



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA LÍGIA CHAVES SILVA

**UTILIZAÇÃO DO MODELO SWIM PARA ANALISE DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DE GAMELEIRA-PERNAMBUCO**

RECIFE

2014

ANA LÍGIA CHAVES SILVA

**UTILIZAÇÃO DO MODELO SWIM PARA ANALISE DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DE GAMELEIRA-PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: José Roberto Gonçalves de Azevedo, Ph.D

RECIFE

2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

S586u Silva, Ana Lígia Chaves.

Utilização do modelo SWIM para análise da evapotranspiração de referência diária na Bacia Hidrográfica de Gameleira-Pernambuco / Ana Lígia Chaves Silva. – Recife: O Autor, 2014.

xv125f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo, Ph.D.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2014.

Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Modelo SWIM. 3. Bacias Hidrográficas. 4. Evapotranspiração 5. Turc-Ivanov Modificado. 6. Gameleira-Pernambuco. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de (Orientador). II. Título.

624 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2014/ 034

ANA LÍGIA CHAVES SILVA

**UTILIZAÇÃO DO MODELO SWIM PARA ANÁLISE DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DE GAMELEIRA-PERNAMBUCO**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco.

Aprovada em _____ pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo - UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Bezerra Candeias – UFPE
(examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Martins Sobral – UFPE
(examinadora interna)

RECIFE

2014

A Deus;

Aos meus queridos pais, Graça e Firmino;

A meu amado esposo João Régis;

Ao meu filho amado João Vitor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar comigo em todas as horas, me dando forças para vencer cada dificuldade e por ter permitido passar por mais esta etapa da minha vida.

À minha família, em especial aos meus pais, por toda a educação, carinho e participação na minha vida;

Ao meu amado esposo por estar sempre presente em minhas decisões, me apoiando, incentivando e aconselhando da melhor forma possível, meu muito abrigado por fazeres parte de minha vida;

Ao meu filho amado por toda a compreensão nos momentos que precisei estudar ao invés de dar-lhe a atenção necessária.

Ao meu querido Professor Roberto Azevedo, pela orientação e conhecimentos transmitidos, pela compreensão, paciência e competência para resolver as dificuldades do trabalho;

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, pelo conhecimento transmitido. Aos professores Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Suzana Maria Gico Lima Montenegro e Ricardo Braga. Meu agradecimento especial a Você, Professor, ficando minha admiração e respeito. Obrigada por nunca ter desistido de mim;

A todas as pessoas que fazem parte do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE que de uma forma ou de outra ajudaram neste trabalho;

Ao grupo do projeto INNOVATE, em especial aos professores Fred Hattermann e Hagen Koch, pela disponibilização do programa SWIM e de todas as informações que foram de fundamental importância para o desenvolvimento da pesquisa;

As professoras Ana Lúcia Bezerra Candeias e Maria do Carmo Martins Sobral pela participação na banca examinadora;

A todos os colegas e amigos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, da Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba - CAGEPA e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB.

À Secretaria do PPGEC/UFPE, em nome da Secretária da Coordenação Andréa Negromonte Vieira Matoso por sua valiosa atenção e apoio logístico.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

UTILIZAÇÃO DO MODELO SWIM PARA ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DE GAMELEIRA-PERNAMBUCO

ANA LÍGIA CHAVES SILVA

Janeiro/2014

Orientador: Prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo, Ph.D.

Diante dos conflitos por recursos hídricos motivados, muitas vezes, pelo aumento da demanda e pela tentativa de atendimento aos usos múltiplos da água, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos que permitam compreender a variabilidade climática e espacial deste recurso. Sendo, o Balanço Hídrico um componente importante nos estudos aplicados na gestão de bacias hidrográficas. Entretanto, um problema encontrado no cálculo deste balanço é a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), um dos mais importantes componentes do balanço hídrico e, ao mesmo tempo, uma das variáveis mais complexas de quantificar. Isto se deve, dentre outros fatores, ao fato das medições serem escassas e dispendiosas. Este trabalho busca estimar a evapotranspiração diária na microbacia hidrográfica do riacho Gameleira, inserida na sub-bacia do rio Tapacurá, localizada na parte Nordeste da Mesoregião Geográfica do Agreste do Estado de Pernambuco. Os dados utilizados na pesquisa são da estação climatológica localizada na Escola Agrotécnica Federal de Vitória de Santo Antão – PE. O período escolhido para simulação foi de 2004 a 2008. Para preencher as falhas existentes na série foram utilizados dados da estação do Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE) de Recife, validados por análises estatísticas. E para o cálculo da ET_o aplicou-se o modelo SWIM com o método de Penman-Monteith (FAO56), da *Food and Agriculture Organization* – FAO, e o método modificado de Turc-Ivanov. Como resultados da pesquisa tem-se a calibração do modelo SWIM para estimar a ET_o, destacando-se o bom desempenho do método modificado de Turc-Ivanov comparado com o método recomendado pela FAO. Ao final, foi possível estimar a ET_o por um método, que requer apenas as seguintes variáveis climatológicas: radiação solar e temperatura do ar. Indicando que métodos mais simples podem apresentar bons resultados na estimativa da ET_o, e assim, auxiliar na gestão de bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Modelo SWIM; Bacias Hidrográficas; Evapotranspiração; Turc-Ivanov modificado.

ABSTRACT

USING THE SWIM MODEL FOR ANALYSIS DAILY REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN RIVER BASIN OF GAMELEIRA-PERNAMBUCO

ANA LÍGIA CHAVES SILVA

Janeiro/2014

Advisor: Prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo, Ph.D.

Facing the conflicts motivated by water, often, by increased demand and attempt to care for multiple uses of water, makes it necessary to develop studies to understand climate variability and spatial of this it. Hydrological studies involving water balance are often applied in watershed management. Being the water balance an important components in the studies apply in the river basins. However, a problem encountered in the calculation of this balance is the estimated reference evapotranspiration (ET_o), one of the most important components of the water balance and at the same time, one of the most complex variables to quantify. This is due, among other factors, to the fact that measurements are scarce and expensive. This dissertation search to estimate the daily evapotranspiration in the river micro-basin of the Gameleira inserted in the Tapacurá River sub-basin, located in the northeastern part of the Wasteland Geographic Mesoregião the State of Pernambuco. The data used in the research are the climatological station located in Federal Agrotechnical College of Vitória de Santo Antão-PE. The period chosen for simulation was from 2004 to 2008. To fill existing gaps in the series were used data from station of the Meteorology Laboratory of Pernambuco (LAMEPE) of Recife, validated by statistical analysis. And for the calculation of ET_o applied the SWIM model with the Penman-Monteith (FAO 56), the Food and Agriculture Organization-FAO, and the modified method of Turc-Ivanov. The results in this search were the calibration of the SWIM model to estimate ET_o, and the good performance of the modified Turc-Ivanov method compared with the method recommended by FAO. At the end, it was possible to estimate ET_o by a method that requires only the following climatic variables: solar radiation and air temperature. Indicating that the simplest methods can produce good results in the estimation of ET_o, and thus aid the river basins management.

Keywords: SWIM model; River Basins; Evapotranspiration, Modified Turc-Ivanov.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nível de desagregação implementado no SWIM	31
Figura 2 - Estrutura do SWIM.....	31
Figura 3 - Fluxograma metodológico	35
Figura 4 - Localização das estações de coleta de dados	38
Figura 5 - Parâmetros de calibração dos métodos no modelo SWIM.	45
Figura 6 - Localização da Microbacia de Gameleira Escala:1:900.000	53
Figura 7 - Domínios hidrogeológicos da microbacia de Gameleira na escala de 1:50000.	55
Figura 8 - Composição do solo da microbacia de Gameleira na escala de 1:50000.	56
Figura 9 - Características do relevo da Microbacia de Gameleira na escala de 1:50000....	57
Figura 10 - Cobertura vegetal da microbacia.	58
Figura 11 - Média histórica da precipitação	59
Figura 12 - Diagrama de Box Plot das variáveis.	62
Figura 13 - Análise dos dados brutos de Radiação solar da estação Gameleira.....	63
Figura 14 - Análise dos dados brutos da Umidade relativa do ar da estação Gameleira.....	63
Figura 15 - Identificação de erros grosseiros nas séries da Temperatura máxima, média e mínima da estação Gameleira.....	64
Figura 16 - Análise preliminar da Temperatura máxima da estação Gameleira	64
Figura 17 - Análise preliminar da Temperatura média da estação Gameleira	65
Figura 18 - Análise preliminar da Temperatura mínima da estação Gameleira.....	65
Figura 19 - Análise preliminar da velocidade do vento da estação Gameleira	66
Figura 20 - Análise dos dados brutos da precipitação da estação Gameleira.....	66
Figura 21 - Análise de resíduos das variáveis respostas a partir das variáveis explicativas.	70
Figura 22 - Análise de consistência dos dados de precipitação pelo método de dupla massa	71
Figura 23 - Dados preenchidos das variáveis: umidade relativa do ar e temperaturas máxima, média e mínima.....	73
Figura 24 - Dados preenchidos das variáveis: radiação solar, velocidade do vento e precipitação.....	74
Figura 25 - Relação entre a ETo gerada na PCD e no modelo SWIM (thc: 1,0 e 0,8).....	77

Figura 26 - Relação entre a ETo gerada na PCD e no modelo SWIM (thc: 0,6 e 0,4).....	78
Figura 27 - Relação entre a ETo gerada na PCD e no modelo SWIM (thc = 0,2).	79
Figura 28 - Desempenho do método de Turc-Ivanov, período seco.	82
Figura 29 - Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado, período chuvoso.....	83
Figura 30 - Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado, período de transição. ...	84
Figura 31 - Comparação entre os métodos de Turc-Ivanov modificado e Penman-Monteith (FAO56)	86
Figura 32 - Relação dos métodos de Turc-Ivanov modificado e Penman-Monteith (FAO56)	86
Figura 33 - Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado.....	88
Figura 34 - Comparação dos métodos de Turc-Ivanov modificado ($\Omega = 1,0$) e Penman-Monteith (FAO 56).....	89
Figura 35 - Relação dos métodos de Turc-Ivanov modificado ($\Omega = 1,0$) e Penman-Monteith (FAO 56)	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das estações vizinhas à área de estudo	38
Tabela 2 - Valores mensais do fator Ω . Fonte: Adaptado do modelo SWIM.	46
Tabela 3 - Descrição do índice de desempenho “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997)	52
Tabela 4 - Características fisiográficas da bacia de Gameleira..	54
Tabela 5 - Descrição dos sensores da estação climatológica.....	60
Tabela 6 - Enquadramento das correlações entre as variáveis	67
Tabela 7 - Teste de hipótese sobre as variáveis.....	67
Tabela 8 - Análise estatística de regressão simples e teste t de Student.....	68
Tabela 9 - Análise estatística de regressão Múltipla e teste t de Student	69
Tabela 10 - Equações utilizadas no preenchimento das falhas.....	72
Tabela 11 - Enquadramento das correlações dos valores gerados no SWIM e na PCD	76
Tabela 12 - Desempenho do método Turc-Ivanov modificado (Simulação 01).	85
Tabela 13 - Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado (Simulação 02).....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δ	Declive da curva de pressão de vapor
AIQ	Amplitude interquartile
ASCE	American Society of Agricultural Engineering
CPETEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
d_r	Distância relativa terra-sol
e°	Pressão de vapor de saturação
e_a	Pressão real de vapor
Ecal	Coeficiente de calibração
e_s	Pressão de vapor saturado
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
ETp	Evapotranspiração potencial
ETr	Evapotranspiração real
FAO	Organização da Agricultura e alimentos
G	Fluxo de calor do solo
IBESA	Implantação de bacias experimentais no semiárido
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
P	Pressão atmosférica
PCD	Plataforma de coleta de dados
Q_1	Primeiro quartil
Q_3	Terceiro quartil
R	Coeficiente de correlação linear
r^2	Coeficiente de determinação
R_{nl}	Radiação de ondas longas
R_{ns}	Radiação de ondas curtas
SiBCS	Sistema Brasileiro de classificação de solos
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SWAT	Ferramenta de avaliação de solo e água

SWIM	Modelo integrado solo e água
S_x	Desvio padrão das amostras
$S_{x,y}$	Covariância
T	Temperatura
t_0	Teste de hipótese
T_{hc}	Fator de correção para evapotranspiração
t_α	Valor crítico
A	Nível de significância
Υ	Constante psicrométrica
Ω	Fator adimensional mensal
ω_s	Ângulo horário do pôr-do-sol

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	16
1.1 Caracterização do problema	16
1.2 Hipótese	17
1.3 Justificativa	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo Geral	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5 Estrutura do trabalho	19
CAPÍTULO II – REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 Aspectos históricos	20
2.2 Evapotranspiração	21
2.2.1 Definições	22
2.2.2 Fatores que afetam a evapotranspiração	24
2.2.3 Estimativas de Evapotranspiração	25
2.3 Aplicações do método de Turc-Ivanov modificado	26
2.4 Modelo SWIM	28
2.4.1 Definições	28
2.4.2 Apresentação do modelo SWIM	30

2.4.3 Aplicação do modelo SWIM	32
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	35
3.1 Tratamento de dados	36
3.1.1 Análise preliminar	36
3.1.2 Preenchimento de falhas	37
3.2 Estimativa de evapotranspiração utilizando o modelo SWIM	44
3.2.1 Método de Turc-Ivanov	45
3.2.2 Método de Penman-Monteith (FAO 56)	46
3.3 Calibração e Análise do desempenho do modelo SWIM	50
3.4 Avaliação do desempenho do método	51
CAPÍTULO IV - ÁREA DE ESTUDO	53
4.1 Características da área de estudo	53
4.1.1 Características fisiográficas da bacia.....	54
4.1.2 Hidrogeologia	54
4.1.3 Solo.....	55
4.1.4 Estrutura Geológica e Relevo	57
4.1.5 Cobertura Vegetal.....	58
4.1.6 Características climáticas	59
4.1.7 Estação experimental de Gameleira	59
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 Etapa de Tratamento dos dados	61
5.2 Estimativa da evapotranspiração	74
5.2.1 Estimativa da ETo através do método Penman-Monteith (FAO56).....	75
5.2.2 Estimativa da ETo através do método Turc-Ivanov modificado	75
5.3 Calibração e análise do modelo SWIM	75
5.4 Avaliação do desempenho do método de Turc-Ivanov modificado	80

5.4.1 Avaliação do desempenho do método de Turc-Ivanov modificado (Simulação 1)	81
5.4.2 Avaliação do desempenho do método de Turc-Ivanov modificado (Simulação 2). ..	87
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	90
REFERÊNCIAS	93
ANEXOS	104
ANEXO A – Programa principal do SWIM.....	105
ANEXO B – Sub-rotina do programa SWIM para estimar a Evapotranspiração	114

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os conflitos potenciais no gerenciamento de recursos hídricos surgem como consequência do aumento da demanda por este recurso, gerada a partir do crescimento populacional e da necessidade de atendimento aos usos múltiplos, a exemplo de: geração de energia, indústria, agricultura, ecossistemas e consumo humano. A situação no nordeste brasileiro, pode se tornar mais crítica por causa do desequilíbrio existente entre oferta e demanda de água, condição que pode ser agravada em consequência das mudanças climáticas.

Diante deste problema, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos que permitam compreender a variabilidade climática e espacial dos recursos hídricos. O Balanço hídrico é um componente importante dos estudos hidrológicos, que são frequentemente aplicados em gestão de bacias hidrográficas. Entretanto, um problema encontrado no cálculo deste balanço é a estimativa da evapotranspiração (ET), uma das mais importantes componentes do balanço hídrico e, ao mesmo tempo, também uma das variáveis mais complexas de quantificar (Jain *et al.*, 2011). A dificuldade de obter esta variável se deve ao fato das medições serem escassas e dispendiosas (Silva *et al.*, 2010).

A intensidade do fluxo de evapotranspiração de uma área depende de fatores atmosféricos e da disponibilidade de água. Entre os fatores, destacam-se a radiação solar, a temperatura do ar, a velocidade do vento e a umidade relativa do ar.

Existem diversos métodos disponíveis para estimativa da evapotranspiração, podendo ser diretos ou indiretos. Segundo Moura (2009), dentre os métodos diretos está a utilização dos lisímetros, já para os métodos indiretos existem inúmeras equações disponíveis na literatura, dentre elas a equação de Penman-Monteith, recomendada pela Food and Agriculture Organization (FAO) como uma equação padrão para determinação da evapotranspiração.

Além dos métodos citados, a utilização de modelos computacionais para estimar as variáveis hidrometeorológicas está sendo cada vez mais difundida. Dentre os modelos, pode-se citar o Soil and Water Integrated Model (SWIM). Este sistema de simulação hidrológica se

divide em quatro volumes de controle: a superfície do solo, a zona radicular no solo, o aquífero raso, e do aquífero profundo. Para o balanço hídrico na superfície e coluna do solo o modelo inclui, entre outras variáveis, a evapotranspiração. No modelo SWIM, a evapotranspiração de referência é estimada através dos métodos de Priestley-Taylor, Priestley e Taylor (1972), de Penman-Monteith, Monteith (1965), de Penman-Monteith (FAO56), Allen *et al.*, (1998) e Turc-Ivanov modificado, Wendling and Schellin (1986).

Diante do exposto, ressalta-se a importância de estudos da evapotranspiração, sendo imprescindível a definição de métodos adequados para sua estimativa, que demandem um número menor de fatores atmosféricos.

1.2 HIPÓTESES DO TRABALHO

- As variáveis utilizadas no estudo em Gameleira, quais sejam: temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação possuem uma boa correlação com as variáveis das estações vizinhas, possibilitando o preenchimento de possíveis falhas;
- O método modificado de Turc-Ivanov, mesmo necessitando de poucas variáveis para o cálculo, apresenta bons resultados para estimar a evapotranspiração;
- O modelo SWIM apresenta um bom desempenho na estimativa da evapotranspiração.

1.3 JUSTIFICATIVA

Existem inúmeras situações em que o conhecimento da evapotranspiração da região é de grande importância, por exemplo: as análises solo-água-planta, muito utilizadas para melhorar o desempenho dos métodos de irrigação no tocante ao consumo de água; os estudos de manejo da água dentro da bacia hidrográfica, relacionado com o conhecimento das perdas de água de uma superfície natural como lagos e rios e da água depositada no solo e na vegetação presentes na bacia hidrográfica, sendo possível, a partir desse conhecimento, simular a operação de reservatórios.

Serrat-Capdevila *et al.*, (2011) afirmam que existe uma dificuldade em determinar a evapotranspiração, de forma direta, via lisímetros. Este fato é reafirmado por Silva *et al.*, (2010), que atribuíram esta dificuldade na determinação da evapotranspiração direta ao fato de necessitar de equipamentos específicos e caros. Neste sentido, Carvalho *et al.*, (2011)

observaram que surgem estudos constantes com objetivo de encontrar respostas mais viáveis para as medições e estimativas desta variável na prática.

Pesquisas realizadas apontam que existem vários métodos para estimar a Evapotranspiração de referência (ET_o), destacando-se o método de Penman Monteith (FAO 56). Contudo sua utilização requer um grande número de variáveis que nem sempre estão disponíveis em uma estação, e, por isso, diferentes métodos que utilizam um menor número de variáveis vêm sendo avaliados.

Como o modelo de Turc-Ivanov modificado apresenta esta característica, e não existem muitas pesquisas que avaliaram seu desempenho para regiões com condições climáticas semelhantes à região de aplicação desta pesquisa, surgiu, então, a necessidade de investigá-lo e compará-lo com o modelo de Penman-Monteith (FAO 56), este o mais utilizado e testado nas aplicações práticas, tanto brasileiras como estrangeiras.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo utilizar o modelo SWIM para analisar a evapotranspiração de referência diária na bacia experimental de Gameleira – PE.

1.4.2 Objetivos específicos

- Tratar os dados hidrometeorológicos da região de estudo: radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e precipitação;
- Determinar a ET_o diária através do método de Penman-Monteith (FAO 56);
- Utilizar o modelo SWIM para estimar a evapotranspiração de referência diária através do método de Turc-Ivanov modificado;
- Avaliar o desempenho do método de Turc-Ivanov modificado comparando com o método de Penman-Monteith (FAO 56).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho apresentou o estudo da evapotranspiração de referência na bacia experimental de Gameleira – PE utilizando o modelo SWIM. Esta dissertação foi dividida em capítulos, que estão organizados da seguinte forma:

No capítulo I, tem-se uma breve introdução, justificativa técnica para realização deste trabalho e os objetivos a serem alcançados.

No capítulo II, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, apresentando um levantamento histórico sobre o estudo da evapotranspiração e citando alguns trabalhos que aplicaram o método de Turc-Ivanov modificado e o modelo SWIM. O objetivo deste capítulo é fundamentar conceitualmente a discussão do tema.

No capítulo III, descreve-se a metodologia utilizada na pesquisa, abordando as etapas de coleta, aquisição e tratamento dos dados necessários para a análise, destacando o estudo estatístico realizado, a descrição do modelo e os métodos adotados no estudo.

O capítulo IV refere-se à descrição da região escolhida para o estudo de caso, a bacia hidrográfica de Gameleira, mostrando as características fisiográficas da área.

O capítulo V apresenta os resultados e discussões relevantes encontrados, atendendo aos objetivos do trabalho.

O capítulo VI ressalta os principais pontos dos resultados obtidos, bem como recomenda sugestões para trabalhos futuros.

E finaliza-se este trabalho com uma lista de referências pesquisadas. Além disso, são apresentados dois anexos com o programa fonte SWIM e o módulo de cálculo da evapotranspiração de referência.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, destacando pontos importantes referentes à evapotranspiração, ao método Turc-Ivanov modificado e ao modelo SWIM, que serviram como base para realização do trabalho, auxiliando na escolha da metodologia e na discussão dos resultados.

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

Ao longo do tempo, várias pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de estudar a evapotranspiração, Thornthwaite & Wilm, em 1944, introduziram o termo “evapotranspiração”, e, em 1948 surgiram duas importantes contribuições científicas, pois, a partir delas, foi introduzido o conceito de evapotranspiração potencial (ET_p). Carvalho *et al.*, (2011) afirmaram que o trabalho de Warren Thornthwaite apresentou uma abordagem para a classificação do clima, e o de Howard Penman estudou a evaporação natural das águas, solos descobertos e grama.

Segundo Sedyama (1996), a preocupação principal de Thornthwaite era tentar definir as diferenças regionais do clima e explicar as variações sazonais do balanço de água no solo. O autor destaca que a equação de Thorntwaite era apenas uma proposta de estimativa da evapotranspiração em função da temperatura média do ar baseado em um índice térmico. O mesmo autor relata que Penman se preocupava com os processos físicos envolvidos na evaporação, levando em consideração elementos climáticos como: temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e energia radiante para estimar a taxa de evaporação da água-livre, da umidade de superfície do solo ou da vegetação.

No início da década de 50 surgiram estudos de necessidade hídrica para a irrigação, com uso de metodologias simples, a exemplo do método de Blaney e Criddle (1950). Nesta década, destaca-se ainda o desenvolvimento de lisímetros de grande porte, tanques de evaporação e atmômetros, cujo objetivo destes era correlacionar as taxas de evaporação da água livre e a evapotranspiração de culturas agrícolas.

Mais tarde, na década de 1960, os lisímetros, os saldos radiômetros e as sondas de nêutrons foram bastante utilizados na estimativa da evapotranspiração. Moura (2009), afirmou que um dos grandes avanços, na década de 70, foram dados relacionados à modelagem da evapotranspiração. Em 1977, a FAO (Food and Agricultural Organization) consolidou conceitos e metodologias elaborando uma revisão, que foi publicada por Doorenbos e Pruitt (1977). Destaca-se, ainda, o método proposto por Monteith estimando, diretamente, a Evapotranspiração da cultura (ET_c) com base no método de Penman, denominando-o de Penman-Monteith, e Doorenbos e Pruitt (1977).

Na década de 80 a American Society of Agricultural Engineering (ASCE) realizou simpósios que mostraram os avanços nas teorias sobre a evapotranspiração, envolvendo medições e métodos de aplicação.

O método de Penman-Monteith para estimar a ET_o, elaborado por Allen *et al.*, (1998), revolucionou os estudos sobre o assunto. Carvalho *et al.*, (2011) observaram que são raríssimas as regiões em que este método não seja recomendado.

Vários métodos foram desenvolvidos para estimativa da ET_o, ao longo de todos esses anos. Este fato decorre da limitação de elementos meteorológicos ou climáticos que alimentam os métodos e a adequação destes às condições climáticas da região. Segundo Carvalho *et al.*, (2011) é comum haver estudos utilizando artifícios estatísticos para compará-los, avaliando aquele que tem maior aplicabilidade ao local de estudo, pois existe uma diversidade de métodos e uma grande variabilidade de parâmetros que influenciam o fenômeno.

2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração (ET) é responsável pelo retorno da água precipitada para a atmosfera, fechando o ciclo hidrológico. Collischonn e Tassi (2008) afirmaram que este processo permaneceu mal compreendido até o início do século 18, quando Edmond Halley provou que a água que evaporava da terra era suficiente para abastecer os rios, pois, voltava para a superfície em forma de precipitação. Neste sentido, Fernandes *et al.*, (2010) destacaram a importância da evapotranspiração para o ciclo hidrológico, por meio do balanço hídrico, possibilitando a estimativa da recarga hídrica dos aquíferos.

Em consonância, Xu e Singh (1998) afirmaram que as estimativas de ET são cruciais para gerenciar os problemas de hidrologia. Neste sentido, Azevedo (2010) destacou sua

importância para o balanço hídrico de uma bacia como um todo. Por isso, o conhecimento do processo de evapotranspiração é bastante utilizado em estudos hidrológicos, seja para prever perdas de água em reservatórios e canais ou para melhorar o processo de irrigação. De acordo com Salgado (2001), sua correta estimativa serve de subsídio para conhecer a quantidade real de água a ser fornecida ao solo no monitoramento da irrigação. Back (2007), acrescentou, nesta afirmação, a importância do conhecimento da evapotranspiração para o manejo racional de recursos hídricos.

No que se refere ao tema, Reynolds *et al.*, (2000) e Jung *et al.*, (2010) ressaltaram que a evapotranspiração (ET) é um importante processo da superfície terrestre para estudos em climatologia, auxiliando, também, nos estudos de mudanças globais. De acordo com Silva *et al.*, (2010), os conhecimentos de taxas de evapotranspiração de uma região permitem aos gestores formular estratégias que contribuam para eficiência da operação dos recursos hídricos. Desse modo, Fernandes *et al.*, (2010) relataram que determinar e quantificar a evapotranspiração de forma precisa aperfeiçoará o uso dos recursos hídricos naturais, economizando energia elétrica e diminuindo, conseqüentemente, os custos de produção.

Outra importância de estudos da evapotranspiração, citada por Fisher *et al.*, (2011) refere-se à ecologia geográfica, que estuda a variação nos diferentes atributos ecológicos de uma espécie ao longo de sua distribuição geográfica e avalia quais fatores históricos e/ou ambientais locais explicam essas variações.

2.2.1 Definições

A evaporação da água, conforme Berlatto e Molion (1981), é um fenômeno físico que propicia a mudança de estado da água na fase líquida para a fase gasosa. Ocorre tanto em superfícies de água livre, ou seja, mares, lagos, rios, açudes, quanto em superfícies úmidas, como plantas e solo. Quando essa mudança dá-se por meio das plantas, recebe o nome de transpiração. Nos solos parcialmente vegetados, ocorrem tanto a evaporação quanto transpiração. Assim, o processo é chamado de evapotranspiração.

Outro conceito, elaborado por Allen *et al.*, (1998), refere-se à evapotranspiração como sendo a combinação dos dois processos, que ocorrem simultaneamente: a evaporação e a transpiração.

Os mesmos autores consideram a evaporação como um processo pelo qual a água líquida é convertida em vapor de água e removida para a superfície. A água evapora a partir

de uma variedade de superfícies, como: lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação molhada. A transpiração é considerada pelo autor como a vaporização de água, no estado líquido, para a atmosfera, contidos em tecidos de plantas. As culturas perdem água através dos estômatos, que são pequenas aberturas nas folhas das plantas por onde passam gases e vapor de água.

Neste sentido, Tucci (2012), afirmou que o retorno da água para a atmosfera ocorre pela evaporação onde se verifica a transferência da água na forma líquida para vapor de ar diretamente dos corpos de água ou a partir do solo que contem água, no estado líquido, em seus poros. As plantas também contribuem para este retorno, quando através de seus estômatos liberam água para a atmosfera, processo conhecido como transpiração. A evapotranspiração é composta por estes dois processos: evaporação e transpiração.

Na conceituação da evapotranspiração, pesquisadores, como Gomes (1997) apresentam três formas: Evapotranspiração real (ET_r), Evapotranspiração potencial (ET_p) e Evapotranspiração de referência (ET_o).

Thornthwaite (1948) definiu o fenômeno de evapotranspiração potencial como a perda máxima de água em uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberta com vegetação, em fase de desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes. Outro conceito de ET_p, é trazido por Tanner e Pelton (1960) que definem a ET_p como a quantidade de água transpirada, em um determinado espaço de tempo, a partir de uma vegetação rasteira e verde, cobrindo totalmente o solo, com altura uniforme e sem jamais sofrer limitações nas condições hídricas.

Doorenbos e Pruitt (1977), introduziram o conceito da evapotranspiração de referência, como sendo a taxa de evapotranspiração para uma superfície extensa, coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo, com solo completamente sombreado e sem déficit de água. Segundo Allen *et al.*, (1998), a ET_o é conceituada como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, na presença de água e considerando uma grama hipotética. Devido à diversidade de gramas utilizadas, o mesmo autor recomenda a utilização de grama com altura uniforme de 0,12 m, com albedo igual a 0,23 e resistência do dossel de 70 s.m⁻¹. Complementando esta informação Carvalho *et al.*, (2011) destacaram que a ET_o é um importante parâmetro agrometeorológico, principalmente para planejamento e manejo de irrigação, como, também, é considerada elemento climático de demanda hídrica, por isso sua aplicação em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos.

Gomes (1997) considerou a evapotranspiração real como a quantidade de água realmente consumida, em uma determinada cultura e que, entre outros fatores, dependem da

umidade efetivamente existente no solo. Outro conceito trazido por Pereira *et al.*, (2002) definiram a ETr como a quantidade de água realmente utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo. Porém, existem dificuldades em estabelecer um valor exato para a ETr, isto se deve ao fato de ser um processo complexo e extremamente dinâmico, que envolve organismos vivos como o solo e a planta (Tucci, 2012).

2.2.2 Fatores que afetam a evapotranspiração

Os principais parâmetros meteorológicos que afetam a evapotranspiração são: a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (ALLEN *et al.*, 1998).

Segundo Varejão-Silva (2006) a passagem da fase líquida para vapor depende do saldo de energia disponível à superfície-fonte e de sua temperatura. O autor reforçou ainda que, o fluxo vertical deste vapor de água para a atmosfera está condicionado pelo saldo de energia disponível, pela velocidade do vento e pelo teor de umidade reinante na camada de ar próxima à superfície evaporante.

Radiação solar é o conceito dado à energia radiante emitida pelo Sol. Conforme Acra *et al.*, (1990), as regiões mais próximas ao Equador recebem maior radiação solar, e apresentam maiores taxas de evapotranspiração. De acordo com Biscaro, (2007) a quantidade de energia solar que atinge a terra, no topo da atmosfera, está na faixa das ondas curtas. Esta é refletida, na atmosfera e na superfície, sofrendo transformações. Porém, em dias de céu nublado, a radiação solar é refletida pelas nuvens, e, algumas vezes, nem chega à superfície, reduzindo a energia disponível para a evapotranspiração.

Com relação às variáveis: temperatura do ar e umidade relativa do ar, Saraiva *et al.*, (2013) relataram que a quantidade de vapor de água que o ar pode conter varia com a temperatura. Logo, o ar mais quente pode conter mais vapor, favorecendo a evapotranspiração. Um efeito semelhante a este, é visto para a umidade relativa, quanto menor a umidade do ar, mais fácil é o fluxo de vapor da superfície que está evaporando. Por outro lado, a evaporação diminui se o ar da atmosfera próxima à superfície estiver com umidade relativa do ar próxima a 100%, praticamente saturado de vapor. Os mesmos autores destacam ainda que a variável velocidade do vento é importante no processo de

evapotranspiração porque remove o ar úmido diretamente do contato da superfície que está evaporando ou transpirando.

2.2.3 Estimativas de Evapotranspiração

Fernandes *et al.*, (2010) afirmaram que existem várias metodologias desenvolvidas para estimativa da evapotranspiração, dentre estas pode-se citar: medidas diretas, métodos baseados na temperatura do ar e na radiação solar e métodos combinados e balanço hídrico (Tucci, 2012).

Conforme informações de Carvalho *et al.*, (2006) os métodos diretos de estimativa da ETr, como os lisímetros de pesagem, apresentam resultados mais confiáveis, porém, necessitam de uma estrutura física muitas vezes com alto custo de implantação. Por isso são apenas utilizados para finalidades científicas. Já os métodos indiretos são bastante empregados na estimativa da ETo e se baseiam em dados meteorológicos.

O método do balanço hídrico é baseado no princípio da conservação da massa e consiste basicamente na contabilidade da variação de armazenamento de água de um dado volume de controle de solo (Tucci, 2012).

Jacobs e Satti (2001) conceituaram os métodos baseados na temperatura como equações empíricas que substituem a quantidade de energia disponível pela temperatura, para calcular a evapotranspiração de referência, porém não existe uma relação única entre a energia e a temperatura. Já os métodos de radiação solar são considerados por Scuderi (2010) como métodos que utilizam uma medida da radiação solar acoplada com a temperatura do ar para estimar a ETo.

Os métodos combinados estão baseados na equação de Penman desenvolvida em 1948, e consiste em dois termos: radiação solar e o aerodinâmico. Estes métodos fornecem os melhores resultados e suas aplicações são apropriadas para locais onde existem disponibilidade de medições de dados de temperatura, vento e horas de sol ou radiação solar (Scuderi, 2010).

Existe uma diversidade de métodos indiretos para estimar a ETo, este fato se deve à complexidade da transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, aos diferentes climas presentes no mundo e à dificuldade de obtenção dos elementos meteorológicos necessários para a alimentação destes métodos (Carvalho *et al.*, 2010).

Dentre os métodos indiretos Borges Júnior *et al.*, (2012) citaram: os métodos combinados: Penman-Monteith (FAO 56) e FAO-24 Penman; os baseados na radiação solar: FAO-24 Radiação e Priestley-Taylor e os baseados na temperatura: FAO-24 Blaney-Criddle, Hargreaves- Samani e Camargo-71.

Destacaram ainda, que o método Penman-Monteith (FAO56) é o mais apropriado para estimar a ETo. A afirmação também é feita por Carvalho *et al.*, (2010), acrescentando que este método vem sendo adotado como padrão em vários estudos. Pôde-se observar seu desempenho nas pesquisas de Xu e Chen (2005), Yoder *et al.*, (2005), Lopez-Urrea *et al.*, (2006), Jabloun e Sahli (2008) e Barros *et al.*, (2009).

Este método representa, de maneira consistente, o fenômeno biofísico da evapotranspiração, sendo alimentado por quase todos os elementos meteorológicos observados em estações meteorológicas de superfície. Porém, quando há impossibilidade da aplicação deste, muitas vezes por falta de dados de todos estes elementos meteorológicos, na região a ser estudada, é necessário averiguar qual método é mais indicado, diante das condições locais. Entretanto, poucos possuem aplicação prática para todas as condições climáticas, sendo necessário muitas vezes, o ajuste de coeficientes das equações (Fernandes *et al.*, 2010) .

2.3 APLICAÇÕES DO MÉTODO DE TURC-IVANOV MODIFICADO

O método de TURC (1961) foi originalmente desenvolvido para a França e norte da África, mas, pesquisas realizadas na parte oriental da Alemanha encontraram bons desempenhos deste método para a região, porém, com necessidade de correções (DVWK 1996). O método de Turc foi modificado, acrescentando uma abordagem de Ivanov (1954) para temperaturas inferiores a 5 °C, e aplicado na região Oriental da Alemanha (Richter, 1984 e Wendling e Schellin, 1986 apud Conradt *et al.*, 2013).

Singh e Frevert (2002) e Pellicciotti (2012) destacaram que o método Turc-Ivanov modificado apresenta duas equações, um aplicada para temperaturas acima de 5 °C e a outra para temperaturas abaixo de 5 °C conforme Equação 1.

$$E_{To} = \begin{cases} a. \Omega. (R + b). \left(\frac{T}{T+15} \right) & \text{para } T \geq 5 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.000036. (T + 25)^2. (100 - U) & \text{para } T < 5 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

ET_o - Evapotranspiração de referência diária (mm)

T - Temperatura mediado ar (°C)

R – Radiação solar (J/cm²)

a e b - Parâmetros do modelo a =0,0031 e b =209,4

Ω - é o fator adimensional mensal

U – Umidade relativa do ar (%)

O fator adimensional Ω proposto por Glugla e König (1989) varia de janeiro a dezembro, conforme descrito no capítulo III, e foi adotado em alguns trabalhos, a exemplo de Lahmer (2000), Conradt *et al.*, (2013) e Pohle *et al.*, (2013). Enquanto que Pellicciotti (2012) apresentou o fator Ω igual a 1,0, quando o valor da umidade relativa do ar for maior que 50%, dentre os trabalho que aplicaram este fator estão o de Roth *et al.*, (2005) e Abdelmageed (2013).

Alguns dos trabalhos encontrados na literatura utilizaram o método de Turc-Ivanov modificado para estimar a ET_o. A pesquisa realizada por Lahmer (2000) aplicou os resultados encontrados pelo método Turc-Ivanov modificado na estimativa do balanço hídrico, utilizado para auxiliar nos estudos de modelagem hidrológica em macro e mesoescalas, através da interpolação espacial, na bacia do rio Elba, localizada na Europa Central.

Outro trabalho aplicado para a mesma bacia foi desenvolvido por Conradt *et al.*, (2013), que utilizaram o método de Turc-Ivanov modificado, através do modelo SWIM, e compararam os resultados encontrados de ET_o com os obtidos pelos métodos: utilizando sensoriamento remoto e balanço hídrico. A região do rio Elba está localizado na Europa Central, onde a evapotranspiração segue um ciclo anual distinto, com valores insignificante no inverno, e chegam até 7 mm/dia no verão.

Roth *et al.*, (2005) compararam o desempenho do lisímetro com o método de Penman-Monteith (FAO 56), Turc-Ivanov modificado e Haude para a região de Thüringen, na Alemanha, região de clima temperado com grandes variações de temperatura, verões com temperatura média de 20°C e invernos, mais rigorosos, com temperatura média de 5°C. Os resultados mostram um bom desempenho do método de Turc-Ivanov modificado.

A pesquisa de Monteiro (2010) objetivou analisar o desempenho de vários métodos para estimar a evapotranspiração de referencia em duas regiões climaticamente distintas do

Brasil: Sul e Nordeste. Para região Nordeste, foram utilizados dados dos municípios de Petrolina e Cabrobó em Pernambuco, Barbalha no Ceará; Uruçuí, Teresina, São João e Bom Jesus no Piauí; Rita de Cássia e Jacobina na Bahia. Dentre os métodos utilizados nesta pesquisa estavam o de Turc-Ivanov modificado, que teve seus coeficientes calibrados para as regiões da pesquisa e, em seguida os resultados foram comparados com o método de Penman-Monteith (FAO 56). Os resultados apontaram um índice de desempenho de 0,95 para a região Sul e de 0,82 para a região Nordeste, sendo considerado como um dos melhores métodos, entre os de Hargreaves e Samani (1985), Camargo e Sentelhas (1997), Priestley e Taylor (1972), Doorenbos e Pruitt (1977) e Turc (1961).

Outra aplicação do método Turc-Ivanov modificado para estimar a ETo foi abordada no trabalho de Holsten *et al.*, (2013) subsidiando os cálculos de índices de riscos de incêndio em florestas da Alemanha. Esta região apresenta um clima temperado com temperatura diária variando entre 12,9 °C e 14,1 °C e precipitação anual entre 620-1000 mm.

O estudo de Abdelmageed (2013) utilizou o método Turc-Ivanov modificado para auxiliar em sua pesquisa, que buscou detectar a influência de diferentes sistemas de irrigação na eficiência do uso da água, da cultura e da salinidade do solo na área irrigada do oeste do delta, no Egito, região de clima semiárido mediterrâneo, com pouca chuva, e precipitações médias anuais de 100 a 200 mm. Os resultados encontrados indicaram um bom desempenho do método de Turc-Ivanov modificado para estimar a ETo, na região em estudo.

Recentemente, Pohle *et al.*, (2013) criaram modelos hidrológicos, como um pré-requisito para estudos climáticos, para as bacias hidrográficas dos rios Spree, Preto Elster, e Lusatian Neisse, localizadas na Europa Central. Auxiliando esta pesquisa, os autores utilizaram o método de Turc-Ivanov modificado para calcular um fator de correção dos modelos.

2.4 MODELO SWIM

2.4.1 Definições

Campos (2009) definiu modelo como um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procura explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades de um sistema. Os modelos são classificados em: físicos, analógicos e matemáticos.

O modelo físico representa o sistema por um protótipo em escala menor, na maior parte dos casos. Os analógicos valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos, para modelar o processo desejado, no sistema mais conveniente, (Tucci, 2005). E os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema por meio de equações matemáticas. Estes modelos são os mais versáteis, porque pode-se facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da grande velocidade de resposta (Santos, 2013).

De acordo com Tucci (2005) o modelo hidrológico é uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados. A utilização destes, segundo Marinho Filho *et al.*, (2012), tem sido bastante difundida, e suas aplicações na representação do comportamento de bacias hidrográficas têm apresentado bons resultados.

Não obstante, Santos (2013) afirmou que os modelos hidrológicos buscam integrar os diferentes processos do ciclo hidrológico, descrevendo a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evapotranspiração, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação, escoamento superficial e subsuperficial.

Desta forma, os modelos surgiram dentro da necessidade de responder às diferentes questões práticas e científicas, tentando explicar os componentes da relação precipitação como a infiltração, o escoamento em rios, e a evapotranspiração, integrando os diferentes componentes causais da natureza e dos fatores antrópicos. Estes apresentaram grandes avanços com a entrada da fase do geoprocessamento e do sensoriamento remoto, destacando a evolução dos modelos distribuídos e a representação da diversidade física da bacia hidrográfica (Tucci, 2005).

Rennó e Soares (2000) afirmaram que os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos: de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Outro fator importante, referente ao modelo hidrológico, está na sua capacidade de representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica, através da equacionalização dos processos (Tucci, 2012), sendo a bacia hidrográfica o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos (Rennó e Soares, 2000).

Alguns modelos trabalham com a desagregação espacial da bacia para níveis de sub-bacias ou microbacias. Segundo Tucci (2012) a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água precipitada que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um único leito, no seu exutório.

Com relação às sub-bacias, Faustino (1996) descreveu-as como áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal, que apresentam áreas maiores que 100 km² e menores que 700 km². O mesmo autor destacou que as microbacias são divisões da sub-bacia, com área inferior a 100 km², possuindo toda sua área com drenagem direta ao curso principal de uma sub-bacia.

2.4.2 Apresentação do modelo SWIM

O Soil and Water Integrated Model - SWIM é baseado em duas ferramentas anteriormente desenvolvidas o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold *et al.*, (1993), Arnold *et al.*, (1994)), e o Matsalu (Krysanova e Becker (1999); Krysanova *et al.*, (1999)).

O modelo SWIM foi desenvolvido para o uso, principalmente na Europa e em áreas temperadas. Entretanto, existe a possibilidade da sua aplicação em outras regiões (Krysanova *et al.*, 2000). Este modelo visa proporcionar a modelagem hidrológica e de qualidade da água, em mesoescala, para grandes bacias hidrográficas (de 100 a 10 mil km²). Trata-se de um modelo semi-distribuído, baseado no Sistema Informação Geográfica (SIG), com esquema de desagregação em três níveis: bacia, sub-bacias, e hidrotopos.

Os domínios dos modelos semi-distribuídos não são representados em forma de quadrícula, mas por manchas na paisagem com comportamento hidrológico uniforme, chamados hidrotopos (Conradt *et al.*, 2013). Estes são subáreas quase uniformes, configurando unidades de resposta hidrológicas (Monteiro e Viadana, 2009) (Figura 1).

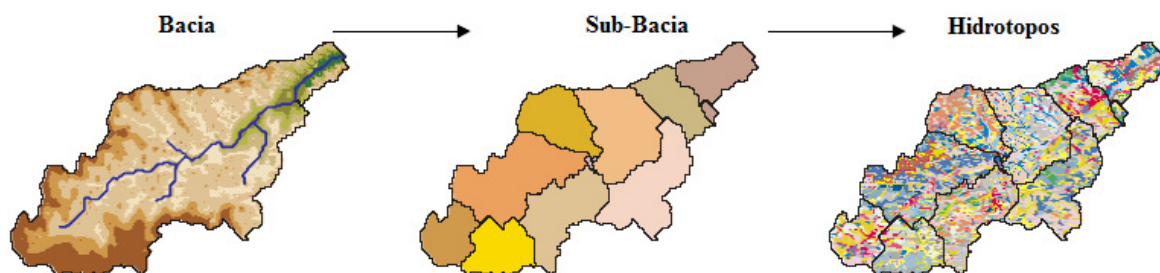


Figura 1 - Nível de desagregação implementado no SWIM. Fonte: Adaptado de Krysanova *et al.*, (2000)

Além disso, este modelo integra a dinâmica hidrológica, vegetação, erosão e fluxo de nutrientes. Baseado na equação do balanço hídrico, que utiliza dados de precipitação, evapotranspiração, percolação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial para a coluna de solo (Figura 2).

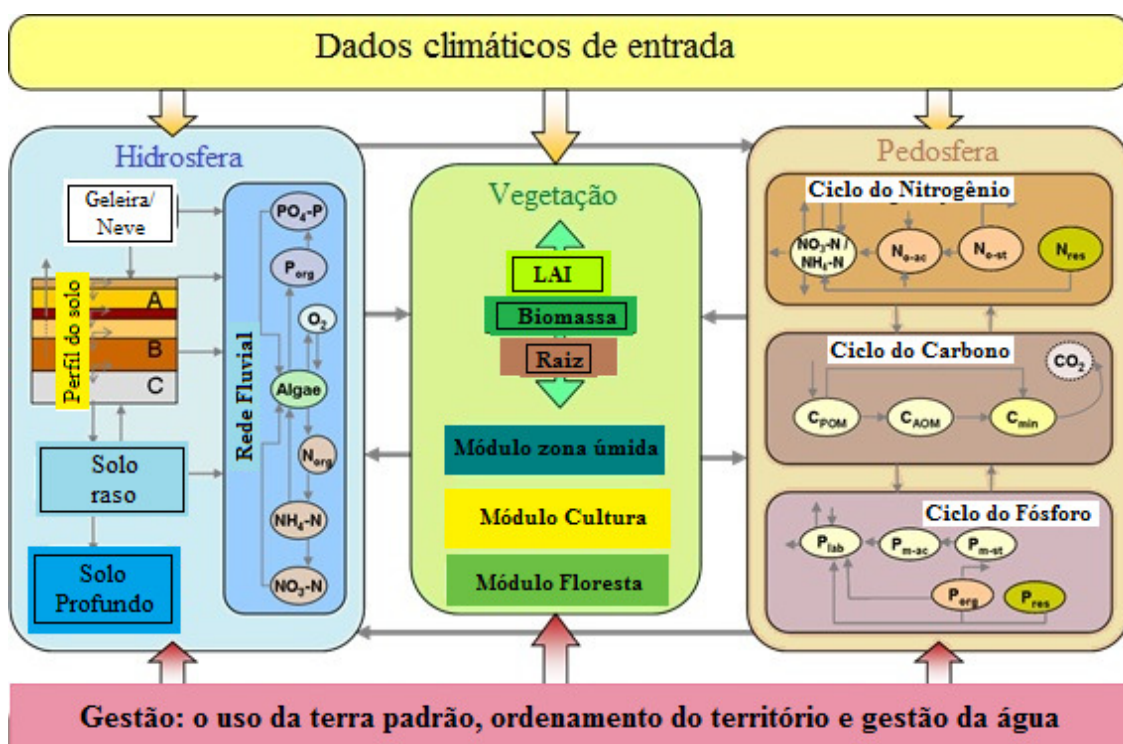


Figura 2 – Estrutura do SWIM. Fonte: Adaptado de Krysanova *et al.*, (2000).

O módulo de nitrogênio inclui as seguintes opções: nitrato, nitrogênio orgânico ativo e estável, nitrogênio orgânico no resíduo vegetal, enquanto o módulo de fósforo inclui: fósforo instável, fósforo mineral estável e ativo, fósforo orgânico e fósforo no resíduo vegetal. A saída de nutrientes para as águas superficiais e lixiviação para as águas subterrâneas são

mais importantes para o nitrogênio, ao passo que o fósforo é transportado principalmente com a erosão.

A representação das culturas e vegetação natural se apresenta como uma interface importante entre a hidrologia e os nutrientes, este permite simular todas as culturas como: trigo, cevada, milho, batata, alfafa, e outros, utilizando-se os valores dos parâmetros únicos para cada cultura, que foram obtidos em diferentes estudos de campo. Permite também simular o crescimento da cultura em uma estrutura distribuída para modelar grandes bacias e regiões.

A dinâmica hidrológica é representada no módulo hidrológico, baseado na equação do balanço hídrico. Este sistema de simulação hidrológica se divide em quatro volumes de controle: a superfície do solo, a zona radicular do solo, o aquífero raso, e do aquífero profundo. A zona radicular do solo é subdividida em várias camadas de acordo com a base de dados dos solos.

O balanço de água para o aquífero raso inclui recarga de águas subterrâneas, a ascensão capilar para o perfil do solo, o fluxo lateral e a percolação para o aquífero profundo. O balanço hídrico para a superfície do solo e coluna de solo inclui a precipitação, o escoamento superficial, evapotranspiração, o escoamento subsuperficial e a percolação.

Pode-se destacar ainda a possibilidade, deste modelo, de estimar a Evapotranspiração de referência, usando os métodos: de Priestley-Taylor (1972); de Penman-Monteith descrito por Monteith (1965); de Turc-Ivanov modificado e de Penman-Monteith (FAO 56) (Allen *et al.*, 1998).

2.4.3 Aplicação do modelo SWIM

Na literatura existem poucas pesquisas com o modelo SWIM para regiões do Brasil, sendo citado nos estudos desenvolvidos por Junqueira (2008) e Durães (2010), que, utilizaram o modelo SWAT. No entanto, a literatura apresenta a aplicação deste modelo em outros países para simulações hidrológicas voltadas para os seguintes estudos:

- i. Controle de cheiras e inundações, apresentado por Huang; Hattermann; *et al.*, (2013);
- ii. Baixas vazões em corpos d'água, aplicados na pesquisa de Huang; Krysanova; *et al.*, (2013);

- iii. Mudanças Climáticas, desenvolvidas por Hattermann *et al.*, (2011) e Němečková *et al.*, (2011);
- iv. Qualidade de água, elaborado por Huang *et al.*, (2009);
- v. Lixiviação de nutrientes do solo, realizado por Krysanova e Haberlandt (2002) e Haberlandt (2010);
- vi. Crescimento de culturas e vegetação natural, investigado por Hanasaki *et al.*, (2013);
- vii. Dinâmica do lençol freático, analisado por Hattermann *et al.*, (2002);
- viii. Gestão das águas, pesquisado por Conradt *et al.*, (2007);
- ix. Evapotranspiração, investigado por Conradt *et al.*, (2013).

Dentre as possíveis aplicações do modelo SWIM citadas anteriormente, está a pesquisa de Hanasaki *et al.*, (2008) que desenvolveram um modelo global e integrado de recursos hídricos, composto por seis módulos: hidrologia de superfície, caminhamento do rio, crescimento da cultura, operação do reservatório, estimativa da necessidade de fluxo ambiental e retirada de água por atividades antrópicas, cujo objetivo foi avaliar os recursos hídricos do mundo.

Este trabalho utilizou o modelo SWIM no módulo de crescimento da cultura. A simulação foi realizada utilizando a estrutura do Global Soil Wetness Project (GSWP2). Os autores destacaram que a simulação do escoamento e vazão foram validados por comparação com as observações e trabalhos anteriores, e o desempenho foi semelhante aos melhores estudos realizados. Este resultado indicou a aplicabilidade do modelo.

Abordando o tema qualidade da água, Hesse *et al.*, (2008), utilizaram o SWIM para modelar a qualidade da água em mesoescala do rio Rhin, sub-bacia do rio Elba. O objetivo desta pesquisa foi: responder a algumas questões específicas relativas à identificação de fontes pontuais e difusas de poluição por nutrientes na bacia hidrográfica; avaliar as possíveis influências do clima e mudanças de uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água e avaliar as possíveis medidas a serem tomadas, a fim de alcançar um "bom estado ecológico". A pesquisa simulou, no SWIM, o fluxo de nutrientes no solo, a vegetação, bem como o transporte de água e nutrientes para dentro da rede fluvial. A calibração do modelo apresentou resultados satisfatórios.

A pesquisa de Huang *et al.*, (2010) aplicou o modelo sequencialmente para cinco bacias hidrográficas da Alemanha (Ems, Weser, Elba, Danúbio superior e Baixo Reno) para

simular a dinâmica e os componentes da água. Os autores apontaram como uma importante vantagem do SWIM a integração do ciclo hidrológico com a vegetação e as interações entre os fluxos da água e os ecossistemas. Destacaram ainda, que o modelo permite a mudança tempo sazonal de estágios de crescimento da planta em condições de temperaturas elevadas. Por isso, representa mais uma ferramenta confiável para a avaliação do impacto do clima em comparação com outros modelos hidrológicos.

Em estudo recente, Conradt *et al.*, (2013) realizaram uma pesquisa na bacia do rio Elba, localizada na Europa central, esta bacia abrange 148 268 km², cerca de um terço dos mesmos dentro da República Checa e dois terços para a Alemanha. Este trabalho comparou três métodos na estimativa da evapotranspiração: o modelo SWIM sem qualquer calibração espacial, aplicando o método de Turc-Ivanov modificado para estimativa da ETo; a abordagem de sensoriamento remoto e o método de balanço hídrico.

A bacia do rio Elba foi dividida em hidrotopos, definidos pelo cruzamento do tipo de solo como o uso da terra. Para cada hidrotopo foram modelados, em escala diária, o crescimento da vegetação e o fluxo de água e de nutrientes.

Os resultados apresentam uma boa correlação entre o modelo SWIM e a abordagem com sensoriamento remoto, nas 72 sub-bacias Alemãs. Mas, o mesmo desempenho não pôde ser observado ao comparar os resultados do SWIM e da abordagem de sensoriamento remoto com o método de balanço hídrico. Fracas correlações também foram observadas comparando os três métodos para as sub-bacias da República Checa.

Outra pesquisa na bacia do rio Elba utilizando o modelo SWIM, foi realizada por Nied *et al.*, (2013). Neste trabalho, os autores investigaram a relação entre padrões de umidade do solo e ocorrência de inundações na bacia do rio Elba, os resultados mostraram um bom desempenho do modelo.

Diante de todos os trabalhos encontrados na literatura pôde-se observar, que, de uma forma geral, a aplicação do modelo SWIM apresentou bons desempenhos para as regiões estudadas, e nas diversas áreas de aplicação do modelo, desde estudo de mudanças climáticas a identificação da qualidade da água. O mesmo pôde ser observado na utilização do método de Turc-Ivanov modificado para estimar a ETo.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o procedimento metodológico utilizado para realização desta pesquisa, descrevendo as etapas de tratamento de dados, estimativa da evapotranspiração de referência, calibração e análise do modelo SWIM e validação do método de Turc-Ivanov modificado, conforme apresentado no fluxograma metodológico, ilustrado na Figura 03.

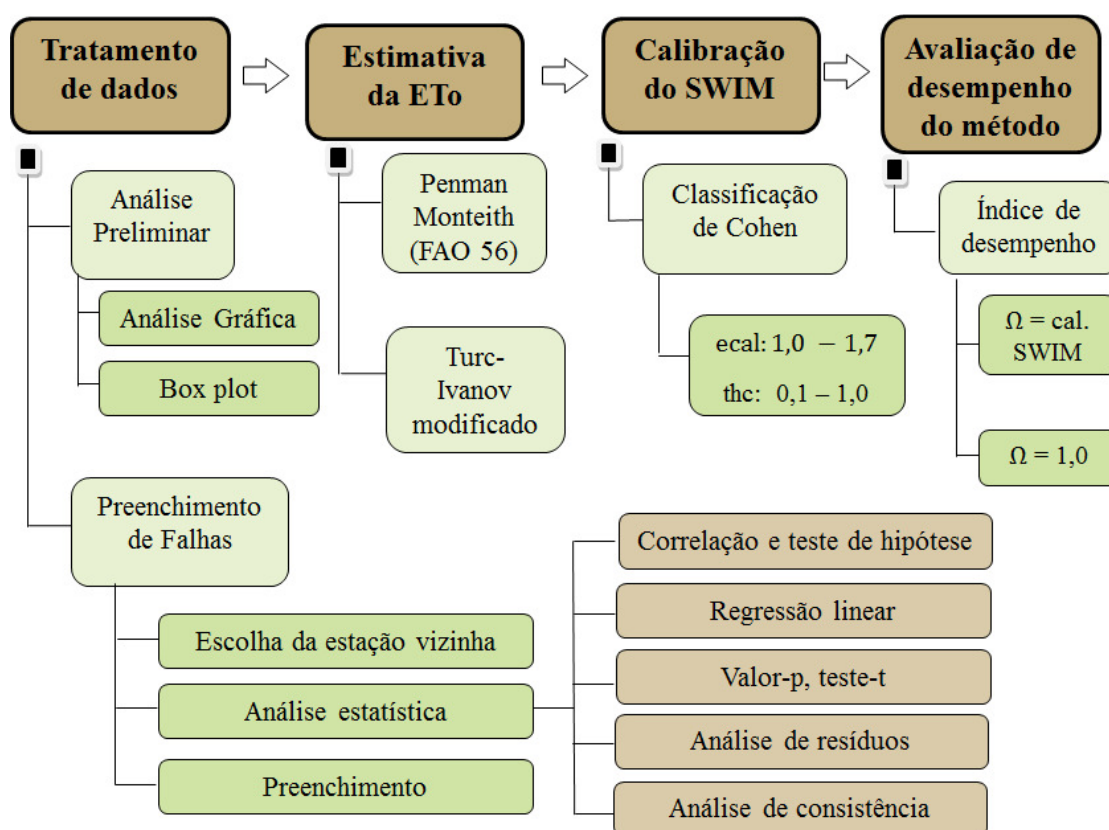


Figura 3 – Fluxograma metodológico

A metodologia utilizada nesta pesquisa inicia-se com o tratamento de dados, esta etapa está subdividida em análise preliminar dos dados da estação Gameleira e preenchimento das falhas encontradas nas séries históricas das variáveis hidrológicas utilizadas neste trabalho. Em seguida foi estimado a ETo pelos métodos de Penman-Monteith (FAO 56) e Turc-Ivanov modificado, no modelo SWIM. Necessitando de calibração do modelo e por

último foi avaliado o desempenho do método de Turc-Ivanov modificado comparado com o método de Penman-Monteith (FAO 56). Estas etapas foram descritas nos itens a seguir.

3.1 TRATAMENTO DE DADOS

3.1.1 Análise preliminar

Segundo Naghettini e Pinto (2007) a análise preliminar de uma amostra de dados hidrológicos compreende um conjunto de métodos e técnicas que visam extrair as características empíricas essenciais do padrão de distribuição de uma variável hidrológica. Os mesmos autores destacaram como métodos disponíveis: o sumário numérico e estatística descritiva; métodos exploratórios e a apresentação gráfica.

Analisando os dados em estudo inicialmente utilizou-se o método de apresentação gráfica, com a aplicação do gráfico de linha representando, no eixo vertical, os valores diários da série e, no eixo horizontal, o intervalo de tempo em dias, possibilitando assim, a identificação de dados inconsistentes das variáveis: temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, precipitação e velocidade dos ventos.

No intuito de verificar a existência de valores atípicos ou *outliers*, nas séries das variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade dos ventos, aplicou-se um método exploratório chamado de diagrama Box plot, que consiste em um retângulo definido pelo primeiro e pelo terceiro quartis, contendo a mediana (Equação 2) em seu interior relativa às observações médias diárias de cada variável em estudo (Naghettini e Pinto, 2007).

$$x_{md} = x_{\left(\frac{N+1}{2}\right)} \text{ se } N \text{ for impar ou } x_{md} = \frac{x_{\left(\frac{N}{2}\right)} + x_{\left(\frac{N}{2}+1\right)}}{2} \text{ se } N \text{ for par} \quad (2)$$

Onde: x_{md} é a mediana e N é o número de observações.

Para calcular os três quartis, inicialmente dividiu-se o conjunto de dados em duas partes, cada uma com metade dos dados, calculando, assim, a mediana ou segundo quartil. Em seguida considerou-se as duas partes que ela gerou, uma abaixo da mediana e outra acima da mediana, ambas têm o mesmo número de observações. O primeiro quartil (Q_1) foi calculado

como a mediana da parte inferior e o terceiro quartil (Q_3) foi calculado como a mediana da parte superior. De posse destes valores pode-se calcular a amplitude interquartil (AIQ), obtida por (Naghettini e Pinto, 2007):

$$AIQ = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

O procedimento adotado para identificar os valores discrepantes ou atípicos foi traçar no gráfico de linha, apresentado anteriormente, uma linha vertical até o ponto que não exceda ($Q_3 + 1,5AIQ$), considerado limite superior para a identificação de *ouliers*. De modo análogo, traçou-se outra linha até o limite dado por ($Q_1 - 1,5AIQ$). As observações que estavam acima ou abaixo desses limites foram identificadas no diagrama e consideradas *outliers*.

Uma vez identificadas falhas nas séries, procedeu-se a etapa de preenchimento destes dados.

3.1.2 Preenchimento de falhas

Após a análise preliminar, na qual são identificadas falhas e inconsistências nas séries, realizou-se a etapa de preenchimento de falha, que permitiu o preenchimento de lacunas nos registros ou a substituição de dados inconsistentes. Este procedimento utilizou os dados de estações situadas em bacias ou regiões vizinhas como valores de comparação, como proposto por Azevedo (2010).

a) Escolha das estações vizinhas

Para a escolha das estações utilizadas no preenchimento de falhas consultou-se o banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPETEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do qual foram selecionadas nove estações mais próximas da estação de Gameleira, descritas na Tabela 1.

Algumas das estações selecionadas apresentam-se distantes da estação Gameleira, isto se deve ao fato do Brasil possuir poucas estações de monitoramento hidrometeorológico, comparados com outros países, como, por exemplo, a Inglaterra e a Alemanha.

Tabela 1 - Descrição das estações vizinhas à área de estudo

Estações	Long(°)	Lat(°)	Altitude	Usuário
Barreiros	-35,19	-8,82	22 m	ITEP – Instituto de Tecnologia de Pernambuco
Carpina	-35,24	-7,85	184 m	
Caruaru	-35,91	-8,24	488 m	
Goiana	-34,94	-7,64	13 m	
Vitória de Santo Antão	-35,30	-8,12	157 m	
Palmares	-35,57	-8,66	108 m	
Vertentes	-35,97	-7,90	401 m	
Recife	-34,92	-8,06	10 m	Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos. CPETEC/INPE
Olinda	-34,87	-8,04	18 m	SRH – Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco

Das estações selecionadas, oito são estações meteorológicas: Barreiros, Caruaru, Goiana, Olinda, Recife, Palmares, Vertentes e Vitória de Santo Antão, e a estação de Carpina é agrometeorológica, sendo todas localizadas no estado de Pernambuco (Figura 4).

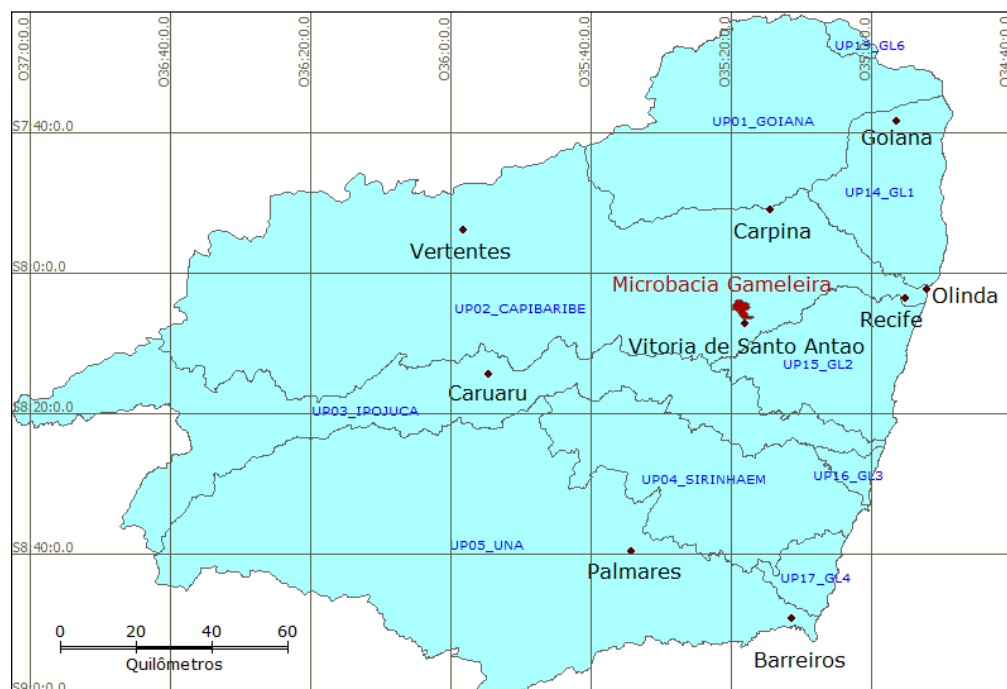


Figura 4 - Localização das estações de coleta de dados. Fonte: Autoria própria.

Após esta seleção preliminar foram feitas algumas análises com base nos seguintes critérios: proximidade da estação Gameleira, pertencer à bacia hidrográfica do rio Capibaribe,

compatibilidade da série histórica das estações com a estação de Gameleira para o período de 2004 a 2008 e ausência de falhas ou dados inconsistentes na série para o período da pesquisa.

Realizada a escolha da estação para preencher as falhas, com base nos critérios citados, onde apenas uma estação atendeu a todos estes critérios, analisou-se a confiabilidade desta relação com base em análise estatística.

b) Análise de Correlação

Para o estudo da relação linear, inicialmente faz-se necessário quantificar a força da relação a partir da correlação, para depois explicar a forma dessa relação aplicando a regressão.

A análise de correlação mede o grau de relacionamento entre duas variáveis quantitativas, o termo correlação indica a influência que tem os valores de uma variável (x) sobre os valores de uma variável (y). Para representar a correlação adotou-se o chamado coeficiente de correlação linear de Pearson, descrito por Naghettini e Pinto (2007) e Montgomery (2009), cujo estimador é apresentado na Equação 4:

$$r = \frac{S_{x,y}}{S_x S_y} \quad (4)$$

Onde: r é coeficiente de correlação linear ($-1 \leq r \leq 1$), S_{xy} é covariância entre as variáveis determinada pela Equação 5, S_x e S_y são os desvios-padrão das amostras calculados pelas Equações 6 e 7 respectivamente:

$$s_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (5)$$

$$s_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (6)$$

$$s_y = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1} \quad (7)$$

Onde: x e y são as variáveis; $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias aritméticas de cada uma das variáveis; n é o tamanho da amostra; x_i e y_i são as observações simultâneas das variáveis.

Naghetini e Pinto (2007) destacam que o coeficiente de correlação linear de Pearson é adimensional, variando entre -1 e +1. A correlação linear positiva é perfeita quando o coeficiente de Pearson é igual a 1, e quando o coeficiente de correlação de Pearson é igual a -1 a correlação linear negativa é perfeita.

Inicialmente se investigou o grau de correlação existente entre a variável temperatura média diária da estação Gameleira com a Estação Recife, onde foi possível construir uma função que descreveu o relacionamento entre elas. A análise de correlação também foi aplicada para os valores médios diários das variáveis: temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Já para correlacionar a precipitação utilizou-se a precipitação acumulada diária das duas estações.

c) Teste de hipótese sobre o coeficiente de correlação

Após realizar a análise de correlação verificou-se sua adequabilidade a partir do teste de hipótese, onde foi possível testar se a hipótese de que o coeficiente de correlação linear é igual à zero, de acordo com Naghetini e Pinto (2007) e aplicada por Mota *et al.*, (2010) e Alencar *et al.*, (2012), a estatística apropriada para este teste esta descrita na Equação 8 :

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (8)$$

Onde: t_0 é a estatística do teste; r é a estimativa do coeficiente de correlação linear e n é o tamanho da amostra. A estatística do teste, t_0 , segue uma distribuição t de Student com $(n - 2)$ graus de liberdade. A hipótese nula $H_0 : \rho = 0$ é rejeitada se (Equação 9):

$$|t_0| > t_{\alpha/2, n-2} \quad (9)$$

Sendo, $t_{\alpha/2, n-2}$ o valor crítico para a estatística do teste bilateral para um nível de significância α , com $(n - 2)$ graus de liberdade. Adotou-se o nível de significância de 0,05.

d) Regressão linear simples

A técnica de regressão estuda a relação linear entre variáveis quantitativas, construindo uma função que relaciona as variáveis y e x , onde y é a variável de interesse do estudo, denominada de variável dependente ou variável resposta, e x é conhecida como variável independente ou variável explicativa. O termo regressão (de regredir) se deve ao fato da técnica observar um histórico de valores passados (dos pares y, x), para realizar previsões para um futuro bem próximo.

Para preencher as falhas identificadas nas séries históricas das variáveis: temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa do ar e velocidade do vento e precipitação, aplicou-se a técnica estatística conhecida como análise de regressão linear simples. Já para preencher as falhas da radiação solar aplicou-se a regressão linear múltipla, que será descrita no próximo subitem.

Denomina-se regressão linear simples quando existe uma única variável explicativa (x) para prever a variável resposta (y). O objetivo desta análise, segundo Naghettini e Pinto (2007), é encontrar a reta que melhor represente a “nuvem de pontos” do Diagrama de dispersão, representada pela Equação 10 (Naghettini e Pinto, 2007) .

$$y = \alpha + \beta x + e \quad (10)$$

Onde: y é a variável dependente, x é a variável independente, α e β são os coeficientes do modelo e e denota os erros ou resíduos da regressão. Os coeficientes α e β da reta teórica são estimados através dos dados observados fornecidos pela amostra, obtendo uma reta estimativa na forma apresentada na Equação 11 (Naghettini e Pinto, 2007):

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad (11)$$

Onde: y_i é a variável resposta, a é o termo independente e b é o coeficiente da variável explicativa x_i .

Para traçar a reta adequada utilizou-se o método dos mínimos quadrados, este adota a reta que torna mínima a soma dos quadrados dos erros ou resíduos da regressão (Naghettini e Pinto, 2007).

Identificou-se também o coeficiente de determinação (Equação 12), a partir da relação entre a soma dos quadrados devidos à regressão (SQRe g) e a soma total dos quadrados (SQT):

$$r^2 = \frac{\text{Variância Explicada}}{\text{Variância total}} = \frac{SQReg}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

Sendo r^2 o coeficiente de determinação ($0 \leq r^2 \leq 1$), y_i o valor observado da variável dependente, $\hat{y}_i$ o valor estimado da variável dependente e $\bar{y}$ é a média da variável dependente.

e) Análise de regressão linear múltipla

Quando existem duas ou mais variáveis explicativas correlacionadas com uma mesma variável resposta, diz-se que será construído um modelo de regressão linear múltipla (Montgomery, 2009).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

Onde: Y_i é a variável dependente ou prevista; $X_1, X_2, \dots, X_p$ são as variáveis independentes ou explicativas e $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ são os coeficientes de regressão e P é o número de variáveis independentes.

O coeficiente de determinação é calculado aplicando a Equação 12. Este modelo, depois de testado, foi utilizado para preencher as falhas da radiação solar da estação Gameleira, relacionando a série desta variável com as variáveis, consideradas explicativas: temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação da própria estação de Gameleira. A escolha da regressão múltipla se deve ao fato das séries históricas de radiação solar das estações vizinhas apresentarem dados inconsistentes (períodos com valores constantes de radiação solar ou sem observações), o que inviabilizou a aplicação destas séries no preenchimento das falhas.

f) Teste sobre parâmetros do modelo

Após realizar a análise de regressão foi necessário investigar se as variáveis explicativas consideradas na modelagem realmente deveriam permanecer na equação final da previsão. Realizou-se esta tarefa a partir de testes sobre os valores dos parâmetros que representam tais variáveis. Estes testes foram averiguados por meio da estatística de teste t de Student.

A decisão se o parâmetro é ou não próximo de zero foi tomada através do Valor- p . Este é uma probabilidade que indica se a variável explicativa que este parâmetro representa pode ou não ser excluída da formulação do modelo. Para tanto esta probabilidade segue o seguinte critério (Naghetini e Pinto, 2007):

Valor- $p > 0,05$ (a variável pode ser excluída da formulação do modelo);

Valor- $p \leq 0,05$ (a variável permanece na formulação do modelo).

No caso da análise da regressão múltipla aplicou-se a análise de variância utilizando o teste F (conhecido como Fisher-Snedecor), antes da realização do teste t , com o objetivo de investigar se pelo menos uma variável explicativa é significativa para ajudar a prever a variável resposta. A análise dos valores encontrados neste teste segue o mesmo critério do valor- p do teste t (Montgomery, 2009).

g) Análise de resíduos

A análise residual é uma etapa que deverá ser realizada para toda e qualquer análise de regressão que se pretende construir, pois trata da validade estatística do modelo de regressão, bem como dos resultados que são gerados por este. Para realizar esta análise construiu-se um gráfico dos resíduos com a ordem amostral em que eles aparecem na amostra.

Na análise dos resíduos foi verificado se: os resíduos das amostras relacionadas são independentes uns dos outros; a média dos resíduos é igual a zero e os erros aleatórios acometidos pela formulação do modelo de regressão não apresentam nenhum padrão de tendência que viole a suposição de variância constante. Atendendo estes critérios o modelo de regressão pode ser utilizado no preenchimento de falhas (Naghetini e Pinto, 2007).

h) Análise de consistência pelo método de duplas massas

Este método foi aplicado para a variável precipitação e consiste em selecionar os postos de uma estação vizinha, acumular para cada um deles os valores e plotar em um gráfico cartesiano os valores acumulados correspondentes ao posto a consistir (eixo ordenado) com os valores médios das precipitações acumuladas (eixo das abcissas) que servirá como base para comparação. Se os valores dos postos a consistir forem proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem se alinhar segundo uma única reta. A declividade desta reta determina o fator de proporcionalidade entre ambas às séries (Tucci, 2012).

3.2 ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO O MODELO SWIM

Após o preenchimento das falhas foi possível estimar a evapotranspiração diária, no modelo SWIM, pelo método de Turc-Ivanov modificado e o método de Penman-Monteith (FAO 56) recomendado por Allen *et al.*, (1998).

Apesar do modelo SWIM ter sido desenvolvido para o uso, principalmente na Europa e áreas temperadas, Krysanova *et al.*, (2000) afirmam que existe a possibilidade da sua aplicação em outras regiões. Diante deste fato, o modelo foi testado, para estimar a evapotranspiração de referência, em uma região de transição entre a Zona da Mata e o Semi-árido de Pernambuco, suas características estão descritas no capítulo IV.

Para estimar a evapotranspiração de referência diária na Microbacia hidrográfica de Gameleira utilizou-se um módulo do modelo SWIM escrito em MS-DOS, que possui uma interface não muito amigável, o que dificulta sua utilização pelo usuário. Mas, uma vez conhecendo o modelo, é possível estimar a ETo com rapidez.

A entrada dos dados no modelo ocorre com a preparação dos arquivos clim1.dat e clim2.dat. O primeiro armazena os dados de radiação solar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade dos ventos, e o segundo arquivo contém os dados de temperatura máxima, mínima e média do ar.

No modelo SWIM a escolha do método a ser utilizado se faz com a indicação deste no parâmetro “iemeth” do arquivo de calibração chamado de “elbe.bsn”, este parâmetro possibilita a escolha do método entre as opções: 0 para o método de Priestley-Taylor; 1 para Turc-Ivanov modificado; 2 para Penman-Monteith (original) e 3 para Penman-Monteith (FAO

56). A Figura 5 ilustra a interface deste arquivo, a seta aponta o local de escolha do método. Os coeficientes de calibração da evapotranspiração (ecal) e o fator de correção para a evapotranspiração (thc) utilizado no método de Penman-Monteith (FAO 56), também estão destacados na Figura 5.

```

SWITCH PARAMETERS
0      isc      =0/1, SC: READ/CALC
0      icn      =0/1, CN: STANDARD / cnum1,cnum3 FOR ALL SOILS
0      idlef    =0/1, DAY LENGTH EFFECT IN CROP: WITHOUT/WITH
0      intercep =0/1, INTERCEPTION: WITHOUT/WITH
1 ← iemeth     =0/1/2/3, EVAPORATION: Priestley-Taylor/Turc-Ivanov/Penman-Monteith
0      idvkw    =0/1, EVAPORATION CALCULUS: DVWK-Merkblatt 238

BASIN, INITIALIZATION & CALIBRATION PARAMETERS
da      bff
147422.56 .029349
cnum1    cnum2    cnum3
1.0000000 1.0000000 1.0000000
ecal     thc
1.0      .300000
  
```

Figura 5 – Parâmetros de calibração dos métodos no modelo SWIM. OBS: Considera-se o ponto (.) como separador decimal.

Os resultados da ETo diária, gerados pelo modelo após a escolha do método a ser utilizado, são apresentados no arquivo “htp-1.prn”. Como mencionado anteriormente, na pesquisa foram utilizados os métodos de Turc-Ivanov modificado e de Penman-Monteith (FAO 56), o procedimento para a estimativa destes métodos está descrito nos itens a seguir.

3.2.1 Método de Turc-Ivanov modificado

O método de Turc-Ivanov modificado abordado por DVWK (1996), aplicado sem dados de velocidade do vento, foi escolhido para o cálculo da evapotranspiração de referência. Este foi originalmente desenvolvido para Alemanha Oriental por Richter (1984) e Wendling e Schellin (1986). A fórmula, apresentada na Equação 1, foi aplicada em uma região com temperaturas maiores que 5 °C, descrita na Equação 14.

$$ET_o = 0,0031 \cdot \Omega \cdot (R + 209,4) \cdot \left(\frac{T}{T + 15} \right) \cdot c \cdot ecal \quad (14)$$

Esta equação combinada estima a evapotranspiração de referência diária ETo em mm, utilizando: a temperatura média T em °C, a radiação solar R em J.cm⁻², c é o fator específico de uso da terra que varia de 0,9 para terras cultiváveis a 1,3 para superfícies de

água (ATV-DVWK, 2002). Para a calibração do modelo utilizou-se o fator $c = 1,0$ referente à pastagem. E Ω é o fator adimensional mensal. Além dos fatores descritos no método de Turc-Ivanov modificado, o modelo SWIM acrescenta um fator de calibração chamado de ecal.

Inicialmente, adotou-se para os valores de Ω , os indicados na calibração do modelo SWIM, visto que este fator não é um dado de entrada do modelo e faz parte do programa fonte, conforme Anexo 1, fato este, que dificultou sua calibração. No modelo SWIM este fator inicialmente estava variando entre 0,7 em dezembro e janeiro e 1,25 para maio, conforme Tabela 2, calibrado para a região da Alemanha onde o método de Turc-Ivanov modificado foi desenvolvido, como relatam Conradt *et al.*, (2013).

Tabela 2 – Valores mensais do fator Ω . Fonte: Adaptado do modelo SWIM.

Mês	Valor de Ω	Mês	Valor de Ω
Janeiro	0,70	Julho	1,05
Fevereiro	0,85	Agosto	0,95
Março	0,95	Setembro	0,90
Abril	1,05	Outubro	0,80
Maio	1,25	Novembro	0,75
Junho	1,15	Dezembro	0,70

Em uma segunda análise adotou-se $\Omega = 1,0$ para todos os meses, conforme proposto por Pellicciotti (2012), que considera este fator igual a 1,0 para regiões onde a umidade relativa do ar é maior que 50 %. Como a região onde a pesquisa foi realizada apresenta esta característica este procedimento pôde ser adotado.

3.2.2 Método de Penman-Monteith (FAO 56)

O método de Penman-Monteith recomendado pela FAO 56 e expresso na Equação 15, foi utilizado como referência na análise de desempenho do método de Turc-Ivanov modificado.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (15)$$

Onde: ETo a evapotranspiração de referência expressa em mm, R_n o saldo de radiação na área da cultura em MJ m^{-2} , G a densidade de fluxo de calor do solo em MJ m^{-2} ; T temperatura média do ar a 2 m de altura em $^{\circ}\text{C}$, u_2 a velocidade do vento a 2 m de altura em m s^{-1} , e_s a pressão de vapor saturado (kPa), e_a a pressão de vapor atual (kPa), $e_s - e_a$ a saturação de déficit de pressão de vapor (kPa), Δ é o declive da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

A equação utiliza dados climatológicos de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Os demais dados necessários para a estimativa da ETo foram obtidos a partir de fórmulas matemáticas, que serão apresentadas a seguir:

a) Cálculo da constante psicrométrica (γ)

Para o cálculo de γ utiliza-se a Equação 16 (Allen *et al.*, 1998).

$$\gamma = \frac{C_p P}{\epsilon \lambda} = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (16)$$

Onde γ é a constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], λ o calor latente de vaporização, 2,45 [MJ kg^{-1}], c_p calor específico a pressão constante, $1,013 \times 10^{-3}$ [$\text{MJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$], ϵ relação peso molecular de vapor / ar seco água = 0,622 e P a pressão atmosférica [kPa] que é calculada pela Equação 17, e necessita da elevação em relação ao nível do mar z (m) (Allen *et al.*, 1998).

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (17)$$

b) Cálculo do declive da curva de pressão de vapor (Δ)

Para o cálculo da evapotranspiração é necessário também conhecer o declive da relação entre a pressão de vapor saturado e a temperatura. O declive da curva a uma dada temperatura é dada por (Allen *et al.*, 1998):

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (18)$$

Onde: Δ é o declive da curva de pressão de vapor de saturação à temperatura do ar T (kPa ° C-1), T é a temperatura do ar T (° C) e exp [...] 2,7183 (base de logaritmo natural) elevado à potência [...].

c) Cálculo da pressão de vapor saturado (e_s)

Para obter a pressão de vapor saturado (e_s) é necessário calcular primeiro a pressão de vapor de saturação e^o (T) à temperatura do ar T (° C), para tanto utiliza-se a Equação 19 (Allen *et al.*, 1998), como objetivo de encontrar as pressões de vapor saturado e^o (Tmax) e e^o (Tmin) à temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin), respectivamente.

$$e^o(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad (19)$$

Os dados obtidos na Equação 19 são aplicados na Equação 20 para calcular a pressão de vapor saturado (e_s).

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (20)$$

d) Cálculo da pressão real de vapor (e_a)

Dentre as várias equações existentes para calcular a pressão real de vapor aplicou-se a Equação 21 (Allen *et al.*, 1998), utilizando dados de temperatura máxima do ar (T_{max}) em °C, temperatura mínima do ar (T_{min}) em °C e umidade relativa média do ar (RH_{med}) em %.

$$e_a = \frac{RH_{med}}{100} \left[\frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \right] \quad (21)$$

O déficit de pressão de vapor é a diferença entre a saturação (e_s) e a pressão de vapor efetivo (e_a) para uma dado período de tempo.

e) Cálculo da densidade de fluxo de calor do solo (G)

O fluxo de calor no solo (G) foi considerado desprezível, para períodos diários, por se tratar de um intervalo de tempo relativamente grande.

f) Cálculo do saldo de radiação na área da cultura (R_n)

O saldo de radiação (R_n) é a diferença entre a radiação de ondas curtas líquidas de entrada (R_{ns}) e da radiação de onda longa de saída (R_{nl}).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (22)$$

A radiação de onda longa R_{nl} pode ser calculada pela Equação 23 (Allen *et al.*, 1998).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{máx.K} + T_{mín.K}}{20,14} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (23)$$

Em que: R_{nl} é a radiação líquida de onda longa ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903.10^{-9} \text{ MJ.K}^{-4}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); $T_{máx,K}$ e $T_{mín,K}$ são as temperaturas máximas e mínimas absolutas (K); e_a é a pressão real de vapor (kPa) e R_{so} é a radiação solar em dias claros ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). R_s pode ser obtido através da Equação 24 (Allen *et al.*, 1998), tomando-se $n=N$.

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_T \quad (24)$$

Sendo: R_s é a radiação solar de ondas curtas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); n é o número de horas de brilho solar (h); N é o fotoperíodo (h) descrito na Equação 26 (Allen *et al.*, 1998), a_s e b_s são constantes de regressão, sendo que a_s representa a fração da radiação extraterrestre que chega à terra em dias nublados e $a_s + b_s$ é a fração da radiação extraterrestre que chega à terra em dias claros e R_T é a radiação extraterrestre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) calculada pela Equação 25 (Allen *et al.*, 1998).

$$R_T = \frac{24,60}{\pi} \cdot G_{SC} d_R [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (25)$$

Onde: R_T é a radiação extraterrestre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), G_{SC} é a constante solar igual a $0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$, ω_s é o ângulo horário do pôr-do-sol (radianos), d_R é a distância relativa terra-sol, δ é a declinação solar (radianos) e φ é a latitude (radianos).

O fotoperíodo representa a duração máxima possível da insolação solar, utilizando o ω_s (ângulo horário do pôr-do-sol em radianos), sendo dada por (Allen *et al.*, 1998):

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (26)$$

Para calcular o ângulo horário do pôr-do-sol (ω_s), a distância relativa terra-sol (d_R) e a declinação solar utilizou-se as seguintes equações (Allen *et al.*, 1998):

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (27)$$

$$d_R = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (28)$$

$$\delta = 0,4093 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (29)$$

$$J = 30,42 \cdot M - 15,23 \quad (30)$$

Onde: J é o dia Juliano (adimensional), M é o índice do mês em questão (janeiro = 1...; junho = 6...; dezembro = 12);

3.3 CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO SWIM

Para calibração do modelo comparou-se os dados da ETo estimados, pelo método Penman-Monteith FAO 56, da Plataforma de coleta de dados da estação experimental de Gameleira, com os dados obtidos no modelo SWIM a partir do mesmo método, variando o coeficientes de calibração (e_{cal}) entre 1,0 e 1,7 e o fator de correção para evapotranspiração

potencial (thc) entre 0,1 e 1,0. Este procedimento buscou encontrar valores ótimos para relação, o que irá indicar o desempenho do modelo no cálculo da ETo. O desempenho do modelo foi identificado a partir da análise de correlação (r) (Equação 4) e enquadrado pela classificação de Cohen (1988) apud in Cunha *et al.*, (2013) como: “muito baixo” ($r < 0,1$); “baixo” ($0,1 < r < 0,3$); “moderado” ($0,3 < r < 0,5$); “alto” ($0,5 < r < 0,7$); “muito alto” ($0,7 < r < 0,9$); e “quase perfeito” ($r > 0,9$).

3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MÉTODO

Os dados de ETo resultantes da aplicação do método de Turc-Ivanov modificado, variando o Ω mensalmente conforme Tabela 2, foram comparados com o método de Penman-Monteith (FAO 56), admitido como estimativa padrão, ambos foram submetidos à análises estatística, utilizando o coeficiente de determinação (r^2), dado pela Equação 12.

A mesma análise estatística foi aplicada para analisar a relação entre o método de Turc-Ivanov modificado, adotando $\Omega = 1,0$ e método de Penman-Monteith (FAO 56).

A exatidão das estimativas, que está relacionada com o afastamento dos valores estimados em relação aos observados, foi avaliada através do índice de concordância (d) proposto por Willmott *et al.*, (1985) utilizada nas pesquisas de, Oliveira (2007), Moura (2009) e Cunha *et al.*, (2013), dado por:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [(P_i - O) + (O_i - O)]}, 0 \leq d \leq 1 \quad (31)$$

Onde: O_i são os valores estimados pelo método padrão; P_i , são os valores estimados pelos métodos propostos; O , a média dos valores estimados pelo método padrão; e N é o número de eventos.

O desempenho de cada método foi avaliado através do índice de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997), denominado de índice de concordância (c). O índice “c” reúne o coeficiente de correlação (r) e o de exatidão (d), sendo expresso da seguinte forma:

$$c = r \cdot d \quad (32)$$

A avaliação quantitativa e qualitativa do índice de desempenho foi realizada conforme classificação listada na Tabela 3 (Camargo e Sentelhas, 1997).

Tabela 3 – Descrição do índice de desempenho “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 – 0,85	Muito bom
0,66 – 0,75	Bom
0,61- 0,65	Mediano
0,51 – 0,6	Sufrível
0,41 – 0,5	Mau
≤ 0,40	Péssimo

A metodologia descrita neste capítulo foi aplicada com o intuito de avaliar o desempenho do método Turc-Ivanov modificado para a Bacia experimental de Gameleira. As características desta região estão descritas no capítulo IV.

CAPÍTULO IV

ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo apresenta as características fisiográficas e climatológicas da área de estudo, qual seja a microbacia experimental de Gameleira, localizada no município de Vitória de Santo Antão, no Estado de Pernambuco. A escolha desta área se deve ao fato de ser uma estação monitorada pelo Grupo de pesquisas em Recursos Hídricos (GRH) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por isso apresenta dados confiáveis. O conhecimento das características da região de interesse da pesquisa é indispensável nas discussões dos resultados alcançados.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para realização do estudo foi a bacia experimental do riacho de Gameleira, inserida na Sub-Bacia do rio Tapacurá, que pertence a bacia hidrográfica de rio Capibaribe (Figura 6). Com uma área de drenagem de 470,5 km², o rio Tapacurá possui doze afluentes: os riachos Pacas, Natuba, Itapessirica, Pororoca, Água Azul, Miringaba, Bento Velho e Tamatá-Mirim e o rio Várzea do Uma, localizados na margem direita, enquanto pela margem esquerda estão os riachos Jurubeba, Gameleira e do Meio.

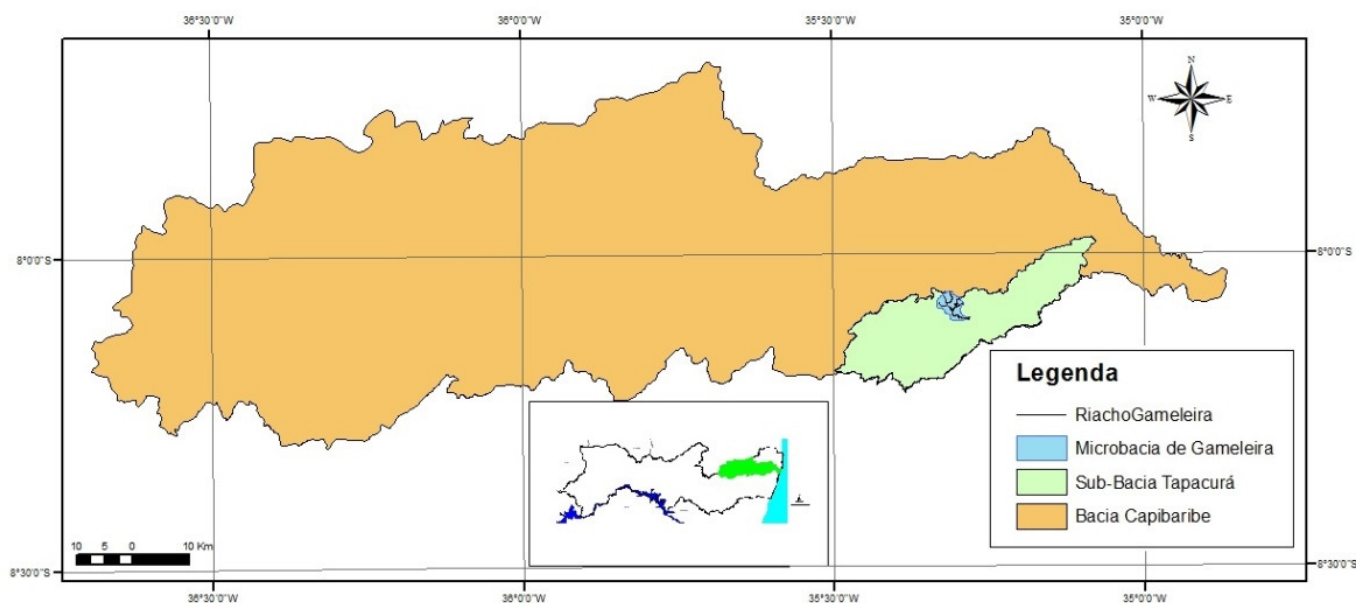


Figura 6- Localização da Microbacia de Gameleira Escala:1:900.000. Fonte: Autoria própria.

A microbacia do Riacho Gameleira está localizado no município de Vitória de Santo Antão, a oeste da região metropolitana do Recife em Pernambuco, entre as latitudes 8° 06' 30" e 8° 03' 30" sul e longitudes de 35° 20' 00" a 35° 16' 30" a oeste de Greenwich, trata-se de uma área de transição entre a zona da mata e o semiárido.

4.1.1 Características fisiográficas da bacia

Os dados descritos na Tabela 4 apresentam as características fisiográficas da microbacia de Gameleira, que possui uma rede de drenagem bem definida e uma área e densidade de drenagem de 17 km² e 1,80 km/km² respectivamente. Seu curso principal é permanente, contribuindo para o escoamento de base, e o desnível, entre a nascente e o exutório, é de 230 m, com o índice de declividade 0,02266 m/m, possibilitando um rápido escoamento da água da chuva (REHISA, 2004).

Tabela 4- Características fisiográficas da bacia de Gameleira. Fonte: REHISA (2004).

Características	Valor/Unidade
Área	1.877 ha (18,77 km ²)
Perímetro	19,27 km
Ordem	3
Comprimento do curso principal	10,15 km
Comprimento total dos canais	33,73 km
Afluentes da margem direita	10,44 km
Afluentes da margem esquerda	13,14 km
Densidade de drenagem	1,80 km/km ²
Altitude máxima na bacia	430 m
Altitude na nascente	370 m
Altitude no exutório	140 m
Desnível da nascente ao exutório	230 m
Índice de declividade global	0,02266 m/m

4.1.2 Hidrogeologia

A microbacia de Gameleira está totalmente inserida no Domínio Hidrogeológico Fissural, composto de rochas do embasamento cristalino que englobam o subdomínio rochas

metamórficas constituído do Complexo Vertentes e do Complexo Salgadinho (REHISA, 2004), como ilustra a Figura 7.

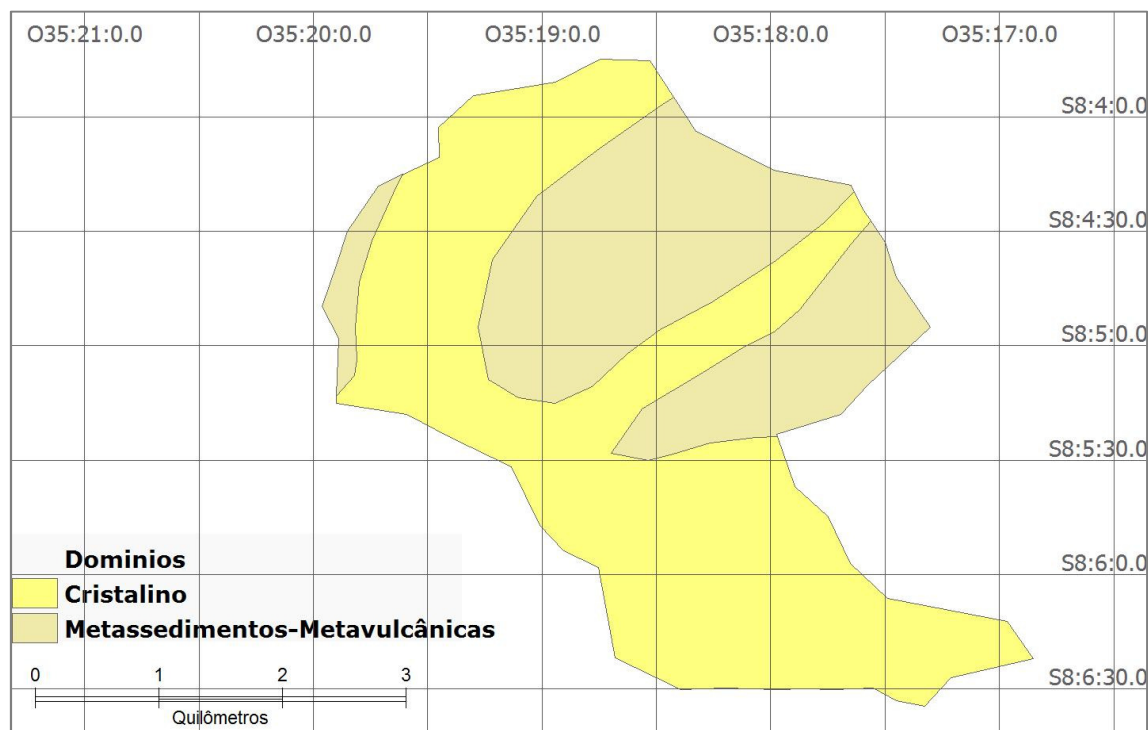


Figura 7 – Domínios hidrogeológicos da microbacia de Gameleira na escala de 1:50000. Fonte: Autoria própria.

Os litótipos relacionados aos Metassedimentos/Metavulcânicas reúnem Paragnaisse, Metavulcânica Intermediária a Máfica e Metavulcanoclástica, para o complexo de Salgadinho. No domínio Cristalino, também presente na região, foram reunidos basicamente, Metagranito, Metagranodiorito, Metatonalito, Metatrondhjemitó para o complexo de Vertentes, os dois domínios estão relacionados ao denominado aquífero fissural. MME (2009) afirma que quase não existe uma porosidade primária nestes tipos de rochas, a ocorrência de água subterrânea é condicionada por uma porosidade secundária representada por fraturas e fendas, o que se traduz por reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão.

4.1.3 Solo

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), na microbacia de Gameleira há uma predominância do tipo de solo argissolo associados com

neossolos, e uma pequena presença de argissolo associado com latossolos (Figura 8) . Os argissolos são constituídos por material mineral, grande parte dos solos desta classe apresenta um evidente incremento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B (EMBRAPA, 2006).

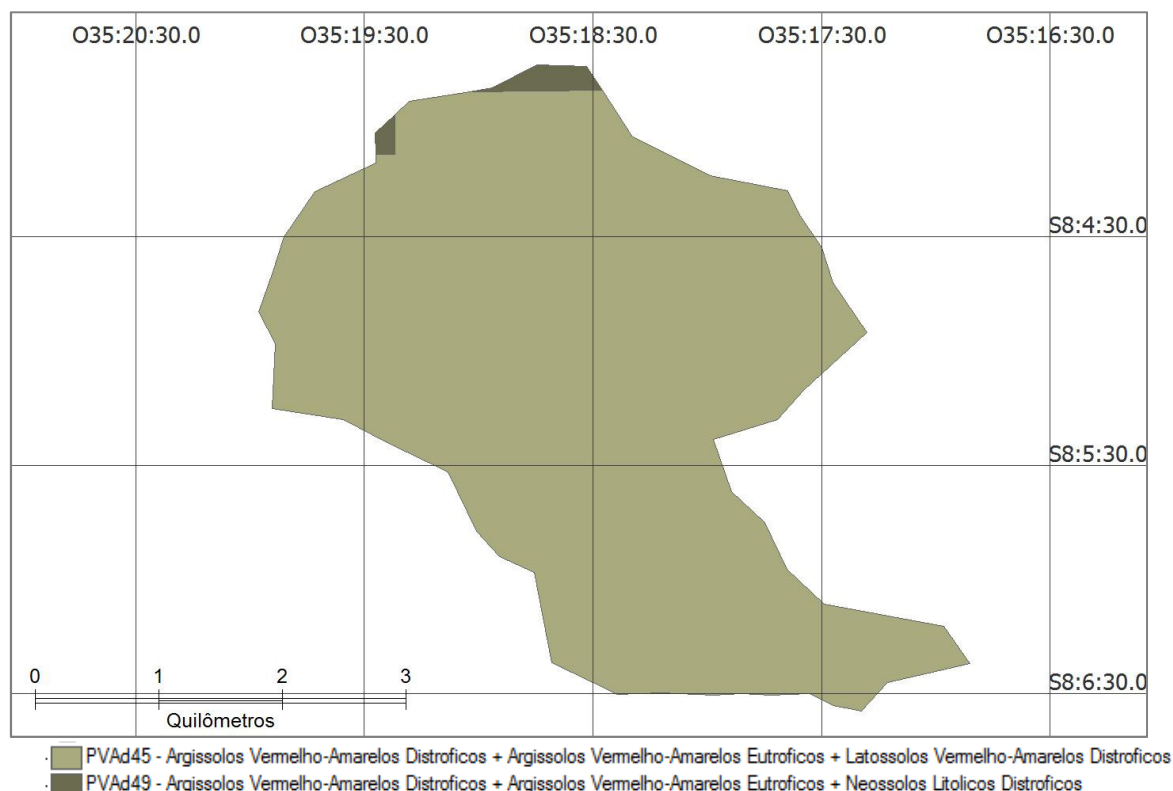


Figura 8 - Composição do solo da microbacia de Gameleira na escala de 1:50000. Fonte: Autoria própria.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos estão presentes em todo o território nacional, constituindo a classe de solo das mais extensas no Brasil, ao lado dos Latossolos. As principais restrições são relacionadas à fertilidade, em alguns casos, e susceptibilidade à erosão. Sua classificação como Distróficos (solos de baixa fertilidade) e Eutróficos (solos de alta fertilidade) faz parte do terceiro nível categórico do SiBCS.

Os Latossolos Vermelho-Amarelos presentes na região em estudo, de forma geral estão associados aos relevos: plano, suave ondulado ou ondulado, este tipo de solo ocorre em ambientes bem drenados, são muito profundos e possuem características uniformes de cor e textura. Sua classificação como distróficos está associada à baixa fertilidade.

Já os Neossolos Litólicos compreendem solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos com declives. Apresentam limitações ao crescimento radicular, ao uso de máquinas e elevam

o risco de erosão, isto se deve ao fato de serem rasos e se apresentarem próximos de rochas e declives acentuados. Sua classificação no terceiro nível categórico do SiBCS, como distróficos, está associada à baixa fertilidade.

A ocupação do solo na região era predominantemente com cana de açúcar, substituída pelos latifúndios que encontram-se parcelados em sítios, onde há predominância do plantio de hortaliças irrigadas e de pastagens (REHISA, 2004).

4.1.4 Estrutura Geológica e Relevo

O relevo da região está integralmente situado na província estrutural de Borborema, localizada na porção Nordeste da ampla Plataforma Estrutural Brasileira e engloba, sobretudo, terrenos muito antigos, de natureza ígnea intrusiva e metamórficos, datados como sendo do Pré-Cambriano. Um dos elementos geológicos de maior destaque dessa unidade estrutural é o maciço Pernambuco-Alagoas, como descreve Álvares *et al.*, (2011) apud Noronha (2013). Na microbacia existe uma predominância de morros e serras baixas, com parcela pequena de colinas (Figura 9).

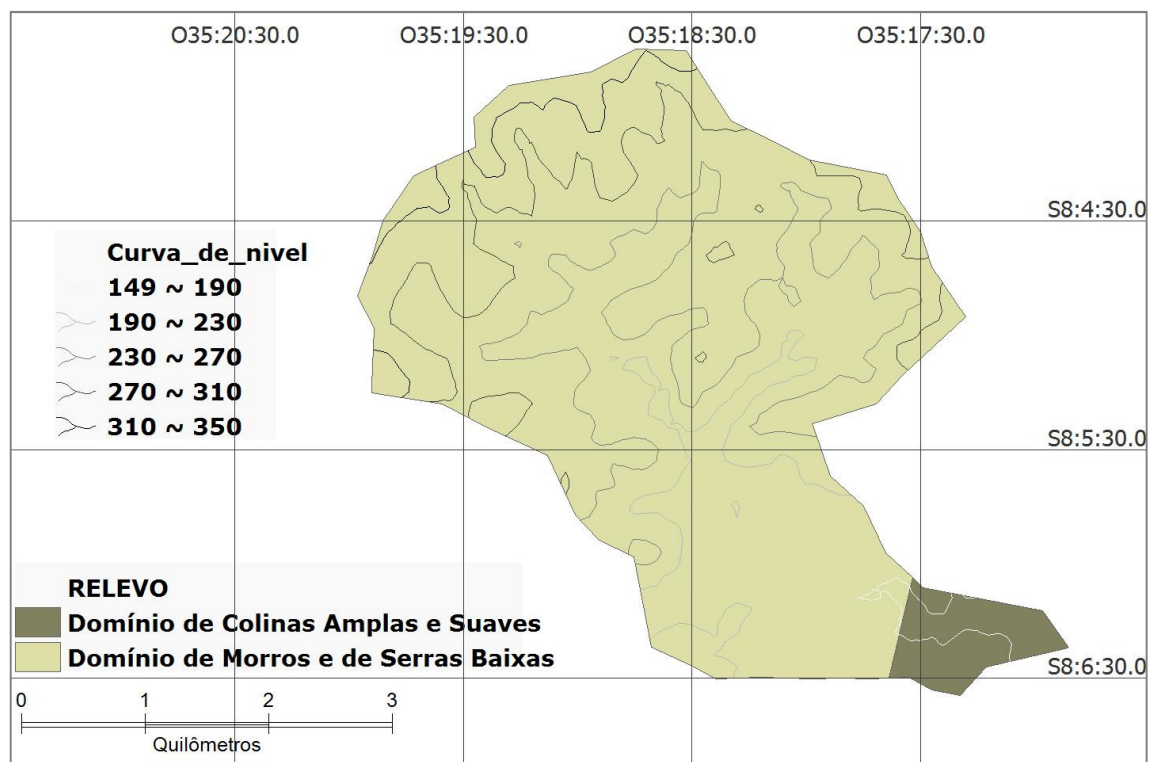


Figura 9 – Características do relevo da Microbacia de Gameleira na escala de 1:5000. Fonte: Autoria própria.

De acordo com Santos (2013) os morros se constituem em relevos convexo-côncavos dissecados e topos aguçados em cristas ou arredondados. O sistema de drenagem principal é constituído por restritas planícies aluviais, onde predominam processos de morfogênese, com formação de solos pouco espessos em terrenos declivosos, em geral, com moderada a alta suscetibilidade à erosão.

4.1.5 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal da microbacia é formada por pastagem, cultivo de hortaliças e resquícios da Mata Atlântica como ilustra a Figura 10.

Na área de remanescente de Mata Atlântica encontra-se a Floresta Estacional Semidecidual. O conceito ecológico deste tipo de floresta está condicionado pela dupla estacionalidade climática, uma tropical com época de intensas chuvas de verão, seguida por estiagem acentuada e outra subtropical sem período seco (Veloso *et al*, 1991).

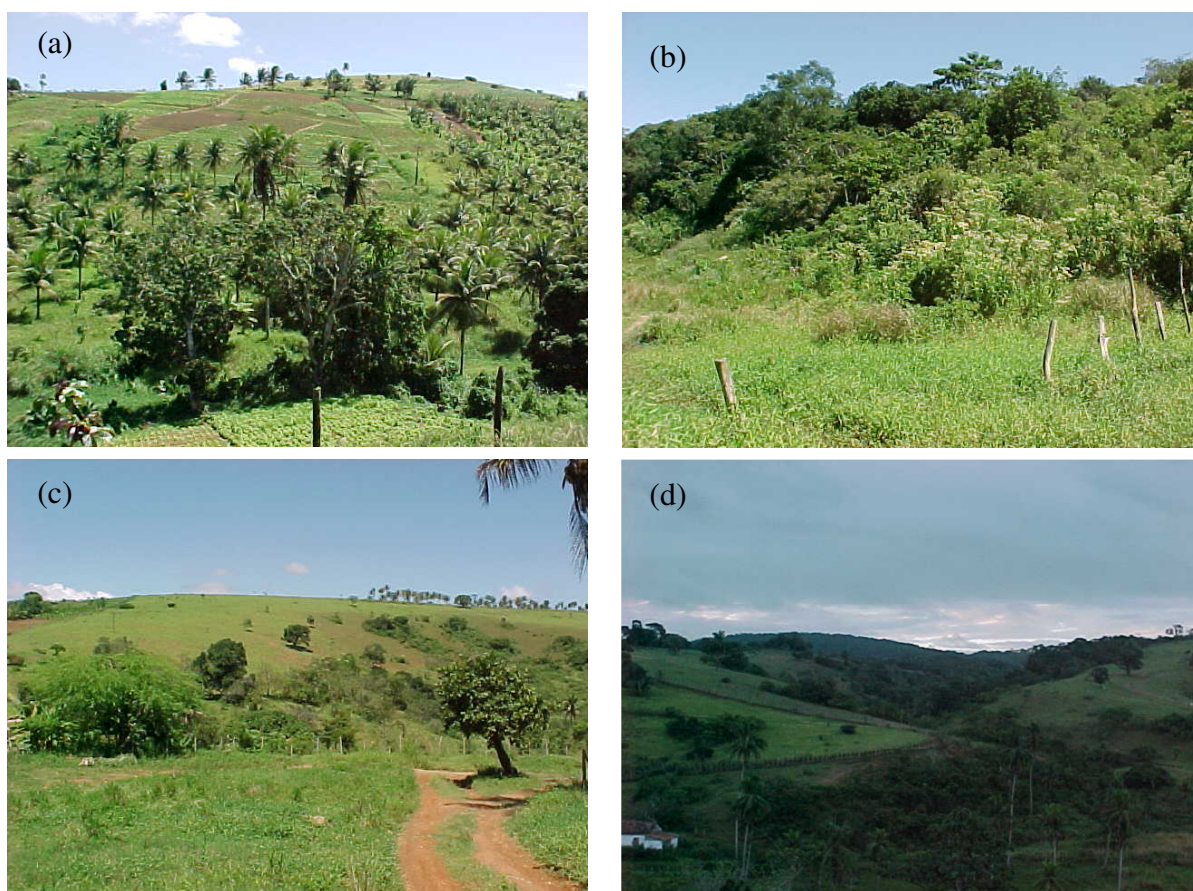


Figura 10– Cobertura vegetal da microbacia: a) área de pastagem; b) mata atlântica; c) cultivo de hortaliças e d) vista do exultório da microbacia. Fonte: REHISA (2004).

4.1.6 Características climáticas

Braga (2001) destaca que o clima dominante da área, segundo a classificação de Köppen, é o As', clima quente e úmido do tipo pseudo tropical. Conforme REHISA (2004) e Araújo Filho (2004) o período chuvoso acontece entre março e julho, onde ocorrem 68% da precipitação anual (Figura 11), e o período mais seco de outubro a dezembro. A região apresenta precipitação média anual de 1,047mm, com temperatura média mensal variando entre 23,7 e 27,0°C, e umidade relativa do ar superando os 70% durante os meses de março a julho.

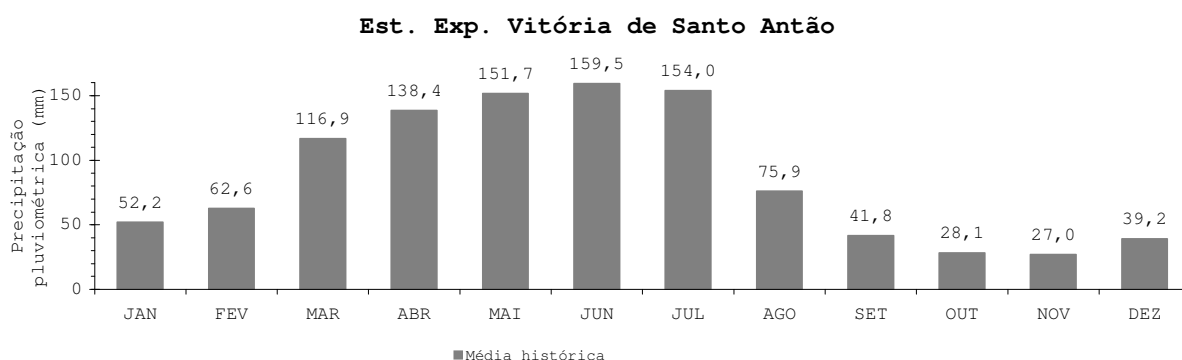


Figura 11– Média histórica da precipitação. Fonte: REHISA (2004)

Neste sentido Rodrigues *et al.*, (2006) afirmaram que as precipitações ocorrem com mais frequência durante a madrugada e a noite, muito embora existam pequenas variações durante o ano e, ainda, a grande maioria dos eventos começam e terminam no mesmo dia.

4.1.7 Estação experimental de Gameleira

A estação experimental de Gameleira surgiu do projeto Implantação de Bacias Experimentais no Semiárido (IBESA) e foi instalada em junho/2003 na Escola Agrotécnica Federal de Vitória de Santo Antão, cujas coordenadas são 35° 17' 21,379" oeste e 8° 6' 47,618" sul, cujo objetivo foi coletar dados climatológicos. Trata-se de uma estação meteorológica completa da Campbell automática, composta dos seguintes sensores:

Tabela 5 – Descrição dos sensores da estação climatológica. Fonte: REHISA, 2004.

Sensor	Modelo
Medição de chuva	modelo TB4-L
Medição de temperatura e umidade relativa do ar	modelo HMP45C
Medição de velocidade e direção do vento	modelo 03001
Medição de pressão barométrica	modelo CS105
Medição de radiação solar	modelo SP-LITE
Medição de temperatura do solo às profundidades de 20, 40 e 60cm	modelo 108

Como descrito por REHISA (2004) a coleta dos dados era feita mensalmente através de um equipamento chamado Storage Module que retira os dados armazenados no Datalogger. Todo o conjunto é chamado de Plataforma de Coleta de Dados (PCD) e é alimentado por um painel solar. O registro dos dados, citado por Moura (2009), procedeu-se da seguinte forma:

- i. A Precipitação era registrada a cada minuto na hipótese desta ser maior ou no mínimo igual a uma basculada do pluviógrafo, a qual corresponde a uma chuva de 0,254mm. E a cada hora quando seu valor era zero;
- ii. A Velocidade e direção do vento (média e desvio padrão), intensidade da radiação solar, pressão barométrica, umidade relativa do ar e temperatura do solo nas profundidades de 20, 40 e 60cm a cada 15 minutos;
- iii. A tensão da bateria a cada hora;
- iv. A Evapotranspiração de referência (ET_o), calculada pelo método de Penman-Monteith (FAO), a cada 15 minutos.

O capítulo seguinte apresenta os resultados obtidos, após a aplicação da metodologia descrita no capítulo III, utilizando os dados da estação experimental de Gameleira cujas características fisiográficas foram apresentadas neste capítulo.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo mostram o desempenho do método de Turc-Ivanov modificado, através do modelo SWIM, para estimar a evapotranspiração de referência na microbacia de Gameleira. Para alcançar este objetivo dividiu-se a metodologia em etapas, cujos resultados estão descritos aqui.

5.1 ETAPA DE TRATAMENTO DOS DADOS

A metodologia empregada neste trabalho para o tratamento dos dados esta subdividida em: análise preliminar e preenchimento de falhas.

Na etapa de análise preliminar identificaram-se a existência de períodos inconsistentes ou sem observações nas séries históricas de dados diários das variáveis em estudo a partir do método de representação gráfica. As falhas encontradas são ocasionadas, entre outras razões, por problema no funcionamento dos sensores ou na bateria da Plataforma de coleta de dados.

Além desta análise gráfica, diagramas, tipo Box Plot, foram gerados para as variáveis: temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, (Figura 12), com o objetivo de verificar a existência de dados inconsistentes, a partir da identificação de *outliers*. Com este procedimento foi possível encontrar os valores máximos e mínimos aceitáveis presente nas séries históricas de cada variável, considerando inconsistentes os valores fora destes limites.

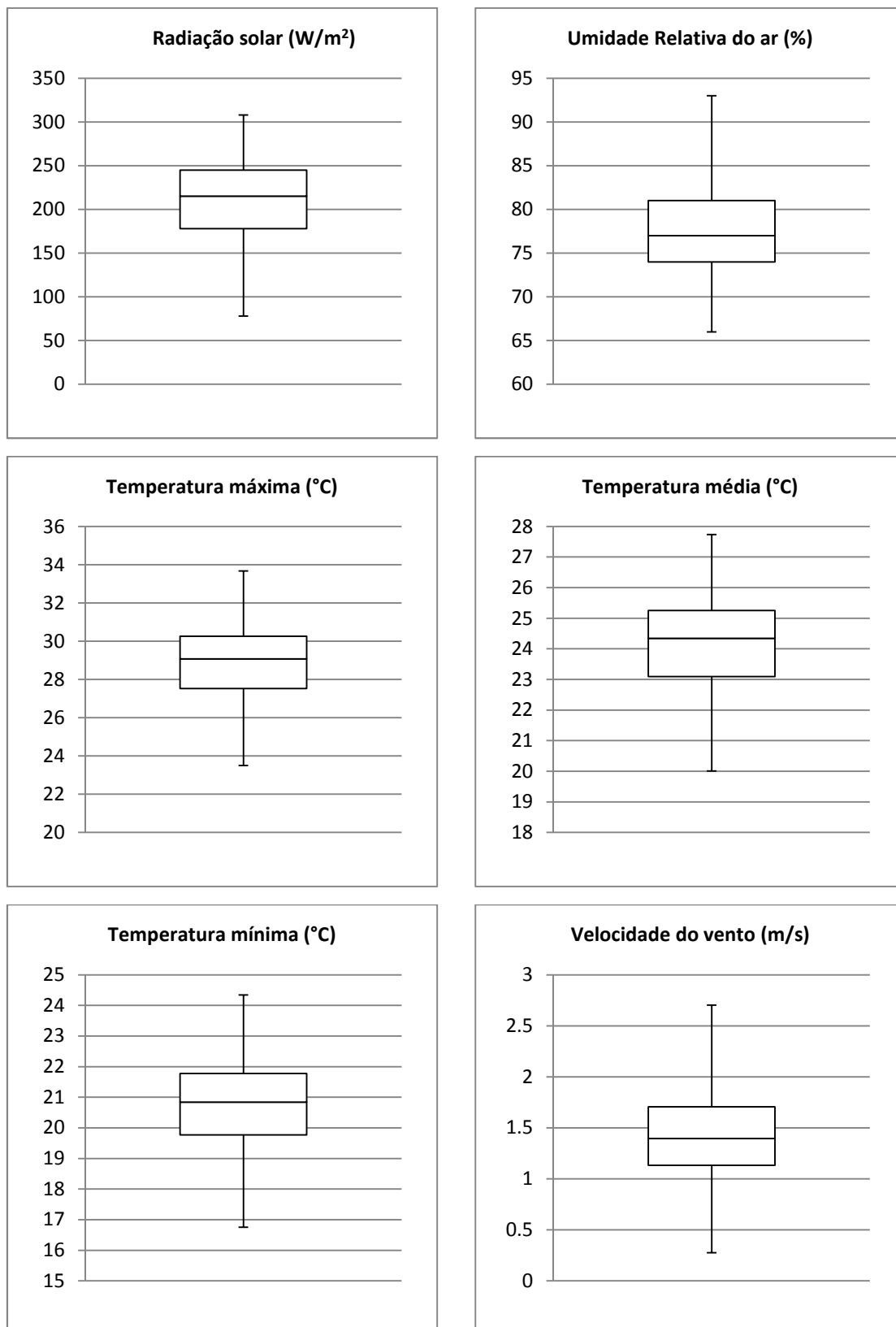


Figura 12 – Diagrama de Box Plot das variáveis.

Na Figura 12 pode-se identificar a faixa de valores considerados consistentes para as variáveis: temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

A partir da análise dos dados observou-se que a temperatura foi a variável que apresentou maior número de dados com falhas, 23% apresentaram erros. Seguido da umidade relativa do ar com 19% de dados falhos, velocidade dos ventos (14%), radiação solar (10%) e precipitação (7%). Este levantamento mostrou a necessidade de preenchimento destas falhas.

Na Figura 13 pode-se observar que existe um período sem observações representadas pelo círculo. Para os dados de radiação solar os valores considerados inconsistentes estão abaixo de $77,5 \text{ W/m}^2$ ou acima de 345 W/m^2 .

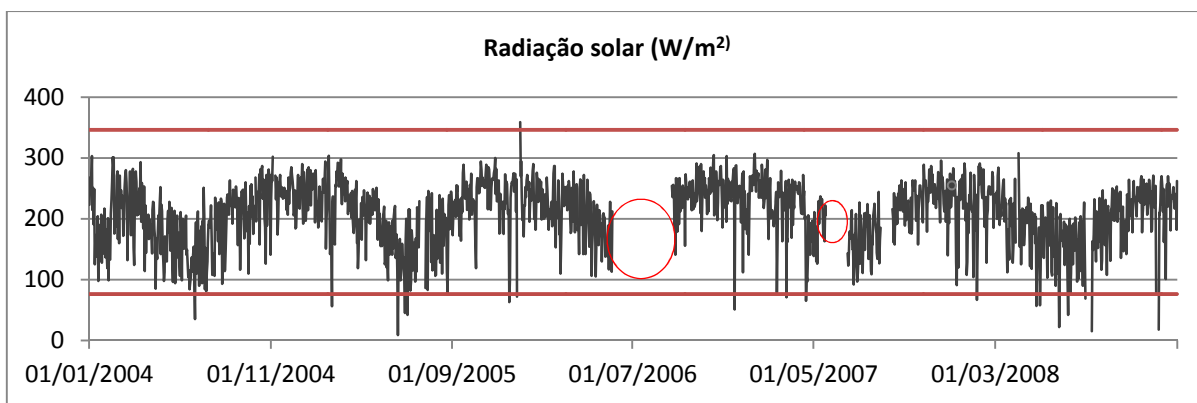


Figura 13 - Análise dos dados brutos de Radiação solar da estação Gameleira

O mesmo procedimento foi aplicado para analisar os dados inconsistentes da variável umidade relativa do ar, sendo observados os períodos sem dados e valores discrepantes, considerados abaixo de 62% e acima de 93 %, ilustrado na Figura 14.

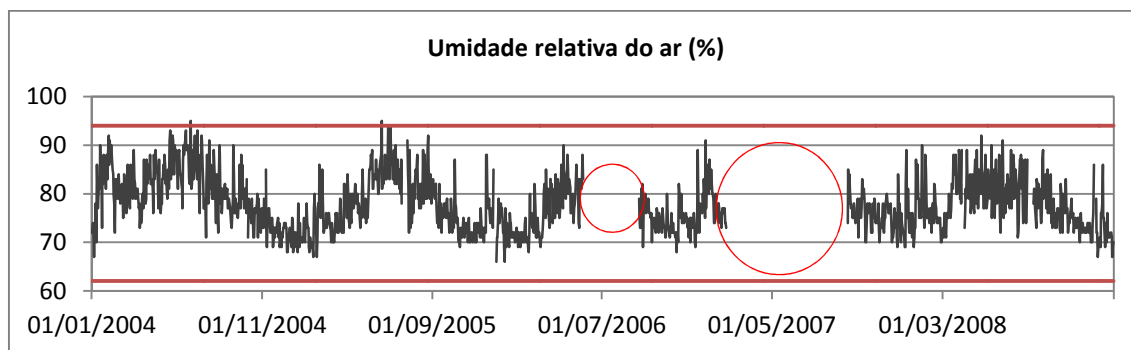


Figura 14 - Análise dos dados brutos da Umidade relativa do ar da estação Gameleira

Observou-se separadamente o comportamento da temperatura para os valores diários máximos, mínimos e médios, todos apresentaram alguns valores muito distantes dos demais dados, destacados na Figura 15, considerados erros grosseiros, por isso foram retirados. Em seguida foi verificado se existia mais algum valor inconsistente, este procedimento foi realizado pelo diagrama de Box Plot.

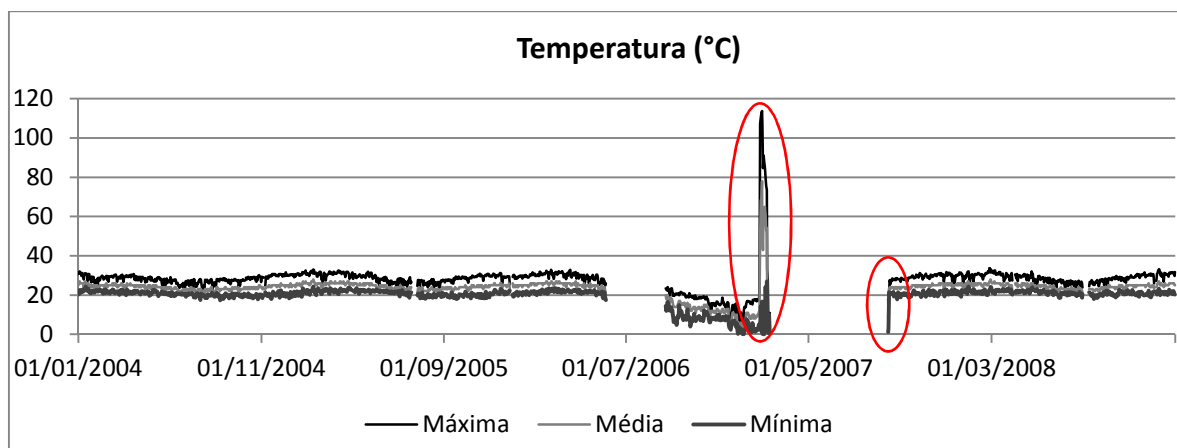


Figura 15 – Identificação de erros grosseiros nas séries da Temperatura máxima, média e mínima da estação Gameleira

Foram considerados valores consistentes, para a variável temperatura máxima, aqueles acima de 23,4 °C e abaixo de 34,3 °C. Percebe-se, na Figura 16, a presença de alguns dados abaixo do valor mínimo aceitável, por isso estes valores foram considerados inconsistentes. Foi identificado também um período sem observações representado pelas áreas circuladas.

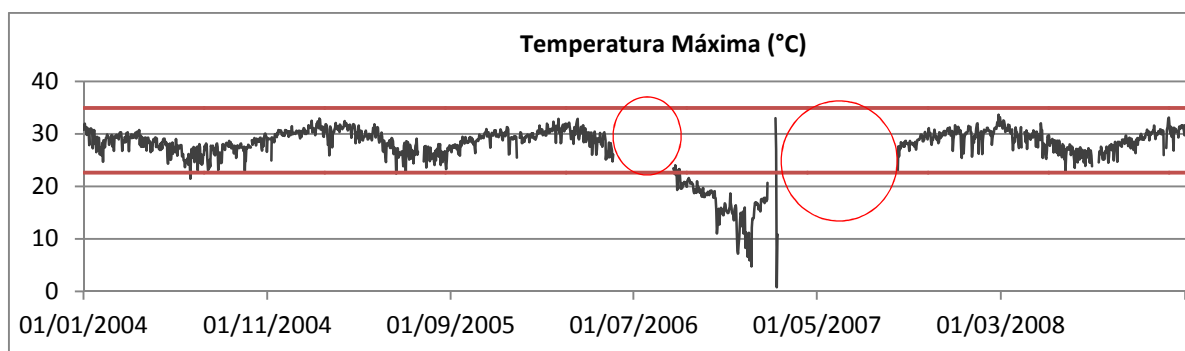


Figura 16 - Análise preliminar da Temperatura máxima da estação Gameleira

Analisando a série da temperatura média identificou-se a faixa entre 19,8 °C e 28,5°C como valores confiáveis, os demais valores foram desprezados, a Figura 17 ilustra os períodos sem observações e os valores fora dos limites aceitáveis.

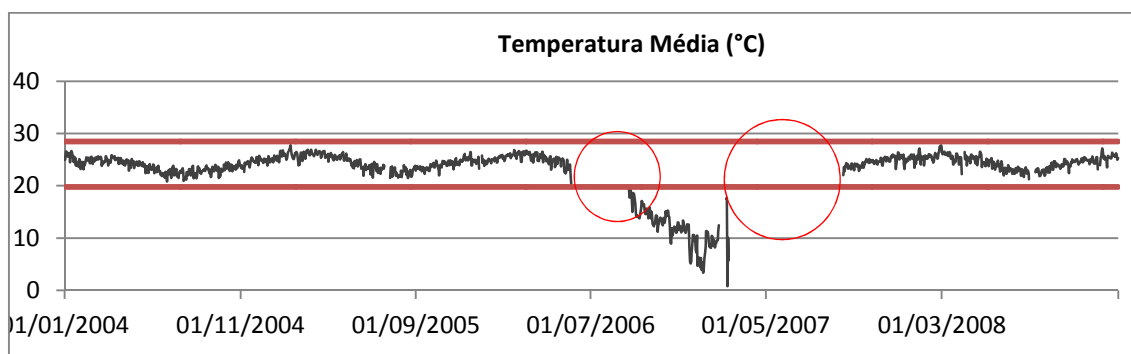


Figura 17 – Análise preliminar da Temperatura média da estação Gameleira

Já para a temperatura mínima, os valores considerados consistentes estão entre 16,8 °C e 24,8°C, apresentados na Figura 18, pode-se observar ainda a presença de períodos sem observações e dados fora do limite aceitável.

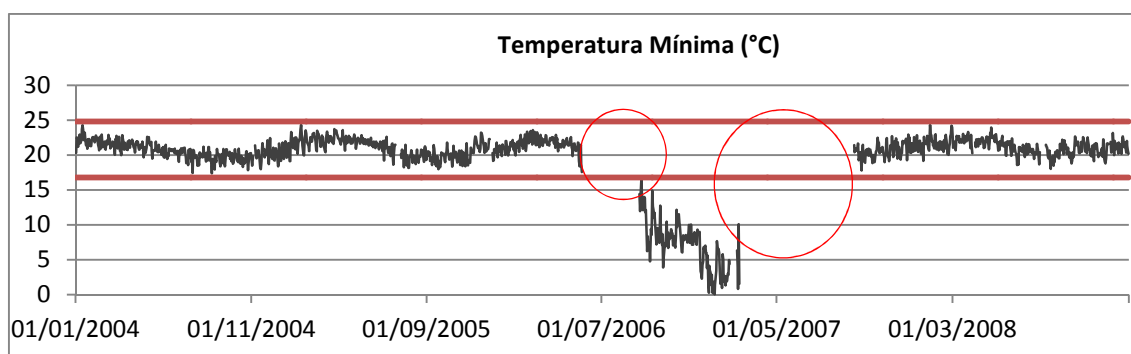


Figura 18 - Análise preliminar da Temperatura mínima da estação Gameleira

Esta análise também foi realizada para os dados de velocidade do vento, os resultados encontrados consideram a faixa de valores aceitáveis entre 0,3 m/s e 2,6 m/s. A série apresentou períodos sem observações, porém, não foi observado muitos dados inconsistentes (Figura 19).

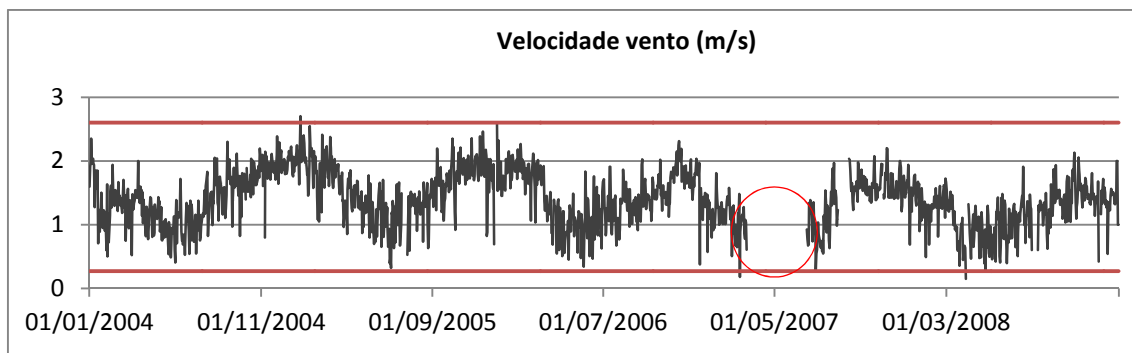


Figura 19 - Análise preliminar da velocidade do vento da estação Gameleira

As falhas nas observações da precipitação podem ter ocorrido por falha no equipamento, uma vez que a série apresentou um período sem observação. Os períodos que apresentaram maiores precipitações foram comparados com os dados das estações vizinhas para confirmar a confiabilidade dos dados (Figura 20).

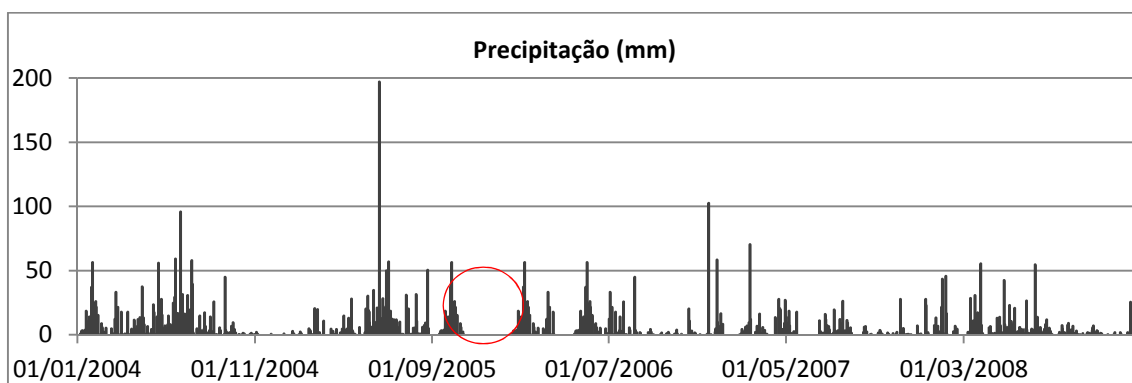


Figura 20 - Análise dos dados brutos da precipitação da estação Gameleira

Após o reconhecimento dos períodos das séries, de cada variável, com dados inconsistentes, foi possível preencher as falhas. O primeiro passo foi a escolha da estação vizinha utilizada para o preenchimento.

Inicialmente foram selecionadas as estações de Vitória de Santo Antão e Recife dentre as nove estações pré-selecionadas, representadas na Figura 4. Como a estação de Vitória de Santo Antão apresentou dados inconsistentes no período de 2004 a 2008, período utilizado na pesquisa, a estação Recife foi escolhida para preencher as falhas, por contemplar todos os itens de seleção previstos na metodologia.

Em seguida foi realizado o tratamento estatístico, com o intuito de verificar a confiança das relações entre os dados. Para tanto, foi realizada uma análise de correlação dos

dados diários entre as variáveis a ser preenchidas da estação Gameleira e as mesmas variáveis da estação Recife, onde foi observada uma correlação maior que 0,8 para as variáveis: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade dos ventos. Estas foram avaliadas pela classificação de Cohen e enquadradas como correlações que variam entre alta e quase perfeitas, como mostra a Tabela 6, o que indica que a estação Recife pode ser utilizada no preenchimento de falhas da estação Gameleira. Esta análise não pôde ser aplicada para a variável radiação solar, pois os dados, desta variável, da estação Recife apresentaram inconsistência para o período utilizado na pesquisa.

Tabela 6 – Enquadramento das correlações entre as variáveis

Variável	Correlação (r)	Classificação de Cohen (1988)
Temperatura Máxima	0,824	muito alto
Temperatura Mínima	0,826	muito alto
Temperatura Média	0,876	muito alto
Umidade relativa do ar	0,826	muito alto
Velocidade do vento	0,805	muito alto
Precipitação	0,997	quase perfeito

Para verificar a confiança da relação também foi realizado um teste de hipótese, analisando se a hipótese nula ($T_0 = 0$): “não existe correlação entre as variáveis das estações estudadas” seria rejeitada ou não. Para este teste, utilizou-se o t crítico com nível de significância 5% para n-2 graus de liberdade, cujos resultados estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Teste de hipótese sobre as variáveis

Variável	T_0	Graus de liberdade	$T_{crítico0,05}$
Temperatura Máxima	26,74	1496	1,96
Temperatura Mínima	26,98	1496	1,96
Temperatura Média	33,40	1496	1,96
Umidade relativa do ar	26,94	1477	1,97
Velocidade do vento	24,98	1589	1,97
Precipitação	278,31	1697	1,97

O resultado encontrado mostrou que a hipótese nula foi rejeitada para todas as variáveis, pois todos os valores de T_0 , apresentados na Tabela 7, são maiores que o valor crítico ($T_{crítico 0,05}$) de 1,96 para as temperaturas e 1,97 para as demais variáveis.

Outra estatística aplicada para verificar o ajuste do modelo em relação aos dados amostrais foi a análise de regressão simples, relacionando os dados da estação Gameleira com os dados da estação Recife. Este procedimento foi adotado para as variáveis: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento. Já para a variável radiação solar aplicou-se a análise de regressão múltipla, utilizando os dados da estação Gameleira, sendo a radiação solar, a variável resposta, e a umidade relativa do ar, temperatura do ar, precipitação e velocidade do vento as variáveis explicativas utilizadas no modelo. Para verificar a significância do teste utilizou-se teste-t e a análise do valor-p. Os dados da Tabela 8 mostram o desempenho dos testes.

Tabela 8 – Análise estatística de regressão simples e teste t de Student

Variável	r²	Teste-t	Valor-p
Temperatura Máxima	0,68	372,15	$1,72 \cdot 10^{-290}$
Temperatura Mínima	0,65	38,55	$1,1 \cdot 10^{-299}$
Temperatura Média	0,77	38,55	0
Umidade relativa do ar	0,68	12,85	$6,07 \cdot 10^{-87}$
Velocidade do vento	0,65	8,38	$1,88 \cdot 10^{-48}$
Precipitação	0,99	30,08	0

As análises estatísticas apresentadas na Tabela 8 mostraram que apesar do resultado da regressão simples das variáveis temperatura e velocidade do vento não terem apresentado um excelente desempenho, a estatística do teste-p e do teste-t mostraram que as variáveis explicativas da estação Recife são representativas para a formulação do modelo utilizado no preenchimento de falha das variáveis da estação Gameleira, existindo mais de 95% de chance desta relação ser adequada.

O procedimento estatístico aplicado para verificar a confiabilidade dos dados da variável resposta, radiação solar, foi a regressão múltipla, que utilizou as variáveis explicativas: umidade relativa do ar, temperatura máxima, velocidade dos ventos e precipitação da estação Gameleira para realizar o teste, cujos resultados encontrados estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Análise estatística de regressão múltipla e teste t de Student

Variável	r^2	Teste-t	Valor-p
Temperatura Máxima	0,82	16,51	$8,28 \cdot 10^{-56}$
Umidade relativa do ar		18,84	$2,57 \cdot 10^{-70}$
Velocidade do vento		2,87	$4,18 \cdot 10^{-3}$
Precipitação		3,66	$2,63 \cdot 10^{-4}$

O coeficiente de determinação do modelo (r^2) apresentou um resultado superior a 0,70, sendo de 0,82 a relação entre as variáveis estudadas. Após identificar o grau da relação, as variáveis explicativas, descritas na Tabela 9, foram testadas a partir do teste t e do valor-p, a fim de descobrir quais destas deveriam permanecer na equação final. Como o valor-p das variáveis analisadas foram inferiores a 5% (ou 0,05), diz-se que a variável explicativa, que esse parâmetro representa, deverá permanecer na fórmula do modelo final (Montgomery, 2009). Logo, os resultados mostraram que todas as variáveis deveriam permanecer na equação final, destacando a temperatura do ar e umidade relativa do ar como variáveis que mais influenciam na relação.

Os testes aplicados anteriormente serviram para discutir as formas de construir os modelos de regressões utilizados posteriormente no preenchimento de falhas das variáveis necessárias para calcular a Evapotranspiração. Mas, é indispensável verificar a viabilidade do modelo através da análise dos resíduos. Este procedimento foi realizado por meio da análise gráfica descrita na metodologia e apresentada na Figura 21.

Os resultados das análises de resíduos mostraram a validade dos modelos, pois percebe-se na Figura 21a que os resíduos da temperatura máxima de Gameleira (eixo y) relacionados com a variável explicativa, temperatura máxima de Recife (eixo x), apresentaram um padrão aleatório, indicando uma independência entre eles, atendendo a suposição de independência. Além disso, a média dos resíduos se aproximou de zero, atendendo a mais um critério para validar o modelo. O mesmo desempenho pôde ser encontrado para as temperaturas mínimas e médias (Figuras 21b e 21c, respectivamente), e para a umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação (Figuras 21d, 21e e 21f, respectivamente).

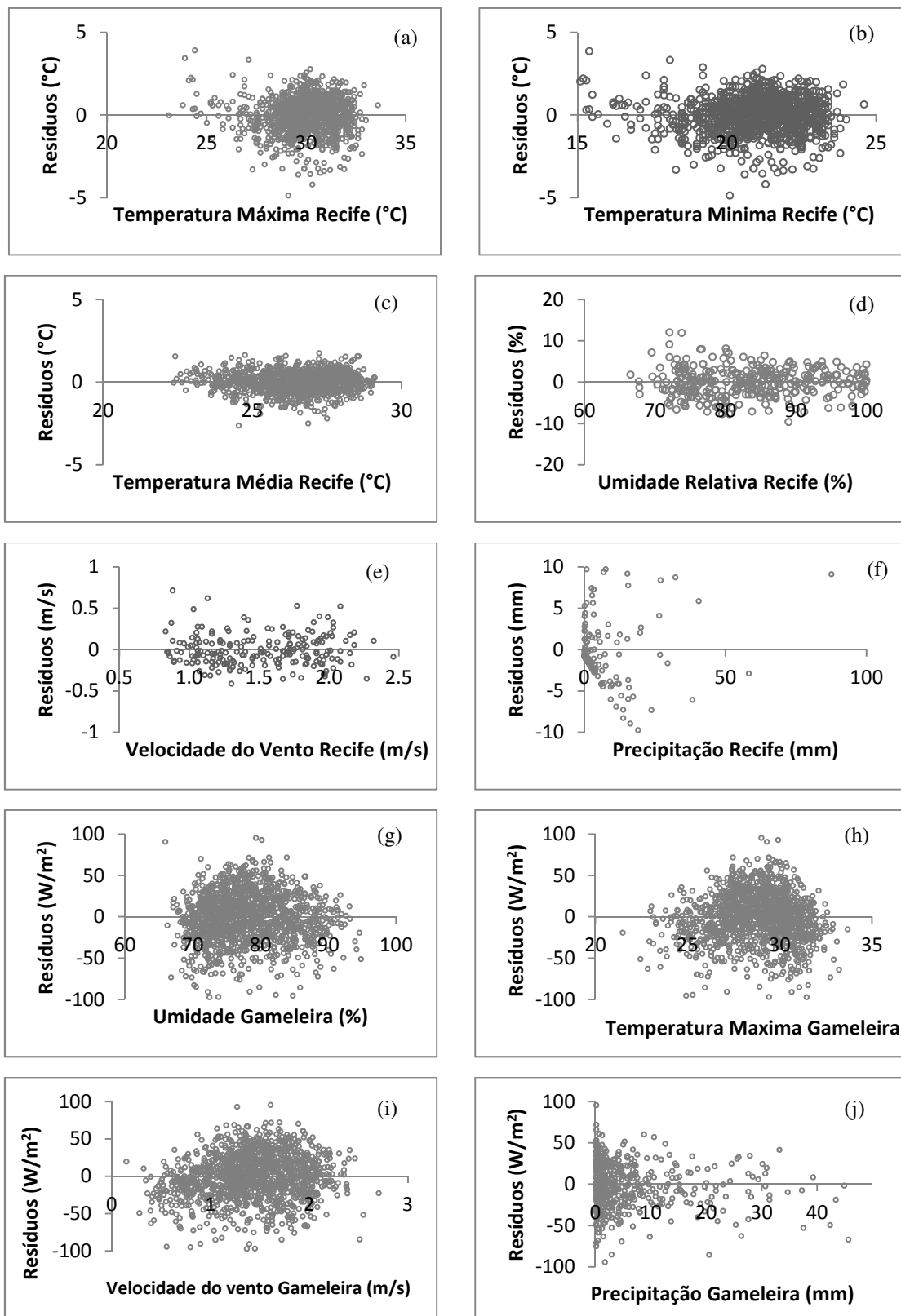


Figura 21 - Análise de resíduos das variáveis respostas a partir das variáveis explicativas.

Analisando os resíduos gerados a partir da análise de regressão múltipla da radiação solar (variável resposta) com as variáveis explicativas: umidade relativa do ar, temperatura máxima do ar, velocidade do vento e precipitação, todas da estação de Gameleira, pode-se verificar a viabilidade do modelo, uma vez que os resíduos das variáveis explicativas (Figuras: 21g, 21h, 21i e 21j) apresentaram padrões aleatórios, independentes e médias próximas de zero.

Complementando a análise da consistência dos dados de precipitação, utilizou-se o método de duplas massas, cujo objetivo foi de comprovar o grau de homogeneidade dos dados médios diários acumulados do posto de Gameleira com os dados médios diários acumulados do posto de Recife.

A declividade da reta apresentada na Figura 22 ilustra que os valores do posto Gameleira são proporcionais aos valores do posto Recife, afirmando a existência de dados consistentes entre os postos.

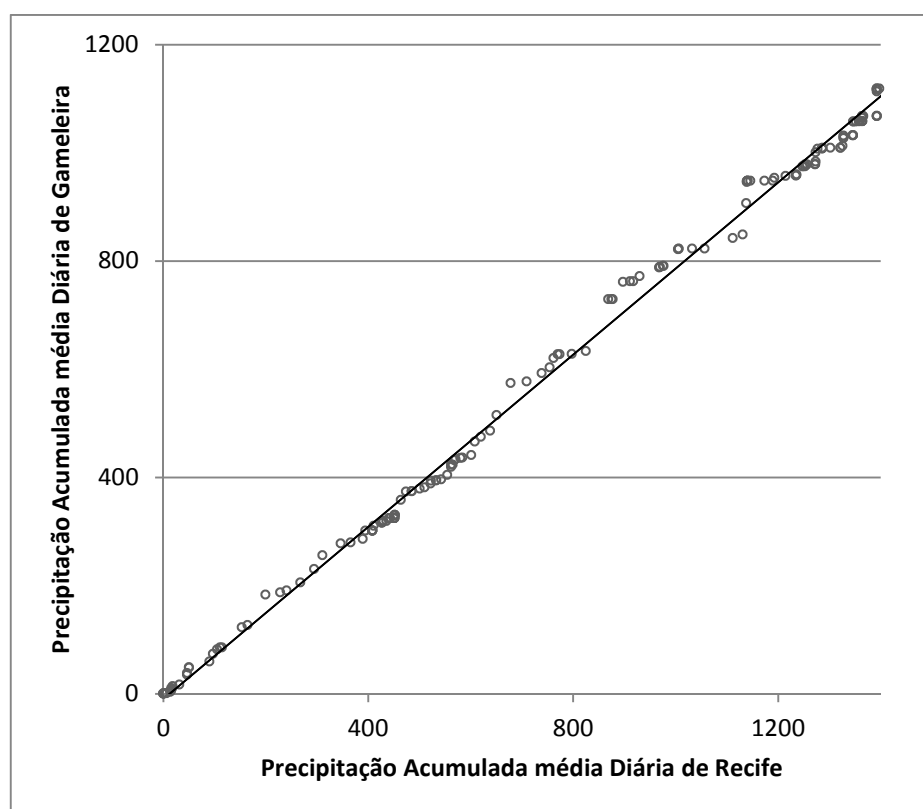


Figura 22 – Análise de consistência dos dados de precipitação pelo método de dupla massa

Após obter bons resultados no teste dos modelos gerados, o preenchimento de falha dos dados diários ocorreu a partir da aplicação da equação gerada para cada variável, quais

sejam: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação obtida a partir da regressão simples tendo como variáveis explicativas as respectivas variáveis da estação Recife. As falhas da variável radiação solar foram preenchidas a partir da análise de regressão múltipla utilizando como variáveis explicativas a umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento e precipitação da própria estação, uma vez que os dados de radiação solar da estação Recife possuíam muitas inconsistências. As equações aplicadas estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Equações utilizadas no preenchimento das falhas

Variável a ser Preenchida	Equação utilizada no preenchimento
Temperatura Máxima do ar	$y = 1,0582t_1 - 2,9446$
Temperatura Média do ar	$y = 0,8402 t_2 + 2,1643$
Temperatura Mínima do ar	$y = 0,3946 t_3 + 18,976$
Umidade relativa do ar	$y = 1,1194u - 6,3295$
Velocidade do vento	$y = 0,6608v + 0,3815$
Precipitação	$y = 0,7954p - 9,3855$
Radiação solar	$y = 242,75 + 10,18.X_1 - 0,04.X_2 - 4,28X_3 + 3,27X_4$

Nas equações descritas na Tabela 10 as variáveis t_1 , t_2 e t_3 representam, respectivamente, a temperatura máxima, média e mínima da estação Recife, e as variáveis: u , v e p , representam a umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação, respectivamente, também da estação Recife.

Fazendo referência à equação usada para preencher as falhas da radiação solar a variável X_1 representa a temperatura máxima do ar, X_2 refere-se à precipitação, X_3 trata-se da umidade relativa do ar e X_4 diz respeito à velocidade do vento, todas as variáveis coletadas na estação Gameleira.

Os dados preenchidos foram plotados em um gráfico para analisar o comportamento das variáveis no período da pesquisa, de 2004 a 2008, apresentados nas Figuras 23 e 24.

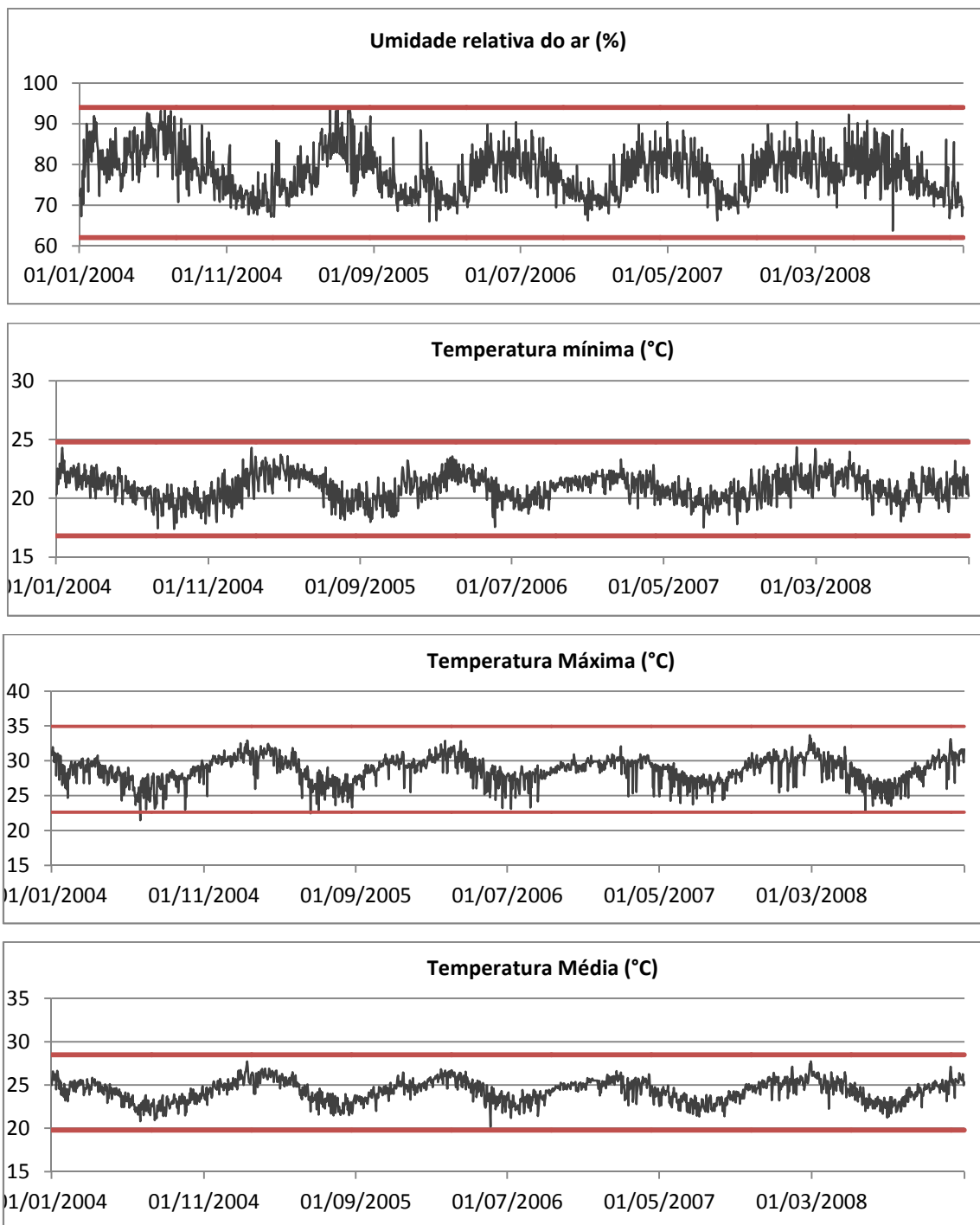


Figura 23 - Dados preenchidos das variáveis: umidade relativa do ar e temperaturas máxima, média e mínima.

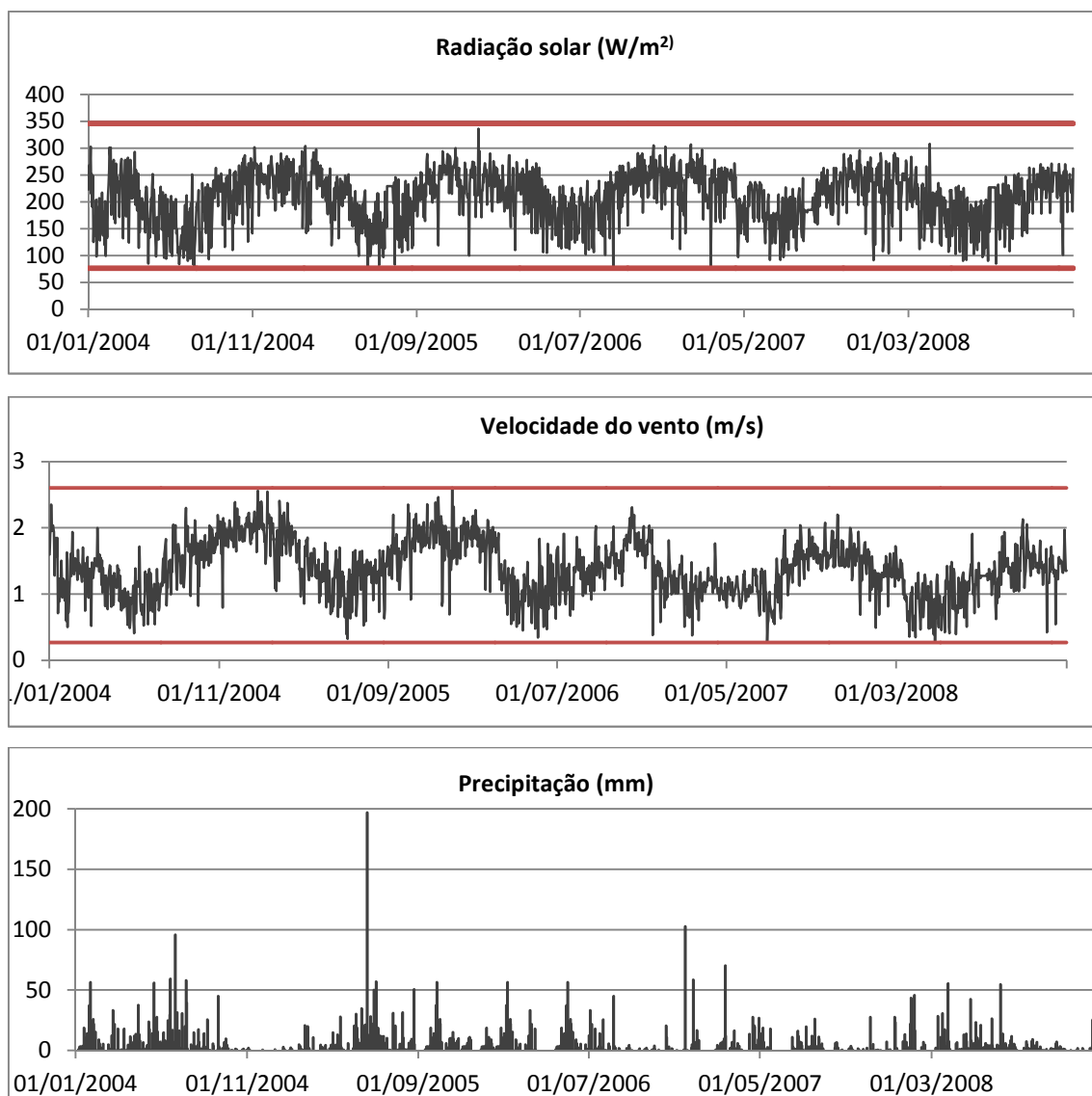


Figura 24 - Dados preenchidos das variáveis: radiação solar, velocidade do vento e precipitação.

Concluindo a etapa de preenchimento de falhas, preparou-se os dados para inclui-los no modelo. Para tanto foi preciso converter os valores da variável radiação solar de W/m^2 para J/cm^2 , compatível com o SWIM, multiplicando os valores da radiação solar pelo fator de conversão de 8,64, descrito por Allen *et al.*, (1998).

5.2 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Conforme síntese metodológica apresentada na seção 3.2, a evapotranspiração de referência (ET_o) foi gerada no modelo SWIM, utilizando o método de Turc-Ivanov modificado. Para calibrar o modelo SWIM estimou-se também a ET_o pelo método de

Penman-Monteith (FAO 56) e comparou-se os resultados com os dados gerados pela PCD da estação experimental de Gameleira, que adotou o mesmo método na estimativa. Após a calibração do modelo realizou-se a etapa de avaliação do desempenho do método de Turc-Ivanov modificado para a região em estudo, comparando os resultados obtidos com os encontrados pelo método de Penman-Monteith (FAO56). Os resultados das etapas descritas serão apresentados nos próximos itens.

5.2.1 Estimativa da ETo através do método Penman-Monteith (FAO56)

Nesta etapa foi feita a estimativa da evapotranspiração diária através do método de Penman-Monteith (FAO 56), para o período de janeiro de 2004 a dezembro de 2008, variando de 0,1 o coeficiente ecal para a faixa de 1,0 – 1,7 e o coeficiente thc para a faixa de 0,1 a 1,0. Os resultados para ETo, pelo método citado, foram obtidos através da variação dos coeficientes ecal e thc, resultando em 70 diferentes séries, analisados na etapa de calibração do modelo, onde foi possível compará-los com os resultados obtidos na plataforma de coleta de dados da estação Gameleira e identificar a estimativa que apresentou melhor desempenho. Esta foi utilizada como parâmetro para analisar o método de Turc-Ivanov modificado.

5.2.2 Estimativa da ETo através do método Turc-Ivanov modificado

Para estimar a evapotranspiração diária através de métodos de Turc-Ivanov modificado, também para o período de janeiro de 2004 a dezembro de 2008, variou-se o coeficiente ecal em 0,1 para a faixa de 0,9 a 1,7. Os resultados para ETo, pelo método citado, geraram nove diferentes resultados. Para analisar o desempenho do modelo, comparou-se os resultados obtidos com o melhor resultado encontrado pelo método de Penman-Monteith (FAO56). O desempenho do método de Turc-Ivanov modificado está descrito no item de avaliação do desempenho.

5.3 CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO SWIM

Para calibrar o modelo SWIM fez-se necessário verificar a existência de correlação entre os modelos, para isso aplicou-se a análise de correlação e classificou-as segundo Cohen (1988), conforme descrito no item 3.3 da metodologia. A Tabela 11 mostra o enquadramento

das correlação entre os modelos, apresentando os resultados para as combinações entre os valores de ecal 1,7 e 1,2 variando thc de 0,2 à 1,0.

Tabela 11 – Enquadramento das correlações dos valores gerados no SWIM e na PCD

Valores dos coeficientes	Correlação (r)	Classificação de Cohen (1988)
thc= 1,0 e ecal = 1,7	0,58	Alto
thc= 1,0 e ecal = 1,2	0,59	Alto
thc= 0,8 e ecal = 1,7	0,74	Muito alto
thc= 0,8 e ecal = 1,2	0,75	Muito alto
thc= 0,6 e ecal = 1,7	0,41	Moderado
thc= 0,6 e ecal = 1,2	0,87	Muito alto
thc= 0,4 e ecal = 1,7	0,64	Alto
thc= 0,4 e ecal = 1,2	0,94	Quase perfeito
thc= 0,2 e ecal = 1,7	0,98	Quase perfeito
thc= 0,2 e ecal = 1,2	0,98	Quase perfeito
thc= 0,2 e ecal = 1,1	0,98	Quase perfeito
thc= 0,2 e ecal = 1,0	0,97	Quase perfeito

O enquadramento da análise de correlação segundo a classificação de Cohen variaram, principalmente, entre alto e quase perfeito, enfatizando que os melhores resultados foram encontrados nas estimativas que utilizaram os menores valores de thc e de ecal (Tabela 11).

Além do enquadramento de Cohen (1988), aplicou-se também a análise de regressão, relacionando os setenta (70) resultados obtidos pelo método de Penman-Monteith (FAO56) gerados no modelo SWIM com o resultado encontrado na PCD. As Figuras 25, 26 e 27 ilustram um gráfico de linha e um gráfico de dispersão para 12 dos 70 resultados estimados no SWIM. Pode-se perceber que o coeficiente ecal desloca os valores da ETo podendo superestimar quando se eleva este coeficiente ou subestimar quando se diminui. Já o coeficiente thc se comporta de maneira inversa, ou seja, quanto menor o coeficiente, maior os valores estimados.

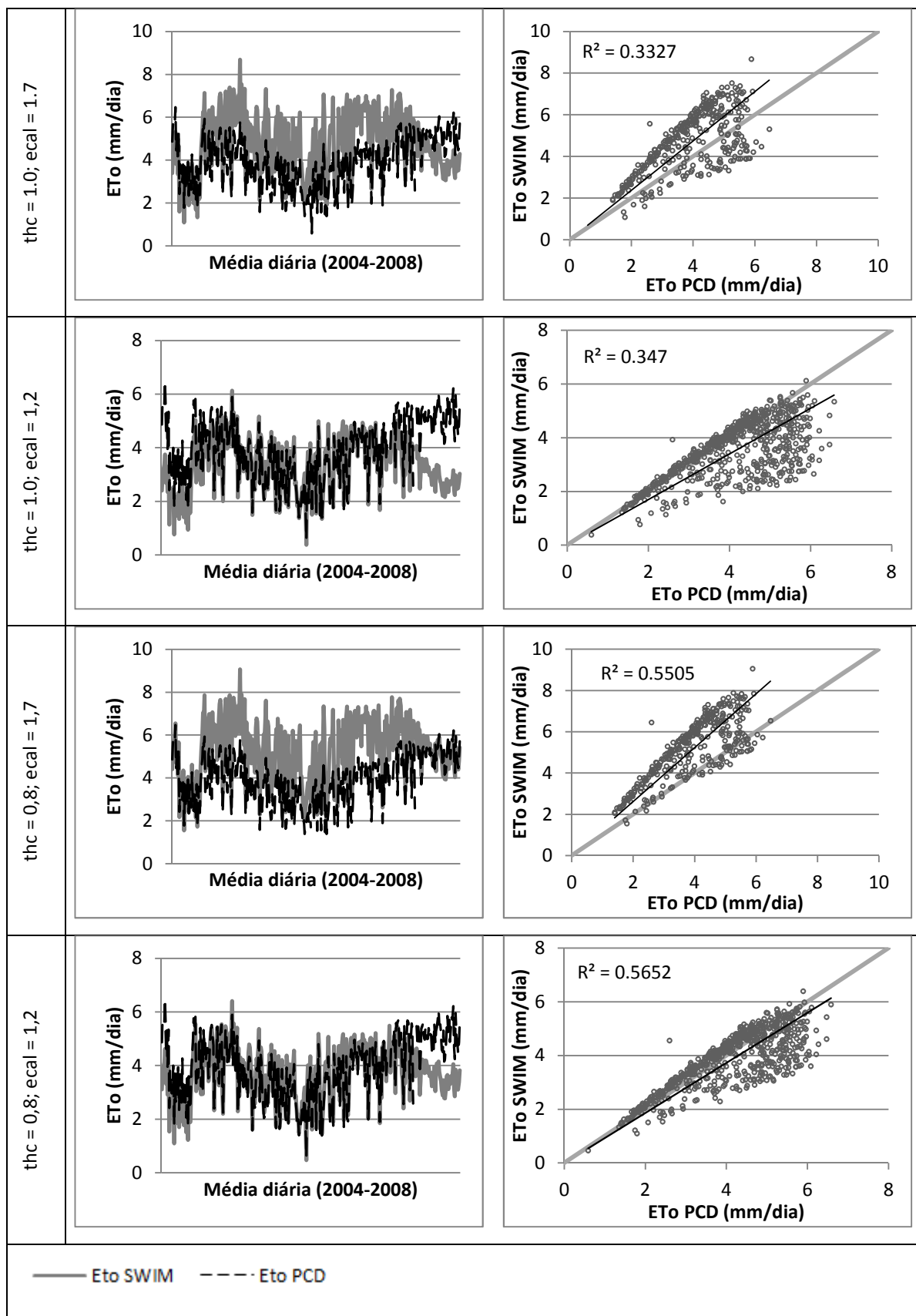


Figura 25 - Relação entre a ETo gerada na PCD e no modelo SWIM (thc: 1,0 e 0,8).

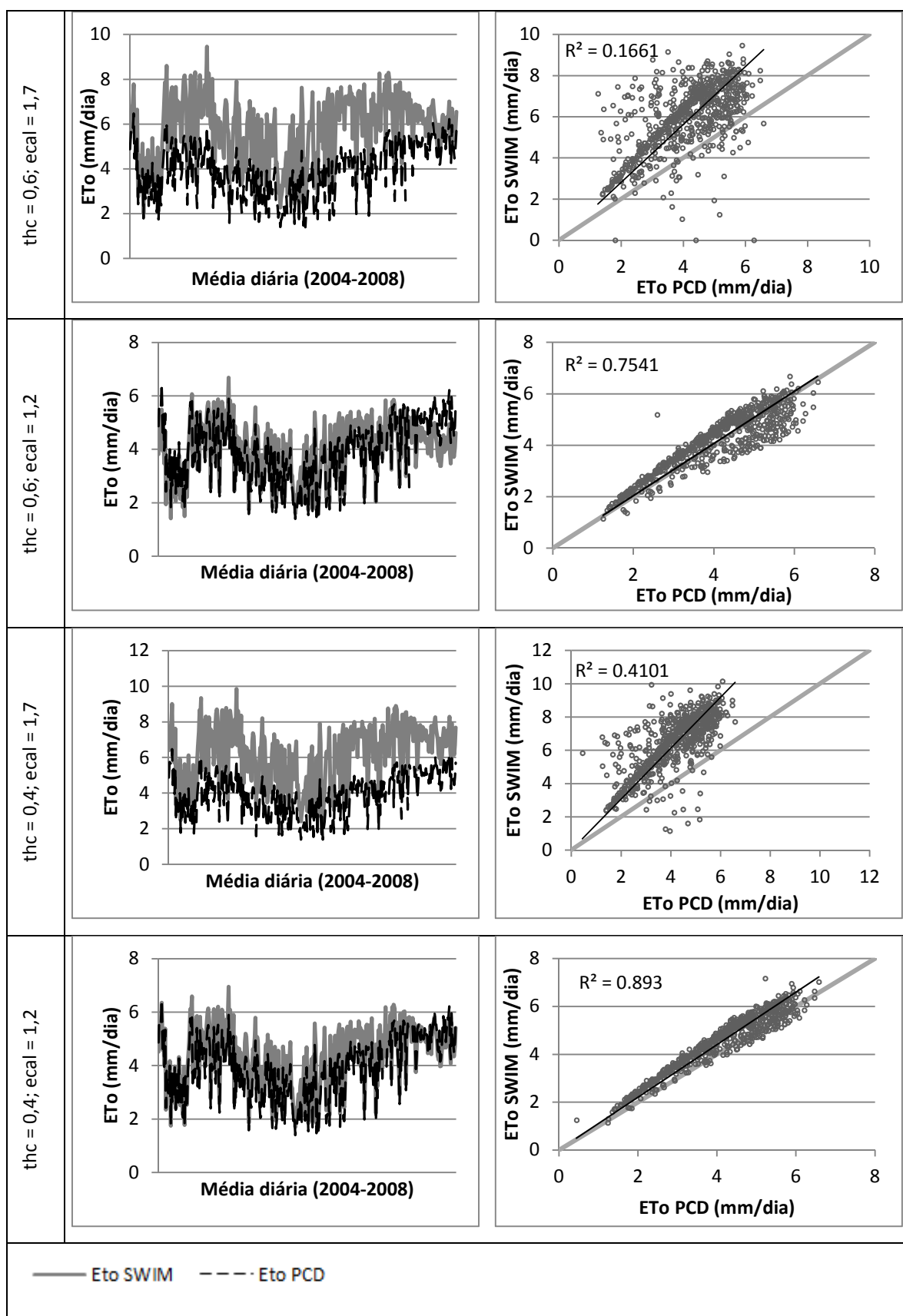


Figura 26 - Relação entre a ETo gerada na PCD e no modelo SWIM (thc: 0,6 e 0,4).

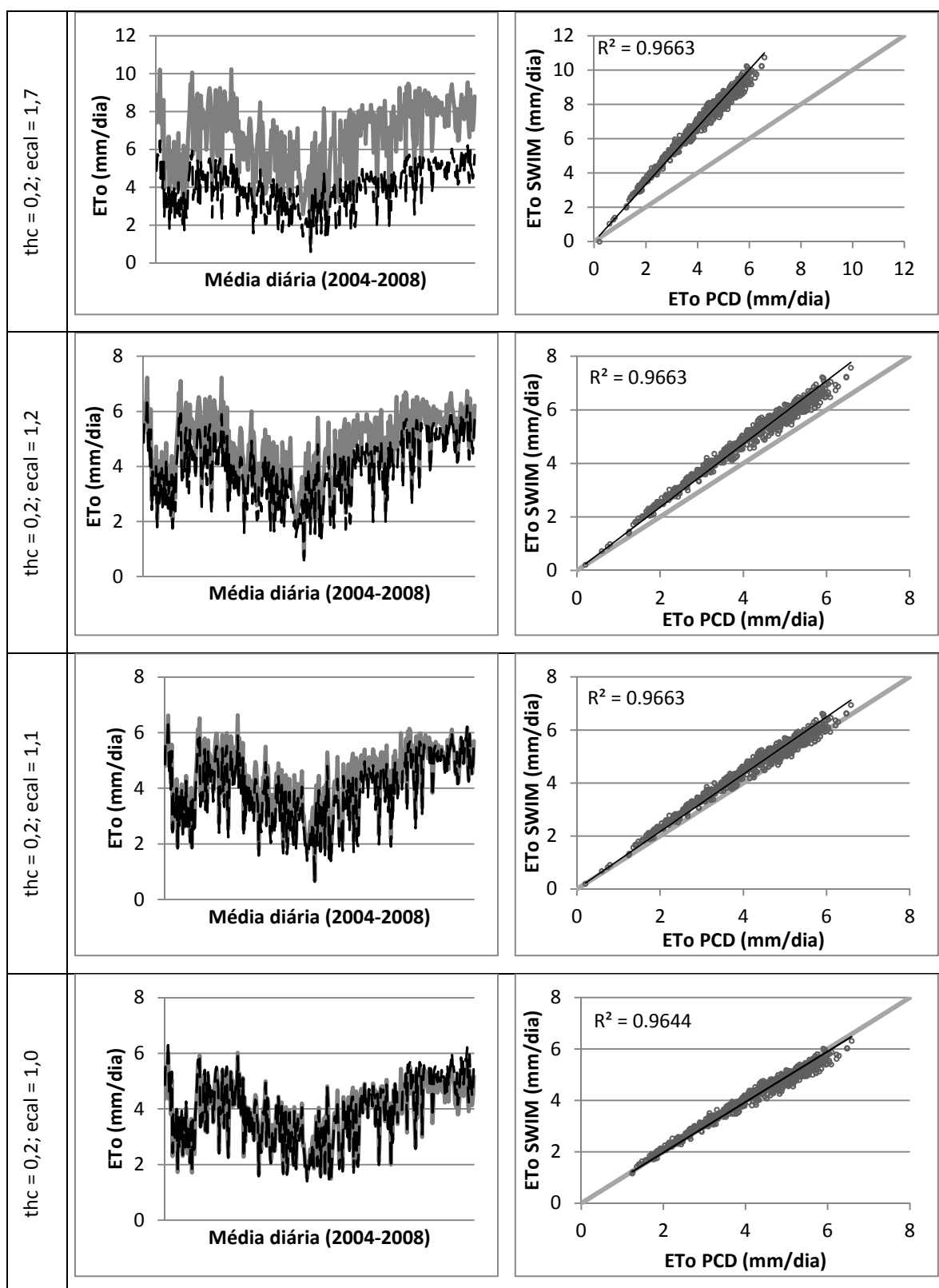


Figura 27 – Relação entre a ETo gerada na PCD e no modelo SWIM (thc = 0,2).

Os gráficos de linha, a esquerda nas Figuras: 25, 26 e 27, ilustram no eixo y as estimativas, pelo método de Penman Monteith (FAO 56), da ETo média diária, para o período de 2004-2008, geradas pela PCD (linha tracejada) e pelo modelo SWIM (linha cinza), e no eixo x estão representados os dias do ano. Os gráficos de dispersão a direita representam a relação entre os dados gerados pelo SWIM e calculados pela PCD.

Analisando os valores estimados e plotados pôde-se observar que o coeficiente $ecal = 1,7$ superestima os resultados independente do valor aplicado do coeficiente thc , e o mesmo desempenho pode ser observado para valores de $ecal$ entre 1,4 e 1,6. Verificou-se também que as melhores relações foram encontradas utilizando o valor de thc entre 0,4 e 0,2.

Os resultados encontrados ao relacionar os dados estimados na PCD e no SWIM demonstraram graficamente que existe uma boa relação entre os mesmos, o que indica que o modelo pode estar calibrado para estimar a ETo na região de interesse da pesquisa. Apesar de outras combinações de coeficientes apresentarem uma boa relação com os dados da PCD, os mesmos não puderam ser indicados por superestimar os resultados, como é o caso da combinação de $thc = 0,2$ e $ecal = 1,7$. Analisando, separadamente, o alinhamento entre as séries o melhor resultado é observado ao utilizar $thc = 0,2$ e $ecal = 1,0$. Porém, nesta pesquisa adotou-se como critérios, inicialmente, o melhor coeficiente de determinação e, em seguida, o alinhamento entre as estimativas. Com base nestes critérios o melhor desempenho encontrado foi para os valores de thc e $ecal$ de 0,2 e 1,1 respectivamente. Esta hipótese foi a utilizada na estimativa de Eto com o objetivo de analisar o desempenho do método de Turc-Ivanov modificado.

5.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MÉTODO DE TURC-IVANOV MODIFICADO

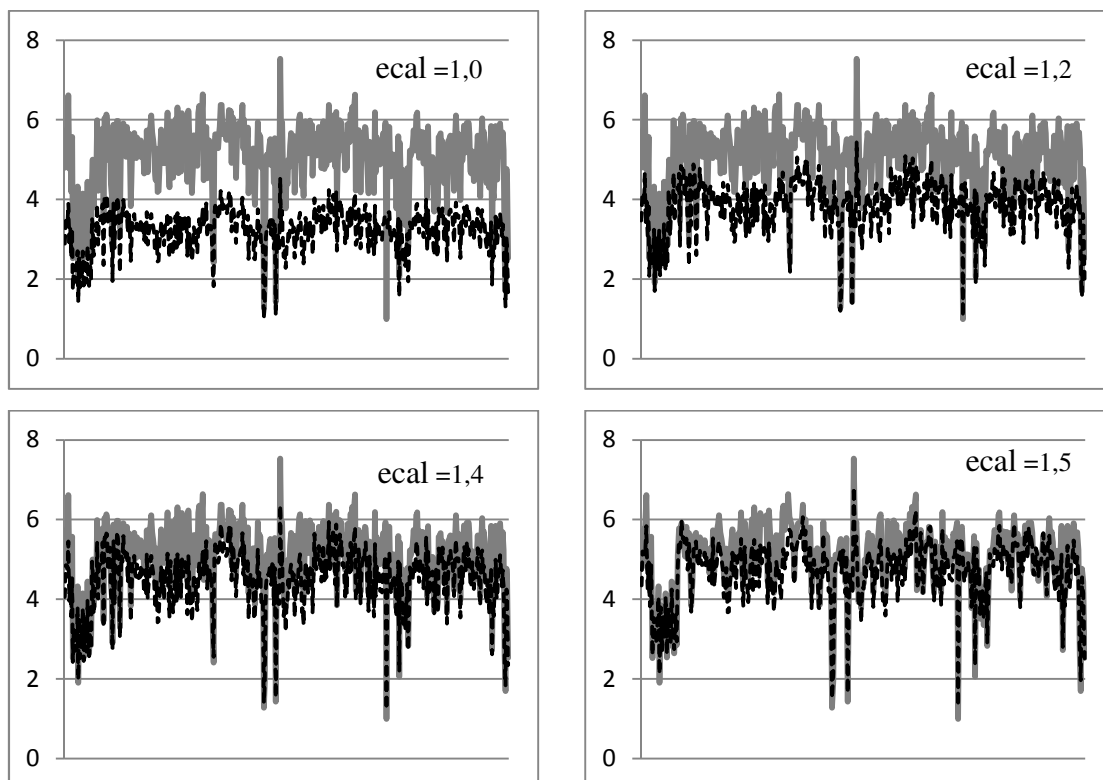
Após a confirmação de que o modelo SWIM estava calibrado para a área de estudo, foi possível avaliar o desempenho do método de Turc-Ivanov modificado na estimativa da Eto da microbacia de Gameleira. Para verificar esta afirmação, inicialmente, em uma primeira simulação, comparou-se os dados gerados no SWIM pelo método Penman-Monteith (FAO56), utilizando os coeficientes $thc=0,2$ e $ecal = 1,1$, com as estimativas geradas pelo método de Turc-Ivanov modificado, adotando como valores de Ω os já utilizados na calibração do modelo, que variam entre 0,7 para os meses de janeiro e dezembro e de 1,25 para maio, conforme citado na metodologia. Em uma segunda simulação, comparou-se os

mesmos dados gerados no SWIM pelo método Penman-Monteith (FAO56) como os calculados pelo método de Turc-Ivanov modificado, considerando $\Omega = 1,0$.

5.4.1 Avaliação do desempenho do método de Turc-Ivanov modificado (Simulação 1).

Foram encontrados nove resultados para a ETo utilizando o método de Turc-Ivanov modificado, obtidos a partir da variação do coeficiente ecal em 0,1 para a faixa de 0,9 a 1,7. Pode-se perceber que o comportamento das correlações entre os métodos foram sazonais, divididas em três zonas: a primeira contemplou os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro; a segunda zona refere-se aos meses de maio a julho e a terceira engloba os meses de fevereiro, março, abril, agosto e setembro. A primeira zona representa o período mais seco, a segunda zona é caracterizada por ser um período chuvoso e a terceira zona refere-se a meses de transição entre estes dois períodos.

Analisando separadamente estas zonas, percebe-se que o método de Turc-Ivanov modificado apresentou o melhor desempenho para o período seco quando o valor do coeficiente ecal foi 1,6 como ilustra a Figura 28.



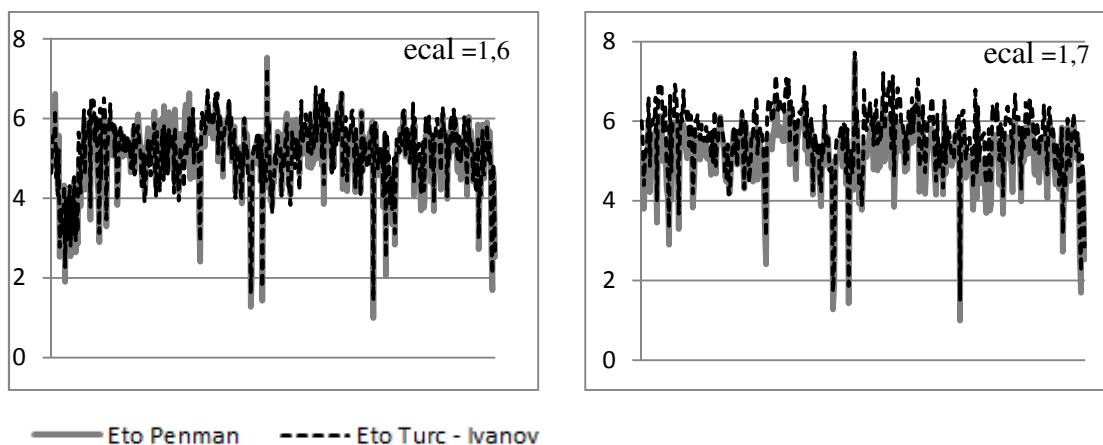
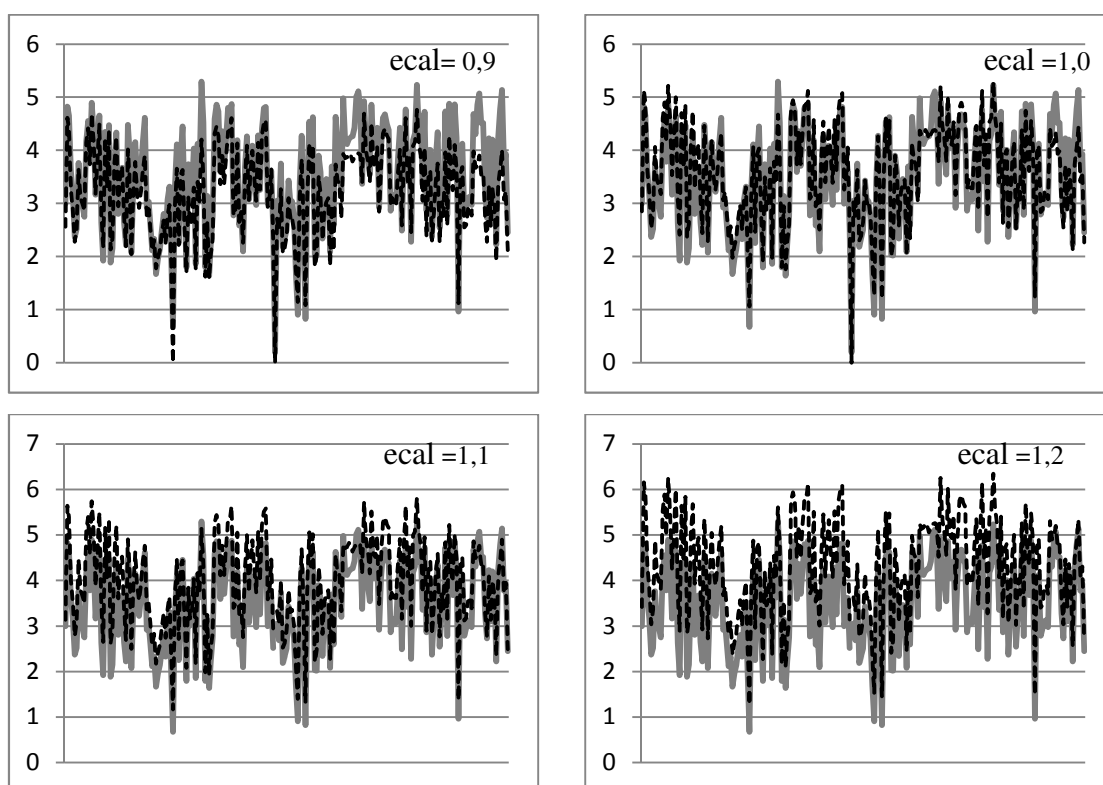


Figura 28 – Desempenho do método de Turc-Ivanov para o período seco.

Este comportamento pode ser justificado pelo fato que no período seco encontra-se os maiores valores de ETo, ou seja o maior índice de evapotranspiração, portanto, elevando o coeficiente ecal, foi obtido o melhor ajuste entre os métodos. O efeito inverso pode ser observado para o período chuvoso, pois é nesta zona que encontra-se os menores índices de ETo, por isso o melhor desempenho do método de Turc-Ivanov modificado, para este período, foi observado ao adotar o valor de ecal de 1,0 (Figura 29).



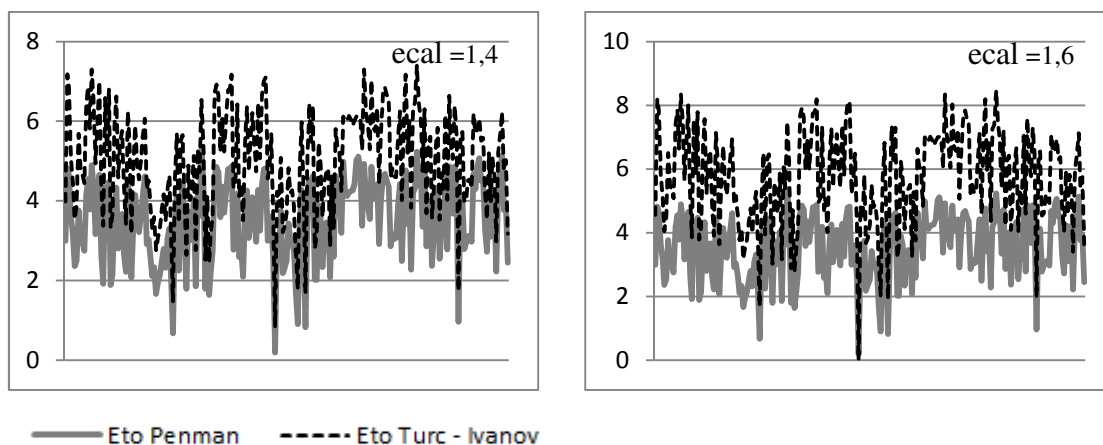
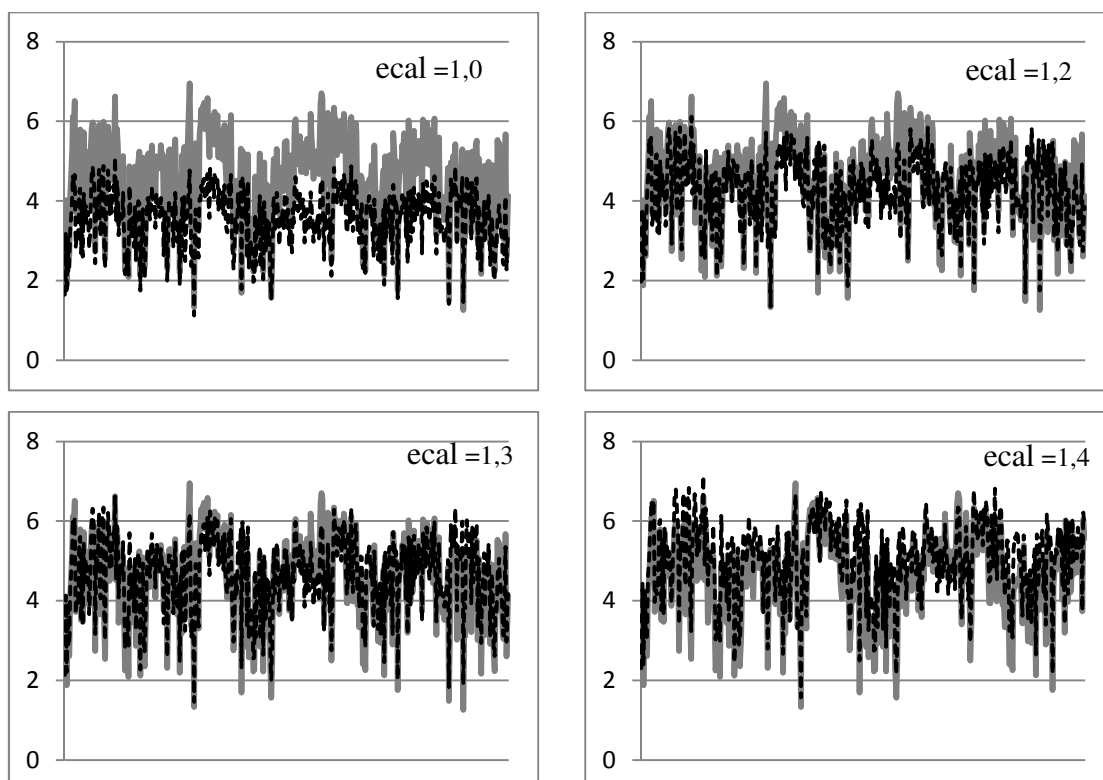


Figura 29 – Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado para o período chuvoso.

No entanto, existe um período que se chamou, neste trabalho, de zona de transição entre o período seco e o período chuvoso, que apresentou um comportamento diferente dos dois outros períodos extremos, para esta zona o método apresentou o melhor desempenho quando o valor de ecal foi 1,3 (Figura 30).



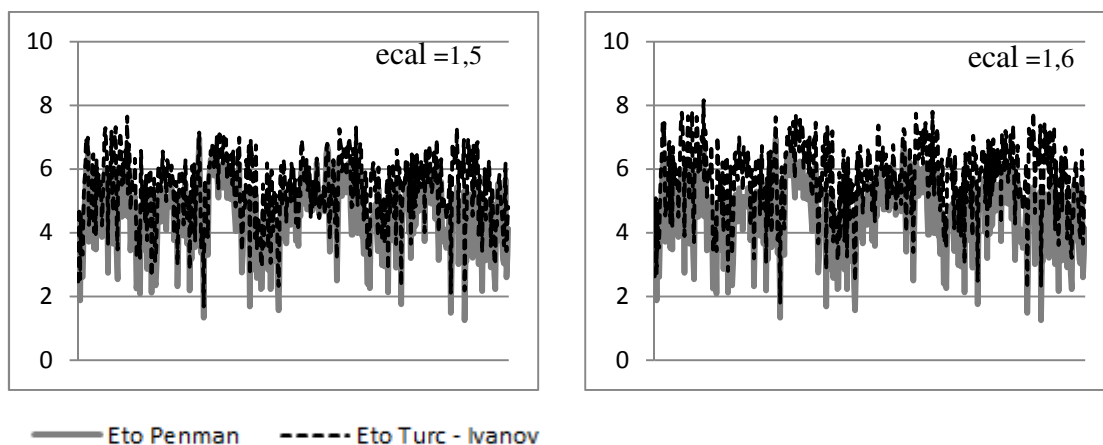


Figura 30 – Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado para o período de transição.

Após a análise gráfica, realizou-se a análise de desempenho utilizando o índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c) descrito no capítulo de metodologia. Para esta análise os nove resultados encontrados, após a variação do coeficiente ecal, foram divididos em três períodos, já citados anteriormente, e para cada período determinou-se os valores dos índices de concordância e de desempenho.

A análise do desempenho do método, a partir do índice de concordância e do índice de desempenho, variando o coeficiente ecal para a faixa de 0,9 a 1,7, mostrou que para o período seco os melhores desempenhos foram obtidos pelas equações que utilizaram valores maiores de ecal, apresentando um ótimo desempenho a equação que utilizou $ecal = 1,6$. Isso se deve ao fato dos resultados encontrados a partir desta equação apresentaram o menor afastamento dos resultados gerados pelo método de Penman-Monteith (FAO56). Já para o período chuvoso a equação que apresentou um ótimo desempenho refere-se ao $ecal = 1,0$, demonstrando que a aplicação dos menores valores deste coeficiente melhoram o desempenho do método para este período. Para os meses de fevereiro, março, abril, agosto e setembro a equação que apresentou melhor desempenho adotou o $ecal = 1,3$. A Tabela 12 apresenta os resultados para os três períodos, variando os valores de ecal em: 0,9 ;1,0; 1,1; 1,2; 1,3;1,4; 1,5; 1,6 e 1,7.

Tabela 12 – Desempenho do método Turc-Ivanov modificado.

Período	Valor ecal	r	d	c	Desempenho
Seco	0,9	0,95	0,41	0,39	Péssimo
	1,0	0,95	0,50	0,43	Mau
	1,1	0,95	0,39	0,41	Mau
	1,2	0,95	0,13	0,12	Péssimo
	1,3	0,95	0,40	0,38	Péssimo
	1,4	0,95	0,74	0,71	Bom
	1,5	0,95	0,91	0,87	Ótimo
	1,6	0,95	0,95	0,90	Ótimo
	1,7	0,95	0,87	0,83	Muito bom
Chuvoso	0,9	0,95	0,94	0,90	Ótimo
	1,0	0,95	0,97	0,92	Ótimo
	1,1	0,95	0,87	0,83	Muito bom
	1,2	0,95	0,64	0,61	Mediano
	1,3	0,95	0,25	0,24	Péssimo
	1,4	0,95	0,22	0,21	Péssimo
	1,5	0,95	0,46	0,43	Mau
	1,6	0,95	0,55	0,47	Mau
	1,7	0,95	0,45	0,43	Mau
Transição	0,9	0,93	0,02	0,02	Péssimo
	1,0	0,93	0,04	0,04	Péssimo
	1,1	0,93	0,51	0,47	Mau
	1,2	0,93	0,83	0,77	Muito Bom
	1,3	0,93	0,95	0,88	Ótimo
	1,4	0,93	0,91	0,84	Ótimo
	1,5	0,93	0,78	0,73	Bom
	1,6	0,93	0,52	0,49	Mau
	1,7	0,93	0,24	0,22	Péssimo

O desempenho do método de Turc-Ivanov modificado comparado com o método de Penman-Monteith (FAO56) Allen *et al.*, (1998), recomendado pela FAO 56, para o período da pesquisa, 2004 a 2008, utilizando os dados da Estação de Gameleira, foi enquadrado como ótimo, e pode ser observado nas Figuras 31 e 32 o desempenho médio diário para o período em estudo.

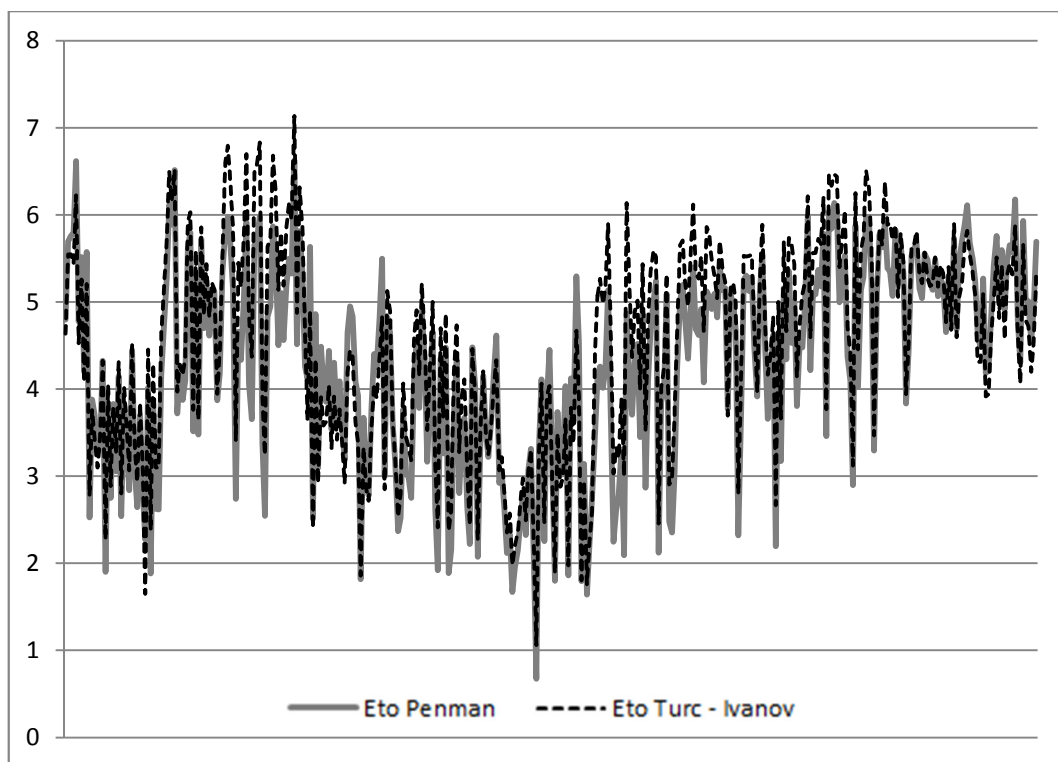


Figura 31 – Comparação entre os métodos de Turc-Ivanov modificado e Penman-Monteith (FAO56)

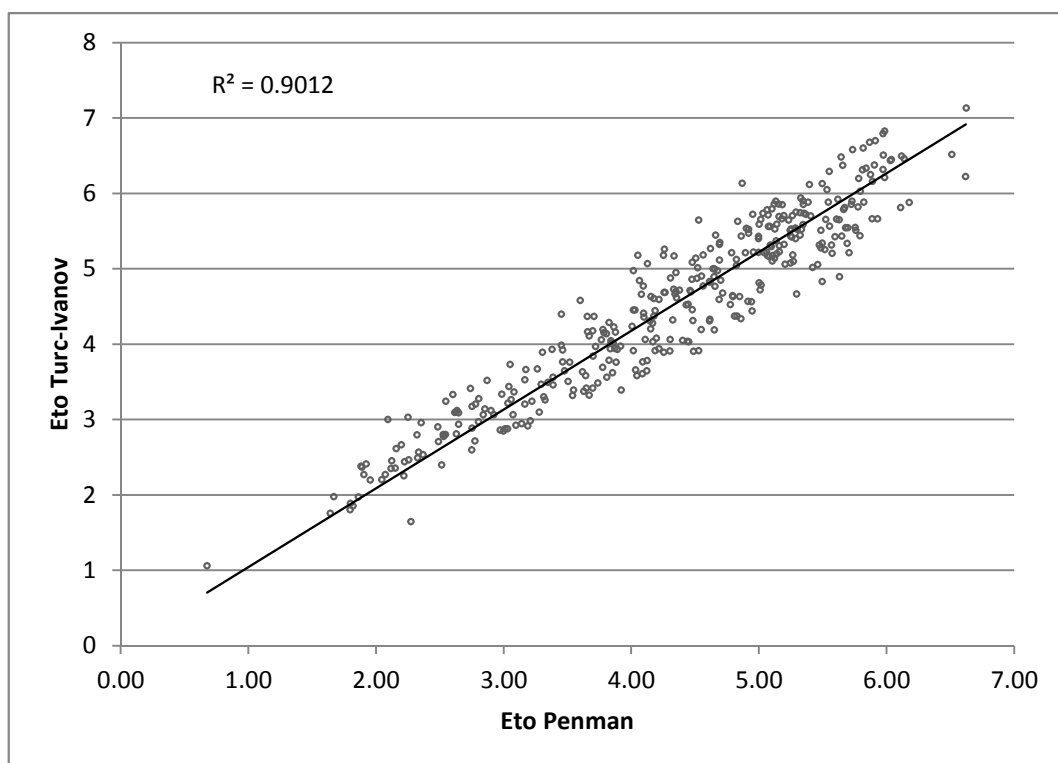


Figura 32 - Relação dos métodos de Turc-Ivanov modificado e Penman-Monteith (FAO56)

5.4.2 Avaliação do desempenho do método de Turc-Ivanov modificado (Simulação 2)

Em uma segunda análise adotou-se o valor de 1,0 para o fator adimensional mensal (Ω), presente no método de Turc-Ivanov modificado, visando analisar o comportamento deste método sem essa variação mensal. Os dados descritos na Tabela 13, apresentam o desempenho deste método comparado com método Penman-Monteith (FAO 56). Para essa análise variou-se o coeficiente ecal de 0,1 para a faixa de 1,0 a 1,7. Os resultados encontrados mostraram um ótimo desempenho do modelo quando o valor de ecal foi 1,2, como apresentado na Tabela 13 e na Figura 33.

Tabela 13 – Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado considerando $\Omega = 1,0$

Valor ecal	r	d	c	Desempenho
1,0	0,98	0,68	0,67	Bom
1,1	0,98	0,92	0,90	Ótimo
1,2	0,98	0,97	0,95	Ótimo
1,3	0,98	0,87	0,85	Muito bom
1,4	0,98	0,64	0,62	Mediano
1,5	0,98	0,32	0,31	Péssimo
1,6	0,98	0,06	0,06	Péssimo
1,7	0,98	0,02	0,02	Péssimo

Analisando os resultados obtidos pode-se perceber que o desempenho do modelo é melhor para valores menores de ecal. O mesmo desempenho não pode ser observado ao elevar este coeficiente (Figura 33), pois para a faixa de 1,5 a 1,7 os valores estimados pelo método de Turc-Ivanov modificado apresentam-se bem afastados dos calculados pelo método de Penman-Monteith (FAO 56).

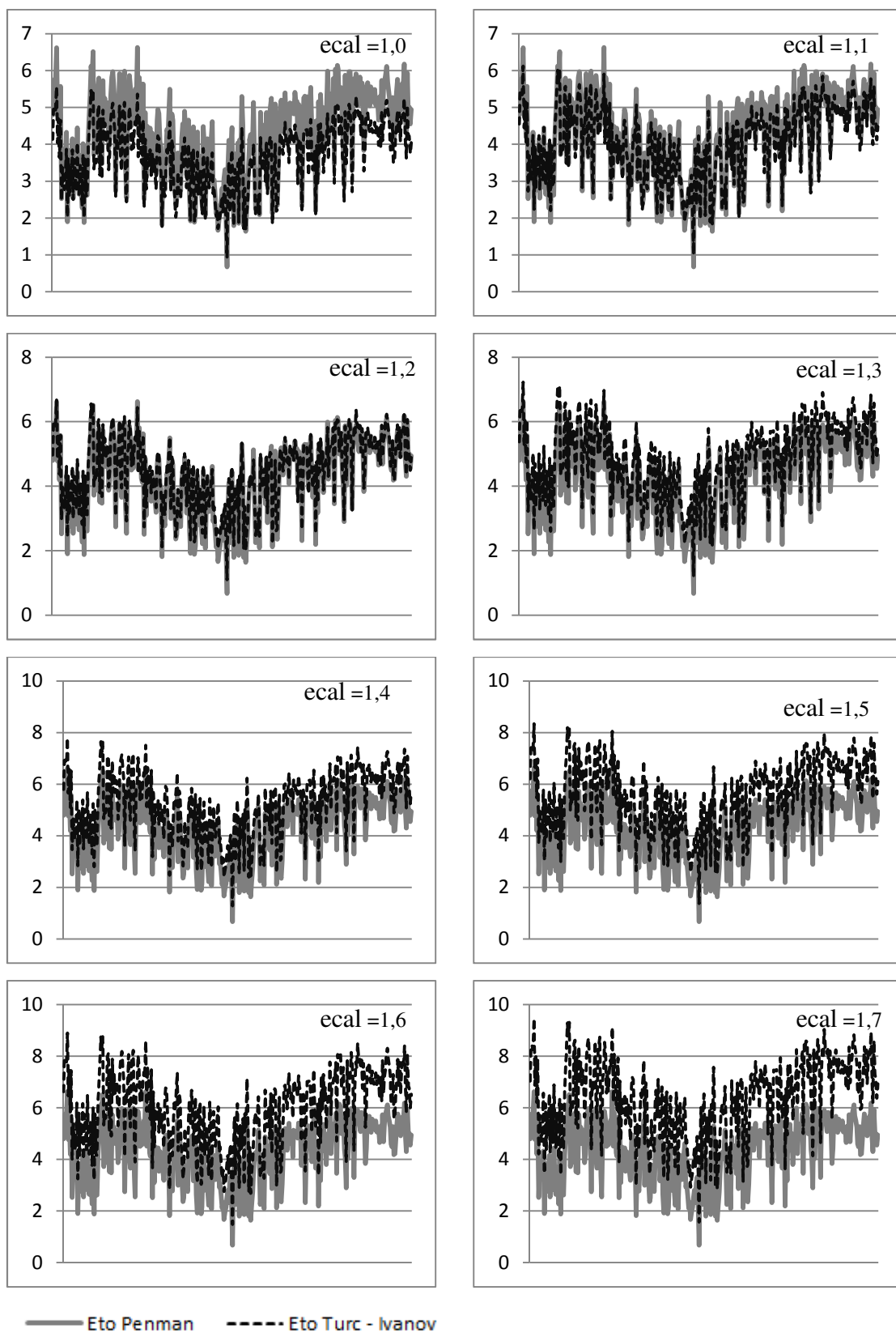


Figura 33– Desempenho do método de Turc-Ivanov modificado.

Diante destes resultados pôde-se observar que o melhor desempenho do método Turc-Ivanov modificado, considerando $\Omega=1,0$, foi encontrado para o valor de $e_{cal}=1,2$, pois apresentou o melhor índice de concordância e o melhor índice de exatidão, proposto por Camargo e Sentelhas (1997). As Figuras 34 e 35 ilustram este resultado através dos gráficos de linha e dispersão.

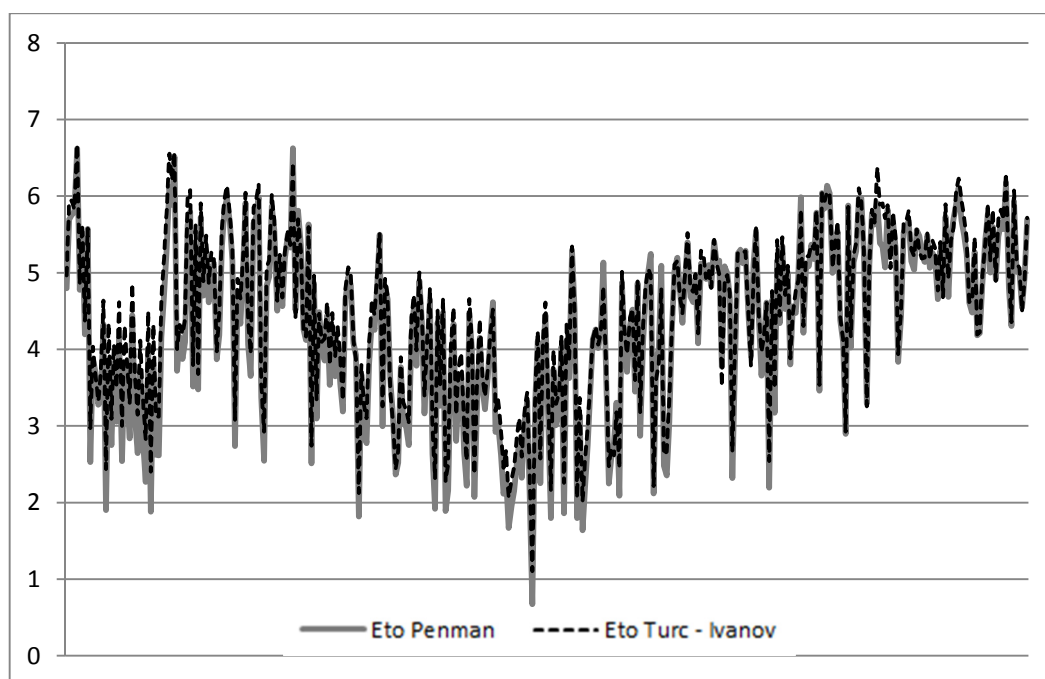


Figura 34 – Comparação dos métodos de Turc-Ivanov modificado ($\Omega = 1,0$) e Penman-Monteith (FAO 56)

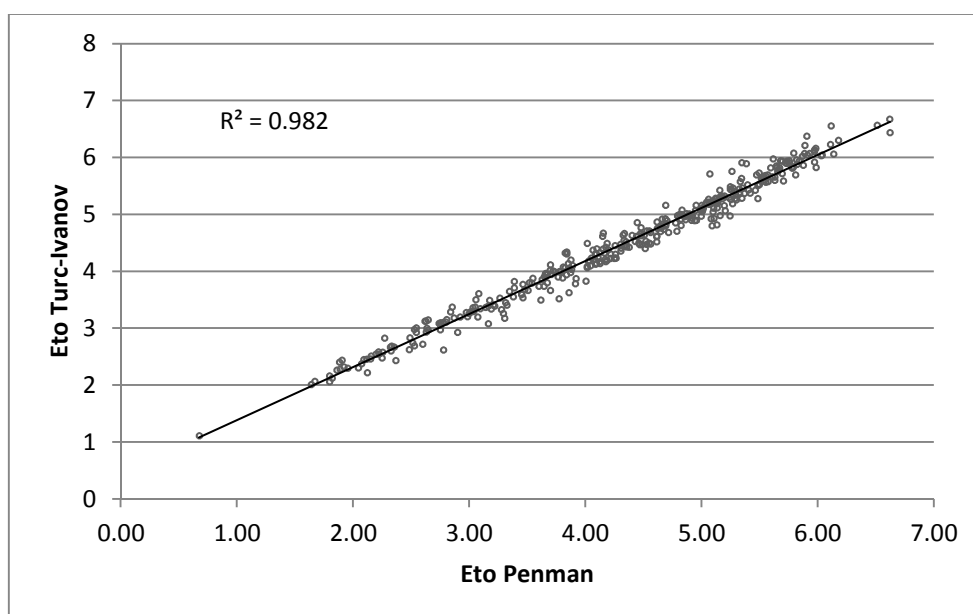


Figura 35 – Relação dos métodos de Turc-Ivanov modificado ($\Omega = 1,0$) e Penman-Monteith (FAO 56)

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse trabalho investigou o desempenho do método de Turc-Ivanov modificado na estimativa da Evapotranspiração de referência, tendo como método padrão o método de Penman-Monteith (FAO56). A região estudada foi a microbacia de Gameleira.

O método de Penman-Monteith (FAO56) (ALLEN *et. al*, 1998) foi recomendado pela FAO como o padrão para calcular a ETo e tem sido utilizado em todo o mundo. Este método exige vários parâmetros de entrada como temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. Entretanto, há um número limitado de estações meteorológicas para monitoramento dessas variáveis do tempo. Esta falta de dados meteorológicos leva ao desenvolvimento de abordagens mais simples para estimar a ETo, que exigem apenas alguns parâmetros de entrada. O método de Turc-Ivanov modificado possui estas características, por necessitar apenas da radiação solar e da temperatura.

Para a aplicação do método foi necessário tratar os dados, cujo procedimento foi possível em virtude da ótima correlação entre os dados da estação Gameleira e os dados da estação Recife, utilizada como variável explicativa na geração das equações usadas no preenchimento de falhas.

Faz-se necessário destacar que existe uma deficiência na coleta de dados hidrometeorológicos, este fato se deve a quantidade, ainda pequena, de estações de monitoramento no Brasil. Além deste problema, as séries históricas, destas estações, apresentam inconsistências nos dados, necessitando, muitas vezes, de estudos estatísticos adicionais para preencher falhas.

No que se refere à etapa de preenchimento de falhas, destaca-se ainda os resultados do preenchimento das falhas da radiação solar, a partir da regressão múltipla, adotando como variáveis explicativas a temperatura máxima, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e precipitação. Este desempenho indica que é possível utilizar as próprias variáveis da estação em estudo para preenchimento de falhas de uma variável específica. Este procedimento pode ser aplicado nas situações onde as estações vizinhas apresentam inconsistências.

Os resultados apresentados da calibração do modelo SWIM foram considerados “quase perfeitos”, segundo a classificação de Cohen, diante do número considerável de

variáveis a serem ajustadas. Pode-se considerar que o modelo foi capaz de representar, de forma eficaz, a ETo na microbacia hidrográfica de Gameleira, aplicando-se os métodos de Penman-Monteith (FAO56) e Turc-Ivanov modificado.

Para o método Turc-Ivanov modificado o modelo SWIM apresenta uma dificuldade de calibração do fator Ω , pois, este faz parte do programa fonte, dificultando o acesso, este poderia ser um dado de entrada do modelo.

O método de Turc-Ivanov modificado, aplicado com os valores de Ω disponíveis na calibração original do modelo SWIM, apresentou ótimo desempenho segundo o índice proposto por Willmott *et al.*, (1985), sendo necessário analisar separadamente os dados em três períodos. Para os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro adotou-se o coeficiente de calibração de 1,6, enquanto que os meses de maio, junho e julho o coeficiente utilizado foi de 1,0 e para os meses de fevereiro, março, abril, agosto e setembro foi aplicado o coeficiente de 1,3. Nas três situações foi encontrado um ótimo desempenho.

A aplicação do método de Turc-Ivanov modificado, adotando $\Omega = 1$, apresentou um ótimo desempenho, de acordo com o método proposto por Willmott *et al.*, (1985), ao utilizar o valor de 1,2 para ecal. Ressaltando que ao utilizar $\Omega = 1$, não foi necessário dividir a série em períodos.

Este desempenho indica que para a microbacia de Gameleira não existe grandes variações mensais na Evapotranspiração, que necessite utilizar o coeficiente de ajuste. Isso pode ser explicado pelos valores da umidade relativa do ar serem maiores que 50%, e também devido ao fato do clima brasileiro ser bastante comparável ao clima no Sul da Europa / África do Norte, onde o método foi desenvolvido, do que com o clima da Europa Central.

Observa-se que a aplicação do método de Turc-Ivanov modificado na estimativa de Evapotranspiração de referência da microbacia de Gameleira é bastante viável. Este desempenho possibilita a estimativa da ETo por um método mais simples, que necessita apenas da temperatura e da radiação solar, uma vez que as medições dos dados climatológicos são escassas e de difícil manutenção.

Portanto, ressalta-se que, a partir de um método aplicado originalmente na Europa, para uma região temperada, com variações bruscas de ETo, foi possível calibrá-lo e aplica-lo para uma região de transição entre a Zona da Mata e o Semiárido do Nordeste brasileiro.

Evidencia-se ainda que o método Turc-Ivanov modificado é aplicado tanto para temperaturas acima como abaixo de 5 °C, e neste trabalho foi aplicado para temperaturas médias bem acima, variando entre 20 °C e 26 °C, apresentando a possibilidade de aplicação

do método para regiões com temperaturas bem mais elevadas do que a proposta originalmente.

Também foi possível testar a aplicação do modelo SWIM, elaborado para aplicações na Europa. Os resultados encontrados indicaram um bom desempenho de sua aplicação para uma região de transição entre a Zona da Mata e o Semiárido do Nordeste brasileiro.

Destaca-se ainda a possibilidade de aplicação da metodologia, utilizada neste trabalho, para outras regiões do Brasil, a exemplo da região em torno do lago da usina hidrelétrica Luiz Gonzaga (antiga Itaparica). Existindo a possibilidade de encontrar bons resultados para a estimativa da ETo, pelo método de Turc-Ivanov modificado, adotando o parâmetro omega igual a 1 ou dividindo a série em dois períodos: seco e chuvoso.

Recomenda-se uma maior responsabilidade das instituições que monitoram as estações hidrometeorológicas, na tentativa de diminuir a quantidade de dados inconsistentes nas séries.

Quanto à estação de Gameleira, sugere-se a continuidade das observações para que outros trabalhos possam ser desenvolvidos. Além disso, verificar a possibilidade de parcerias com a Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) para suporte na manutenção desta estação.

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se:

- Investigar o desempenho do método de Turc-Ivanov modificado em outras escalas temporais.
- Aplicar o método em outras regiões com características climáticas diferentes, para verificar a viabilidade de sua aplicação.
- Comparar o método de Turc-Ivanov modificado com o método de Hargreaves aplicado pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), para a região Nordeste.
- Utilizar o modelo SWIM na modelagem hidrológica analisando a dinâmica hidrologia, vegetação, erosão e nutrientes.

REFERÊNCIAS

- ABDELMAGEED, N. B. Performance assessment of some developed surface irrigation methods. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 5, 2013.
- ACRA, A. *et al.*, **Water Disinfection by Solar Radiation, Assessment and Application**. Canada: International Development Research Centre - IDRC, 1990.
- ALENCAR, L. P. D. *et al.*, Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade aos principais elementos climáticos na cidade de Uberaba – MG. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, p. 159-166, 2012.
- ALLEN, R. G. *et al.*, Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage**, v. Paper 56. Rome, Italy p. 300, 1998.
- ÁLVARES, J. *et al.*, **História da Vitória de Santo Antão, 1983 a 2010**. Vitória de Santo Antão: 1ª Ed, 2011. 636
- ARAÚJO FILHO, P. F. **Modelagem hidrológica, com implantação de um limite máximo no déficit hídrico do modelo TOPMODEL, e aplicação na região de transição entre a Zona da Mata e o Agreste Pernambucano**. 2004. 130 p. (Doutorado). Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, p. 142, 1993.
- ARNOLD, J. G. *et al.*, **SWAT, Soil and Water Assessment Tool**. USDA, Agriculture Research Service, Grassland, Soil & Water Research Laboratory. 808 EAST BLACKLAND ROAD, T., TX 76502. 1994.

ATV-DVWK: VERDUNSTUNG IN BEZUG ZU LANDNUTZUNG, B. U. B. **DWA-Merkblatt atv-dvkw-m 504**, DWA Deutsche Vereinigung f'ur Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Hennef: DWA 2002.

AZEVEDO, J. R. G. D. (Org.) **Hidrologia aplicada a gestão de recursos hídricos**. Universitária da UFPE. Recife: 2010. 484 p.

BACK, Á. J. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 139-145, 2007.

BARROS, V. R. *et al.*, Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, 2009.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração. Boletim Técnico. DEPARTAMENTO DE PESQUISA. SECRETARIA DA AGRICULTURA**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Agronômicas 95 p. 1981.

BISCARO, G. A. **Meteorologia agrícola básica**. Cassilândia: UNIGRAF, 2007.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation date. Washington. **USDA**, n. 96, 1950.

BORGES JÚNIOR, J. C. F. *et al.*, Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, 2012.

BRAGA, R. A. P. **Gestão ambiental da bacia do rio Tapacurá – Plano de ação**. Recife: 2001. 101 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, D. F. *et al.*, Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica - RJ utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 1, 2006.

CARVALHO, L. G. D. *et al.*, Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **pesquisa agropecuaria tropical**, v. 41, p. 456-465, 2011.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Erlbaum, 1988. 569 p.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia** Porto Alegre: IPH UFRGS 2008.

CONRADT, T. *et al.*, Impacts of global change on water-related sectors and society in a trans-boundary central European river basin – Part 2: from eco-hydrology to water demand management. **Adv. Geosci.**, v. 11, p. 93-99, 2007.

CONRADT, T.; WECHSUNG, F.; BRONSTERT, A. Three perceptions of the evapotranspiration landscape: comparing spatial patterns from a distributed hydrological model, remotely sensed surface temperatures, and sub-basin water balances. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 17, n. 7, p. 2947-2966, 2013.

CUNHA, F. F. D.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. D. MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA CHAPADÃO DO SUL - MS. **REVENG Engenharia na agricultura** v. 21, n. 2, p. 159-172, Março / Abril, Viçosa - MG, 2013.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements** (Irrigation and drainage paper, 24). FAO. Rome 1977.

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários**

Atuais e prospectivos de ocupação e uso do Solo utilizando um modelo hidrológico Distribuído. 2010. (Mestrado). Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DVWK: ERMITTLUNG DER VERDUNSTUNG VON LAND- UND WASSERFLÄCHEN, D.-M. D.-M. **DWA-Merkblatt DVWK-M 238. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.** . Hennef: DWA 1996.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas.** Turrialba: CATIE, 1996.

FERNANDES, D. S. *et al.*, **Evapotranspiração : uma revisão sobre os métodos empíricos.** FEIJÃO, E. A. E. Santo Antônio de Goiás 2010.

FISHER, J. B.; WHITTAKER, R. J.; MALHI, Y. ET come home: potential evapotranspiration in geographical ecology. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, p. 1-18, 2011.

GLUGLA, G.; KÖNIG, B. **VERMO - Ein Modell für die Berechnung des Jahresganges der Evaporation, Versickerung und Grundwasserneubildung.** Berlin: Landwirtsch.Wiss. DDR, 1989. 85-91

GOMES, H. P. **Engenharia de Irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento.** . 2ª ed. Campina Grande: UFPB, 1997. 344 p

HABERLANDT, U. From hydrological modelling to decision support. **Advances in Geosciences**, v. 27, n. 27, p. 11-19, 2010.

HANASAKI, N. *et al.*, A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways-Part 2: Water availability and scarcity. . **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 2393-2413, 2013.

HANASAKI, N. *et al.*, An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, p. 1007–1025, 2008.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **American Society of Agricultural Engineering Meeting (Paper 85-2517)**, 1985.

HATTERMANN, F. *et al.*, Multiscale and multicriterial hydrological validation of the ecohydrological model SWIM. **Env. Modelling and Software Society**, p. 281-286., 2002.

HATTERMANN, F. *et al.*, Model-Supported Impact Assessment for the Water Sector in Central Germany Under Climate Change—A Case Study. **Water Resources Management**, v. 25, n. 13, p. 3113-3134, 2011.

HESSE, C. *et al.*, Eco-hydrological modelling in a highly regulated lowland catchment to find measures for improving water quality. **Ecological Modelling**, v. 218, n. 1–2, p. 135-148, 2008.

HOLSTEN, A. *et al.*, Evaluation of the Performance of Meteorological Forest Fire Indices for German Federal States. **Forest Ecology and Management**, v. 287, n. 1, 2013.

HUANG, S. *et al.*, Projections of climate change impacts on river flood conditions in Germany by combining three different RCMs with a regional eco-hydrological model. **Climatic Change**, v. 116, n. 3-4, p. 631-663, 2013.

HUANG, S. *et al.*, From meso- to macro-scale dynamic water quality modelling for the assessment of land use change scenarios. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 19, p. 2543-2558, 2009.

HUANG, S.; KRYSANOVA, V.; HATTERMANN, F. Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining three RCMs and a regional hydrological model. **Acta Geophysica**, v. 61, n. 1, p. 151-193, 2013.

HUANG, S. *et al.*, Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 23, p. 3289-3306, 2010.

JABLOUN, M. D.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 6, 2008.

JACOBS, J. M.; SATTI, S. R. **Evaluation of Reference Evapotranspiration Methodologies and AFSIRS Crop Water Use Simulation**. Johns River Water Management District. Palatka, FL. 2001

JAIN, S. K. *et al.*, Water Balance Study for a Basin Integrating Remote Sensing Data and GIS. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 39, n. 2, p. 259-270, 2011.

JUNG, M. *et al.*, Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, p. 951–954, 2010.

JUNQUEIRA, C. D. Á. R. **Avaliação ambiental aplicável a bacias hidrográficas no meio urbano: avaliação dos métodos de Amorim e Cordeiro, Pesmu e SWAT**. 2008. (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, UFSCar, São Carlos.

KRYSANOVA, V.; BECKER, A. Integrated Modelling of Hydrological Processes and Nutrient Dynamics at the River Basins Scale. **Hydrobiologia**, n. 410, p. 131-138, 1999.

KRYSANOVA, V. *et al.*, Factors affecting nitrogen export from diffuse sources: a modelling study in the Elbe basin. In: L. Heathwaite (ed.) **Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources**. **IAHS Publications**, n. 257, p. 201-212, 1999.

KRYSANOVA, V.; HABERLANDT, U. Assessment of nitrogen leaching from arable land in large river basins: Part I. Simulation experiments using a process-based model. **Ecological Modelling**, v. 150, n. 3, p. 255-275, 2002.

KRYSANOVA, V. *et al.*, SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual, PIK Report 69. **Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany**, 2000.

LAHMER, W. Macro- and Mesoscale Hydrological Modelling in the Elbe River Basin. **Technical Documents in Hydrology**, Paris, n. 37, 2000.

LOPEZ-URREA, R. *et al.*, Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. . **Agricultural Water Management**, v. 85, 2006.

MARINHO FILHO, G. M. *et al.*, Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MONTEIRO, A. B.; VIADANA, A. G. Técnica alternativa e simplificada para a aferição de hidrotopos aplicada ao córrego Wenzel. **REVISTA GEONORTE**, p. 1-15, Rio Claro/SP: 2009.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial diária em regiões brasileiras. XVI Congresso Nacional de Meteorologia - CBMET**. Belém 2010.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment, in: The state and movement of water in living organisms. **Symposium Society Experimental Biology**, p. 205–234. Cambridge University Press, London, 1965.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7 ed. New York: Willey & Sons, 2009. 656 p.

MOTA, D. M. *et al.*, **Validação do Modelo Espectral de Estimativa de Evapotranspiração de Nagler *et al.*, (2005) nos Domínios Morfoclimáticos da Caatinga e**

do Cerrado no Oeste Baiano Brasileiro. II Seminário Ibero Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra 2010

MOURA, A. R. C. **Estimativa da Evapotranspiração de Referência em bacia experimental na região Nordeste.** 2009. 126 (Mestrado). DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, UFPE, Recife.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia estatística.** CPRM. Belo Horizonte: 2007.

NĚMEČKOVÁ, S.; SLÁMOVÁ, R.; ŠÍPEK, V. Climate change impact assessment on various components of the hydrological regime of the Malše River basin. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 59, n. 2, p. 131, 2011.

NIED, M.; HUNDECHA, Y.; MERZ, B. Flood-initiating catchment conditions: a spatio-temporal analysis of large-scale soil moisture patterns in the Elbe River basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 1401–1414, 2013.

NORONHA, E. A. P. D. **Análise das potencialidades e vulnerabilidades socioambientais decorrentes do processo de expansão da industrialização no município de Vitória de Santo Antão-PE.** 2013. 88 (Mestrado). Universidade de Pernambuco, Recife - PE.

OLIVEIRA, L. M. M. D. **Avaliação da evapotranspiração de referência (ET_o) na Bacia Experimental do riacho Gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos.** 2007. 89 (Mestrado). CTG - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

PELLICCIOTTI, F., Ed. **Empirical evapotranspiration models.** Zürich: Swiss Federal Institute of Technology in Zürich. 2012.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas.** Guaíba (RS): Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478 p.

POHLE, I. *et al.*, Using catchment similarity for model parameter regionalization in highly anthropogenically impacted catchments in Lusatia. **Geophysical Research Abstracts**, v. 15, 2013.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review, Boston**, v. 100, n.2, p. 81-92, 1972.

REHISA. **Relatório Final da Caracterização das bacias experimentais do semi-árido, Projeto IBESA – Implantação de bacias experimentais do semi-árido para o desenvolvimento de metodologias de avaliação dos balanços hídricos e energéticos em diferentes escalas temporais e espaciais.** Projeto integrado UFRN-UFC-UFPB-UFCG-UFRPE-UFPE-UFBA: 2004.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental:** INPE 2000.

RICHTER, D. Verdunstung, in: Klimadaten der Deutschen Demokratischen Republik – Ein Handbuch für die Praxis. **Meteorologischer Dienst der Deutschen Demokratischen Republik, Potsdam**, v. 6, 1984.

RODRIGUES, A. C. *et al.*, **Bacia do riacho Gameleira – análise dos eventos chuvosos e da variabilidade de microescala.** VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. ABRH. Gravatá-PE: In Anais: 183 p. 2006.

ROTH, D. *et al.*, **Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen: Ergebnisse der TLL-Lysimeterstation. Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen.** Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2005.

SALGADO, E. **Curso relación suelo água planta.** VALPARAISO, U. Valparaiso: 184 p. 2001.

SANTOS, K. A. D. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: Bacia do rio Mundaú.** 2013. 126 (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SARAIVA, G. S.; BONOMO, R.; SOUZA, J. M. D. Perdas de água por evaporação e arraste, em sistemas de aspersão fixa, no norte do estado do Espírito Santo **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 4, 2013.

SCUDERI, C. M. **Estimativa da taxa de evapotranspiração da macrófita aquática "Zizaniopsis Bonariensis" : aplicação à simulação do nível de água do longo período do Banhado do Taim (RS).** 2010. (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, p. 1-12, 1996.

SERRAT-CAPDEVILA, A. *et al.*, Estimating evapotranspiration under warmer climates: Insights from a semi-arid riparian system. **Journal of Hydrology**, v. 399, n. 1–2, p. 1-11, 2011.

SILVA, D.; MEZA, F. J.; VARAS, E. Estimating reference evapotranspiration (ET_o) using numerical weather forecast data in central Chile. **Journal of Hydrology**, v. 382, p. 64-71, 2010.

SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. **Mathematical modeling of watershed hydrology** Highlands Ranch: Water Resources Publications, LLC, 2002.

TANNER, C. B.; PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by approximate energy balance method of Penman. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 10, 1960.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographic Review**, n. 38, 1948.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia, ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012.

TURC, L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. **Annals of Agronomy**, v. 12, n.1, p. 13-49, 1961.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: 2006. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf>.

VELOSO, H. P. *et al.*, **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

WENDLING, U.; SCHELLIN, H. Neue Ergebnisse zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration. . **Zeitschrift für Meteorologie** **36**, p. 214-217, 1986.

WILLMOTT, C. J. *et al.*, Statistics for the evaluation and comparison of models **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

XU, C.-Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 18, 2005.

XU, C. Y.; SINGH, V. P. A review on monthly water balance models for water resources investigations. **Water Resour Manage**, v. 12, p. 31–50, 1998.

YODER, R. E.; ODHIAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. . **Applied Engineering in Agriculture**, v. 21, n. 2, p. 197-202, 2005.

ANEXOS

```
C      FILE mainpro.f
C
C      SUBROUTINES IN THIS FILE          CALLED FROM
C      program main
```

```

program main
C**** PURPOSE 1: MAIN PROGRAM READS INPUT DATA by calling
C          open, readcod, readbas, readcrp, readsub, readsol;
C          PURPOSE 2: MAKES INITIALIZATION by calling init
C          PURPOSE 3: INCLUDES ANNUAL CYCLE, DAILY CYCLE, and ROUTING
STRUCTURE
C~~~~~
~~~~~
C      PARAMETERS & VARIABLES
C
C      >>>> COMMON PARAMETERS & VARIABLES
C      accf(7),accf(8) = monthly water discharge observed and simulated
C      aryld(j,k,icr)  = fraction of area by crop per sub, soil
C      arylda(iy,icr)  = fraction of area by crop per year
C      aryldc(icr)     = fraction of area by crop
C      arylds(k,icr)   = fraction of area by crop per soil
C      avyld(j,k,icr)  = av. yld per sub,soil,crop, kg/ha
C      avylda(iy,icr)  = av yld per year, crop, kg/ha
C      avyldc(icr)     = av yld per crop, kg/ha
C      avylds(k,icr)   = av. yld per soil,crop, kg/ha
C      cn              = Curve Number, current
C      da9             = 100. * da = basin area in ha
C      dflow(j,je,20)  = monthly flows for water and N (see writhru.f)
C      diso(ida)       = observed river discharge at the outlet
C                      = for the total sim. period, m3/sec.
C      diss(ida)       = simulated river discharge at the outlet
C                      = for the total sim. period, m3/sec.
C      flu(j)          = fraction of subbasin area in the basin
C      icodes(ih)      = code to switch between routing subroutines
C      ida             = current day
C      idaf            = beginning day of simulation
C      idal            = last day of simulation
C      idayx           = par = ida, to calc ndgro - number of growth
days
C      ieap            = index for GRASS output in subbasin (yield),
init. here
C      ieapu           = index for GRASS output in subbasin (water),
init. here
C      ifloa          = swith code to write annual flows for HRUs
C                      = in subbasin=inusb, HRUs=(inuhd,...,inuhd+8)

```

```

C      iflom          = switch code to write monthly flows for HRUs
C                    in subbasin=inusb, HRUs=(inuhd,...,inuhd+8)
C      ihouts(ih)     = Hyd. Storage Location
C      inuhd          = number of hydrotope to print from ncycle and
writhru
C      inum1s(ih)     = Reach No.
C      inum2s(ih)     = Inflow Hydrograph
C      inusb          = number of subbasin to print from ncycle (if
inutr=1)
C                    and writhru
C      iy             = current year as counter (1,...,nbyr)
C      iyr            = current year
C      lu             = number of subbasins
C      lub            = number of "flow transfer"
C      mo             = current month
C      nbyr           = number of years of simulation
C      nc             = number of julian days passed to the beginning
of month
C      ndmo(mo)       = number days in the month
C      neap(j)        = number of HRUs in subbasin
Cblock nsb           = 30, dimension of massiv sub() - daily BASIN
outputs
C      nt             = 0 if 365 days, =1 if 366 days
C      omega          = month factor for Turc-Ivanov evap
C      pr             = peak runoff, m3/sec.
C      routin         = internal (program code) name for the routing
input file
C      runo(ida)       = water discharge observed, annual massiv,
m3/sec.
C      runs(ida)       = water discharge simulated, annual massiv,
m3/sec.
C      sbar(j)        = subbasin area, m2
C      smm(30)        = monthly BASIN outputs (dif. components, see
writgen)
C      smy(30)        = annual BASIN outputs (dif. components, see
writgen)
C      snoev          = snov evap, mm
C      sub(30)        = daily BASIN outputs (dif. components, see
writgen)
C      wy             = water yield in the basin, mm =
C                    SUM(xqi*flu)+SUM(xssf*flu)+SUM(gwq*flu)-
SUM(qtl*flu)
C      xnflow(17)     = N flows for a choosen hydrotope to write in
nutr.prn
C                    (see ncycle)
C      xwysb          = water yield for subbasin, mm
C      xxswind        = soil water index for basin
C      >>>>

C      >>>>> STATIC PARAMETERS
C      aop            = local par
C      dtot           = days total
C      i              = local par
C      icode          = code to switch between routing subroutines (here: 2)
C      icodep         = local par
C      icr            = local par
C      id1            = starting day of simulation

```

```

C      idum   = local par
C      ihout  = hydrological storage location
C      ii     = local par
C      iik    = local par
C      ik     = local par
C      im     = local par
C      immo   = local par
C      inum1  = reach number
C      inum2  = inflow hydrograph (inum2 hydrograph is routed through
inum1)
C      ix     = local par
C      j      = local par
C      jj     = local par
C      k      = local par
C      lu1    = local par
C      lutot  = local par
C      mol    = current month number
C      nbmo   = local par
C      nbsb   = local par
C      nd     = number of days in the current year
C      ndmon  = number of days in the current month
C      ndsum  = local par
C      xn     = local par
C      xx     = local par
C      >>>>
C~~~~~
~~~~~

C**** INCLUDE common parameters & descriptions
      use common_par
      implicit NONE
      integer i,icode,icodep,icr,id1,idum,ihout,ii,iik
      integer ik,im,immo,inum1,inum2,ix,j,jj,k,lu1,lutot
      integer mol,nbmo,nbsb,nd,ndmon,ndsum
      real dtot,xn,xx
      character*80 titldum,a*1
      character*3 aop

C#### CALL OPEN
      call open

C#### READ INPUT PARAMETERS: CALL READCOD
      call readcod
      nbsb = lu
      lutot = lu + lub
      lu1 = lu + 1
      flu(lu1) = 1.
      xn = nbyr
      nbmo = nbyr * 12

C#### READ INPUT PARAMETERS: CALL READBAS, READCRP, READSUB, READSOL
      do 21 i=1,mb
         neap(i) = 0
         sbar(i) = 0.
      21 continue
      call readbas
      call readcrp

```

```

        close (2)
        close (3)
        close (4)
        call readsub
        call readsol
        write (6,*) '==> INPUT PARAMETERS READ - O.K.!'
        write (6,*)' '

C#### INITIALIZATION: CALL INIT
        mol = 1
        immo = 0
        idayx = -99
        call init

C#### CALL TTCOEFI() - calculate channel routing coefficients
        do 80 j = 1, lu
            call ttcoefi(j)
        80 continue

C#### CALL CLOSEF to close files
        call closef
        ndsum = 0

C***** START
ANNUAL LOOP
C***** START
ANNUAL LOOP
C**** BEGIN SIMULATION, ANNUAL LOOP - CYCLE 540
        write(6,*) 'SWIM starts simulation'
        do 540 iy = 1, nbyr
            jj = 0
            mo = 1
            nt = 1
            if (mod(iyr,4).eq.0) nt = 0
            ida = 1
            nd = 366 - nt
            ndsum = ndsum + nd
            idl = 1
            if (iy.eq.1.and.idaf.gt.0) idl = idaf
            if (iy.eq.nbyr.and.idal.gt.0) nd = idal

C#### INITIALIZE CROPS: CALL INITCROP
        do 542 jj=1,mcrdb
            avyl da(iy,jj) = 0.
            aryl da(iy,jj) = 0.
        542 continue
        call initcrop(iy)

C***** START
DAILY LOOP
C**** DAILY LOOP - CYCLE 530
        do 530 i = idl, nd

            if (mod(ida,90).eq.0) write(6,1020)i,mo,iy
            xxswind = 0.
            xwysb = 0.
            ieap = 1

```

```

        ieapu = 1
        do 535 ii=1,20
            xnflow(ii) = 0.
535    continue
        do 351 k = 1, nsb
            sub(k) = 0.
351    continue

C####    CALL INITSUMS
        if (ida.eq.1) then
c        CLOSED temporarily - files 81-99 are used for dflow
c            write (81,*) 'Year ', iy
c            write (82,*) 'Year ', iy
c            write (83,*) 'Year ', iy
c            write (84,*) 'Year ', iy
c            write (85,*) 'Year ', iy
c            write (86,*) 'Year ', iy
c            write (87,*) 'Year ', iy
c            write (88,*) 'Year ', iy
c            write (89,*) 'Year ', iy
            call initsums
        endif

        if (iy.eq.1.and.ida.eq.1) write(70,1008)

C####    CALL CLIREAD - to read climate data daily
        call readcli

        ndmo(mo) = ndmo(mo) + 1
        dtot = dtot + 1.
        snoev = 0.
        pr = 0.

C        DEFINE MONTH FACTOR FOR TURC-IVANOV EVAP (if necessary)
C        if (iemeth.eq.1) then
            omega = 1.0
            if (mo.eq.1) omega = 0.70
            if (mo.eq.2) omega = 0.85
            if (mo.eq.3) omega = 0.95
            if (mo.eq.4) omega = 1.05
            if (mo.eq.5) omega = 1.25
            if (mo.eq.6) omega = 1.15
            if (mo.eq.7) omega = 1.05
            if (mo.eq.8) omega = 0.95
            if (mo.eq.9) omega = 0.90
            if (mo.eq.10) omega = 0.80
            if (mo.eq.11) omega = 0.75
            if (mo.eq.12) omega = 0.70
C        end if

C##### START
ROUTING
C####    CALL subbasin, route, transfer, add
        do 200 idum = 1, mhyd
            icode = icodes(idum)
            ihout = ihouts(idum)
            inum1 = inumls(idum)

```

```

        inum2 = inum2s(idum)
        if (icode.le.0) go to 210
        go to (140,150,160,170,180), icode
140      call subbasin(icode,ihout,inum1,inum2)
        go to 200
150      call route(icode,ihout,inum1,inum2)
        go to 200
160      continue
        go to 200
170      ihout = ihouts(idum-1)
        icodep = icode(idum-1)
        call transfer(icode,ihout,inum1,inum2)
        go to 200
180      call add(icode,ihout,inum1,inum2)
        go to 200
200      continue
210      continue
C##### END
ROUTING

C****   Calc wy - water yield
        wy = sub(8) + sub(9) - sub(10) + sub(15) + 1.e-20

C****   Correction - sediment yield
        sub(21) = sub(21) / da9

C****   Calculation of monthly sums
        do 220 iik = 1, 28
            smm(iik) = smm(iik) + sub(iik)
220      continue

C****   Calc monthly water discharge
        accf(7) = accf(7) + runo(ida)
        accf(8) = accf(8) + runs(ida)

C####   CALL DAILY WRITE
        call wr_daily

C****   NEXT DAY
        ida = i + 1

C####   DETERMINE MONTH for the next day
        call xmonth

C****   MONTHLY AND ANNUAL CALC & WRITE, endif - at 530
        if (mo.ne.mol) then
            xx = i - jj
            immo = immo + 1
            ndmon = float(nc(mol+1)-nc(mol))
            if (smm(7).eq.0.) smm(7) = cn
            smm(4) = smm(4) / xx
            smm(5) = smm(5) / xx
            smm(6) = smm(6) / xx
            jj = i

C****   CALC average monthly concentrations:::
        do 360 ix = 1,9

```

```

        dflow(inusb,inuhd+ix-1,10) = dflow(inusb,inuhd+ix-1,10)/ xx
        dflow(inusb,inuhd+ix-1,11) = dflow(inusb,inuhd+ix-1,11)/ xx
        dflow(inusb,inuhd+ix-1,12) = dflow(inusb,inuhd+ix-1,12)/ xx
        dflow(inusb,inuhd+ix-1,13) = dflow(inusb,inuhd+ix-1,13)/ xx
        dflow(inusb,inuhd+ix-1,14) = dflow(inusb,inuhd+ix-1,14)/ xx
        dflow(inusb,inuhd+ix-1,15) = dflow(inusb,inuhd+ix-1,15)/ xx
360      continue

C####      CALL MONTHLY FLOW WRITE: dflow
           if (iflom.eq.1) call flomon(mol)

C####      CALL MONTHLY WRITE
           call wr_month(mol)

C****      WRITE MONTHLY WATER DISCHARGE
           write (70,1009) iyr,mol,accf(7),accf(8)
           accf(7) = 0.
           accf(8) = 0.

C****      ANNUAL CALCULATION & WRITE
           if (mo.le.mol) then
C           smy(2) = smy(2) / 12.
C           smy(9) = smy(9) / 12.
C           smy(10) = smy(10) / 12.
C           smy(8) = smy(8) / 12.
           smy(19) = smy(19) / 12.

C####      CALL ANNUAL FLOWS WRITE: dfloy
           if (ifloa.eq.1) call floann

C####      CALL ANNUAL WRITE
           call wr_annual

           iyr = iyr + 1
           end if

           end if
           mol = mo
530      continue

C***** END DAILY
LOOP

C**** OPTION FOR REGIONAL CROP SIMULATION:
C---> 'goto 540' should be opened, if criteria of fit (Nash&Sutcliff
etc)
C      are not needed, e.g. for regional crop simulation (to omit call
xnash)
ccc      goto 540

C**** CALCULATE diso(), diss() for the total period evaluations
do 543 im=1,nd
        diso(ndsum-nd+im) = runo(im)
        diss(ndsum-nd+im) = runs(im)
543      continue

C#### CALL xnash() to calculate Nash & Sutcliff and other criteria

```

```

        call xnash(runo,runs,nd,1)

C**** Write average crop yield annually
do 544 icr=1,mcrdb
    if (arylda(iy,icr).gt.0.0001.and.icr.ne.51) then
        write(59,1015) iy, icr, avyllda(iy,icr)/arylda(iy,icr)
        write(6,1015) iy, icr, avyllda(iy,icr)/arylda(iy,icr)
    endif
544 continue

C#### LAST YEAR: CALL xnash() to calculate criteria of fit, whole
period
    if (iy.eq.nbyr) then
        write (6,1007)
        write (6,*) 'Number of days =',ndsum
        write (6,*) 'Number of years =',nbyr
        call xnash(diso,diss,ndsum,2)
    endif

C**** LAST YEAR: INFORM, where are the final routed Q: rvQ.prn or
rvaddQ.prn
    if (iy.eq.nbyr) then
        open(3,file=routin)
        do 666 idum = 1,mhyd
            read (3,*) aop, icodes(idum)
            if (aop.eq.'fin') then
                backspace(3)
                backspace(3)
                read (3,*) aop
                if (aop.eq.'rou') write(6,1005)
                if (aop.eq.'add') write(6,1006)
            endif
            if (ICODES(idum).eq.0) go to 667
666 continue
667 continue
        endif

C**** LAST YEAR: WRITE average crop yield
    if (iy.eq.nbyr) then
        write(59,2000)
        do 673 icr=1,mcrdb
            do 672 ik=1,ms
                do 671 jj=1,lu
                    if (aryld(jj,ik,icr).gt.0.0001.and.icr.ne.51) then
                        write(59,1010) icr,ik,jj, avyld(jj,ik,icr)/aryld(jj,ik,icr)
                    endif
671 continue
672 continue
673 continue
                write(59,2002)
                do 675 icr=1,mcrdb
                    do 674 ik=1,ms
                        if (arylds(ik,icr).gt.0.0001.and.icr.ne.51) then
                            write(59,1011) icr,ik, avylds(ik,icr)/arylds(ik,icr)
                        endif
674 continue
675 continue
                    
```


ANEXO B – Sub-rotina do programa SWIM para estimar a Evapotranspiração

```
C      FILE evap.f
C
C      SUBROUTINES IN THIS FILE          CALLED FROM
C      subroutine   evap(j,je,k,n)       hydrotop

C&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&&
&&&&&&&&&

        subroutine evap(j,je,k,n)
C***** PURPOSE: THIS SUBROUTINE COMPUTES THE AMOUNT OF SOIL EVAPORATION
C                & THE POTENTIAL PLANT TRANSPIRATION USING RITCHIE'S
METHOD
C***** CALLED IN:  HYDROTOP
C~~~~~
~~~~~
C    PARAMETERS & VARIABLES
C
C    >>>>> COMMON PARAMETERS & VARIABLES
C    alai(j,je)      = leaf area index
C    canev           = canopy evaporation, mm
C    canstor(j,je)   = canopy water storage, mm
C    cva(j,je)       = vegetation cover, kg/h
C    ecal            = general potential evap calibration factor
C    eo              = potential evapotranspiration, mm
C    eopot           = potential evapotranspiration, mm
C    ep              = plant transpiration, mm
C    es              = soil evaporation, mm
C    et              = es + ep, mm
C    humi(j)         = air humidity in the subbasin, %
C    ida             = current day
C    ievap           = switch code to print from evap()
C    ievhd           = number of hydrotope to print from evap(), if
ievap = 1
C    ievsb           = number of subbasin to print from evap(), if
ievap = 1
C    nn              = number of soil layers
C    omega           = month factor for Turc(Ivanov) evap (Glugla 1989)
Cblock pit         = parameter for estimation of the day length
C    preinf(j,je)    = precipitation adjusted for canopy storage, mm
C    qd              = daily surface runoff, mm
C    ra(j)           = solar radiation, J/cm^2
C    sl(j,je)        = internal func. for Richie's method to estimate
es
C    s2(j,je)        = internal func. for Richie's method to estimate
es
C    salb(j)         = soil albedo
```

```

C      snoa(j,je)      = water content in snow, mm
C      snoev           = snow evaporation, mm
C      ste(j,je,l)     = water storage in a layer, , mm, calc in hydrotop
& purk
C      thc             = correction factor for potential
evapotranspiration
C                      range for thc: (0.8-1.0), value 1. - from R.
Muttiah
C      tv(j,je)        = internal func. for Richie's method to estimate
es
C      tx(j)           = average daily temperatue, degree C
C      ylc(j)          = cos(ylt()/clt), ylt() - lat, clt=57.296, to calc
rmx
C      yls(j)          = sin(ylt()/clt), ylt() - lat, clt=57.296, to calc
rmx
C                      (convert degrees to radians (2pi/360=1/57.296) )
C      z(l,k)          = soil depth, mm
C      >>>>>

C      >>>>> STATIC PARAMETERS
C      alb      = soil albedo
C      aph      = local par
C      cej      = local par
C      ch       = local par
C      corn     = correction on land use for Turc-Ivanov evaporation
C      d        = inclination of saturation vapor pressure curve
C      dayl     = day length
C      dd       = local par
C      eaj      = local par
C      eos      = local par
C      esd      = local par
C      esx      = local par
C      ff       = local par
C      gma      = local par
C      h        = local par
C      hh       = local par
C      ho       = local par
C      jk1      = local par
C      jk2      = local par
C      p        = local par
C      rmx      = max solar radiation
C      rto      = local par
C      sb       = local par
C      sd       = local par
C      skyem    = sky emissivity
C      sp       = local par
C      suu      = local par
C      thrad    = add. radiation due to sky emissivity
C      tk       = local par
C      tkk      = local par
C      turc     = potential evapotranspiration according to Turc
C      u        = local par
C      vp       = vapor pressure
C      vps      = saturated vapor pressure
C      xi       = current day
C      xx       = local par
C      yc       = local par

```

```

C      ys      = local par
C      yy      = local par
C      zz      = local par
C      j       = subbasin number
C      je      = number of hydrotape in subbasin
C      n       = land use number
C      k       = soil number
C      >>>>>
C~~~~~
~~~~~

C**** Include common parameters
      use common_par
      implicit NONE
      integer j,je,n,k,jk1,jk2
      real alb,aph,cej,ch,corn,d,dayl,dd,eaj,eos,esd,esx,ff,gma
      real h,hh,ho,p,rmx,rto,sb,sd,skyem,sp,suu,thrad,tk,tkk
      real turc,u,vp,vps,xi,xx,yc,ys,yy,zz
      real Rnetto,elev

      data esd /300./, cej / -5.e-5/, u /6./

C**** CALC albedo
      p = preinf(j,je) - qd
      eaj = exp(cej*(cva(j,je)+.1))
      tk = tx(j) + 273.
      tkk = tk * tk
      if (idvwk.eq.1) then
        if (tx(j).ge.0.) then
          !Magnusformel Mean saturation vapour pressure [hPa]
          vps = 6.11 * exp((17.62*tx(j))/(243.12+tx(j)))
          d = vps * 4284. / (243.12+tx(j))**2
        else
          vps = 6.11 * exp((22.46*tx(j))/(272.62+tx(j)))
          d = vps * 6123. / (272.62+tx(j))**2
        end if
        gma = d / (d+.655)
      else
        d = exp(21.255-5304./tk) * 5304. / tkk
        gma = d / (d+.68)
      end if
      if (snoa(j,je).le.5.) then
        alb = salb(j)
        if (alai(j,je).gt.0.) alb = .23 * (1.-eaj) + salb(j) * eaj
C      ! hypothetical grass reference crop after FAO 1998
        if (iemeth .eq. 3) alb = .23
C      ! hypothetical forest albedo after De Walle 1973
        if (iemeth .eq. 2) alb = .16
      else
        alb = .6
      end if

C**** CALC max solar radiation rmx, coef 711 changed to 916
C                                     916 (ly) ==> 3847.2 (J/cm^2)
      xi = ida

```

```

sd = .4102 * sin((xi-80.25)/pit)
ch = -yls(j) * tan(sd) / ylc(j)
if (ch.lt.1.) then
  if (ch.le.-1.) go to 200
  h = acos(ch)
  go to 201
end if
h = 0.
go to 201
200 h = 3.1416
201 dayl = 7.72 * h
dd = 1. + .0335 * sin((xi+88.2)/pit)
ys = yls(j) * sin(sd)
yc = ylc(j) * cos(sd)
ccc   rmx = 711. * (h*ys+yc*sin(h))
      rmx = 3847.2 * (h*ys+yc*sin(h))

C**** CORRECTION of radiation on sky emissivity (Ranjan)
C   hol - old, ho - from Ranjan, divisor 58.3 for cal ==> 244.86 for
J
C   thrad correction, thc - calib. coef.(0.8-1.)
C   hol = ra(j) * (1.-alb) / 58.3
C   ho = (ra(j) * (1.-alb)+thrad) / 58.3
  if (idvkw.ne.1) then
C   Idso & Jackson (1969) J. Geophys. Res. 74(23):5397--5403
      skyem = 1. - 0.261*exp(-7.77e-4*(tk-273.15)**2)
      thrad = (skyem-0.96)*4.914e-7*tk**4*(.2+.8*(ra(j)/rmx))
      ho = (ra(j) * (1.-alb)+thc*thrad) / 244.86
      Rnetto = (ra(j) * (1.-alb)+thc*thrad)/100 !Rnetto for Penman-
Monteith, transformation to MJm-2
      if (Rnetto .lt. 0.) Rnetto=0.00001
  else
C   DVWK (1995) Merckblatt Nr. 238 / Brunt (1932)
      vp = vps * (humi(j)/100.)
      skyem = 0.34 - 0.044 * sqrt(vp)
      thrad = -5.67 * 8.64e-8 * tk**4. * skyem * (.1+.9*(ra(j)/rmx))
      ho = (ra(j) * (1.-alb) + thrad) / (249.8 - .242*tx(j))
      Rnetto = (ra(j) * (1.-alb) + thrad)/100 !Rnetto for Penman-
Monteith, transformation to MJm-2
      if (Rnetto .lt. 0.) Rnetto=0.00001
  end if
  if (ho.lt.0.) ho = 0.001

C**** CORRECTION of aph=1.28 on humidity:
C   aph = f(humidity):  aph(60) = 1.74, aph(90)=1.28
      hh = humi(j)/100.
      zz = 40. * hh - 29.
      if (zz.gt.10.) zz = 10.
      if (zz.lt.-10.) zz = -10.
      ff = hh / (hh + exp(zz))
      aph = 1.28 + 0.46 * ff

C**** CALC POTENTIAL ET
      select case (iemeth) !flag pot evapo
      case (0)
        call pri_tay(aph, ho, gma)

```

```

case (1)
    call turc_iva(j,n)

case (2)
    call pen_mon(j,je,Rnetto)

case (3)
    call fao_gras(j,Rnetto)

end select !flag iemeth evapotranspiration

C**** CORRECTION of pot. evap. on interception
C    eopot is used later as Pot Evap for write()
C    eo is corrected for interception and used to calc es, ep
eopot = eo
canev = 0.
if (canstor(j,je).gt.0.) then
eo = eo - canstor(j,je)
if (eo.lt.0.) then
    canstor(j,je) = -eo
    canev = eopot
    eo = 0.
else
    canev = canstor(j,je)
    canstor(j,je) = 0.
endif
endif

C**** CALC soil evaporation es
eos = eo * eaj
if (s1(j,je).ge.u) go to 30
sp = s1(j,je) - p

if (sp.gt.0.) then
    s1(j,je) = sp
    go to 20
end if

10 s1(j,je) = 0.
20 s1(j,je) = s1(j,je) + eos
suu = s1(j,je) - u

if (suu.le.0.) then
    es = eos
    go to 40
end if

es = eos - .4 * suu
s2(j,je) = .6 * suu
tv(j,je) = (s2(j,je)/3.5) ** 2
go to 40

30 sb = p - s2(j,je)
if (sb.ge.0.) then
    p = sb
    s1(j,je) = u - p

```

```

        tv(j,je) = 0.
        if (s1(j,je).lt.0.) go to 10
        go to 20
    end if

    tv(j,je) = tv(j,je) + 1.
    es = 3.5 * sqrt(tv(j,je)) - s2(j,je)

    if (p.le.0.) then
        if (es.gt.eos) es = eos
    else
        esx = 0.8 * p
        if (esx.le.es) esx = es + p
        if (esx.gt.eos) esx = eos
        es = esx
    end if

    s2(j,je) = s2(j,je) + es - p
    tv(j,je) = (s2(j,je)/3.5) ** 2

40 if (es.le.0.) es = 0.

C**** CALC plant transpiration ep: preliminary estimation,
C      later recalc in wstress (vegfun.f)
    if (alai(j,je).le.3.0) then
        ep = alai(j,je) * eo / 3.
    else
        ep = eo
    end if

    et = es + ep + canev
    if (eopot.lt.et) then
        et = eopot
        es = et - ep - canev
    end if

    xx = es

C**** RECALC ste(), sno()
    if (snoa(j,je).lt.es) then
        xx = xx - snoa(j,je)
        snoa(j,je) = 0.
        do 50 jk2 = 1, nn
            if (z(jk2,k).gt.esd) go to 70
            if (ste(j,je,jk2).gt.xx) go to 60
            xx = xx - ste(j,je,jk2)
            ste(j,je,jk2) = 0.
50      continue
        go to 80
60      ste(j,je,jk2) = -xx + ste(j,je,jk2)
        go to 100
70      jk1 = jk2 - 1
        yy = 0.
        if (jk1.gt.0) yy = z(jk1,k)
        rto = ste(j,je,jk2) * (esd-yy) / (z(jk2,k)-yy)
        if (rto.gt.xx) go to 90
        xx = xx - rto

```


C! CORRECTION ON LAND USE

```

if (n.eq.1)  corn = 1.3
if (n.eq.2)  corn = 1.
if (n.eq.3)  corn = 1.
if (n.eq.4)  corn = 1.
if (n.eq.5)  corn = 0.9
if (n.eq.6)  corn = 0.9
if (n.eq.7)  corn = 1.
if (n.eq.8)  corn = 1.
if (n.eq.9)  corn = 1.14
if (n.eq.10) corn = 1.19
if (n.eq.11) corn = 1.1
if (n.eq.12) corn = 1.3
if (n.eq.13) corn = 1.3
if (n.eq.14) corn = 1.
if (n.eq.15) corn = 0.9

```

```
eo = ecal * corn * turc
```

end

[illegible]

```
subroutine pri_tay(aph, ho, gma)
```

```
C**** PURPOSE:  Calculation of PRIESTLEY-TAYLOR POTENTIAL EVAP
```

C

```
C**** CALLED IN:  EVAP
```

C ~~~~~
~~~~~

## C PARAMETERS & VARIABLES

C<sub>ecal</sub> = general potential evap calibration factor

C<sub>eo</sub> = potential evapotranspiration, mm

C

```
C      >>>>> STATIC PARAMETERS
```

$$C_{\text{aph}} = \text{local par}$$

C gma = local par

C ho = local par

C >>>>>

C ~ ~ ~ ~ ~  
~ ~ ~ ~ ~

```
C**** Include common parameters
```

```
use common_par
```

```
implicit NONE
```

real aph, gma, ho

```
if (idvwk .eq. 1) then
```

$$e_o = e_{cal} * 1.26 * h_o * g_{ma}$$

else

$$eo = ecal * aph * ho * gma$$

```
end if
```

end



```

use common_par
implicit NONE
integer j,je
real vp,vps,d,alb
real zpd, zom, zoh, karmconst, resaero, ressurf, part1
real ppl, Tvir, rhoa, cp, gammal, part2, part3
real zh, soilheat, zm, crh, ressl, elev, laihelp, tmp
real vp2,vps2,d2,windz,Rnetto,vptmn,vptmx

resaero = 0.
ressurf = 0.
C      ! Penman/Monteith calculation
C      ! aerodynamic resistance
C      ! vapor pressure and slope of saturation in kPa bzw. kPa/°C

vptmn=0.6108*exp((17.27*tmn(j))/(tmn(j)+237.3))
vptmx=0.6108*exp((17.27*tmx(j))/(tmx(j)+237.3))
vps2 =(vptmn+vptmx)/2.
vp2 =vps2*(humi(j)/100.)
d2  =4098*0.6108*exp((17.27*tx(j))/(tx(j)+237.3))
d2  =d2/(tx(j)+237.3)**2

zm = 2. ! height of wind measurement [m]
zh = 2. ! height of humidity measurent [m]
crh = 20. !crop height [m]
C      !windz = (windspeed(j)*log(67.8*zm-5.42))/4.87 !conversion for
wind speed above 2m (Allen 1998)
zpd = 7.2      !7.2 values for foliated oak from DOLMAN 1986
!(2/3)*crh zero plane displacement height [m] Allen 1998
zom = 1.      !1. values for foliated oak from DOLMAN 1986
!0.123*crh roughness length governing momentum transfer [m] Allen 1998
zoh = 0.1 * zom      !roughness length governing transfer of heat
and vapor [m] Allen 1998
karmconst = 0.41      !von Karman constant [-]
C
tmp = log(abs((zm-zpd))/zom)*log(abs((zh-zpd))/zoh)
resaero = tmp/(karmconst*karmconst*windspeed(j))
C
C      ! bulk surface resistance
ressl = 300.      !single leaf resistance [s/m] crops=100 trees=300
C      laihelp = max(0.01,alai(j,je))
laihelp = 5.      !estimation forest
ressurf = ressl/laihelp*0.5      !LAI active = Lai*0.5 Allen 1998
C
C      !seperate calculation of parts of the combination equation
C      !net_rad=ra variable in swim
C      !soil heat flux is small and will be ignored soil_heat=0 (Allen
1998, FAO)
soilheat=0.
elev = 160.
C      !delta=slope of saturation vapor pressure, in swim delta=d,
different calculation to Allen 1998 (FAO)
part1 = d2*(Rnetto-soilheat)      !radiation
transform to MJ/m2
C      !rho_a= mean air density at constant pressure
ppl = 101.3*((293.-0.0065*elev)/293.)**5.26      ! atmospheric
pressur [kPa] from Allen 1998

```



