maio (3) e 15 de setembro (4) .....	68



## EXTRATO

SANTANA, Marcos Oliveira, M. S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2000. **Sistema de geoespacialização da demanda de irrigação suplementar para o Estado de Minas Gerais em tempo quase real.** Orientador: Aristides Ribeiro. Conselheiros: Gilberto Chohaku Sedyama e José Maria Nogueira da Costa.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema automático e monitorado de regionalização da demanda de irrigação suplementar das principais culturas irrigadas no Estado de Minas Gerais, disponibilizando tais informações via rede mundial de computadores (Internet), com três atualizações semanais. O sistema denominado IRG–NET utiliza dados de estações climáticas automáticas do Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais (SIMGE), para estimativa da perda de água pela cultura por evapotranspiração, bem como a reposição da água no solo pela precipitação. Foi utilizado um sistema de informações geográficas para espacializar e gerar mapas temáticos de evapotranspiração de referência e de precipitação diária do estado. Também, foi desenvolvido um programa computacional para calcular o balanço hídrico e determinar a lâmina de irrigação para qualquer localidade de Minas. O sistema desenvolvido teve o seu desempenho avaliado por meio da estimativa da demanda de irrigação suplementar acumulada para Minas Gerais no ano de 1999,

em duas épocas de plantio, para a cultura do feijoeiro. Foi calculada a demanda pelo sistema e por meio de um método climatológico de recomendação de irrigação proposto por CAMARGO (1971). Foi estimado o volume total de água utilizada na irrigação do feijoeiro em todos os municípios de Minas Gerais, nas duas épocas de plantio. Também, foi comparada a estimativa da evapotranspiração de referência para Viçosa, MG, no ano de 1999, calculada pelo método do Tanque Classe A e pelo método de Penman Monteith, sendo este considerado padrão e utilizado no sistema. Concluiu-se que as estimativas da demanda de irrigação suplementar acumulada, calculada pelo sistema para os ciclos iniciados em 1<sup>o</sup> de maio e em 15 de setembro, foram mais elevadas do que as estimativas calculadas pelo modelo climatológico proposto por CAMARGO (1971). O volume total de água para irrigação da cultura do feijoeiro em Minas Gerais no plantio de 1<sup>o</sup> de maio de 1999 foi de 611.720.830 m<sup>3</sup> e, no plantio de 15 de setembro, de 686.660.480 m<sup>3</sup>. O método do Tanque Classe A subestimou a evapotranspiração de referência em 7,6%.

## ABSTRACT

SANTANA, Marcos Oliveira, M. S., Universidade Federal de Viçosa, October 2000. **Geo-spatializing system for the supplementary irrigation demand for Minas Gerais State in quasi real time.** Adviser: Aristides Ribeiro. Committee members: Gilberto Chohaku Sedyama and José Maria Nogueira da Costa.

This study had the aim to develop an automatic and controlled system of regionalized supplementary irrigation demand for the main irrigated crop in the State of Minas Gerais, providing this information three times a week by the world wide web (Internet). The so-called IRG–NET system uses data collected by automatic weather stations belonging to the System of Meteorology and Water Supply of Minas Gerais (SIMGE) for the assessment of water loss in crop evapotranspiration, and also the water supply by rainfall. A geographic information system was used to spatialize and create thematic maps about crop evapotranspiration and daily rainfall in the State. A computer program was also developed to calculate the soil water balance and to determine the irrigation water depth for any place within the state. The performance of the developed system was evaluated by an assessment of the accumulated supplemental irrigation demand for Minas Gerais during the year of 1999, in two planting dates, for dry bean crops. The water demand was calculated by the system and by a climatic method for the recommendation of irrigation proposed by CAMARGO

(1971). The total volume of water used for bean irrigation within all potential irrigated area of Minas Gerais was estimated in two planting dates. The estimated reference crop evapotranspiration for Viçosa, Minas Gerais, was also compared for the year of 1999, calculated by the soil water balance class A pan and the Penman Montheith method. It was concluded that the accumulated supplemental irrigation demand for beginning on 1<sup>st</sup> May and on 15<sup>th</sup> September were higher than the estimates calculated by the climatic model suggested by CAMARGO (1971). The total water volume for the irrigation of bean crop in the State of Minas Gerais was 611,720,830 m<sup>3</sup> for the planting period of 1<sup>st</sup> May, while 686,660,480 m<sup>3</sup> were used during the cultivation period of 15<sup>th</sup> September. The evaporation class A pan method underestimated the reference crop evapotranspiration by 7.6%.

## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada no Brasil ocupa uma área de dois milhões e setecentos mil hectares, correspondendo a 5% da área plantada do país e respondendo por 16% da produção total e por 50% do valor dessa produção (SANTOS, 1998). A agricultura de Minas Gerais tem-se destacado no quadro nacional, motivada tanto pela tradição agrícola do povo mineiro quanto pela utilização crescente de técnicas modernas. A irrigação em Minas Gerais vem auxiliar muito o aumento da produtividade, minimizando os efeitos adversos do clima da região. Cerca da metade do território estadual é coberto por cerrado, caracterizado por intenso e prolongado período seco durante o ano; além disso, observa-se ocorrência de veranicos freqüentes em todo o estado. Assim, a utilização da irrigação vem aumentando, sendo esta prática bem desenvolvida nas regiões Norte, Noroeste, Triângulo Mineiro e Sul de Minas Gerais.

O êxito da prática da irrigação se baseia no planejamento cuidadoso, envolvendo desde a fase de projeto até a operação e o manejo do sistema de irrigação. O conhecimento da quantidade de água necessária para o bom desenvolvimento da cultura é vital para o manejo de áreas irrigadas. Assim, também o acompanhamento da entrada e saída de água no solo em curtos períodos permite ao técnico de irrigação ação mais efetiva, impedindo que as plantas sofram *deficit* hídrico, evitando, assim, o comprometimento da máxima

produção. O mau dimensionamento dos sistemas de irrigação, bem como o emprego de lâminas de água de reposição inadequadas, compromete não só o potencial de produção da cultura, mas também os recursos hídricos disponíveis. A aplicação de lâminas de água excessivas aumenta os custos de produção, além de promover a lixiviação de nutrientes do solo. No entanto, compromete o abastecimento das usinas hidroelétricas, propriedades e aglomerados urbanos situados a jusante. A aplicação de lâminas menores que o necessário à cultura implica queda na produção e, muitas vezes, salinização do solo.

As séries históricas de dados climáticos são muito úteis para o dimensionamento de sistemas de irrigação e, muitas vezes, têm sido empregadas para estimativa estatística da demanda de irrigação. Entretanto, a grande variabilidade interanual do clima compromete a exatidão dessas estimativas para uso em manejo, indicando ser mais adequada a utilização de dados climáticos em tempo real.

O número de estações meteorológicas principais no Brasil ainda é insuficiente para uma boa cobertura do território nacional, o que tem dificultado a boa caracterização das condições atmosféricas. Em Israel, país com extensão territorial semelhante à do Estado de Sergipe e com destaque na utilização da irrigação, existem 70 estações meteorológicas, enquanto Minas Gerais, com uma área aproximadamente 28 vezes maior, contava, até bem pouco tempo atrás, com apenas 32 estações mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia. Aliado a isso, não existia sistema público eficiente de disponibilização dos dados coletados, inviabilizando a geração de produtos de clima em tempo hábil para a tomada eficiente de decisões agrícolas.

Nesse contexto, vêm surgindo no Brasil núcleos de previsão climática estaduais que melhor adequam os produtos gerados às necessidades de cada estado. Esses núcleos vêm adquirindo plataformas de coleta de dados com transmissão de dados em tempo real via satélite e disponibilizando-os via Internet.

Utilizando dados climáticos de Minas Gerais e estados circunvizinhos, obtidos via Internet, propuseram-se, neste trabalho, os seguintes objetivos:

- *Geral*

Criar um sistema automático monitorado de regionalização da demanda de irrigação suplementar das principais culturas irrigadas no Estado de Minas Gerais, disponibilizando tais informações via rede mundial de computadores, com três atualizações semanais.

- *Específicos*

Estimar o balanço de água no solo e determinar a demanda de irrigação suplementar diária da cultura do feijoeiro em Minas Gerais, em duas épocas de plantio do ano de 1999.

Comparar a variação espacial da demanda suplementar de irrigação através do sistema proposto e pelo método sugerido por CAMARGO (1971), para duas épocas de plantio do ano de 1999, considerando-se solos de texturas médias.

Estimar o volume total de água necessário para irrigação suplementar, considerando-se as áreas irrigadas por município do Estado de Minas Gerais para a cultura do feijoeiro, em duas épocas de plantio, no ano de 1999.

Analisar a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método FAO-Penman Monteith, utilizado no sistema proposto, e pelo método FAO-Tanque Classe A para a localidade de Viçosa, MG, no ano de 1999.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Manejo de irrigação**

O objetivo principal da irrigação é suprir as necessidades hídricas da planta durante seu desenvolvimento, recolocando no solo a quantidade de água consumida pela evapotranspiração. A irrigação torna possível mais de uma safra anual, permitindo o aproveitamento intensivo do solo, inclusive dos cerrados e das regiões secas, o que minimiza as incertezas do clima, elevando substancialmente a produtividade agrícola.

Embora a irrigação seja uma técnica alternativa que visa ao aumento da produtividade das culturas, especialmente em regiões áridas e semi-áridas, esta técnica causa grande impacto nas disponibilidades hídricas dos mananciais de água, em virtude do grande consumo de água requerido nos sistemas de irrigação, especialmente em regiões com elevada concentração de áreas irrigadas e, principalmente, na época da seca (COSTA, 1991).

Um dos principais problemas que freqüentemente ocorrem na agricultura é a baixa eficiência com que são utilizados os recursos disponíveis. Uma produção eficiente e rentável deve constituir um dos principais objetivos da empresa agrícola. Para atingir esse fim, devem ser utilizados racionalmente os



recursos disponíveis, de tal maneira que sejam atingidos os mais altos níveis de produtividade econômica (FRIZZONE, 1995).

Atualmente, a união dos países em grandes blocos econômicos, aliada à globalização, requer sistemas produtivos agrícolas ainda mais eficientes. Nesse contexto, o aumento do nível tecnológico da produção é necessário, e a irrigação é uma técnica que viabiliza não somente o aumento da produtividade na safra, mas também permite produzir na entressafra, época em que os preços são mais elevados.

Grandes fontes de preocupação entre os irrigantes são os questionamentos sobre quando e quanto irrigar. Saber o momento certo de se iniciar a irrigação e quanta água se deve aplicar é o objetivo do manejo racional da irrigação. Nos dias atuais, tem-se verificado não somente uma elevação dos custos da energia, o que encarece o custo de produção, mas também a escassez dos recursos hídricos. Portanto, o manejo racional da irrigação passa necessariamente pelos aspectos econômicos envolvidos nesse processo.

A estimativa da quantidade de água, ou lâmina, a ser aplicada por irrigação é um problema de difícil solução. Normalmente, os sistemas de irrigação são dimensionados para atender às necessidades de água da cultura durante os períodos de máximo uso consuntivo. Fora desses períodos, se os sistemas operarem em sua capacidade de projeto, um excesso de água será perdido por drenagem profunda, lixiviando nutrientes para fora da zona radicular. Excesso de água pode também prejudicar o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, tornando-as menos eficientes em absorver nutrientes. Finalmente, o excesso hídrico, em determinadas condições, pode elevar o nível do lençol freático – restringindo o desenvolvimento do sistema radicular das plantas –, forçar a necessidade de drenagem ou provocar o processo de erosão pelo escoamento superficial da água. Tais fatos evidenciam a importância de se aplicar a quantidade exata de água em cada situação.

## 2.2. Balanço de água no solo

Uma forma para determinar quanto irrigar muito utilizada em áreas úmidas, nas quais a irrigação complementa a chuva, é determinar a necessidade de água a partir do balanço hídrico dos solos (REICHARDT, 1990). O balanço de água no solo é um método de estimativa da disponibilidade hídrica no solo para as plantas pela contabilização das entradas e saídas de água no sistema solo-água-plantas. Ele está fundamentado no princípio da conservação de massa, em que a transferência da massa de água, em determinado volume de controle, com capacidade finita de armazenamento e em determinado intervalo de tempo, pode ser determinada pelas variações nos fluxos de água no solo (BERGAMASCHI, 1992). A principal variável de entrada é a precipitação, e o mais importante componente de saída, para fins de manejo de irrigação, é a evapotranspiração.

As pesquisas no desenvolvimento e aplicação de modelos de balanço hídrico têm sido realizadas desde a década de 40 (XU e SING, 1998). Os modelos de balanço hídrico têm sido desenvolvidos em várias escalas de tempo (ex.: horária, diária, mensal, anual) e em vários graus de complexidade. O primeiro modelo de balanço hídrico mensal foi desenvolvido por THORNTHWAITE (1948) e, posteriormente, revisado por THORNTHWAITE e MATHER (1955, 1957). Esse modelo originalmente foi concebido para caracterização climática regional, mas tem sido adotado, modificado e aplicado a um largo espectro de problemas hidrológicos (ALLEY, 1984 e 1985; VANDEWIELE e XU, 1992; XU e VANDEWIELE, 1995).

Recentemente, modelos de balanço hídrico foram empregados para explorar os impactos das mudanças climáticas globais. GLEICK (1987) desenvolveu e testou um modelo de balanço hídrico mensal para avaliação do possível impacto climático na bacia de Sacramento (EUA). Os resultados indicaram que a aplicação de tais modelos pode prover mais informações sobre os efeitos hidrológicos nas mudanças climáticas do que as informações correntemente disponíveis. SCHAAKE e LIU (1989) desenvolveram um modelo simples de balanço hídrico para entender a relação entre o clima e os recursos

hídricos em 50 bacias hidrográficas na China oriental e ao longo do sudeste dos Estados Unidos. ARNALL (1992) usou o modelo de THORNTHWAITE e MATHER (1955), juntamente com vários cenários de mudanças climáticas, para examinar os fatores que controlam os efeitos das mudanças climáticas em 15 bacias hidrográficas do Reino Unido, representando diferentes condições climáticas e geológicas.

São várias as aplicações do balanço hídrico na agricultura. COSTA (1991) utilizou o balanço hídrico para definir a melhor época de plantio da cultura do milho de acordo com a economia dos recursos hídricos. SILVA (1997), utilizando um balanço hídrico seriado, analisou os riscos climáticos da cultura do arroz-de-sequeiro no Estado de Goiás, em diferentes épocas de plantio.

Uma área de grande aplicação do balanço hídrico é o zoneamento agroclimatológico. SANTOS (1999), utilizando o modelo de THORNTHWAITE e MATHER (1955) para calcular a deficiência hídrica média mensal da bacia do rio Itapemirim, ES, definiu as áreas mais propícias para a cultura dos cafés Conilon e Arábica para essa região.

Atualmente, o modelo de balanço hídrico é um dos métodos mais utilizados para determinar as necessidades hídricas das culturas. O modelo utilizado por Chesness et al. (1986), citados por SOUSA (1993), fez a previsão da demanda sazonal de irrigação com um erro médio de 16% para 13 estações de cultivo e para dois tipos de solo. Esses autores concluíram que esse nível de precisão foi aceitável, justificado pela complexidade dos processos físicos envolvidos, pela relativa simplicidade do modelo e pelo total de dados de campo utilizados.

BACCHI et al. (1996) utilizaram o balanço hídrico para estudar o comportamento da cultura da aveia forrageira de inverno em regime de irrigação, bem como a sua demanda hídrica na região de São Carlos, no Estado de São Paulo. Esses autores verificaram que a manutenção da umidade do solo em um nível de 50% da água disponível foi suficientemente satisfatória para garantir as máximas produtividades da cultura nas condições locais de solo e clima.

KRÜGER et al. (1999) conduziram, durante três anos, experimentos de campo com dois cultivares de morango, tendo comparado a produção da cultura irrigada com base no método do tensiômetro e no modelo climatológico. Esses autores confirmaram a influência positiva da irrigação na produção e no tamanho dos frutos de morango em relação ao tratamento não-irrigado. Apesar de encontrarem diferença estatística entre os métodos em apenas um dos anos de estudo e com somente um dos cultivares, os referidos autores recomendaram a utilização do modelo de balanço da água no solo por ser o método menos trabalhoso e que consome menos tempo na determinação da necessidade de água da cultura.

Outra aplicação dos modelos de balanço hídrico é na simulação do crescimento e rendimento das culturas. BHATTACHARYA e SASTRY (1999) fizeram avaliação comparativa de três modelos de crescimento de culturas que simulam os componentes do balanço de água no solo. Os modelos avaliados foram: a) modelo de Campbell e Diaz, baseado na utilização da fração da radiação solar interceptada pela cultura para produção de biomassa em relação ao índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de transformação do dossel – neste modelo, a evapotranspiração potencial é calculada com base na equação de Campbell; b) modelo de O'Leary et al., que usaram equações de regressão empregando a abordagem de graus-dia para calcular os componentes do balanço hídrico – a evapotranspiração potencial é definida com base no método do Tanque Classe A; e c) modelo de SWASIM (“Soil Water Simulation”), desenvolvido por Hayoe e De Jong, que calcularam os diferentes componentes do balanço hídrico, em termos de fluxos ascendente e descendente, usando-se a equação de Ritchie como etapa transitória dos cálculos. BHATTACHARYA e SASTRY (1999) afirmaram que o modelo de Campbell-Diaz, requerendo menor número de variáveis de entrada, provou ser o melhor modelo para previsão do balanço hídrico na zona radicular de *Brassica oleaginosa*.

Grande preocupação na escolha de um modelo de balanço hídrico tem sido a simplicidade no requerimento dos dados de entrada, desde que o nível de comprometimento seja aceitável. Para solucionar o problema de falta de dados

das propriedades hídricas do solo, como a curva de retenção de água e a condutividade hidráulica do solo, BORIN et al. (2000) avaliaram a “performance” do DRAINMOD, um modelo de simulação de drenagem da água do solo, sendo executado com diferentes níveis de dados de entrada. Eles verificaram que, mesmo com dados de entrada limitantes (somente textura e porosidade do solo na camada superficial), o modelo apresentou bons resultados na previsão das propriedades hídricas do solo e do nível do lençol freático. Apesar dos resultados satisfatórios, é preciso enfatizar que a utilização restrita de dados de entrada deve ser vista com cautela, pois, em geral, tais aproximações comprometem, de forma acentuada, a precisão dos modelos.

### **2.3. Sistema de informações geográficas**

A aquisição de dados que representam propriedades significativas da superfície da Terra é parte importante da atividade das sociedades organizadas. Desde as civilizações antigas até os tempos modernos, dados referenciados a localidades da superfície terrestre têm sido coletados por navegadores, geógrafos e outros estudiosos e organizados na forma de mapas e imagens. Esses dados são denominados “dados geográficos” e descrevem um objeto do mundo real quanto à sua posição em relação a um sistema de coordenadas conhecidas (localização geográfica); quanto às suas relações espaciais com outros objetos como pertinência, vizinhança e distância (relacionamentos espaciais); e quanto às suas propriedades medidas ou observadas (atributos físicos). As informações extraídas desses dados são denominadas “informações geográficas”.

Nas últimas décadas, o estudo científico dos recursos naturais por ramos da ciência como Hidrologia, Geologia, Meteorologia, Pedologia e Ecologia tem gerado novos dados passíveis de serem mapeados. Com essa massa crescente de dados, tornou-se praticamente impossível mapeá-los manualmente. Isso levou ao desenvolvimento de ferramentas automáticas e computadorizadas para manipulação desses dados, os sistemas de informações geográficas (SIG) (BARBOSA, 1997).

A dinâmica e a complexidade das operações no setor agrícola requerem o controle e a atualização constante de informações. Essas informações estão associadas às propriedades agrícolas e às suas particularidades, cujos detalhes estão normalmente ligados, dentre outros, aos mapas das áreas, à sua divisão em blocos e talhões e a vias de acesso, relevo, tipos de solo e uso da terra. Do manuseio e controle de tal volume de dados depende o gerenciamento agrícola, que, por sua vez, deixará de ser eficiente caso esses dados não se apresentem de forma integrada, atualizada e de fácil interpretação. Os SIGs apresentam-se, dessa maneira, como opção aos métodos tradicionais de gerenciamento, pois é uma ferramenta poderosa, integrando dados espaciais e seus atributos, possibilitando a simulação, a modelagem e a visualização de informações associadas aos mapas de áreas de cultivo e fornecendo subsídios ao processo de tomada de decisões (ROCHA, 1996)

Nos anos recentes, os SIGs têm sido utilizados extensivamente para suprir dados de entrada espaciais para qualidade de água e modelagem hidrológica devido à sua capacidade de armazenar, recuperar, manipular, analisar e mostrar dados geograficamente referenciados. Os avanços recentes da tecnologia computacional produziram SIGs com melhores resoluções nas imagens e com manipulação mais rápida. Fontes de dados digitais georreferenciados têm-se tornado cada vez mais acessíveis. Os recentes progressos nos SIG têm conduzido a análises dos mais diferentes tipos de dados espacialmente distribuídos. Sistemas avançados agora são capazes de sobrepor análises complexas. Essas técnicas de análise espacial deram uma nova dimensão à tecnologia SIG, permitindo aos usuários empregar esse sistema para ajudar a analisar e interpretar bancos de dados espaciais desenvolvidos para uma diversidade aparentemente ilimitada de aplicações (VERMA et al., 1998).

FARIA (1998) espacializou a demanda de irrigação suplementar da cultura do milho no Estado de Minas Gerais, utilizando séries históricas de dados para calcular a evapotranspiração de referência e a precipitação dependente. DANTAS NETO (1999) desenvolveu um trabalho semelhante na bacia do Leste,

gerando mapas de irrigação suplementar para a cultura do feijão e estimando a melhor época de plantio para a região.

KNOX et al. (1997) utilizaram técnicas de SIG para mapear o requerimento total anual de água para irrigação das principais culturas irrigadas no Reino Unido. Eles empregaram um modelo de balanço hídrico diário para cálculo da irrigação necessária de oito culturas, em três tipos de solos com texturas distintas. Foram utilizados dados climáticos de 11 estações meteorológicas representativas, sendo essa uma informação muito importante para o planejamento dos recursos hídricos.

#### **2.4. Uso da Internet na agricultura**

O computador foi desenvolvido para processamento e armazenamento de grandes volumes de informações. A informação acabou-se tornando um dos principais produtos da atualidade. A maior parte dessas informações está armazenada em computadores, e a rede mundial de computadores (Internet) deve seu sucesso ao fato de ter conseguido universalizar a informação, conectando milhões de computadores ao redor do mundo e permitindo a troca de informações de forma rápida e em tempo real.

A Internet pode ser considerada uma biblioteca eletrônica mundial; um banco de dados distribuído pelo Planeta que, atualmente, cresce de uma forma espantosa em quantidade de máquinas, serviços e usuários. Pode-se dizer que boa parte do conhecimento humano está armazenada na Internet e acessível a todos os seus usuários, mas a Internet não é apenas um banco de dados global; ela é também importante veículo de comunicação entre instituições, empresas e pessoas de todo o mundo.

Já existe grande quantidade de endereços na Internet que disponibilizam informações relacionadas à agricultura. A seguir, são relacionados alguns deles, onde podem ser encontradas valiosas informações nesta área:

- Agricultura Brasileira Online: <http://agrobusiness.hypermart.net/indexNN.html>
- Agricultura Web Brasileira: <http://www.surf.com.br/Agropecuaria/>

- Agricultural Information: <http://www.abdn.ac.uk/~agr342/infoagric.html>
- Agricultural Science: <http://www.yahoo.com/science/agriculture/>
- American Society of Agricultural Engineers: <http://www.asae.org/>
- American Society of Agronomy: <http://www.agronomy.org/asa.html>
- Bancos de dados climáticos:
  - <http://orion.cpa.unicamp.br/>
  - <http://www.aneel.gov.br/>
  - <http://www.duc.auburn.edu/its/duc/as/desktop/sites/linkhtml/weather.htm>
  - <http://www.inmet.gov.br/>
  - <http://www.ncdc.noaa.gov/onlineprod/drought/xmgr.html>
  - <http://yabae.cptec.inpe.br/>
- Biblioteca virtual de irrigação:
  - [http://www.wiz.uni-kassel.de/kww/projekte/irrig/irrig\\_i.html#index](http://www.wiz.uni-kassel.de/kww/projekte/irrig/irrig_i.html#index)
- Biblioteca Virtual para Pecuária: <http://www.ansi.okstate.edu/library/>
- Florida Agriculture Overview: <http://www.ifas.ufl.edu/>
- Livraria Virtual da Embrapa: <http://www.spi.embrapa.br/liv/>
- Negócios Agropecuários – *AgroSite*: <http://www.agrosite.com.br>
- Plants and Sustainable Agriculture: <http://www.envirolink.org/>
- Universidade Federal de Viçosa: <http://www.ufv.br>

São vários os serviços que o agricultor pode obter através da Internet, como: indicativos financeiros sobre o mercado agrícola, informações sobre manejo de bovinos e previsões de tempo, dentre outros. WASKMAN e HARKIN (1999), fazendo comparação entre os serviços de informações agrícolas disponibilizados em sistemas de telemetria desenvolvidos na década de 80 com as aplicações existentes na Internet atualmente, concluíram que, para o usuário final, os avanços obtidos eram muito questionáveis, já que os investimentos em conexão com a Internet eram relativamente elevados e os benefícios alcançados seriam difíceis de serem medidos. Há que se levar em consideração que os avanços na Internet são espantosamente rápidos, de forma que a realidade atual certamente é bem mais favorável. Apesar de tudo, o sucesso do uso da Internet na agricultura está associado à existência de produtos adequados à realidade do

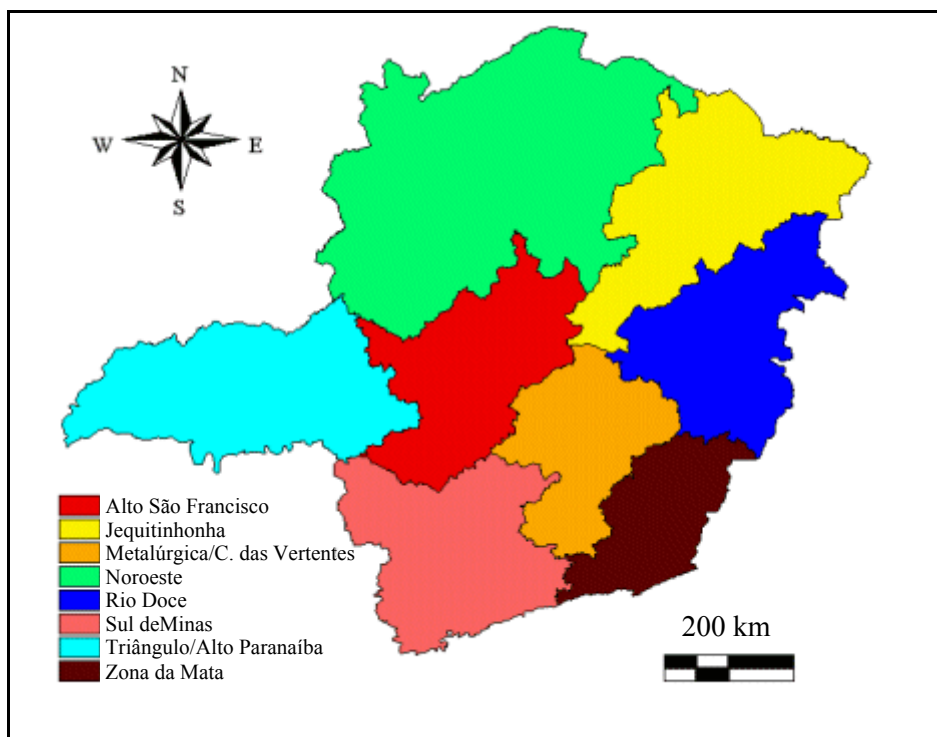


agricultor, ao treinamento do usuário e ao acesso à rede. Para isso, a parceria com órgãos extensionistas é imprescindível, tanto no balizamento dos produtos a serem gerados quanto no treinamento dos usuários ao acesso às informações via Internet.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Região de estudo**

A região de estudo abrangeu todo o Estado de Minas Gerais, situado na Região Sudeste do país, entre os paralelos 14° 13' e 22° 55' de latitude sul e os meridianos 39° 51' e 51° 02' de longitude oeste. O estado se caracteriza por apresentar topografia irregular, com os mais variados tipos climáticos em sua extensão, com vegetação do tipo floresta úmida costeira, floresta seca, floresta subtropical mista, cerrado e campo (MINAS GERAIS, 1990). O estado está dividido em mesorregiões geográficas (Figura 1), que foram consideradas para analisar a distribuição geográfica da demanda de irrigação suplementar.



Fonte: Mapa Geopolítico de Minas Gerais – IGA/CETEC – 1994

Figura 1 – Mesorregiões geográficas do Estado de Minas Gerais.

### 3.2. Base de dados

Os dados meteorológicos foram obtidos no Centro de Missão de Coleta de Dados (CMCD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por intermédio do convênio firmado entre aquela instituição, o Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais (SIMGE) e o Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV). No Quadro 1, apresentam-se as coordenadas geográficas das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) do SIMGE utilizadas no desenvolvimento de um sistema automático e monitorado de regionalização da demanda de irrigação suplementar (IRG–NET).

O CMCD conta com uma rede de estações climáticas automáticas no território nacional (PCDs), com capacidade para 500 unidades em funcionamento, espalhadas nos diferentes estados brasileiros. As PCDs são dotadas de sensores capazes de medir a umidade relativa, temperatura do ar,

radiação solar, pressão atmosférica, precipitação, velocidade e direção do vento. Os dados são coletados em intervalos de 10 minutos, e são calculadas as médias ou as integrações a cada três horas, sendo essas informações armazenadas em um sistema de aquisição de dados. Tais registros são enviados a cada três horas ao CMCD via satélite, por ocasião da passagem do satélite de coleta de dados de segunda geração, SCD-2, que tem como missão a coleta de dados ambientais. No CMCD, os dados são validados e disponibilizados na Internet (BRASIL, 1991-9). Além das PCDs localizadas no Estado de Minas Gerais, foram utilizadas estações de apoio situadas próximas da divisa de Minas Gerais, a fim de melhorar a interpolação.

Quadro 1 – Localização geográfica das plataformas de coleta de dados do SIMGE utilizadas no sistema IRG–NET

<b>Cidade</b>	<b>UF</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Cidade</b>	<b>UF</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Anagé	BA	14° 36' 43''	41° 08' 08''	Jaíba	MG	15° 20' 16''	43° 40' 26''
Anápolis	GO	16° 19' 36''	48° 57' 10''	Jataí	GO	17° 53' 00''	51° 43' 59''
Araçuaí	MG	16° 52' 00''	42° 03' 59''	Jequié	BA	13° 51' 00''	40° 04' 59''
Barretos	SP	20° 33' 25''	48° 34' 04''	Lavras	MG	21° 14' 00''	45° 00' 00''
Barro Alto	GO	14° 58' 14''	48° 54' 56''	Leopoldina	MG	21° 30' 00''	42° 45' 00''
B. Horizonte	MG	19° 55' 59''	43° 56' 00''	Montes Claros	MG	16° 42' 59''	43° 52' 00''
Brumado	BA	14° 09' 59''	41° 39' 59''	Nanuque	MG	17° 50' 21''	40° 21' 14''
Cach. Paulista	SP	19° 46' 59''	42° 03' 59''	Paracatu	MG	17° 12' 59''	46° 52' 00''
Caldas Novas	GO	17° 45' 00''	48° 37' 58''	Pirapora	MG	17° 19' 59''	44° 54' 59''
Caratinga	MG	22° 39' 59''	45° 31' 00''	Pires do Rio	GO	17° 18' 00''	48° 15' 59''
Catalão	GO	18° 10' 01''	47° 57' 00''	Queluz	SP	22° 32' 00''	44° 45' 59''
Ceres	GO	15° 18' 29''	49° 35' 53''	Quirinópolis	GO	18° 26' 53''	50° 27' 06''
Crixás	GO	14° 32' 56''	49° 58' 09''	Rio Verde	GO	17° 47' 53''	50° 55' 41''
Cruzeiro	SP	22° 34' 00''	44° 57' 00''	S. J. Barreiro	SP	22° 37' 59''	44° 35' 00''
Cunha	SP	23° 07' 00''	45° 07' 59''	Santa Helena	GO	17° 48' 48''	50° 35' 48''
Eunápolis	BA	16° 19' 59''	39° 35' 00''	Silveira	SP	22° 39' 59''	44° 52' 00''
Goiânia	GO	16° 44' 00''	49° 15' 00''	Teix. Freitas	BA	17° 32' 00''	39° 43' 00''
Goiatuba	GO	18° 01' 00''	49° 22' 00''	Vianópolis	GO	16° 44' 30''	48° 30' 59''
Ipatinga	MG	19° 28' 59''	42° 31' 00''	Viçosa	MG	20° 45' 13''	42° 51' 00''
Itajubá	MG	22° 26' 00''	45° 27' 00''	Vit. Conquista	BA	14° 51' 57''	40° 50' 21''
Itumbiara	GO	18° 25' 09''	49° 12' 55''				

Foram utilizados para análise do sistema IRG–NET no ano de 1999, além dos dados meteorológicos do SIMGE, dados de 30 estações climatológicas telemétricas e 52 estações pluviométricas da Companhia Energética do Estado de

Minas Gerais (CEMIG) (Quadro 2). Em breve, essa base de dados será incorporada ao sistema IRG–NET.

Também, foram utilizados dados de 39 estações climatológicas principais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do ano de 1999 (Quadro 3). Na Figura 2, mostra-se a distribuição espacial das estações coletoras de dados utilizadas no presente trabalho.

Quadro 2 – Localização geográfica das estações automáticas da CEMIG utilizadas para avaliação do sistema IRG–NET

<b>Estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Abadia dos Dourados	18° 29' 08''	47° 24' 11''	Ponte do Prata	18° 28' 54''	49° 37' 14''
Abaixo da B. R. Verde	18° 04' 05''	50° 10' 14''	Ponte do Rio Verdão	19° 57' 20''	44° 18' 20''
Aiuruoca	21° 58' 32''	44° 36' 11''	Ponte dos Vilelas	17° 07' 30''	47° 16' 19''
Alpercata	18° 58' 27''	41° 58' 13''	Ponte Goiás 206	19° 02' 27''	49° 42' 15''
Barra do Escuro	16° 16' 18''	45° 12' 46''	Ponte N. Paraopeba	17° 31' 13''	50° 29' 39''
Bom Jardim de Minas	21° 56' 49''	44° 11' 27''	Ponte São Marcos	20° 24' 28''	44° 37' 32''
Botelhos	21° 37' 59''	46° 23' 42''	Porto Cavalo	17° 01' 18''	45° 28' 13''
Buritizeiro	17° 21' 03''	44° 57' 43''	Porto das Andorinhas	18° 11' 35''	47° 29' 20''
Caatinga	17° 10' 00''	45° 52' 59''	Porto dos Pereiras	18° 41' 30''	45° 34' 55''
Cachoeira do Gambá	18° 52' 30''	49° 44' 32''	Porto Indaiá	19° 10' 24''	44° 41' 39''
Carmo de Minas	22° 07' 19''	45° 07' 45''	Porto Mesquita	19° 17' 04''	45° 06' 39''
Coa-Belo Horizonte	19° 54' 39''	44° 04' 05''	Porto Pará	21° 07' 23''	44° 13' 59''
Curvelo	18° 45' 23''	44° 25' 50''	Porto Tiradentes	19° 16' 40''	45° 17' 59''
Diamantina	18° 14' 57''	43° 36' 01''	Prata	19° 18' 25''	48° 55' 27''
Dores do Indaiá	19° 27' 47''	45° 36' 06''	Quartel Geral	19° 16' 24''	45° 33' 25''
Faz. Boa Vista de Goiás	17° 05' 20''	49° 40' 20''	Ribeirão Vermelho	21° 11' 26''	45° 03' 42''
Faz. Boa Vista de Minas	19° 43' 35''	47° 25' 18''	Salinas	16° 10' 13''	42° 17' 25''
Fazenda Bonita de Baixo	16° 56' 25''	49° 06' 02''	Santo Hipólito	18° 17' 48''	44° 13' 23''
Fazenda Campo Grande	20° 37' 55''	44° 26' 26''	S. Gonçalo R. Acima	20° 01' 50''	43° 32' 35''
Fazenda das Pedras	18° 01' 00''	45° 06' 34''	S. Pedro Ponte Firme	18° 06' 39''	46° 27' 30''
Faz. Energética Uberaba	19° 43' 00''	47° 57' 12''	São Roque de Minas	20° 14' 43''	46° 21' 56''
Fazenda Laranjeiras	21° 41' 04''	44° 21' 30''	SE Cons. Lafaiete	18° 11' 30''	45° 15' 34''
Fazenda Meloso	19° 05' 25''	42° 53' 09''	SE Pitangui	19° 40' 58''	44° 53' 25''
Fazenda Nova do Turvo	17° 05' 53''	50° 15' 20''	Três Marias Jusante	20° 40' 23''	43° 49' 30''
Fazenda Ouro Fino	19° 10' 14''	42° 49' 14''	Turmalina	17° 17' 08''	42° 43' 47''
Fazenda São Domingos	18° 06' 20''	47° 42' 00''	UHE Cajuru	20° 14' 15''	44° 45' 15''
Felisburgo	16° 38' 18''	40° 45' 41''	UHE Camargos	21° 40' 00''	44° 40' 00''
Ibituruna	21° 09' 08''	44° 44' 52''	UHE Mach. Mineiro	15° 31' 54''	41° 31' 00''
Iguatama	20° 10' 27''	45° 42' 41''	UHE Nova Ponte	19° 09' 08''	47° 40' 28''
Itambacuri	18° 01' 51''	41° 41' 06''	UHE Rio de Pedras	20° 13' 31''	43° 44' 08''
Itumirim	21° 19' 00''	44° 52' 15''	UHE Salto Grande	19° 09' 38''	42° 45' 00''
Januária	15° 33' 00''	44° 23' 59''	UHE S. Grande-SA	19° 10' 31''	42° 46' 50''
Juiz de Fora	21° 45' 51''	43° 21' 01''	UHE São Simão	19° 01' 13''	50° 29' 08''
Macaia	21° 09' 05''	44° 56' 22''	UHE Três Marias	18° 12' 23''	45° 14' 30''
Madre de Deus de Minas	21° 28' 57''	44° 19' 49''	Unai	16° 21' 27''	46° 54' 21''
Major Porto	18° 42' 29''	46° 02' 35''	Vargem Alegre	19° 36' 29''	42° 17' 53''
Paracatu	17° 13' 19''	46° 52' 28''	Vargem Bonita	20° 19' 36''	46° 21' 57''
Passos	20° 43' 08''	46° 36' 34''	Várzea da Palma	17° 35' 53''	44° 43' 50''
Patos de Minas	18° 34' 44''	46° 31' 05''	Viçosa	20° 45' 14''	42° 52' 54''
Pirapora	17° 20' 41''	44° 56' 30''	Vila Urucuia	16° 07' 59''	45° 43' 00''
Ponte Br-146	19° 21' 34''	46° 49' 59''			

Quadro 3 – Localização geográfica das estações climatológicas principais do INMET utilizadas para a avaliação do sistema IRG–NET

Estação	Latitude	Longitude	Estação	Latitude	Longitude
Aimorés	19° 29' 44''	41° 59' 24''	João Pinheiro	17° 44' 32''	46° 10' 20''
Araçuaí	16° 50' 58''	42° 04' 13''	Juiz de Fora	21° 45' 51''	43° 21' 01''
Araxá	19° 35' 35''	46° 56' 26''	Lavras	21° 14' 43''	44° 59' 58''
Arinos	15° 55' 00''	46° 06' 20''	Machado	21° 40' 28''	45° 55' 10''
Bambuí	20° 00' 23''	45° 58' 36''	Moçambinho	15° 03' 00''	44° 01' 00''
Barbacena	21° 13' 32''	43° 46' 24''	Monte Azul	15° 09' 17''	42° 52' 28''
Belo Horizonte	19° 55' 14''	43° 56' 16''	Montes Claros	16° 44' 05''	43° 51' 42''
Bocaiúva	17° 06' 28''	43° 48' 53''	Paracatu	17° 13' 19''	46° 52' 26''
Buritis	15° 37' 04''	46° 25' 23''	Patos de Minas	18° 34' 40''	46° 31' 01''
Caparaó	20° 31' 23''	41° 54' 15''	Pedra Azul	16° 00' 19''	41° 17' 49''
Capinópolis	18° 40' 54''	49° 34' 10''	Pirapora	17° 20' 23''	44° 56' 27''
Caratinga	19° 47' 22''	42° 08' 21''	Pompeu	19° 13' 27''	44° 56' 07''
Conceição do Mato Dentro	19° 02' 13''	43° 25' 29''	Salinas	16° 10' 12''	42° 17' 23''
Diamantina	18° 14' 56''	43° 36' 00''	São Lourenço	22° 06' 59''	45° 03' 15''
Espinosa	14° 55' 33''	42° 49' 09''	Sete Lagoas	19° 27' 56''	44° 14' 48''
Frutal	20° 01' 28''	48° 56' 26''	Teófilo Otoni	17° 51' 27''	41° 30' 19''
Governador Valadares	18° 51' 3''	41° 56' 57''	Uberaba	19° 44' 53''	47° 55' 54''
Itamarandiba	17° 51' 25''	42° 51' 32''	Unai	16° 21' 21''	46° 54' 18''
Janaúba	15° 48' 09''	43° 18' 32''	Viçosa	20° 45' 10''	42° 52' 51''
Januária	15° 32' 23''	44° 24' 35''			

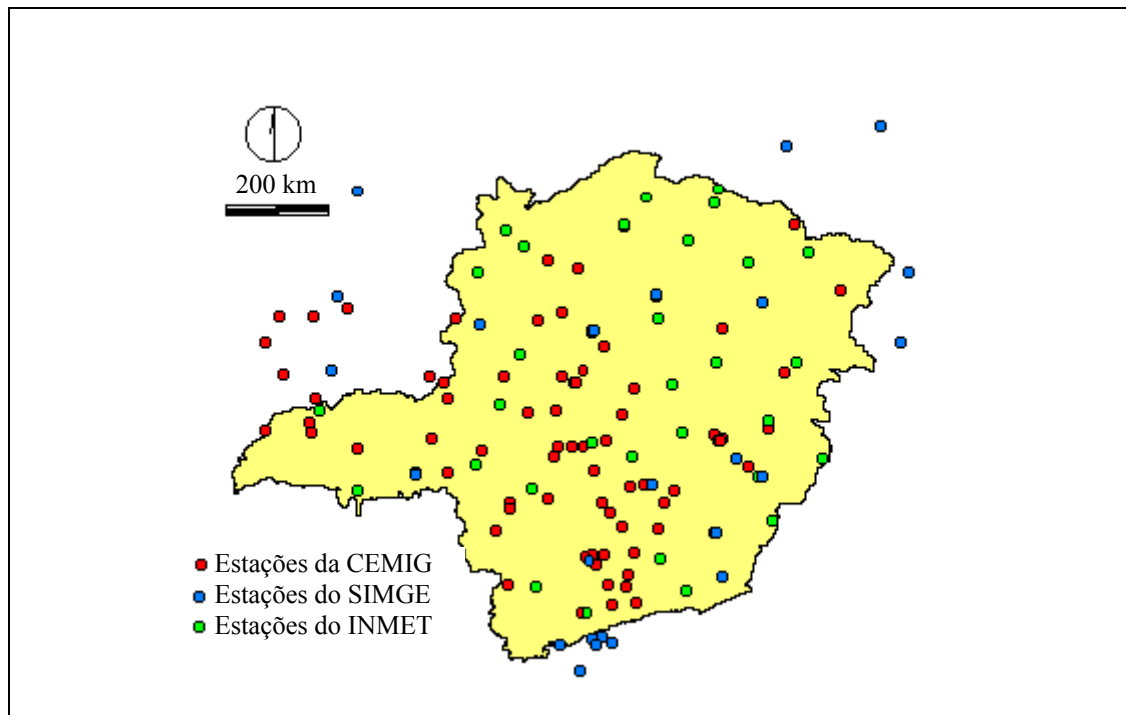


Figura 2 – Localização espacial das estações meteorológicas utilizadas.

### 3.3. Desenvolvimento do sistema IRG–NET

Foi desenvolvido um sistema denominado IRG–NET para disponibilizar na Internet mapas de evapotranspiração de referência (ETo) e de precipitação e um programa computacional para calcular o balanço de água no solo e determinar a demanda de irrigação suplementar para qualquer coordenada geográfica do Estado de Minas Gerais. Tais informações são disponibilizadas via Internet, com três atualizações semanais, juntamente com o programa para o cálculo do balanço hídrico. Na Figura 3, apresenta-se o fluxograma do sistema.

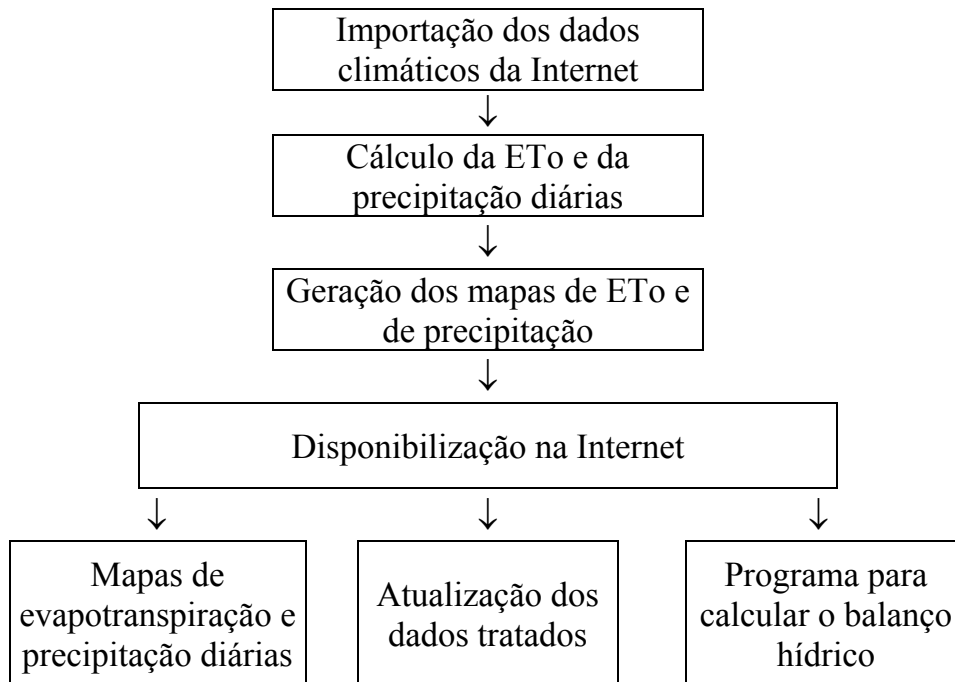


Figura 3 – Fluxograma do sistema IRG–NET.

O descarregamento dos dados do SIMGE na Internet é feito automaticamente, através do programa Godzilla 3.6. Foi desenvolvida uma rotina de cálculos em linguagem Visual Basic 6.0, para verificar falhas nos dados climáticos, calcular as médias e integrações diárias destes e calcular a ETo diária,



gerando como saída arquivos georreferenciados de ETo e de precipitação, para ser feita a espacialização.

### 3.3.1. Cálculo da evapotranspiração de referência

Para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), foi utilizado o método Penman-Monteith, considerado como padrão pela FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) em 1991, por ter apresentado os melhores resultados em estudos comparativos realizados em diferentes condições climáticas. O método combinado de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração da cultura hipotética (referência) admite resistência da superfície vegetada de  $70 \text{ s.m}^{-1}$  e calcula a resistência aerodinâmica para uma grama de 0,12 m de altura uniforme e com albedo de 23%. Assim, a evapotranspiração de referência de 24 horas pode ser expressa pela equação 1 (PEREIRA et al., 1997; SEDIYAMA, 1996).

$$ETo = \frac{s}{s+\gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{(s+\gamma^*)} \frac{900}{(T_m+275)} U_2 (e_a - e_d) \quad (1)$$

em que

ETo = evapotranspiração de referência, mm d<sup>-1</sup>;

s = declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C<sup>-1</sup>;

$\gamma^*$  = coeficiente psicrométrico modificado, kPa °C<sup>-1</sup> =  $\gamma [1+0,33U_2]$ ;

R<sub>n</sub> = saldo de radiação na superfície da grama, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

G = fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

$\lambda$  = calor latente de evaporação, MJ kg<sup>-1</sup>;

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico, kPa °C<sup>-1</sup>;

T<sub>m</sub> = temperatura média, °C;

U<sub>2</sub> = velocidade do vento a 2 m de altura, m s<sup>-1</sup>;

e<sub>a</sub> = pressão de vapor de saturação, kPa; e

e<sub>d</sub> = pressão parcial de vapor, kPa.

A seguir é apresentado o tratamento matemático utilizado para cálculo dos parâmetros da equação de Penman-Monteith relacionados anteriormente:

Fluxo de calor no solo (G)

$$G = 0,38 (T_i - T_{i-1}) \text{ na escala diária} \quad (2)$$

em que

$T_{i-1}$  = temperatura média do dia i, °C; e

$T_i$  = temperatura média do dia i-1, °C.

Saldo de radiação ( $R_n$ )

$$R_n = R_{ns} - R_b \quad (3)$$

em que

$R_{ns}$  = saldo de radiação de ondas curtas,  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ; e

$R_b$  = saldo de radiação de ondas longas,  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ .

Radiação solar no topo da atmosfera ( $R_a$ )

$$R_a = 37,586 \cdot d_r \cdot (\omega_s \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega_s) \quad (4)$$

em que

$\varphi$  = latitude (graus);

$\delta$  = declinação solar (graus);

$\omega_s$  = ângulo horário do pôr-do-sol (rad); e

$d_r$  = distância relativa Terra–Sol, adimensional.

$$\delta = 0,409 \text{sen} \left[ \frac{2\pi}{365} (J + 258) \right] \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0,33 \cos \left( \frac{2\pi}{365} \times J \right) \quad (7)$$

em que

J = dia juliano.

Saldo de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ )

$$R_{ns} = (1 - r) \times R_s \quad (8)$$

em que

$r$  = coeficiente de reflexão da superfície (albedo); e

$R_s$  = radiação solar incidente na superfície,  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ .

Velocidade média do vento corrigida para 2 m de altura ( $U_2$ )

$$U_2 = U_z \left[ \frac{\text{Ln}\left(\frac{z_2 - d}{z_0}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{z - d}{z_0}\right)} \right] \quad (9)$$

em que

$U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura,  $\text{m.s}^{-1}$ ;

$U_z$  = velocidade do vento a  $z$  metros de altura,  $\text{m.s}^{-1}$ ;

$z$  = altura do anemômetro, m;

$d$  = deslocamento do plano zero, m; e

$z_0$  = rugosidade da superfície, m.

Coeficiente psicrométrico

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (10)$$

em que

$P$  = pressão atmosférica, kPa;

$\lambda$  = calor latente de evaporação,  $\text{MJ.kg}^{-1}$ ; e

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico,  $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$ .

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3}) T \quad (11)$$

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,26} \quad (12)$$

em que

$Z$  = altitude, m.

Declividade da curva de pressão de vapor

$$s = \frac{4098 e_s}{(T_m + 273,3)^2} \quad (13)$$

Pressão de vapor de saturação

$$e_a = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_m}{T_m + 237,3}\right) \quad (14)$$

Pressão parcial de vapor

$$e_d = \frac{e_a UR}{100} \quad (15)$$

Fração relativa de luz solar

$$\frac{n}{N} = \frac{\left[\left(\frac{R_s}{R_a}\right) - a\right]}{b} \quad (16)$$

em que

$n$  = horas de brilho solar, h;

$N$  = duração astronômica do dia, h;

$R_a$  = radiação no topo da atmosfera,  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ;

$R_s$  = radiação solar incidente na superfície (radiação global),  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ;

$a = 0,25$ ; e

$b = 0,50$ .

$a$  e  $b$  são coeficientes empíricos variáveis conforme o local e a época do ano, mas, para efeito de estimativa da ETo, são considerados constantes.

$$N = \frac{24}{\pi} \times \omega_s \quad (17)$$

Saldo de radiação de ondas longas ( $R_b$ )

$$R_b = -\sigma \times \left(0,9 \times \frac{n}{N} + 0,1\right) \times \left(0,34 - 0,14\sqrt{e_d}\right) \times \left(T_{kx}^4 + T_{kn}^4\right) \times \frac{1}{2} \quad (18)$$

em que

$e_d$  = pressão parcial de vapor, kPa

$$\sigma = \text{constante de Stefan-Boltzmann } (4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}.\text{K}^{-4});$$

$$T_{kx} = \text{temperatura máxima do ar, K;}$$

$$T_{kx} = T_{\text{max}} + 273,15; \quad (19)$$

$$T_{kn} = \text{temperatura mínima do ar, K; e}$$

$$T_{kn} = T_{\text{min}} + 273,15. \quad (20)$$

### 3.3.2. Espacialização dos resultados

Utilizou-se o sistema de informações geográficas *Idrisi 2.0* para regionalizar a precipitação e a ETo no Estado de Minas Gerais (EASTMAN, 1995). O mapa vetorial de contorno do estado foi obtido por meio da importação de arquivos disponíveis na página da Internet do Projeto Geominas ([www.geominas.mg.gov.br](http://www.geominas.mg.gov.br)), oriundo de MINAS GERAIS (1980).

Os arquivos em formato ASCII foram convertidos em arquivos vetoriais através do módulo de importação *Xyzidris*, do *Idrisi*. O resultado da conversão foi interpolado de acordo com a metodologia usada por DANTAS NETO (1999), utilizando o comando *Interpol*. Os mapas resultantes da interpolação foram filtrados através do módulo *Filter* e reclassificados, usando-se o módulo *Reclass*. Logo após, foram sobrepostos ao mapa de contorno de Minas Gerais, usando-se o módulo *Overlay*, e finalmente transformados em figuras através do módulo *Bmpidris*. Todos esses passos realizados no *Idrisi* foram automatizados por meio de macros que permitem agrupar os diferentes módulos do programa. Os resultados finais foram mapas de evapotranspiração de referência e de precipitação diárias no Estado de Minas Gerais, disponibilizados na Internet. A Figura 4 ilustra as etapas de confecção desses mapas. Descrições mais detalhadas a respeito dos módulos do *Idrisi* citados anteriormente podem ser encontradas em EASTMAN (1995).

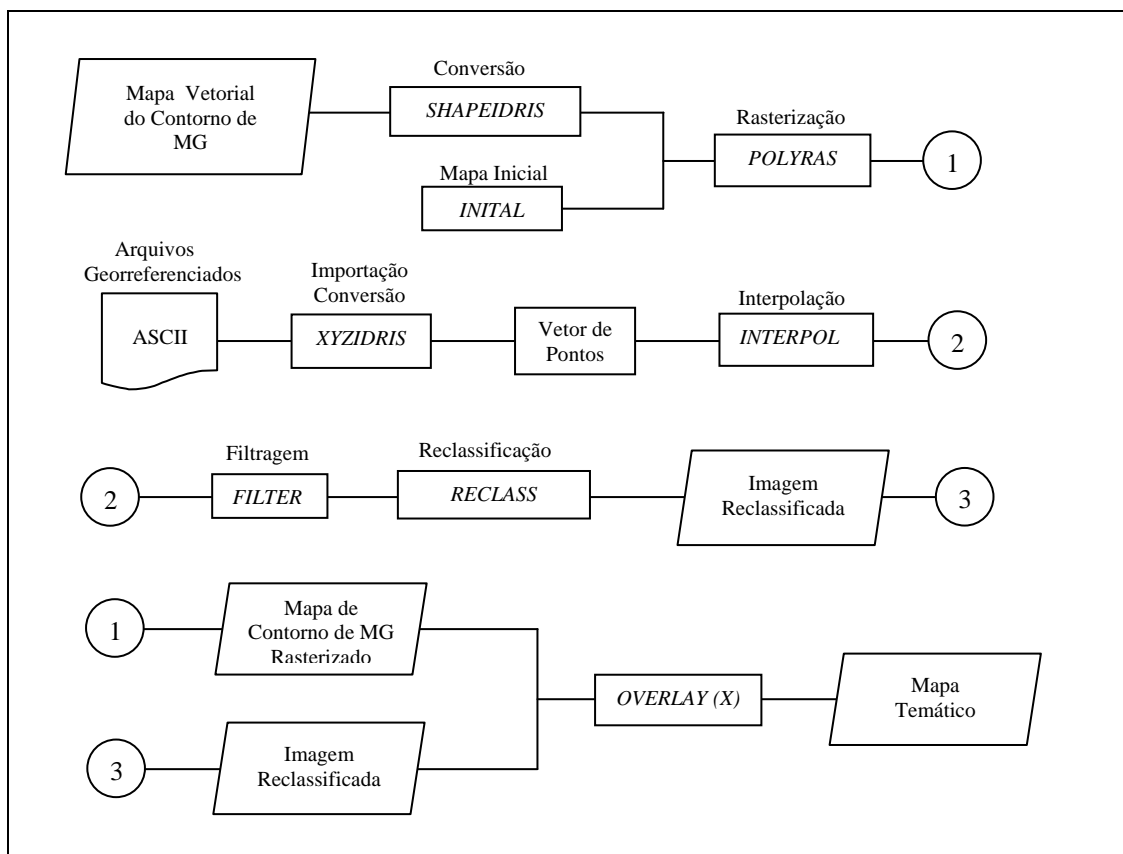


Figura 4 – Fluxograma das etapas realizadas no programa Idrisi 2.0 para confecção dos mapas de ETo e de precipitação diária em Minas Gerais.

### 3.3.3. Cálculo do balanço de água no solo

O balanço de água no solo pode ser representado em termos do *deficit* de água no solo, tendo como referencial a umidade na capacidade de campo, sendo descrito pela equação 21.

$$DA_i = DA_{i-1} + (ETr_i + Pp_i) - P_i \quad (21)$$

em que

$DA_i$  = *deficit* de água de água no período  $i$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ;

$DA_{i-1}$  = *deficit* de água no período anterior a  $i$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ;

$ETr_i$  = evapotranspiração real da cultura no período  $i$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ;

$Pp_i$  = perda por percolação no período  $i$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ; e

$P_i$  = precipitação no período  $i$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ .

A evapotranspiração real da cultura foi calculada a partir da equação 22 (BERNARDO, 1995).

$$ETr = k_s \ k_c \ ETo \quad (22)$$

em que

$ETr$  = evapotranspiração real da cultura,  $\text{mm d}^{-1}$ ;

$k_s$  = coeficiente de umidade do solo, adimensional;

$k_c$  = coeficiente de cultura, adimensional; e

$ETo$  = evapotranspiração de referência,  $\text{mm d}^{-1}$ .

O coeficiente de cultura e a duração dos estádios de desenvolvimento das culturas foram adaptados de DOORENBOS e KASSAM (1994) e DOORENBOS e PRUIT (1997).

O coeficiente de umidade do solo pode ser estimado pela equação 23.

$$k_s = \frac{\ln(LAA+1)}{\ln(CTA+1)} \quad (23)$$

em que LAA é a lâmina real de água no solo e CTA, a capacidade total de água no solo expressa pelas seguintes equações:

$$LAA = \frac{(Ua - Pm)}{10} Da \cdot Pr \quad (24)$$

$$CTA = \frac{(Cc - Pm)}{10} Da \cdot Pr \quad (25)$$

em que

$Ua$  = umidade atual do solo, % em peso;

$Cc$  = capacidade de campo, % em peso;

$Pm$  = ponto de murchamento, % em peso;

$Da$  = densidade aparente do solo,  $g\ cm^{-3}$ ; e

$Pr$  = profundidade do sistema radicular, cm.

De acordo com o tipo de cultura, foi considerado um valor mínimo da profundidade radicular na fase inicial de desenvolvimento. Esse valor aumenta linearmente na fase vegetativa, atingindo um valor máximo predefinido ao chegar na fase de maturação.

Para evitar que ocorresse esgotamento total da umidade do solo, utilizou-se apenas uma fração da capacidade total de água do solo, expressa pela equação 26.

$$CRA = CTA \cdot f \quad 26$$

em que

CRA = capacidade real de água do solo, mm;

f = fator de disponibilidade, adimensional; e

CTA = capacidade total de água do solo.

O fator de disponibilidade (f) depende da demanda climática e da sensibilidade da cultura em resistir ao *deficit* hídrico no solo.



### 3.4. Balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971)

Foi realizada uma comparação entre o modelo de balanço hídrico diário adotado pelo sistema e o balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971). Da mesma forma que no modelo de balanço hídrico diário, neste foram utilizados valores diários de precipitação, entretanto o cálculo da ETo foi baseado em valores normais da temperatura média mensal. A equação para o cálculo da ETo foi uma adaptação da equação de THORNTHWAITE (1948), e é dada pela seguinte equação:

$$ET_o = Q_o \cdot T \cdot F \cdot nd \quad 27$$

em que

$Q_o$  = radiação solar extraterrestre,  $mm \cdot d^{-1}$ ;

$T$  = temperatura média do período considerado,  $^{\circ}C$ ;

$F$  = fator de ajuste (função da temperatura média anual); e

$nd$  = número de dias do período.

Esse autor considerou balanço com turno de regas mensal, quinzenal, decendial ou quinquidial. Nas análises efetuadas, foi utilizado o turno de rega de cinco dias. Esse intervalo foi recomendado para solos com capacidade de água disponível (CAD) de 80 mm e água prontamente disponível para as plantas (AD) de 25 mm. A ETo foi calculada, utilizando-se a temperatura mensal das normais climatológicas, e dividida proporcionalmente quanto ao número de dias do período, que, apesar de ser cinco, pode variar de três a seis dias, dependendo do mês e do ano. A dotação de rega (DR), isto é, a quantidade de água a ser utilizada em cada aplicação, deve ser de 25 a 50% de AD. As equações 28 a 31 indicaram como é definido o valor da prescrição da rega a ser adotada.

$$AD_{(i)} = AD_{(i-1)} + P_{(i)} + R_{(i)} - ETc_{(i)} \quad (28)$$

$$AD_{(i)} = 25 \text{ se } AD_{(i)} > 25 \quad (29)$$

$$DR = AD_{(i-1)} - AD_{(i)} \text{ se } AD_{(i)}/4 < DR < AD_{(i)}/2 \quad (30)$$

$$DR = 2 \times AD_{(i)}/2 \text{ se } AD_{(i)} = 0 \quad (31)$$

em que

$AD_{(i)}$  = água disponível no período  $i$ , mm;

$AD_{(i-1)}$  = água disponível no período  $i-1$ , mm;

$P_{(i)}$  = precipitação no período  $i$ , mm;

$R_{(i)}$  = rega no período  $i$ , mm; e

$ETc_{(i)}$  = evapotranspiração no período  $i$ , mm [ $ET_c = kc \cdot ET_o$ ].

Foram calculados o balanço hídrico diário e o balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) para a cultura do feijão, em duas épocas de plantio (1<sup>o</sup> de maio de 1999 e 15 de setembro de 1999), nas estações listadas nos Quadros 1, 2 e 3. Posteriormente, foi feita a espacialização, para Minas Gerais, da demanda de irrigação suplementar acumulada nos dois períodos de estudo calculada pelos dois métodos de balanço hídrico, de acordo com a metodologia descrita no item 3.3.2. Também, foi espacializada a diferença entre a demanda de irrigação calculada pelo método do balanço hídrico de CAMARGO (1971) e a do balanço hídrico diário.

### **3.5. Estimativa do volume da água para irrigação**

Foram realizadas a estimativa e a espacialização do requerimento de água para irrigação, por município, no ano de 1999. Para tanto, foi utilizado o mapa vetorial com os limites municipais do Estado de Minas Gerais, obtido por meio da importação de arquivos disponíveis na página da Internet do projeto Geominas ([www.geominas.mg.gov.br](http://www.geominas.mg.gov.br)). Os valores da área irrigada por município foram obtidos do Censo Agropecuário de Minas Gerais 1995-1996 (FUNDAÇÃO ... – IBGE, 1998).

Foram feitas análises em duas épocas de plantio (1<sup>o</sup> de maio de 1999 e 15 de setembro de 1999), considerando-se que toda a área irrigada era cultivada com feijão (justificada por ser uma das culturas mais irrigadas em Minas Gerais e ser plantada mais de uma vez por ano).

Os valores de demanda de irrigação suplementar foram calculados pelo método do balanço hídrico diário apresentado no item 3.3.3. para as 145 estações com disponibilidade de dados. Posteriormente, esse resultado foi interpolado através do módulo *Interpol* do *Idrisi 2.0*. O resultado da interpolação foi transformado em tabelas através do módulo de exportação *Grassidris*. Foi desenvolvido um programa em Visual Basic 6.0 para ler essas tabelas e retornar o valor médio da demanda de irrigação para todos os municípios de Minas Gerais. Esses valores foram multiplicados pela área irrigada para obter o volume de água requerido para irrigação em m<sup>3</sup>. Esses resultados foram utilizados para reclassificar os mapas de limites municipais através do módulo *Assign* (Figura 5).

### 3.6. Análise da estimativa de evapotranspiração de referência

Foi feita uma comparação para Viçosa, MG, dos valores de ETo estimados pelo método FAO-Tanque Classe A, muito utilizado no manejo de irrigação, com a estimativa de ETo utilizando o método FAO-Penman Monteith, discutido no item 3.3.1. como padrão. Os valores de evaporação do Tanque Classe A foram obtidos da estação climatológica principal do INMET de Viçosa, ao passo que os dados para o cálculo da ETo pelo método de Penman-Monteith foram utilizados da Plataforma de Coleta de Dados do SIMGE de Viçosa.

Foram realizadas análises de regressão linear e regressão linear passando pela origem e, como parâmetro comparativo, foram calculados o erro-padrão de estimativa (SEE) e o erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE).

$$SEE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n'} \right] \quad (32)$$

em que  $Y_i$  é a estimativa de ETo padrão no dia  $i$ ,  $\hat{Y}_i$  é a estimativa de ETo calculada pelo FAO-Tanque Classe A correspondente e  $n'$  é o número total de observações, que foram de 335 no ano de 1999. Para o cálculo do ASEE, o valor  $\hat{Y}_i$  é a estimativa ajustada pela origem. O SEE concede igual peso às diferenças

absolutas entre os valores-padrão e estimados. Dessa forma, os parâmetros SEE e ASEE serviram para indicar quão bem o método FAO Tanque Classe A estimou a ETo em relação ao padrão.

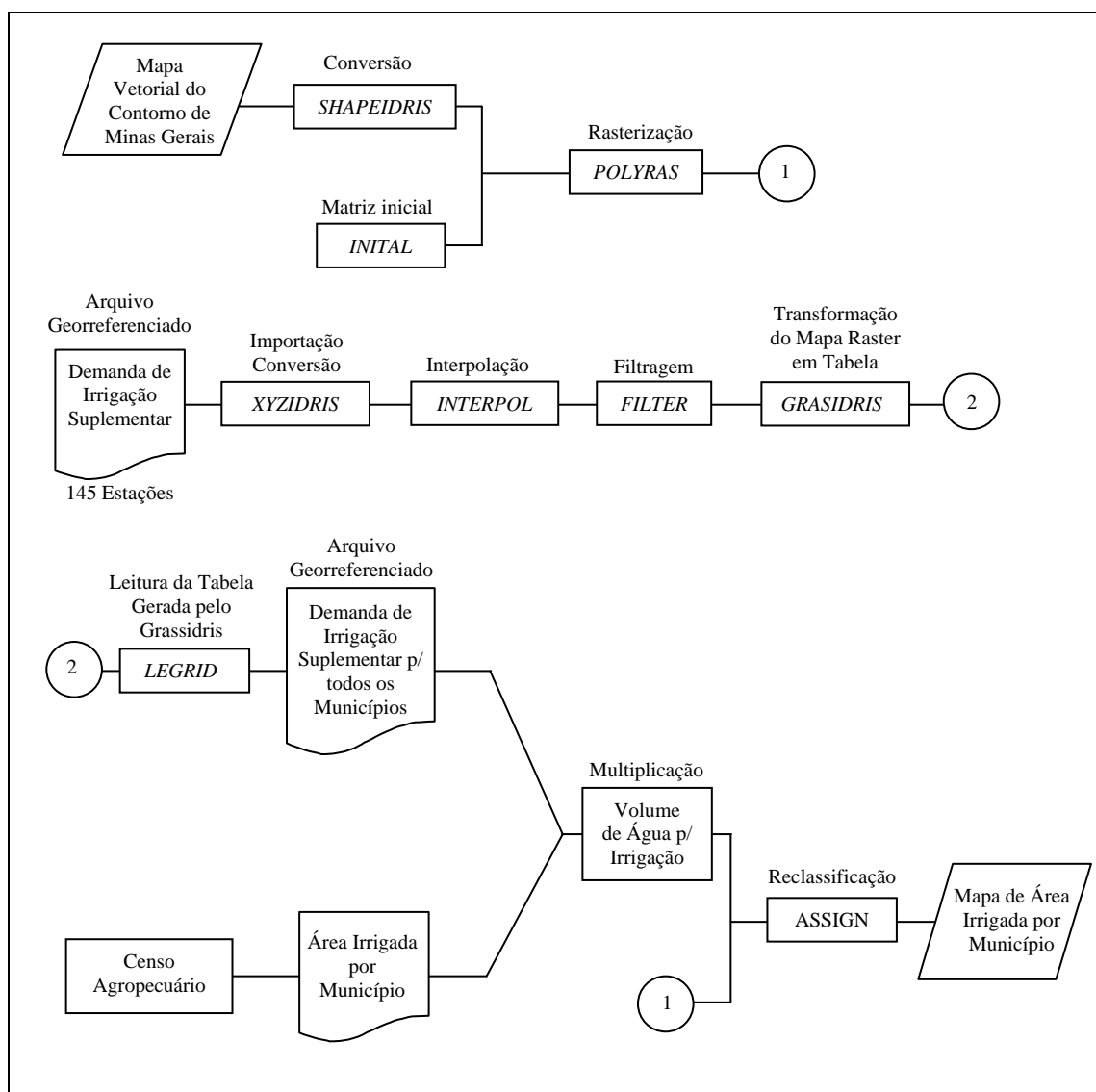


Figura 5 – Fluxograma das etapas realizadas para confecção dos mapas de área irrigada por município.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. O sistema computacional IRG–NET**

Foi desenvolvido um sistema computacional automático monitorado, denominado IRG–NET, para cálculo e disponibilização, via Internet, da demanda suplementar de irrigação no Estado de Minas Gerais, em tempo quase real. Esse sistema é direcionado a produtores rurais, técnicos, extensionistas e cooperativas agrícolas que utilizam irrigação e precisam determinar a lâmina de água a ser repostada à cultura, permitindo o melhor manejo da atividade e a preservação dos recursos hídricos.

#### **4.1.1. Descrição da página do sistema IRG–NET na Internet**

Foi desenvolvida uma página na Internet para disponibilizar aos usuários os produtos do sistema IRG–NET. Essa página pode ser encontrada no endereço eletrônico <http://www.dea.ufv.br/irgnet/index.htm>, sendo na página inicial (Figura 6) encontrados os seguintes produtos: 1) cadastro do usuário; 2) mapas de ETo; 3) mapas de precipitação; e 4) área de transferência (“download”) do programa Balanço 1.0 e dos dados climáticos formatados, ambos necessários ao cálculo da demanda suplementar de irrigação.

Na página inicial, a opção “Cadastro” dá acesso a um formulário (Figura 7), que deve ser preenchido com informações sobre o perfil do usuário, auxiliando no aprimoramento do sistema. Outras informações requeridas no formulário são úteis para rodar o programa Balanço 1.0, permitindo, também, um atendimento personalizado ao usuário que tenha dificuldade em operar o programa, sendo os resultados enviados por meio de correio eletrônico ao solicitante.

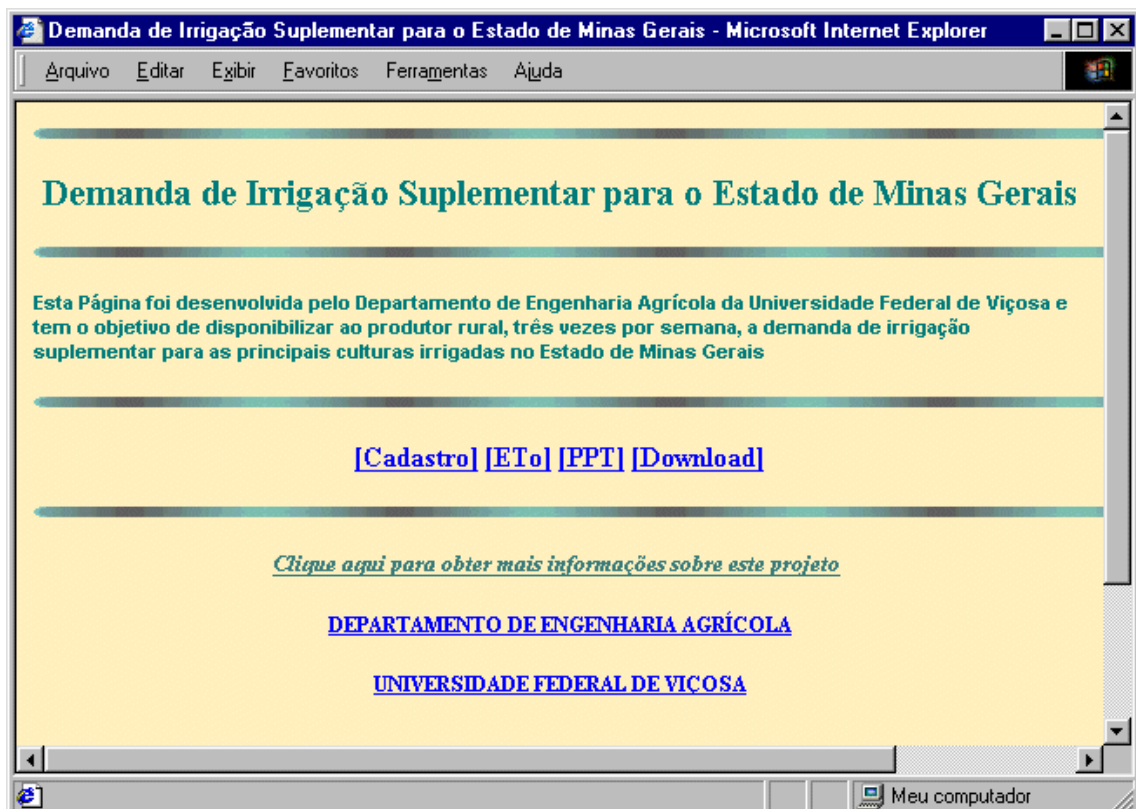


Figura 6 – Página inicial do sistema IRG–NET na Internet.



Evapotranspiração de Referência para Minas Gerais - Microsoft Internet Explorer

Arquivo Editar Exibir Favoritos Ferramentas Ajuda

## Cadastro de Produtores

Estamos disponibilizando em caráter experimental o Balanço Hídrico Semanal de sua Propriedade. Se você tem interesse em receber regularmente este serviço preencha o formulário abaixo com as seguintes informações:

● Propriedade:

● Proprietário:

● Cidade:  ● Latitude:

● Longitude:  ● Altitude:

● Cultura:  ● Ciclo:  Precoce  Tardio

Concluído Meu computador

Figura 7 – Formulário de cadastro com informações para cálculo do balanço hídrico.

Na página inicial, a opção “ETo” encaminha para os mapas de ETo, onde são disponibilizados os mapas com totais diários de evapotranspiração de referência, para Minas Gerais, dos sete dias anteriores à data da última atualização. Esses mapas são classificados em intervalos de 1 mm, como pode ser visto na Figura 8. Da mesma forma, a opção “Precipitação” dá acesso aos mapas de precipitação, que são classificados em intervalos de 7 mm (Figura 9).



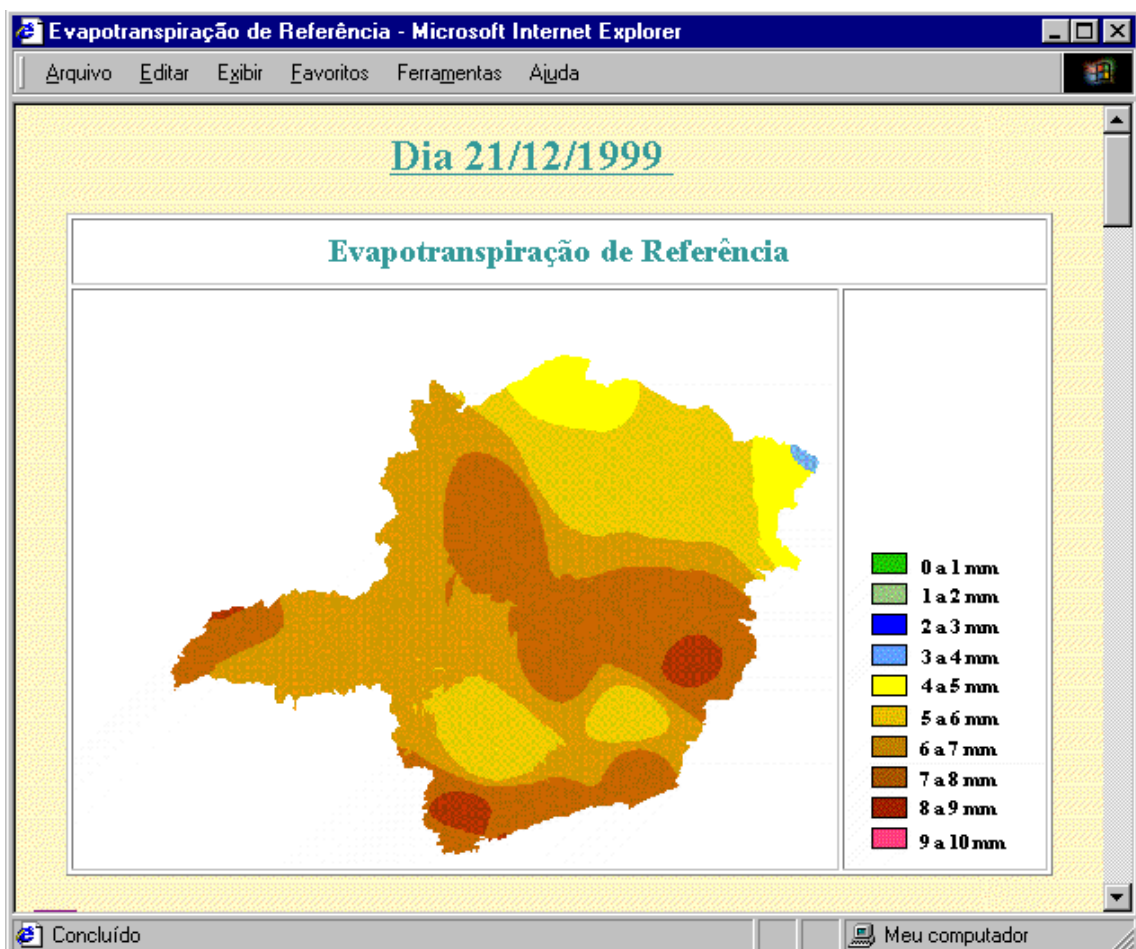


Figura 8 – Mapa de evapotranspiração de referência do dia 21/12/1999 em Minas Gerais.

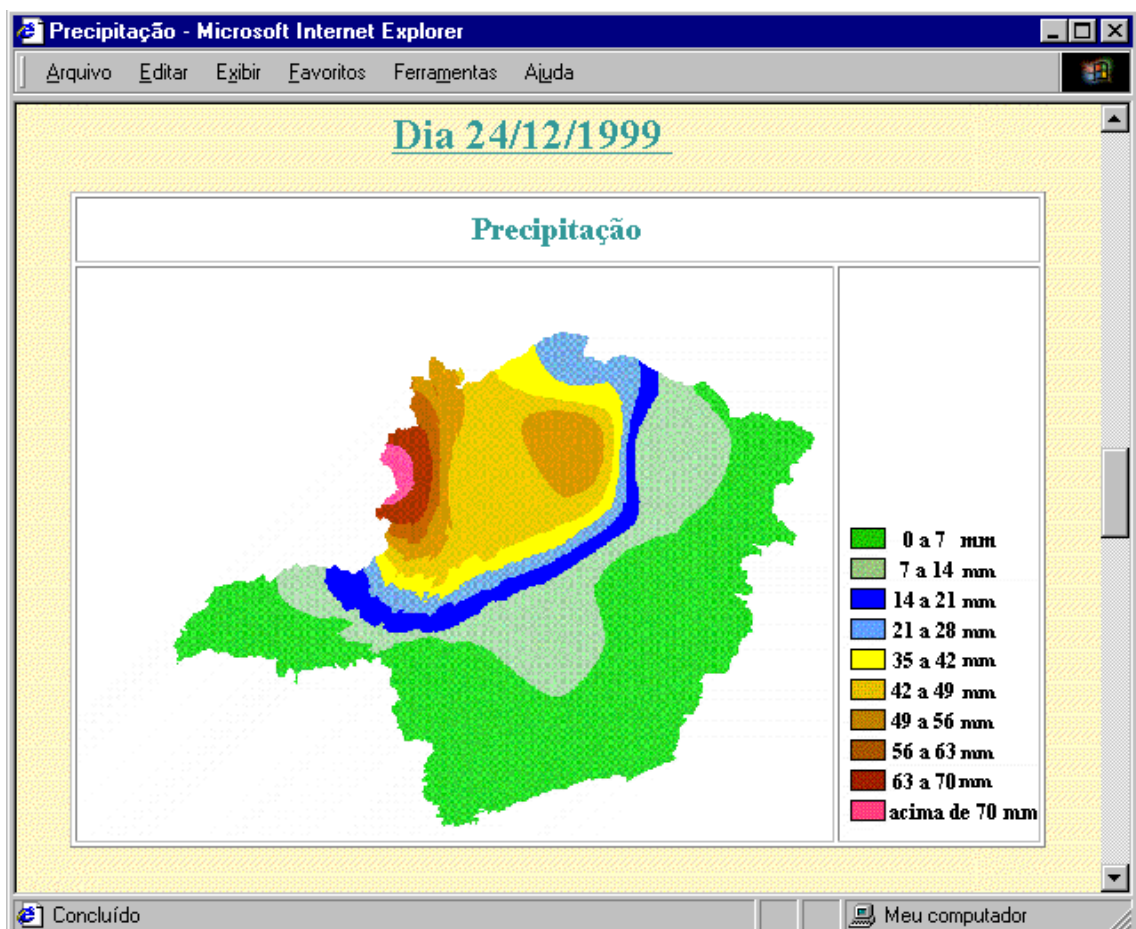


Figura 9 – Mapa de precipitação do dia 24/12/1999 em Minas Gerais.

A opção “Download” da página inicial remete à área onde é possível descarregar o programa de instalação do Balanço 1.0 e os dados climáticos processados, necessários para sua execução, os quais são atualizados três vezes por semana (Figura 10).

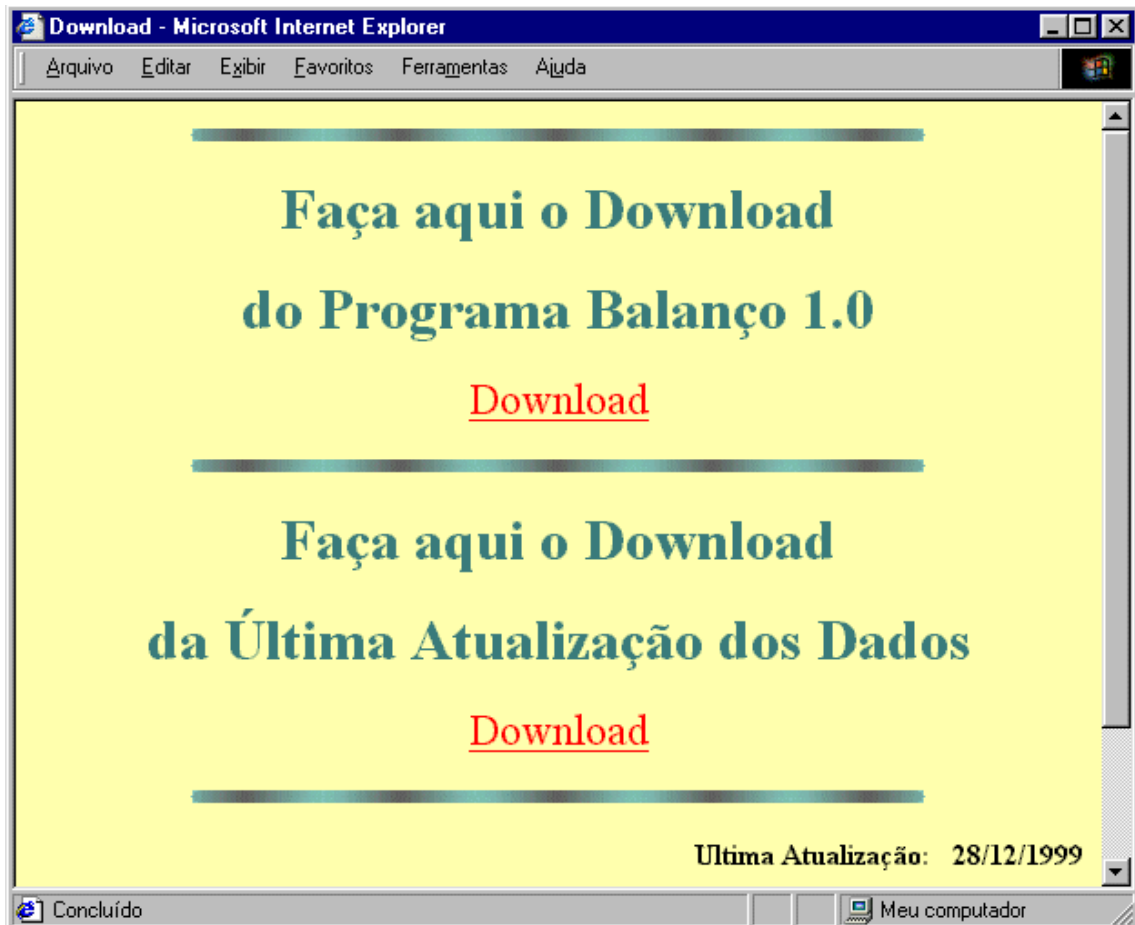


Figura 10 – Página com os arquivos para serem transferidos.

#### 4.1.2. Descrição do programa Balanço 1.0

O programa computacional Balanço 1.0 foi desenvolvido em linguagem de programação Visual Basic 6.0, com o objetivo de calcular o balanço hídrico diário de Minas Gerais, por meio da interpolação de dados de precipitação e de evapotranspiração de referência estimada com dados meteorológicos de 41

estações automáticas situadas no Estado de Minas Gerais e em estados limítrofes. A Figura 11 ilustra a tela inicial do programa Balanço 1.0. Antes de executar o programa, é necessário que seja feita a sua atualização com dados climáticos mais recentes obtidos através da Internet na página do IRG–NET, opção “Download”/ “Última atualização dos dados” (Figura 10).

Na página inicial (Balanço Hídrico Diário para Minas Gerais) do programa Balanço 1.0 existem as pastas Dados de Entrada, Precipitação e Resultado.

Na pasta “Dados de Entrada” existem seis campos que devem ser preenchidos. O primeiro campo, “Cultura”, refere-se à cultura de interesse, tendo sido cadastradas as 17 culturas mais importantes em relação à utilização de irrigação (abacaxi, algodão, banana, batata, café, cebola, ervilha, feijão, mamão, manga, maracujá, milho, pimentão, soja, tomate, trigo e uva). O segundo campo, “Cidade”, é reservado à localidade de interesse, tendo sido cadastrados todos os municípios e vilas do estado, sendo as coordenadas de latitude e longitude preenchidas automaticamente. O terceiro campo, “Data de Plantio”, deve ser preenchido com a data do plantio, para que seja definida a fase fenológica em que se encontra a cultura. O quarto campo, “Início do Balanço”, deve ser preenchido com a data que se deseja ser o início do balanço, para que seja definido o turno de rega. O quinto campo, “Característica do Solo”, deve ser preenchido com as características do solo da propriedade, devendo ser informada a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a densidade aparente do solo. Entretanto, se essas informações não forem disponíveis, pode-se selecionar um tipo de textura do solo (fina, média ou grossa).

Na pasta “Precipitação” existe a opção de inserir dados de precipitação obtidos na propriedade, uma vez que esse elemento climático é de fácil medida e apresenta grande variabilidade no tempo e no espaço. A utilização destes dados gera uma maior confiabilidade nos resultados. Na Figura 12, mostra-se a forma de entrada dos dados de precipitação.

Figura 11 – Tela inicial do programa Balço 1.0.

Figura 12 – Tela de entrada dos dados de precipitação do programa Balço 1.0.

A pasta “Resultados”, contendo os resultados do balanço, é mostrada ao se executar o programa (pasta “Dados de Entrada” opção “Calcular Balanço”), como pode ser verificado na Figura 13. Existe a opção de salvar os resultados num relatório em formato html no microcomputador do usuário (Figura 14). Os resultados são os seguintes: data, número de dias após o plantio (DAP), precipitação (Ppt), evapotranspiração de referência (ETo), coeficiente da cultura (kc), evapotranspiração da cultura (ETc), lâmina de água armazenada no solo (LAA), demanda de irrigação suplementar (DIS) e demanda de irrigação suplementar acumulada (DISA).

**Balanço Hídrico Diário para Minas Gerais**

Dados de Entrada      Precipitação      Resultado

Data	DAP	Ppt	Eto	Kc	Etc	LAA	DIS	DISA
01/01/2000	65	0	1.4	1	1.4	64.6	1.4	1.4
02/01/2000	66	5	2.0	0.99	1.9	66.0	0.0	0.0
03/01/2000	67	12	4.5	0.97	4.4	66.0	0.0	0.0
04/01/2000	68	3	1.9	0.96	1.8	66.0	0.0	0.0
05/01/2000	69	2	2.0	0.94	1.9	66.0	0.0	0.0
06/01/2000	70	0	4.5	0.93	4.2	61.8	4.2	4.2
07/01/2000	71	0	1.9	0.91	1.6	60.2	1.6	5.8

Voltar      Salvar      Fechar

Figura 13 – Tela de saída com os resultados do balanço hídrico.

Balanco Hídrico Diário para Viçosa - MG - Microsoft Internet Explorer

Arquivo Editar Exibir Favoritos Ferramentas Ajuda

## Balanco Hídrico Diário para Viçosa - MG

Data	DAP	Ppt	Eto	Kc	Etc	LAA	DIS	DISA
01/01/2000	65	0	1.4	1	1.4	64.6	1.4	1.4
02/01/2000	66	15	2.0	0.99	1.9	66.0	0.0	0.0
03/01/2000	67	6	4.5	0.97	4.4	66.0	0.0	0.0
04/01/2000	68	2	1.9	0.96	1.8	66.0	0.0	0.0
05/01/2000	69	1	2.0	0.94	1.9	65.1	0.9	0.9
06/01/2000	70	0	4.5	0.93	4.1	61.0	4.1	5.0
07/01/2000	71	0	1.9	0.91	1.6	59.4	1.6	6.6

---

**Cultura:** Feijão  
**DAP:** Dias após o Plantio;  
**Ppt:** Precipitação (mm);  
**Eto:** Evapotranspiração de Referência (mm);  
**Kc:** Coeficiente de Cultura (mm);  
**Etc:** Evapotranspiração da Cultura (mm);  
**LAA:** Lâmina de Água Armazenada (mm);  
**DIS:** Demanda de Irrigação Suplementar (mm);  
**DISA:** Demanda de Irrigação Suplementar Acumulada (mm);

Concluído      Meu computador

Figura 14 – Relatório com os resultados no formato de página da Internet.

## **4.2. Espacialização da demanda de irrigação suplementar**

### **4.2.1. Balanço hídrico diário**

Nas Figuras 15 e 16, mostram-se os mapas de lâmina acumulada de irrigação suplementar, em classes de 20 mm, para todo o ciclo da cultura do feijoeiro, utilizando o balanço hídrico diário (método adotado no programa desenvolvido), nas datas de plantio em 1<sup>o</sup> de maio e 15 de setembro de 1999, respectivamente. As duas classes de maior frequência foram coincidentes em ambos os períodos de estudo (180 a 200 e 200 a 220 mm), com a ressalva de que no primeiro essas classes ocuparam 61% da área do estado e, no segundo, apenas 34,3%. No primeiro período, as duas classes de menores frequências compreenderam o intervalo de 80 a 120 mm, com 0,4% da área; no segundo período, 0,8% da área foi ocupada com a classe de 100 a 120 mm e 5,1% com a classe de 280 a 300 mm. Semelhante informação é encontrada na forma de histograma e tabela nos Apêndices A e B, respectivamente, onde se encontram as distribuições de frequência das lâminas de irrigação suplementar calculadas pelo balanço hídrico diário total do ciclo, nos dois períodos de estudo, em classes de 20 mm.

Analisando a distribuição espacial da demanda de irrigação no primeiro período, observou-se que as menores demandas se concentravam nas regiões mineiras Sul, Sudoeste, Zona da Mata e parte do Jequitinhonha. Já as áreas com demanda mais elevada se situavam nas regiões Norte, Vale do Rio Doce e Triângulo Mineiro. No segundo período, as maiores demandas se localizavam no Norte e Noroeste de Minas, Triângulo Mineiro e Vale do Rio Doce; e as mais baixas se concentravam principalmente na região Oeste de Minas e Campo das Vertentes.



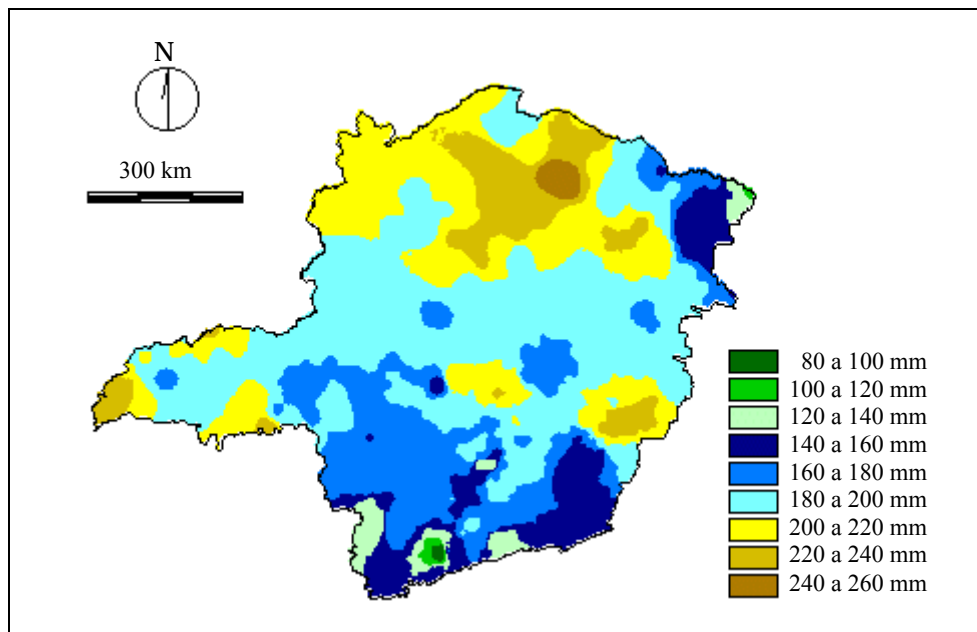


Figura 15 – Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 1º de maio de 1999.

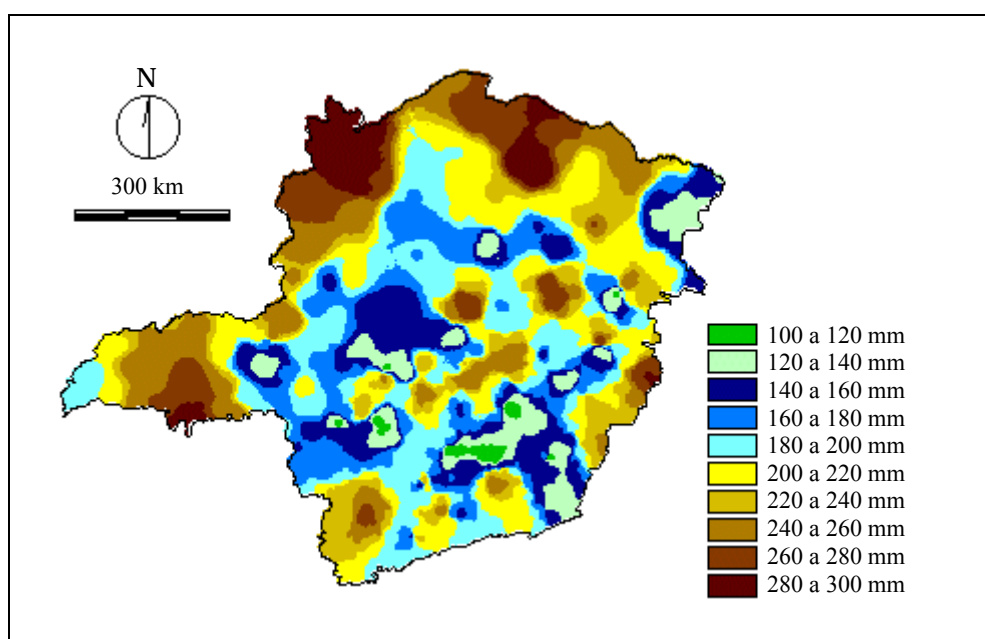


Figura 16 – Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999.

#### **4.2.2. Balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971)**

Nas Figuras 17 e 18, mostram-se os mapas de lâmina acumulada de irrigação suplementar, em classes de 20 mm, para todo o ciclo da cultura do feijoeiro, utilizando o balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) para o manejo da irrigação, com o plantio em 1º de maio e 15 de setembro de 1999, respectivamente.

Diferentemente do balanço hídrico diário, as duas classes de maior frequência não foram coincidentes em ambos os períodos estudados. No plantio em 1º de maio, as classes de maior frequência de demanda de irrigação foram de 100 a 120 mm e de 140 a 160 mm, somando, juntas, 35% da área do estado. Já no segundo período, as duas maiores classes ficaram entre 120 e 160 mm, ocupando 60,4% da área. Semelhante informação foi mostrada na forma de histograma e tabela nos Apêndices A e B, respectivamente, em que se mostram as distribuições de frequência das lâminas de irrigação suplementar total do ciclo, calculadas pelo balanço hídrico de CAMARGO (1971), nos dois períodos de estudo, em classes de 20 mm.

Da mesma forma que no balanço hídrico diário, as regiões Norte e Vale do Rio Doce foram as que apresentaram valores mais elevados de demanda. Mas as áreas com baixa demanda foram bem mais frequentes e se concentraram, no primeiro período, nas regiões da Zona da Mata, Campo das Vertentes, Oeste de Minas e Central Mineira e, no segundo período, no Sul e Sudoeste de Minas.

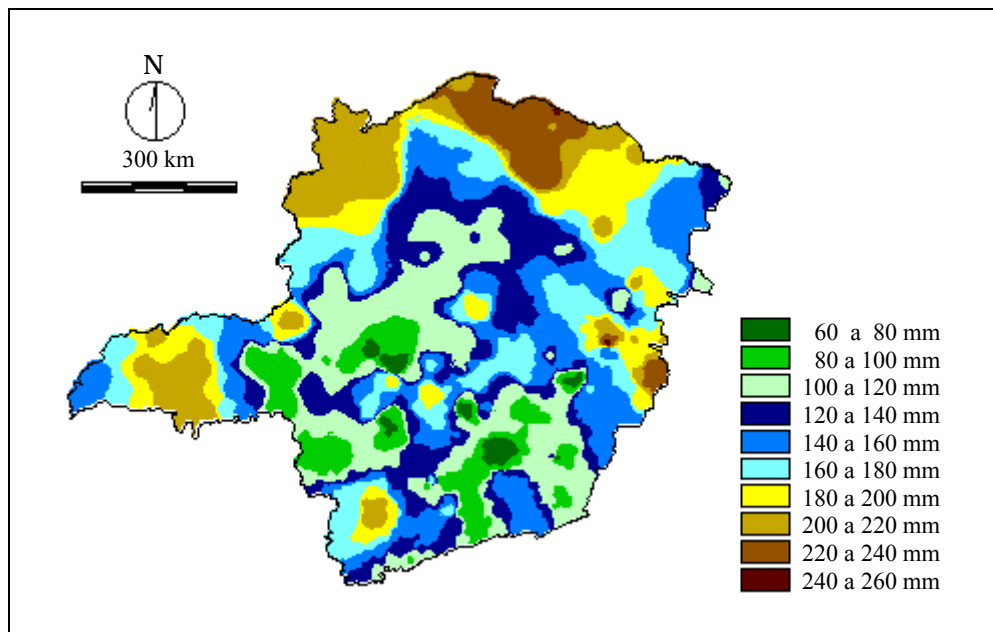


Figura 17 – Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) para a cultura do feijão plantado em 1<sup>o</sup> de maio de 1999.

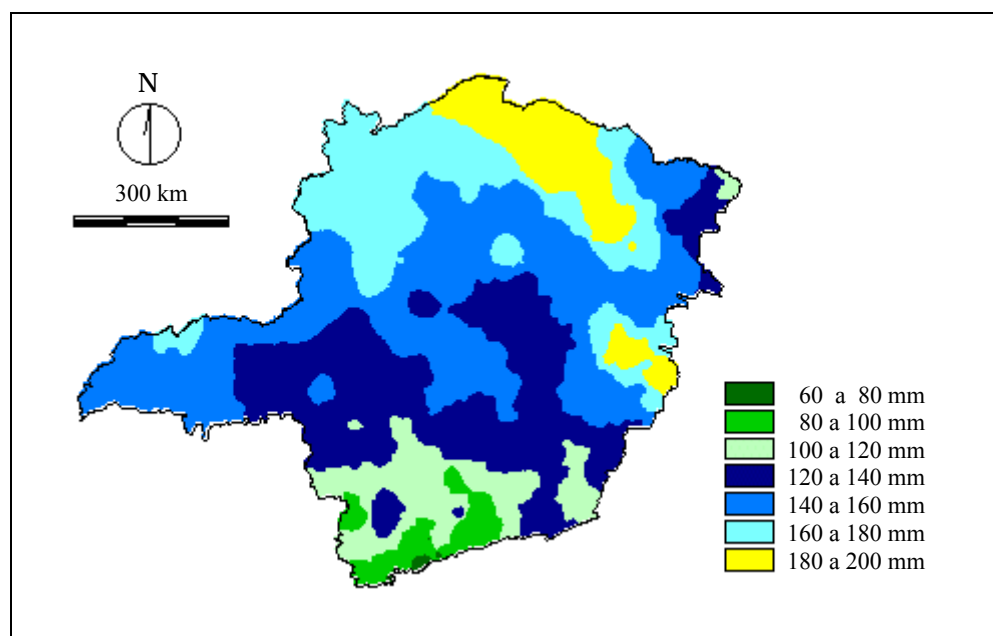


Figura 18 – Lâmina de irrigação suplementar total calculada pelo balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) para a cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999.

#### **4.2.3. Diferença entre o balanço hídrico diário e o balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971)**

Nas Figuras 19 e 20, mostra-se a diferença entre o balanço hídrico de CAMARGO (1971) e o balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 1º de maio e em 15 de setembro de 1999, respectivamente. Verificou-se, em ambos os ciclos, que o balanço hídrico de CAMARGO (1971) subestimou a demanda de irrigação suplementar na maior parte do estado. No Quadro 4, observa-se que no plantio de 1º de maio, em 71% da área do estado, a demanda foi subestimada em mais de 10 mm e superestimada em mais de 10 mm, numa área de 10,4%. No plantio de 15 de setembro, a área subestimada foi de 90,8% e a área superestimada, de apenas 2%. As maiores diferenças negativas entre o balanço hídrico de CAMARGO (1971) e o balanço diário foram de 134 mm e 151 mm no plantio em 1º de maio e em 15 de setembro, respectivamente. Observou-se que as classes em que ocorreram as maiores diferenças se localizavam na região central do estado no plantio de 1º de maio. Já no ciclo iniciado em 15 de setembro, tais classes se localizavam nas regiões do Vale do Rio Doce, Sul, Sudoeste e Norte de Minas.

Informações semelhantes são apresentadas na forma de quadro, no Apêndice B, que mostra a porcentagem da área ocupada por classes de 20 mm de demanda de irrigação suplementar calculada pelo balanço hídrico de Camargo e pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado nos dois períodos.

As grandes diferenças encontradas entre os dois métodos de cálculo da demanda de irrigação estudados podem assim ser explicadas: o balanço hídrico proposto por CAMARGO (1971) utilizou dados medidos apenas de precipitação, e os demais elementos climáticos foram obtidos por meio de médias de séries históricas. Já o balanço hídrico diário proposto utilizou apenas dados medidos, inclusive da irradiância solar global, que são elementos muito variáveis, e influenciam substancialmente na estimativa da evapotranspiração. O cálculo diário destes fatores permitiu maior exatidão no cálculo do balanço de energia e do transporte de vapor (fator aerodinâmico) na estimativa da evapotranspiração.

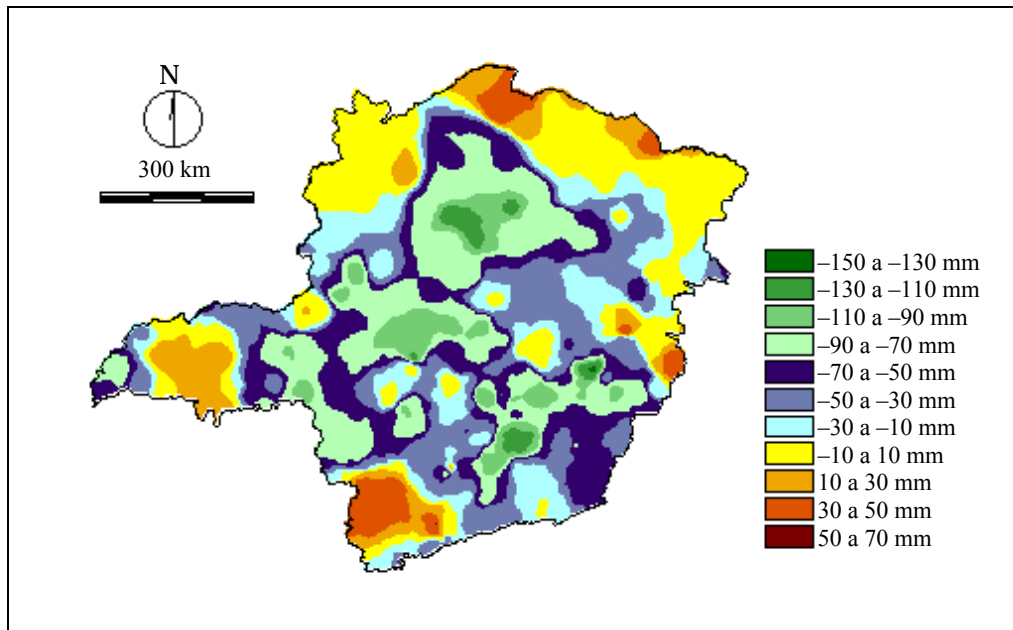


Figura 19 – Diferença entre o balanço hídrico de CAMARGO (1971) e o balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 1º de maio de 1999.

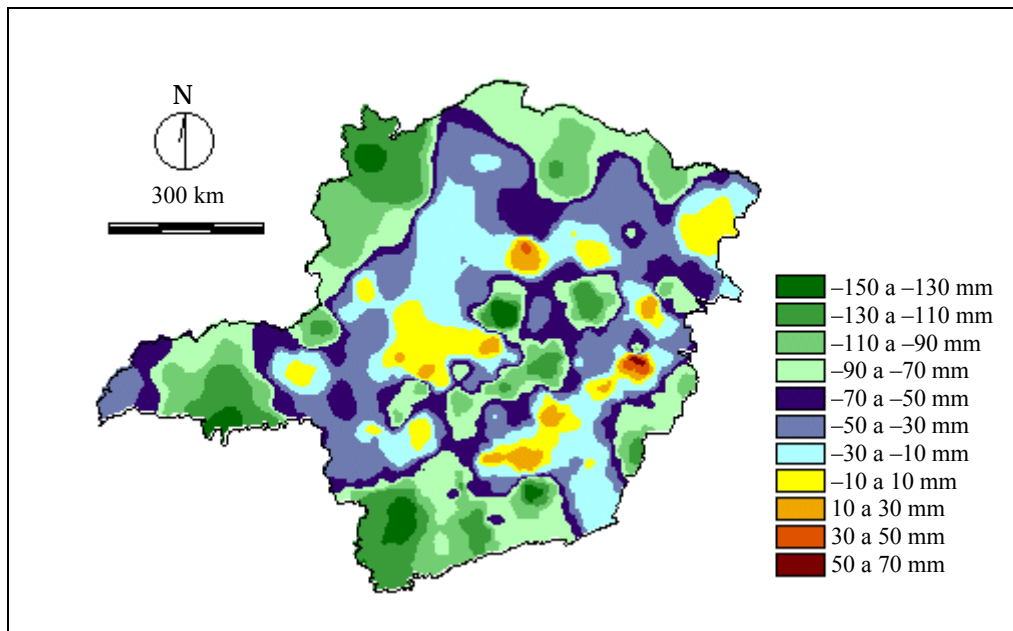


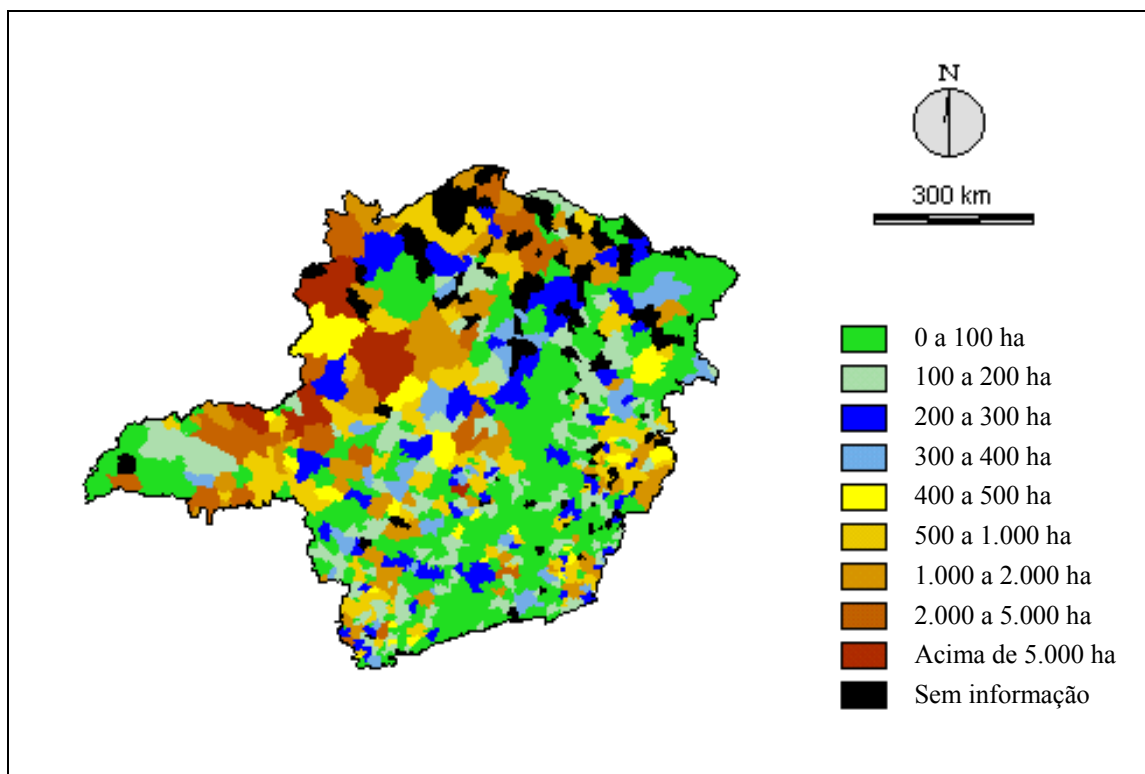
Figura 20 – Diferença entre o balanço hídrico de CAMARGO (1971) e o balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999.

Quadro 4 – Percentagem da área ocupada por classes da diferença entre a demanda de irrigação suplementar calculada pelo balanço hídrico de CAMARGO (1971) e pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 1º de maio e 15 de setembro de 1999

<b>Classes (mm)</b>	<b>1º de maio (%)</b>	<b>15 de setembro (%)</b>
-160 a -130	-	2,00
-130 a -110	1,30	9,30
-110 a -90	5,40	12,3
-90 a -70	17,5	16,7
-70 a -50	15,7	14,5
-50 a -30	17,4	20,5
-30 a -10	13,7	15,5
-10 a 10	18,6	7,20
10 a 30	6,80	1,70
30 a 50	3,60	0,20
50 a 70	-	0,10

#### **4.3. Estimativa do volume total de água para irrigação**

Na Figura 21, apresenta-se a distribuição espacial dos municípios do Estado de Minas Gerais, classificados, conforme a área irrigada, de acordo com o Censo Agropecuário de 1995-1996 (FIBGE, 1998). Observou-se que os municípios com maiores áreas irrigadas estavam concentrados na região Noroeste mineira. A classe predominante, que ocupava 29% da área do estado, foi representada pelos municípios que possuíam até 100 hectares de seu território irrigado.



Fonte: Censo Agropecuário 1995-1996 (FIBGE, 1998)

Figura 21 – Área cultivada utilizando irrigação nos municípios de Minas Gerais.

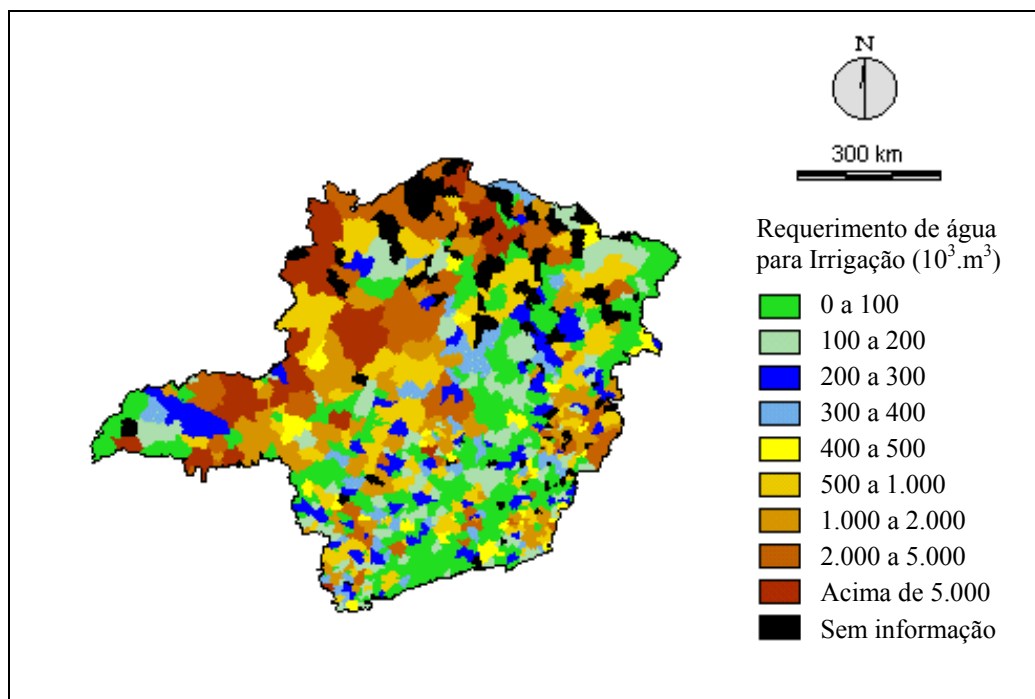


Figura 22 – Requerimento de água para irrigação, por município, da cultura do feijão plantado em 1º de maio de 1999.

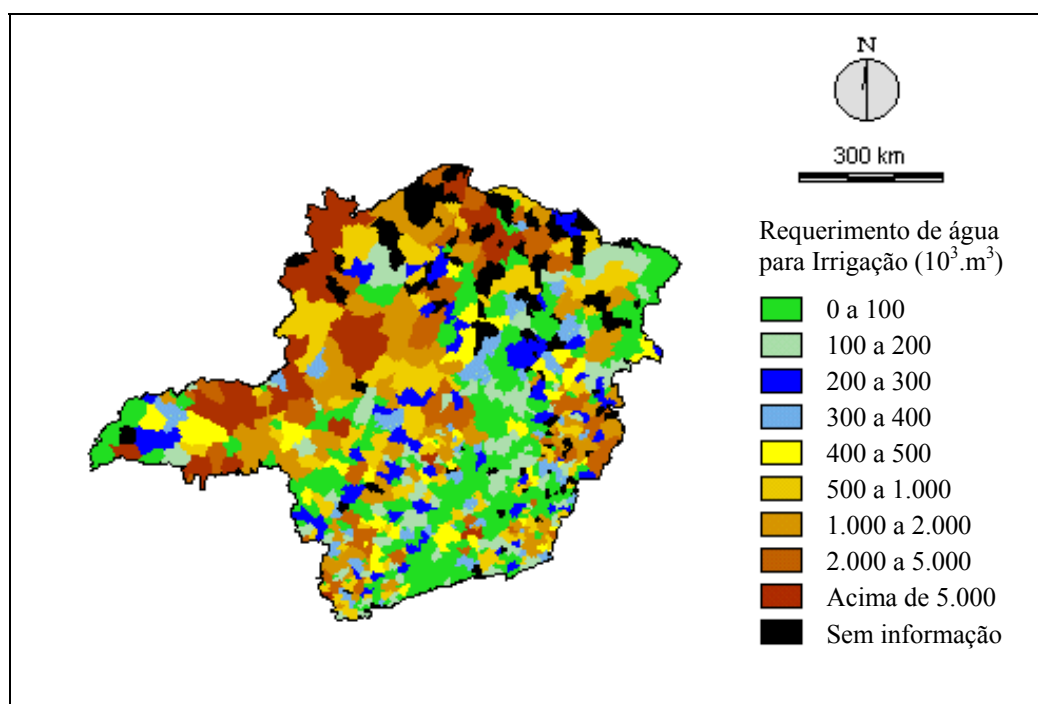


Figura 23 – Requerimento de água para irrigação, por município, da cultura do feijão plantado em 15 de setembro de 1999.



Considerando toda a área irrigada do Estado de Minas Gerais ocupada com a cultura do feijoeiro, foi calculado o requerimento de água para irrigação por município, em duas diferentes épocas de plantio (Figuras 22 e 23). A cultura do feijoeiro foi escolhida por se tratar da principal cultura irrigada do estado e por não ser disponível informação de área irrigada para cada cultura por município. Analisando essa distribuição espacial, não foram verificadas grandes diferenças entre os períodos. O volume total de água requerido para suprir a demanda hídrica da cultura do feijão em todo o Estado de Minas Gerais foi de 611.720.830 m<sup>3</sup> e 686.660.480 m<sup>3</sup>, no plantio em 1<sup>o</sup> de maio e em 15 de setembro, respectivamente. O valor ligeiramente mais elevado na estação chuvosa provavelmente foi devido à evapotranspiração mais elevada nesse período (Figuras 24 e 25). Observou-se que 62,2% da área do estado, no primeiro período, apresentou ETo na faixa de 260 a 300 mm, enquanto no segundo período o intervalo de maior frequência (59,9%) ficou entre 340 e 380 mm (Figura 28). Outro fator que pode ter auxiliado na explicação desse fato foi a distribuição das chuvas. No primeiro período, 92,6% da área do estado apresentou precipitação abaixo de 40 mm, enquanto no segundo, em 86,7% da área, a precipitação foi maior que 40 mm (Figuras 26, 27 e 28). Apesar de ter chovido mais no segundo período, o grau de aproveitamento das chuvas foi mais elevado no primeiro período do que no segundo. Em outras palavras, foi observado maior número de dias com chuva no primeiro período; e espera-se que, quanto mais bem distribuídos forem os totais de chuvas no tempo, melhor será o aproveitamento da água pelas plantas.

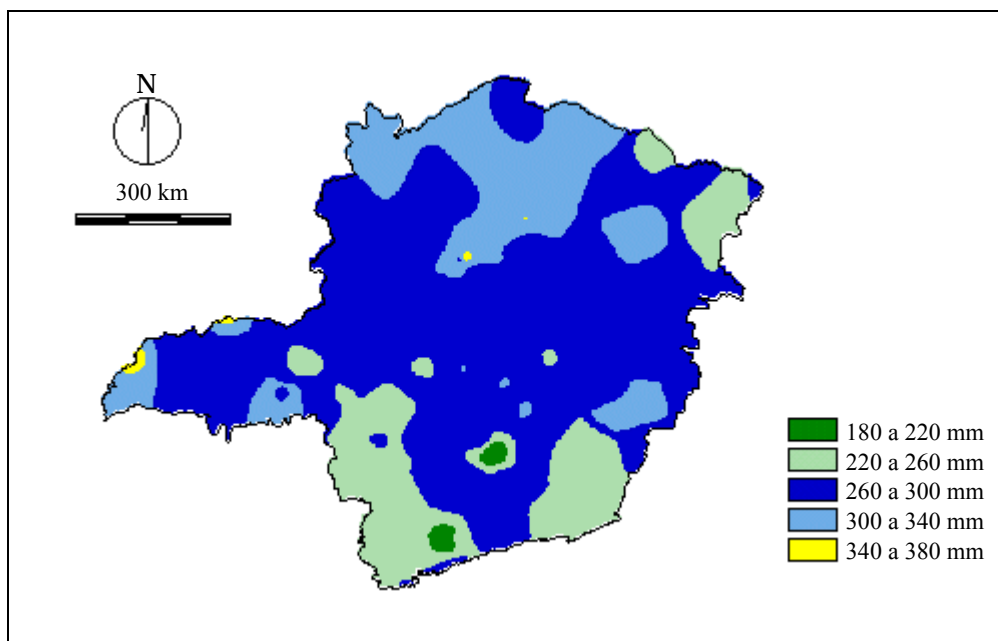


Figura 24 – Evapotranspiração de referência acumulada no período de 1º de maio a 30 de julho de 1999.

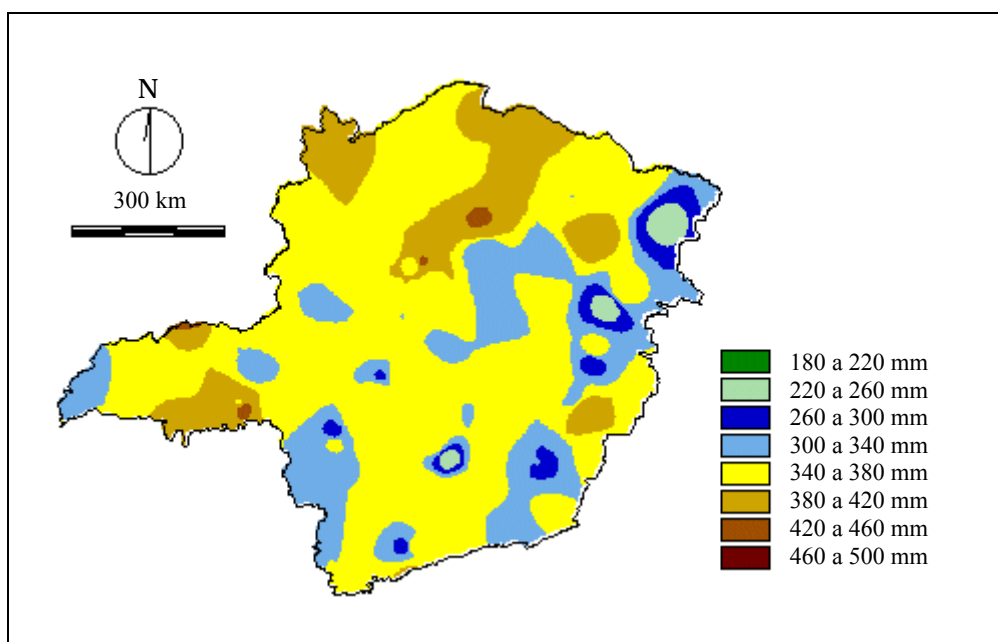


Figura 25 – Evapotranspiração de referência acumulada no período de 15 de setembro a 14 de dezembro de 1999.

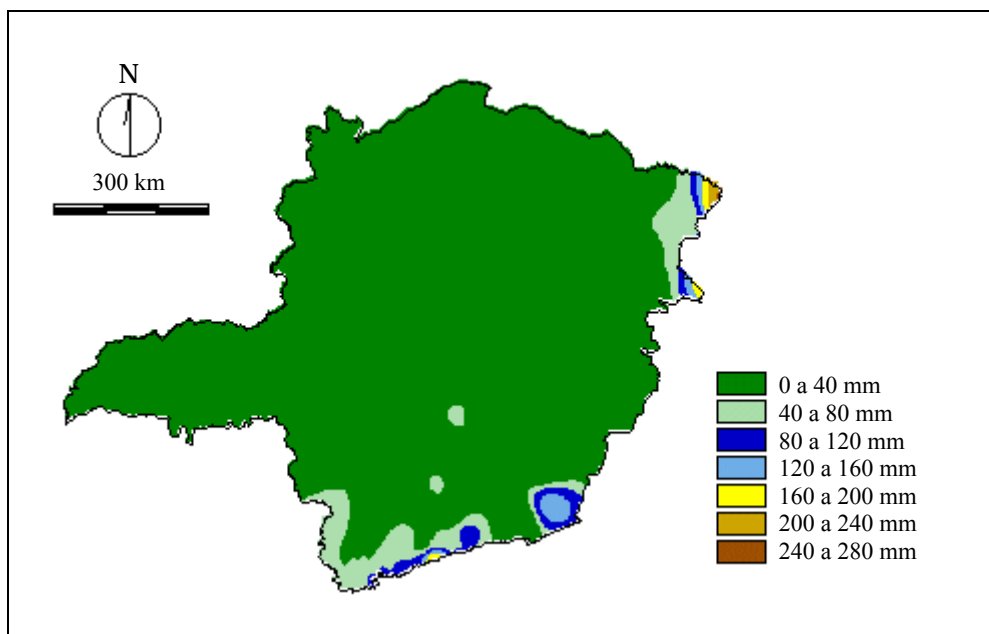


Figura 26 – Precipitação acumulada no período de 1<sup>o</sup> de maio a 30 de julho de 1999.

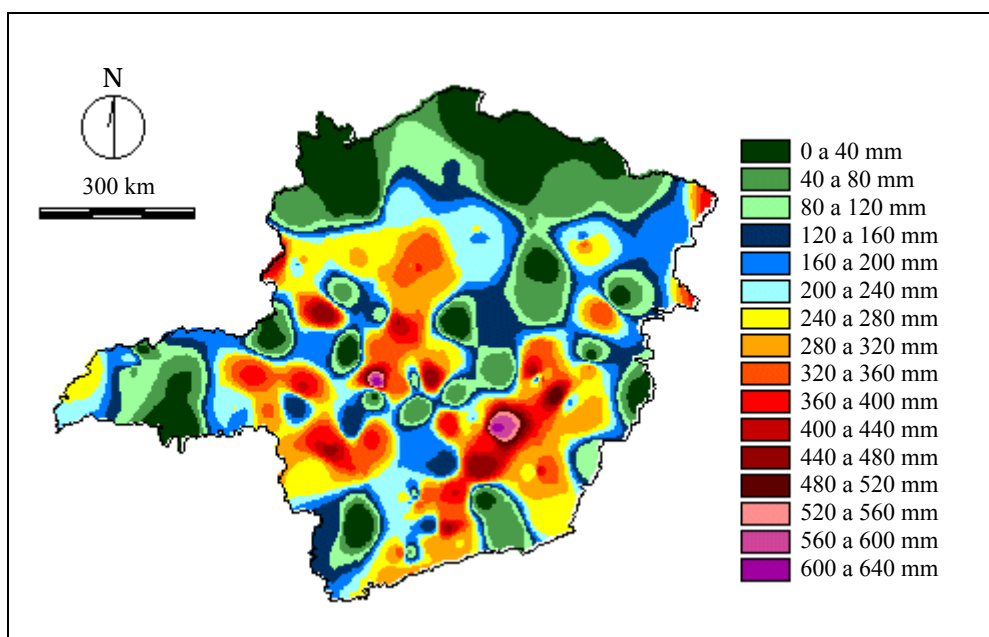


Figura 27 – Precipitação acumulada no período de 15 de setembro a 14 de dezembro de 1999.

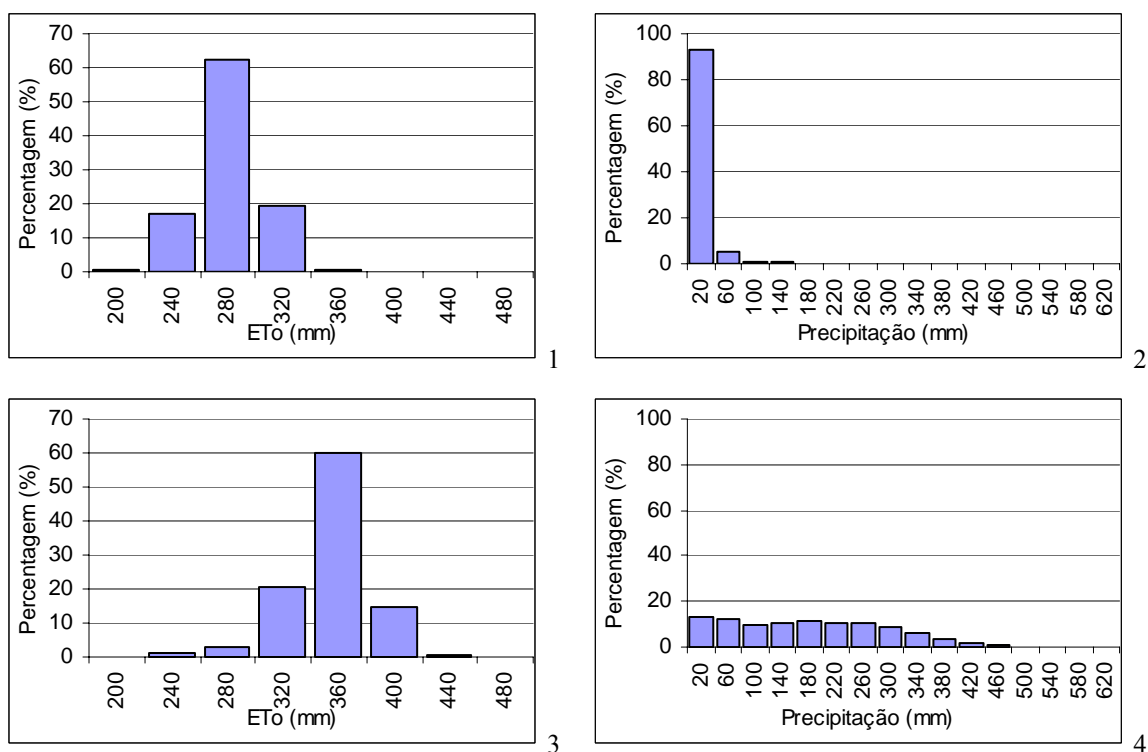


Figura 28 – Histogramas de freqüência das classes de evapotranspiração de referência acumulada e da precipitação acumulada nos períodos de 1º de maio a 30 de julho de 1999 (1) e (2), respectivamente, e de 15 de setembro a 14 de dezembro de 1999 (3) e (4), respectivamente.

#### 4.4. Comparação da evapotranspiração de referência

Com o objetivo de mostrar o erro a que se está sujeito ao utilizar o método do Tanque Classe A no manejo de irrigação, foi feita uma comparação entre os métodos de estimativa da ETo: FAO Tanque Classe A e FAO Penman-Monteith, considerando-se este último como padrão, no ano de 1999. Os resultados podem ser observados na Figura 29 e no Quadro 5, que contém o resumo estatístico da análise de regressão. Verificou-se que o método do Tanque Classe A subestimou a ETo em apenas 7,6%, mas a dispersão foi muito acentuada, o que pode ser evidenciado pelo coeficiente de determinação muito baixo ( $r^2 = 0,3039$ ). Notou-se também que o erro-padrão da estimativa foi muito elevado ( $SEE = 1,82 \text{ mm dia}^{-1}$ ), mesmo quando a regressão foi ajustada pela

origem ( $ASEE = 1,44 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Apesar de o Tanque Classe A ser de simples operação e relativamente de baixo custo e, também, ser um dos métodos considerados como padrão pela FAO, é necessário considerar os reais benefícios de se utilizá-lo. Caso não seja possível a utilização de outro método de estimativa da ETo mais preciso, deve-se ter cuidado na instalação e manutenção do tanque, evitando erros ainda maiores. Também, é recomendável que seja feita a calibração periódica dos valores obtidos com o Tanque Classe A, utilizando-se a umidade do solo medida pelo método-padrão de estufa.

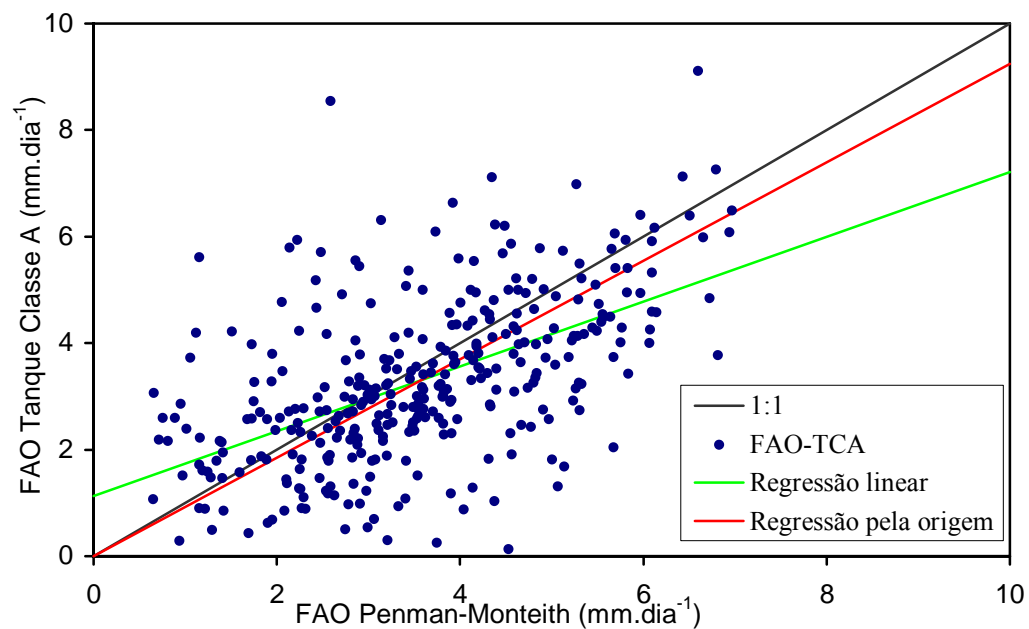


Figura 29 – Comparação da estimativa da evapotranspiração de referência calculada pelo método FAO-Tanque Classe A e FAO-Penman Monteith para o ano de 1999.

Quadro 5 – Resumo estatístico da análise de regressão da estimativa da evapotranspiração de referência calculada pelo método FAO-Tanque Classe A

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Média	3,30 mm.dia <sup>-1</sup>
Erro-padrão de estimativa (SEE)	1,82 mm.dia <sup>-1</sup>
Coeficiente linear da regressão (a)	1,1277
Coeficiente angular da regressão (b)	0,6084
Coeficiente de determinação (r <sup>2</sup> )	0,3039
Coeficiente de regressão ajustado pela origem (b')	0,9239
Erro-padrão de estimativa ajustado (ASEE)	1,44 mm.dia <sup>-1</sup>

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

O manejo adequado da irrigação é indispensável para utilização racional dos recursos hídricos. Com o propósito de auxiliar o agricultor rural na tomada de decisão do momento certo de irrigar e da quantidade adequada, foi desenvolvido um sistema automático para cálculo da demanda de irrigação suplementar do Estado de Minas Gerais, sendo disponibilizado via rede mundial de computadores (Internet).

O acesso ao sistema denominado IRG–NET está disponível a todos através do endereço da Internet, <http://www.dea.ufv.br/irgnet/index.htm>, e é atualizado três vezes por semana, disponibilizando mapas temáticos de evapotranspiração de referência e de precipitação diária para o Estado de Minas Gerais, bem como um programa computacional para cálculo da demanda de irrigação suplementar em qualquer localidade mineira.

Pode-se dizer que, em virtude da escassez e da dificuldade de acesso a dados meteorológicos, para cálculo da demanda de irrigação, o sistema IRG–NET é uma alternativa viável para corrigir essa lacuna de forma eficiente. Inclusive, é uma forma de haver interação mais efetiva entre o produtor rural e as pesquisas desenvolvidas no meio acadêmico, utilizando uma tecnologia que está revolucionando o acesso à informação em tempo real, a Internet.

Com o intuito de verificar o desempenho do sistema desenvolvido, foi estimada a demanda de irrigação suplementar acumulada para Minas Gerais no ano de 1999, em duas épocas de plantio, para a cultura do feijoeiro. Foi calculada a demanda pelo sistema IRG–NET através de um balanço hídrico diário e por meio de um método de recomendação de irrigação proposto por CAMARGO (1971). Também foi estimado o volume total de água utilizada na irrigação do feijoeiro em todos os municípios de Minas Gerais, nas duas épocas de plantio. Fez-se, ainda, a comparação da estimativa da evapotranspiração de referência para Viçosa, MG, no ano de 1999, calculada pelo método do Tanque Classe A e pelo método de Penman Monteith, sendo este considerado padrão e utilizado no sistema IRG–NET.

A análise dos dados permitiu chegar às seguintes conclusões:

- As estimativas da demanda de irrigação suplementar acumulada nos ciclos iniciados em 1<sup>o</sup> de maio e em 15 de setembro, calculada pelo método do balanço hídrico diário, foram mais elevadas do que as estimativas calculadas pelo modelo proposto por Camargo.
- O volume total de água para irrigação da cultura do feijoeiro em todo o Estado de Minas Gerais, no plantio de 1<sup>o</sup> de setembro de 1999, foi ligeiramente mais elevado do que no plantio em 15 de maio de 1999.
- O método do Tanque Classe A subestimou a evapotranspiração de referência em 7,6%, mas o erro-padrão da estimativa foi de 1,82 mm.dia<sup>-1</sup>.



## **6. DIFICULDADES ENCONTRADAS E PERSPECTIVAS FUTURAS**

De maneira geral, no Brasil, especialmente em Minas Gerais, a escolha da lâmina de irrigação aplicada às culturas não tem sido baseada na demanda real existente, que depende das condições climáticas, mas sim numa lâmina preestabelecida ou em métodos de estimativa limitados. A margem de segurança considerada para o estabelecimento dessa lâmina tem promovido o aumento do custo de produção e o comprometimento dos recursos hídricos disponíveis. A determinação exata da lâmina suplementar torna a atividade agrícola mais rentável e sustentável. Assim, o IRG-NET, utilizando métodos precisos para cálculo do balanço hídrico do solo, tem papel importante na geração de tais informações. Entretanto, a maior precisão do sistema é dependente do número de estações climatológicas utilizadas na geoespacialização dos dados. Atualmente, estão sendo utilizadas 41 plataformas de coleta de dados via satélite do SIMGE, e em breve as informações das 30 estações automáticas climáticas, com telemetria da CEMIG, serão incorporadas ao sistema. Além disso, o SIMGE está em negociação avançada para a compra de mais 50 novas plataformas, que deverão ser instaladas no corrente ano, sendo também incorporadas ao sistema, num total de coleta de dados em 126 localidades. Um dos elementos climáticos com maior variabilidade é a chuva, influenciando a estimativa da demanda fortemente. Pensando nisso, foi incorporada ao sistema a opção do usuário de fornecer o total

de chuva diário, medido em sua propriedade, uma vez que essa medida é de fácil obtenção e exige equipamento de baixo custo. Além disso, está sendo negociado pelo SIMGE um radar meteorológico, sendo possível, no futuro, a utilização dos mapas de chuva gerados por esse equipamento, o que melhorará ainda mais a precisão do IRG–NET.

Uma próxima etapa deste trabalho será a regionalização das informações geradas, permitindo trabalhar em uma escala maior, o que possibilitará maior detalhamento e melhoria das estimativas. Com isso, será possível dar um tratamento mais preciso ao balanço hídrico, uma vez que será introduzido um mapa de relevo. Atualmente, o sistema IRG–NET considera que toda água da chuva infiltra no solo e, com a inclusão do relevo do terreno, é possível estimar adequadamente a infiltração da água. Além disso, considerando o relevo, é possível quantificar, de forma mais precisa, a energia solar incidente segundo a exposição das diferentes partes do terreno aos raios solares.

O sucesso do IRG–NET depende não somente do método de cálculo do balanço de água utilizado, mas essencialmente do fácil acesso, pelo produtor rural irrigacionista, às informações geradas. Assim, está se buscando uma parceria com um órgão de extensão do estado, para auxiliar na divulgação e no treinamento dos usuários do sistema. A infra-estrutura do órgão de extensão permitirá o acesso ao IRG–NET daqueles produtores e cooperativas que não dispõem de conexão com a Internet, cumprindo, assim, o objetivo final do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEY, W. M. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models, **Water Resour. Res.**, v. 20, n. 8, p. 1137-1149, 1984.
- ALLEY, W. M. Water balance models in one-month-ahead stream flow forecasting, **Water Resour. Res.**, v. 21, n. 4, p. 597-606, 1985.
- ARNALL, N. W. Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment. **J. Hydrol.**, v. 132, p. 321-342, 1992.
- BACCHI, O. O. S., GODOY, R., FANTE JR., L., REICHARDT, K. Balanço hídrico em cultura de aveia forrageira de inverno na região de São Carlos-SP. **Scientia Agricola**, v. 53, n. 1, p. 18-21, 1996.
- BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 1997. São José dos Campos, SP: INPE. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997 ([www.dpi.inpe.br/dpi/teses/claudio/?/Cap2](http://www.dpi.inpe.br/dpi/teses/claudio/?/Cap2)).
- BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 1992. 125p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6.ed. Viçosa, MG: UFV, 1995. 657p.
- BHATTACHARYA, B. K., SASTRY, P. S. N. Comparative evaluation of three-crop growth models for the simulation of soil water balance in oilseed *Brassica*. **Agricultural Water Management**, v. 42, p. 29-46, 1999.

- BORIN, M., MORARI, F., BONAITI, G., PAASCH, M., SKAGGS, R. W. Analysis of DRAINMOD performances with different detail of soil input data in the Veneto region of Italy. **Agricultural Water Management**, v. 42, p. 259-272, 2000.
- BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Missão e Coleta de Dados. **Informações Gerais**, Brasília, DF, [1991-9], (www.cmdc.inpe.br).
- CAMARGO, A. P. de. **Balço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas, SP: Instituto Agrônômico, 1971. 24p. (Boletim 116).
- COSTA, M., H. **Modelo de otimização dos recursos hídricos para irrigação, conforme a época de plantio**. Viçosa, MG: UFV, 1991. 111p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- DANTAS NETO, F., S. **Caracterização e análise espaço-temporal da demanda evapotranspirativa e do regime pluvial na bacia dos rios do leste**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 69p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, nº 33).
- DOORENBOS, J., PRUIT, W. O. **Necessidades hídricas das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1997. 204p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, nº 24).
- EASTMAN, J. R. **IDRISI for windows: user's guide**. Massachusetts: Clark University, 1995. 367p.
- FARIA, R., A. **Demanda de irrigação suplementar no Estado de Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, 1998. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- FRIZZONE, J. A. **Programação matemática aplicada a projetos hidroagrícolas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, SBEA, 1995. 28p. (Apostila).
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA e ESTATÍSTICA – FIBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 1995-1996**, v. 16, p. 1-421, 1998.
- GLEICK, P. H. The development and testing of a water balance model for climate impact assesment: modeling the Sacramento basin. **Water Resour. Res.**, v. 23, n. 6, p. 1049-1061, 1987.

- KNOX, J. W., WEATHERHEAD, E. K., BRADLEY, R. I. Mapping the total volumetric irrigation water requirements in England and Wales. **Agricultural Water Management**, v. 33, p. 1-18, 1997.
- KRÜGER, E., SCHMIDT, G., BRÜCKNER, U. Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. **Scientia Horticulturae**, v. 81, p. 409-424, 1999.
- MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Minas Gerais. **Zoneamento Agroclimático do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1980. 114p.
- MINAS GERAIS. Secretaria de planejamento. **Anuário estatístico de Minas Gerais - 1988 e 1989**, v. 7, 1990. 896p.
- PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A., SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FESALQ, 1997. 183p.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, SP: Manole, 1990. 188p.
- ROCHA, J. V. Gerenciamento de operações agrícolas em sistemas de informações geo-referenciadas. **Caderno de informações georeferenciadas** agosto de 1996. ([www.agrosoft.com/revista/numero0/agribus3.htm](http://www.agrosoft.com/revista/numero0/agribus3.htm))
- SANTOS, A. R. **Zoneamento agroclimatológico para a cultura do café conilon (*Coffea canephora* L.) e Arábica (*Coffea canephora* L.), na bacia do rio Itapemirim**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 62p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- SANTOS, J. R. M. Irrigar é preciso. **Agroanalysis**, FGV, v. 18, n. 3, p. 29-34, 1998.
- SCHAAKE, J. C., LIU, C. Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. In: **New directions for surface water modelling** (Proceedings of the Baltimore Symposium, May 1989), IAHS, n. 181, 1989.
- SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidade de água para plantas cultivadas**. Brasília, DF: ABEAS/UFV, 1996. 176p. (Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação. Módulo 2).
- SILVA, S. C. **Estudo e análise espaço-temporal do risco climático no arroz de sequeiro, em áreas constituídas de areia quartzosa e latossolo, no Estado de Goiás**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- SOUSA, E. F. **Modelo computacional aplicado ao manejo e planejamento de irrigação**. Viçosa, MG: UFV, 1993. 65p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate, **Geogr. Rev.**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. **Publ. Climatol. Lab. Climatol. Dresel Inst. Technol.**, v. 10, n. 3, p. 185-311, 1957.
- THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. The water balance, **Publ. Climatol. Lab. Climatol. Dresel Inst. Technol.**, v.8, n. 8, p.1-104, 1955.
- VANDEWIELE, G. L., XU, C. Y. Ni-Lar-Win: Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma. **Journal of Hidrology**, v. 134, p. 315-347, 1992
- VERMA, A. K., COOKE, R. A., HIRSCHI, M. C., MITCHELL, J. K. GIS and GPS Assisted Variable Rate Application (VRA) of Agri-Chemicals. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2, n. 1, p. 17-22, 1998.
- WASKMAN, G., HARKIN, M. Green telematics from videotex to Internet based applications. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v. 22, p. 131-139, 1999.
- XU, C. L., VANDEWIELE, G. L. Parsimonious monthly rainfall-runoff models for humid basins with different input requirements. **Adv. Water Resour.**, v. 18, p. 39-48, 1995.
- XU, C. Y., SINGH, V. P. A review on monthly water balance models for water resources investigations. **Water Resources Management**, v. 12, p. 31-50, 1998.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

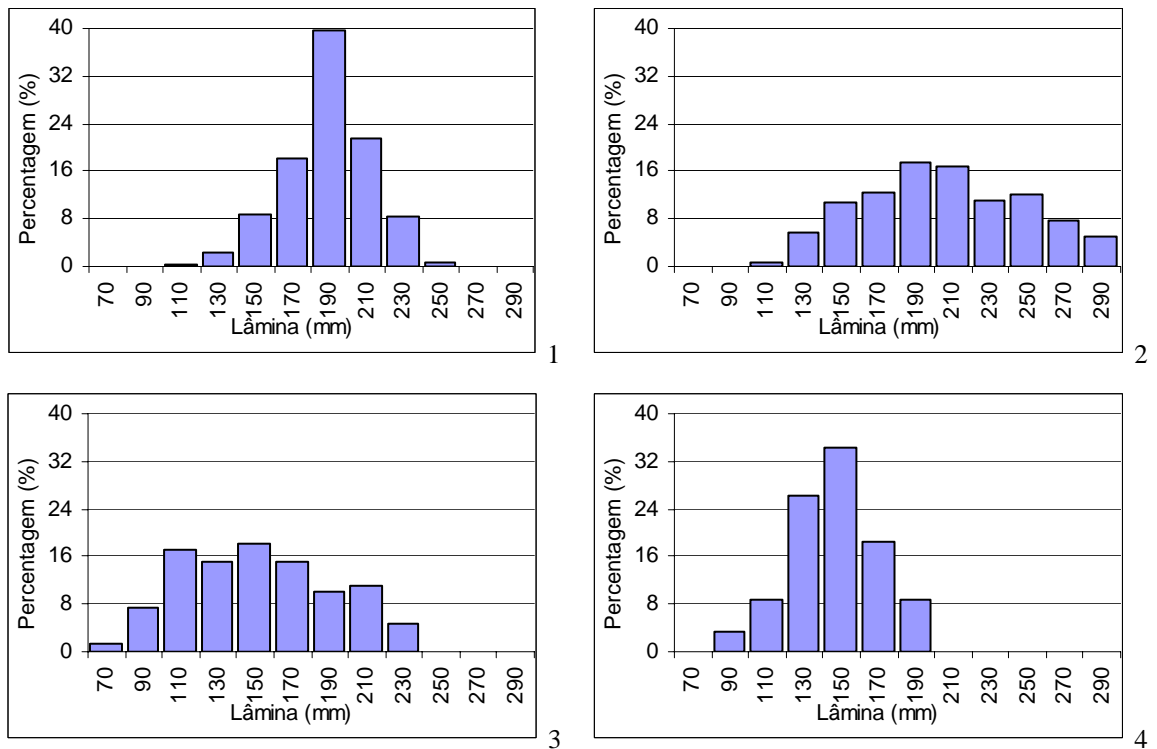


Figura 1A – Histogramas de frequência das classes de lâmina de irrigação suplementar total do ciclo calculada pelo balanço hídrico diário da cultura do feijão plantado em 15 de maio (1) e 15 de setembro (2) e pelo balanço hídrico de Camargo da cultura do feijão plantado em 15 de maio (3) e 15 de setembro (4).



## APÊNDICE B

Quadro 1B – Porcentagem da área ocupada por classes de demanda de irrigação suplementar calculada pelo balanço hídrico de Camargo e pelo balanço hídrico diário da cultura do feijoeiro plantado em 1<sup>o</sup> de maio e 15 de setembro de 1999

Classes (mm)	Balanço Diário		Balanço de Camargo	
	1 <sup>o</sup> de maio (%)	15 de setembro (%)	1 <sup>o</sup> de maio (%)	15 de setembro (%)
60 a 80	-	-	1,20	0,20
80 a 100	0,10	-	7,40	3,30
100 a 120	0,30	0,80	17,0	8,70
120 a 140	2,30	5,60	15,1	26,2
140 a 160	8,80	10,6	18,0	34,2
160 a 180	18,1	12,5	15,1	18,5
180 a 200	39,6	17,4	10,2	8,90
200 a 220	21,4	16,9	11,0	-
220 a 240	8,50	11,1	4,80	-
240 a 260	0,80	12,1	0,10	-
260 a 280	-	7,80	-	-
280 a 300	-	5,10	-	-

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)