MIRLÉIA APARECIDA DE CARVALHO

**SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO PARA ALOCAÇÃO
DE ÁGUA EM PROJETOS DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em
Engenharia.

São Paulo

2003

MIRLÉIA APARECIDA DE CARVALHO

**SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO PARA ALOCAÇÃO
DE ÁGUA EM PROJETOS DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em
Engenharia.

Área de concentração: Eng.
Hidráulica e Sanitária.

Orientador:
Rubem La Laina Porto

São Paulo

2003

*“ Se eu pudesse deixar algum presente à você,
deixaria o acesso ao sentimento de amor à vida dos seres humanos.
A consciência de aprender tudo o que nos foi ensinado pelo tempo afora,
lembraria dos erros que foram cometidos,
com os sinais para que não mais se repetissem.
A capacidade de escolher novos rumos,
deixaria para você se pudesse,
o respeito à aquilo que é indispensável:
além do pão, o trabalho, a ação.
E quando tudo mais faltasse para você,
eu deixaria, se pudesse, um segredo:
o de buscar no interior de si mesmo
o respeito e a força interior para encontrar a saída. ”*

(Mahatma Gandhi)

A Deus que renova todas as coisas.

Aos meus pais, Francisco (in memoriam) e Lazarina.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados irmãos, cunhados e sobrinhos, pelo apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. Rubem La Laina Porto pela amizade, compreensão e orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

À Prof.a. Mônica do Amaral Porto pelos gestos de incentivo.

À Dejanyne Paiva Zamprogno pela presença em todos os momentos.

À D. Marli Penido e à Maria Gorete Modesto pelas orações e amizade incondicional.

Ao André Schardong pela elaboração do programa computacional e pela troca de idéias sempre positiva.

Aos amigos do LabSid, Alexandre, Arisvaldo, Celimar, Cristiano, Honório, Roberto Amorim, Roberto Oliveira, Satie e Silvana, pela convivência e colaboração.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo concedida.

À Iara, ao Ricardo e ao Odorico pela atenção e colaboração.

Aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP/USP.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. CULTURA	3
2.2. CLIMA	4
2.2.1. Evapotranspiração de Referência	6
2.2.2. Evapotranspiração Máxima ou Potencial	8
2.2.3. Evapotranspiração Real	11
2.2.4. Precipitação	12
2.3. SOLO.....	13
2.4. IRRIGAÇÃO	16
2.5. MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	19
2.6. SISTEMA DE SUPORTE A DECISÕES	23
2.6.1. Sistema de Suporte a Decisões para a Agricultura	25
2.7. MODELO DE REDE DE FLUXO.....	28
2.7.1. ModSim	31
3. METODOLOGIA.....	36
3.1. CULTURAS	36
3.1.1. Profundidade Efetiva do Sistema Radicular	37
3.2. CLIMA	38
3.2.1. Evapotranspiração de Referência	38

3.2.2. Evapotranspiração Potencial.....	38
3.2.3. Evapotranspiração Real	40
3.2.4. Precipitação Efetiva	41
3.3. SOLO	41
3.3.1. Disponibilidade total de água do solo.....	42
3.3.2. Capacidade Total de Água no Solo	44
3.3.3. Capacidade Real de Água do Solo	45
3.4. BALANÇO HÍDRICO NO SOLO	45
3.4.1. Irrigação Real Necessária	46
3.4.2. Irrigação Total Necessária	47
3.4.3. Determinação do Calendário de Irrigação	48
3.4.4. Resposta da Cultura ao Suprimento Hídrico	51
3.4.5. Produção	54
3.5. O MODELO MODSIMLS	55
3.6. O MODELO IRRIGALS	69
3.6.1. Reservatório do Solo no IrrigaLS.....	70
3.6.2. A interface do IrrigaLS.....	74
3.6.3. Adaptações.....	93
4. ESTUDO DE CASO	98
4.1. REGIÃO DE ESTUDO	98
4.1.1. Clima	100
4.1.2. Solo	101
4.2. TOPOLOGIA DO SISTEMA DA BACIA DO ITAPICURU	102
4.2.1. Dados de Entrada	104
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
5.1. RESUMO DOS PROJETOS	108
5.2. AJUSTE DOS VALORES DAS TABELAS	110
5.3. COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO	115
5.4. IRRIGALS E MÉTODO DO BALANÇO HÍDRICO	117
5.4.1. Coeficiente de Umidade do Solo Constante e Volume Meta no Solo Igual ao Volume na Capacidade de Campo	123
5.4.2. Coeficiente de Umidade do Solo Logarítmico e Volume Meta do Solo Abaixo da Capacidade de Campo	129
5.5. IRRIGALS E MODSIMLS	131
5.5.1. Com Irrigação Total.....	132
5.5.2. Com Irrigação Suplementar.....	133

5.5.3. Economia Total de Água	135
5.6. SUPRIMENTO DE ÁGUA E RENDIMENTO DAS CULTURAS.....	136
5.7. ANÁLISE DO SISTEMA DA BACIA DO ITAPICURU	138
5.7.1. Relação entre o Reservatório do Solo e o Reservatório Superficial.....	142
6. CONCLUSÕES.....	145
7. ANEXO – TABELAS E GRÁFICOS	148
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
9. BIBLIOGRAFIA COMPLETAR	171

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Ciclo de desenvolvimento da cultura	10
Figura 2.	Representação esquemática de um modelo de simulação	22
Figura 3.	Características de um sistema de suporte a decisão	25
Figura 4.	Representação de um sistema como uma rede de fluxo	29
Figura 5.	Arcos e nós artificiais de vazões não reguladas.....	58
Figura 6.	Arcos e nós artificiais de vazões não reguladas com adição do volume inicial	59
Figura 7.	Arcos e nós artificias de volume	59
Figura 8.	Demandas terminais	65
Figura 9.	Demandas de passagem	66
Figura 10.	Iterações para se determinar as perdas por infiltração nos canais.....	68
Figura 11.	Representação esquemática das relações existentes entre os reservatórios superficial e do solo	73
Figura 12.	Botões de traçado	77
Figura 13.	Vários links entre dois nós	77
Figura 14.	Exemplo de traçado	78
Figura 15.	Tela de definições gerais.....	79
Figura 16.	Planilha de entrada/edição de dados quando se utiliza o solo como reservatório – Características gerais.....	80
Figura 17.	Planilha do link com coeficiente de perda preenchido automaticamente de acordo com a eficiência do sistema.....	81
Figura 18.	Planilha de entrada de dados quando se utiliza o solo como reservatório – Água (Perda e Contribuições)	82

Figura 19.	Planilha de entrada de dados quando se utiliza o solo como reservatório – Volume Meta no Solo	83
Figura 20.	Tela para escolha dos elementos cujos dados serão fornecidos/editados	84
Figura 21.	Tela de escolha dos resultados	86
Figura 22.	Tela de resultados mostrando volumes e vazões no mesmo gráfico	86
Figura 23.	Resumo dos resultados em formato gráfico	87
Figura 24.	Menu irrigação com as opções de comparação entre os métodos: simulação do IrrigaLS e cálculos diretos (tradicional)	89
Figura 25.	Planilha de comparação das variáveis de irrigação obtidas através da simulação no IrrigaLS e através de cálculos diretos pelo método do balanço hídrico.....	89
Figura 26.	Resultado em forma de gráfico comparando a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a lâmina atual de água no solo obtidos pelo método do balanço hídrico de cálculo da irrigação	90
Figura 27.	Resultados em forma de planilha comparando a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a lâmina atual de água no solo obtidos pelo método do balanço hídrico de cálculo da irrigação	90
Figura 28.	Comparação entre os resultados obtidos pelo métodos ModSim e do balanço hídrico	91
Figura 29.	Análise do rendimento relativo e da produção relativa obtidos através da simulação no ModSim e através de cálculos diretos pelo método do balanço hídrico.....	91
Figura 30.	Tela para dimensionar os elementos	92
Figura 31.	Tela para localizar elementos	93
Figura 32.	Exemplo de elemento localizado	93
Figura 33.	Localização da bacia do Rio Itapicuru	99
Figura 34.	Área de drenagem da bacia do Rio Itapicuru	100

Figura 35.	Topologia usada na simulação do sistema da Bacia do Itapicuru, não considerando-se o solo como um reservatório.....	103
Figura 36.	Topologia usada na simulação do sistema da Bacia do Itapicuru, considerando-se o solo como um reservatório	103
Figura 37.	Curvas de ajuste da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for de 75 mm/mês.....	111
Figura 38.	Curva de ajuste da correção da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for diferente de 75 mm	112
Figura 39.	Curvas de ajuste da fração de esgotamento de água no solo (f) para diferentes grupos de cultura	113
Figura 40.	Curvas de ajuste da produção relativa (P_a/P_p), em função do coeficiente K_y e da evapotranspiração relativa (ET_a/ET_p)	114
Figura 41.	Variação dos componentes do balanço hídrico para a banana.....	115
Figura 42.	Variação dos componentes do balanço hídrico para a cana-de-açúcar	115
Figura 43.	Variação dos componentes do balanço hídrico para as cítricas	116
Figura 44.	Variação dos componentes do balanço hídrico para o feijão.....	116
Figura 45.	Variação dos componentes do balanço hídrico para a melancia	116
Figura 46.	Variação dos componentes do balanço hídrico para o milho.....	117
Figura 47.	Gráfico da variação da evapotranspiração de referência (ET_o), da evapotranspiração potencial (ET_p) e da evapotranspiração atual da cultura (ET_a), fornecido pelo IrrigaLS, considerando a umidade do solo variável (a) e constante (b).....	119
Figura 48.	Gráfico da variação do coeficiente de cultura (K_c) e do fator de variação da umidade do solo (K_s), fornecido pelo IrrigaLS, considerando a umidade do solo variável (a) e constante (b).....	120

Figura 49.	Gráfico da variação da capacidade de campo (CC), do ponto de murcha permanente (PM) e da capacidade atual de água no solo (CAA), fornecido pelo IrrigaLS.....	121
Figura 50.	Gráfico da variação da precipitação efetiva (PP_e) e da água no solo antes da primeira irrigação (AS), fornecido pelo IrrigaLS	121
Figura 51.	Gráfico que relaciona a capacidade total de água no solo e a variação das lâminas irrigadas (atual, máxima e real), fornecido pelo IrrigaLS	122
Figura 52.	Evapotranspiração atual média mensal (ET_a) para as culturas permanentes (a) e temporárias (b), para coeficiente de umidade do solo constante ($K_s = 1$) e volume meta no solo igual ao volume na capacidade de campo ($V_{meta} = 1$).....	124
Figura 53.	Demandas de irrigação obtidas por simulação no IrrigaLS e no ModSimLS, considerando-se a precipitação igual a zero ($PP_e = 0$) e solo na capacidade de campo(CC)	133
Figura 54.	Demandas de irrigação obtidas por simulação no IrrigaLS ($PP \neq 0$) e no ModSimLS ($PP = 0$), considerando-se o solo na capacidade de campo	134
Figura 55.	Relação entre a diminuição de rendimento relativo ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho	137
Figura 56.	Relação entre a diminuição de rendimento relativo ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho, obtida no método adaptado.....	137
Figura 57.	Relação entre a diminuição da produção relativa ($1 - P_a/P_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho	138
Figura 58.	Relação entre a diminuição da produção relativa ($1 - P_a/P_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho, obtida no método adaptado.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Demonstração da montagem da Tabela Cota-Area-volume no IrrigaLS	96
Tabela 2.	Valores característicos do solo da região de estudo.....	105
Tabela 3.	Culturas consideradas no estudo e suas respectivas áreas.....	106
Tabela 4.	Resumo dos projetos considerados no estudo da eficiência do IrrigaLS e na validação das adaptações	109
Tabela 5.	Equações da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for de 75 mm.....	112
Tabela 6.	Equação que representa o Fator de correção da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for diferente de 75 mm	112
Tabela 7.	Equações que representam a fração de esgotamento de água no solo (f) para diferentes grupos de cultura	113
Tabela 8.	Equações que representam a produção relativa (P_a/P_p), em função do coeficiente K_y e da evapotranspiração relativa (ET_a/ET_p)	114
Tabela 9.	Variáveis envolvidas no cálculo do método do balanço hídrico, fornecidas pelo IrrigaLS.....	118
Tabela 10.	Valores mensais do número de irrigação (N_i), das irrigações real e total (IRN e ITN), e da evapotranspiração atual da cultura (ET_a), fornecidos pelo IrrigaLS	122
Tabela 11.	Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a) obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico	123
Tabela 12.	Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a), obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico, para diferentes áreas irrigadas (A_i).....	126

Tabela 13.	Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a) obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico	129
Tabela 14.	Lâminas obtidas pelo método do balanço hídrico e pelo IrrigaLS com redução do volume meta (V_{meta})	130
Tabela 15.	Economia conseguida, no IrrigaLS, na lâmina total irrigada (ITN) com a redução do volume meta (V_{meta}).....	131
Tabela 16.	Demandas de irrigação no IrrigaLS e no ModSimLS	132
Tabela 17.	Economia de água obtida pela inclusão da precipitação no IrrigaLS	134
Tabela 18.	Econômica de água obtida pelo IrrigaLS em comparação com o ModSimLS.....	135
Tabela 19.	Cenário atual da situação das demandas de irrigação, jusante e urbana no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS	139
Tabela 20.	Cenário atual da situação dos reservatórios de Aipim, Pindobaçu e Ponto Novo no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS.....	140
Tabela 21.	Cenário futuro da situação das demandas de irrigação, jusante e urbana no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS	141
Tabela 22.	Cenário futuro da situação dos reservatórios de Aipim, Pindobaçu e Ponto Novo no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS.....	142
Tabela 23.	Volume no reservatório do solo de acordo com a área irrigada (A_i) e a profundidade do sistema radicular (Z_r).....	143
Tabela 24.	Relação entre a evapotranspiração real média mensal das culturas (ET_a) e a evaporação real média mensal (E_a) do reservatório de Ponto Novo.....	143

LISTA DE ABREVIATURAS

FAO	Organização da Agricultura e Alimentação das Nações Unidas
ICID	Comitê Internacional de Irrigação e Drenagem
IIC	Centro Internacional de Irrigação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MRF	Modelos de Rede de Fluxo
SCS	Soil Conservation Service
SRH	Superintendência de Recursos Hídricos
SISDA	Sistema de Suporte a decisão Agrícola
SSD	Sistema de Suporte a Decisão
UFV	Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Eficiência dos métodos de irrigação
τ	Margem de tolerância
A	Área média da superfície do reservatório superficial
A_i	Área irrigada
C	Custos
CC	Capacidade de campo
c_{ij}	Custo (prioridade) da unidade de vazão que transita entre os nós ij
CAA	Capacidade atual de água no solo
$C_{\max}$	Capacidade máxima do reservatório superficial
$C_{\min}$	Capacidade mínima do reservatório superficial
$C_{\min}^*$	Capacidade mínima admissível no reservatório superficial
CRA	Capacidade real de água do solo
CTA	Capacidade total de água disponível do solo
D_a	Massa específica do solo
$DEMR_i$	Prioridade da demanda
DTA	Disponibilidade total de água do solo
e_i	Taxa de evaporação no arco
E_i	Evaporação no reservatório
$E_{i\text{meta}}$	Evaporação meta no reservatório
$E_{i\text{min}}$	Evaporação mínima no reservatório
$E_{i\text{max}}$	Evaporação máxima no reservatório

E_o	Evaporação média
ET	Evapotranspiração
ET_a	Evapotranspiração real da cultura
ET_a/ET_p	Evapotranspiração relativa
ET_o	Evapotranspiração de referência
ET_p	Evapotranspiração máxima ou potencial
f	Fator de esgotamento de água disponível no solo disponibilidade
F_j	Conjunto de todos os nós que terminam no nó j
I_{ij}	Vazão mínima no arco ij
IRN	Irrigação real necessária
ITM	Irrigação total no mês
ITN	Irrigação total necessária
ITN_i	Irrigação total necessária no mês i
K_c	Coefficiente de cultura
K_{c_i}	Coefficiente de cultura para cada período de crescimento
K_s	Coefficiente de umidade do solo
K_y	Coefficiente de resposta da cultura
$OPRP_i$	Prioridade no arco
P	Prioridade
P_a	Produção real
P_a/P_p	Produção relativa
PMP	Ponto de murcha permanente
PMP^*	Limite crítico de água no solo

P_p	Produção potencial
PP	Precipitação
PP_e	Precipitação efetiva
PP_i	Precipitação na estação i
q_{ij}	Vazão que transita do nó j ao i
$q_{i \text{ total}}$	Vazão total no arco
$q_{is \text{ (meta)}}$	Vazão ótima no arco
$q_{is \text{ (final)}}$	Vazão final no arco
S_{ij}	Limite superior da vazão no arco ij
$S_{i \text{ max}}$	Volume máximo no arco
$S_{i \text{ min}}$	Volume mínimo ou volume morto no arco
T_i	Volume meta no período atual
UA	Umidade atual de água no solo
U_{ij}	Vazão máxima no arco ij
VDA	Volume disponível de água no solo
V_{meta}	Volume meta do solo
V_{morto}	Volume morto no reservatório
V_{total}	Volume total no reservatório
V_{util}	Volume útil no reservatório
Y_a	Rendimento real da cultura
Y_a/Y_p	Rendimento relativo da cultura
Y_p	Rendimento máximo ou potencial da cultura
Z	Profundidade do reservatório superficial
Z_r	Profundidade efetiva do sistema radicular

RESUMO

No presente trabalho, fez-se a adaptação do reservatório superficial do ModSimLS para trabalhar como reservatório do solo. O modelo denomina-se IrrigaLS.

Por comparação com o método do balanço hídrico, verificou-se que o IrrigaLS é apto para determinar demandas de irrigação suplementares e/ou totais. Com a adaptação, o modelo considera a produção agrícola como o resultado da interação dos fatores água-clima-planta-solo.

A capacidade de simular sistemas complexos de recursos hídricos foi testada por comparação dos resultados do IrrigaLS com um modelo de simulação similar (ModSimLS). No ModSimLS, as demandas foram calculadas usando método tradicional de balanço hídrico. Verificou-se que o modelo é apto para simular sistemas complexos de recursos hídricos e apresenta algumas vantagens sobre o ModSimLS, quais sejam: determina a necessidade hídrica real da cultura; garante em períodos de seca um suprimento mínimo de água para a planta; garante uma economia de água pela inclusão da precipitação e possibilidade de variação do volume meta; diferencia as culturas com relação a sensibilidade ao déficit hídrico e calcula o balanço hídrico diário do solo.

ABSTRACT

In this work, an adaptation in the ModSimLS surface reservoir has been made in order to make it work as a soil reservoir. The model is called IrrigaLS.

When compared to the water balance method, it was ascertained that IrrigaLS is suitable for determining supplementary and/or total irrigation demands. The model adaptation considers agricultural production as a result from water-weather-plant-soil factors interaction.

The model capability to simulate complex water resources systems has been tested has been tested by comparing the results of IrrigaLS with a similar simulation model (ModSimLS) where the irrigation demands were computed using traditional water balance methods. It was ascertained that the model is suitable for simulating complex water resources systems and it has some advantages over ModSimLS, that are: it determines the real water needs of the culture; it guarantees a minimum water supply to the crop during dry periods, it guarantees water saving by the inclusion of rainfall and by the possibility to choose the soil moisture target; it distinguishes the crops in relation to the water deficit sensibility and it calculates the soil daily water balance.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda mundial por água de boa qualidade, à uma taxa superior à da renovação do ciclo hidrológico é, consensualmente, previsto nos meios técnicos e científicos. A eficiência do uso da água, tanto qualitativa quanto quantitativa, é tema de grande preocupação entre órgãos competentes de todo país.

Numa visão mais ampla, entende-se que a espécie humana deva utilizar os recursos naturais de forma a não alterar as atuais condições do equilíbrio planetário, o qual depende fundamentalmente do equilíbrio climático atual e da biodiversidade existente. Nos chamados sistemas produtivos, especialmente aqueles relacionados com a produção agrícola e florestal, a análise da sustentabilidade poderá ser feita tomando por base o balanço hídrico das bacias hidrográficas.

A agricultura irrigada é reconhecidamente em todo o mundo, uma das atividades econômicas que apresentam as maiores demandas de água para a produção. A necessidade de usar maior quantidade possível de solo agricultáveis vem impulsionando o uso da irrigação não só para complementar as necessidades hídricas das regiões úmidas, como para tornar produtiva as regiões áridas e semi-áridas do globo.

Com o crescimento populacional a demanda de água para irrigação tende a se tornar cada vez maior. Futuras irrigações, mesmo nas regiões com suficiente disponibilidade de água, poderão sofrer limitações devido à competição com a expansão populacional e o aumento de instalações industriais.

Em casos de escassez e baseados em dados de previsão futura, deve-se considerar com mais cautela o planejamento e gestão de recursos hídricos. Percebe-se que a solução de tais questões, requer a utilização de técnicas e instrumentos capazes de auxiliar profissionais na análise, operação, planejamento e tomada de decisões.

A solução para os conflitos pela água é uma gestão integrada e compartilhada de seu uso, controle e conservação. Não mais pode existir o conceito de gestão de recursos hídricos baseada exclusivamente na análise da irrigação, geração hidrelétrica ou saneamento básico. Um bom conhecimento das necessidades de seus diversos usuários e da capacidade de oferta e renovação de suas fontes naturais, são fundamentais para a

definição dos marcos regulatórios principais e da capacidade de suporte de cada bacia hidrográfica, evitando assim o desperdício de água.

Enfocando-se a tendência futura de aumento da demanda agrícola e o fato desta demanda ser o principal concorrente pelo uso da água, o objetivo desse trabalho é desenvolver uma ferramenta que facilite a análise de estratégias de manejo de irrigação em um contexto integrado e compartilhado com os outros usos da água.

Para o proposto optou-se por adaptar um sistema de suporte a decisão (ModSimLS) para trabalhar com o reservatório do solo, considerando que a produção agrícola é o resultado da interação dos fatores água, clima, planta e solo. Esta adaptação permite simular a variação da água armazenada no solo e a alocação da água em projetos de irrigação ao longo do período de cultivo, em sistemas complexos de recursos hídricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CULTURA

Quando o suprimento de água não atende as necessidades hídricas da cultura desenvolve-se um estresse hídrico na planta, o qual afetará seu crescimento e seu rendimento. Porém, o efeito da água sobre o rendimento não pode ser considerado independente de outros fatores agrônômicos, tais como os fertilizantes, a densidade de plantas e a proteção da cultura, porque esses fatores também determinam o quanto o *rendimento real* (Y_a) aproxima-se do *rendimento máximo ou potencial* (Y_p), (Doorenbos e Kassam, 1979).

O nível de Y_p de uma cultura é determinado principalmente, por suas características genéticas e grau de adaptação ao ambiente predominante. Os métodos de determinação de Y_p permitem a quantificação do potencial produtivo de diferentes áreas, possibilitando a identificação das mais apropriadas para a produção de determinada cultura. Entre esses métodos os autores citam: (1) o de “Wageningen”; e (2) o da zona agroecológica, (Doorenbos e Kassam, 1979).

Os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento de diferentes culturas são da maior importância para o planejamento da produção. Doorenbos e Kassam (1979) quantificam o efeito do estresse hídrico na planta através do *coeficiente de resposta da cultura* (K_y).

Reichardt (1990) divide os estádios de desenvolvimento em quatro. No caso das hortaliças: Estádio -I: da emergência até 10% do desenvolvimento vegetativo (DV); Estádio -II: de 10 até 80% do DV; Estádio -III: de 80 à 100% do DV (ou enchimento

dos grãos) e Estádio -IV: maturação. Para hortaliças com frutos: Estádio -I: semeadura e germinação; Estádio -II: ramificação; Estádio -III: frutificação e Estádio -IV: maturação.

Geralmente, as culturas são mais sensíveis ao déficit hídrico durante a emergência, a floração e na fase inicial de formação da colheita do que durante o período vegetativo, após o estabelecimento, e maturação. Isto implica que a programação do momento de aplicação de água é tão importante quanto o nível de suprimento de água durante o período total de crescimento. Portanto, o planejamento do suprimento estacional deve considerar o fornecimento ótimo de água à cultura durante as fases de ciclo fenológico, (Frizzone, 1998).

2.2. CLIMA

Os fatores climáticos têm influência direta nos requerimentos de água pelas culturas, sendo um dos principais fatores que determinam as necessidades hídricas de uma cultura para crescimento e rendimentos ótimos (Doorenbos e Kassam, 1979).

Dentre as vantagens de se conhecer o clima encontram-se: (1) previsão de fatores adversos às culturas, tais como geadas e estiagens; (2) planejamento da irrigação; (3) estabelecimento de calendários de plantio e colheita; (4) seleção de variedades aptas à região; (5) controle e prevenção de algumas doenças e pragas; e (6) dimensionamento de estruturas de controle e dissipação de excedentes hídricos (Doorenbos e Kassam, 1979).

O consumo de água do conjunto solo-planta, conhecido também como *necessidade hídrica da cultura*, corresponde a quantidade de água que passa à atmosfera

em forma de vapor (transpiração e evaporação). Em uma cultura bem estabelecida e desenvolvida, a taxa de transpiração é bem superior à taxa de evaporação, do ponto de vista agrônomo, porém, as duas taxas são de importância, pois representam a perda total para a atmosfera. À união dessas duas taxas dá-se o nome de taxa de *evapotranspiração* (ET). A necessidade hídrica da cultura é normalmente expressa mediante a ET (Doorenbos e Kassam, 1979).

Dois sistemas físicos básicos regulam o clima nas vizinhanças das plantas: o balanço de energia (radiação solar, temperatura e comprimento do dia) e a transferência aerodinâmica (velocidade do vento ou distância por ele percorrida e umidade relativa do ar). Muitos destes fatores são inter-relacionados e é difícil de se especificar o efeito de cada um na ET, (Goldberg e Teixeira, 1976)

Reichardt (1985, 1990), denomina ET como sendo a transferência de água na forma de vapor, do sistema solo-planta para a atmosfera. Essa transferência dá-se na superfície do solo (evaporação) e na superfície da planta (transpiração).

As condições de solo, pragas, a própria cultura e suas características de crescimento, além de práticas agrícolas, também influenciam a transferência de água para a atmosfera, mas segundo Klar (1991) o clima é o fator que mais afeta a perda de água de uma cultura.

Para Valadão (1995), os estudos de ET propiciam informações do uso da água pela planta, fornecendo parâmetros para o manejo da água e para o dimensionamento de sistemas de irrigação.

Fernandes et al. (1999), em estudos feitos com soja, relatam que a quantidade de água que sai de um volume de solo, desprezando-se os movimentos laterais e verticais, compreende a perda por evaporação e transpiração da cultura, portanto, o conhecimento

da ET permite o planejamento das irrigações de tal forma a dotar o solo de uma condição de umidade que forneça sempre conforto hídrico às culturas e não ocorram perdas.

2.2.1. Evapotranspiração de Referência

Tem-se demonstrado que o nível de *evapotranspiração* (ET) está relacionado com a demanda evaporativa do ar. Essa demanda pode ser expressa como *evapotranspiração de referência* (ET_o) que, quando calculada, prediz o efeito do clima sobre o nível de ET da cultura (Doorenbos e Kassam, 1979).

Define-se ET_o como sendo a quantidade de água evapotranspirada na unidade de tempo e de área, por uma cultura de baixo porte (de 8 a 15 cm de altura), de altura uniforme, verde, em ativo crescimento e sem deficiência de água, cobrindo totalmente o solo. Para esta superfície, as condições climáticas comandam o processo evapotranspirativo.

A ET_o é um fator básico na determinação do total de água necessário durante o ciclo de uma cultura, quando se deseja um manejo correto da água nos trabalhos de irrigação e drenagem (Sediyama, 1987).

Existem vários métodos para estimar a ET_o , de acordo com Jensen (1973) a escolha do método depende do clima local e dos dados disponíveis.

Segundo Doorenbos e Pruitt (1977) são utilizados métodos indiretos de estimativa da quantidade de água requerida pelas culturas devido a dificuldade de se conseguir medidas de campo com precisão.

Os métodos para a avaliação de ET_o , segundo Bernardo (1995), podem ser divididos em: (1) *Diretos*: lisímetros, parcelas experimentais de campo, controle de

umidade, método de entrada e saída em grandes áreas, e; (2) *Indiretos*: evaporímetros e equações.

De acordo com Doorenbos e Kassam (1974) a *Organização da Agricultura e Alimentação das Nações Unidas* (FAO), por intermédio de seu Grupo de Exigência de Água pelas Culturas, através da publicação nº 24 da coleção Irrigação e Drenagem, recomenda quatro métodos indiretos para estimativa da ET_o : (1) Penman modificado; (2) Radiação; (3) Tanque evaporimétrico; e (4) Blaney-Criddle. Para os autores, os métodos relacionados permitem a predição da ET_o com 10 a 20% de erro, desde que os dados meteorológicos sejam confiáveis e obtidos num ambiente agrícola representativo, contanto que se conheçam o período total de crescimento e a duração dos diferentes estádios de desenvolvimento.

Devido às dificuldades de determinação da ET_o através de medições diretas e exatas em condições reais, os métodos indiretos têm sido largamente utilizados, possibilitando resultados satisfatórios, (Marouelli, 1986).

Os métodos para determinar ET_o , segundo Mota (1989), podem agrupar-se em cinco categorias: (1) medidas diretas com lisímetros; (2) fórmulas empíricas que usam um ou mais elementos climáticos comuns; (3) método aerodinâmico; (4) método do balanço de energia; e (5) evaporímetros.

O emprego de métodos mais precisos, na maioria das vezes, é limitado pela indisponibilidade de parâmetros específicos o que favorece a utilização de métodos mais simples para estimativa da evapotranspiração, nem sempre propiciando resultados satisfatórios.

O Comitê Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a FAO consideram o uso do método de Penman-Monteith como “Standard” para estimativa da ET_o , Hargreaves (1994).

Augusto et al. (1996) estudando os efeitos da variação temporal da ET_o em projetos de irrigação, concluíram que, para efeito de projetos de irrigação, deve-se utilizar valores médios de ET_o para a série de dados de maior duração possível.

2.2.2. Evapotranspiração Máxima ou Potencial

A *evapotranspiração potencial* (ET_p) refere-se às condições em que a água é suficiente para um crescimento e desenvolvimento sem restrição e representa a taxa de evapotranspiração máxima de uma cultura sadia que cresce em grandes áreas sob condições ótimas de manejo agrônômico e de irrigação (Marouelli, 1986).

Klar (1991) define ET_p ou demanda evaporativa ideal como a perda de água por uma cultura qualquer sem nenhuma restrição de água em qualquer estágio de desenvolvimento. Pode ser estimada através de métodos diretos, ou, indiretamente a partir de ET_o .

Serruto (1992) propôs uma fórmula para estimar ET_p , em base mensal, utilizando a temperatura média e a radiação solar extraterrestre. A equação é aplicada pelo autor para as condições do lago Titicaca (Peru-Bolívia) e do vale do Paraíba no Estado de São Paulo.

Quando a umidade do solo está próxima da *capacidade de campo* (CC), a evapotranspiração de uma cultura é mantida na sua potencialidade e determinada pelo tipo de cultura e principalmente pelas condições climáticas predominante, (Doorenbos e Kassam, 1974).

Segundo Telles (1996), a maneira mais indicada para se determinar os requerimentos de água, de uma cultura, é através da estimativa ET_p , que depende basicamente do clima e do tipo de cultura e seu estágio de desenvolvimento.

2.2.2.1. Coeficientes de cultura

A ET_p está relacionada com a ET_o através de um coeficiente adimensional que é determinado empiricamente, denominado *coeficiente de cultura* (K_c). O valor de K_c é função das diferenças de interface cultura-atmosfera entre a cultura de referência (grama batatais) e outros cultivos, também em diferentes estágios de desenvolvimento. Para a maioria das culturas, o valor de K_c aumenta a partir de um pequeno valor no momento da emergência até um máximo durante o período em que é alcançado seu pleno desenvolvimento e diminui à medida em que amadurece (Doorenbos e Kassam, 1979).

O K_c para cada tipo de cultura assume valores distintos segundo a fase de crescimento da cultura, conforme apresentado na Tabela 2 no ANEXO.

Doorenbos e Pruitt (1977) propõem uma série de procedimentos para a determinação do K_c . Classificam as culturas em dezesseis grupos e apresentam duas figuras e nove tabelas, nas quais os valores de K_c variam com o estágio vegetativo da cultura e com as condições climáticas. Os mesmos autores reconhecem a existência de períodos críticos durante o ciclo de desenvolvimento das plantas, nos quais o déficit hídrico acarreta maiores perdas na produtividade. Quanto maior for a demanda evapotranspirométrica local e, ou, quanto mais sensível for a planta ao déficit de água no solo, maior deverá ser o K_c .

Fonte: Bernardo (1995)

Figura 1. Ciclo de desenvolvimento da cultura

O valor de K_c para o estágio inicial está relacionado principalmente com a evaporação do solo. Sendo assim, ele depende da demanda evapotranspirométrica e da umidade do solo local (Doorenbos e Pruitt, 1977).

Doorenbos e Kassam (1979) fornecem uma tabela completa de K_c , para inúmeras culturas, em cada um dos seus estádios, em função do vento e da umidade do ar. Bernardo (1998) sugere que para as condições do Brasil, onde na maioria do território a irrigação deve ser suplementar, podem-se, de uma maneira mais simplificada, usar tais tabelas.

De acordo com Klar (1991), dispondo-se de valores de K_c , determinados experimentalmente para a região, estes deverão ser utilizados.

2.2.3. Evapotranspiração Real

Vila Nova e Reichardt (1989) referem-se a *evapotranspiração real* (ET_a) como a perda de água por evapotranspiração de uma superfície em quaisquer condições de vegetação e suprimento de água.

Klar (1991) define ET_a como sendo a taxa de perda de água da superfície vegetada, nas condições prevalecentes de solo, clima e planta.

A demanda de água da cultura deve ser atendida pela água do solo, através do sistema radicular. A taxa real de absorção de água do solo pela cultura, em relação a sua ET_p é determinada quer pelo fato de que a água disponível no solo seja suficiente, ou que a cultura venha a sofrer estresse resultante de déficit hídrico (Bernardo, 1995).

Dados confiáveis de ET_a são exigidos para o planejamento, a construção e operação de reservatórios e de sistemas de irrigação de drenagem, (Sediyama, 1987). O autor relata, baseado em dados obtidos em lisímetros de pesagem, que a ET_a mantém-se acima de 90% da ET_o enquanto a umidade nos primeiros 75 a 90 cm de solo estiver acima de aproximadamente um terço de água disponível. Depois ela cai mais rapidamente, até um valor abaixo de 50% da ET_o , para umidade do solo no ponto de murchamento (Bernardo, 1995).

Existem várias proposições para o cálculo de ET_a , das quais as baseadas na disponibilidade de umidade do solo parecem mais simples e mais realísticas. A ET_a será igual a ET_p quando a água disponível no solo para a cultura for suficiente, ou seja, $ET_a = ET_p$. Entretanto, $ET_a < ET_p$ quando a água disponível no solo for limitada, (Doorenbos e Kassam, 1974).

Bernardo (1995), tomando como base os resultados de Pierce, cita que a ET_a é igual a ET_p durante algum tempo, decrescendo rapidamente a partir de determinado

valor de umidade do solo, podendo ser quantificada para períodos entre irrigações ou chuvas intensas e para períodos mensais. O autor cita também que determinação da ET_a é fator de fundamental importância para o correto manejo dos sistemas de irrigação.

Para Valadão (1995) a necessidade de se conhecer o consumo ideal de água de uma cultura permite, entre outros, a obtenção de resultados econômicos e o melhor aproveitamento pela planta da água aplicada através da irrigação.

2.2.4. Precipitação

Do total de *precipitação* (PP) que incide em uma área, parte é retida pela cobertura vegetal, parte escoia sobre a superfície do solo e parte infiltra no solo. Da quantidade que infiltra no solo, uma parte é retida na zona radicular e outra parte percola para as partes mais profundas. Segundo Bernardo (1995) a distribuição da precipitação entre estas quatro partes depende, principalmente: (1) do total precipitado; (2) da intensidade e da frequência da precipitação; (3) da cobertura vegetal; (4) da topografia local; (5) do tipo de solo; e (6) do teor de umidade no solo antes da chuva.

Quanto à irrigação, interessa principalmente (Bernardo, 1998): (1) a parte precipitada que será utilizada diretamente pela cultura (precipitação efetiva); (2) a frequência e a magnitude de precipitação, que se podem esperar na área de projeto (precipitação provável); e (3) a quantidade de água que abastecerá os rios e as represas a fim de ser usada na irrigação.

2.2.4.1. Precipitação Efetiva

Segundo Bernardo (1995), *precipitação efetiva* (PP_e), sob o ponto de vista da irrigação, corresponde a parte da PP que é utilizada pela cultura para atender a sua demanda evapotranspirométrica. Ou seja, é a precipitação total menos a parte que escoia sobre a superfície do solo e a parte que percola abaixo do sistema radicular da cultura. O autor cita que dentre os métodos de determinação da PP_e encontram-se: (1) Método de Balanço de Umidade do Solo; (2) Método do Lisímetro; (3) Método do US Bureau of Reclamation; (4) Método de Conservação de Solo dos EUA; e (5) várias equações.

Cardoso et al. (1997) consideram que quando a precipitação ocorrida for menor que 25 mm, toda a precipitação é considerada efetiva.

Zahed e Porto em apostila da disciplina de hidrologia cita uma adaptação, para as condições do Estado de São Paulo, do método do Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Tal método acha-se descrito em detalhes no Boletim Técnico do DAEE v 2, nº 2, Maio/Ago 1979, pág. 82.

2.3. SOLO

O solo pode ser definido como um sistema poroso constituído por partículas sólidas e volume de vazios, que podem ser ocupados pelo ar e pela água, sendo, portanto, utilizado pela plantas como suporte e fonte nutrientes e água, (Klar, 1984).

Depois de exposto ao ar por tempo relativamente longo, um solo permanece a uma umidade praticamente constante, variável de solo para solo, (Reichardt, 1990).

Segundo o mesmo autor, enquanto houver água disponível no solo há o movimento de água da planta para a atmosfera, não havendo água disponível, o movimento cessa.

Qualquer tentativa de quantificar a água disponível no solo, baseando-se apenas em parâmetros do solo, não pode dar resultados satisfatórios. Por outro lado, existe a necessidade da definição da água disponível para a possibilidade de um manejo agrícola racional. Definiu-se, então, uma quantidade de água disponível baseada em parâmetros do solo, de grande utilidade desde que se reconheçam suas limitações, são elas a *capacidade de campo* (CC) e *ponto de murcha permanente* (PMP), (Reichardt, 1990).

A *disponibilidade total de água no solo* (DTA), segundo Doorenbos e Kassam (1974), é a lâmina de água armazenada por profundidade de solo, entre os teores de umidade na CC e no PMP.

Para Doorenbos e Kassam (1974) CC é considerada como o limite superior da quantidade de água no solo disponível para a alimentação das plantas e o PMP corresponde ao ponto no qual as plantas não conseguem mais extrair água do solo e se murcham de maneira irreversível. A umidade na CC corresponde a um estado aparentemente de equilíbrio, alcançado depois da drenagem da água gravitacional proveniente de um solo saturado e no PMP corresponde a um estado de umidade mínimo do solo.

Andrade et al. (1998) relatam que muitas tentativas têm sido feitas para associar o limite superior de água disponível com o conteúdo de umidade do solo em equilíbrio com $1/3$ atm (-30 kPa). Essa definição desconsidera o fato de o equilíbrio da água no solo depender das propriedades de transição do meio poroso como um todo e do gradiente de potencial total, e não somente do estado de energia da água em um ponto particular do perfil. Além do mais, devido ao formato da curva de retenção naquela

faixa de potencial, grandes erros podem ser cometidos na obtenção do valor da umidade do solo na CC associado com determinado valor de potencial matricial.

O conteúdo de água no potencial matricial de 15 atm (-1500 kPa) é geralmente adequado para caracterizar o PMP. Nestas condições as plantas não podem utilizar a água do solo, e murcham de tal maneira que mesmo chovendo ou irrigando elas já não se recuperam mais. Ao contrário do que ocorre com o limite superior de água disponível, os erros cometidos na determinação do ponto de murcha permanente representam pequenas variações em termos de conteúdo de umidade do solo e, de fato, podem ser desprezíveis, (Andrade et al., 1998).

Existe uma relação funcional entre a umidade (com base em peso ou em volume) com o potencial matricial que é chamada *curva de retenção de água*. Como para cada tipo de solo existe um valor característico de umidade correspondente a um determinado valor de potencial matricial, essa relação funcional é também chamada de *curva característica de umidade*, (Andrade et al., 1998).

O balanço hídrico do solo corresponde a somatória das quantidades de água que entram e saem de um elemento de volume do solo, num intervalo de tempo, apresentando como resultado a quantidade líquida de água que permanece disponível às plantas. Os componentes do balanço são a PP, a irrigação, o deflúvio superficial, a percolação profunda ou ascensão capilar, a variação de armazenamento no solo e a ET, Reichardt (1985).

Fernandes et al. (1999) comentam que de grande importância para a análise do comportamento de uma cultura são as variações de umidade do solo e, conseqüentemente, do armazenamento de água. Estas variações são um reflexo das taxas de ET, PP, irrigação e movimentos de água no perfil de solo.

Segundo Mendonça (2001) o balanço entre a entrada por PP e a saída por ET, recarga subterrânea e escoamento superficial pode ser estimado para um perfil de solo. Esse balanço permite a computação da ET, recarga do aquífero e vazão a partir de umas poucas observações do solo, da vegetação e de informações hidrometeorológicas.

O balanço hídrico em perfis de solo tem sido usado para calcular demandas de irrigação, umidade do solo para plantações e vegetação natural, predição de vazões e de níveis de lençol, fluxo de água, variações de nível e salinidade em lagos. Tendo e vista que são utilizados dados meteorológicos disponíveis, longo período de dados de umidade do solo, água subterrânea e vazões podem ser gerados e sujeitos a análise probabilística para estudos de viabilidade econômica e ecológica de alternativas de uso de solo e de recursos hídricos. Apesar de ser um método aproximado, serve para prever chances de sucessos, modos de operação e impactos ambientais de alternativas analisadas, (Mendonça, 2001).

O balanço hídrico do solo também pode ser calculado indiretamente, com o uso da ET_p . O potencial de perda acumulada de água pode ser calculado em função da capacidade de água disponível e da quantidade de água retida no solo. A capacidade de água disponível na zona das raízes é função do tipo e textura de solo e da profundidade do sistema radicular das raízes, (Mendonça, 2001).

2.4. IRRIGAÇÃO

A irrigação é uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando as dotações pluviométricas, ou qualquer outra forma natural de abastecimento não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas, (Gomes, 1999).

A irrigação tem grande impacto na produção, principalmente de pequenos produtores, mesmo quando é usada em pequenos lotes, permite diversificar a produção e reduz os riscos de incertezas quanto ao produto final (Gomes, 1999).

Com o crescimento populacional, a humanidade se vê compelida a usar maior quantidade possível de solos agricultáveis, o que vem impulsionando o uso da irrigação, não só para complementar as necessidades hídricas das regiões úmidas, como para tornar produtiva as regiões áridas e semi-áridas do globo, que constituem cerca de 55% das áreas continentais, Leme (1991).

Gartuno (1994) cita que mais de 80% da água consumida em todo o mundo vai para a agricultura, embora a eficiência média seja apenas 37%.

A produtividade agrícola a sustentabilidade da produção e o futuro da agricultura irrigada estão condicionados por riscos de saturação dos solos, salinização nas áreas áridas e semi-áridas e competição pelo uso da água com outros usos (humano, pecuário e industrial), (Lima et al., 1999).

Leme (1991) cita que o mais importante recurso disponível para se racionalizar a aplicação de água é a programação da irrigação que requer certos procedimentos que permitem a determinação de turno e da quantidade de água da próxima irrigação.

O estágio tecnológico atual mostra que a viabilidade econômica da irrigação está relacionada com a aplicação de água na quantidade certa e em estádios da cultura que apresentem maior potencial de resposta e não com a aplicação de lâmina de água máxima durante todo o ciclo. Portanto a tendência atual é a otimização da irrigação das culturas, visando a obtenção da produtividade real ótima, com a maximização de lucros e não com a maximização da produtividade, (Leme, 1991).

A agricultura irrigada é reconhecidamente em todo o mundo, uma das atividades econômicas que apresentam as maiores demandas de água para a produção, (Arruda, 1994).

Bastos (1994), recomendam que se deve estimular um manejo racional da irrigação e a otimização dos equipamentos elétricos utilizados, com a finalidade de tornar a utilização da água e da energia elétrica mais eficientes. O estabelecimento do consumo de água das culturas deve ser feito criteriosamente a fim de propiciar um correto dimensionamento de sistemas de irrigação.

Para Cirino (1994) o pleno conhecimento dos parâmetros necessários para a elaboração de um projeto de irrigação racional, tais como: facilidade com que a água movimenta-se no solo, disponibilidade de água no solo para as plantas, aeração e porosidade efetiva no solo, é indispensável no processo de planejamento e dimensionamento da irrigação e drenagem de terras destinadas à agricultura. Existem critérios ou métodos empíricos que permitem estimar estes parâmetros sem precisar ir ao campo ou laboratório.

Para se fazer irrigações corretas, deve-se, (Bernardo, 1995): (1) analisar os fatores de solo, clima, planta e suprimento de água; (2) considerar os fatores de solo, água e de engenharia na determinação da aplicação de água; (3) avaliar a inter-relação entre irrigação e outros fatores culturais, tais como: variedade, densidade de plantio, fertilizante, ervas daninhas, colheitas etc.; e (4) visar sempre à obtenção da melhor função econômica.

A aplicação da água na lavoura é feita por métodos de irrigação, que podem ser classificados em: irrigação superficial (sulcos de irrigação, taças de inundação, corrugação, etc), irrigação sub-superficial (tubos porosos, tubos perfurados, elevação do

lençol freático), irrigação por aspersão (convencional, autopropelido, pivô central, montagem direta, etc) e irrigação localizada (gotejamento, jato-pulsante, microaspersão, etc), (Telles, 1996).

Na 26^a Conferência Regional da FAO foi discutido que nos últimos anos uma das inovações da ciência e arte de irrigar tem sido a introdução dos sistemas de irrigação localizada usando técnicas que relacionam alta-frequência e baixo-volume de aplicação de água (e nutrientes), respeitando o ciclo de desenvolvimento da cultura. Outra modernidade corresponde ao desenvolvimento de modelos digitais, métodos e técnicas de simulação matemática e otimização dos sistemas de irrigação, o que possibilita aumentar a eficiência dos sistemas de irrigação e minimizar os custos da água requerida pela cultura.

2.5. MODELOS DE SIMULAÇÃO

A simulação é uma técnica de modelagem utilizada para aproximar o comportamento de um sistema no computador, representando da melhor maneira possível as características desse sistema através do emprego de descrições algébricas ou matemáticas, (Yeh, 1985; Porto e Azevedo, 1997). O primeiro modelo de simulação utilizado em um sistema de reservatórios citado em literatura parece ser o estudo desenvolvido pelo U. S. Army Corps of Engineers em 1953, para a análise operacional de seis reservatórios no rio Missouri, EUA, (Yeh, 1985).

Os modelos descritivos ou de simulação são particularmente atrativos para fornecer as respostas e a performance do sistema de recursos hídricos diante de diversas estratégias operacionais, (Labadie, 1998). Além disso, fornecem a resposta do sistema para diversos dados de entrada fornecidos, incluindo regras de decisão, e permitem ao

decisor examinar as conseqüências de vários cenários de um sistema existente ou de um novo sistema a ser implementado, (Yeh, 1985).

A simulação é diferente das técnicas de programação matemática, que encontram uma decisão ótima para a operação do sistema respeitando restrições enquanto maximizam ou minimizam algum objetivo. Um modelo de programação matemática normalmente necessita de hipóteses na estrutura do modelo e nas restrições do sistema para aplicações práticas, enquanto um modelo de simulação é mais flexível e versátil para simular as respostas do sistema. Por outro lado, a otimização implicitamente analisa todas as alternativas de decisão, enquanto a simulação está limitada a um número finito de alternativas de entrada, (Yeh, 1985).

A maioria dos modelos de simulação adotam alguma série particular de vazões afluentes como representativa de toda a série histórica. Períodos hidrológicos críticos tem sido utilizados com sucesso em projetos e estudos de simulação de reservatórios. O uso de séries geradas sinteticamente é recomendado porque, se diversas seqüências de vazões são utilizadas e cada uma delas tem a mesma probabilidade de ocorrência no período de interesse, é provável que toda a faixa de cenários futuros tenha sido explorada, (Yeh, 1985).

Um modelo de simulação de sistemas de reservatórios reproduz a performance hidrológica e, em alguns casos, a performance econômica do sistema para regras operacionais e vazões afluentes fornecidas. Os modelos são baseados no balanço de massa para reproduzir o caminhamento de água através do sistema de reservatórios, (Wurbs, 1993).

Várias estratégias podem ser adotadas na aplicação de modelos de simulação. Diversas rodadas são feitas para comparar a performance do sistema diante de configurações alternativas de reservatórios, armazenamentos, regras de operação, níveis

de demanda e séries de vazões afluentes. A performance do sistema pode ser avaliada com a simples observação dos níveis de armazenamento, vazões efluentes, energia hidroelétrica gerada, abastecimento de água para demandas e lazer e valores dos parâmetros de qualidade da água, (Wurbs, 1993).

Diversos tipos de análises de armazenamento e descarga podem ser realizados. Os modelos de simulação devem também ter a capacidade de analisar a operação de sistemas de reservatórios utilizando medidas hidrológicas e de performance econômica, como, por exemplo, vazões firmes, confiabilidade, rendimento da geração hidroelétrica, danos causados por enchentes e benefícios econômicos associados a diversas finalidades, (Wurbs, 1993).

Com o surgimento e o rápido desenvolvimento dos computadores, as dificuldades de cálculo que existiam na aplicação de modelos de simulação em recursos hídricos vem sendo superadas. Os modelos de simulação atuais são extremamente flexíveis, detalhados e representam os sistemas em estudo com alto grau de fidelidade, (Roberto e Porto, 1999).

As incertezas associadas ao comportamento das variáveis de entrada e às demandas podem ser levadas em conta de forma implícita com o auxílio da hidrologia estocástica ou técnicas de Monte Carlo de forma geral. Esses modelos podem calcular o valor de uma função objetivo ou índices de performance solicitados pelo usuário e a não linearidade, seja da função objetivo, seja dos processos simulados geralmente não constitui grande problema (Roberto e Porto, 1999). Na Figura 2 é apresentada uma representação esquemática de um modelo de simulação.

Figura 2. Representação esquemática de um modelo de simulação

Os modelos de simulação são fáceis de entender e, por esta razão, são amplamente aceitos por altos níveis gerenciais, geralmente constituídos por não especialistas e até mesmo por leigos. Por estas razões esta classe de modelos é, com certeza, a mais amplamente utilizada na análise de sistemas de recursos hídricos, (Roberto e Porto, 1999). Entretanto, os modelos de simulação são incapazes de encontrar os valores das variáveis de decisão que otimizem os critérios formulados pelo usuário, o que constitui o ponto fraco da técnica. O usuário que desejar encontrar valores ótimos para as variáveis de decisão utilizando um modelo de simulação é obrigado a recorrer aos chamados métodos de força bruta (processos de tentativa e erro), que se baseiam no processamento repetitivo do modelo, de tal forma a exaurir a faixa de valores possíveis das variáveis de decisão. Mesmo assim não se pode garantir que os valores ótimos tenham sido encontrados, (Roberto e Porto, 1999).

Nos últimos anos a tendência tem sido a de incorporar esquemas de otimização aos modelos de simulação e tem se tornado comum ter algumas rotinas de otimização nos modelos de simulação. Como resultado, a distinção frequentemente feita entre simulação e otimização tende a desaparecer. Sob esse ponto de vista, a simulação é uma ótima ferramenta no estudo da operação de sistemas de recursos hídricos complexos incorporando a experiência e o julgamento do decisor no modelo. É desejável que o modelo de simulação tenha alguma capacidade de otimização para reduzir a quantidade

de cálculos realizada até a obtenção do ótimo ou alguma resposta próxima do ótimo para o sistema de reservatórios.

2.6. SISTEMA DE SUPORTE A DECISÕES

À medida que as demandas de água crescem, aumentam-se os conflitos e disputas pelo recurso e os sistemas de recursos hídricos tendem a se tornar maiores e mais complexos, havendo a necessidade de planejamentos estratégicos que conciliem eficiência econômica, sustentabilidade, flexibilidade e equidade.

Em ambientes onde há escassez de recurso hídrico, o problema de alocação da água torna-se extremamente complexo e para ajudar a resolvê-lo tem sido apresentado o *Sistema de Suporte a Decisões* (SSD).

SSD é uma metodologia de auxílio à tomada de decisões baseada na intensa utilização de bases de dados e modelos matemáticos e também na facilidade com que propicia o diálogo entre o usuário e o computador. Esta metodologia vem sendo aplicada, com sucesso, a diversos campos da atividade humana em que o problema da decisão é muito complexo, como é o caso de gerenciamento e do planejamento de recursos hídricos.

Para Porto e Azevedo (1997) “qualquer coisa” que ajude (apoie) uma tomada de decisão pode ser considerado um SSD. Adotando uma definição mais restrita, sistemas de suporte a decisões são sistemas computacionais que tem por objetivo ajudar indivíduos que tomam decisões na solução de problemas não estruturados (ou parcialmente estruturados).

O melhor SSD não é obrigatoriamente aquele que utiliza as melhores técnicas mas o que é capaz de induzir às melhores decisões. Não tem usualmente o objetivo de

encontrar a solução ótima, mas sim auxiliar o decisor a escolher uma alternativa satisfatória, (Porto e Azevedo, 1997).

O SSD não é construído para tomar decisões, mas, para apoiar ou assistir um indivíduo ou grupo de indivíduos na execução desta tarefa. É preciso definir quais os princípios que orientarão a escolha, seja para se chegar a uma solução “ótima” ou a uma solução “satisfatória”, disposto a assumir riscos ou não. Deve-se procurar expressar as alternativas em termos monetários ou em termos de outro indicador de desempenho (por exemplo, atendimento a uma vazão de demanda com determinada garantia), (Porto e Azevedo, 1997).

De maneira geral, os atributos de um sistema de suporte a decisão estão apresentados na Figura 3.

Em um SSD deve haver uma interação entre o homem e a máquina (computador). O homem soluciona problemas a partir de dois elementos essenciais: (1) *Informações*: permitem conhecer uma determinada situação que requer sua atuação; e (2) *Concepção intelectual do problema (modelo)*: quais são suas variáveis, como elas interagem etc., (Porto Azevedo, 1997). O computador, por sua vez, deve auxiliar o homem na utilização de informações e modelos.

O procedimento para se efetuar uma análise de simulação da operação de um sistema de reservatórios pode ser resumido nas seguintes etapas: (1) identificação do sistema; (2) determinação dos objetivos do estudo e definição de critérios de avaliação; (3) coleta e análise de dados do sistema; (4) formulação do modelo de simulação; (5) calibração e validação do modelo; (6) organização e execução das simulações; e (7) análise e avaliação dos resultados, (Azevedo e Porto, 2002).

Fonte: Turban (1993) apud Porto e Azevedo (1997)

Figura 3. Características de um sistema de suporte a decisão

A tomada de decisões a respeito de sistemas de recursos hídricos deve considerar obrigatoriamente aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, mutáveis no tempo e associados a incertezas de difícil quantificação (Azevedo e Porto, 2002).

2.6.1. Sistema de Suporte a Decisões para a Agricultura

Visando a necessidade de uma utilização mais eficiente da água, em uma ação conjunta, a Secretaria de Recursos Hídricos (SRH) do Ministério do Meio Ambiente,

dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (MMA), e a Universidade Federal de Viçosa (UFV), desenvolveram um sistema informatizado especialista o Sistema de Suporte à Decisão Agrícola (SISDA), (Cardoso et al., 1997).

O SISDA é voltado ao monitoramento de áreas irrigadas visando dar sustentabilidade a irrigação em áreas agrícolas, possibilitando um uso mais eficiente dos recursos hídricos e racionalizando o uso da água em lavouras. A concepção do sistema considera três aspectos fundamentais: (1) rigor científico sem perder de vista a praticidade na utilização; (2) sistema de fácil comunicação e interação com o usuário, tanto do ponto de vista de manusear o programa quanto das informações, resultados e serviços prestados; e (3) sistema que considera o gerenciamento integrado dos recursos hídricos, com visão ampla dos aspectos água, solo, clima, planta (fitotecnia e fitopatologia), e sistema de irrigação. O SISDA foi desenvolvido com base em dois objetivos: (1) manejo; e (2) simulação, (Cardoso et al., 1997).

Antes de utilizar o sistema de manejo e simulação de irrigação o usuário deve fornecer informações básicas, compondo um cadastro do seu sistema de produção agrícola. O SISDA disponibiliza ao usuário, caso necessário, a maioria das informações externas (clima, coeficientes da planta e do solo) e exigindo dele apenas as informações inerentes a sua propriedade e à atividade a ser desenvolvida, (Cardoso et al., 1997).

A consolidação dos resultados alcançados associado a novas perspectivas criadas implicaram na incorporação de novas propostas como o desenvolvimento do SISDA-Cafeicultura e do SISDA-Fruticultura para atender as demandas peculiares destes grupos de culturas, (Cardoso et al., 1997).

O Land and Water Development Division of FAO desenvolveu um programa de computador para o planejamento e gerenciamento da irrigação denominado

CROPWAT. O CROPWAT é um sistema de suporte a decisão disponível na internet, cujas principais funções são: (1) calcular a evapotranspiração da cultura de referência, a exigência hídrica da cultura e a necessidade de irrigação da cultura; (2) desenvolver calendários de irrigação sob várias condições de gerenciamento e esquemas de suprimento de água; e (3) avaliar os efeitos da seca e da chuva na produção e eficiência de práticas da irrigação. O CROPWAT é uma ferramenta prática que auxilia na determinação da evapotranspiração da cultura, uso racional da água e mais especificamente nos projetos e manejos da irrigação, (Clark, 1998).

O programa consta de uma base de entrada de dados, quais sejam: (1) dados da cultura; (2) dados climatológicos da região. A base de dados climatológicos corresponde ao CLIMWAT. A programação da irrigação é feita por um balanço hídrico diário, (Clark, 1998). Os métodos de cálculos são baseados nas metodologias apresentadas nos Manuais de Irrigação e Drenagem da FAO, nº 24 (Doorenbos e Pruitt, 1977) e nº 33 (Doorenbos e Kassam, 1979).

O SSD, resultado da integração do LabSid e da *Superintendência de Recursos Hídricos* (SRH) do Estado da Bahia, integra pela sua interface gráfica, os módulos de cálculo de demandas hídricas. A interface desenvolvida em Visual Basic utiliza componentes do software GeoMedia Professional da Intergraph Corporation, (Lisboa Neto e Porto, 2001). O K_c , a Z_r , a *área irrigada* (A_i) e a *eficiência do sistema de irrigação* (ϵ) devem ser fornecidas pelo usuário numa tela de entrada de dados. Como os valores dos postos climatológicos da região estão armazenados em um banco de dados, fornecendo-se as coordenadas geográficas do local (latitude, longitude), a ET_o é determinada automaticamente por interpolação.

2.7. MODELO DE REDE DE FLUXO

Os *modelos de rede de fluxo* (MRF) misturam características dos modelos de simulação e otimização e podem incorporar as características estocásticas das vazões de entrada, (Porto e Azevedo, 1997).

Os MRF representam sistemas de recursos hídricos por uma rede formada de "nós" e "arcos". Os nós representam reservatórios, demandas, reversões, confluências, e outros pontos importantes de um sistema. Os arcos são os elos de ligação entre os nós e representam trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas semelhantes, (Porto e Azevedo, 1997).

Cada arco é caracterizado por três parâmetros, ou seja, os limites superior e inferior do fluxo que passa pelo arco (ex.: capacidade máxima e mínima de um canal) e um "custo" por unidade de fluxo que transita pelo arco. Os custos podem ser positivos ou negativos, ou seja, podem representar uma penalidade (no caso de custo positivo), ou um prêmio (custo negativo), influenciando na quantidade de fluxo que irá passar pelo arco e fornecendo um mecanismo para expressar as prioridades relativas utilizadas na definição das regras operacionais, (Wurbs, 1993). Este custo não significa, obrigatoriamente, um valor monetário, podendo representar preferências estabelecidas pelo usuário. As capacidades máxima e mínima de cada arco podem ser fixas para todo o período de simulação ou podem variar ao longo do tempo, (Roberto e Porto, 1999). Na Figura 4 é apresentada uma representação de um sistema como uma rede de fluxo.

Fonte: Porto e Azevedo (1997)

Figura 4. Representação de um sistema como uma rede de fluxo

Em um modelo de rede de fluxo, cada um dos elementos (nós e arcos) deve conter as características da estrutura que o mesmo está representando. Algumas dessas características, especificadas por tipo de elemento, são: (1) reservatórios: volumes máximos e mínimos, curva cota-área-volume, níveis de armazenamento desejados, série de vazões afluentes, taxa de evaporação; (2) demandas: valor e distribuição temporal da demanda, prioridade de atendimento, retornos; e (3) arcos: capacidades máximas e mínimas, custo, perdas por infiltração, (Roberto e Porto, 1999).

Quando um modelo de rede de fluxo é aplicado na análise de sistemas de recursos hídricos, o algoritmo do modelo busca minimizar o custo total da rede que representa o problema em estudo, (Roberto e Porto, 1999).

Cada nó deve conter as características da estrutura que representa. Por exemplo se o nó " i " estiver representando um reservatório, o analista deve fornecer a relação cota-área-volume, os volumes máximos e mínimos de armazenamento, os níveis de

armazenamento que se deseja atingir, o percentual de perdas por infiltração, a taxa de evaporação, etc, (Roberto e Porto, 1999).

Entre as características que tornam atrativa a utilização dessa classe de modelos para análise de sistemas de recursos hídricos, destacam-se as seguintes, (Porto e Azevedo 1997): (1) na grande maioria dos casos, pode-se representar um sistema de recursos hídricos de forma adequada, realista, flexível e bastante clara como uma rede composta de nós e arcos; (2) esses modelos possuem a flexibilidade típica dos modelos de simulação, ou seja, podem representar o comportamento de um sistema de recursos hídricos de forma bastante completa; e (3) MRF incluem também algoritmos de otimização que minimizam o custo total da rede, ou seja, determinam os fluxos em todos os arcos de tal forma que a somatória de todos os custos seja mínima.

Os MRF podem modelar também as interações entre águas superficiais e subterrâneas como, por exemplo, a diminuição das vazões dos rios devido ao bombeamento de aquíferos ou o retorno de vazões aos cursos de água através do subsolo, (Roberto e Porto, 1999).

Os algoritmos de otimização de redes de fluxo costumam ser altamente eficientes (ordens de magnitude mais rápido que o Simplex) o que significa que sistemas extremamente grandes e complexos podem ser tratados em microcomputadores comuns.

Embora modelos de rede sejam extremamente vantajosos, eles apresentam limitações. Os algoritmos de rede de fluxo otimizam apenas sistemas lineares, uma vez que aplicação de técnicas não lineares ainda não constitui tecnologia madura. A função objetivo é pré-definida e portanto não pode ser livremente especificada pelo usuário.

Estes algoritmos admitem também apenas os dois tipos de restrições acima citados. Como os sistemas de recursos hídricos costumam ser altamente condicionados, em alguns casos pode haver necessidade de adoção de artifícios para que seja obtida representação adequada, (Roberto e Porto, 1999).

Geralmente a otimização dos MRF é executada a cada intervalo de tempo, de forma sequencial. O intervalo mensal é usualmente o mais utilizado para os problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, embora a técnica seja aplicável a intervalos mais curtos. Deve ser enfatizado, entretanto, que na maioria dos MRF a otimização efetuada não é dinâmica, ou seja, não se garante o ótimo global para um período de “ n ” intervalos de tempo à frente, (Roberto e Porto, 1999).

As perdas de condução em canais e evaporação em reservatórios representam um desvio da condicionante que impõe o balanço de massas. Tal fato não representa entretanto grande problema uma vez que estas perdas podem ser calculadas por processos iterativos sem grande perda de eficiência, (Roberto e Porto, 1999).

Em resumo, os modelos de rede de fluxo reúnem características das técnicas de simulação e otimização. As características de flexibilidade e adaptabilidade dos modelos de simulação são quase que integralmente preservadas nos MRF, ao mesmo tempo que o algoritmo de otimização, apesar das limitações citadas, libera o usuário dos trabalhosos e demorados processos de tentativa e erro, (Roberto e Porto, 1999).

2.7.1. ModSim

O ModSim é um modelo de rede de fluxo de caráter geral e adaptável a diversos tipos de problemas. Assim, a maior parte das configurações e estruturas operacionais

das bacias hidrográficas pode ser representada por meio da especificação de dados de entrada apropriados.

Uma das principais características do ModSim é o fato de que o modelo incorpora automaticamente uma série de funções que são comuns na simulação de bacias hidrográficas sem que o usuário tenha que se preocupar em programá-las. Entre elas as mais importantes são, (Roberto e Porto, 1999): (1) os usuários podem colocar quantos nós de demanda forem necessários para levar em conta as demandas na bacia (consuntivas ou não). O modelo atenderá a estas demandas de acordo com um valor de prioridade atribuída pelo usuário, que pode variar de 1 a 99, sendo o valor 1 a maior prioridade. Na realidade as *prioridades* (P) e os *custos* (C) estão relacionados de forma biunívoca ($C = 10P - 1000$), o que significa que os valores de C que representam prioridades são sempre negativos. Portanto, ao atender uma prioridade o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor C por unidade de vazão fornecida; (2) a operação dos reservatórios é feita utilizando-se o conceito de volume meta ou nível meta, ao qual se atribui uma prioridade. Desta forma, sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água desde que as outras prioridades da rede sejam menores. O volume armazenado acima do nível meta tem custo zero, ou seja, é livre para atender a quaisquer demandas por menores que sejam suas prioridades; (3) as perdas por evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo; (4) o modelo calcula a produção de energia elétrica desde que sejam fornecidas as características da usina; (5) o modelo faz o balanço água superficial – água subterrânea, desde que sejam fornecidas as características do aquífero.

O ModSim realiza uma otimização em rede para atender metas operacionais realizada de modo seqüencial em cada intervalo de tempo, em vez da forma plenamente

dinâmica. O modelo executa a otimização sequencial sem previsão e pode ser tratado como um modelo de simulação mediante o qual centenas ou milhares de anos de dados históricos ou sintéticos de vazões podem ser utilizados, (Azevedo e Porto, 2002).

Os atributos mais importantes do ModSim são: (1) faz uma simulação de rede de fluxo de volume armazenados em reservatórios e da distribuição de vazões em um sistema complexo de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica; (2) inclui a capacidade de otimizar a operação de sistemas mediante a utilização de um algoritmo de rede de fluxo, o “*out-of-kilter*” (mais detalhes em Azevedo e Porto, 2002); e (3) o modelo pode ser usado para formulação de diretrizes operacionais de curto prazo (semanal) ou a longo prazo (sazonal ou plurianual).

Além de ser um instrumento de gerenciamento, o ModSim também pode ser usado para o planejamento, para a análise do impacto de propostas alternativas para a implantação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos. O modelo também pode servir no processo de seleção inicial de alternativas com base na análise econômica, em um nível simplificado, por meio da inclusão direta de dados de custos e benefícios em lugar da especificação relativa de prioridades.

Deve-se notar que, internamente, os cálculos do ModSim envolvem números inteiros, o que favorece muito a velocidade de processamento do modelo. Além disso, o algoritmo Out-of-Kilter tem a vantagem de não necessitar de uma solução inicial viável, embora o balanço de massas deva ser satisfeito em toda a rede. Isto é conseguido facilmente, começando com fluxos iguais a zero em cada arco, no procedimento de solução, (Azevedo e Porto, 2002).

Foi desenvolvido no *Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental* (Labsid) uma nova versão do ModSim chamada ModSimLS, (Roberto e Porto, 2001).

2.7.1.1. Interfaces Gráficas do ModSim

O Labsid da Escola Politécnica da USP, desenvolveu interfaces gráficas para facilitar a aplicação do ModSim. As interfaces foram desenvolvidas no formato típico de um sistema de suporte a decisões, ou seja, estão presentes em sua estrutura um módulo de diálogo, uma base de dados e uma base de modelos.

Acompanhando a primeira versão (ModSim Fortran) vem a chamada de ModSimP32 (Roberto e Porto, 1999) e Roberto (2002). Acompanhando a versão do ModSimLS tem-se a interface ModSimLS (Roberto e Porto, 2001). Na aparência, a versão ModSimLS é bastante semelhante ao modelo ModSimP32 (Roberto e Porto, 1999). Entretanto, as duas versões são completamente diferentes quando se considera o funcionamento e o armazenamento/leitura de dados e resultados. O ModSimP32 funciona com arquivos próprios e é completamente responsável pela criação e atualização desses arquivos. Já o ModSimLS aproveita a estrutura e a funcionalidade possibilitada pela utilização de arquivos em formato de Banco de Dados.

Desenvolvido a partir do sistema ModSimLS, o AcquaNet é um sistema que permite a utilização integrada de diversos tipos de cálculos, usuais na área de Recursos Hídricos. Inicialmente o AcquaNet está operando com um único modelo, destinado a cálculos de alocação de água, o AlocaLS. Estão em implementação modelos para

integração quantidade-qualidade produção de energia elétrica e outorgas, (Roberto, 2002).

3. METODOLOGIA

Os aspectos agronômicos básicos necessários para a elaboração de um projeto de irrigação se resumem em questões como a determinação da quantidade de água útil armazenada pelo solo, e a determinação das necessidades hídricas das plantas necessárias para o pleno desenvolvimento da cultura. A quantidade de água armazenada pelo solo depende basicamente das características físicas e hídricas do solo, como também do tipo de cultura a implantar. Por sua vez, as necessidades hídricas das plantas dependem da cultura e das condições climáticas da região. O conhecimento dessas duas questões permite a determinação da frequência de aplicação das sucessivas dotações ou lâminas de irrigação ao terreno.

O solo armazena uma quantidade limitada de água, sendo somente parte desta, disponível para as plantas. Assim, para que o manejo da irrigação se proceda dentro de um critério racional, é necessário o controle da umidade do solo durante todo o ciclo da cultura para, deste modo, determinar o momento da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada. Com este propósito é necessário o conhecimento prévio de uma série de parâmetros relacionados ao solo, à planta, à água e ao clima.

3.1. CULTURAS

Sendo o enfoque desse trabalho a irrigação e o objetivo a que ela se propõe, que é o de abastecer as plantas de água, à medida que elas necessitam, visando a quantidade e qualidade da produção, partiu-se do princípio que as culturas selecionadas e assentadas na região são as mais apropriadas para o clima e o solo a que se referem.

Depois de identificadas as principais culturas, foram levantados os seguintes dados:

- necessidades hídricas da cultura;
- suprimento de água e rendimento da cultura;
- capacidade de retirada de água pela cultura;
- calendário de irrigação.

3.1.1. Profundidade Efetiva do Sistema Radicular

Para cada tipo de cultura, a densidade do sistema radicular, em geral, aumenta conforme avança a fase de crescimento vegetativo da planta, até alcançar uma profundidade máxima no solo. No entanto, as raízes se distribuem de forma não uniforme no solo e se concentram na sua grande maioria na metade superior do solo. A Z_r representa portanto a profundidade do sistema radicular no solo, onde se concentra em torno de 80% das raízes da cultura. Esta profundidade efetiva determina a espessura da camada de solo, que é utilizada no cálculo da lâmina de água nos projetos dos sistemas de irrigação.

A Z_r depende fundamentalmente do tipo de cultura e das condições do solo, tais valores encontram-se tabelados. Neste estudo utilizou-se os valores que constam na Tabela 1 no ANEXO.

3.2. CLIMA

3.2.1. Evapotranspiração de Referência

Caso os dados da ET_o não estejam disponíveis, pode-se recorrer aos métodos indiretos de determinação de ET_o . O método de cálculo selecionado vai depender dos dados meteorológicos existentes.

Os métodos mais utilizados e recomendados pela FAO, por intermédio de seu Grupo de Exigência de Água pelas Culturas, podem ser encontrados em Doorenbos e Kassam (1974) e Telles (1996).

3.2.2. Evapotranspiração Potencial

Os dados meteorológicos utilizados para o cálculo da ET_p devem ser coletados, preferencialmente, em estações situadas dentro de da área agrícola (irrigada) que se deseja analisar. Quando se coletam os dados em estações situadas em áreas secas, desnudas, os valores calculados da ET_p devem ser corrigidos, visto que os dados não representam os diferentes micro-climas que se encontram dentro dos projetos de irrigação. Nas zonas áridas e semi-áridas com ventos moderados, ET_p pode necessitar de um ajuste negativo de aproximadamente 20 a 25% (Bernardo, 1995).

3.2.2.1. Coeficiente de Cultura

Quando o suprimento de água atende plenamente as necessidades hídricas da cultura ET_p é relacionada com ET_o através dos K_c , sendo determinada, para um período de 30 dias, de acordo com a equação:

$$ET_p = K_c \cdot ET_o \quad (1)$$

em que:

- ET_p = evapotranspiração potencial [mm/mês];
- K_c = coeficiente de cultura (Tabela 2 no ANEXO);
- ET_o = evapotranspiração de referência [mm/mês];

Pelo fato do ModSimLS trabalhar em base mensal, para os períodos de duração dos estádios de desenvolvimento do cultivo menores que 30 dias, utilizou-se o valor médio de K_c , ou seja:

$$K_c = \frac{\left(\sum_{i=1}^n K_{ci} \right)}{n} \quad (2)$$

em que:

- K_{ci} = coeficiente de cultura para cada período de crescimento (Tabela 2 no ANEXO);
- i = período de crescimento específico;
- n = período de crescimento total.

3.2.3. Evapotranspiração Real

À medida que o solo perde a umidade a ET_a apresenta valores abaixo da ET_p , a partir de determinado teor de umidade do solo. Se houver água disponível no solo e o fluxo de água do solo para a planta atender à demanda atmosférica, $ET_a = ET_p$, se houver restrição de água no solo e a demanda atmosférica não for atendida, $ET_a < ET_p$. Partindo dessa afirmação, optou-se por determinar ET_a em função da umidade do solo. A ET_a e ET_p foram relacionadas a partir do *coeficiente relativo à umidade do solo* (K_s), de acordo com a equação.

$$ET_a = K_s \cdot ET_p \quad (3)$$

em que:

- ET_a = evapotranspiração real da cultura [mm/mês];
- ET_p = evapotranspiração potencial da cultura [mm/mês], Equação 1;
- K_s = coeficiente relativo a umidade do solo [adimensional].

K_s pode ser determinado pela equação em que a umidade do solo decresce exponencialmente, ou seja (Bernardo, 1995):

$$K_s = \frac{\ln(UA - PMP + 1)}{\ln(CC - PMP + 1)} = \frac{\ln(CAA + 1)}{\ln(CTA + 1)} \quad (4)$$

em que:

- UA = umidade atual de água no solo [mm];
- PMP = ponto de murcha permanente [mm];
- CC = capacidade de campo [mm];

- CAA = capacidade atual de água no solo [mm], item 3.4.3;
- CTA = capacidade total de água no solo [mm], Equação 7.

Para o caso em que se deseja manter o solo com umidade máxima, ou seja, $UA = CC$, a $CAA = CTA$ e $K_s = 1$.

3.2.4. Precipitação Efetiva

O método utilizado neste trabalho, na determinação da PP_e , foi o Método do Serviço de Conservação do Solo dos EUA. Este método estima a PP_e média mensal em função dos valores regionais da PP média mensal e da ET_p , para as condições em que a CTA seja igual a 75 mm (Tabela 3 no ANEXO). Para valores da CTA diferentes de 75 mm a PP_e é multiplicada por um fator de correção (Tabela 4 no ANEXO).

Deve ser observado que a quantidade de PP realmente efetiva dependerá do teor de umidade do solo imediatamente anterior à precipitação. Quando a chuva ocorrer após uma irrigação, praticamente não haverá efetividade; quando ocorrer poucos dias após a irrigação, a quantidade realmente efetiva será a lâmina que o solo poderá reter até que o seu teor de umidade chegue à CC e não a quantidade dada pela Tabela 3 no ANEXO.

Apesar de ser recomendado que o período em que os dados de PP_e são agrupados sejam, para regiões tropicais e subtropicais, de 5, 10 ou 15 dias, neste trabalho, considerou-se o intervalo mensal pelo fato do ModSimLS trabalhar em base mensal.

3.3. SOLO

A frequência de irrigação requerida para a cultura, sob determinado clima, depende principalmente da quantidade de água que pode ser “armazenada” no solo após uma irrigação.

Para o bom desenvolvimento da planta é necessário que o solo não alcance um limite crítico que é superior ao conteúdo de água equivalente ao PMP. Entre este limite, no qual as plantas começam a ressentir o déficit hídrico, e o PMP, as raízes ainda conseguem extrair água do solo, porém o crescimento vegetativo é sensivelmente prejudicado, pois a facilidade com que as raízes das plantas absorvem água também diminui com o conteúdo de água.

A relação entre o conteúdo de umidade do solo nesse limite crítico e sua DTA denomina-se déficit hídrico tolerável. O déficit hídrico tolerável depende do tipo de cultura, do tipo de solo e da ET.

Quando o solo dispõe de água em abundância, a ET é mantida numa taxa potencial, determinada pelas condições meteorológicas. À medida que a umidade do solo começa a diminuir, a taxa de evapotranspiração se torna mais baixa que a potencial, prevalecendo ainda as condições meteorológicas com participação das forças de retenção de água no solo. Prosseguindo o secamento do solo, começa a haver predominância das características de retenção de umidade do solo.

3.3.1. Disponibilidade total de água do solo

Determinou-se a água disponível do solo a partir do conhecimento dos teores de umidade correspondente à CC e ao PMP, as propriedades físicas do solo e a profundidade do solo (igual a Z_r). A Tabela 2 no ANEXO apresenta os valores de Z_r .

O cálculo da DTA depende da qualidade dos dados de solo disponíveis, ou seja, se os valores da CC e do PMP são fornecidos em *percentagem em peso do solo* (%peso) ou *percentagem em volume do solo* (%volume).

a) Percentagem em Peso do Solo

Quando os dados de solo estavam disponíveis em %peso, a DTA foi calculada pela equação:

$$DTA = \frac{1}{10} (CC - PM) D_a \quad (5)$$

em que:

- DTA = disponibilidade total de água no solo [mm/cm];
- CC = conteúdo da umidade á capacidade de campo [%peso];
- PMP = conteúdo da umidade correspondente ao ponto de murcha [%peso];
- D_a = massa específica aparente do solo, relativa à densidade da água [adimensional].

b) Percentagem em Volume do Solo

Quando os dados de solo estavam disponíveis em %volume, DTA foi calculada pela equação:

$$DTA = \frac{1}{10}(CC - PM) \quad (6)$$

em que:

- DTA = disponibilidade total de água no solo [mm/cm];
- CC = conteúdo da umidade á capacidade de campo [%volume];
- PMP = conteúdo da umidade correspondente ao ponto de murcha [%volume].

As características associadas à retenção e a disponibilidade de água (CC – 0,33 atm e PMP – 15 atm) das classes de solo devem estar de acordo com as características das áreas irrigáveis da bacia em estudo. Caso os dados não estejam disponíveis pode-se recorrer a uma extrapolação.

3.3.2. Capacidade Total de Água no Solo

Tanto a quantidade de água de chuva como de irrigação só devem ser consideradas disponíveis para a cultura no perfil do solo que esteja ocupada pelo seu sistema radicular. Sendo assim a *capacidade total de água do solo* (CTA) foi calculada por:

$$CTA = DTA \cdot Z_r \quad (7)$$

em que :

- CTA = capacidade total de água disponível do solo [mm];
- DTA = disponibilidade total de água no solo [mm/cm], Equações 5 ou 6;
- Z_r = profundidade efetiva do sistema radicular [cm], Tabela 2 no ANEXO.

3.3.3. Capacidade Real de Água do Solo

Em um manejo adequado de irrigação nunca se deve permitir que o teor de umidade do solo atinja o PMP, isto é, deve-se somente usar entre duas irrigações sucessivas, uma fração da capacidade total de água do solo, ou seja:

$$CRA = CTA \cdot f \quad (8)$$

em que:

- CRA = capacidade real de água no solo [mm];
- CTA = capacidade total de água no solo [mm], Equações 5 ou 6;
- f = fração de esgotamento de água disponível no solo. A escolha de f depende da cultura e da ET_p , Tabelas 5 e 6 no ANEXO, respectivamente.

3.4. BALANÇO HÍDRICO NO SOLO

As relações existentes entre cultura, clima, água e solo são complexas envolvendo muitos processos biológicos, fisiológicos, físicos e químicos. Grande quantidade de informações de pesquisa sobre esses processos em relação à água, encontra-se disponível; contudo, para a sua aplicação prática, esse conhecimento deve

ser reduzido a um número manejável de componentes principais para permitir uma análise significativa do efeito da água sobre a cultura, a nível de campo.

A finalidade básica da irrigação é proporcionar água às culturas de maneira a atender às exigências hídricas durante todo o seu ciclo, possibilitando alta produtividade. A quantidade de água necessária às culturas é função da espécie cultivada, do local do cultivo, do estágio de desenvolvimento da cultura, do tipo de solo e da época de plantio.

3.4.1. Irrigação Real Necessária

A *irrigação real necessária* (IRN) é a quantidade real de água necessária a ser aplicada a cultura por irrigação. Considerando-se dois casos:

a) Com irrigação total: quando toda água necessária à cultura é suprida pela irrigação.

Nesse caso utilizou-se:

$$IRN \leq CRA \quad (9)$$

em que:

- IRN = irrigação real necessária [mm];
- CRA = capacidade real de água no solo [mm], Equação 8.

b) Com irrigação suplementar: quando parte da água necessária à cultura for suprida pela irrigação e a outra parte pela precipitação efetiva. Neste caso.

$$IRN \leq CRA - PP_e - AS \quad (10)$$

em que:

- IRN = irrigação real necessária [mm];
- CRA = capacidade real de água no solo [mm], Equação 8.
- PP_e = precipitação efetiva [mm], Tabelas 3 e 4 no ANEXO;
- AS = água no solo antes da irrigação [mm], deve ser de conhecimento do usuário.

3.4.2. Irrigação Total Necessária

São comuns os vazamentos de água nas tubulações e nos canais de alimentação e de distribuição de água. A manutenção, quando existe, é praticada desordenadamente. Os valores médios de ε variam consideravelmente em função de diversos fatores, conforme pode ser verificado na Tabela 8 no ANEXO.

Definiu-se a *irrigação total necessária* (ITN) como a quantidade total de água a ser suprida por irrigação, admitindo-se as perdas existentes no sistema de irrigação, ou seja:

$$ITN = \frac{IRN}{\varepsilon} \quad (11)$$

em que:

- ITN = quantidade total de irrigação necessária [mm];
- IRN = quantidade real de irrigação necessária [mm], Equações 9 ou 10, dependendo se é irrigação total ou suplementar, respectivamente;

- ε = eficiência de aplicação da irrigação [fração], Tabela 8 no ANEXO.

3.4.3. Determinação do Calendário de Irrigação

O método utilizado neste trabalho foi baseado na determinação da ET_a . Neste método é definida a IRN para cada estágio de desenvolvimento da cultura. Através do cálculo diário da ET_a , verificou-se quando aquela lâmina foi consumida pela planta e aplicou-se nova irrigação.

3.4.3.1. Procedimento de Cálculo

a) Dados necessários:

- ET_o : para o caso de dados diários, dividir o total mensal pelo número de dias do mês;
- K_c : Tabela 2 no ANEXO;
- CC: característica do solo da região;
- PMP: característica do solo da região;
- Z_r : Tabela 2 no ANEXO;
- f: Tabela 6 no ANEXO;
- ε : Tabela 8 no ANEXO.

b) Dados calculados:

- ET_p : Equação 1, para o caso de dados diários dividir o total mensal pelo número de dias do mês;
- ET_a : Equação 3, para o caso de dados diários dividir o total mensal pelo número de dias do mês;
- K_s : Equação 3;
- DTA: Equações 5 ou 6;
- CTA: Equação 7;
- CRA: Equação 8;
- IRN: Equações 9 ou 10, dependendo se é irrigação total ou suplementar, respectivamente;
- ITN: Equação 11.

c) Seqüência:

- **Primeiro dia:**

- irrigar o solo até a CC;
- calcular a ET_p (Equação 1). Para $K_s = 1$, $ET_a = ET_p$.

• **Segundo dia:**

- fazer o balanço hídrico do solo com os dados do dia anterior: $CAA = CTA - ET_a + PP_e$, caso não tenha ocorrido nenhuma chuva: $PP_e = 0$;
- calcular o novo K_s (Equação 4);
- calcular a nova ET_a (Equação 3);

• **Dias subsequentes:**

- seguir o mesmo procedimento do segundo dia obedecendo ao limite preestabelecido da disponibilidade total de água no solo, ou seja, ($IRN \leq CRA$). Caso a relação não seja cumprida, deve-se irrigar na noite do mesmo dia ou na manhã do dia seguinte, sendo: $IRN = CTA - CAA$;
- calcular a ITN (Equação 11);
- irrigar o solo com ITN. Caso a água disponível seja suficiente $CAA = CTA$, caso não, abastecer o solo com o máximo de água possível a fim de garantir uma produção satisfatória;
- recomençar os cálculos como no primeiro dia.

No final de cada mês contar quantas irrigações foram feitas, podendo-se assim quantificar o montante total de água.

$$ITM = \sum_i^n ITN_i \quad (12)$$

em que:

- ITM = irrigação total no mês [mm/mês];
- n = número de irrigações no mês;
- ITN_i – irrigação total necessária no dia i [mm/dia].

3.4.4. Resposta da Cultura ao Suprimento Hídrico

A indicação sobre o Y_p corresponde aos máximos obtidos nas condições agrícolas do momento com alto nível de manejo de cultura e água.

A maioria das culturas apresenta variedades que diferem tanto quanto as necessidades climáticas gerais específicas como em relação à duração do ciclo fenológico total (desde a semeadura até a colheita). Essa variação permite que a cultura se adapte a uma ampla faixa de condições climáticas e ao período de tempo necessário e disponível para a produção.

Além da necessidade climática, o período de crescimento disponível é determinado pela duração de um suprimento garantido de água de boa qualidade. Neste caso, as demandas de água devem estar sincronizadas com sua disponibilidade, como por exemplo: uma variação da vazão do rio e a descarga de uma barragem. Para algumas culturas, o período total de crescimento necessário para uma Y_p pode ser manipulado mediante o nível de suprimento de água. Para outras culturas, o período

necessário para Y_p deve ser manejado também mediante o nível de suprimento de água, durante determinado estágio de crescimento.

A relação entre o rendimento da cultura e o suprimento de água pode ser determinada quando se puder quantificar, de um lado, as necessidades hídricas da cultura e os efeitos hídricos e, de outro, os rendimentos máximo e real da cultura. Os déficits hídricos nas culturas e o conseqüente estresse hídrico na planta, têm certos efeitos sobre a evapotranspiração e o rendimento da cultura.

O efeito do estresse hídrico na planta foi quantificado através da relação entre a queda de *rendimento relativo* ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de *evapotranspiração relativa* ($1 - ET_a/ET_p$), dada pelo *coeficiente de resposta da cultura* (K_y) obtido empiricamente, ou seja:

$$(1 - Y_a/Y_p) = K_y (1 - ET_a/ET_p) \quad (13)$$

em que:

- Y_a = rendimento real obtido;
- Y_p = rendimento potencial ou máximo obtido;
- K_y = coeficiente de resposta da cultura, Tabela 8 no ANEXO;
- ET_a = evapotranspiração atual, Equação 3;
- ET_p = evapotranspiração potencial, Equação 1.

Como não se dispõem de valores padrões de referências para comparação, supôs-se que a confiabilidade dos valores de K_y apresentados na Tabela 8 no ANEXO é semelhante ao procedente da análise dos resultados experimentais de campo (Doorenbos e Kassam, 1979).

3.4.4.1. Procedimento de Cálculo

a) Dados Necessários

- ET_p : Equação 1;
- ET_a : Equação 3.

b) Dados calculados

- ET_a/ET_p ;
- K_y : Tabela 8 no ANEXO;
- Y_a/Y_p .

c) Seqüência

Para o período total de crescimento, calcular:

- ITN; Equação 11;
- ET_p : Equação 1;
- escolher adequadamente o K_y (Tabela 8 no ANEXO);

- Y_a/Y_p : Equação 13.

3.4.5. Produção

3.4.5.1. Procedimento de Cálculo

a) Dados Necessários

- ET_p : Equação 1;
- ET_a : Equação 3.

b) Dados Calculados

- ET_a/ET_p ;
- K_y : Tabela 8 no ANEXO.

c) Seqüência

Para o período total de crescimento, calcular:

- ITN: Equação 11;
- ET_p : Equação 1;

- ET_a/ET_p ;
- escolher adequadamente o K_y , Tabela 8 no ANEXO;
- P_a/P_p : Tabela 9 no ANEXO

3.5. O MODELO MODSIMLS

A condição básica para utilização do ModSimLS é que o sistema de recursos hídricos possa ser representado como rede de fluxo. Os componentes do sistema são representados na rede como nós, sendo nós de volume (reservatórios) e nós de passagem (confluências, pontos de desvio, pontos de entrada e pontos de demanda) e arcos ou elos (canais, adutoras e trechos naturais de rios). Para considerar as demandas, vazões afluentes e as normas de operação desejadas do reservatório, diversos nós e arcos artificiais devem ser criados de forma a assegurar que o balanço de massa seja satisfeito em toda a rede. Esses nós e arcos artificiais são criados automaticamente pelo ModSimLS restando ao usuário a criação dos nós e arcos reais do sistema.

As hipóteses básicas vinculadas ao modelo são:

- todos os nós de armazenamento e arcos do sistema devem possuir limites (deve-se fornecer valores máximos e mínimos para os volumes dos reservatórios e para a capacidade dos arcos). Permite-se que a capacidade dos arcos varie ao longo do tempo. As perdas resultantes da evaporação e da infiltração são estimados iterativamente;
- cada arco deve ser unidirecional no que diz respeito ao sentido de fluxo; e
- todos os influxos, demandas, perdas por infiltração e vazões de retorno devem se acumular nos nós.

Matematicamente, o algoritmo Out-of-Kilter resolve o seguinte problema de fluxo de rede, de forma sequencial, ao longo do tempo.

Minimizar

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot q_{ij} \quad (14)$$

em que:

- q_{ij} = a vazão média entre o nó i e o nó j durante o intervalo de tempo considerado;
- c_{ij} = custo unitário, que pode ser um custo monetário ou um fator de ponderação que represente direitos de água ou prioridades operacionais (um custo negativo é tratado como um benefício ou prioridade).

A resolução do algoritmo está sujeita a:

- a) Satisfação do equilíbrio de massa em todos os nós $j = 1, 2, \dots, N$ (inclusive os nós artificiais)**

$$\sum_{i \in F_j} q_{ij} - \sum_{k \in O_j} q_{jk} = 0 \quad (15)$$

em que:

- F_j = conjunto de todos os nós com arcos que terminam no nó j ;
- O_j = conjunto de todos os nós com arcos que se originam no nó j .

- b) A vazão mínima em todos os arcos (i, j)**

$$q_{ij} \geq I_{ij} \quad (16)$$

sendo:

- I_{ij} = vazão mínima no arco (i, j).

c) A vazão máxima em todos os arcos (i, j)

$$q_{ij} \leq U_{ij} \quad (17)$$

sendo:

- U_{ij} = vazão máxima no arco (i, j).

Os parâmetros c_{ij} , I_{ij} e U_{ij} são definidos para os principais componentes de um sistema de recursos hídricos de acordo com a descrição feita nos itens a seguir.

3.5.1.1. Vazões não Reguladas

As vazões não reguladas utilizadas no ModSimLS podem ser baseadas em séries históricas, previsões ou geração sintética, podendo ser utilizadas em qualquer um dos nós reais do modelo (pontos de entrada de vazões afluentes).

A adição de vazões não reguladas ao modelo é feita através da criação de um único nó artificial de influxo, que é ligado a todos os nós reais da rede através de arcos artificiais. Esses nós e arcos artificiais são criados para manter o equilíbrio de massa em cada um dos nós de influxo.

Os nós reais 1, 2, 3 e 4 são automaticamente ligados pelo ModSimLS a um nó artificial I, através da criação de quatro arcos artificiais, Figura 5.

Fonte: Porto e Azevedo (1997)

Figura 5. Arcos e nós artificiais de vazões não reguladas

Os parâmetros dos arcos representam respectivamente o limite inferior (I_{ij}), o limite superior (U_{ij}) e o custo do arco (c_{ij}), e são automaticamente definidos pelo ModSimLS. O conjunto I_j é fornecido pelo usuário e representa as vazões afluentes aos nós j durante o intervalo de tempo. Nos elementos que possuem vazões afluentes (nós 1 e 2) os limites inferior e superior são igualados a I_j para garantir que o valor exato fornecido pelo usuário seja utilizado. Já nos elementos que não possuem vazões afluentes (nós 3 e 4) os limites inferior e superior são automaticamente igualados a zero.

Para os nós de volume (reservatórios) a definição dos parâmetros nos arcos muda. Além das vazões afluentes aos reservatórios, existe também a água que ficou armazenada nos mesmos ao final do período anterior (volume final no período $(i - 1)$) e que passa a ser o volume inicial no período atual (período i). Assim, os arcos artificiais para vazões afluentes que chegam em reservatórios passam a ter limites inferior e superior iguais a $I_j + S_j$, onde S_j é o volume armazenado no reservatório j ao final do período anterior e que passa a ser o volume armazenado no mesmo reservatório no início do período atual. Supondo que os nós 1 e 2 sejam reservatórios, os novos valores dos parâmetros nos arcos artificiais são mostrados na Figura 6.

Fonte: Porto e Azevedo (1997)

Figura 6. Arcos e nós artificiais de vazões não reguladas com adição do volume inicial

3.5.1.2. Perdas nos Reservatórios e por Evaporação

3.5.1.2.1. Limites nos Arcos

Nos elementos de volume da rede (reservatórios) é necessário que a água armazenada no final de um período de simulação seja transportada para o período seguinte. Isso é feito através de arcos artificiais que se originam em cada reservatório e terminam em um único nó artificial de volume (nó S), conforme mostrado na Figura 7.

Fonte: Porto e Azevedo (1997)

Figura 7. Arcos e nós artificiais de volume

O primeiro arco artificial (arco [1] na Figura 7) é chamado de arco de volume meta, cujos limites são:

- Limite inferior (S_{imin}): volume mínimo ou volume morto do reservatório i ;
- Limite superior (T_i): volume meta a ser atingido no final do período atual, fornecido pelo usuário do modelo.

Quando o volume armazenado superar o volume meta, o excesso de volume é transportado pelo arco artificial de volume final (arco [2] na Figura 7), cujos limites são:

- Limite inferior: é zero porque qualquer volume excedente (acima de T_i) vai ser transportado por este arco;
- Limite superior ($S_{\text{imáx}} - T_i$): é o volume máximo de excesso, ou seja, é a diferença entre o volume máximo e o volume meta do reservatório i .

Se, ao final do período atual, o volume a ser transportado para o período seguinte for menor que o volume mínimo em algum dos reservatórios, ocorre uma inviabilidade. Para resolver este problema, o ModSim altera o valor de S_{imin} no período atual, igualando-o ao volume final real a ser transportado.

3.5.1.2.2. Vertimentos

No modelo ModSimLS ocorrem vertimentos quando o volume afluyente mais o volume armazenado superar a capacidade máxima de algum reservatório. Esses vertimentos são coletados pelo nó SP, que está conectado aos reservatórios através do link artificial [3] (Figura 7). O link [3] tem limite inferior igual a zero e limite superior equivalente à capacidade total de armazenamento do sistema multiplicada por dez.

3.5.1.2.3. Custos nos Arcos

Os arcos artificiais de volume meta (arcos [1] na Figura 7) tem um custo, representado por c_{is} , que é calculado de forma a refletir as prioridades associadas ao volume meta ou aos direitos de armazenamento de água. A prioridade do volume meta é representada por um valor inteiro fornecido pelo usuário, variando de 1 a 99 (OPRP_i).

Quanto menor o valor numérico da prioridade, maior será a tendência do ModSim em tentar manter o volume meta durante os cálculos. O custo c_{is} , obtido em função da prioridade $OPRP_i$, é calculado através da seguinte expressão:

$$c_{is} = -[1000 - (OPRP_i \cdot 10)] \quad (18)$$

na qual é possível notar que o custo c_{is} sempre será negativo, ou seja, na realidade ele é um benefício associado ao volume meta.

O custo no arco artificial de volume final (arco [2] na Figura 7) sempre é configurado como zero. Já o custo no arco artificial de vertimento (arco [3] na Figura 7) recebe o maior valor positivo entre todos os arcos existentes.

3.5.1.2.4. Evaporação

A evaporação é calculada através de um processo iterativo, que faz estimativas sucessivas da área média da superfície do reservatório, durante cada intervalo de tempo de simulação. O funcionamento desse método iterativo é:

(a) Calcula-se em cada reservatório:

$$E_{i\max} = e_i [A(S_i) + A(S_{i\max})] / 2 \quad (19)$$

$$E_{i\min} = e_i [A(S_i) + A(S_{i\min})] / 2 \quad (20)$$

$$E_{i\text{meta}} = e_i [A(S_i) + A(T_i)] / 2 \quad (21)$$

em que:

- e_i = taxa de evaporação para o reservatório que está sendo calculado;
- $A(S_i)$ = área da superfície do reservatório para o volume S_i ;

- S_i = volume do reservatório no início do período i ;
- $S_{i\max}$ = capacidade máxima do reservatório;
- $S_{i\min}$ = volume mínimo ou volume morto do reservatório; e
- T_i = volume meta fornecido pelo usuário.

(b) Ajustam-se os parâmetros do arco de volume meta e do arco de volume final respectivamente para os seguintes valores:

$$[(S_{i\min} + E_{i\min}), (T_i + E_{i\text{meta}}), c_{is}] \quad (22)$$

$$[0, (S_{i\max} - T_i) + (E_{i\max} - E_{i\text{meta}}), 0] \quad (23)$$

(c) Calcula-se o volume total de transporte, através dos arcos de volume meta e de volume final, incluindo as perdas por evaporação, através da expressão:

$$q_{i\text{total}} = q_{is(\text{meta})} + q_{is(\text{final})} \quad (24)$$

(d) Estima-se um valor inicial para a perda por evaporação (E_i). Assim, o volume final passa a ser:

$$q_{i\text{total}} - E_i \quad (25)$$

(e) Calcula-se a área média A da superfície do reservatório:

$$A = 0.5 \cdot [\bar{A}(q_{i\text{total}} - E_i)] \quad (26)$$

(f) Atualiza-se a estimativa da evaporação:

$$E_i = e_i \cdot A \quad (27)$$

(g) Volta-se ao passo dado pela expressão (25) e repete-se o processo até que a diferença entre duas estimativas sucessivas de evaporação esteja dentro do nível desejado de tolerância

3.5.1.2.5. Estados Hidrológicos

No ModSim existem duas opções de cálculo conhecidas como “calibração” e “estados hidrológicos”. Na primeira opção, o usuário deve fornecer volumes meta mensais, para cada reservatório, cujos valores podem variar durante todos os anos de simulação. Já na segunda opção o usuário deve fornecer volumes meta mensais, constantes ao longo dos anos, que podem variar entre os três estados hidrológicos existentes no modelo. O estado hidrológico é definido como:

$$R = \sum_{i \in H} [S_i + I_i] \quad (28)$$

em que:

- H = conjunto de reservatórios que farão parte do cálculo do estado hidrológico, também chamado de subsistema de reservatórios;
- S_i = volume inicial do reservatório i;
- I_i = vazão afluyente ao reservatório i.

O usuário deve fornecer dois valores (x_1 e x_2) que são utilizados para estabelecer, mensalmente, o estado hidrológico do sistema. Esses valores, multiplicados pelo volume total existente no subsistema de reservatórios, definem as fronteiras entre os três estados hidrológicos.

Os estados hidrológicos usualmente são denominados seco, médio e úmido mas podem ser também chamados de médio, seco e sequíssimo no caso de simulações durante um período de vazões baixas. Neste capítulo, o estado de menor volume armazenado é chamado de E_1 , o de volume médio de E_2 e o de maior volume de E_3 . Os limites entre os estado E_1 e E_2 e entre os estados E_2 e E_3 são, respectivamente:

$$E_1 E_2 = x_1 \cdot W \quad (29)$$

$$E_2 E_3 = x_2 \cdot W \quad (30)$$

sendo:

$$W = \sum_{i \in H} S_{i \max} \quad (31)$$

Os estados hidrológicos são definidos da seguinte forma:

$$E_1 : \text{se } R < E_1 E_2 \quad (32)$$

$$E_2 : \text{se } E_1 E_2 \leq R \leq E_2 E_3 \quad (33)$$

$$E_3 : \text{se } R > E_2 E_3 \quad (34)$$

Observação: Quando o usuário escolhe a opção de cálculo estados hidrológicos deve ser fornecido um valor de prioridade por estado para cada reservatório. A opção estados hidrológicos aumenta a flexibilidade da simulação, já que os cálculos passam a considerar, mensalmente, o estado do sistema.

3.5.1.3. Demandas e Direitos de Água

3.5.1.3.1. Demandas Terminais

Considere a rede apresentada na Figura 8, na qual os nós 3 e 4 são demandas. O modelo ModSim cria e configura automaticamente os arcos artificiais originados em cada um dos nós de demanda da rede e conecta esses arcos a um único nó artificial de demanda.. Os valores dos parâmetros I_{ij} , U_{ij} , e c_{ij} nos arcos artificiais de demanda são mostrados na Figura 8, sendo D_3 e D_4 os valores de demanda em cada um dos nós. As demandas podem ser volumes legalmente outorgados, retiradas históricas, demandas agrícolas, municipais ou industriais.

Fonte: Porto e Azevedo (1997)

Figura 8. Demandas terminais

Os custos c_{iD} são calculados através da seguinte expressão:

$$c_{iD} = -[1000 - (\text{DEMR}_i \cdot 10)] \quad (35)$$

em que

- DEMR_i é a prioridade da demanda i , variando de 1 a 99.

Observe que c_{iD} é um número negativo assim como c_{is} (custo associado ao volume meta nos reservatórios). O usuário do modelo precisa escolher valores de prioridades para as demandas e os volumes meta. Quando todas as demandas não puderem ser atendidas, as primeiras a sofrerem déficits serão aquelas com menor valor de prioridade. Se a opção escolhida for Estados Hidrológicos podem ser fornecidos três

valores de prioridade, sendo um para cada estado. Esses valores permanecem constantes para todos os anos.

3.5.1.3.2. Demandas de Passagem

Demandas de passagem são demandas não consuntivas, incluídas no modelo com o objetivo de manter a magnitude da vazão em algum ponto específico do sistema em estudo. Podem ser utilizadas, por exemplo, para a manutenção da vazão mínima em um trecho de rio, estabelecida para peixes e fauna, controle da qualidade da água ou recreação.

Geralmente as demandas de passagem destinadas a manutenção de vazões mínimas podem ser substituídas pelo estabelecimento de vazões mínimas nos arcos. Entretanto, se a vazão mínima em algum arco não puder ser atingida (o que pode ocorrer em períodos secos), o modelo não irá encontrar uma solução possível para o problema e irá encerrar os cálculos.

O esquema de funcionamento de uma demanda de passagem será explicado com o auxílio do exemplo existente na Figura 9, que apresenta a parte final da rede mostrada na Figura 8.

Figura 9. Demandas de passagem

No exemplo, é necessário manter uma vazão mínima D_3 no arco (3,4) e o nó 4 representa uma demanda terminal. Além dos arcos artificiais de demanda são mostrados também os arcos de vazão artificial, com origem no nó I e término nos nós de demanda. O arco artificial que termina na demanda 4 recebe os parâmetros $[D_3, D_3, 0]$. Se uma vazão I_4 tivesse sido aportada ao nó 4 os parâmetros passariam a ser $[I_4 + D_3, I_4 + D_3, 0]$.

A demanda de passagem é definida no nó 3 mas o fluxo irá se acumular na demanda 4. Para simular uma demanda de passagem em um certo arco, o ModSim retira a vazão do nó de montante e coloca a vazão de volta no nó de jusante do respectivo arco.

3.5.1.4. Perdas de Condução e de Infiltração

O modelo ModSimLS possui a capacidade de simular as perdas por infiltração nos canais, através do fornecimento de um coeficiente de perda. Esse coeficiente deve ser fornecido pelo usuário e representa a fração do fluxo que seria perdida durante o percurso através do canal. O procedimento utilizado pelo modelo para simular as perdas é o seguinte:

- i. em cada período de simulação a perda no canal é inicialmente igualada a zero (primeira iteração);
- ii. a seguir, a perda no canal é calculada em função do fluxo que chega a montante do mesmo. Essa perda é transportada como uma demanda para o nó de jusante do canal;
- iii. a iteração seguinte é efetuada utilizando a perda calculada no item ii;

- iv. repete-se o processo até que o fluxo no canal não mude entre duas iterações sucessivas (dentro da margem de tolerância).

O procedimento descrito anteriormente é mostrado na Figura 10, na qual $c_{l_{ij}}$ é o coeficiente de perda no canal ij . O procedimento termina quando $q_{ij}^{(k)} = q_{ij}^{(k-1)}$ para todos os canais, dentro da margem de tolerância, ou seja, $q_{ij}^{(k)} = q_{ij}^{(k-1)} \pm \tau$.

Fonte: Porto e Azevedo (1997)

Figura 10. Iterações para se determinar as perdas por infiltração nos canais

Quando não existe demanda no nó de jusante (nó j na Figura 10) então a perda no canal passa a ser a única demanda nesse nó. Essa demanda recebe uma alta prioridade para garantir que as perdas no canal sejam sempre removidas em primeiro lugar, já que se trata de uma demanda que precisa ser satisfeita. Por outro lado, se já existir uma demanda no nó j , as perdas no canal são simplesmente acrescentadas a essa demanda, mantendo-se o valor de prioridade existente. Isso pode criar problemas quando houver pouca água disponível no sistema e a demanda existente tiver baixa prioridade.

3.6. O MODELO IRRIGALS

A interface IrrigaLS foi desenvolvida no formato típico de um sistema de suporte a decisões, ou seja, estão presentes em sua estrutura um módulo de diálogo, uma base de dados e uma base de modelos, que no presente caso é constituída apenas pelo IrrigaLS.

O módulo de diálogo permite que a topologia do sistema seja formulada com a utilização do mouse e de uma série de ícones (que representam reservatórios, canais, nós de passagem, etc.). Ao se acionar o botão do mouse sobre cada um destes ícones tem-se acesso à base de dados da estrutura representada pelo ícone acionado. Após a execução do programa os resultados podem ser consultados em forma tabular ou gráfica. Os dados e resultados podem ser facilmente exportados para planilhas eletrônicas e processadores de texto. Da mesma forma, os dados de entrada podem ser importados de planilhas.

Como inovação o modelo oferece a demanda de irrigação por ser uma das principais concorrentes pelo uso da água. O modelo adaptado calcula as necessidades hídricas da cultura obedecendo aos critérios de irrigação, ou seja, a relação clima-solo-água-cultura, utilizando, antes de fazer uso da água do reservatório superficial, a água armazenada no solo. Espera-se com isto, dependendo da disponibilidade hídrica da bacia, que uma quantidade ideal de água seja fornecida à planta.

O modelo oferece, também, a opção de comparação das variáveis obtidas pelo método do balanço hídrico de determinação da lâmina irrigada e os valores simulados pelo IrrigaLS. É possível, também, analisar o rendimento e a produção de acordo com a

quantidade de água aplicada a cultura para ambos os métodos (balanço hídrico e IrrigaLS).

3.6.1. Reservatório do Solo no IrrigaLS

Para o modelo IrrigaLS efetuar a análise do planejamento da irrigação, a fim de fornecer informações mais precisas do balanço de água no solo de acordo com a exigência da cultura, tornou-se necessário adaptá-lo. O reservatório do modelo foi adaptado para funcionar também como um reservatório do solo no ModSimLS. Nesta simulação, enquanto a água armazenada no solo satisfizer as exigências hídricas da cultura afim de obter máxima produção não é necessário utilizar água do reservatório superficial.

A Figura 11 apresenta a relação entre o reservatório superficial e do solo.

Observa-se pela figura que:

- a capacidade máxima ($C_{\max}$) do reservatório superficial esta relacionada a capacidade de campo (CC) no reservatório do solo;
- a capacidade mínima ($C_{\min}$) do reservatório superficial esta relacionada ao ponto de murcha permanente (PMP) no reservatório do solo;
- a capacidade mínima admitida ($C_{\min}^*$) do reservatório superficial esta relacionada ao limite crítico de umidade no reservatório do solo (PMP^*); Abaixo do PMP^* a planta não retira água do solo;
- a perda de água por evaporação (E) do reservatório superficial corresponde a perda de água por evapotranspiração (ET) no reservatório do solo.

O que resulta para uma área irrigada (A_i) e profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r) do reservatório do solo em:

a) O volume total de água no solo

$$V_{\text{total}} = \text{CTA} \cdot A_i \cdot 10^{-3} \quad (36)$$

em que:

- V_{total} = volume total de água no solo [Hm^3];
- CTA = capacidade total de água no solo [mm];
- A_i = área irrigada [Km^2].

b) O volume útil de água no solo, ou seja, o volume de água no solo realmente disponível para as plantas

$$V_{\text{útil}} = V_{\text{total}} \cdot f \quad (37)$$

em que:

- $V_{\text{útil}}$ = volume útil de água no solo [Hm^3];
- V_{total} = volume total de água no solo [Hm^3];
- f = fator de esgotamento de água no solo [adimensional], (Tabelas 6 no ANEXO).

c) o volume morto de água no solo, ou seja, o volume de água no solo não disponível para as plantas [Hm³].

$$V_{\text{morto}} = V_{\text{total}} \cdot (1 - f) \quad (38)$$

em que:

- V_{morto} = volume morto de água no solo, ou seja, o volume de água no solo não disponível para as plantas [Hm³];

- V_{total} = volume total de água no solo [Hm³];

f = fator de esgotamento de água no solo [adimensional], Tabelas 5 e 6 no

ANEXO.

Figura 11. Representação esquemática das relações existentes entre os reservatórios superficial e do solo

3.6.2. A interface do IrrigaLS

O IrrigaLS é um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas. Com ele o usuário além de poder montar redes com um grande número de reservatórios, demandas e trechos de canais, poderá também, caso queira, considerar a demanda de irrigação (reservatório do solo), representando o problema em estudo de forma ainda mais detalhada.

Em linhas gerais, o modelo IrrigaLS funciona da seguinte maneira:

- durante a utilização do IrrigaLS, todas as ações feitas pelo usuário são imediatamente armazenadas em um banco de dados temporário;
- ao iniciar o modelo, o usuário pode começar um novo projeto ou abrir um projeto previamente gravado;
- se for iniciado um novo projeto, um novo banco de dados temporário será criado;
- quando o usuário abre um projeto existente, o ModSimLS cria imediatamente uma cópia desse projeto, que passa a ser o banco de dados temporário;
- no banco de dados temporário são armazenadas todas as informações fornecidas pelo usuário (traçado e dados de entrada).

A utilização de um banco de dados temporário durante o funcionamento do modelo apresenta as seguintes vantagens:

- não é necessário alocar memória para guardar valores em variáveis, já que os mesmos estarão automaticamente armazenados no banco de dados;
- ao abrir um projeto só uma pequena parte do banco é lida. Todos os dados e resultados só serão lidos (diretamente do banco) quando for necessário;

- um projeto só será alterado quando o usuário salvá-lo. Nesse instante será criada uma cópia do banco de dados temporário com o nome e no local fornecido pelo usuário.

As adaptações, as principais partes e as novidades existentes no IrrigaLS são descritas nos próximos itens.

3.6.2.1. Tipos de Simulação

Os dois tipos de simulação existentes no IrrigaLS são Simulação Contínua e Planejamento Tático. Atualmente, os cálculos são efetuados de maneira seqüencial no tempo (Simulação Contínua), o Planejamento Tático está em desenvolvimento.

Na Simulação Contínua, o valor mais importante é o número total de anos de simulação (denotado por NT). O usuário deve fornecer séries de vazões afluentes mensais com duração igual a NT . O modelo efetua os cálculos continuamente, para todos os anos da série. Os resultados são fornecidos em escala mensal para todos os anos.

Quando as séries de vazões são relativamente longas, percebe-se que os volumes iniciais dos reservatórios passam a ter pequena influência nos resultados. Assim, este tipo de simulação é recomendado para se obter uma idéia inicial do comportamento do sistema em estudo, das prioridades a serem adotadas, etc. Se o usuário pretende ter uma idéia do comportamento do sistema ao longo do tempo então a Simulação Contínua é a opção recomendada.

No Planejamento Tático, o usuário deve fornecer, além do número total de anos de simulação (NT), o número de anos do horizonte de simulação (NH). O horizonte de simulação é o número de anos durante os quais pretende-se estudar o comportamento do

sistema em análise. Neste tipo de simulação, os cálculos são efetuados da seguinte maneira:

- partindo, no primeiro ano, com os volumes iniciais dos reservatórios fornecidos pelo usuário, o modelo efetua os cálculos sequencialmente para NH anos;
- no segundo ano o procedimento acima é repetido partindo-se novamente com os volumes iniciais fornecidos pelo usuário;
- o procedimento acima é repetido até que seja efetuado o cálculo partindo-se do ano $NT - NH + 1$;
- os resultados fornecidos são valores estatísticos para todos os meses do horizonte de simulação.

Esta opção de cálculo é a mais recomendada quando o objetivo é fazer o planejamento e/ou a operação de sistemas de reservatórios.

3.6.2.2. Opções de Cálculo

As duas opções de cálculo existentes no IrrigaLS são Estados Hidrológicos e Calibração. Atualmente os cálculos são realizados por Calibração (Estados Hidrológicos está em desenvolvimento).

As diferenças entre estas duas opções estão na entrada de dados e na maneira como o modelo irá efetuar os cálculos. Na opção Estados Hidrológicos, o modelo considera o estado hidrológico (quantidade de água armazenada nos reservatórios) para determinar qual o valor de demanda, de volume meta e as prioridades que serão utilizadas no cálculo de cada um dos meses. Quando a opção selecionada for

Calibração, o modelo efetua os cálculos com os valores fornecidos sem considerar o estado atual do sistema.

3.6.2.3. O Traçado

Para criar/editar elementos o usuário deve selecionar um dos botões mostrados na Figura 12 e clicar na área de trabalho do modelo. A Figura 14 apresenta um exemplo de traçado.

Figura 12. Botões de traçado

O IrrigaLS possibilita criar vários links entre dois nós, sendo possível atribuir custos diferentes a cada um desses links, direcionando o caminhamento da água. A Figura 13 apresenta um exemplo dessa montagem.

Figura 13. Vários links entre dois nós

Considerando que as plantas apresentam exigências hídricas diferentes, na montagem da topologia da rede, cada área ocupada por determinada cultura será tratada como uma demanda de irrigação. Apesar do IrrigaLS possibilitar criar vários links entre dois nós, para um melhor controle das perdas no sistema de irrigação nos nós de demanda de irrigação só é permitido chegada de um único link. A Figura 14 apresenta um exemplo de traçado quando se considera a demanda de irrigação.

Figura 14. Exemplo de traçado

3.6.2.4. Definições Gerais

Ao iniciar uma nova simulação, o usuário deve fornecer ao modelo diversas informações que servirão de base para a entrada de dados, o cálculo e os resultados. Para isto, existe a tela de definições gerais (Figura 15), na qual é escolhido o tipo de simulação, as opções de cálculo e os valores relacionados com estas opções.

O usuário pode, a qualquer momento, alterar as definições de uma simulação bastando, para isso, clicar no menu ou no botão respectivo.

Figura 15. Tela de definições gerais

3.6.2.5. Entrada/Edição de Dados

Como a demanda de irrigação é a inovação do modelo, essa será explicada com mais detalhes. Para entrar/editar os dados basta clicar com o botão dois do mouse sobre qualquer um dos elementos existentes na área de trabalho. Ao clicar aparece uma tela com todos os dados necessários ao elemento escolhido.

A tela de dados para a demanda de irrigação consta de três partes:

- Características;
- Água (perda e contribuições);
- Volume Meta.

Para aceitar os valores apresentados basta clicar no botão Ok. Para sair sem aceitar as alterações basta clicar no botão Cancelar.

Cada parte da planilha entrar/editar da demanda de irrigação é descrita a seguir:

a) Características Gerais - (Figura 16)

Dados do Reservatório Cana-de-açúcar

Características | Água (perda e contribuições) | Volume Meta do Solo

Identificação

Nome da Demanda de Irrigação:

Características Gerais

- Cultura (escolha um tipo de cultura ou entre com os valores):

Tipo de Cultura:

Profundidade do Sistema Radicular (cm):

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
K _c	0.00	0.00	0.50	1.00	1.10	0.80	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

- Irrigação:

Área Irrigada (Km2):

Eficiência do Sistema de Irrigação (%):

- Solo:

CC (%):

PMP (%):

Água no Solo no Início do Primeiro Mês (%):

Densidade do solo (g/cm3):

Figura 16. Planilha de entrada/edição de dados quando se utiliza o solo como reservatório – Características gerais

- *Identificação*: corresponde ao nome que o usuário deseja para a demanda de irrigação;
- *Cultura*: corresponde as características da cultura implantada na região. Após a escolha da cultura as planilhas do *coeficiente de cultura* (K_c) e da *profundidade do sistema radicular* (Z_r) são preenchidas automaticamente. Caso o usuário opte por outros valores basta preencher a planilha manualmente.

- *Irrigação*: corresponde a área irrigada, ao sistema de irrigação e a eficiência.

A escolha do sistema implicará no preenchimento automático do valor da *eficiência do sistema de irrigação* (ϵ). As perdas serão consideradas no link ligado a esta demanda como um *coeficiente de perda* (Figura 7). Caso o usuário opte por outros valores basta preencher o campo manualmente.

- *Solo*: corresponde às características do solo da região. São solicitados: a CC; o PMP; a umidade inicial do solo; se esses dados estão em percentagem de peso ou em percentagem de volume. Caso os dados estejam em percentagem de peso, automaticamente aparecerá o item D_a . Neste estudo, o solo é composto por uma única camada e os valores de CC e PMP, quando especificado para vários perfis de solo podem ser tomados como os valores médios. O campo é preenchido manualmente.

Dados do Link 1T

Identificação

Nome do link: 1T

Nó inicial: Fil,Pin,PonN,Sau

Nó final: Cana-de-açúcar

Características do link

Capacidade mínima (m³/s): 0.00

Custo unitário: 0

Coeficiente de perda (fração): 0.27500

Capacidades máximas

Ano / Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1949	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1950	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1951	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1952	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1953	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1954	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1955	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1956	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1957	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1958	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1959	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
1960	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00

Ok Cancelar

Figura 17. Planilha do link com coeficiente de perda preenchido automaticamente de acordo com a eficiência do sistema

b) Água (Perdas e Contribuições) – (Figura 18)

Dados do Reservatório Cana-de-açúcar

Características | **Água (perda e contribuições)** | Volume Meta do Solo

Perda

- Cálculo do Ks: Logarítmico

- Evapotranspiração de Referência (mm/mês):

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ET _o	125.22	110.40	241.82	101.36	83.30	93.43	100.92	75.45	87.80	112.65	121.91	125.79

Contribuições

- Precipitação (mm/mês):

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PP	100.78	102.82	113.85	93.85	57.13	59.11	48.60	43.66	32.80	35.81	67.93	97.23

- Água Subterrânea (mm/mês):

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
AS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ok Cancelar

Figura 18. Planilha de entrada de dados quando se utiliza o solo como reservatório – Água (Perda e Contribuições)

- *Perdas:*

- *Cálculo do K_s*: o usuário pode selecionar o método de determinação do coeficiente (K_s) que relaciona a umidade do solo e que, conseqüentemente, está relacionado com a evapotranspiração (Equações 3 e 4).
- *Evapotranspiração de referência [mm/mês]*: corresponde as características climáticas da região. O cálculo preenchimento do campo é manual.

- *Contribuições:*

- *Precipitação [mm/mês]:* corresponde aos dados da precipitação média mensal da região. O preenchimento do campo é manual;
- *Água no Solo [mm/mês]:* corresponde a água no solo antes do primeiro dia de irrigação. Caso este dado não seja disponível o valor assumido é zero. O preenchimento do campo é manual.

c) **Volume Meta do Solo** – (Figura 19)

Dados do Reservatório Cana-de-açúcar

Características Água (perda e contribuições) **Volume Meta do Solo**

Prioridade do Volume Meta

Prioridade

10

Volume Meta do Solo (fração da capacidade de campo)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Ok Cancelar

Figura 19. Planilha de entrada de dados quando se utiliza o solo como reservatório – Volume Meta no Solo

- *Prioridade do Volume Meta*: como padrão assume-se 99, podendo ser modificado de acordo com as características admitidas;
- *Volume Meta (fração do volume total)*: corresponde a fração do volume total que será necessária no solo para produção máxima. Como padrão foi admitido o valor 1 (volume do solo na CC), podendo ser modificado manualmente pelo usuário.

O IrrigaLS permite ao usuário entrar/editar, de uma só vez, os dados de todos os elementos existentes na tela, para isso basta escolher os elementos cujos dados vão ser fornecidos/editados na tela mostrada na Figura 20. O IrrigaLS mostra somente os dados escolhidos pelo usuário, aumentando a eficiência deste processo.

Elementos / dados existentes

Demandas

- ☒ Demanda
- ☐ Prioridade da Demanda
- ☐ Retorno da Demanda
- ☐ Vazão afluente

Visualizar Dados

Links

- ☒ Características do link
- ☐ Capacidade máxima

Visualizar Dados

Passagens

- ☒ Vazão afluente

Visualizar Dados

Reservatórios

- ☒ Volumes característicos
- ☐ Tabela Área-Volume-Nível
- ☐ Prioridade do Volume Meta
- ☐ Volume Meta
- ☐ Vazão afluente
- ☐ Taxa de Evaporação

Visualizar Dados

Reservatórios do Solo

- ☒ Volumes característicos
- ☐ Tabela ET a-Volume
- ☐ Prioridade do Volume Meta
- ☐ Volume Meta
- ☐ Vazão afluente
- ☐ Taxa de Evapotranspiração

Visualizar Dados

Sair

Figura 20. Tela para escolha dos elementos cujos dados serão fornecidos/editados

3.6.2.6. Resultados

A parte de resultados do IrrigaLS apresenta as seguintes características:

- os resultados são acessados somente através do botão respectivo;
- os resultados são escolhidos através da tela mostrada na Figura 21. Somente os resultados escolhidos pelo usuário serão lidos do banco de dados;
- é possível visualizar volumes e vazões no mesmo gráfico, com cada uma das grandezas em um eixo respectivo (Figura 22);
- além de mostrar os resultados em planilha, os mesmos são mostrados em forma de gráfico. É possível editar diversas propriedades do gráfico e efetuar “zoom” em qualquer parte do gráfico;
- o resumo dos resultados são apresentados em planilha e em formato gráfico, conforme mostrado na Figura 23, porém para a demanda de irrigação (reservatório do solo) este recurso ainda não encontra-se disponível;
- todos os resultados podem ser mostrados individualmente ou como sistema (todos os elementos de um mesmo tipo são mostrados como se fossem um único);

Elementos / resultados existentes

Reservatórios

☐ Aipim
☐ Angelim
☐ P. Altas
☐ Pindobaçu
☐ Ponto Novo
☐ Rio das Pedras

☐ Volume inicial (Mm³)
☐ Volume final (Mm³)
☐ Volume meta (Mm³)
☐ Volume vertido (Mm³)
☐ Vazão natural (m³/s)
☐ Vazão afluente (m³/s)
☐ Vazão efluente (m³/s)
☐ Evaporação (Mm³)
☐ Transferência de (m³/s)

Resumo

Reservatórios do Solo (Demandas de Irrigação)

☐ Banana
☐ Cana-de-açúcar
☐ Feijão
☐ Laranja
☐ Limão
☐ Melancia
☐ Milho

☐ Volume inicial (Mm³)
☐ Volume final (Mm³)
☐ Volume meta (Mm³)
☐ Contribuições (Pe + ASUB)
☐ Irrigação Real Necessária
☐ Irrigação Total Necessária
☐ Evapotranspiração (Mm³)

Demandas

☐ B. Galg
☐ D. Sec
☐ D. Sec(2)
☐ D. Sec(3)
☐ D. Sec(4)
☐ FINAL
☐ Irrigação
☐ Irrigação(2)
☐ Irrigação(3)
☐ Irrigação(4)
☐ Irrigação(5)
☐ Irrigação(7)
☐ Jusante
☐ Jusante(2)

☐ Demanda necessária (m³/s)
☐ Déficit na demanda (m³/s)
☐ Vazão natural (m³/s)
☐ Vazão fornecida (m³/s)
☐ Vazão efluente (m³/s)
☐ Transferência de (m³/s)
☐ Transferência para (m³/s)

Resumo

Passagens

☐ Fil, Pin, PonN, Sau
☐ Jacobina
☐ Passagem
☐ Passagem(2)
☐ Passagem(3)

☐ Vazão natural (m³/s)
☐ Vazão afluente (m³/s)
☐ Vazão efluente (m³/s)
☐ Transferência de (m³/s)

Resumo

Links

☐ 1
☐ 10
☐ 11
☐ 12
☐ 13
☐ 14
☐ 15
☐ 16
☐ 17

☐ Vazão mínima (m³/s)
☐ Vazão máxima (m³/s)
☐ Vazão ótima (m³/s)
☐ Perda no link (m³/s)

Resumo

☐ Resultados do Sistema

Resultados **Sair**

Figura 21. Tela de escolha dos resultados

Figura 22. Tela de resultados mostrando volumes e vazões no mesmo gráfico

Figura 23. Resumo dos resultados em formato gráfico

3.6.2.6.1. Demanda de Irrigação: Comparação dos métodos de Cálculo

Além das planilhas e gráficos de resultados já apresentados, o IrrigaLS oferece duas opções de avaliação sobre a irrigação, que podem ser acessadas através do menu *Irrigação*, conforme visto na Figura 24.

As duas opções são:

- *Método do balanço hídrico e comparação dos resultados*: os resultados são acessados através da planilha mostrada na Figura 25. Verifica-se pela figura que é possível fazer a análise da demanda de irrigação desejada de acordo com a quantidade de água disponível na rede, optando: pelo intervalo de interesse da simulação; pela forma de determinação do *coeficiente de umidade*

do solo (K_s); e pela unidade de interesse [mm ou m^3/s]. No estágio atual a água é considerada suficiente para suprir as necessidades hídricas das culturas.

- *Método do balanço hídrico*: para o método do balanço hídrico a análise dos resultados é feita em base diária, em forma de gráfico (Figura 26) e/ou planilha (Figura 27). É possível analisar todas as variáveis envolvidas na rotina de cálculo, que segue os passos descritos no item 3.4.3..
- *Comparação dos resultados*: a comparação dos resultados obtidos pelo dois métodos (IrrigaLS e balanço hídrico do solo), é em base mensal devido ao próprio intervalo de simulação do IrrigaLS (Figura 28).
- *Comparação da queda de produção*: permite a análise das variáveis obtidas através da simulação no IrrigaLS e através de cálculos diretos pelo método do balanço hídrico (Figura 29). As variáveis envolvidas são: o *coeficiente de resposta* (K_y) (armazenadas em banco de dados e varia de acordo com a cultura); a *evapotranspiração relativa* (ET_a/ET_p); o *rendimento relativo* (Y_a/Y_p); e a *produção relativa* (P_a/P_p). A análise do rendimento e da produção de acordo com a lâmina irrigada, fornece ao usuário uma visão sobre o efeito da água na produção da cultura, permitindo a tomada de decisão quando esta quantidade de água não for suficiente para manter a produção em níveis desejados. Os métodos de cálculo para Y_a/Y_p e a produção relativa P_a/P_p seguem os item 3.4.4 e 3.4.5, respectivamente.

Ao comparar as variáveis obtidas pelos dois métodos de determinação da demanda de irrigação, o usuário passa a ter uma visão crítica, podendo avaliar melhor o critério adotado.

Figura 24. Menu irrigação com as opções de comparação entre os métodos: simulação do IrrigaLS e cálculos diretos (tradicional)

The image shows a dialog box titled 'Método de Irrigação Tradicional'. It contains several sections for user input:

- Água para Irrigação:** A dropdown menu for 'Quantidade de Água:' set to 'Suficiente'.
- Volumes Mensais Disponíveis (mm):** A checkbox for 'Repetir Valores' and a table of monthly values.
- Intervalo da Simulação:** Dropdowns for start month ('Jan'), start year ('1949'), end month ('Dez'), and end year ('1993').
- Cálculo do Ks:** A dropdown menu set to 'Logarítmico'.
- Reservatórios:** A dropdown menu for 'Escolha a Demanda de Irrigação:' set to 'Banana'.
- Unidades em:** A dropdown menu set to 'mm'.
- Buttons:** 'Simular / Ver Resultados' and 'Fechar'.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 25. Planilha de comparação das variáveis de irrigação obtidas através da simulação no IrrigaLS e através de cálculos diretos pelo método do balanço hídrico

Figura 26. Resultado em forma de gráfico comparando a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a lâmina atual de água no solo obtidos pelo método do balanço hídrico de cálculo da irrigação

Resultados do Método Tradicional

Gráficos (Valores Diários) | **Tabela (Valores Diários)** | Resumo Mensal/Comparação

Data	CC (%)	PMP (%)	CAA (%)	CTA (mm)	CAA (mm)	LAM (mm)	LIR (mm)	ETo (mm)
01/01/1949	26.400	18.500	26.400	94.800	94.800	42.230	---	3.908
02/01/1949	26.400	18.500	26.231	94.800	92.768	42.230	---	3.908
03/01/1949	26.400	18.500	26.061	94.800	90.737	42.230	---	3.908
04/01/1949	26.400	18.500	25.892	94.800	88.705	42.230	---	3.908
05/01/1949	26.400	18.500	25.723	94.800	86.674	42.230	---	3.908
06/01/1949	26.400	18.500	25.554	94.800	84.642	42.230	---	3.908
07/01/1949	26.400	18.500	25.384	94.800	82.611	42.230	---	3.908
08/01/1949	26.400	18.500	25.215	94.800	80.579	42.230	---	3.908
09/01/1949	26.400	18.500	25.046	94.800	78.547	42.230	---	3.908
10/01/1949	26.400	18.500	24.876	94.800	76.516	42.230	---	3.908
11/01/1949	26.400	18.500	24.707	94.800	74.484	42.230	---	3.908
12/01/1949	26.400	18.500	24.538	94.800	72.453	42.230	---	3.908
13/01/1949	26.400	18.500	24.368	94.800	70.421	42.230	---	3.908
14/01/1949	26.400	18.500	24.199	94.800	68.390	42.230	---	3.908
15/01/1949	26.400	18.500	24.030	94.800	66.358	42.230	---	3.908
16/01/1949	26.400	18.500	23.861	94.800	64.326	42.230	---	3.908
17/01/1949	26.400	18.500	23.691	94.800	62.295	42.230	---	3.908
18/01/1949	26.400	18.500	23.522	94.800	60.263	42.230	---	3.908
19/01/1949	26.400	18.500	23.353	94.800	58.232	42.230	---	3.908
20/01/1949	26.400	18.500	23.183	94.800	56.200	42.230	---	3.908
21/01/1949	26.400	18.500	23.014	94.800	54.169	42.230	---	3.908
22/01/1949	26.400	18.500	22.845	94.800	52.137	42.230	---	3.908
23/01/1949	26.400	18.500	22.675	94.800	50.105	42.230	---	3.908
24/01/1949	26.400	18.500	22.506	94.800	48.074	42.230	---	3.908
25/01/1949	26.400	18.500	22.337	94.800	46.042	42.230	---	3.908

Fechar

Figura 27. Resultados em forma de planilha comparando a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a lâmina atual de água no solo obtidos pelo método do balanço hídrico de cálculo da irrigação

Resultados do Método Tradicional

Gráficos (Valores Diários) Tabela (Valores Diários) **Resumo Mensal/Comparação**

Unidades em: mm

Mês/Ano	Nº Irrigações	IRN	ITN	ETa	IRN	ITN	ETa
Jan/1949	1	50.789	57.715	96.912	62.737	71.424	96.937
Fev/1949	1	51.617	58.655	86.368	52.743	59.717	86.306
Mar/1949	1	51.969	59.056	94.664	56.946	64.668	94.595
Abr/1949	1	56.033	63.673	79.344	48.571	55.109	79.279
Mai/1949	1	59.324	67.414	74.056	54.533	61.772	74.054
Jun/1949	0	0.000	0.000	57.600	38.297	43.434	57.658
Jul/1949	1	66.933	76.060	53.392	37.160	41.986	53.333
Ago/1949	0	0.000	0.000	60.288	45.364	51.638	60.360
Set/1949	1	61.039	69.362	68.928	56.978	64.917	69.009
Out/1949	2	110.850	125.966	88.624	75.285	85.419	88.649
Nov/1949	1	50.937	57.883	97.272	73.790	83.598	97.297
Dez/1949	2	100.230	113.897	103.152	69.977	79.146	103.063
Jan/1950	1	52.121	59.228	96.912	62.737	71.424	96.937
Fev/1950	1	52.510	59.671	86.368	52.743	59.717	86.306
Mar/1950	1	52.180	59.296	94.664	56.946	64.668	94.595
Abr/1950	1	55.743	63.344	79.344	48.571	55.109	79.279
Mai/1950	1	58.369	66.328	74.056	54.533	61.772	74.054
Jun/1950	0	0.000	0.000	57.600	38.297	43.434	57.658
Jul/1950	1	67.287	76.462	53.392	37.160	41.986	53.333
Ago/1950	1	64.147	72.894	60.288	45.364	51.638	60.360

☐ Resultados do Método Tradicional
☐ Resultados do Método ModSim

Figura 28. Comparação entre os resultados obtidos pelo métodos ModSim e do balanço hídrico

Figura 29. Análise do rendimento relativo e da produção relativa obtidos através da simulação no ModSim e através de cálculos diretos pelo método do balanço hídrico

3.6.2.7. Análise/Comparação de projetos

O modelo IrrigaLS permite ao usuário visualizar os dados e comparar os resultados de quaisquer projetos previamente calculados.

3.6.2.8. Ferramentas especiais

O IrrigaLS apresenta duas ferramentas especiais para auxiliar o usuário na manipulação da rede representativa do sistema em estudo. Estas ferramentas são:

- *Dimensionar*: permite, através da tela mostrada na Figura 30, alterar o tamanho dos elementos. Isto é útil quando o desenho fica muito carregado devido ao grande número de elementos;
- *Localizar*: mostra a posição de qualquer um dos elementos existentes na rede através da tela mostrada na Figura 31. Um exemplo de elemento localizado está na Figura 32.

Figura 30. Tela para dimensionar os elementos

Figura 31. Tela para localizar elementos

Figura 32. Exemplo de elemento localizado

3.6.3. Adaptações

Para considerar o solo como um reservatório no processo de simulação do IrrigaLS, foram necessárias algumas adaptações no reservatório superficial do modelo. As relações existentes entre o reservatório superficial e o reservatório do solo encontram-se descritas no item 3. 6. e na Figura 11. As adaptações de cálculo são descritas a seguir.

3.6.3.1. Volume de Água no Solo

O volume de água considerado disponível para a planta no perfil do solo e na Z_r corresponde a Equação 37.

3.6.3.2. Volume meta

O volume meta no reservatório superficial do ModSimLS corresponde a fração do volume total que deve permanecer no reservatório durante o período de simulação.

No reservatório do solo, com a finalidade de suprir as necessidades hídricas da cultura e manter a produção a níveis satisfatórios obedecendo a relação clima-solo-água-cultura. Assumiu-se como padrão para o volume meta o próprio volume na CC, ou seja, a fração do volume na CC = 1 (Figura 19). Caso a água disponível para cultura não seja suficiente para suprir as necessidades hídricas da planta, o usuário poderá optar por um outro valor de fração do volume total. Vale lembrar que a umidade do solo nunca deve igualar ao PMP afim de que a planta não morra.

Para optar pela prioridade do volume meta será necessário que o usuário tenha conhecimento das prioridades de uso da água na região.

3.6.3.3. Evapotranspiração Real

Cada cultura tem uma necessidade hídrica; cada solo tem uma capacidade de armazenamento; e a perda de água para a atmosfera esta condicionada ao clima da região. Como no nosso estudo o solo é um reservatório de água, que serve de suporte para as plantas, que por sua vez dependem das características climáticas da região, viu-se a necessidade de achar um coeficiente que relacionasse essas quatro variáveis (clima-solo-água-cultura). O coeficiente escolhido foi o K_s , que relaciona a umidade do solo (Equação 4) e, conseqüentemente, as ET_a e ET_p (Equação 3).

No ModSimLS a perda de água por evaporação é avaliada considerando o volume atual de água no reservatório superficial. Com base no volume o modelo interpola a área, multiplica pela taxa evaporada e determina a evaporação atual. Os dados de entrada necessários são os da tabela cota-área-volume do reservatório superficial e a da taxa evaporada.

No reservatório do solo além da perda por evaporação deve-se considerar também a perda por transpiração, ou seja, a ET_a . Partindo deste princípio, por analogia com o ModSimLS, no IrrigaLS os dados de entrada necessários ao cálculo da evapotranspiração são os dados da tabela cota-área-volume do reservatório do solo e a ET_p . O procedimento de cálculo é o mesmo do ModSimLS, ou seja, o modelo com base no volume de água do solo, interpola a área, multiplica por ET_p e determina a ET_a .

A adaptação da tabela cota-área-volume no IrrigaLS parte das definições da capacidade de armazenamento de água no solo e do K_s . A tabela não aparece ao usuário, a montagem da mesma é feita internamente, já que as variáveis envolvidas dependem das condições de umidade do solo, do clima e da cultura, dados estes fornecidos pelo usuário antes da simulação pelo modelo. A Tabela 1 mostra as adaptações feitas, as colunas em cinza correspondem a tabela cota-área-volume do reservatório do solo.

Verifica-se pela Tabela 1 que partindo-se da umidade do solo, é possível determinar o volume de água no solo e o equivalente a área do reservatório superficial. Para um melhor entendimento segue a explicação de cada coluna da tabela:

Tabela 1. Demonstração da montagem da Tabela Cota-Area-volume no IrrigaLS

Cota	Umidade do Solo [%]	CAA [mm]	Volume [Mm³]	K _s [adimensional]	Área [km²]
1	PMP	0	CAA . A _i . 10 ⁻³	0	K _s . A _i
2	interpolação	Interpolação		interpolação	
3					
4					
5	CC	CTA		1	

- Coluna *Cota*: o IrrigaLS considera cinco pontos de variação do volume para proceder à determinação da evapotranspiração. Como o valor da cota não entra nos cálculos foram arbitrados 5 pontos (1, 2, ..., 5) apenas como seqüência de preenchimento;
- Coluna *Umidade do Solo* [%]: corresponde a variação da umidade no solo, que tem como limites mínimo e máximo o PMP e a CC, respectivamente. PMP e CC são dados de entrada;
- Coluna *Capacidade Atual de Água no Solo – CAA* [mm]: corresponde a lâmina atual de água no solo. Quando o solo está no PMP (CAA = 0), e quando está na CC (CAA = CTA).
- Coluna *Volume* [Mm³]: corresponde ao volume atual de água no solo, que é a CAA multiplicada pela área irrigada, ou seja, Volume = CAA . A_i . 10⁻³. O valor de A_i é dado de entrada.
- Coluna *K_s* [fração]: K_s é o coeficiente de umidade do solo que também relaciona a evapotranspiração atual e potencial (ET_a/ET_p). Quando o solo está

na CC ($CAA = CTA$ e $K_s = 1$), quando está no PMP ($CAA = 0$ e $K_s = 0$). O usuário pode optar pela forma de determinação do K_s .

- Coluna *Área* [Km^2]: corresponde a multiplicação do coeficiente de umidade do solo pela área irrigada, ou seja, $\text{Área} = K_s \cdot A_i$.

Depois de feita a interpolação na tabela cota-área-volume, o valor resultante será multiplicado pela ET_p , Equação 1, ou seja;

$$K_s \cdot A_i \cdot ET_p = \frac{ET_a}{ET_p} \cdot A_i \cdot ET_p = ET_a \cdot A_i = \text{volume de água evapotranspirado} \quad (39)$$

3.6.3.4. Precipitação efetiva

A PP no IrrigaLS é admitida como vazão de contribuição (vazão natural ou afluente), sendo dado de entrada e a PP_e é determinada pelo método do SCS dos USA.

3.6.3.5. Água no Solo

Corresponde a *água no solo* (A_s) que antecede a primeira irrigação feita dentro do calendário de irrigação pré-estabelecido. Este valor no IrrigaLS também é considerado como vazão de contribuição (vazão natural ou afluente) e é um dado de entrada.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. REGIÃO DE ESTUDO

A região de estudo, a da Bacia do Itapicuru, localiza-se no semi-árido brasileiro, mais especificamente no Estado da Bahia, conforme pode ser verificado na Figura 33. O ambiente semi-árido do Nordeste brasileiro é diversificado nos seus recursos naturais, e complexo na convivência do homem com o seu clima seco e quente. Se por um lado, o regime hídrico irregular se constitui num sério fator limitante para a produção agropecuária, por outro existem áreas com boa disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas, bem como recursos de solo apropriados para desenvolver agricultura irrigada, em condições competitivas com outros semi-áridos do mundo.

A bacia possui área de drenagem de 36.440 km² e é formada principalmente pelos rios Itapicuru, Itapicuru-Açu, Itapicuru-Mirim, Rio Peixe, Cariaça e Quinjingue (Figura 34).

Os principais usos da água são para:

- Abastecimento;
- Irrigação; e
- Dessedentação de animais.

Figura 33. Localização da bacia do Rio Itapicuru

Quanto ao potencial das águas subterrâneas, o sistema aquífero de maior potencialidade de exploração na bacia é a da bacia sedimentar de Tucano, onde os poços tubulares aí localizados apresentam as maiores vazões.

Na bacia, ocorrem conflitos em trechos onde a qualidade das águas é alterada devido a lançamentos de resíduos provenientes da atividade de mineração, esgotamento sanitário ou resíduos sólidos.

A relação dos municípios e população que fazem parte da bacia estão apresentadas na Tabela 10 no ANEXO.

mm a 718,1 mm, com o período chuvoso de fevereiro a abril e o período seco de agosto a outubro

- Alto Itapicuru: compreende a parte superior da bacia até a cidade de Queimadas. A precipitação anual varia de 477,6 mm a 1.129,3 mm com o período chuvoso de maio a junho e o período seco de setembro a novembro.

Toda a região apresenta diferença hídrica durante praticamente todos os meses do ano.

4.1.2. Solo

Devido à grande extensão geográfica e à grande variedade de condições geomorfológicas, a bacia do rio Itapicuru apresenta uma grande diversificação de tipos de solos. Foram identificados:

- Solódicos;
- Solos litólicos,;
- Latossolos Vermelho-Amarelo;
- Areias;
- Quartzosas;
- Podzólicos Vermelho-Amarelos eutróficos;
- Regossolos;
- Vertissolos;
- Brunos não Cálcicos;
- Solonetz Solodizados.

A predominância é da classe dos Planossolos Sódicos, que ocupam mais de 50% da bacia. Os Latossolos Vermelho-Amarelos aparecem em segundo lugar, seguido

das Areias Quartzosas, Podzólicos Vermelho-Amarelos, Vertissolos, Regossolos e Solos Litólicos.

A Tabela 12 no ANEXO apresenta as características de alguns solos do nordeste.

4.2. TOPOLOGIA DO SISTEMA DA BACIA DO ITAPICURU

Na análise da validade das adaptações e da eficiência do IrrigaLS foram comparadas duas redes que diferem somente pela inclusão, em uma delas, do reservatório solo (reservatório superficial adaptado). No estudo considerou-se as adaptações no reservatório superficial de Ponto Novo, mais especificamente à região dos municípios de Filadélfia, Pindobaçu, Ponto Novo e Saúde. A descrição dos municípios encontra-se na Tabela 10 no ANEXO.

Na rede da Figura 35 não foram consideradas as adaptações do modelo, e a demanda de irrigação total foi calculada no SSD. Na da Figura 36, consideraram-se as adaptações do modelo e as demandas foram calculadas e analisadas individualmente.

Figura 35. Topologia usada na simulação do sistema da Bacia do Itapicuru, não considerando-se o solo como um reservatório

Figura 36. Topologia usada na simulação do sistema da Bacia do Itapicuru, considerando-se o solo como um reservatório

4.2.1. Dados de Entrada

4.2.1.1. Climáticos

Foram considerados os dados de ET_o das estações de medição consideradas de influência para bacia do Rio Itapicuru. A Tabela 11 no ANEXO apresenta as estações de medição.

Os valores médios de ET_o e de PP , para a área irrigada, foram obtidos por interpolação através das Equações 40 e 41, respectivamente.

$$ET_o = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{oi} \cdot d_i^{-2})}{\sum_{i=1}^n d_i^{-2}} \quad (40)$$

em que:

- ET_o = evapotranspiração de referência [mm/mês];
- ET_{oi} = evapotranspiração de referência na estação i [mm/mês];
- d_i = distancia da estação i ao ponto desejado; [km²].

$$PP = \frac{\sum_{i=1}^n (PP_i \cdot d_i^{-2})}{\sum_{i=1}^n d_i^{-2}} \quad (41)$$

em que:

- PP = precipitação [mm/mês];
- PP_i = precipitação na estação i [mm/mês];

- d_i = distancia da estação i ao ponto desejado; $[\text{km}^2]$.

4.2.1.2. Solo

O solo da região dos municípios de Filadélfia, Pindobaçu, Ponto Novo e Saúde apresenta horizonte B Latossólico. As propriedades do mesmo foram extrapoladas de estudos realizados, por diversos pesquisadores, no Nordeste (Tabela 12 no ANEXO).

Considerou-se no estudo o solo como constituído por apenas uma camada. A Tabela 2 apresenta os valores médios da CC, do PMP e a D_a , para o solo da região de estudo.

Tabela 2. Valores característicos do solo da região de estudo

Classe de Solo	CC [% peso]	PMP [% peso]	D_a [adimensional]
Horizonte B Latossólico	26.43	18.46	1.2

Fonte: Cavalcanti (1979)

4.2.1.3. Sistema de Irrigação

Os valores da ε foram armazenados em banco de dados e podem ser conferidos na Tabela 7 no ANEXO

4.2.1.4. Culturas

Considerou-se apenas algumas culturas representativas da região. A Tabela 3 apresenta a relação das culturas e suas respectivas áreas irrigadas.

Os valores da Z_r e do K_c foram armazenados em banco de dados e podem ser conferidos nas Tabelas 1 e 2 no ANEXO, respectivamente.

Tabela 3. Culturas consideradas no estudo e suas respectivas áreas

Cultura	Área Irrigada [ha]	
	Cenário Atual	Cenário Futuro
Banana	222	287
Cana-de-açúcar	9	105
Cítricas	8	23
Feijão	15	175
Melancia	4	47
Milho	4	47

Fonte: SRH do Estado da Bahia

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A eficiência do IrrigaLS e a validade das adaptações foram verificadas mediante comparação com dois outros métodos em diferentes etapas.

Os resultados comparados referem-se a diferentes culturas. As culturas em estudo diferenciam-se com relação ao *ciclo vegetativo* (permanentes e temporárias), ao K_c , à Z_r , à K_y e as A_i . Baseando-se nesta diversidade de parâmetros pôde-se chegar à algumas conclusões em relação ao IrrigaLS.

Os métodos e as etapas encontram-se descritos a seguir:

a) Métodos

- *Balanço hídrico*: as demandas de irrigação das culturas individuais foram calculadas a partir do balanço hídrico do solo (veja item 3.4);
- *ModSimLS*: o solo não foi considerado como um reservatório e as demandas de irrigação das culturas foram calculadas no SSD e admitidas na topologia do sistema como um único nó (veja item 3.5). A topologia do sistema encontra-se na Figura 35;
- *IrrigaLS*: o solo foi considerado como um reservatório e as demandas de irrigação das culturas foram calculadas pelo próprio modelo e admitidas na topologia do sistema como nós individuais (veja item 3.6). A topologia do sistema encontra-se na Figura 36.

b) Etapas

- *primeira*: verificou-se a viabilidade do IrrigaLS na determinação da demanda de irrigação e da evapotranspiração da cultura, mediante comparação dos resultados obtidos pelo modelo com os obtidos pelo método do balanço hídrico;
- *segunda*: verificou-se as vantagens do IrrigaLS sobre o ModSimLS mediante comparação das demandas de irrigação;
- *terceira*: analisou-se o efeito do déficit hídrico sobre rendimento e sobre a produção das culturas;
- *quarta*: verificou-se a influência das adaptações feitas no IrrigaLS e a viabilidade do modelo para simular sistemas. Nesta fase compararam-se os resultados obtidos pelo IrrigaLS com os obtidos pelo ModSimLS na simulação do sistema da bacia do Itapicuru.

5.1. RESUMO DOS PROJETOS

Considerou-se a bacia do Itapicuru em dois projetos, um foi analisado no ModSimLS e outro no IrrigaLS. A Tabela 4 apresenta o resumo dos projetos e as características dos sistemas encontram-se descritas a seguir.

Tabela 4. Resumo dos projetos considerados no estudo da eficiência do IrrigaLS e na validação das adaptações

Características	Bacia do Itapicuru	
	Projeto 1	Projeto 2
Nome do Projeto	ModSimLS	IrrigaLS
Total de Nós	35	40
Reservatórios	6	6
Demandas	25	23
Reservatórios do Solo	0	5
Nós de Passagens	4	5
Links	34	39
Tipo de Simulação	Simulação Contínua	Simulação Contínua
Opção de Cálculo	Calibração	Calibração
Mês inicial	Janeiro	Janeiro
Ano inicial	1949	1949
Série histórica (anos)	45	45

a) Volumes nos reservatórios superficiais

- Aipim: 2.3 Mm³
- Pindobaçu: 9.0 Mm³
- Ponto Novo: 40.0 Mm³

c) Política de operação (prioridade)

- Reservatórios do solo:
 - culturas permanentes: 8

- culturas temporárias: 10
- Reservatórios Superficiais: 90
- Demandas
 - irrigação: 10
 - jusante: 5
 - queimada: 1
 - final: 99
 - urbana: 1

5.2. AJUSTE DOS VALORES DAS TABELAS

Na rotina de cálculos do programa computacional do IrrigaLS utilizaram-se algumas tabelas (veja item 3). Com o intuito de facilitar e agilizar esse processo, representaram-se os valores tabelados em forma de gráficos a fim de verificar a existência de alguma relação entre eles. Observou-se que alguns desses conjuntos de valores apresentavam uma tendência, sendo portanto possível representá-los por funções. As funções obtidas dizem respeito à PP_e , ao *fator de correção da PP_e* (K_{pp}), à f , e a P_a/P_p . As curvas de ajuste e as funções que representam os valores de PP_e , K_{pp} , f e P_a/P_p , encontram-se nas Figuras 37, 38, 39 e 40 e nas Tabelas 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

Figura 37. Curvas de ajuste da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for de 75 mm/mês

Tabela 5. Equações da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for de 75 mm

ET_p [mm/mês]	PP_e [mm/mês]	R^2
25	$0,64 \cdot PP$	1,0000
50	$-0,0016 PP^2 + 0,7411 PP - 0,8$	0,9996
75	$-0,0009 PP^2 + 0,708 PP + 0,7857$	0,9993
100	$-0,0007 PP^2 + 0,7258 PP + 0,8531$	0,9997
125	$-0,0005 PP^2 + 0,7213 PP + 2,2615$	0,9992
150	$-0,0006 PP^2 + 0,785 PP + 1,5661$	0,9997
175	$-0,0007 PP^2 + 0,8295 PP + 1,9464$	0,9998
200	$-0,0007 PP^2 + 0,8738 PP + 1,5268$	0,9998
225	$-0,0007 PP^2 + 0,9258 PP + 1,7393$	0,9998
250	$-0,0009 PP^2 + 1,0142 PP + 0,4982$	0,9997

PP [mm/mês]

Figura 38. Curva de ajuste da correção da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for diferente de 75 mm

Tabela 6. Equação que representa o Fator de correção da precipitação efetiva (PP_e) quando a capacidade total de água no solo (CTA) for diferente de 75 mm

K_{PP} [adimensional]	R^2
$3 \cdot 10^{-7} \cdot CTA^3 - 0,0001 \cdot CTA^2 + 0,0128 \cdot CTA + 0,51$	0,9979

CTA [mm]

os grupos de culturas encontram-se na Tabela 20 do ANEXO

Figura 39. Curvas de ajuste da fração de esgotamento de água no solo (f) para diferentes grupos de cultura

Tabela 7. Equações que representam a fração de esgotamento de água no solo (f) para diferentes grupos de cultura

Grupo de Culturas ¹	f [adimensional]	R ²
Grupo 1	$0,0054 \cdot ET_p^2 - 0,1035 \cdot ET_p + 0,6838$	0,9964
Grupo 2	$-0,0006 \cdot ET_p^3 + 0,0175 \cdot ET_p^2 - 0,1883 \cdot ET_p + 0,9905$	0,9982
Grupo 3	$-0,0008 \cdot ET_p^3 + 0,0205 \cdot ET_p^2 - 0,2096x + 1,1522$	0,9960
Grupo 4	$0,0058 \cdot ET_p^2 - 0,1302 \cdot ET_p + 1,122$	0,9969

ET_p [mm/dia]

¹ encontram-se na Tabela 20 do ANEXO

Figura 40. Curvas de ajuste da produção relativa (P_a/P_p), em função do coeficiente K_y e da evapotranspiração relativa (ET_a/ET_p)

Tabela 8. Equações que representam a produção relativa (P_a/P_p), em função do coeficiente K_y e da evapotranspiração relativa (ET_a/ET_p)

ET_a/ET_p	P_a/P_p	R^2
0,60	$-0,67 \cdot K_y + 1,67$	0,9998
0,70	$-0,425 \cdot K_y + 1,423$	0,9996
0,80	$-0,25 \cdot K_y + 1,25$	1,0000
0,90	$-0,11 \cdot K_y + 1,108$	0,9918
1,00	1	1,0000

K_y [adimensional], encontram-se na Tabela 8 no ANEXO

Verifica-se pelas Figuras 37, 38, 39 e 40 e pelos valores de R^2 nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, que as funções representam bem os valores de PP_e , K_{pp} , f e P_a/P_p , sendo portanto possíveis de serem utilizadas na rotina de cálculos do modelo. Os valores intermediários foram obtidos por interpolação linear.

5.3. COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO

Os componentes do balanço hídrico, para cada cultura, encontram-se nas Figuras 41, 42, 43, 44, 45 e 46.

Figura 41. Variação dos componentes do balanço hídrico para a banana

Figura 42. Variação dos componentes do balanço hídrico para a cana-de-açúcar

Figura 43. Variação dos componentes do balanço hídrico para as cítricas

Figura 44. Variação dos componentes do balanço hídrico para o feijão

Figura 45. Variação dos componentes do balanço hídrico para a melancia

Figura 46. Variação dos componentes do balanço hídrico para o milho

Verifica-se nas Figuras 41, 42, 43, 44, 45 e 46, mediante observação da precipitação e da evapotranspiração, que apesar da ocorrência da chuva durante todo ano existe a necessidade de irrigação.

5.4. IRRIGALS E MÉTODO DO BALANÇO HÍDRICO

Conforme descrito no item 3.6.2.6.1, o IrrigaLS, como recurso alternativo, calcula o balanço hídrico diário do solo e apresenta as variáveis envolvidas no cálculo em forma de tabelas e gráficos. A análise do comportamento diário das variáveis fornece uma alternativa a mais ao usuário possibilitando, inclusive, a determinação do calendário de irrigação. Por exemplo, a Tabela 9 apresenta o balanço hídrico diário do solo para a cultura da banana. Verifica-se na tabela que, para o mês de Jan/1993, no dia 30/01/1993, foi necessário repor no solo uma lâmina de água de 52.025 mm (coluna LIR). Portanto no mês de janeiro daquele ano foi necessário realizar uma única irrigação. Os comportamentos das variáveis podem, também, ser verificados nas Figuras 47, 48, 49 e 50.

Tomando outro exemplo pode-se ainda verificar o comportamento das variáveis de acordo com a umidade do solo. Pela Figura 47 (b) observa-se que, para solos com umidade constante, a evapotranspiração potencial (ET_p) coincide com a evapotranspiração atual da cultura (ET_a). e na Figura 48 (b) que K_s permanece invariável.

Tabela 9. Variáveis envolvidas no cálculo do método do balanço hídrico, fornecidas pelo IrrigaLS

Data	CC (%)	PMP (%)	CAA (%)	CTA (mm)	CAA (mm)	LAM (mm)	LIR (mm)	ETo (mm)	ETp (mm)	ETa (mm)	Kc	Ks	Pe (mm)	ASub (mm)
01/01/1993	26.400	18.500	26.400	94.800	94.800	42.230	---	3.908	3.126	3.126	0.800	1.000	1.095	0.000
02/01/1993	26.400	18.500	26.231	94.800	92.768	42.230	---	3.908	3.126	3.112	0.800	0.995	1.095	0.000
03/01/1993	26.400	18.500	26.063	94.800	90.752	42.230	---	3.908	3.126	3.097	0.800	0.991	1.095	0.000
04/01/1993	26.400	18.500	25.896	94.800	88.750	42.230	---	3.908	3.126	3.081	0.800	0.986	1.095	0.000
05/01/1993	26.400	18.500	25.730	94.800	86.763	42.230	---	3.908	3.126	3.066	0.800	0.981	1.095	0.000
06/01/1993	26.400	18.500	25.566	94.800	84.791	42.230	---	3.908	3.126	3.051	0.800	0.976	1.095	0.000
07/01/1993	26.400	18.500	25.403	94.800	82.835	42.230	---	3.908	3.126	3.035	0.800	0.971	1.095	0.000
08/01/1993	26.400	18.500	25.241	94.800	80.895	42.230	---	3.908	3.126	3.019	0.800	0.966	1.095	0.000
09/01/1993	26.400	18.500	25.081	94.800	78.971	42.230	---	3.908	3.126	3.002	0.800	0.960	1.095	0.000
10/01/1993	26.400	18.500	24.922	94.800	77.063	42.230	---	3.908	3.126	2.986	0.800	0.955	1.095	0.000
11/01/1993	26.400	18.500	24.764	94.800	75.172	42.230	---	3.908	3.126	2.969	0.800	0.950	1.095	0.000
12/01/1993	26.400	18.500	24.608	94.800	73.297	42.230	---	3.908	3.126	2.952	0.800	0.944	1.095	0.000
13/01/1993	26.400	18.500	24.453	94.800	71.440	42.230	---	3.908	3.126	2.935	0.800	0.939	1.095	0.000
14/01/1993	26.400	18.500	24.300	94.800	69.600	42.230	---	3.908	3.126	2.917	0.800	0.933	1.095	0.000
15/01/1993	26.400	18.500	24.148	94.800	67.778	42.230	---	3.908	3.126	2.899	0.800	0.927	1.095	0.000
16/01/1993	26.400	18.500	23.998	94.800	65.973	42.230	---	3.908	3.126	2.881	0.800	0.922	1.095	0.000
17/01/1993	26.400	18.500	23.849	94.800	64.187	42.230	---	3.908	3.126	2.862	0.800	0.916	1.095	0.000
18/01/1993	26.400	18.500	23.702	94.800	62.419	42.230	---	3.908	3.126	2.844	0.800	0.910	1.095	0.000
19/01/1993	26.400	18.500	23.556	94.800	60.670	42.230	---	3.908	3.126	2.824	0.800	0.903	1.095	0.000
20/01/1993	26.400	18.500	23.412	94.800	58.940	42.230	---	3.908	3.126	2.805	0.800	0.897	1.095	0.000
21/01/1993	26.400	18.500	23.269	94.800	57.230	42.230	---	3.908	3.126	2.785	0.800	0.891	1.095	0.000
22/01/1993	26.400	18.500	23.128	94.800	55.540	42.230	---	3.908	3.126	2.765	0.800	0.884	1.095	0.000
23/01/1993	26.400	18.500	22.989	94.800	53.869	42.230	---	3.908	3.126	2.744	0.800	0.878	1.095	0.000
24/01/1993	26.400	18.500	22.852	94.800	52.220	42.230	---	3.908	3.126	2.723	0.800	0.871	1.095	0.000
25/01/1993	26.400	18.500	22.716	94.800	50.591	42.230	---	3.908	3.126	2.702	0.800	0.864	1.095	0.000
26/01/1993	26.400	18.500	22.582	94.800	48.983	42.230	---	3.908	3.126	2.680	0.800	0.857	1.095	0.000
27/01/1993	26.400	18.500	22.450	94.800	47.398	42.230	---	3.908	3.126	2.658	0.800	0.850	1.095	0.000
28/01/1993	26.400	18.500	22.319	94.800	45.834	42.230	---	3.908	3.126	2.636	0.800	0.843	1.095	0.000
29/01/1993	26.400	18.500	22.191	94.800	44.293	42.230	---	3.908	3.126	2.613	0.800	0.836	1.095	0.000
30/01/1993	26.400	18.500	26.400	94.800	94.800	42.230	52.025	3.908	3.126	3.126	0.800	1.000	1.095	0.000
31/01/1993	26.400	18.500	26.231	94.800	92.768	42.230	---	3.908	3.126	3.112	0.800	0.995	1.095	0.000

(a) umidade no solo variável

(b) umidade no solo constante

Figura 47. Gráfico da variação da evapotranspiração de referência (ET_0), da evapotranspiração potencial (ET_p) e da evapotranspiração atual da cultura (ET_a), fornecido pelo IrrigaLS, considerando a umidade do solo variável (a) e constante (b)

(a) umidade no solo variável

(b) umidade no solo constante

Figura 48. Gráfico da variação do coeficiente de cultura (K_c) e do fator de variação da umidade do solo (K_s), fornecido pelo IrrigaLS, considerando a umidade do solo variável (a) e constante (b)

Figura 49. Gráfico da variação da capacidade de campo (CC), do ponto de murcha permanente (PM) e da capacidade atual de água no solo (CAA), fornecido pelo IrrigaLS

Figura 50. Gráfico da variação da precipitação efetiva (PP_e) e da água no solo antes da primeira irrigação (AS), fornecido pelo IrrigaLS

Figura 51. Gráfico que relaciona a capacidade total de água no solo e a variação das lâminas irrigadas (atual, máxima e real), fornecido pelo IrrigaLS

O IrrigaLS apresenta, também, os valores mensais do *número de irrigação* (N_i), da IRN e da ITN), e da ET_a , calculados pelo próprio modelo e pelo método do balanço hídrico (Tabela 10). Aproveitou-se deste recurso para comparar os resultados obtidos pelos dois métodos e verificar se o IrrigaLS é apto para calcular demandas de irrigação.

Tabela 10. Valores mensais do número de irrigação (N_i), das irrigações real e total (IRN e ITN), e da evapotranspiração atual da cultura (ET_a), fornecidos pelo IrrigaLS

Mês/Ano	Nº Irrigações	IRN	ITN	ET_a	IRN	ITN	ET_a
Jan/1993	1	52.025	59.120	90.007	62.737	71.424	96.937
Fev/1993	0	0.000	0.000	79.674	52.743	59.717	86.306
Mar/1993	1	52.644	59.823	87.672	56.946	64.668	94.595
Abr/1993	1	57.141	64.932	73.233	48.571	55.109	79.279
Mai/1993	1	59.082	67.139	66.974	54.533	61.772	74.054
Jun/1993	0	0.000	0.000	51.062	38.297	43.434	57.658
Jul/1993	1	67.034	76.175	46.853	37.160	41.986	53.333
Ago/1993	0	0.000	0.000	53.608	45.364	51.638	60.360
Set/1993	1	60.569	68.828	63.435	56.978	64.917	69.009
Out/1993	2	106.588	121.123	81.904	75.285	85.419	88.649
Nov/1993	1	50.581	57.479	90.991	0.000	0.000	97.297
Dez/1993	1	50.186	57.029	95.485	0.000	0.000	0.000

colunas em amarelo corresponde ao método do balanço hídrico

colunas em azul corresponde ao IrrigaLS

5.4.1. Coeficiente de Umidade do Solo Constante e Volume Meta no Solo Igual ao Volume na Capacidade de Campo

A Tabela 11 apresenta as diferenças relativas e os valores de IRN, ITN e ET_a (média anual) obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico para K_s constante ($K_s=1$) e volume meta (V_{meta}) do solo igual ao volume na CC.

Tabela 11. Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a) obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico

Cultura	N _i ¹	Balanço Hídrico			IrrigaLS ³			Diferença relativa [%]		
		Lâminas [mm]								
		IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a
Banana	12	672,78	764,52	960,60	672,38	762,83	960,54	0,06	0,22	0,01
Cana-de-açúcar	11	245,94	336,91	361,15	246,14	328,32	360,00	-0,08	2,55	0,32
Cítricas (c/c) ²	10	561,44	638,00	840,53	578,02	617,76	830,00	-2,95	3,17	1,25
Feijão	9	128,59	176,16	252,29	141,47	191,00	253,33	-10,01	-8,43	-0,41
Melancia	9	217,04	297,32	328,12	210,82	287,60	320,00	2,87	3,27	2,48
Milho	9	214,24	293,49	321,57	221,60	290,30	330,00	-3,44	1,08	-2,62

¹ número total de irrigações

² com controle de ervas

³ $K_s = 1$ e volume meta do solo igual ao volume na CC

Verifica-se pela Tabela 11 que as diferenças relativas para ET_a apresentam-se inferiores a 2,62% para as culturas em estudo, mostrando que as adaptações na tabela cota-área-volume do reservatório do solo no IrrigaLS são válidas.

A Figura 52 apresenta as curvas coincidentes de ET_a média mensal para as culturas permanentes e temporárias, respectivamente.

(a) culturas permanentes

(b) culturas temporárias

Figura 52. Evapotranspiração atual média mensal (ET_a) para as culturas permanentes (a) e temporárias (b), para coeficiente de umidade do solo constante ($K_s = 1$) e volume meta no solo igual ao volume na capacidade de campo ($V_{meta} = 1$)

Verifica-se, também, pela Tabela 11 que as diferenças relativas apesar de aceitáveis (menor que 10%) não mantêm a mesma proporção entre IRN, ITN e ET_a e nem entre as culturas. Na tentativa de explicar tais diferenças analisou-se os resultados mediante a variação a A_i .

5.4.1.1. Variação da Área Irrigada

Os efeitos da variação de A_i sobre IRN, ITN e ET_a (média anual) podem ser verificados na Tabela 12. Verifica-se que no IrrigaLS IRN, ITN e ET_a variam com a área, permanecendo praticamente constantes para áreas acima de 40 ha. Apesar dos valores serem aceitáveis, exceto para $A_i = 1$ ha, observou-se que tal variação acontece pelo fato de internamente os cálculos do ModSimLS envolverem números inteiros. A velocidade de processamento é favorecida mas, em se tratando de pequenos volumes, há uma limitação na precisão do modelo.

Tabela 12. Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a), obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico, para diferentes áreas irrigadas (A_i)

Cultura	A _i [ha]	Balanço Hídrico				IrrigaLS ³			Diferença relativa [%]		
		N _i ¹	Lâminas [mm]			IRN	ITN	ET _a			
			IRN	ITN	ET _a				IRN	ITN	ET _a
Banana	1	12	672,78	764,52	960,60	532,22	532,22	920,00	20,89	30,38	4,23
	5	12	672,78	764,52	960,60	693,27	693,27	968,00	-3,05	9,32	-0,77
	10	12	672,78	764,52	960,60	672,19	756,17	956,00	0,09	1,09	0,48
	20	12	672,78	764,52	960,60	683,42	751,68	958,00	-1,58	1,68	0,27
	40	12	672,78	764,52	960,60	677,98	756,95	960,00	-0,77	0,99	0,06
	80	12	672,78	764,52	960,60	674,05	758,20	961,00	-0,19	0,83	-0,04
	160	12	672,78	764,52	960,60	671,54	762,20	960,50	0,18	0,30	0,01
	320	12	672,78	764,52	960,60	673,77	764,09	960,38	-0,15	0,06	0,02
	640	12	672,78	764,52	960,60	673,11	764,93	960,69	-0,05	-0,05	-0,01
	1280	12	672,78	764,52	960,60	673,27	764,84	960,62	-0,07	-0,04	0,00
	2560	12	672,78	764,52	960,60	673,23	764,92	960,58	-0,07	-0,05	0,00
	5120	12	672,78	764,52	960,60	672,82	764,51	960,19	-0,01	0,00	0,04
Cana-de-açúcar	1	11	245,94	336,91	361,15	107,14	107,14	320,00	56,44	68,20	11,39
	5	11	245,94	336,91	361,15	253,67	316,57	352,00	-3,14	6,04	2,53
	10	11	245,94	336,91	361,15	242,61	327,28	360,00	1,35	2,86	0,32
	20	11	245,94	336,91	361,15	253,50	338,00	364,00	-3,07	-0,32	-0,79
	40	11	245,94	336,91	361,15	248,23	335,41	361,00	-0,93	0,45	0,04
	80	11	245,94	336,91	361,15	245,59	335,36	361,00	0,14	0,46	0,04
	160	11	245,94	336,91	361,15	246,24	336,03	361,00	-0,12	0,26	0,04
	320	11	245,94	336,91	361,15	246,57	337,01	361,13	-0,26	-0,03	0,01
	640	11	245,94	336,91	361,15	246,58	337,52	361,19	-0,26	-0,18	-0,01
	1280	11	245,94	336,91	361,15	246,42	337,27	361,13	-0,19	-0,11	0,01
	2560	11	245,94	336,91	361,15	246,46	337,48	361,13	-0,21	-0,17	0,01
	5120	11	245,94	336,91	361,15	246,44	337,54	361,16	-0,20	-0,19	0,00

continuação

Cultura	A _i [ha]	Balanço Hídrico				IrrigaLS ³			Diferença relativa [%]		
		N _i ¹	Lâminas [mm]			IRN	ITN	ET _a			
			IRN	ITN	ET _a				IRN	ITN	ET _a
Cítricas (c/c) ²	1	10	561,44	638,00	840,53	214,27	214,27	800,00	61,84	66,42	4,82
	5	10	561,44	638,00	840,53	631,76	631,76	824,00	-12,52	0,98	1,97
	10	10	561,44	638,00	840,53	556,76	620,35	840,00	0,83	2,77	0,06
	20	10	561,44	638,00	840,53	562,46	630,72	838,00	-0,18	1,14	0,30
	40	10	561,44	638,00	840,53	565,14	638,75	841,00	-0,66	-0,12	-0,06
	80	10	561,44	638,00	840,53	563,89	638,75	841,50	-0,44	-0,12	-0,12
	160	10	561,44	638,00	840,53	561,90	636,77	840,25	-0,08	0,19	0,03
	320	10	561,44	638,00	840,53	561,48	636,39	840,38	-0,01	0,25	0,02
	640	10	561,44	638,00	840,53	561,50	637,73	840,50	-0,01	0,04	0,00
	1280	10	561,44	638,00	840,53	561,75	638,05	840,47	-0,05	-0,01	0,01
	2560	10	561,44	638,00	840,53	561,54	638,05	840,53	-0,02	-0,01	0,00
	5120	10	561,44	638,00	840,53	561,49	637,98	840,40	-0,01	0,00	0,02
Feijão	1	9	128,59	176,16	252,29	0,00	0,00	240,00	100,00	100,00	4,8714
	5	9	128,59	176,16	252,29	140,61	190,008	256,00	-9,348	-8,29	-1,47
	10	9	128,59	176,16	252,29	127,53	191,10	244,00	0,824	-8,49	3,28
	20	9	128,59	176,16	252,29	139,97	201,70	254,00	-8,85	-14,50	-0,68
	40	9	128,59	176,16	252,29	142,25	193,70	252,00	-10,62	-9,96	0,12
	80	9	128,59	176,16	252,29	142,3	195,10	252,50	-10,66	-10,70	-0,08
	160	9	128,59	176,16	252,29	142,29	195,10	252,30	-10,65	-10,80	0,02
	320	9	128,59	176,16	252,29	142,28	195,00	252,30	-10,65	-10,70	0,02
	640	9	128,59	176,16	252,29	142,27	194,90	252,30	-10,64	-10,60	-0,01
	1280	9	128,59	176,16	252,29	142,26	194,80	252,30	-10,63	-10,60	0,00
	2560	9	128,59	176,16	252,29	142,25	194,70	252,30	-10,62	-10,50	0,00
	5120	9	128,59	176,16	252,29	142,24	194,60	252,30	-10,62	-10,50	0,00

continuação

Cultura	A _i [ha]	Balanço Hídrico				IrrigaLS ³			Diferença relativa [%]		
		N _i ¹	Lâminas [mm]								
			IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a
Melancia	1	9	217,04	297,32	328,12	103,68	103,68	320,00	52,23	65,13	2,48
	5	9	217,04	297,32	328,12	211,99	275,93	329,27	2,33	7,19	-0,35
	10	9	217,04	297,32	328,12	201,14	285,47	328,00	7,33	3,99	0,04
	20	9	217,04	297,32	328,12	216,69	290,65	328,00	0,16	2,24	0,04
	40	9	217,04	297,32	328,12	219,46	293,50	328,00	-1,11	1,28	0,04
	80	9	217,04	297,32	328,12	216,78	294,75	327,50	0,12	0,86	0,19
	160	9	217,04	297,32	328,12	218,07	297,39	328,25	-0,48	-0,02	-0,04
	320	9	217,04	297,32	328,12	217,76	297,74	328,25	-0,33	-0,14	-0,04
	640	9	217,04	297,32	328,12	217,77	298,07	328,06	-0,34	-0,25	0,02
	1280	9	217,04	297,32	328,12	217,60	297,99	328,10	-0,26	-0,22	0,01
	2560	9	217,04	297,32	328,12	217,77	298,19	328,13	-0,33	-0,29	0,00
	5120	9	217,04	297,32	328,12	217,73	298,23	328,12	-0,32	-0,31	0,00
Milho	1	9	214,24	293,49	321,57	107,14	107,14	320,00	49,99	63,50	0,49
	5	9	214,24	293,49	321,57	211,51	253,67	320,00	1,28	13,57	0,49
	10	9	214,24	293,49	321,57	201,14	285,81	324,00	6,12	2,61	-0,75
	20	9	214,24	293,49	321,57	222,22	296,35	322,00	-3,72	-0,98	-0,13
	40	9	214,24	293,49	321,57	214,27	288,40	320,00	-0,01	1,73	0,49
	80	9	214,24	293,49	321,57	215,61	290,99	322,00	-0,64	0,85	-0,13
	160	9	214,24	293,49	321,57	216,28	294,32	321,50	-0,95	-0,29	0,02
	320	9	214,24	293,49	321,57	215,28	293,65	321,63	-0,48	-0,06	-0,02
	640	9	214,24	293,49	321,57	214,95	293,99	321,56	-0,33	-0,17	0,00
	1280	9	214,24	293,49	321,57	214,78	293,99	321,59	-0,25	-0,17	-0,01
	2560	9	214,24	293,49	321,57	214,83	294,15	321,58	-0,27	-0,23	0,00
	5120	9	214,24	293,49	321,57	214,74	294,11	321,56	-0,23	-0,21	0,00

¹ número total de irrigações² com controle de ervas³ K_s = 1 e volume meta do solo igual ao volume na CC

5.4.2. Coeficiente de Umidade do Solo Logarítmico e Volume Meta do Solo Abaixo da Capacidade de Campo

A Tabela 13 apresenta as diferenças relativas e os valores de IRN, ITN e ET_a (média anual), para o método do balanço hídrico e para o IrrigaLS. Em ambos os métodos considerou-se a umidade do solo variando logaritmicamente.

Tabela 13. Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a) obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico

Cultura	N _i ¹	Balanço Hídrico			IrrigaLS ³			Diferença relativa [%]		
		Lâminas [mm]								
		IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a
Banana	11	590,99	671,58	879,03	672,38	762,83	960,54	-13.77	-13.6	-9.273
Cana-de-açúcar	9	173,08	237,10	288,29	246,14	328,32	360,00	-42.21	-38.5	-24.87
Cítricas (c/c) ²	8	446,33	507,20	725,50	578,02	617,76	830,00	-29.51	-21.8	-14.4
Feijão	9	106,77	146,26	230,46	141,47	191,00	253,33	-32.5	-30.6	-9.924
Melancia	8	177,38	242,99	288,46	210,82	287,60	320,00	-18.85	-18.4	-10.93
Milho	9	178,46	244,47	285,79	221,60	290,30	330,00	-24.17	-18.7	-15.47

¹ número total de irrigações

² com controle de ervas

³ K_s logarítmico e volume meta do solo igual ao volume na CC

Comparando-se as Tabelas 11 e 13 verifica-se que no método do balanço hídrico as lâminas para K_s logarítmico resultaram menores que para $K_s = 1$ e para IrrigaLS as lâminas são iguais. Tais resultados justificam-se pela diferença das metodologias de cálculo entre os dois métodos. No método do balanço hídrico, a menos que se opte por considerar a umidade no solo constante ($K_s = 1$), a cultura retira do solo uma lâmina igual a CRA, só depois de esgotada esta lâmina irriga-se até que o solo atinja novamente a CC. Neste processo a umidade no solo é variável. Já na simulação, o IrrigaLS procura manter o reservatório do solo sempre no volume meta seja para $K_s = 1$ ou para K_s logarítmico.

Verifica-se na Tabela 13 que as lâminas no método do balanço hídrico resultaram menores que no IrrigaLS. Como o método do balanço hídrico calcula a lâmina que realmente é utilizada pela planta, sem comprometer a produção, achou-se conveniente reduzir o V_{meta} dos reservatórios do solo no IrrigaLS e analisar este efeito sobre a economia de água. O V_{meta} no IrrigaLS foi encontrado através de tentativas, o melhor valor foi aquele que apresentou menor diferença relativa em comparação ao método do balanço hídrico.

A Tabela 14 mostra os valores de IRN, ITN e ET_a (média anual) e as diferenças relativas obtidas com a redução do volume meta e a Tabela 15 as economias conseguidas com esta redução.

Tabela 14. Lâminas obtidas pelo método do balanço hídrico e pelo IrrigaLS com redução do volume meta (V_{meta})

Cultura	Vmeta	N _i ¹	Balanço Hídrico			IrrigaLS ³			Diferença relativa [%]		
			Lâminas [mm]								
			IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a	IRN	ITN	ET _a
Banana	0.90	11	590.99	671.58	879.03	589.88	669.33	878.80	0.19	0.34	0.03
Cana-de-açúcar	0.82	9	173.08	237.10	288.29	160.65	221.79	310.10	7.18	6.46	-7.57
Cítricas (c/c) ²	0.81	8	446.33	507.20	725.50	440.29	456.35	680.80	1.35	10.03	6.16
Feijão	0.88	9	106.77	106.77	230.46	104.65	104.65	237.45	1.99	1.99	-3.03
Melancia	0.90	8	177.38	242.99	288.46	179.38	266.48	310.00	-1.13	-9.67	-7.47
Milho	0.86	9	178.46	244.47	285.79	195.89	236.34	309.59	-9.77	3.33	-8.33

¹ número total de irrigações

² com controle de ervas

³ K_s logarítmico e V_{meta} abaixo do volume na CC

Tabela 15. Economia conseguida, no IrrigaLS, na lâmina total irrigada (ITN) com a redução do volume meta (Vmeta)

Culturas	ITN [mm]		Economia [%]
	Vmeta =1	Vmeta < 1	
Banana	762,83	669.33	12.26
Cana-de-açúcar	328,32	221.79	32.45
Cítricas (c/c) ¹	617,76	456.35	26.13
Feijão	191,00	104.65	45.21
Melancia	287,60	266.48	7.34
Milho	290,30	236.34	18.59

¹ com controle de ervas

Pela Tabela 15 observa-se que a economia conseguida com a redução do volume meta justifica o uso de tal processo.

Finalmente, verifica-se pelas comparações dos resultados das Tabelas 11 e 14 a validade das adaptações sugeridas nesse estudo, comprovando que o IrrigaLS é apto para determinar a demanda de irrigação.

5.5. IRRIGALS E MODSIMLS

Nas comparações entre os modelos considerou-se para o ModSimLS as hipóteses de cálculos utilizadas até o momento, ou seja, demanda de irrigação total calculada pelo método do balanço hídrico no SSD. No IrrigaLS variaram-se os recursos oferecidos pelo modelo, ou seja, a PP_e e o Vmeta.

É importante citar previamente algumas vantagens do IrrigaLS sobre o ModSimLS. Além de calcular as demandas de irrigação total e suplementar sem a necessidade de cálculos externos por tratar o solo como um reservatório, no IrrigaLS, é possível estipular um volume máximo e mínimo de água armazenada no solo. A fixação de um volume mínimo, que corresponde ao PMP garante, que em períodos de seca, a

planta pelo menos não morra. É possível, também, determinar-se quantidades ótimas de água para a cultura (CRA) pela inclusão da f , e a inclusão do K_s permite determinar-se a necessidade hídrica real da cultura.

5.5.1. Com Irrigação Total

A Tabela 16 e a Figura 53 apresentam as demandas de irrigação médias mensais obtidas pelas simulações do IrrigaLS e do ModSimLS. Em ambos os métodos considerou-se a $PP_e = 0$ e o solo na CC.

Tabela 16. Demandas de irrigação no IrrigaLS e no ModSimLS

Data	IrrigaLS ¹	ModSimLS ¹	Diferença relativa [%]
	Demanda de Irrigação [m³/s]		
Jan	0,094	0,100	-6,38
Fev	0,092	0,090	2,17
Mar	0,100	0,100	0,00
Abr	0,092	0,090	2,17
Mai	0,088	0,090	-2,27
Jun	0,064	0,060	6,25
Jul	0,057	0,060	-5,26
Ago	0,058	0,060	-3,45
Set	0,069	0,070	-1,45
Out	0,086	0,090	-4,65
Nov	0,098	0,100	-2,04
Dez	0,100	0,100	0,00
Média	0,083	0,084	-1,20

¹ $PP_e = 0$ e solo na CC

Figura 53. Demandas de irrigação obtidas por simulação no IrrigaLS e no ModSimLS, considerando-se a precipitação igual a zero ($PP_e = 0$) e solo na capacidade de campo(CC)

Verifica-se pela Figura 53 que as lâminas são praticamente coincidentes e pela Tabela 16 que a diferença relativa média é de $-1,20\%$. Tal diferença não é considerada significativa mostrando que os dois métodos de simulação, para a proposta de $PP_e = 0$ e V_{meta} do solo na CC, são equivalentes.

5.5.2. Com Irrigação Suplementar

O IrrigaLS oferece a possibilidade da inclusão da AS e o aporte da água da PP_e , sem necessidade de cálculos externos ao modelo. Analisou-se o efeito da inclusão da PP_e mediante a comparação com o ModSimLS. A Tabela 17 e a Figura 54 apresentam as economias obtidas pela inclusão da PP_e .

Verifica-se na Tabela 17 que a economia média ao considerar-se a água de precipitação é de 31% . Esse é um bom resultado, e para regiões com maior pluviosidade do que a região de estudo a economia tende a aumentar. Na Figura 54 verifica-se, também, a diferença entre as demandas de irrigação obtidas pelos dois métodos.

Tabela 17. Economia de água obtida pela inclusão da precipitação no IrrigaLS

Data	IrrigaLS ¹	ModSimLS ²	Economia [%]
	Demanda de irrigação [m³/s]		
Jan	0,061	0,100	39,00
Fev	0,056	0,090	37,78
Mar	0,060	0,100	40,00
Abr	0,057	0,090	36,67
Mai	0,066	0,090	26,67
Jun	0,041	0,060	31,67
Jul	0,038	0,060	36,67
Ago	0,044	0,060	26,67
Set	0,058	0,070	17,14
Out	0,073	0,090	18,89
Nov	0,074	0,100	26,00
Dez	0,068	0,100	32,00
Média	0,058	0,084	30,95

¹ PP_e ≠ 0 e solo na CC² PP_e = 0 e solo na CC **Figura 54. Demandas de irrigação obtidas por simulação no IrrigaLS (PP ≠ 0) e no ModSimLS (PP = 0), considerando-se o solo na capacidade de campo**

Vale lembrar que no ModSimLS a PP_e pode ser incluída como vazão natural, necessitando para tanto de cálculos externos ao modelo.

5.5.3. Economia Total de Água

A Tabela 18 apresenta os valores anuais médios da demanda de irrigação e os resultados da economia de água conseguida pelo IrrigaLS em comparação com o ModSimLS. A tabela apresenta, também, as demandas obtidas pelo método do balanço hídrico.

Tabela 18. Econômica de água obtida pelo IrrigaLS em comparação com o ModSimLS

Demandas de irrigação [m ³ /s]								
ModSimLS	PP _e = 0 e K _s = 1		PP _e = 0 e K _s logarítmico		PP _e ≠ 0 e K _s = 1		PP _e ≠ 0 e K _s logarítmico	
PP _e = 0 Vmeta = 1	IrrigaLS Vmeta = 1	Balanço hídrico	IrrigaLS Vmeta ≠ 1	Balanço hídrico	IrrigaLS Vmeta = 1	Balanço hídrico	IrrigaLS Vmeta ≠ 1	Balanço hídrico
0,083	0,083	0,083	0,075	0,076	0,058	0,058	0,050	0,051
Economia de água conseguida com o IrrigaLS em comparação com o ModSimLS [%]								
IrrigaLS (PP _e = 0 e K _s = 1: V _{meta} = 1) e ModSimLS (PP _e = 0 e Vmeta = 1)							0,74	
IrrigaLS (PP _e = 0 e K _s logarítmico: V _{meta} ≠ 1) e ModSimLS (PP _e = 0 e Vmeta = 1)							9,71	
IrrigaLS (PP _e ≠ 0 e K _s = 1: V _{meta} = 1) e ModSimLS (PP _e = 0 e Vmeta = 1)							30,95	
IrrigaLS (PP _e ≠ 0 e K _s logarítmico: V _{meta} ≠ 1) e ModSimLS (PP _e = 0 e Vmeta = 1)							40,42	

Verifica-se pela Tabela 18 que as demandas de irrigação obtidas pelo IrrigaLS estão de acordo com as demandas obtidas pelo método do balanço hídrico. Verifica-se também, que com a inclusão da PP_e e a variação do Vmeta obteve-se no IrrigaLS em relação ao ModSimLS, uma economia na quantidade de água, chegando essa economia à 40,42%.

5.6. SUPRIMENTO DE ÁGUA E RENDIMENTO DAS CULTURAS

O IrrigaLS oferece, também, como opção alternativa a análise do efeito do déficit hídrico sobre as diferentes culturas.

A Figura 55 apresenta a relação entre a *diminuição de rendimento relativo* ($1 - Y_a/Y_p$) e o *déficit de evapotranspiração relativa* ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho. A Figura 56 apresenta a faixa de valores obtida pela simulação no IrrigaLS. Nas análises utilizaram-se coeficientes de resposta da cultura (K_y) referente ao período total de crescimento das culturas.

Verifica-se pelas Figuras 55 e 56 que para as cítricas a eficiência de utilização da água aumenta com a variação do déficit hídrico, isso deve-se ao fato de K_y para essa cultura ser menor que a unidade. Em outras palavras, o efeito do suprimento reduzido de água sobre o rendimento das cítricas é menos pronunciado do que em relação as outras culturas que têm valores de K_y maiores que a unidade durante o período de escassez de água. Quando se envolve o cultivo de várias culturas, o suprimento de irrigação para as cítricas pode ser reduzido em detrimento de outras culturas mais sensíveis. Também pode se dizer que sob condições de déficit hídrico limitado de água, a produção total das cítricas é incrementada através da ampliação da área irrigada, em vez de atender plenamente às necessidades hídricas da cultura numa área limitada.

Verifica-se, também, na Figura 56 o efeito da variação do volume no reservatório do solo. Como a variação foi pequena os valores no gráfico concentram-se na parte inicial, mostrando que não houve queda significativa no rendimento das culturas.

Figura 55. Relação entre a diminuição de rendimento relativo ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de evapotranspiração relativo ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho

Figura 56. Relação entre a diminuição de rendimento relativo ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de evapotranspiração relativo ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho, obtida no método adaptado

A explicação acima pode também ser observada nas Figuras 57 e 58, que representam, para as culturas em estudo, a relação entre a *diminuição da produção relativa* ($1 - P_a/P_p$) e ($1 - ET_a/ET_p$). A Figura 58 apresenta os resultados obtidos com a simulação no modelo.

Figura 57. Relação entre a diminuição da produção relativa ($1 - P_a/P_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho

Figura 58. Relação entre a diminuição da produção relativa ($1 - P_a/P_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas da banana, cana-de-açúcar, cítricas, feijão, melancia e milho, obtida no método adaptado

5.7. ANÁLISE DO SISTEMA DA BACIA DO ITAPICURU

Com a finalidade de verificar as vantagens do IrrigaLS, em relação ao ModSimLS, na simulação de sistemas complexos, analisou-se o sistema da bacia do Itapicuru. Verificou-se a situação dos reservatórios superficiais e das demandas,

mediante a comparação de dois projetos. O primeiro projeto diz respeito a simulação no IrrigaLS e o segundo a simulação no ModSimLS. Para o ModSimLS, como citado anteriormente, consideraram-se as hipóteses de cálculo utilizadas até o momento. Para o IrrigaLS considerou-se a demanda de irrigação suplementar e V_{meta} do solo igual ao volume na CC. As topologias das redes simuladas no ModSimLS e no IrrigaLS encontram-se nas Figuras 35 e 36, respectivamente.

A Tabela 19 apresenta a situação das demandas de irrigação, jusante e urbana no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS. As demandas de irrigação referentes ao reservatório de Ponto Novo foram analisadas separadamente.

Tabela 19. Cenário atual da situação das demandas de irrigação, jusante e urbana no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS

Projetos	Tempo máximo abaixo da demanda necessária [meses]	Frequência abaixo da demanda necessária [%]	Vazão média fornecida [m ³ /s]
Demanda de irrigação do reservatório de Ponto Novo			
IrrigaLS	0	0,00	0,058
ModSimLS	4	0,93	0,083
Demanda de irrigação no sistema			
IrrigaLS	8	4,81	0,861
ModSimLS	8	4,81	0,861
Demanda de jusante no sistema ¹			
IrrigaLS	2	0,37	26,24
ModSimLS	2	0,37	26,194
Demanda de urbana no sistema			
IrrigaLS	4	5,93	1,044
ModSimLS	4	5,93	1,044

¹ demanda que tem a função de forçar a passagem de água no link

Verifica-se na Tabela 19, pela comparação dos projetos, que houve alteração nos valores da demanda de irrigação do reservatório de Ponto Novo. No ModSimLS a

demanda fica abaixo do necessário durante quatro meses consecutivos, enquanto que no IrrigaLS isso não acontece. Em se tratando de irrigação e dependendo da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, quatro meses pode representar uma queda significativa no rendimento da cultura ou até mesmo a morte da planta. Verifica-se, também, pela tabela uma diferença entre os valores da vazão média fornecida, sendo o valor da mesma menor no IrrigaLS. Essa diferença para menos representa um aspecto positivo já que os critérios de cálculos já foram verificados anteriormente e mostraram-se corretos.

A Tabela 20 apresenta a situação dos reservatórios de Aipim, Pindobaçu e Ponto Novo no sistema da bacia do Itapicuru.

Tabela 20. Cenário atual da situação dos reservatórios de Aipim, Pindobaçu e Ponto Novo no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS

Projetos	Tempo máximo abaixo do Volume Meta [meses]	Frequência abaixo do Volume Meta [%]	Volume acumulado vertido [Mm³]	Frequência com que houve vertimento [%]	Tempo máximo de esvaziamento [meses]	Frequência de esvaziamento [%]
Reservatório de Aipim						
IrrigaLS	19	40	86,302	4,44	6	3,52
ModSimLS	19	40	86,302	4,44	6	3,52
Reservatório de Pindobaçu						
IrrigaLS	16	32,22	1.155,247	6,67	4	2,96
ModSimLS	16	32,22	1.155,055	6,67	4	2,96
Reservatório de Ponto Novo						
IrrigaLS	17	28,52	2.107,049	4,44	4	0,93
ModSimLS	17	29,07	2.104,758	4,44	4	0,93

Verifica-se pela Tabela 20 que a situação dos reservatórios Aipim e Pindobaçu não varia com os projetos, porém, no reservatório de Ponto Novo a frequência abaixo do volume meta é maior no ModSimLS. Como visto na Tabela 19 a única demanda que apresenta variação é a demanda de irrigação do reservatório de Ponto Novo, assim,

conclui-se que a mesma é a responsável por essa diferença. É importante verificar que o montante da demanda de irrigação de Ponto Novo é pequeno em relação as outras demandas, por isso os valores da frequência abaixo do volume meta apresentam-se próximos. Caso o valor da demanda de irrigação de Ponto Novo fosse igual ou maior ao das outras demandas a diferença seria mais significativa.

A partir dos dados de proposta de ampliação da área irrigada na região do reservatório de Ponto Novo (Tabela 3), fornecidos pela SRH, analisou-se o cenário futuro da região de estudo. As Tabelas 21 e 22 apresentam a situação futura das demandas e dos reservatórios.

Tabela 21. Cenário futuro da situação das demandas de irrigação, jusante e urbana no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS

Projetos	Tempo máximo abaixo da demanda necessária [meses]	Frequência abaixo da demanda necessária [%]	Vazão média fornecida [m³/s]
Demanda de irrigação do reservatório de Ponto Novo			
IrrigaLS	0	0,00	0,104
ModSimLS	4	0,93	0,156
Demanda de irrigação no sistema			
IrrigaLS	8	4,81	0,861
ModSimLS	8	4,81	0,861
Demanda de jusante no sistema ¹			
IrrigaLS	2	0,37	26,157
ModSimLS	2	0,37	26,067
Demanda de urbana no sistema			
IrrigaLS	4	5,93	1,044
ModSimLS	4	5,93	1,044

¹ demanda que tem a função de forçar a passagem de água no link

Tabela 22. Cenário futuro da situação dos reservatórios de Aipim, Pindobaçu e Ponto Novo no sistema da bacia do Itapicuru para o IrrigaLS e ModSimLS

Projetos	Tempo máximo abaixo do Volume Meta [meses]	Frequência abaixo do Volume Meta [%]	Volume acumulado vertido [Mm ³]	Frequência com que houve vertimento [%]	Tempo máximo de esvaziamento [meses]	Frequência de esvaziamento [%]
Reservatório de Aipim						
IrrigaLS	19	40	86,302	4,44	6	3,52
ModSimLS	19	40	86,302	4,44	6	3,52
Reservatório de Pindobaçu						
IrrigaLS	16	32,22	1.154,744	6,67	4	2,96
ModSimLS	16	32,22	1.154,168	6,67	4	2,96
Reservatório de Ponto Novo						
IrrigaLS	17	29,07	2.102,95	4,44	4	0,93
ModSimLS	17	29,44	2.098,191	4,44	4	0,93

Verifica-se pelas Tabelas 21 e 22 que apesar do aumento da vazão média fornecida, não houve variação no cenário, mostrando que o sistema mostra-se apto à ampliação.

5.7.1. Relação entre o Reservatório do Solo e o Reservatório Superficial

Verificou-se a relação existente entre o reservatório de Ponto Novo e os reservatórios do solo, analisando-se a variação dos volumes dos mesmos mediante as respectivas E_a e ET_a , médias mensais.

Os volumes dos reservatórios do solo para as culturas consideradas encontram-se na Tabela 23 e o volume do reservatório de Ponto Novo corresponde a 40 Mm³.

Tabela 23. Volume no reservatório do solo de acordo com a área irrigada (A_i) e a profundidade do sistema radicular (Z_r)

Cultura	Volume [m ³]
Banana	2.220.000
Cana-de-açúcar	67.500
Cítricas (c/c)	63.600
Feijão	120.000
Melancia	50.000
Milho	36.000
Volume total	2.557.100

A Tabela 24 apresenta os valores de ET_a e E_a para os reservatórios do solo e superficial, respectivamente, quando considerou-se a PP_e e a variação do V_{meta} .

Tabela 24. Relação entre a evapotranspiração real média mensal das culturas (ET_a) e a evaporação real média mensal (E_a) do reservatório de Ponto Novo

Projeto IrrigaLS	Reservatórios	
	Solo [m ³]	Ponto Novo [m ³]
	ET_a	E_a
$PP_e = 0$ e V_{meta} na CC	82.584,00	973.545,45
$PP_e = 0$ e V_{meta} abaixo da CC	75.609,82	973.918,56
$PP_e \neq 0$ e V_{meta} na CC	82.584,00	97.545,45
$PP_e \neq 0$ e V_{meta} abaixo da CC	75.490,36	974.924,24

Verifica-se pela Tabela 24 que quanto menos água o reservatório no solo necessitar mais água será armazenada no reservatório superficial, resultando em um aumento na E_a . Isso mostra que existe sinergia entre os reservatórios do solo e superficial. A importância da sinergia está no fato de que a água do reservatório superficial que vai para o reservatório do solo passa a ser armazenada por este. Sendo a

evaporação em uma superfície livre maior do que a evaporação do solo tem-se um aumento da água útil para irrigação.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se a adaptação do reservatório superficial do ModSimLS para trabalhar como reservatório do solo. O novo modelo, o IrrigaLS, visou possibilitar a determinação das demandas de irrigação total ou suplementar pelo próprio modelo, considerando a produção agrícola como o resultado da interação dos fatores água-clima-planta-solo.

Na rotina computacional do IrrigaLS fez-se necessário o uso de tabelas. Com a finalidade de simplificar e agilizar os cálculos plotou-se os dados tabelados e verificou-se que os valores podiam ser ajustados através de funções. As funções utilizadas dizem respeito a precipitação efetiva, ao fator de correção da precipitação efetiva, a fração de esgotamento de água no solo e a produção total relativa.

Verificou-se pela comparação do IrrigaLS com o método do balanço hídrico que o modelo é apto para determinar as demandas de irrigação e a evapotranspiração da cultura. Verificou-se, também, que pelo fato de internamente os cálculos do IrrigaLS envolverem números inteiros o modelo apresenta alguma limitação para pequenos volumes.

Pela comparação dos modelos de simulação, verificou-se que o IrrigaLS é apto para simular sistemas, apresentando algumas vantagens com relação ao ModSimLS. Dentre estas vantagens cita-se a possibilidade de determinação da demanda de irrigação total ou suplementar pelo próprio modelo sem necessidades de cálculos externos. Além disso, por tratar o solo como um reservatório fica possível estipular o volume máximo e mínimo de água admissível pela planta. A fixação de um volume mínimo garante que

em períodos de seca a planta pelo menos não morra. É possível, também, determinar quantidades ótimas de água para a cultura pela inclusão da fração de esgotamento de água no solo. Além disso, a inclusão do coeficiente de variação da umidade do solo permite determinar a necessidade hídrica real da cultura.

O IrrigaLS oferece como opção alternativa o cálculo do balanço hídrico diário do solo. Esta alternativa permite ao usuário informações sobre o calendário de irrigação e sobre o comportamento das variáveis de acordo com as características da região.

Outra alternativa corresponde a possibilidade de diferenciar as culturas com relação a sensibilidade ao déficit hídrico, facilitando a tomada de decisões em cultivo de várias culturas. Permitindo, por exemplo, que o usuário opte por reduzir o suprimento de irrigação em culturas mais resistentes ao déficit hídrico em detrimento de outras culturas mais sensíveis.

A economia conseguida pelo IrrigaLS pôde ser verificada na análise do sistema da bacia do Itapicuru. No ModSimLS a demanda ficou abaixo do necessário durante quatro meses consecutivos, enquanto que no IrrigaLS isto não aconteceu. Em se tratando de irrigação e dependendo da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, quatro meses pode representar uma queda significativa no rendimento da cultura ou até mesmo a morte da planta.

Verificou-se, também, a existência de sinergia entre os reservatórios do solo e superficial, resultando em uma minimização da perda por evaporação.

Embora o IrrigaLS seja adequado para determinar demandas de irrigação e simular sistemas complexos de recursos hídricos, sugere-se considerar na rotina de cálculos mais de uma camada de solo. Esta inclusão pode aumentar a precisão dos

resultados. Sugere-se, também, a elaboração de um modelo de simulação diária, a inclusão da análise da qualidade da água e o estudo do custo da irrigação.

7. ANEXO – TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1. Profundidade efetiva das raízes (Z_r) para diferentes tipos de culturas

Cultura	Z_r (cm)	Cultura	Z_r (cm)
Abacate	60 – 90	Espinafre	40 – 60
Abóbora	75 – 100	Ervilha	60 – 90
Alface	20 – 40	Feijão verde	25 – 50
Algodão	80 – 120	Feijão (grãos secos)	60 – 100
Amendoim	40 – 60	Forragem (gramíneas)	30 – 60
Arroz	30 – 40	Forragem leguminosa	60 – 80
Aspargo	100 – 150	Melancia	100 – 150
Banana	60 – 80	Melão	70 – 100
Batata	25 – 40	Milho	60 – 120
Beterraba açucareira	100 – 180	Morango	40 – 60
Beterraba leguminosa	60 – 80	Pepino	60 – 80
Cana de açúcar	50 – 100	Pimentão	40 – 50
Cebola	20 – 40	Soja	60 – 90
Cevada	80 – 100	Sorgo	90 – 120
Cenoura	45 – 75	Tabaco	60 – 100
Cereais	60 – 120	Tomate	60 – 120
Cítricos	90 – 150	Trigo	80 – 100
Couve	30 – 60	Vinha	90 - 120

Fonte: Gomes (1999)

Tabela 2. Coeficiente de cultura (K_c)

Culturas	Fases de desenvolvimento					Período vegetativo total
	Inicial	Desenvolvimento	Intermediário	Final	Colheita	
Alfafa	0.3-0.4				1.05	0.85-1.05
Algodão	0.4-0.5	0.7-0.8	1.05-1.25	0.8-0.9	0.65-0.7	0.8-0.9
Amendoim	0.4-0.5	0.7-0.8	0.95-1.1	0.75-0.85	0.55-0.6	0.75-0.8
Arroz	1.1-1.15	1.1-1.15	1.1-1.3	0.95-1.05	0.95-1.05	1.05-1.2
Banana						
- tropical	0.4-0.5	0.7-0.85	1.0-1.1	0.9-1.0	0.75-0.85	0.7-0.8
- subtropical	0.5-0.65	0.8-0.9	1.0-1.2	1.0-1.15	1.0-1.15	0.85-0.95
Batata	0.4-0.5	0.7-0.8	1.05-1.2	0.85-0.95	0.7-0.75	0.75-0.9
Beterraba açucareira	0.4-0.5	0.75-0.85	1.05-1.2	0.9-1.0	0.6-0.7	0.8-0.9
Cana-de-açúcar	0.4-0.5	0.7-1.0	1.0-1.3	0.75-0.8	0.5-0.6	0.85-1.05
Cártamo	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.65-0.7	0.2-0.25	0.65-0.7
Cebola						
- seca	0.4-0.6	0.7-0.8	0.95-1.1	0.85-0.9	0.75-0.85	0.8-0.9
- verde	0.4-0.6	0.6-0.75	0.95-1.05	0.95-1.05	0.95-1.05	0.65-0.8
Citros						
- com tratos culturais						0.65-0.75
- sem tratos culturais						0.85-0.9
Ervilha verde	0.4-0.5	0.7-0.85	1.05-1.2	1.0-1.15	0.95-1.1	0.8-0.95
Feijão						
- verde	0.3-0.4	0.65-0.75	0.95-1.05	0.9-0.95	0.85-0.95	0.85-0.9
- seco	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.65-0.75	0.25-0.3	0.7-0.8
Girassol	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.7-0.8	0.35-0.45	0.75-0.85
Melancia	0.4-0.5	0.7-0.8	0.95-1.05	0.8-0.9	0.65-0.75	0.75-0.85

continuação

lturas	Fases de desenvolvimento					Período vegetativo total
	Inicial	Desenvolvimento	Intermediário	Final	Colheita	
ilho						
- doce	0.3-0.5	0.7-0.9	1.05-1.2	1.0-1.15	0.95	0.8-0.95
- grão	0.3-0.5	0.7-0.85	1.05-1.2	0.8-0.95	0.55-0.6	0.75-0.9
iveira						0.4-0.6
então verde	0.3-0.4	0.6-0.75	0.95-1.1	0.85-1.0	0.8-0.9	0.7-0.8
epolho	0.4-0.5	0.7-0.8	0.95-1.1	0.9-1.0	0.8-0.95	0.7-0.8
ja	0.3-0.4	0.7-0.8	1.0-1.15	0.7-0.8	0.4-0.5	0.75-0.9
go	0.3-0.4	0.7-0.75	1.0-1.15	0.75-0.8	0.5-0.55	0.75-0.85
o	0.3-0.4	0.7-0.8	1.0-1.2	0.9-1.0	0.75-0.85	0.85-0.95
ate	0.4-0.5	0.7-0.8	1.05-1.25	0.8-0.95	0.6-0.65	0.75-0.9
go	0.3-0.4	0.7-0.8	1.05-1.2	0.65-0.75	0.2-0.25	0.8-0.9
	0.35-0.55	0.6-0.8	0.7-0.9	0.6-0.8	0.55-0.7	0.55-0.75

Fonte: Doorenbos e Kassam (1974)

Tabela 3. Precipitação efetiva mensal em mm, em função da precipitação e da evapotranspiração potencial da cultura, quando a capacidade total de água no solo for 75 mm, segundo o USDA-SCS.

ETa Média Mensal [mm]	Precipitação Média Mensal [mm]															
	12.5	25.0	37.5	50.0	62.5	75.0	87.5	100.0	112.5	125.0	137.5	150.0	162.5	175.0	187.5	200.0
25	8	16	24													
50	8	17	25	32	39	46										
75	9	18	27	34	41	48	56	62	69							
100	9	19	28	35	43	52	59	66	73	80	87	94	100			
125	10	20	30	37	46	54	62	70	76	85	92	98	107	116	120	
150	10	21	31	39	49	57	66	74	81	89	97	104	112	119	127	133
175	11	23	32	42	52	61	69	78	86	95	103	111	118	126	134	141
200	11	24	33	44	54	64	73	82	91	100	109	117	125	134	142	150
225	12	25	35	47	57	68	78	87	96	106	115	124	132	141	150	159
250	12	25	37	50	61	72	84	92	102	112	121	132	140	150	158	167

Fonte: Bernardo (1995)

Tabela 4. Fator de correção (K_{pp}) quando a capacidade total de água do solo for diferente de 75 mm, segundo o USDA-SCS.

CTA [mm]	Fator	CTA [mm]	Fator	CTA [mm]	Fator
10.00	0.620	31.25	0.818	70.00	0.990
12.50	0.650	32.50	0.826	75.00	1.000
15.00	0.676	35.00	0.842	80.00	1.004
17.50	0.703	37.50	0.860	85.00	1.008
18.75	0.720	40.00	0.876	90.00	1.012
20.00	0.728	45.00	0.905	95.00	1.016
22.50	0.749	50.00	0.930	100.00	1.020
25.00	0.770	55.00	0.947	125.00	1.040
27.50	0.790	60.00	0.963	150.00	1.060
30.00	0.808	65.00	0.977	175.00	1.070

Fonte: Bernardo (1995)

Tabela 5. Grupos de Culturas de acordo com o esgotamento de água do solo

Grupos de Culturas	Culturas
1	Cebola, Pimentão, e Batata
2	Banana, Repolho, Uva e Tomate
3	Alfafa, Feijão, Citros, Amendoim, Abacaxi, Girassol, Melancia e Trigo
4	Algodão, Milho, Oliveira, Cártamo, Sorgo, Soja, Beterraba Açucareira, cana-de-açúcar e Tabaco

Fonte: Doorenbos e Kassam (1974)

Tabela 6. Fração de esgotamento de água no solo (f) para grupos de culturas e evapotranspiração potencial (ET_p)

ET_p (mm/dia)	Grupo de Culturas			
	1	2	3	4
2	0.500	0.675	0.800	0.875
3	0.425	0.575	0.700	0.800
4	0.350	0.475	0.600	0.700
5	0.300	0.400	0.500	0.600
6	0.250	0.350	0.450	0.550
7	0.225	0.325	0.425	0.500
8	0.200	0.275	0.375	0.450
9	0.200	0.250	0.350	0.425
10	0.175	0.225	0.300	0.400

Fonte: Doorenbos e Kassam (1974)

Tabela 7. Eficiência média dos métodos de irrigação (ϵ) na aplicação da água

Método	Condicionante	Eficiência Média (%)
Sulcos de infiltração	Sulcos longos e/ou solos arenosos	45
Sulcos de infiltração	Solo e comprimento adequados	65
Inundação (tabuleiros)	Solo arenoso – lençol profundo	40
Inundação (tabuleiros)	Solo argiloso – lençol superficial	60
Aspersão convencional	Sob ação dos ventos	50
Aspersão convencional	Com ventos leves ou sem	75
Autopropelido/montagem direta	Sob ação dos ventos	50
Autopropelido/montagem direta	Com ventos leves ou sem	75
Pivô central	Vento/condições razoáveis	75
Pivô central	Em condições favoráveis	85
Microaspersão	Condições razoáveis	80
Microaspersão	Em condições favoráveis	90
Gotejamento	Condições razoáveis	85
Gotejamento	Em condições favoráveis	95
Tubos perfurados	Perfuração manual	65
Tubos perfurados	Em condições favoráveis	80

Fonte: Telles, 1999

Tabela 8. Fator de resposta da cultura (K_y)

Culturas	Período vegetativo			Período de floração	Formação da colheita	Maturação	Período total de crescimento
	Inicial (1a)	Final (1b)	Total				
Abacaxi							
Alfafa			0.70-1.10				0.70-1.10
Algodão			0.20	0.50		0.25	0.85
Amendoim			0.20	0.80	0.60	0.20	0.70
Arroz							
Banana							1.20-1.35
Batata	0.45	0.80			0.70	0.20	1.10
Beterraba - tubérculo - açucareira							0.60-1.00 0.70-1.10
Cana-de-açúcar			0.75		0.50	0.10	1.20
Cártamo		0.30		0.55	0.60		0.80
Cebola			0.50		0.80	0.30	1.10
Citros							0.80-1.10
Ervilha	0.20			0.90	0.70	0.20	1.15
Feijão			0.20	1.10	0.75	0.20	1.15
Girassol	0.25	0.50		1.00	0.80		0.95
Melancia	0.45	0.70		0.80	0.80	0.30	1.10
Milho			0.40	1.50	0.50	0.20	1.25
Oliveira							
Pimentão							1.10
Repolho	0.20				0.45	0.60	0.95
Soja			0.20	0.80	1.00		0.85
Sorgo			0.20	0.55	0.45	0.20	0.90
Tabaco	0.20	1.00			0.50	0.50	0.90
Tomate			0.40	1.10	0.80	0.40	1.05
Trigo - de inverno - de primavera			0.20 0.20	0.60 0.65	0.50 0.55		1.00 1.15
Uva							0.85

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979)

Tabela 9. Produção total relativa (P_a/P_p) para diferentes valores de (ET_a/ET_p) e fatores K_y , para o período total de crescimento

ky	ET _a /ET _p				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.6	1.27	1.17	1.10	1.04	1.00
0.8	1.13	1.08	1.05	1.02	1.00
1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.2	0.87	0.91	0.95	0.98	1.00
1.4	0.73	0.83	0.90	0.95	1.00

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979)

Tabela 10. Relação dos municípios e população da Bacia do Itapicuru

Municípios	População (estimada para 2000)	Área (Km ²)
Totalmente inseridos na bacia		
Andorinha	15,774	1,212.50
Antônio Gonçalves	9,716	317.40
Araci	47,584	1,576.30
Banzaê*	11,156	213.10
Caém	12,563	499.50
Caldeirão Grande*	11,395	497.90
Cansanção	31,947	1,324.90
Capim Grosso	23,908	351.50
Cipó	14,285	165.30
Crisópolis	19,037	464.90
Filadélfia	17,194	566.20
Itiúba	35,543	1,737.80
Monte Santo	54,552	3,298.40
Nordestina	11,800	472.80
Nova Soure	24,405	672.00
Olindina	23,909	540.40
Pindobaçu	20,869	529.90
Ponto Novo	17,187	467.10
Queimadas	24,613	2,105.90
Quijingue	26,376	1,276.20
Santaluz	30,955	1,603.60
Saúde	11,488	501.70
Senhor do Bonfim	67,723	820.00
Tucano	50,948	3,214.80
Subtotal 1	614,927	24,430.10

Continuação

Municípios	População (estimada para 2000)	Área (Km ²)
Parcialmente inseridas na Bacia		
Acajutiba	14,322	268.50
Aporá	16,769	600.90
Biritinga	14,641	594.70
Campo Formoso	61,942	6,833.60
Canudos	13,761	3,000.60
Cícero Dantas	30,934	726.60
Conceição do Coité	56,317	1,090.50
Conde	20,426	954.40
Esplanada	27,230	1,408.50
Euclides da Cunha	53,885	2,383.80
Heliópolis	13,108	313.20
Inhambupe	29,589	1,250.00
Itapicuru	27,315	1,552.50
Jacobina	76,492	2,328.90
Jaguarari	27,412	2,578.00
Jandaíra	10,027	646.80
Miguel Calmon	28,267	1,471.20
Mirangaba	14,261	1,960.30
Quixabeira	9,466	369.60
Retirolândia	10,891	204.50
Ribeira do Amparo	13,903	658.80
Ribeira do Pombal	46,270	816.00
Rio Real	33,260	736.90
São José do Jacuípe	9,233	370.70
Sátiro Dias	17,251	688.60
Serrolândia	12,616	375.20
Teofilândia	20,432	266.90
Uauá	25,993	2,962.80
Valente	19,145	372.50
Vázea do Poço	7,515	221.30
Subtotal 2	762,673	38,006.80
TOTAL GERAL	1,377,600	62,436.90

Fonte: IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)

Tabela 11. Identificação das estações de medição da evapotranspiração de referência da Bacia do Rio Itapicuru

Id posto	Nome	Latitude*	Longitude*	N. anos	Fonte
EPBH02	Caetité	14.05	42.62	30	INMET
EPBH03	Camaçari	12.67	38.32	30	INMET
EPBH04	Carinhanha	14.17	43.92	30	INMET
EPBH05	Cipó	11.08	38.52	30	INMET
EPBH06	Irecê	11.30	41.87	30	INMET
EPBH07	Itaberaba	12.55	40.43	30	INMET
EPBH08	Ituruçu	13.36	39.57	30	INMET
EPBH09	Jacobina	11.18	40.47	30	INMET
EPBH10	Lençóis	12.57	41.38	30	INMET
EPBH11	Monte Santo	10.43	39.30	30	INMET
EPBH12	Morro do Chapéu	11.22	41.22	30	INMET
EPBH13	Paulo Afonso	9.40	38.22	30	INMET
EPBH14	Remanso	9.63	42.10	30	INMET
EPBH15	Salvador	13.02	38.52	30	INMET
EPBH16	Senhor do Bonfim	10.47	40.18	30	INMET
EPBH17	Serrinha	11.63	38.97	30	INMET
EPCW01	Água Branca	12.42	38.93	15	CWEB
EPCW02	Anádia	9.63	36.33	14	CWEB
EPCW03	Aracaju-Sergipe	10.90	37.05	56	CWEB
EPCW04	Aracaju1	10.92	37.08	30	CWEB
EPCW05	Aracaju2	10.90	37.10	20	CWEB
EPCW06	Barra	11.08	43.17	30	CWEB
EPCW07	Barra-Bahia	11.08	43.15	57	CWEB
EPCW08	Caiteté-Bahia	14.07	42.48	57	CWEB
EPCW09	Caiteté1	14.10	42.60	44	CWEB
EPCW10	Caiteté2	14.07	42.48	30	CWEB
EPCW11	Catu	12.32	38.37	14	CWEB
EPCW12	Ilhéus	14.70	39.05	30	CWEB
EPCW13	Itabaianinha1	10.68	37.42	54	CWEB
EPCW14	Itabaianinha2	11.28	37.82	30	CWEB
EPCW15	Jacobina	11.18	40.52	30	CWEB
EPCW16	Jacobina-Bahia	11.17	40.52	56	CWEB
EPCW17	Monte Santo-Bahia	10.43	39.33	56	CWEB
EPCW18	Monte Santo	10.45	39.30	30	CWEB
EPCW19	Morro do Chapéu	11.55	41.23	27	CWEB
EPCW20	Ondina	13.00	38.52	30	CWEB
EPCW21	Palmeira dos Índios	9.42	36.67	14	CWEB
EPCW22	Pão de Açúcar	9.77	37.45	28	CWEB
EPCW23	Paratinga-Bahia	12.70	43.00	56	CWEB
EPCW24	Paratinga	12.68	43.18	30	CWEB
EPCW25	Petrolina	9.40	40.50	8	CWEB
EPCW26	Própria-Sergipe	10.22	36.83	55	CWEB

continuação

Id posto	Nome	Latitude*	Longitude*	N anos	Fonte
EPCW27	Própria	10.20	36.87	30	CWEB
EPCW28	Remanso	9.70	42.10	12	CWEB
EPCW29	Remanso-Bahia	9.68	42.07	56	CWEB
EPCW30	Salvador1	13.00	38.50	54	CWEB
EPCW31	Salvador2	12.95	38.50	30	CWEB
EPCW32	Salvador-Ondina	13.00	38.50	11	CWEB
EPCW33	São Benta dos Lage	12.58	38.75	27	CWEB
EPCW34	São FranciscoCond.	12.62	38.67	30	CWEB
EPCW35	São Gonsalo dos Ca.	12.42	39.93	16	CWEB

* graus decimais

Fonte: SRH do Estado da Bahia

Tabela 12. Perfis representativos de classes de solos, com dados sobre retenção de umidade e outras propriedades

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Silte %	Argila %	CTC meq/100g solo	Volume %	1/3 atm	15 atm	AD		Perfil
							% peso		% volume	mm/cm	
ossolo Distrófico textura argilosa fase sta	A1	0-8	19	34	6,6	27	17,9	10,2	10,9	1,09	P.2
	A3	8-16	27	36	5,3	15	18,6	12,2	9,0	0,90	
	B1	16-39	22	41	2,0	14	18,0	11,1	9,6	0,96	
	B21	39-72	27	36	2,1	10	18,1	13,3	9,5	0,95	
	B22	72-110	22	41	3,6	15	18,4	12,1	8,9	0,89	
ossolo Álico textura argilosa fase do	A	0-12	10	45	11,7	5	20,9	16,8	5,0	0,50	P.13
	B1	12-30	7	53	8,6	3	22,5	17,5	6,0	0,60	
	B21	30-65	6	55	7,9	3	22,3	17,0	6,6	0,66	
	B22	65-120	7	55	4,7	4	21,8	17,1	6,2	0,62	
ossolo Distrófico textura média fase sta	A1	0-24	3	21	10,9	11	11,1	8,0	4,3	0,43	P.6
	A3	24-47	5	24	9,2	3	11,9	8,5	4,7	0,47	
	B1	47-65	5	25	6,3	5	10,9	8,0	4,2	0,42	
	B21	65-90	4	26	4,1	7	10,6	8,0	3,9	0,39	
	B22	90-120	4	26	4,2	6	10,8	7,7	4,5	0,45	
ossolo Álico textura média fase cerrado	A1	0-22	5	21	7,0	7	10,3	7,1	4,6	0,46	P.19
	A3	22-55	6	22	3,9	7	11,2	7,0	5,8	0,58	
	B1	55-102	6	24	3,1	6	9,8	6,8	4,0	0,40	
ossolo Distrófico textura média fase inga hiperxerófila	A1	0-18	2	10	2,7	48		3,0			P.22
	B1	18-55	3	17	3,0	27	6,9	4,0	4,5	0,45	
	B21	55-100	4	23	2,9	42	8,2	5,3	4,6	0,45	
	B22	100-150	8	22	2,9	44	8,8	5,3	5,9	0,59	

continuação

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Silte %	Argila %	CTC meq/100g solo	Volume %	1/3 atm	15 atm	AD		Perfil
							% peso		% volume	mm/cm	
ossolo Eutrófico textura argilosa fase resta/caatinga	A1	0-10	28	52	21,9	84	31,3	20,2	9,7	0,97	P.2
	A3	10-34	22	64	13,7	78	26,1	19,3	6,7	0,97	
	B1	34-79	21	66	9,0	81	24,4	17,0	8,4	0,84	
	B21	79-166	21	67	8,2	77	24,1	17,4	8,3	0,83	
ossolo Eutrófico média argilosa fase inga hiperxerófila	A1	0-18	6	16	5,8	33					P.54
	B1	18-50	6	23	3,9	48	8,9	4,0	7,3	0,73	
	B21	50-90	11	23	3,3	63	9,8	4,6	8,0	0,80	
	B22	90-118	14	24	3,7	78	10,9	6,8	6,3	0,63	
dzólico textura média/argilosa fase sta	Ap	0-30	18	20	24,9	10	22,9	13,3	9,6	0,96	P.6
	A12	30-48	7	34	15,9	4	23,4	13,9	9,5	0,95	
	A3	48-112	5	33	12,0	5	25,1	13,4	11,7	1,17	
	B21tx	112-116	19	47	5,0	28	28,9	19,0	9,9	0,99	
rófico textura arenosa/média sta	A1	0-12	25	6	4,5	20	9,4	5,0	7,2	0,72	P.34
	A3	12-33	22	13	5,1	7	10,8	6,7	6,4	0,64	
	B1	33-58	26	15	3,9	12	12,2	7,9	6,3	0,63	
	B22	58-118	27	28	3,3	16					
dzólico Eutrófico To textura édia/argilosa fase floresta	A	0-30	31	27	10,5	98	20,0	12,0	10,4	1,04	P.4
	B21t	30-45	17	48	7,6	95	20,0	14,0	10,2	1,02	
	B22t	45-96	18	46	4,4	95	21,1	12,0	12,6	1,26	
	B23t	96-150	19	53	4,9	94					

continuação

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Silte %	Argila %	CTC meq/100g solo	Volume %	1/3 atm	15 atm	AD		Perfil
							% peso		% volume	mm/cm	
dzólico Eutrófico To textura média fase sta	A1	0-10	16	21	11,6	63	15,0	9,7	7,8	0,78	P.29
	A3	10-20	17	24	8,8	55	13,5	8,6	7,2	0,72	
	B1	20-40	12	31	8,3	61	14,8	9,3	7,8	0,78	
	B2	40-66	14	32	8,4	73	16,8	10,4	8,7	0,87	
	B3	66-87	14	34	7,4	76	16,9	10,7	8,2	0,82	
dsólico Eutrófico Ta textura argilosa fase oresta caducifólia	A1	0-20	36	44	19,6	88	24,7	15,5	14,9	1,49	P.1
	B2t	20-65	26	64	19,5	100	24,8	17,2	12,3	1,23	
	B3t	65-120	25	64	20,0	88	24,8	17,4	13,0	1,30	
Roxa estruturada Similar Eutrófica extura argilosa	Ap	0-16	19	23	7,9	40	27,3	13,9	13,4	1,34	P.13
	B1	16-34	17	49	7,3	38	31,9	23,4	8,5	0,85	
	B21	34-61	19	48	6,5	51	30,3	21,2	9,1	0,91	
	B22	61-150	30	36	5,5	55	25,7	24,7	11,0	1,10	
ZEM AVERMELHADO textura fase floresta caducifólia	A	0-15	30	58	40,4	100	42,5	33,5	13,1	1,31	
	B2	15-40	31	64	41,7	100	32,8	24,9	11,2	1,12	
	B3	40-60	39	50	36,3	100	29,6	20,7	13,1	1,31	
runo Não Cálcico textura argilosa fase ga hipoxerófila	A	0-16	27	28	23,7	92	27,0	18,8	12,2	1,22	P.51
	B1	16-29	21	45	29,0	99	32,9	23,9	14,0	1,40	
	B2	29-48	25	44	32,3	98	34,8	25,1	15,3	1,53	
	B3	48-65	32	29	30,2	100	30,7	23,2	10,8	1,08	
	C	65-90	31	8	20,6	100	20,5	14,4	9,2	0,92	

continuação

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Silte %	Argila %	CTC meq/100g solo	Volume %	1/3 atm	15 atm	AD		Perfil
							% peso		% volume	mm/cm	
mbissolo Eutrófico textura argilosa fase ga hipoxerófila substrato calcário	A11	0-15	25	52	23,2	84	26,5	18,6	9,6	0,96	P.1
	A12	5-15	25	55	19,7	77	22,7	15,7	8,9	0,89	
	B21	15-33	26	56	15,7	61	21,8	13,9	10,8	1,08	
	B22	33-77	23	58	18,2	67	22,3	15,1	10,4	1,04	
	B31	77-113	34	46	15,7	70	22,5	14,4	11,7	1,17	
lo fase floresta caducifolia	A	0-20	31	56	33,1	89	35,7	23,4	16,3	1,63	P.42
	C1	20-42	8	89	44,8	80	45,6	33,8	16,4	1,64	
	C2	42-63	13	78	65,6	91	39,2	29,8	12,7	1,27	
	C3	63-80	31	61	59,4	96	37,0	26,7	14,5	1,45	
anossolo Solódico textura a fase caatinga hiperxerófila	A	0-20	23	4	2,7	66	6,6	2,1	8,0	0,80	P.27
	B2t	20-35	10	39	16,1	81	25,1	17,6	13,0	1,30	
	B3	35-90	21	27	21,3	100	21,3	13,1	14,9	1,49	
	C	90-120	11	4	16,1	100	10,9	7,4	5,8	0,58	
onetz Solodizado textura média fase sta com babaçu	A	0-13	45	9	6,3	79	12,1	4,7	10,3	1,03	P.28
	B1	13-40	36	19	12,4	49	16,7	8,4	12,2	1,22	
	B2	40-100	63	20	9,6	100	21,4	9,8	18,0	1,80	
	B3	100-125	53	28	13,3	100	24,0	14,6	14,2	1,42	
ay pouco Húmico Distrófico textura fase floresta de várzea	A	0-20	37	58	18,0	23	36,0	25,5	12,9	1,29	P.50
	IICg	20-50	32	57	15,9	6	30,7	21,8	12,6	1,26	
	IIICg	50-110	25	59	20,6	4	29,9	20,6	13,0	1,30	

continuação

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Silte %	Argila %	CTC meq/100g solo	Volume %	1/3 atm	15 atm	AD		Perfil
							% peso		% volume	mm/cm	
romórfica Distrófica Ta textura sta de várzea	A	0-5	21	23	16,7	34	21,2	11,6	11,9	1,19	P.59
	B1p1	5-35	19	28	13,3	22	18,2	10,2	10,8	1,08	
	B2p1	35-52	20	33	21,8	11	20,5	13,3	9,7	0,97	
	B3p1	52-64	25	47	31,5	13	26,9	18,4	11,4	1,14	
	Cp1	64-100	30	55	41,4	16	28,7	20,8	10,1	1,01	
lo Aluvial Eutrófico textura siltosa fase sta de várzea	A	0-22	63	34	18,3	51	36,0	19,8	19,5	1,95	P.65
	IIC1	22-48	53	43	21,6	54	29,3	18,1	15,2	1,53	
	IIIC2	48-95	58	34	20,8	43	26,3	14,1	17,3	1,73	
	IVC3	95-150	63	30	20,8	57	28,4	14,9	18,5	1,85	
o Aluvial Eutrófico textura média, fase sta de várzea	Ap	0-12	45	33	15,2	93	29,8	17,6	17,4	1,74	P.58
	A12	13119	40	37	14,1	85	24,6	16,8	10,6	1,06	
	IIC1	35-60	37	32	10,0	82	21,2	14,7	9,4	0,09	
	IIIC2	60-90	39	25	7,4	77	16,7	10,1	10,2	1,02	
	IVC3	90-150	35	28	10,4	81	17,6	11,5	9,4	0,94	
lo Aluvial Eutrófico textura argilosa fase inga hiperxerófila	A11	0-23	25	41	30,6	100	28,4	18,0	14,3	1,43	P.13
	A12	23-70	29	35	27,5	100	27,1	18,7	11,7	1,17	
	CXx	70-120	29	41	28,1	89	28,2	19,4	12,5	1,25	
egossolo Eutrófico textura arenosa fase inga hiperxerófila	A11	0-20	8	4	4,6	50	6,0	2,4	5,5	0,55	P.34
	A12	20-75	12	5	3,5	69	5,4	2,4	4,7	0,47	
	CXx	75-150	11	3	1,6	78	3,4	1,3	3,7	0,37	

continuação

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Silte %	Argila %	CTC meq/100g solo	Volume %	1/3 atm	15 atm	AD		Perfil
							% peso		% volume	mm/cm	
egossolo Eutrófico textura arenosa fase inga hiperxerófila	A11	0-20	18	3	5,0	70	7,4	2,2	8,2	0,82	P.RN-5
	A12	20-45	19	5	4,8	58	7,9	2,7	7,7	0,77	
	C1	45-95	17	6	3,4	61	6,6	2,5	6,8	0,68	
	C2	95-110	16	3	3,7	77	5,5	1,8	6,5	0,65	
osas Distróficas	A1	0-15	14	6	6,2	6	9,2	4,9	6,7	0,67	P.83
	A3	15-40	8	8	2,8	8	5,7	3,8	2,8	0,28	
	C1	40-82	8	12	2,5	9	6,2	4,3	2,9	0,29	
	C2	82-128	7	13	2,0	9	6,4	4,2	3,5	0,35	
lo Litólico Distrófico textura argilosa o substrato siltito	A	0-10	50	41	7,8	11	27,7	17,3	14,1	1,41	
	C	10-30	52	43	7,6	8	29,1	17,7	15,6	1,56	
lo Litólico Eutrófico textura média fase inga hiperxerófila substrato gnaisse	A11	0-15	13	9	6,2	78	12,0	5,1	9,5	0,95	P.
	A12	15-37	14	10	6,1	78	12,5	5,0	10,5	1,05	

Fonte: Cavalcanti (1979)

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. L. T.; COELHO, E. F.; COUTO, L. e SILVA, E. L. Manejo de Irrigação. Parâmetros de solo-água para a engenharia de irrigação e ambiental. XXVII congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. p. 1-45. Poços de Caldas – MG. 1998.
- ARRUDA, F. B. A agricultura irrigada frente a administração de recursos hídricos no estado de São Paulo. Campinas – SP. IAC. 1994. Apresentado ao Comitê da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivarí e Jundiaí – mimeografo.
- AUGUSTO, S. G.; SEDIYAMA, G. C. MANTOVANI, E. C. Variação temporal da evapotranspiração de referência e os efeitos em projetos e manejo de sistemas de irrigação. In. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. II. 1996. Bauru SP e CDROM Jaboticabal SP. SBEA/ALIA/UNESP.
- AZEVEDO, L. G. PORTO. R. L. L. Modelos de simulação e de rede de fluxo (extraído do capítulo 4 do livro Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos, ABRH/EUFRGS). Outubro. 2002.
- BASTOS, E. A. Distribuição de frequência da evapotranspiração potencial de Teresina – PI através do modelo de Gumbel. Engenharia Agrícola. Campinas – SP. v. 14. P. 99-104. 1994.
- BERNARDO, S. Manejo de Irrigação. Irrigação e Produtividade. XXVII congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. p. 117-132. Poços de Caldas – MG. 1998.
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. 6ª edição. Universidade Federal de Viçosa. Imprensa Universitária. Viçosa – MG. 657p. 1995.

- CARDOSO H. E. A. MANTOVANI, E. C. COSTA, L. C. *Manual do SISDA - Sistema de Suporte a Decisão Agrícola – versão 2.0*. SRH/MMA - DEA/UFV. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal Secretaria de Recursos Hídricos. 85p. 1997.
- CIRINO, C. G. GUERRA, H. O. C. Utilização das relações energia/umidade na caracterização físico-hídrica dos solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília. v. 29. n. 12. p. 1973-1978. dez. 1994.
- CLARK, D. *CropWat for Windows: User Guide*. Version 4.2. 43p. October. 1998.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Roma: FAO – Irrigation and Drainage. Paper 33. 193p. 1979.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Souza, J. F. Medeiros. Campina Grande. UFPB. 306p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33. 1974.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Roma: FAO – Irrigation and Drainage. Paper 24. 144p. 1977.
- FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P. e RODRIGUES, J. D. Balanço hídrico do solo em culturas de soja irrigada. *Engenharia Agrícola*. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA. v. 19. n. 1. p. 43-52. Set.1999.
- FRIZZONE, J. A. Manejo de Irrigação. Função de Produção. XXVII congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. p. 86-116. Poços de Caldas – MG. 1998.
- GARTUNO, H. Efficient water use: a multi-dimensional approach. In: GARTUNO, H.; CORTÉS, F. A. (editores Efficient water use. Montevideo. UNESCO-ROSTLAC. p. 17-24. 1994.

- GOLDBERG, D.; TEIXEIRA, A. S. Drip irrigation: principles, design and agricultural practices. Kfar Shmaryahu / Israel: Ed. Drip Irrigation Scientific Publications. 300p. 1976
- GOMES, H. P. Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistema pressurizados, aspersão e gotejamento. 3ª edição. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande – PA. 412 p. 1999.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Economics considerations on deficit irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*. New York. v. 110. n. 4. p. 343-235. 1984.
- JENSEN, M. E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York: ASCE. 215p. 1973.
- KLAR, A. E. Irrigação: frequência e quantidade de aplicação. São Paulo: Nobel. 156p. 1991.
- KLAR, A. E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo. Nobel. 408 p. 1984.
- LABADIE, J. W. Reservoir system optimization models. In: Decision support systems applied the water resources engineering. São Paulo. 1998.
- LEME, E. J. A. otimização da irrigação da cana-de-açúcar (*saccharum spp*) via coeficientes de cultura, função de produção e programação dinâmica. Tese (doutorado) apresentada a EESC/USP. 399 p. Novembro. 1991
- LIMA, J. E. F. W. FERREIRA, R. S. A. CHRISTOFIDIS, D. O estado das águas no Brasil/organização Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas. ANEEL, SIH; MMA. SRH; MME/Brasília - DF. Parte 3. p. 73-82. O uso da irrigação no Brasil. 1999.
- LISBOA NETO, H. PORTO R. L. L. Sistema de suporte a decisão em engenharia de recursos hídricos desenvolvimento piloto para as bacias do rios Paraguaçu e

- itapicuru, no Estado da Bahia. Décimo Quarto Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. ABRH. 2001.
- MAROUELLI, W. A. Manejo da irrigação de hortaliças. Circular Técnica CNPH, 2 Brasília: CNPH/EMBRAPA. Jan. 1986.
- MENDONÇA, A. S. Regionalização hidrológica. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Organizado por João Batista Dias de Paiva e Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva. Porto Alegre - R.S. Capítulo 7. P. 165-168. 2001.
- MOTA, F. S. Meteorologia Agrícola. 7^a ed. São Paulo: Nobel. 376p. 1989.
- PORTO, R. L. L. AZEVEDO, L. Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídrico. Porto Alegre – RS. Cap.2. p.43-95: Sistemas de suporte a decisões de recursos hídricos. 1997
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo - SP. 188 p. Editora Manole Ltda. 1990.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4.ed. rev. amp. Campinas: Fundação Cargill. 445p. 1985.
- RIGUETTO, A. M. Hidrologia e Recursos Hídricos. São Carlos – SP. 840 p. EESC/USP. Projeto REENGE. 1998.
- ROBERTO, A. N. Modelos de rede de fluxo para alocação da água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo. 2002.
- ROBERTO, A. N. e PORTO, R. L. O sistema ModSimLS: um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas. Décimo Quarto Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. ABRH. 2001.

- ROBERTO, A. N. e PORTO, R. L. Alocação da Água entre Múltiplos Usos em uma Bacia Hidrográfica. Décimo Terceiro Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. ABRH. 1999.
- SEDIYAMA, G. C. Evapotranspiração. In: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. Engenharia de Irrigação: Necessidade de água para os cultivos. Brasília: ABEAS. Mod. 4. p. 3-66. 1987.
- SERRUTO, A. R. C. Balanço hídrico com base ecológica da vertente do lago Titicaca. São Paulo.. 210p. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1992
- TELLES, D. A. Águas doces no Brasil. Água na agricultura e pecuária. Organização e coordenação científica Aldo da Cunha Rebouças, Benedito Braga, José Galizia Tundisi. p. 305-337. São Paulo. Escrituras Editora. 1999.
- TELLES, D. A. Determinação das demandas de água para irrigação: evapotranspiração de referência no Estado de São Paulo. São Paulo, 2v. 501p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1996.
- TWENTY-SIXTH FAO REGIONAL CONFERENCE FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN. Water as a resource for food production. Merida, Mexico. p. 10-14. April. 2000.
- VALADÃO, L. T. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do feijoeiro em dois níveis do lençol freático. Dissertação (mestrado). 112p. Faculdade de Ciências Agrônômicas. UNESP. Botucatu. SP. 1995.
- VILA NOVA, N. A., REICHARDT, K. Engenharia Hidrológica. Evaporação/evapotranspiração. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. p. 145-197. Editora da UFRJ. 1989.

- WURBS, R. Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. v. 119. n. 4. p. 455-472. 1993.
- YEH, W. W-G. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. *Water Resources Research*. v.21. n.12. p.1797-1818. 1985.

9. BIBLIOGRAFIA COMPLETAR

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. and SMITH, M. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, 1998.
- A INSERÇÃO REGIONAL DO PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL – A Integração das Águas com o Rio Tocantins. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Elaboração: VBA Consultores S/C Ltda. p. 12-17. Fortaleza. Julho. 2000
- AZEVEDO, L. G. PORTO, R. L. L. LABADIE, J. W. MODSIM: modelo de rede de fluxo de bacias hidrográficas. 142p. 1999.
- AZEVEDO, L. G. PORTO, R. L. L. FILHO, K. Z. Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídrico. Cap.4, p.165-225: Modelos de simulação e de redes de fluxo. Porto Alegre – RS. 1997.
- BARRET, J. W. H., SKOGERBOE, G. V. Crop functions and the allocation and use of irrigation water. *Agric. Water Manege*. Amsterdam. v. 3. p. 53-64. 1980.
- BERTONI J. C. TUCCI, C. E. M. Precipitação. Hidrologia: ciência e aplicação. Organizado por Carlos E. M. Tucci. Porto Alegre-R.S. Editora da Universidade. ABRH. 2ª edição. Capítulo 5. p. 177-252. 1997.
- DANTAS NETO, J. Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água. Tese (mestrado). UNESP. Faculdade de Ciências Agrônômicas. Campus de Botucatu. 125p. 1994.

- FREITAS, A. V. SANTOS, A. H. M. O estado das águas no Brasil/organização Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas ANEEL, SIH; MMA. SRH; MME/Brasília - DF. Parte 1. p. 13-16. Importância da água e da informação hidrológica. 1999.
- HEXEM, R. W., HEADY, E. O. Water production functions for irrigated agriculture. Iowa: Iowa State University Press. 215p. 1978.
- REICHARDT, K. A água na produção agrícola. São Paulo - SP. 119 p. McGraw-Hill do Brasil. 1978.
- SAAD, J. C. C.; SCALOPPI, E. J. Análise dos principais métodos climáticos para estimativa da evapotranspiração. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. 8. Anais. v.2. ABID. p. 999-1021. Florianópolis. 1988.
- SALATI, E.; LEMOS, H. M. E. Águas doces no Brasil. Água e o desenvolvimento sustentável. Organização e coordenação científica Aldo da Cunha Rebouças, Benedito Braga, José Galizia Tundisi. p. 39-64. São Paulo. Escrituras Editora. 1999.
- SIERRA, L. N., ISLA, D. B. Estimación de funciones de producción em la zona de Rio Verde, San Luis Potosi. *Agrociencia*. Chapingo. n. 20. p. 37-41. 1975.
- STEGMAN, E. C. Irrigation scheduling: applied timing criteria. *Adv. Iriga*. New York. v. 2. p. 1-29. 1983.
- TELLES, D. A. Evapotranspiração: a teoria e a prática. Trabalho apresentado na disciplina de Complementos de hidrologia na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.
- TELLES, D. A. Elaboração de Projetos de Irrigação. Programa Nacional de Irrigação – Fundação CTH. Coordenador Técnico. Capítulo 1. p. 1-85. Brasília. 1986.

- WALLACE, J. S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. n. 82. p. 105-205. December 2000.
- YARON, D. BRESLER, E. Economic analysis of on-farm irrigation using response functions of crop. *Adv. Irrig.* New York. v. 2. p.223-255. 1983.
- YARON, D. Estimation and use of water production functions in crop. *J. Irriga. Drain. Eng.* New York. v. 97. p. 291-303. 1971.
- ZAHED, K. F. Algumas metodologias para o dimensionamento e operação de reservatórios. São Paulo, 1984. 258p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.