

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**

**ESTIMATIVA, ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL**

NEILON DUARTE DA SILVA

**CRUZ DAS ALMAS, BAHIA
2017**

**ESTIMATIVA, ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o) NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL**

Neilon Duarte da Silva
Engenheiro Agrônomo
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB, 2015

Dissertação apresentada ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva da Oliveira

**CRUZ DAS ALMAS, BAHIA
2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

S586e

Silva, Neilon Duarte da.

Estimativa, análise espacial e temporal da evapotranspiração de referência (ET_o) na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil / Neilon Duarte da Silva. – Cruz das Almas, BA, 2017.

83f.; il.

Orientador: Aureo Silva de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

1. Bacia hidrográfica – São Francisco (Rio) – Brasil.
2. Hidrologia – Recursos hídricos – Evapotranspiração.
I. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II. Título.

CDD: 551.483

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTIMATIVA, ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO) NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado
Neilon Duarte da Silva

Aprovada em: 08/02/2017

Orientador – Prof. Dr. Aureo Silva da Oliveira

Membro Externo – Prof^a Dr^a Valéria Peixoto Borges

Membro Interno – Prof. Dr. Lucas Melo Vellame

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

Ainda que eu conhecesse todos os mistérios da vida e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria. Ao amor incondicional e imensurável dos meus pais, Elenita Duarte da Silva (In memoriam) e Nelson Pereira da Silva.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida. Aos meus pais Elenita Duarte (In Memoriam) e Nelson Pereira pelo amor incondicional. Aos meus irmãos pela força e ao amor dados durante toda essa jornada.

Agradeço ao professor e amigo Aureo Oliveira, pela confiança depositada e pelas grandes oportunidades que a mim foram dadas.

Agradeço aos professores Lucas Vellame e Francisco Adriano pela confiança e oportunidades dadas.

Agradeço a todos os meus amigos, colegas, professores e funcionários do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRB, compartilhando momentos importantes da minha vida pessoal e acadêmica.

Agradeço a FAPESB pela concessão da bolsa de estudos.

ESTIMATIVA, ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL

RESUMO: Um requisito importante a qualquer programa de gerenciamento dos recursos hídricos é o conhecimento dos processos naturais que regulam o ciclo hidrológico, principalmente quando se trata de análises espaciais e temporais desses processos. O balanço entre a precipitação e a evaporação define essencialmente a disponibilidade hídrica numa região. O planejamento da irrigação e a gestão de recursos hídricos andam lado a lado e quando bem executados, promovem a manutenção e preservação dos recursos hídricos sem perdas na produtividade. Nesse contexto, esse trabalho teve por objetivo realizar uma análise espacial e temporal da evapotranspiração de referência via Penman-Monteith FAO56 face a ao planejamento da agricultura irrigada para culturas anuais e tendências climáticas das variáveis meteorológicas na bacia do rio São Francisco. Dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram utilizados e compreendem o período de 1961 a 2015. A partir dessa série histórica, foi realizada uma modelagem espacial da ETo e o zoneamento de culturas anuais na bacia do São Francisco face a demanda hídrica local, relevo e tipo de solo. Nas determinações da ETo utilizou-se o método de Penman-Monteith - FAO 56. Face as tendências climáticas determinadas pelo teste de Maan-Kendal, foi determinado o peso que cada variável meteorológica tem no computo da ETo. A análise espacial na bacia do Rio São Francisco mostrou que ETo total anual variou entre 1216,8 mm a 2114,2 mm. A região do Submédio São Francisco é aquela que apresentou maior demanda hídrica, na região do Alto São Francisco por sua vez, foram observadas as zonas com regiões mais amenas. Uma simulação de cenários para a implantação da cultura do milho revelou que sua viabilidade sob cultivo sequeiro tem área máxima cultivável de 40% do território da bacia nos períodos cujo plantio se iniciam em janeiro e ou fevereiro, novembro e ou dezembro. Quase todo o território da bacia se encontra em zonas de déficit hídrico, principalmente nos períodos de plantio que vão do mês de maio até setembro. No computo final da ETo, há uma diferença marcante quanto a influências de variáveis meteorológicas. Em escala mensal, a umidade relativa do ar, tem maior contribuição, seguido da radiação solar. Em escala diária os papéis se invertem, a radiação solar passa a ter impacto maior sobre o cálculo da ETo. A análise temporal mostra que o cenário atual da bacia é que mais de 80% do território da bacia apresentaram aumento das taxas de evapotranspiração na ordem de 2,424 mm ano⁻².

Palavras-chave: SIG, mudanças climáticas, análise de sensibilidade

ESTIMATE, ANALYSIS AND SPATIAL TEMPORAL REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION THE BASIN RIVER SÃO FRANCISCO, BRAZIL

ABSTRACT: An important requirement for any water resources management program is knowledge of the natural processes that regulate the hydrological cycle, especially when it comes to spatial and temporal analyzes of these processes. The balance between precipitation and evaporation essentially defines water availability in a region. Irrigation planning and water resource management go hand in hand and when well executed, promote the maintenance and preservation of water resources without loss of productivity. In this context, the objective of this work was to perform a spatial and temporal analysis of reference evapotranspiration via Penman-Monteith FAO56 in relation to irrigated agriculture planning for annual crops and climatic trends of the meteorological variables in the São Francisco river basin. Meteorological data from the National Institute of Meteorology (INMET) were used and cover the period from 1961 to 2015. From this historical series, a spatial modeling of ETo and the zoning of annual crops in the São Francisco basin were performed in response to local water demand, relief and soil type. In the ETo determinations, the Penman-Monteith method - FAO 56 was used. Given the climatic trends determined by the Maan-Kendal test, the weight of each meteorological variable in the ETo calculation was determined. Spatial analysis in the São Francisco River basin showed that total annual ETo ranged from 1216.8 mm to 2114.2 mm. The sub-region São Francisco is the one that presented greater water demand, in the region of the Upper São Francisco, in turn, the zones with the milder regions were observed. A simulation of scenarios for the implantation of the corn crop showed that its viability under dry cultivation has a maximum arable area of 40% of the territory of the basin during the periods of planting beginning in January and / or February, November and / or December. Almost the entire territory of the basin is located in zones of water deficit, mainly in the periods of planting that go from the month of May until September. In the final compute of the ETo, there is a marked difference in influences of meteorological variables. On monthly scale, the relative humidity of the air, has greater contribution, followed by solar radiation. On a daily basis the roles are reversed, solar radiation has a greater impact on the calculation of ETo. The temporal analysis shows that the current scenario of the basin is that more than 80% of the territory of the basin presented an increase of the evapotranspiration rates in the order of 2.424 mm year⁻².

Keywords: GIS, climate change, sensitivity analysis

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
REVISÃO DE LITERATURA	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

CAPÍTULO 1

MODELAGEM ESPACIAL APLICADA AO PLANEJAMENTO DA IRRIGAÇÃO E AO ZONEAMENTO DE CULTURAS ANUAIS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL	18
--	-----------

INTRODUÇÃO	21
MATERIAL E MÉTODOS	22
RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

CAPÍTULO 2

TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL	42
--	-----------

INTRODUÇÃO	45
MATERIAL E MÉTODOS	47
RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ANEXOS	70
---------------------	-----------

INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do rio São Francisco é uma das bacias mais importantes do território brasileiro, abrange 639.219 km² de área de drenagem o que corresponde a 7,5% do país e apresenta vazão média de 2.850 m³ s⁻¹. O rio principal, o São Francisco, tem 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para este, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe. A área da bacia contempla sete unidades da federação – Bahia (48,2%), Minas Gerais (36,8%), Pernambuco (10,9%), Alagoas (2,2%), Sergipe (1,2%), Goiás (0,5%), e Distrito Federal (0,2%) – e 507 municípios (cerca de 9% do total de municípios do país).

A presença de diferentes biomas como a mata atlântica, cerrado, caatinga, costeiros e insulares torna a bacia ainda mais rica do ponto de vista da biodiversidade. O cerrado cobre, praticamente, metade da área da bacia – de Minas Gerais ao oeste e sul da Bahia, enquanto a caatinga predomina no nordeste baiano, onde as condições climáticas são mais severas. Trata-se de uma região fisiográfica que determina a economia, dos estados da qual faz parte, e ainda daqueles que se encontram fora dos limites da bacia. Seu potencial hidrológico e hidrelétrico sem dúvidas é determinante no ciclo hidrológico da região nordeste, já que mais de 50% da área total da bacia se encontra nessa região.

A inserção de estudos envolvendo variáveis meteorológicas dentro de áreas fisiográficas, é primordial para compreender a demanda hídrica local, regional e a nível de bacias hidrográficas. O estudo da evapotranspiração de referência e suas componentes meteorológicas, tem sido algo abordado com frequência e principalmente após padronização do seu cálculo abordada no manual 56 da FAO (*Food and Agriculture Organization*). Atualmente, busca-se melhorias na sua determinação dada a importância principalmente da mudança paulatina dos processos de troca de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre, certa feita, essas alterações a longo prazo podem modificar a maneira como a superfície interage com a atmosfera, o que pode implicar na definição de novas zonas climáticas.

O cenário atual da água doce disponível em termos mundiais é preocupante, visto que, é crescente a redução dos níveis dos rios e seus afluentes, principalmente a nível de Brasil. É comum ver os reservatórios de abastecimento chegarem ao seu nível morto, acionando o sinal de alerta nas principais cidades do Brasil. Fatores como desmatamento, assoreamento dos rios (principais e afluentes), e principalmente não preservação das nascentes, são responsáveis pelo cenário atual, que por sinal, vem piorando nos últimos anos, década após década. A decorrente redução das descargas dos rios na bacia do rio São Francisco, podem ser decorrentes principalmente das alterações da superfície terrestres bem como das mudanças climáticas. O período entre 1999 e 2001 foi crítico na Bacia do São Francisco, em termos de disponibilidade de água, coincidindo com a crise energética que o País enfrentou e que culminou com o racionamento de energia durante o ano de 2001. Este período implicou em mudanças nas médias históricas.

Como tentativa de buscar uma equidade na distribuição e abastecimento de água, a transposição do rio São Francisco é um projeto que tem como principal objetivo levar água a vários estados do Nordeste que não apresentam rios perenes. Entretanto, é um projeto que tem que sido alvo de críticas, sobretudo pela destinação do uso da água, bem como pela não utilização de parâmetros climáticos na determinação da vazão retirada da bacia. E isso, também inclui a forma como a liberação de outorga de água dentro da bacia é feita. Dessa forma, a necessidade de melhorar os critérios utilizados para liberação da outorga de água se dá principalmente devido as alterações climáticas, para tanto o uso dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG's), análises espaciais de variáveis meteorológicas, e as tendências climáticas surgem como produtos finais que podem melhorar tais critérios, visto que, trata-se de instrumento necessário para o gerenciamento dos recursos hídricos, pois permite o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, possibilitando uma distribuição mais justa e equilibrada desse recurso, proporcionando a sustentabilidade hídrica da bacia estudada.

Por uma gestão mais eficiente de bacias hidrográficas e que contemple dados de clima, solo e demanda hídrica associada as variações climáticas, esse trabalho teve por objetivo realizar uma análise espacial e temporal da evapotranspiração de referência via Penman-Monteith FAO-56 face a ao

planejamento da agricultura irrigada para culturas anuais e tendências climáticas das variáveis meteorológicas na bacia do rio São Francisco.

REVISÃO DE LITERATURA

Evapotranspiração de referência

Em modelos hidrológicos clássicos, a evapotranspiração é sempre simulada de forma empírica ou conceitual (ZHAO, 1992). Fatores como topografia, o tipo solo e características da superfície (vegetação) e clima interagem de forma bem complexa para determinar o ciclo hidrológico, (MO, et al. 2004). A evapotranspiração é um indicador eficiente, que reflete a mudança climática e a transferência de energia entre terra e atmosfera. Também desempenha um papel importante na estimativa da demanda hídrica das culturas irrigadas, sendo isto, bastante enfatizado por Xie et al. (2013); Xie et al. (2015); Kite & Droogers, (2000) e Todorovic et al. (2013). A evapotranspiração de referência é bem definida por Allen et al., (1998) como sendo a taxa de evapotranspiração a partir de uma cultura de referência hipotética com uma altura de cultivo assumida de 0,12 m, uma resistência de superfície fixa de 70 s/m e um albedo de 0,23, muito semelhante à evapotranspiração de uma superfície extensiva de grama verde de altura uniforme, crescendo ativamente, bem regada e completamente cobrindo o solo.

Análise espacial

Os parâmetros agroclimáticos, especialmente em áreas de topografia complexa, apresentam variações significativas em intervalos muito curtos e são influenciados por diversos fatores externos como vegetação, característica da superfície, orientação do terreno e altitude, GÜLER, (2014). Diante disso, a regionalização de variáveis climáticas bem como a inclusão dos mais diversos fatores citados, complementam as estimativas espaciais. A estimativa regional e espacial ETo é essencial para todos os estudos do ciclo hidrológico, para um melhor dimensionamento de sistemas de irrigação e para o planejamento dos recursos hídricos DOLMAN, (1992).

A utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na agrometeorologia pode solucionar a ausência de informações regionalizadas de

variáveis e fenômenos importantes para o meio ambiente. A geoestatística tem participação marcante no SIG e vem apresentando aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de parâmetros de interesse nas ciências agrárias, permitindo o mapeamento, a quantificação e a modelagem de fenômenos contínuos, através da interpolação dos pontos amostrados no espaço, (VIEIRA, 2009; SOUZA et al., 2009).

Existem vários métodos de interpolação espacial para estimativas de variáveis climáticas, no entanto, alguns autores não têm atentado para a necessidade de se definir o melhor método de interpolação, (LENNON & TUNNER, 1995; GARDIMAN JUNIOR et al., 2012). A krigagem é um dos principais métodos de interpolação utilizados. Trata-se de uma metodologia que estima valores médios em um ponto de valor desconhecido e também uma medida da acurácia dessa estimativa (BETTINI, 2007). Existem diversos tipos de krigagem. Landim (2003) afirma que a do tipo ordinária assume hipótese intrínseca quando a variável é regionalizada. O desempenho da krigagem é mostrado de forma superior por Alves et al. (2008), Silva et al. (2010) e Gardiman Junior et al. (2012) quando comparado a outros métodos de interpolação, por exemplo o método do Inverso do quadrado da distância, *Spline* regularizada e Vizinhança natural.

O uso dessas ferramentas SIG aplicadas na regionalização de dados meteorológicos tem sido utilizado por vários autores. Em um estudo no Nordeste da China fazendo o uso de técnicas SIG, Liang et al. (2010), verificaram que as mudanças sazonais da ETo ocorrem devido a variação da precipitação e temperatura. Raziei & Pereira (2013) realizaram um estudo de variabilidade espacial da Evapotranspiração através de um grid formado por estações ao longo do Iran. Os autores concluíram que a utilização dessa metodologia é útil e permite representar bem a variável meteorológica (ETo) no tempo e no espaço.

Tendências climáticas

O teste estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall é o mais usual quando se objetiva detectar tendências series históricas de dados climatológicos. Para tanto, em condições diversificadas da umidade relativa do ar, tendências anuais e sazonais da temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração potencial (ETp), no período de 1971 a 2000 na China, Wu et al. (2002), verificaram aumento nas

taxas de variação da temperatura do ar e da precipitação e tendências decrescentes na ETo. Bandyopadhyay et al. (2009) também utilizaram o teste de Mann-Kendall analisar a tendência temporal da ETo, segundo o método de Penman-Monteith FAO 56 para 133 estações selecionadas na Índia, verificando também, acréscimos e decréscimos ao longo de toda a região de estudo. Na Turquia, Hakan et al. (2010) verificaram uma tendência crescente na temperatura e na ETo na maioria das estações analisadas.

As alterações do clima local são determinantes para as mudanças das variáveis climáticas chaves na determinação da ETo, bem como do aumento da demanda de água pela atmosfera, e isso tem alterado a disponibilidade dos recursos hídricos, principalmente pela ausência de técnicas que maximizam seu uso. Em um estudo na China aos redores do lago Poyang, Ye et al. (2014) verificaram tendências de redução da ETo ao longo do período de estudo, atribuindo isso as reduções da velocidade do vento e uma alta contribuição da umidade relativa do ar.

A temperatura, a velocidade do vento e a insolação (número de horas de brilho solar) são os fatores dominantes que afetam as mudanças potenciais de evapotranspiração. A velocidade do vento e a redução do número de horas de brilho solar, diminuíram as taxas de evapotranspiração da primavera e do verão, o aumento da temperatura leva ao aumento da evapotranspiração no outono e no inverno conforme mostrado em um estudo feito na China por (GUOFENG et al. 2012). De forma análoga, em um estudo que relacionou a 150 estações meteorológicas na bacia Changjiang (Rio Yangtze), Xu et al. (2006) encontraram uma tendência decrescente significativa e similar na evapotranspiração de referência e evaporação do tanque classe A (Epan) e atribuem essa tendência decrescente à radiação total seguida pela velocidade do vento, ambos com uma tendência decrescente significativa na região para o período de estudo.

Zhang et al. (2007) também avaliaram a evaporação do tanque classe A (Epan) e a ETo em todo o Planalto tibetano durante o período de 1966 a 2003. Nesse estudo tanto a Epan quanto a ETo diminuíram significativamente ($p < 0,05$) em 47% e 38%, respectivamente, embora a temperatura do ar na maior parte dos locais tenha aumentado significativamente ($p < 0,05$) assim como a velocidade do vento e a insolação em 85% e 43% das estações estudadas, respectivamente. Certa feita, esse tipo estudo tem mostrado uma variação interessante de

resultados, Zheng et al. (2009) verificaram em algumas estações o aumento da ETo na ordem de $1,77 \text{ mm ano}^{-1}$ na China. Em outras partes do mundo tem-se verificado o aumento da ETo, taxas maiores ($6,3 \text{ mm ano}^{-1}$) são mostradas por Peterson et al., (1995) nos Estados Unidos, na Austrália ($4,0 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) por Roderick & Farquhar, (2004), e no planalto tibetano ($4,57 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) por Zhang et al., (2007), tendências negativas atribuídas a velocidade do vento foram verificadas por Tang et al. (2011).

Análise de sensibilidade

A combinação da análise de sensibilidade de modelos que estimam a ETo em conjunto com a verificação de alterações climáticas tem sido um viés interessante no sentido de computar as taxas de variação da ETo bem como os impactos causados por cada variável meteorológica na demanda hídrica local. Focados no padrão espaciotemporal de evapotranspiração, os estudos sobre a sensibilidade da evapotranspiração para variáveis meteorológicas em escala de bacias hidrográficas são escassos dentro do território brasileiro, devido principalmente as características complexas e não-lineares.

A sensibilidade e a variabilidade dos parâmetros de modelos para estimativa da ETo foram utilizadas inicialmente por Vimuri et al. (1969) como sendo um método com potencial de identificação da sensibilidade de variáveis climatológicas em análises hidrológicas. Young et al. (1971) e Coleman & DeCoursey (1976) utilizaram essa técnica para classificar as variáveis meteorológicas por ordem de importância dentro de condições de determinação da ET. McCuen (1973) listou variáveis e análises de componentes, estimativas iniciais e análises de erros como elementos de análise de sensibilidade para determinação da evaporação.

Estevez et al. (2009) realizaram análises de sensibilidade da equação padronizada de evapotranspiração da ASCE-Penman-Monteith, estabelecida pela Associação Americana de Engenharia Civil para temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento no sul da Espanha. Os resultados mostraram que a sensibilidade da ETo às mesmas variáveis climáticas é significativamente diferente entre os locais do país. Gong et al. (2006) exploraram a sensibilidade da ETo para quatro principais variáveis climáticas na bacia do rio Yangtze, e

verificaram a umidade relativa como a variável mais sensível dentro da determinação da ETo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56. Rome: FAO, 1998. 310p.

ALVES, M., BOTELHO, S. A., PINTO, L. V. A., POZZA, E. A., OLIVEIRA, M. S., FERREIRA, E., ANDRADE, H. Variabilidade espacial de variáveis geobiofísicas nas nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão SANTA CRUZ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 527-535, 2008.

BANDYOPADHYAY, A., A. BHADRA, N.S. RAGHUWANSHI, R. Singh, Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India. **Journal Hydrologic Engineering**. 14: 508-515, 2009.

BETTINI, C. Conceitos básicos de geoestatística. In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. cap.4. Brasília: Embrapa, 2007.

CHRISTENSEN, J. H., HEWITSON, B, BUSUIOC, A et al. Regional climate projections. In: Solomon S et al (eds) Climate Change. **The physical science basis. Contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**, Cambridge University Press. 2007.

COLEMAN, G., DECOURSEY, D. G. Sensitivity and Model Variance Analysis Applied to Some Evaporation and Evapotranspiration Models. **Water Resources Research** vol. 12, no. 5, 1976.

DOLMAN, A. J., 1992: A note on areally-averaged evaporation and the value of the effective surface conductance. **Journal of Hydrology**., 138, 583–589.

ESTEVEZ, J, GAVILAN, P., BERENGENA, J. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. **Hydrological Processes** 23: 3342–3353, 2009.

GARDIMAN JUNIOR, B. S., MAGALHÃES, I. A. L., FREITAS, C. A. A., CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Ambiência Guarapuava** (PR) v.8 n.1 p. 61 - 71 Jan./Abr, 2012.

GONG, L., XU, C., CHEN, D., HALLDIN, S., CHEN, Y. D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, 329, 620– 629, 2006.

GÜLER, M. A Comparison of Different Interpolation Methods Using the Geographical Information System for the Production of Reference Evapotranspiration Maps in Turkey. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 92, No. 3, pp. 227–240, 2014.

GUOFENG, Z. YUANQING, H., TAO, P., XUFENG, W., WENXIONG, J., ZONGXING, L., HUIJUAN, X. Spatial distribution and temporal trends in potential evapotranspiration over Hengduan Mountains region from 1960 to 2009. *Journal Geographic Science*. 22(1): 71-85, 2012.

HAKAN, A., K. SAVAS, S. OSMAN. Trend analysis of hydrometeorological parameters in climate regions of Turkey. **Conference prerelease, BALWOIS 2010-Ohrid**, Republic of Macedonia, 2010.

KITE, G. W, DROOGERS, P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *Journal of Hydrology* 229: 3–18, 2000.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. Ver e ampl. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

LENNON, J. J., TURNER, J. R. G. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. *Journal Animal Ecology*. n. 64. 670-392, 1995.

LIANG, L., LI, L., LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150 298–306, 2010.

MCCUEN, R. H., The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling, *Journal Hydrology*., 18, 37-53, 1973.

MO, X., LIUA, S., LINA, Z., ZHAO, W. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin. *Journal of Hydrology* 285 125–142, 2004.

PETERSON, T. C., GOLUBEV, V. S., GROISMAN, P. Y. Evaporation losing its strength. *Nature* 377: 687–688, 1995.

RAZIEI, T., PEREIRA, L. S. Spatial variability analysis of reference evapotranspiration in Iran utilizing fine resolution gridded dataset. *Agricultural Water Management* 126 104–118, 2013.

RODERICK, M. L., FARQUHAR, G. D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology* 24: 1077–1090, 2004.

SILVA, A. F., ZIMBACK, C. R. L., OLIVEIRA, R. B. Cokrigagem na estimativa da evapotranspiração em campinas. *Tékhnē eLógos*, Botucatu, SP, v.2, n,1, out. 2010

SOUZA, L. S., COGO, N. P., Vieira, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica em relação a sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p.77-86, 1507-1514, 2009.

TANG, B., TONG, L., KANG, S., ZHANG, L. Impacts of climate variability on reference evapotranspiration over 58 years in the Haihe river basin of north China. **Agricultural Water Management** 98, 1660–1670, 2011.

TODOROVIC, M. KARIC, B., PEREIRA, L. S. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. **Journal of Hydrology**. 166–176, 2013.

VIEIRA, S. R., GUEDES FILHO, O. G., CHIBA, M. K., CANTARELLA, H. Spatial variability of soil chemical properties after coffee tree removal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.33 no.5 Viçosa Sept./Oct. 2009.

VEMURI, V., DRACUP, J. A., ERDMANN, R. C Sensitivity analysis method of system identification and its potential in hydrologic research, **Water Resources Research**., 5(2), 341-349, 1969.

XIE, H., ZHU, X. Reference evapotranspiration trends and their sensitivity to climatic change on the Tibetan Plateau (1970– 2009). **Hydrology Process**. 27, 3685–3693, 2013.

XIE, H. ZHU, X., YUAN, D. Pan evaporation modelling and changing attribution analysis on the Tibetan Plateau (1970–2012). **Hydrology Process**. 29, 2164–2177, 2015.

XU, C., GONG, L., JIANG T, CHEN, D., SINGH, V.P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology** 327:81–93, 2006.

WU, S. H., YANG, Q. Y., ZHENG, D. An index system for boundaries of eco-geographical regions of China. **Progress in Geography** 21: 302–310, (in Chinese), 2002.

YE, X., LI, X., LIU, J., XU, C., ZHANG, Q. Variation of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in the Poyang Lake catchment, China. **Hydrol. Process**. 28, 6151–6162, 2014.

YOUNG, G. D., TSENG, M. T. TAYLOR, R. S. Estuary water temperature sensitivity to meteorological conditions, **Water Resources Research**.,7(5), 1173-1181, 1971.

ZHANG, Y., LIU, C., TANG, Y., YANG, Y. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. **Journal of Geophysical Research**, 112, 2007.

ZHAO, R.J., The Xinanjiang model applied in China. **Journal of Hydrology** 135, 371–381, 1992.

ZHENG, H., LIU, X., LIU, C., DAI, X., ZHU, R. Assessing contributions to pan evaporation trends in Haihe River Basin, China. **Journal of Geophysical Research**, VOL. 114, 2009.

CAPÍTULO 1

**MODELAGEM ESPACIAL APLICADA AO PLANEJAMENTO DA
IRRIGAÇÃO E AO ZONEAMENTO DE CULTURAS ANUAIS NA
BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL**

MODELAGEM ESPACIAL APLICADA AO PLANEJAMENTO DA IRRIGAÇÃO E AO ZONEAMENTO DE CULTURAS ANUAIS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL

Autor: Neilon Duarte da Silva

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

RESUMO: O planejamento de projetos de irrigação e a gestão de recursos hídricos andam lado a lado e quando bem executados, promovem a manutenção e preservação dos recursos hídricos sem perdas na produtividade. Diante disso, os objetivos deste estudo, utilizando-se a cultura do milho como exemplo, foram: (a) realizar o zoneamento pedoclimático para culturas anuais na bacia do rio São Francisco, (b) estudo da demanda hídrica para culturas anuais frente as taxas de variação temporal e espacial da evapotranspiração de referência e precipitação. Dados meteorológicos oriundos de 101 estações manuais e automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram utilizados e compreendem o período 1961 a 2015. A partir de técnicas SIG foi definido um zoneamento pedológico e a demanda hídrica para a cultura do milho na bacia do São Francisco. As taxas de variação da evapotranspiração e da precipitação foram usadas a fim de melhorar a representatividade dos dados dentro do período histórico. A ETo total anual variou entre 1216,8 mm a 2114,2 mm. A região do Submédio São Francisco é a região que apresentou maior demanda hídrica para a cultura do milho, na região do Alto São Francisco por sua vez, foram observadas as regiões mais amenas apresentando os menores valores totais anuais da ETo. A região do Médio São Francisco, tem em sua maioria zonas intermediárias com os padrões de distribuição anômalos. Foi possível definir períodos ótimos para a implementação da cultura do milho seja através da irrigação ou cultivada em sequeiro. Para os períodos cujo o mês de plantio iniciam-se de março a outubro, a implantação da cultura é viável sobretudo com o uso da irrigação. A cultura do milho é viável em cultivo sequeiro tendo como área máxima de 40% do território da bacia nos períodos cujo plantio se iniciam em janeiro e ou fevereiro, novembro e/ou dezembro.

Palavras-chave: Irrigação, zoneamento agrícola, milho

SPATIAL MODELING APPLIED TO THE PLANNING OF IRRIGATION AND ZONING OF ANNUAL CROPS IN THE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN, BRAZIL

Author: Neilon Duarte da Silva

Adviser: Aureo Silva de Oliveira

ABSTRACT: The planning of irrigation projects and the management of water resources go hand in hand and when well executed, promote the maintenance and preservation of water resources without losses in productivity. Therefore, the objectives of this study, using the maize crop as an example, were: (a) to perform pedoclimatic zoning for annual crops in the São Francisco river basin, (b) study of water demand for annual crops against rates Of temporal and spatial variation of reference evapotranspiration and precipitation. Meteorological data from 101 manual and automatic stations of the National Institute of Meteorology (INMET) were used and comprise the period from 1961 to 2015. From GIS techniques, a pedological zoning and water demand for corn cultivation in the São Francisco. The rates of variation of evapotranspiration and precipitation were used in order to improve the representativeness of the data within the historical period. Total annual ETo ranged from 1216.8 mm to 2114.2 mm. The sub-region of São Francisco is the region that presented the highest water demand for the maize crop, in the Upper São Francisco region, in turn, the milder regions were observed, presenting the lowest total annual values of ETo. The Middle San Francisco region has mostly intermediate zones with anomalous distribution patterns. It was possible to define optimal periods for the implementation of the maize crop either through irrigation or under rainfed conditions. For the periods whose planting month starts from March to October, the implantation of the crop is feasible mainly with the use of irrigation. Maize cultivation is viable in dryland cultivation with a maximum area of 40% of the basin territory during the periods of planting in January and / or February, November and / or December.

Keywords: Irrigation, agricultural zoning, corn

INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio São Francisco compreende 639.219 km² de área de drenagem (7,5% do país) com vazão média de 2.850 m³ s⁻¹ (2% do total do país). O rio São Francisco tem 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para leste, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe (CBHSF, 2016). O potencial hidrelétrico e de irrigação são a base da economia às margens do rio principal e seus afluentes. O risco de secas prolongadas decorrentes dos padrões climáticos, impõe a necessidade de adequada gestão dos recursos hídricos na bacia. A gestão parcial da bacia pode acarretar impactos negativos sobre outros usuários da água, porque a gestão integrada deve suprir de forma harmônica a demanda de água com os suprimentos potenciais (Romano e Cadavid Garcia, 1999). A demanda hídrica local para uma cultura específica quando bem definida, favorece o melhor uso da água, isto é, demanda reduzida de irrigação sem perdas na produtividade das culturas (Pereira et al., 2002).

O potencial do uso da água na bacia do rio São Francisco para fins de irrigação foi discutido por Maneta et al. (2009), ao destacar os diversos fins da água dentro e fora dos limites da bacia, dando importância a seis expansões projetadas e seus desvios de água associados para satisfazer os requisitos de irrigação resultando nos fluxos dos rios e os possíveis impactos causados.

A tentativa de maximização do uso a água é crescente face a escassez dos recursos hídricos, aos desastres ambientais e a manutenção do leito do rio principal e seus afluentes. A procura por técnicas que facilitem a tomada de decisão é explorada cada vez mais pelos comitês das bacias hidrográficas, e diante disso, a combinação da geoestatística com sistemas de informações geográficas (SIG) vem apresentando aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de parâmetros hidrológicos e climatológicos (Vieira, 2009).

O uso de ferramentas SIG aplicadas à regionalização de dados meteorológicos tem sido frequente (Barbosa et al., 2005; Beltrame et al., 1994 e Chung et al., 1997). A metodologia empregada possibilita a obtenção de valores estimados individualizados, resultando em estimativas mais precisas quando aplicadas à demanda de água em cada localidade. Usando SIG e geoestatística, Dalezios et al. (2012) verificaram níveis crescentes de ETo de norte a sul na Grécia. Kamali et al.

(2015) verificaram através da geoestatística uma correlação espacial entre a temperatura e a radiação solar extraterrestre como fatores determinantes da variabilidade espacial da evapotranspiração.

O desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na definição de zonas com potencial agrícola e uso da irrigação são promissoras no gerenciamento de bacias hidrográficas. Resultados mostrados por Fortes et al. (2005) a partir da criação do modelo GISAREG, por Nahry et al. (2011) que utilizou técnicas SIG e de sensoriamento remoto em áreas irrigadas com pivôs e por Georgoussis et al. (2009) que desenvolveu um sistema de simulação mais preciso integrado ao ArcGIS, confirmam que modelos feitos em ambiente SIG são promissoras faces aos resultados obtidos. Os estudos da quantificação das necessidades hídricas das culturas, embora pontuais, podem ser estendidos para regiões mais amplas e, dessa forma, serem disponibilizados parâmetros e dados aos profissionais da área, que têm carência de informações regionais (FREITAS et al., 2006).

Em um contexto de busca de ferramentas que possam auxiliar na gestão mais eficaz dos recursos naturais no âmbito de bacias hidrográficas, principalmente no que diz respeito à delimitação de zonas passíveis de uso da irrigação, os objetivos deste estudo, utilizando-se a cultura do milho como exemplo, foram: (a) realizar o zoneamento pedoclimático para culturas anuais na bacia do rio São Francisco, (b) estudo da demanda hídrica para culturas anuais frente as taxas de variação temporal e espacial da evapotranspiração de referência e precipitação.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia a seguir descreve as etapas realizadas para estimativa da demanda hídrica da cultura do milho em toda a extensão da bacia do rio São Francisco considerando a variabilidade pedoclimática. A opção pela cultura do milho no presente estudo justifica-se pelo fato de ser uma granífera de ampla aceitação em toda a extensão da bacia não somente como cultura de subsistência, mas também como cultivo comercial em larga escala. O algoritmo apresentado simula a demanda hídrica para qualquer época de plantio de modo a contemplar as particularidades do sistema de produção de cada região.

Dados Meteorológicos

Dados meteorológicos diários das temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar média, velocidade do vento média e insolação foram utilizados no presente estudo. A série histórica coletada em 101 estações meteorológicas (ANEXO A) manuais e automáticas e compreendendo o período de 01 de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 2015, foi obtida da base de dados BDMEP do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (www.inmet.org.br). A distribuição espacial das estações é mostrada na Figura 1. Do total de estações utilizadas, 52 estão localizadas fora do divisor de águas da bacia. A inclusão dessas estações externas aos limites da bacia objetivou garantir melhor representação das condições climáticas da bacia e do seu entorno (AMIRATAEE et al., 2016; OLIVER, 1990; ROYLE et al., 1981).

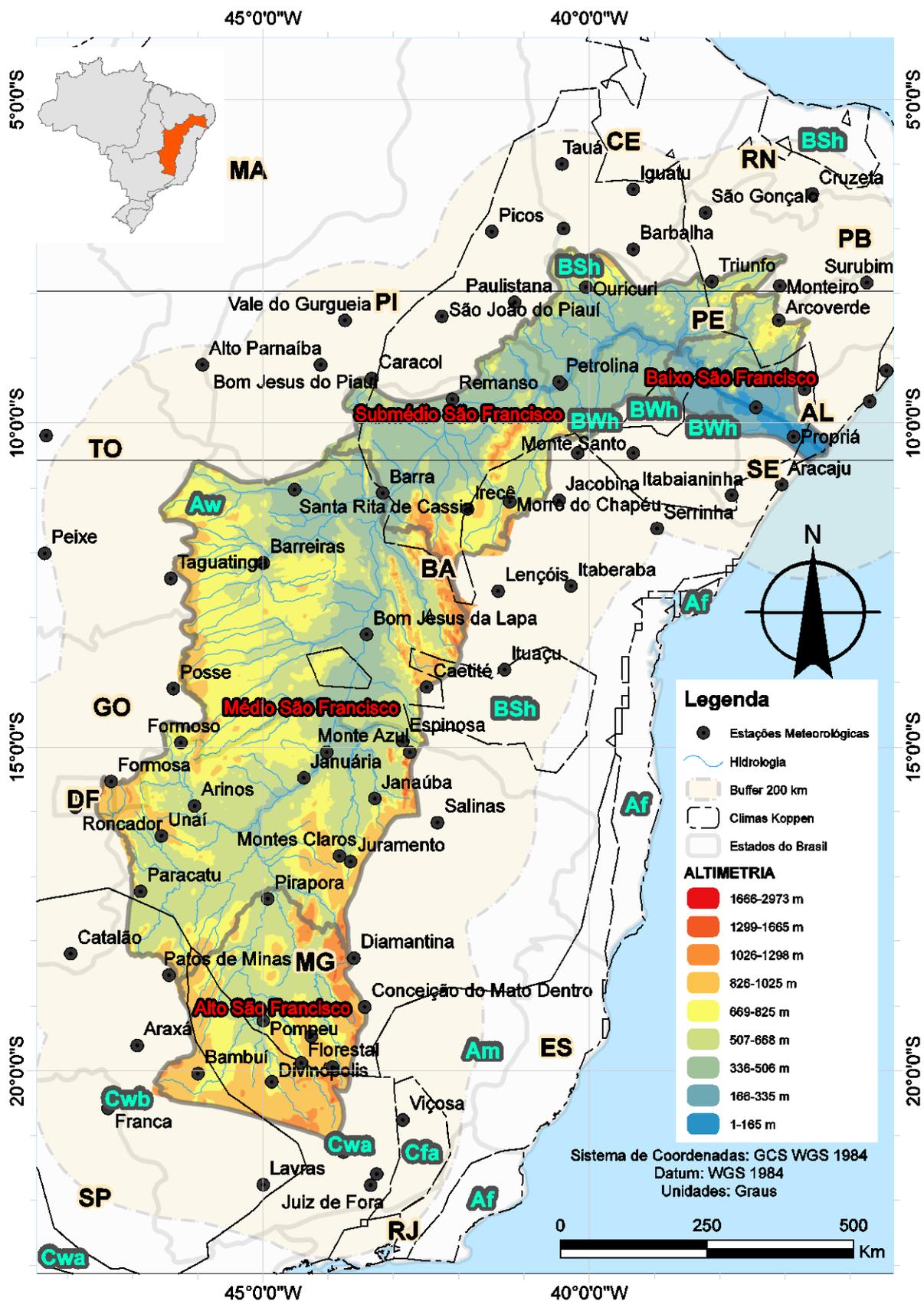


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e distribuição das estações meteorológicas.

Análise de Qualidade de Dados e Preenchimento de Falhas

A análise da qualidade de dados é primordial para a obtenção de resultados consistentes e confiáveis. No presente estudo a análise de qualidade consistiu na identificação de valores discrepantes na série de dados de cada estação bem como a identificação de dados ausentes. A ausência de dados na série foi preenchida com médias entre os valores do dia anterior e posterior. Optou-se por descartar da série sequências de dois ou mais dias com dados ausentes, ainda que fosse de apenas uma variável meteorológica.

Evapotranspiração de Referência (ET_o)

A demanda hídrica de culturas agrícolas é comumente determinada pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ET_o) e um coeficiente de cultivo (Kc) representativo da espécie cultivada (Allen et al., 1998). Neste estudo utilizou-se o programa computacional REF-ET v. 4.1 (Allen et al., 2015) para cálculo da ET_o diária via modelo Penman–Monteith padronizado pela FAO 56 (PM56) em todas as estações meteorológicas da bacia do rio São Francisco conforme Figura 1. Médias mensais de ET_o foram então geradas a partir dos valores diários. O PM56 tem sido recomendado (Jensen et al, 1990; Jensen & Allen, 2016) como o método que melhor simula a transferência de água na forma de vapor a partir de uma extensa superfície de grama de porte baixo, cobrindo totalmente o solo e com adequado suprimento de água. O modelo PM56 é dado pela Equação 1 (ANEXO B).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

em que

ET_o – evapotranspiração de referência (mm·dia⁻¹);

R_n – saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹);

G – fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹), sendo G=0 em um período de 24h;

Δ – declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa °C⁻¹);

u_2 – velocidade do vento à 2m de altura (m s^{-1});

T_a – temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);

e_s – pressão de saturação do vapor d'água na atmosfera (kPa);

e_a – pressão atual do vapor d'água na atmosfera (kPa);

γ – constante psicométrica (MJ kg^{-1}).

Análise espacial (Interpolação)

Mapas das variáveis climatológicas em escala sazonal e anual foram produzidos com o auxílio do software ArcGIS v. 10.3.1 (versão gratuita de 60 dias) fazendo o uso da ferramenta *Geostatistical Analyst*. O método de interpolação utilizado foi a krigagem ordinária, amplamente utilizada em campos geofísicos e na espacialização de variáveis climatológicas (BELO-PEREIRA et al., 2011; HERRERA et al., 2012; XU et al., 2006). A formula geral utilizada pela krigagem é dada pela Equação 2.

$$Z'_v = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{vi} \quad (2)$$

em que,

Z'_v – estimador de krigagem ordinária para o ponto v;

λ_i – enésimo peso;

Z_{vi} – valor da enésima observação da variável regionalizada, coletada nos pontos xi;

n – número de pesos

Planejamento da irrigação

Considerando o ciclo da cultura de 120 dias, 12 períodos de cultivo são possíveis de serem utilizados em um intervalo de um ano. A demanda hídrica foi determinada para cada período possível de cultivo. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de cultivo do milho em função da demanda evaporativa da cultura segundo Cruz et al. (2010). A evapotranspiração da cultura (ETc), diária foi calculada utilizando-se a Equação 3.

$$ET_c = ET_o * Kc \quad (3)$$

em que,

ET_c – evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹);

ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

Kc – coeficiente de cultivo (Tabela 1);

Tabela 1. Valores de coeficientes de cultivo médio em função da demanda evaporativa e do turno de rega. (Cruz et al., 2010)

Demanda evaporativa	Turno de Rega (dias)	Coeficientes de cultivo				
		Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
BAIXA ET _o ≤ 2,5 mm/dia	1	1,10	1,10 a 1,14			
	2	1,03	1,03 a 1,14			
	3	0,95	0,95 a 1,14	1,14	1,14 a 0,35	0,35
	4	0,88	0,88 a 1,14			
	5	0,80	0,80 a 1,14			
	6	0,73	0,73 a 1,14			
MODERADA 2,5 < ET _o ≤ 5,0	1	1,00	1,00 a 1,23			
	2	0,91	0,91 a 1,23			
	3	0,83	0,83 a 1,23	1,23	1,23 a 0,35	0,35
	4	0,75	0,75 a 1,23			
	5	0,66	0,66 a 1,23			
	6	0,58	0,58 a 1,23			
ALTA 5,0 < ET _o ≤ 7,5	1	0,87	0,87 a 1,29			
	2	0,78	0,78 a 1,29			
	3	0,70	0,70 a 1,29	1,29	1,29 a 0,35	0,35
	4	0,62	0,62 a 1,29			
	5	0,53	0,53 a 1,29			
	6	0,45	0,45 a 1,29			
MUITO ALTA ET _o > 7,5 mm/dia	1	0,82	0,82 a 1,36			
	2	0,73	0,73 a 1,36			
	3	0,65	0,65 a 1,36	1,36	1,36 a 0,35	0,35
	4	0,57	0,57 a 1,36			
	5	0,48	0,48 a 1,36			
	6	0,40	0,40 a 1,36			

A irrigação suplementar, quando a precipitação natural não atende à demanda de água da cultura, foi determinada segundo a Equação 4 considerando-se a distribuição espaço-temporal da precipitação efetiva, esta correspondente a uma

fração fixa de 80% da precipitação pluviométrica na bacia conforme sugerido por Todorovic & Steduto (2003).

Se $ET_c > P_{ef}$

$$IS = \sum_{i=1}^n ET_c - \sum_{i=1}^n P_{ef} \quad (4)$$

Se $ET_c < P_{ef}$

$$IS = 0$$

em que,

IS – irrigação suplementar da cultura (mm);
 P_{ef} – precipitação efetiva, 80% (mm);

A lâmina total de irrigação suplementar depende da eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação, conforme Equação 5, assumindo-se aspersão convencional para irrigação do milho em que a eficiência de aplicação é de 70% (Mantovani et al., 2009).

$$IS_b = \frac{IS}{E_a} \quad (5)$$

em que,

IS_b – Irrigação suplementar da cultura (mm);
 E_a – eficiência de aplicação (decimal).

Os dados climáticos históricos oriundos das 101 estações meteorológicas e o mapa de solos de toda a extensão da bacia foram combinados (a partir da ferramenta union do ArcGIS) em um mesmo arquivo shapefile. A correspondente tabela de atributos cada linha representava um pixel (área 1,1 km²) e as colunas continham um valor referente aos atributos: ETo mensal (ETo_Jan, ETo_Fev ... ETo_Dez), taxa de variação diária da ETo para o período de 1961 a 2015 (Trend_ETo), precipitação mensal (P_Jan, P_Fev ... P_Dez), taxa de variação diária da precipitação (Trend_P) e tipo de solo (Classe_Solo).

Para qualquer data de plantio do milho numa dada localidade a demanda hídrica da cultura durante um ciclo de produção foi corrigida utilizando-se as taxas de variação da ETo e da precipitação acumuladas para o mesmo período. O valor extra acrescentado à demanda hídrica simulada via ETo e Kc é oriundo da integração numérica (Método do Trapézio, Equação 6), a partir do período da cultura em relação à função que define a ETo e a precipitação dentro de toda a série histórica.

$$\int_{x_0}^{x_m} f(x)dx \approx \frac{h}{2}[f(x_0) + f(x_1)] + \frac{h}{2}[f(x_1) + f(x_2)] + \dots + \frac{h}{2}[f(x_{N-1}) + f(x_N)] \quad (3)$$

em que,

- x_m e x_0 – período específico da cultura para um Kc qualquer;
- $f(x)$ – função que define a tendência da ETo e da precipitação no período;
- x_1, x_2, x_n – pontos na curva que define a função;
- h – intervalo de dias do período.

Zoneamento Pedoclimático

Três classes foram definidas para o zoneamento pedoclimático final e intersecção das informações. Uma classificação referente ao clima (Class_Climate), uma referente ao solo (Class_Soil), e outra referente a orientação do terreno (Classe_Rel) extraída a partir de dados SRTM fornecido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

A classificação climática foi feita em função da razão entre a precipitação e a evapotranspiração (P_ETo) e a diferença entre o total da precipitação e a evapotranspiração de referência. Para tanto, três classes de aptidão do cultivo do milho em função do clima foram definidas como se segue: (a) aptidão moderada (AM_Clima) caracterizada por excesso hídrico; (b) aptidão plena (AP_Clima), com possibilidade de período chuvoso na floração, quando $P/ETo > 1$ e $P-ETo > 0$ e (c) inaptidão climática (IP_Clima) caracterizada por insuficiência hídrica, quando $P/ETo < 1$ e $P-ETo < 0$.

O zoneamento pedológico refere-se ao tipo de solo mais recomendado para as culturas anuais em geral. Este zoneamento foi baseado em mapa de solos fornecido pelo IBGE (www.ibge.com.br), em escala 1:100.000. Três classes referente

ao zoneamento pedológico foram definidas: (a) aptidão moderada (AM_Solos): solos rasos e o relevo suave ondulado; (b) aptidão plena (AP_Solos): relevo plano e suave ondulado, solos profundos e muito profundos, bem drenados e com alta capacidade de retenção de umidade e (c) inaptidão (IP_Solos): solos rasos, com relevo ondulado a forte ondulado e montanhoso;

O cruzamento das informações de clima e solo obedeceu a hierarquia mostrada na Tabela 2. Quando o solo foi fator limitante, o zoneamento foi considerado inapto para o cultivo do milho. Quando o clima é fator limitante, independente da classe de solo (plena ou moderada) o zoneamento se torna moderado com relação ao clima. Nesse caso, a zona é apta ao cultivo do milho mediante uso da irrigação para atendimento da demanda hídrica da cultura.

Tabela 2. Cruzamento das informações das classes de solo e clima

Classes	AP_Clima	AM_Clima	IP_Clima
AP_Solos	AP	AP_Restrição_Clima	AM_Restrição_Clima
AM_Solos	AP	AM	AM_Restrição_Clima_Solo
IP_Solos	IP	IP	IP

AP – Apto, AM – Aptidão Moderada, IP – Inapto

A Figura 2 apresenta as etapas de construção da modelagem espacial dentro do ambiente SIG, em três módulos distintos e interconectados. O módulo 1 consiste das técnicas de geoprocessamento e geoestatística utilizadas nas interpolações e conversão dos arquivos em forma raster e shapefile; o módulo 2 resume os procedimentos para o zoneamento pedoclimático e o módulo 3 relacionado ao planejamento da irrigação com a quantificação da demanda hídrica da cultura do milho para diferentes épocas de plantio.

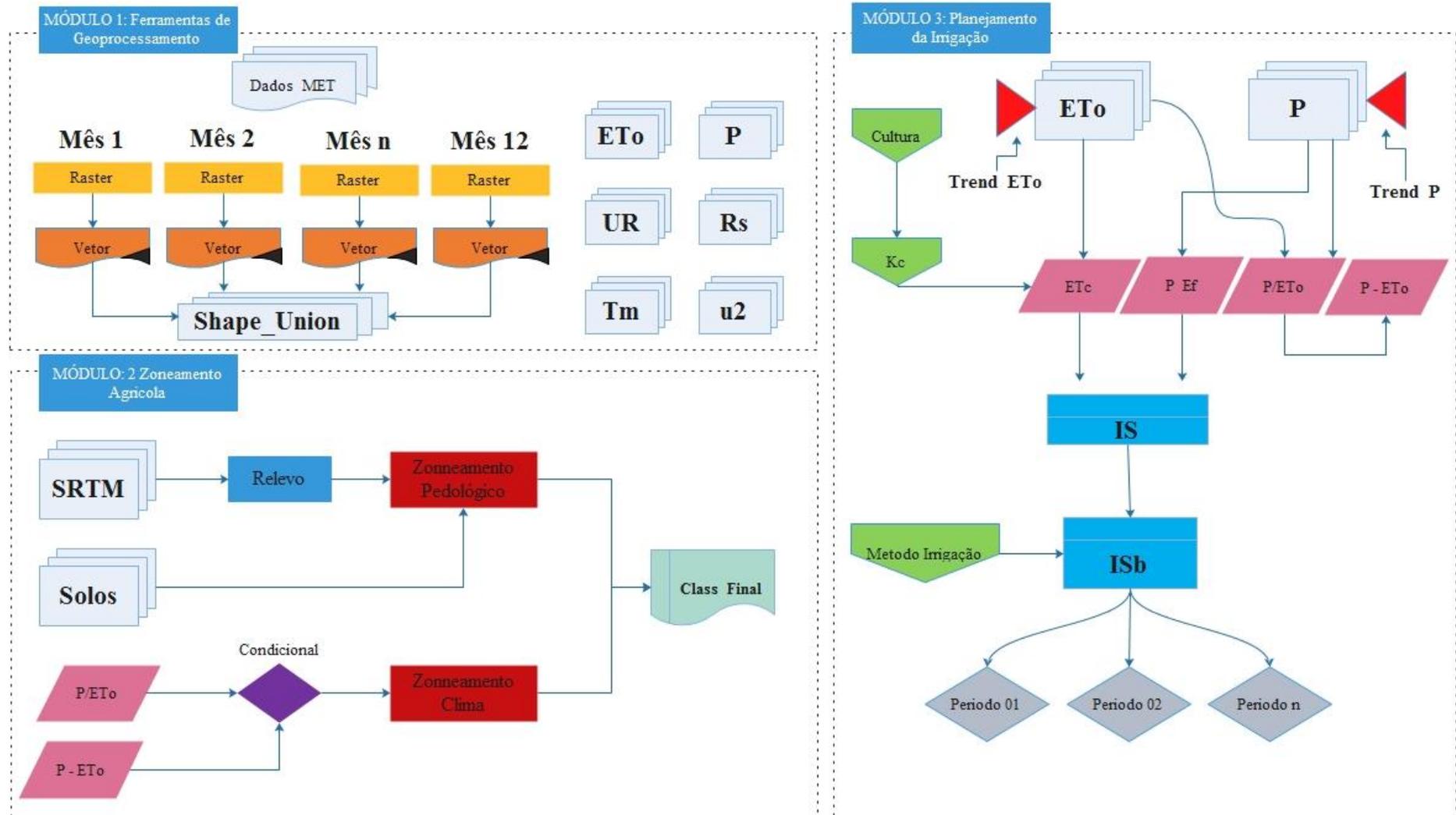


Figura 2. Fluxograma de execução do algoritmo para modelagem espacial

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise espacial

A distribuição espacial do total anual de precipitação pluviométrica e ETo é mostrada na Figura 3. Os maiores totais anuais de chuva se concentram na parte alta da bacia (parte sul do mapa) e região baixa da bacia na foz do rio São Francisco. As regiões do Médio e Submédio São Francisco apresentam as menores lâminas anuais de chuva. O mapa da ETo está claramente relacionado ao da precipitação na medida em que as maiores demandas evaporativas da atmosfera ocorrem nas regiões de menor precipitação, portanto de maior aridez.

A Tabela 3 mostra um resumo estatístico dos totais anuais de ETo de acordo com a região dentro da bacia. A distribuição de valores anuais apresentou forte gradiente espacial, com tendência de aumento da ETo na direção sul-nordeste da bacia, com valor mínimo anual de 1216,8 mm na parte alta da bacia e valor máximo anual de 2114,2 mm na parte baixa da bacia, mais precisamente na região do Submédio São Francisco. A ETo anual máxima, portanto, é quase o dobro da ETo anual mínima, sinalizando para uma grande variabilidade da ETo na bacia. A ETo anual média aproximada foi de 1654,3 mm. A parte alta da bacia apresentou menor variação espacial, devido principalmente aos valores elevados de altitude, conforme é argumentado por Dalezios et al. (2012), em que em regiões montanhosas e de alta altitude, as taxas de evapotranspiração de referência tendem a ser estáveis.

Tabela 3. Estatística descritiva da ETo anual por região fisiográfica da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Região da Bacia	ETo (mm ano-1)				
	Min	Max	Amplitude	Média	DesvPad
Alto	1216,79	1513,69	296,90	1354,21	64,24
Médio	1567,88	1838,09	270,21	1669,79	65,98
Submédio	1605,50	2114,21	506,63	1887,72	109,05
Baixo	1304,91	1838,80	533,89	1631,94	108,13
DesvPad – Desvio Padrão					

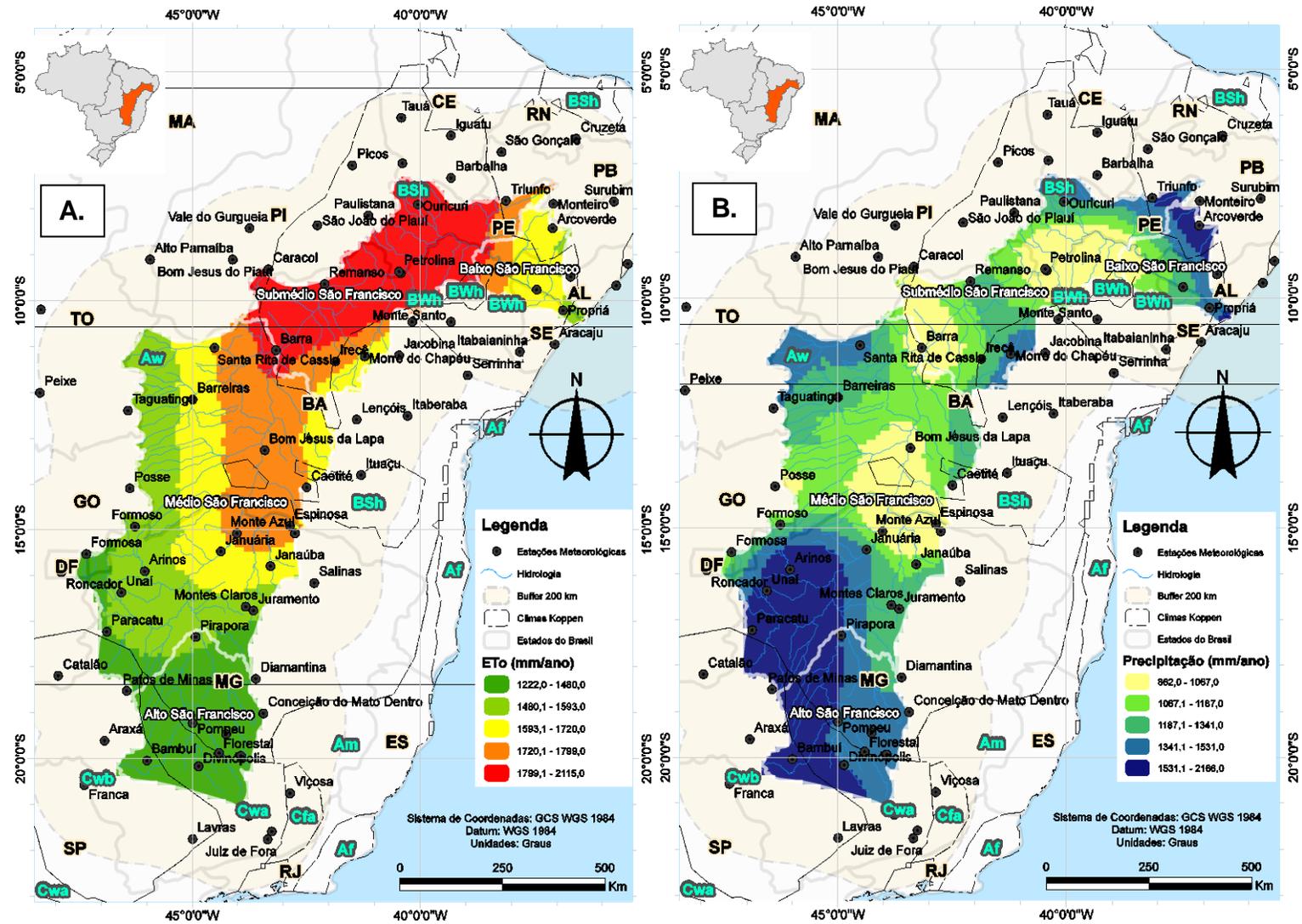


Figura 3. Distribuição do total anual da evapotranspiração de referência (A) e de precipitação pluviométrica (B) na bacia do rio São Francisco

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial da ETo acumulada de acordo com as estações do ano. No inverno, outono e primavera a distribuição espacial da ETo foi semelhante à ETo anual (Figura 3), diminuindo no sentido sul – nordeste, com os valores máximos (669,8 mm) concentrado na região do Médio São Francisco e o menor valor (230,8 mm) na região do Alto São Francisco. No inverno e primavera apresentam uma ligeira semelhança na distribuição espacial da ETo, tal condição foi verificada por Xu et al (2006) em estudo na China.

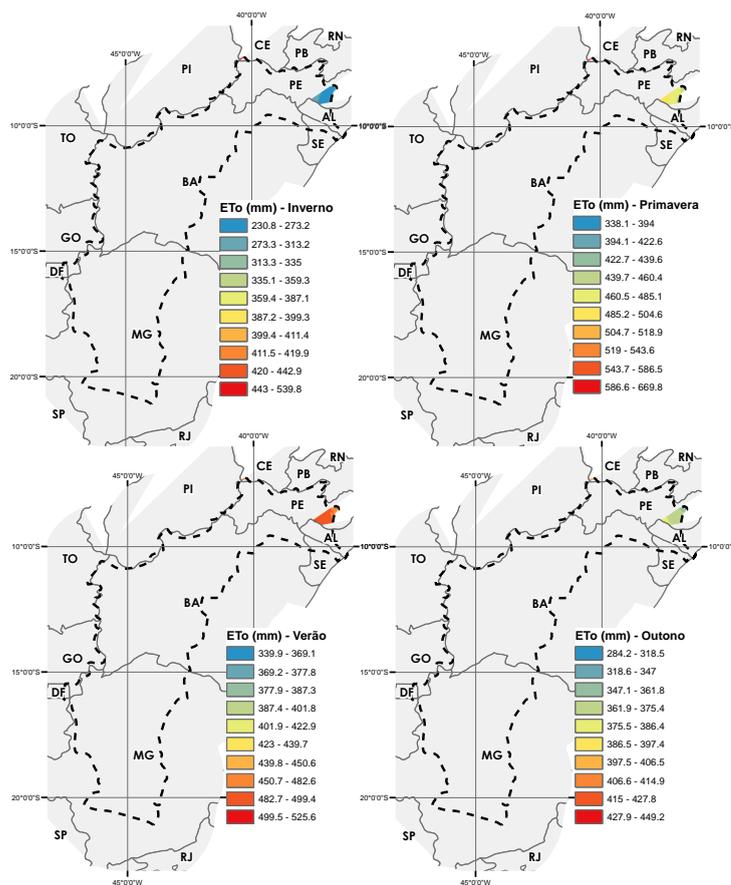


Figura 4. Totais sazonais da ETo na bacia do São Francisco

A Figura 3 revela que a região do Submédio São Francisco é a mais crítica em termos de demanda evaporativa da atmosfera. Nesta região predomina clima semiárido representado pelo bioma caatinga. Em todas as estações do ano, a demanda evaporativa aumenta no sentido sul-norte (da parte mais alta para a mais baixa), mas apenas no verão a demanda evaporativa aumenta no sentido oeste-leste na parte baixa da bacia, tornando a região crítica em termos de suprimento de água para cultivos não irrigados. No inverno, a região oeste é crítica em suprimento hídrico via chuva, o que justifica aumento da demanda evaporativa atmosférica. O período

de chuvas no oeste concentra-se no final e início do ano (INEMA, 2017; ARAÚJO & BRITO, 2011).

Demanda hídrica da cultura e Zoneamento

A Tabela 4 apresentam os valores médios e máximos da irrigação suplementar para os diferentes períodos de cultivo da cultura do milho (eficiência do sistema de irrigação de 70%) em função das áreas fisiográficas da bacia. De um total de 12 períodos possíveis, a implementação da cultura se faz mais viável do ponto de vista da quantidade de água a ser repostada via irrigação, nos períodos que iniciam em janeiro e/ou fevereiro, novembro e/ou dezembro. Nestes períodos, em média 40% do território da bacia encontra-se sob condições de excesso hídrico, não sendo necessário assim o uso da irrigação. Para os períodos que se iniciam de maio a setembro, em quase 100% da área da bacia se faz necessário o uso da irrigação de forma a suplementar o déficit hídrico.

A divisão por área fisiográfica mostra que o Alto São Francisco, apresenta para todos os períodos as menores suplementações da irrigação. O Submédio São Francisco é a região que apresenta maior demanda hídrica, confirmado pela distribuição espacial da ETo, observada na Figura 3.

Tabela 4. Irrigação suplementar média e máxima para os diferentes períodos de cultivo em função das regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco

Período/Região da Bacia	Alto São Francisco	Baixo São Francisco	Submédio São Francisco	Médio São Francisco	Áreas com déficit (%)
	Irrigação Suplementar (mm)				
Jan - Mai	9 (19)	182 (374)	210 (433)	133 (429)	54,82
Fev - Jun	21 (51)	165 (297)	218 (429)	161 (423)	56,56
Mar - Jul	56 (240)	172 (386)	293 (565)	225 (558)	71,75
Abr - Ago	150 (420)	172 (538)	413 (758)	343 (728)	87,37
Mai - Set	306 (578)	321 (750)	623 (1012)	522 (899)	96,68
Jun - Out	426 (691)	527 (902)	821 (1098)	654 (1016)	98,12
Jul - Nov	428 (660)	666 (968)	906 (1153)	664 (1015)	98,75
Ago - Dez	349 (540)	688 (920)	857 (1109)	568 (925)	98,95
Set - Jan	175 (392)	628 (946)	726 (993)	397 (877)	98,26
Out - Fev	54 (344)	474 (793)	563 (814)	306 (736)	79,34
Nov - Mar	83 (313)	329 (621)	413 (673)	249 (696)	67,86
Dez - Abr	70 (157)	233 (506)	277 (520)	172 (588)	61,31

Os valores entre parênteses representam o máximo valor da irrigação suplementar

Para os períodos que iniciam em novembro e/ou dezembro, o período de floração do milho coincide com os dias mais longos do ano (de maior fotoperíodo) além de que, o enchimento dos grãos será em um período com temperaturas elevadas e alta disponibilidade de radiação solar conforme sugerem Cruz et al. (2010). As diferenças entre os períodos de maior e menor demanda na região do Submédio São Francisco, para o período de cultivo Jul – Nov a suplementação máxima de irrigação chega a ser mais que o dobro, quando comparada com o período de Fev – Jun na mesma região fisiográfica. Para efeito de comparação, isso se repete para as regiões do Baixo e Médio São Francisco. Na região do Submédio São Francisco a demanda hídrica (evapotranspiração) é aproximadamente duas vezes maior que aquela simulada para a região alta da bacia nos períodos de abril a agosto.

A Figura 5A apresenta o zoneamento pedoclimático para a cultura do milho cultivada em sequeiro na bacia do rio São Francisco. A região do Alto São Francisco apresenta aptidão plena, à medida que se avança ao longo do rio principal, a potencialidade do uso da cultura sem irrigação diminui, uma vez que mais de 50% do Médio São Francisco apresenta risco de perdas de produtividade tendo a chuva como único fator de entrada de água. Nessa região fisiográfica, as zonas com menores períodos com déficit seguem a classificação pedoclimática com as classes aptas e de aptidão moderada. Cerca de 75% da área da bacia aptidão com restrição ao clima e ao clima e solo. A Figura 5B apresenta a distribuição espacial do número de período com déficit hídrico na bacia hidrográfica do rio São Francisco. As altas demandas evaporativas aliadas a precipitações reduzidas, contribuem para esse efeito, exigindo, portanto, o uso da irrigação para o cultivo do milho.

A programação da implementação da cultura do milho requer ainda a análise do número de períodos cuja suplementação via irrigação se faz necessária. Em 65% do território da bacia, no mínimo 10 períodos apresentam déficit hídrico, com irrigação suplementar variando de 800 a 1153 mm (Figura 6).

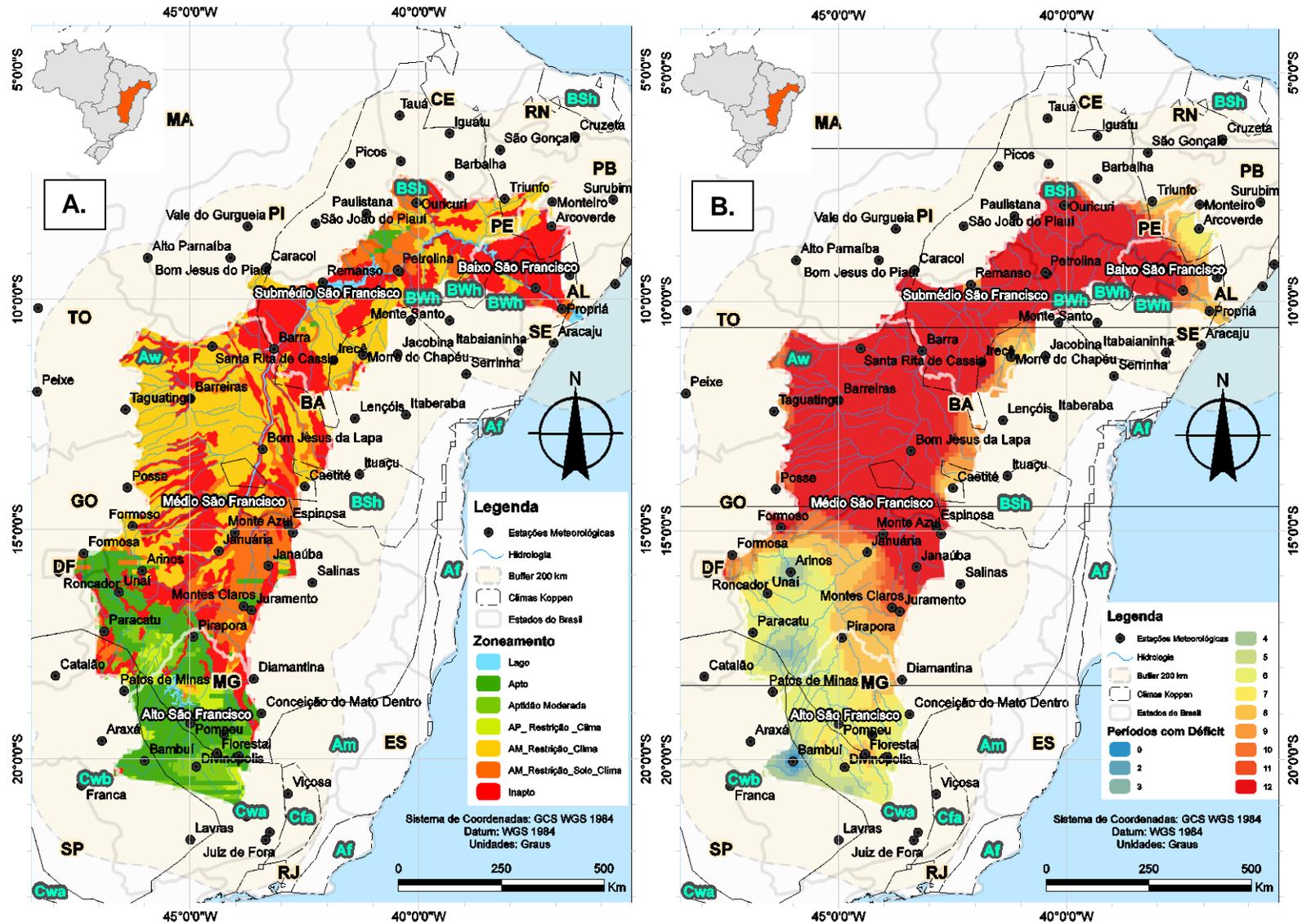


Figura 5. Zoneamento pedoclimático para a cultura do milho (A) e espacialização do número de períodos com déficit hídrico (B)

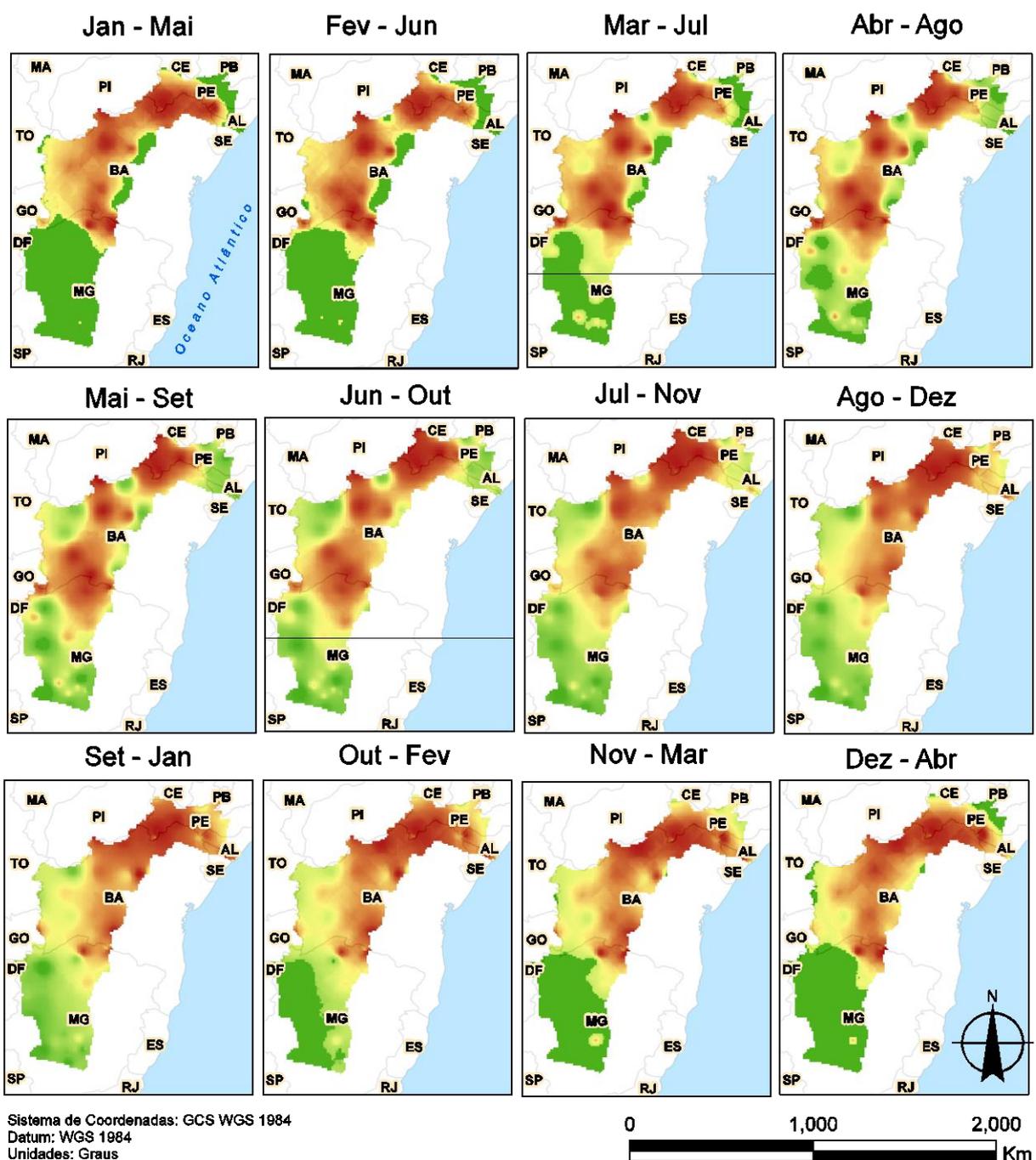


Figura 6. Necessidade de irrigação suplementar para a cultura do milho em diversas época do ano, sendo o primeiro mês de cada intervalo o mês de plantio, assumindo-se ciclo de produção do plantio à colheita constante de 120 dias.

A parte alta da bacia, apresenta áreas bem definidas com excesso hídrico em quatro períodos possíveis de cultivo para a cultura do milho (Figura 6). De forma análoga, parte da região do Médio e do Submédio São Francisco, tem em todos os períodos possíveis de cultivo, zonas com déficit hídrico, o que faz da irrigação técnica indispensável a fim de viabilizar a implementação da cultura.

CONCLUSÕES

A zona mais crítica em todas as estações é a região do Submédio São Francisco, região com alta demanda hídrica para a cultura do milho.

O uso do SIG permitiu definir períodos ótimos para a implementação da cultura do milho seja através da irrigação ou cultivada em sequeiro.

Quase todo o território da bacia se encontra em zonas de déficit hídrico, principalmente nos períodos que vão do mês de maio até setembro.

Na bacia do São Francisco, a cultura do milho é viável em cultivo sequeiro tendo como área máxima de 40% do território da bacia nos períodos cujo plantio se iniciam em janeiro e ou fevereiro, novembro e ou dezembro.

Os períodos de plantios de maio a setembro apresentam em toda bacia mais de 90% de áreas com déficit hídrico. Para tanto, fica inviabilizado o cultivo do milho nessas áreas sem o uso da irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56. Rome: FAO, 1998. 310p.

ALLEN, R. G. **Manual REF-ET version Windows 4.1**. Available online at www.kimberly.idaho.edu, 2015.

AMIRATAEE, B., MONTASERI, M. & SANIKHANI, H. The analysis of trend variations of reference evapotranspiration via eliminating the significance effect of all autocorrelation coefficients. **Theoretical and Applied Climatology**. 126: 131, 2016.

ARAÚJO, W. S., BRITO, J. I. B. Índices de tendências de mudanças climáticas para os estados da Bahia e Sergipe por meio de índices pluviométricos diários e sua relação com TSM do pacífico e atlântico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, 541 - 554, 2011.

BARBOSA, F. C., TEIXEIRA, A. S., GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jágua—CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 1, p. 24-33, 2005.

BELTRAME, L. F. S., LOUZADA, J. A. S., LANNA, A. E. L. **Evapotranspiração potencial do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 49 p. (Recursos hídricos, 31), 1994.

CHUNG, H. W., CHOI, J. Y., BAE, S. J. Calculation of spatial distribution of potential evapotranspiration using GIS. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 1997, Minneapolis, Minnesota. Paper... Minneapolis: **American Society of Agricultural Engineers**, 1997. 9 p.

DALEZIOS, N.R., LOUKAS, A., BAMPZELIS, D. Spatial variability of reference evapotranspiration in Greece. **Physics and Chemistry of the Earth**, 27 1031–1038, 2002.

CRUZ, J. C., PEREIRA FILHO, I. A., ALVARENGA, R. C., GONTIJO NETO, M. M., VIANA, J. H. M., OLIVEIRA, M.F., MATRANGOLO, W. J. R., ALBUQUERQUE FILHO, M. R. **Embrapa Milho e Sorgo Sistema de Produção**, 1 Versão Eletrônica - 6ª edição Set./2010. Disponível em: http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/manejomilho.htm

FREITAS, W. S., RAMOS, M. M., OLIVEIRA, A. M. S. Demanda de irrigação da cultura da uva na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.10, n.3, p.563–569, 2006.

GEORGOUSSIS, H., BABAJIMOPOULOS, C., PANORAS, A., ARAMPATZIS, G., HATZIGIANNAKIS, E., ILIAS, A., PAPAMICHAEL, L. D. Regional scale irrigation scheduling using a mathematical model and GIS. **Desalination** 237(2):108–116, 2009.

INEMA - Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Prognóstico Climático para o Estado da Bahia**. Acessado em 11/01/2017. Disponível em: http://www.inema.ba.gov.br/wp-content/uploads/2011/10/Boletim-Mensal-com-atend%C3%A2ncia-clim%C3%A1tica-trimestral_D_2013-JF_2014.pdf.

JENSEN, M. E., BURMAN, R. D., ALLEN, R.G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, **Am. Soc. Civil Engr.**, New York, NY. 1990, 332 p.

JENSEN, M. E., ALLEN, R.G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, **Am. Soc. Civil Engr.**, New York, NY. 2016, 769 p.

MANETA, M.P., TORRES, M., WALLENDER, W.W., VOSTI, S., KIRBY, M., BASSOI, L.H., Rodrigues, L.N. Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. **Agricultural Water Management** 96, 1191–1200, 2009.

MANTOVANI, E. C., PALARETTI, L. F., BERNARDO, S. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009, 370p.

NAHRY, A. H. E., ALI, R.R., BAROUDY, A. A. E. An approach for precision farming under pivot irrigation system using remote sensing and GIS techniques, **Agricultural Water Management**, 98(4), 517-531, 2011.

OLIVER, M. A. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems." *International Journal of Geographic Information Systems* 4: 313–332, 1990.

PEREIRA, L.S., OWEIS, T., ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**. 57,175–206, 2002.

ROMANO, P. A., CADAVID GARCIA, E. A., **Policies for water-resources planning and management of the Sao Francisco River Basin**. In: Biswas, A.k., Cordeiro, N.V., Tortajada, C., Braga, B.P.F. (Eds.), *Management of Latin American River Basins: Amazon, Plata, and São Francisco*. United Nations University Press, pp. 325, 1999.

ROYLE, A. G., CLAUSEN, F. L., FREDERIKSEN, P. "Practical Universal Kriging and Automatic Contouring." **Geoprocessing** 1: 377–394. 1981.

CBHSF. **Comitê da Bacia Hidrografica do Rio São Francisco**. Acessado em 10/12/2016. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>.

TODOROVIC, M., STEDUTO, P. A GIS for irrigation management. **Physics and Chemistry of the Earth**, 28, 163-174, 2003.

VIEIRA, S. R., GUEDES FILHO, O. G., CHIBA, M. K., CANTARELLA, H. Spatial variability of soil chemical properties after coffee tree removal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.33 no.5 Viçosa Sept./Oct. 2009.

XU, C., GONG, L., JIANG, T., CHEN, D., SINGH, V. P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology**, 327, 81– 93, 2006.

CAPÍTULO 2

**TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE
DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO
FRANCISCO, BRASIL**

TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, BRASIL

Autor: Neilon Duarte da Silva

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

RESUMO: Um requisito importante a qualquer programa de gerenciamento dos recursos hídricos é o conhecimento dos processos naturais que regulam o ciclo hidrológico, principalmente quando se trata de análises espaciais e temporais desses processos. Os objetivos desse trabalho foram: (a) explorar as tendências espaciais e temporais do ETo, (b) avaliar a dinâmica de variação de ETo e quantificar a contribuição de cada uma das variáveis meteorológicas no cômputo evapotranspiração de referência (ETo) na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Dados diários das temperaturas máximas e mínimas do ar, umidade relativa média do ar, velocidade do vento e insolação de 101 estações meteorológicas foram utilizados e fazem parte da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do período de 1961 a 2015. A análise de tendência climática foi feita utilizando o teste estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall. A análise de sensibilidade da Equação de Penman-Monteith foi feita a partir de derivações parciais em função das variáveis meteorológicas chaves da ETo (temperatura do ar, saldo de radiação, velocidade do vento e pressão atual de vapor d'água). O aumento significativo ($p < 0,01$) do déficit de pressão de vapor d'água (DPV) aliado ao aumento da temperatura média do ar, contribuiu em acréscimos na ETo ao longo do período de estudo. O cenário em toda a bacia do rio São Francisco é de aumento dos valores das variáveis climáticas, dado importância principalmente a evapotranspiração (85% da área bacia com acréscimos) e a precipitação (52% área da bacia com decréscimo). Os resultados indicam um aumento nas taxas de variação da ETo na ordem de $2,424 \text{ mm ano}^{-2}$ em média em toda a bacia. O termo energético representa maior peso no cálculo da evapotranspiração em 81% do território da bacia.

Palavras-chave: Climatologia, mudanças climáticas, teste de Mann-Kendall

**CLIMATE TRENDS AND SENSITIVITY ANALYSIS OF REFERENCE
EVAPOTRANSPIRATION INPUT VARIABLES IN THE SÃO FRANCISCO RIVER
BASIN, BRAZIL**

Author: Neilon Duarte da Silva

Adviser: Aureo Silva de Oliveira

ABSTRACT: An important requirement for any water resources management program is knowledge of the natural processes that regulate the hydrological cycle, especially when it comes to spatial and temporal analyzes of these processes. The objectives of this work were: (a) to explore the spatial and temporal trends of ETo, (b) to evaluate the dynamics of ETo variation and to quantify the contribution of each of the meteorological variables in the computation of reference evapotranspiration (ETo) in the hydrographic basin of São Francisco River. Daily data on the maximum and minimum air temperatures, mean air humidity, wind speed and sunshine of 101 meteorological stations were used and are part of the National Institute of Meteorology (INMET) network from 1961 to 2015. The analysis of Mann-Kendall's non-parametric statistical test was used. The sensitivity analysis of the Penman-Monteith equation was based on partial derivations as a function of the key meteorological variables of the ETo (air temperature, radiation balance, wind speed and current water vapor pressure). The significant increase ($p < 0.01$) in the water vapor pressure deficit (DPV), combined with the increase in the mean air temperature, contributed to increases in ETo over the study period. The scenario in the whole basin of the São Francisco River is an increase in the values of climatic variables, mainly due to evapotranspiration (85% of the basin area with additions) and precipitation (52% of the basin area with decrease). The results indicate an increase in the rates of variation of ETo in the order of $2.424 \text{ mm year}^{-2}$ on average in the whole basin. The energy term represents the largest weight in the calculation of evapotranspiration in 81% of the basin's territory.

Keywords: Climatology, climate change, Mann-Kendall test

INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do rio São Francisco tem área de drenagem de 639.219 km² o que corresponde a 7,5% do país. O rio principal, o São Francisco, tem 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para este, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe. A presença de diferentes biomas como a mata atlântica, cerrado, caatinga, costeiros e insulares torna a bacia ainda mais rica do ponto de vista da biodiversidade.

O termo evapotranspiração de referência (ET_o) é bem definido por Pereira et al. (2002) e Allen et al. (1998), que assim a definem como sendo a evapotranspiração que ocorre em uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23, altura uniforme, cobrindo totalmente o solo, e sem restrição hídrica e nutricional. As determinações de evapotranspiração de referência (ET_o) são amplamente utilizadas na engenharia de irrigação para definir as necessidades de água das culturas, (ALLEN et al., 2005). Existem diversos métodos para determinação da evapotranspiração, sejam eles diretos ou indiretos. Dentre os métodos diretos, destacam-se a utilização de lisímetros de pesagem e do balanço hídrico no solo. Já nos métodos indiretos, destaca-se o modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), recomendado e padronizado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) no seu manual 56.

Dada a importância principalmente da mudança paulatina dos processos de troca de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre, as alterações climáticas podem modificar a maneira como a superfície interage com a atmosfera, o que pode implicar na definição de novas zonas climáticas. Uma maneira de se entender e mensurar tais efeitos é expressar ao longo de séries temporais a magnitude dos valores das variáveis climatológicas. Estudos recentes sobre mudanças climáticas se concentram principalmente sobre a variabilidade a longo prazo da temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e precipitação e têm a ET_o como principal fator climático que controla a energia e a troca de massa entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera, (CHEN et al., 2006).

Diversos testes estatísticos são utilizados para a detecção de tendências significativas nas séries temporais, principalmente aqueles denominados não-paramétricos, (ZHANG et al., 2006; CHEN et al., 2007). Os testes de Mann-Kendall e

Spearman Rho são exemplos que podem ser utilizados para detectar tendências em estudos de variáveis meteorológicas, (Gellens, 2000; Kahya & Kalayci, 2004; Gadgil & Dhorde, 2005). Em uma comparação do desempenho entre os testes de Mann-Kendall e Spearman Rho, Yue & Wang (2004); Novotny & Stefan, (2007) verificaram a partir dos seus resultados que ambos têm o mesmo poder na detecção das tendências monótonas em ambos.

Testando condições gerais da umidade relativa do ar e tendências anuais e sazonais da temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração potencial (ETp), no período de 1971 a 2000 na China, Wu et al. (2002), verificaram tendências crescentes na temperatura do ar e da precipitação e tendências decrescentes na ETo. Outros autores, Hakan et al. (2010), relataram que existe uma tendência crescente na temperatura e na ETo na maioria das estações analisadas na Turquia. Fazendo o uso do mesmo teste, Cohen & Stanhill (1996) estudaram as alterações de precipitação na Jordânia e encontraram uma tendência de redução da ETo variando de $-0,47$ à $-0,16$ mm ano⁻¹. Conclusões semelhantes foram verificadas por Al-Ansari et al. (1999) que observaram geral diminuição da intensidade da chuva aliado a redução da ETo.

A combinação da análise de sensibilidade de modelos que estimam a ETo em conjunto com a verificação de alterações climáticas tem sido um viés interessante no sentido de computar as taxas de variação da ETo bem como os impactos causados por cada variável meteorológica na demanda hídrica local. A determinação e a atribuição de maneira quantitativa permitem verificar qual variável é responsável pelo maior aporte de água para a atmosfera. Na China, trabalhos recentes têm sido executados, e os resultados mostram que a velocidade do vento e o déficit de pressão de vapor d'água dentro do termo aerodinâmico são as variáveis que mais contribuem para a redução das taxas de variação da ETo, (TANG et al., 2011; DONOHUE et al., 2010; RODERICK, 2007). Esses trabalhos mostram em geral que o termo aerodinâmico em escala mensal contribui de forma a reduzir as taxas de variação da ETo no tempo.

Face ao cenário atual de possíveis alterações climáticas e a escassez de trabalhos locais que com vistas à melhor gestão da bacia, os objetivos desse trabalho foram: (a) explorar as tendências espaciais e temporais da ETo, (b) quantificar a contribuição de cada uma das principais variáveis meteorológicas no cômputo da ETo via equação FAO 56 de Penman Monteith na bacia hidrográfica do Rio São Francisco.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados Meteorológicos

Dados meteorológicos diários das temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar média, velocidade do vento média e insolação foram utilizados no presente estudo. A série histórica coletada em 101 estações meteorológicas (ANEXO A) manuais e automáticas e compreendendo o período de 01 de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 2015, foi obtida da base de dados BDMEP do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (www.inmet.org.br). A distribuição espacial das estações é mostrada na Figura 1. Do total de estações utilizadas, 52 estão localizadas numa faixa de 200 km de extensão (buffer) a partir do divisor de águas da bacia. A inclusão dessas estações externas aos limites da bacia objetivou garantir melhor representação das condições climáticas da bacia e do seu entorno (AMIRATAEE et al., 2016; OLIVER, 1990; ROYLE et al., 1981).

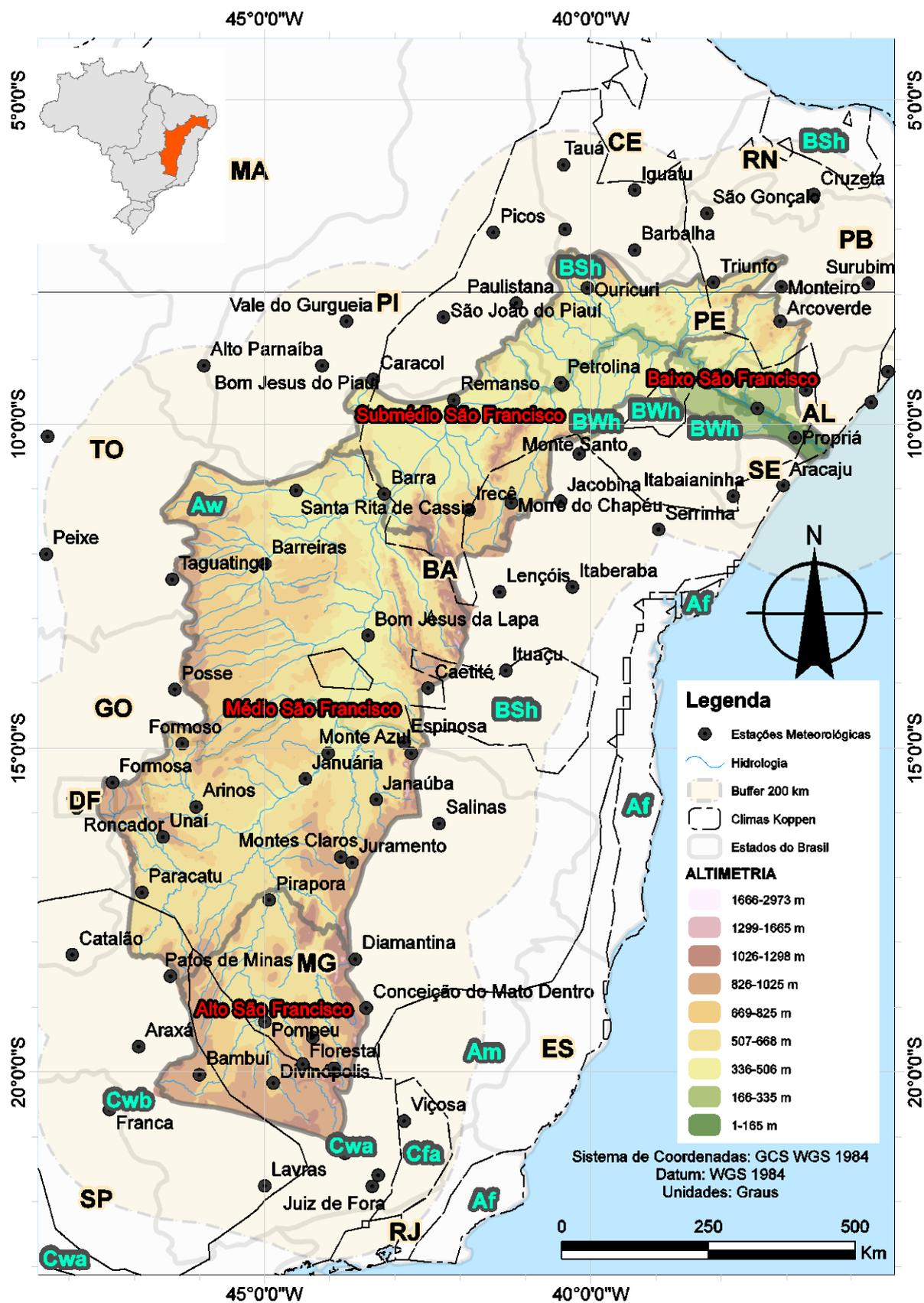


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e distribuição das estações meteorológicas

Análise de Qualidade de Dados e Preenchimento de Falhas

A análise da qualidade de dados é primordial para a obtenção de resultados consistentes. Por isso, foi feita uma triagem em toda a série histórica para cada estação, verificando possíveis valores discrepantes em cada variável meteorológica. A ausência de dados na série foi preenchida através de médias oriundas de valores do dia anterior e posterior. A ausência de dados por três ou mais dias consecutivos, implicou na eliminação destes da série histórica.

Evapotranspiração de Referência (ET_o)

O método Penman–Monteith padronizado no manual 56 da FAO, tem sido recomendado como aquele que melhor expressa e representa condições aproximadas das relações solo/planta/atmosfera para a determinação ET_o, Equação 1. Os valores da ET_o foram calculados (ANEXO B) via *software* REF-ET versão 4.1, Allen, (2015).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

em que

ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

R_n – saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹);

G – fluxo de calor no solo (MJ·m⁻²·dia⁻¹), sendo G=0 em um período de 24h;

Δ – declinação da curva de saturação do vapor da água (KPa °C⁻¹);

u_2 – velocidade do vento à 2m de altura (m s⁻¹);

T_a – temperatura média do ar (°C);

e_s – pressão de saturação do vapor d'água na atmosfera (KPa);

e_a – pressão atual do vapor d'água na atmosfera (KPa);

γ – constante psicométrica (MJ kg⁻¹).

Análise de Tendência Temporal

O teste não-paramétrico de Mann-Kendall, (Mann, 1945; Kendall, 1975) foi utilizado com o auxílio do software XLSTAT versão 2014.5.03 *Copyright Addinsoft*, aplicado em todas as séries temporais das variáveis climáticas envolvidas neste trabalho.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

$$x = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

em que,

- n – tamanho da série temporal ($x_1 \dots x_n$);
- sgn – sinal da função;
- i, j – sequência da série temporal.

A variância do teste estatístico S , que tem média zero, é obtido utilizando as Equações 4 e 5, Kendall, (1975).

$$E[S] = 0 \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^P t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right]}{18} \quad (5)$$

em que,

- t – número de observações iguais no grupo j ;
- P – número de grupos com observações iguais;
- n – número de observações.

O teste estatístico Z é então usado para verificar a hipótese nula em que os dados são distribuídos de forma idêntica e observações aleatórias não dependentes do tempo Equação 6.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$Z < p(0,05) \quad (7)$$

A mudança relativa (Equação 8) da variável no tempo será feita segundo metodologia proposta por Talaei et al, (2014); Tabari & Talaei (2013).

$$MR = \frac{n \cdot \beta}{|\bar{x}|} \cdot 100 \quad (8)$$

em que,

n – tamanho da série temporal;

β – magnitude da tendência da série temporal;

MR – mudança relativa (%);

\bar{x} – média dos valores da série.

A magnitude da tendência da série temporal é estimada usando um outro teste não-paramétrico baseado na declividade da curva de regressão linear proposto por Sen (1968); Hirsch et al. (1982), Equação 9.

$$\beta = \text{mediana} \left(\frac{X_i - X_j}{i - j} \right) \quad (9)$$

em que,

X_i, X_j – valores iniciais e finais da série temporal;

i, j – número de anos da série temporal.

Análise de sensibilidade e impactos das variáveis de entrada da ETo

A Equação 1, pode ser reescrita e particionada em dois termos que dão embasamento nas determinações da Evapotranspiração de Referência, assim, temos

o Termo Energético (ET_{TE}) e o Termo Aerodinâmico (ET_{TA}), conforme é visto nas Equações 10 e 11.

$$ET_o = ET_{TE} + ET_{TA} \quad (10)$$

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} + \frac{\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (11)$$

Na quantificação das diferenciais parciais da análise de atribuição de ET_o dinâmica, foi utilizado o teste de Sen (1968) (Equação 9), representando a derivada da variável (x) no tempo (t), isto é, dx/dt . A determinação da contribuição de cada termo conforme mostra a Equação 12, é apresentada por Xie & Zhu (2013); Tang et al. (2011); Roderick et al. (2007); Xie et al. (2015).

$$\frac{dET_o}{dt} = \frac{dET_{TE}}{dt} + \frac{dET_{TA}}{dt} \quad (12)$$

Termo Energético (ET_{TE})

No termo energético, temos as seguintes variáveis de entrada: Saldo de Radiação (R_n), Temperatura média do ar (T_a), e velocidade do vento (u_2).

$$ET_{TE} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (13)$$

Como Δ está em função da temperatura, aplica-se uma segunda derivada parcial. Sendo assim, o termo energético será composto pelo somatório de três derivações (ANEXO C):

$$\frac{ET_{TE}}{dt} = \frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TE}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} + \frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} \quad (14)$$

a) Declividade da curva de pressão de saturação

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{R_n \cdot \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2) \cdot 0,408}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (15)$$

b) Saldo de radiação

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} = \frac{0,408 \cdot \Delta}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \frac{dR_n}{dt} \quad (16)$$

c) Velocidade do vento

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} = - \frac{0,13872 \cdot \Delta \cdot \gamma \cdot R_n}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \frac{du_2}{dt} \quad (17)$$

Termo Aerodinâmico (ET_{TA})

No termo aerodinâmico, temos as seguintes variáveis de entrada: Temperatura média do ar (T_a), pressão de saturação do vapor d'água (e_s), pressão atual do vapor d'água (e_a) e velocidade do vento (u_2).

$$ET_{TA} = \frac{\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (18)$$

Uma vez que Δ , e e_s , estão em função da temperatura do ar, aplica-se uma segunda derivada parcial nos seus respectivos termos. Sendo assim, o termo energético será composto pela de quatro derivações (ANEXO C):

$$\frac{ET_{TA}}{dt} = \frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} \quad (19)$$

a) Declividade da curva de pressão de saturação

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = - \frac{\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{[\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)]^2} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (20)$$

b) Pressão de saturação do vapor d'água

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{\gamma \cdot u_2 \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \frac{de_s}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (21)$$

c) Pressão atual do vapor d'água

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} = - \frac{\gamma \cdot u_2 \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \frac{de_a}{dt} \quad (22)$$

d) Velocidade do vento

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} = \frac{\gamma \cdot (\Delta + \gamma) \cdot \left[\left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right]}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \frac{du_2}{dt} \quad (23)$$

Determinação isolada do impacto de cada componente no cômputo da ETo

A contribuição de cada variável na determinação da ETo foi feita através da compatibilização dos termos das equações diferenciais dos termos energético e aerodinâmico, conforme sugerido por (TANG et al., 2011).

Seguindo os argumentos de Tang et al. (2011); Roderick et al. (2007); Donohue et al. (2010) e Xie & Zhu (2013), ignora-se o efeito de $\frac{dT_a}{dt}$ no termo $\frac{dR_n}{dt}$ e atribuiu-se as mudanças de Δ e e_s unicamente as variações da temperatura do ar (T_a), logo, as relações $\frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt}$ e $\frac{de_s}{dT_a} \frac{dT_a}{dt}$, podem ser substituídas unicamente pela derivada de Δ

em função do tempo ($\frac{d\Delta}{dt}$) e pela derivada de e_s em função do tempo ($\frac{de_s}{dt}$).

Para tanto, a sensibilidade individual de cada variável sobre a ETo pode ser representada pelas seguintes equações:

a) Temperatura do Ar

$$\frac{\partial ET_o}{\partial T_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{dt} \quad (24)$$

b) Saldo de Radiação

$$\frac{\partial ET_o}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} = \frac{\partial ET_{TE}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} \quad (25)$$

c) Velocidade do Vento

$$\frac{\partial ET_o}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} = \frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} \quad (26)$$

d) Pressão atual do vapor d'água

$$\frac{\partial ET_o}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} = \frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} \quad (27)$$

Partição da contribuição das variáveis de entrada no cálculo da ETo

A contribuição das variáveis de entrada no cálculo da ETo foi feita através de regressão linear múltipla, seguindo a metodologia proposta por, Zhang et al. (2011), Ye et al. (2014) (Equações 28, 29 e 30). A relação entre ETo e suas variáveis climáticas foi então analisada pelo método de regressão múltipla *stepwise*. As regressões foram feitas com o auxílio do *software* R versão 3.1.2.

A aplicação deste método, requer a normalização dos dados originais das variáveis climáticas de entrada, e é realizada usando a Equação 28.

$$X_{in} = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (28)$$

em que,

X_{in} – variável normalizada;

$x_i, x_{i\max} - x_{i\min}$ – sequências de valores observados na série histórica (valor atual, valor máximo e valor mínimo, respectivamente).

O modelo geral de regressão múltipla é dado pela Equação 29.

$$Y_i = aX_{i1} + bX_{i2} + cX_{i3} + \dots + nX_{in} \quad (29)$$

em que,

Y_i – evapotranspiração de Referência ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$)

$X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, X_{in}$ – variáveis de entrada da ETo

a, b, c, d – coeficientes da regressão

Baseado nos coeficientes de regressão, a taxa relativa (η %) de contribuição de cada variável (X_{in}) para explicar os valores da ETo (Y_i) pode ser estimada a partir da Equação 30.

$$\eta_{1,2,3,\dots,n} = \left(\frac{|a_{1,2,3,\dots,n}|}{|a_{1,2,3,\dots,n}| + |b_{1,2,3,\dots,n}| + |c_{1,2,3,\dots,n}| + \dots + |n|} \right) \cdot 100 \quad (30)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de Tendência Temporal

As informações contidas na Tabela 1 representam os casos extremos (acréscimo e decréscimo) das mudanças climáticas para algumas estações da bacia do São Francisco. Foi possível verificar que aumento significativo ($p < 0,01$) do déficit de pressão de vapor d'água (DPV) aliado ao aumento da temperatura média do ar, contribui assim, em acréscimos na ETo ao longo do período de estudo, isso pode ser verificado na cidade de Araxá. Quanto maior o déficit de saturação menor a umidade relativa do ar, advindo de acréscimos na temperatura do ar, o que resulta numa alta demanda de vapor d'água pela atmosfera, contribuindo significativamente para o aumento da ETo em escala mensal, (ZHAO et al., 2014; ALLEN et al., 1998).

Tabela 1. Tendência climáticas para algumas das variáveis chaves do cômputo da ETo na bacia do rio São Francisco.

Estação	Ta	u	Rn	UR	DPV	ETo	
	°C	$m \cdot s^{-1}$	$MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$	%	kPa	$mm \cdot dia^{-1}$	MR %
Água Branca	-0,0018 ^{ns}	-0,0083 ^{ns}	-0,0262*	0,383**	-0,0109**	-0,0167*	-12,09
Arcoverde	0,0066 ^{ns}	-0,0032 ^{ns}	0,0131*	0,297**	-0,0078**	-0,0123**	-11,21
Araxá	0,0472**	0,0085 ^{ns}	0,0047*	-0,258**	0,0089**	0,0192**	24,94
Barbacena	0,0206**	-0,0008 ^{ns}	-0,0191**	0,022 ^{ns}	-0,0008**	-0,0038*	-6,54
Barra	0,0459**	-0,0161**	0,0134**	-0,27**	0,0148**	0,0083*	5,17
Barbalha	0,0487**	-0,0158**	0,0115*	-0,24**	0,0137**	0,0081*	5,02
Belo Horizonte	0,0314**	-0,0011 ^{ns}	0,012**	-0,199**	0,006**	0,0097**	13,19
Bom Jesus da Lapa	0,0541**	-0,0136**	0,0063 ^{ns}	-0,165*	0,0013 ^{ns}	0,0019 ^{ns}	1,61

^{ns} não significativo, ** significativo ao nível de 5% * significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Man Kendall.

De um modo geral, quando a pressão de saturação diminui em conjunto com a declividade da curva de saturação do vapor d'água na atmosfera (isso tende a diminuir o déficit de saturação, advindo da redução da temperatura do ar), há um aumento significativo no termo energético (XIE & ZHU, 2013). Certa feita, a difusão do vapor d'água que é produzido e que está em contato com a superfície da folha e a atmosfera, tem a pressão atual de vapor d'água como principal componente atenuante. Dessa forma, quando esta camada se encontra saturada, há uma quantidade significativa de moléculas de água que saem da superfície da folha e passam para o estado gasoso, e isso praticamente cessa a evapotranspiração, o que explica a participação efetiva das pressões atuais e de saturação nas variações das taxas da ETo (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O saldo de radiação teve participação efetiva nas alterações climáticas da ETo em todas as estações. Mesmo com grande influência do DPV, a não existência de tendências anuais significativas ($p < 0,05$) de R_n , foi suficiente para a estabilização da ETo ao longo dos anos, conforme foi observado na cidade de Bom Jesus da Lapa. As alterações da radiação solar no tempo, aliado a fatores como altas taxas de nebulosidade, emissões de aerossóis e a poluição do ar, tem provocado mudanças bruscas nas taxas de variação da ETo, o que confirma o Alto impacto da radiação solar na ETo e a existência de mudanças climáticas, (NORRIS & WILD, 2009; PAPAIOANNOU et al., 2011; LIU & ZHANG, 2013).

A localização geográfica bem como características de clima, altitude são fatores que contribuem na mudança da taxa relativa de acréscimo ou decréscimo da ETo (ZHENG et al., 2009; WANG et al., 2013). Isto pode ser observado na Figura 2, em que as Estações de Barra e Barbalha são definidos pelo clima 'BSh' segundo a classificação climática atualizada de Köppen-Geiger, proposta por Kottek et al. (2006). Essas localidades apresentaram tendência semelhantes das variáveis chaves da ETo (Tabela1), tendo respectivamente o aumento do déficit de pressão de vapor d'água, e aumento da temperatura, conseqüentemente redução da umidade relativa do ar. Essas localidades são caracterizadas por climas secos representado por Estepes (BS) e por temperaturas médias anuais altas, maiores que 18°C (h), (KÖPPEN-GEIGER, 1961). Esses resultados podem ser explicados pela menor quantidade de vapor de água transportado pelo vento em climas mais secos em comparação com climas mais úmidos, (TANG et al., 2011; WANG et al., 2013; ALLEN et al., 1998). Em contraste, na região relativamente úmida nas cidades de Água Branca e Arcoverde a umidade relativa foi mais sensível que a temperatura do ar, o que causou essas reduções na ETo ao longo do tempo (Tabela1).

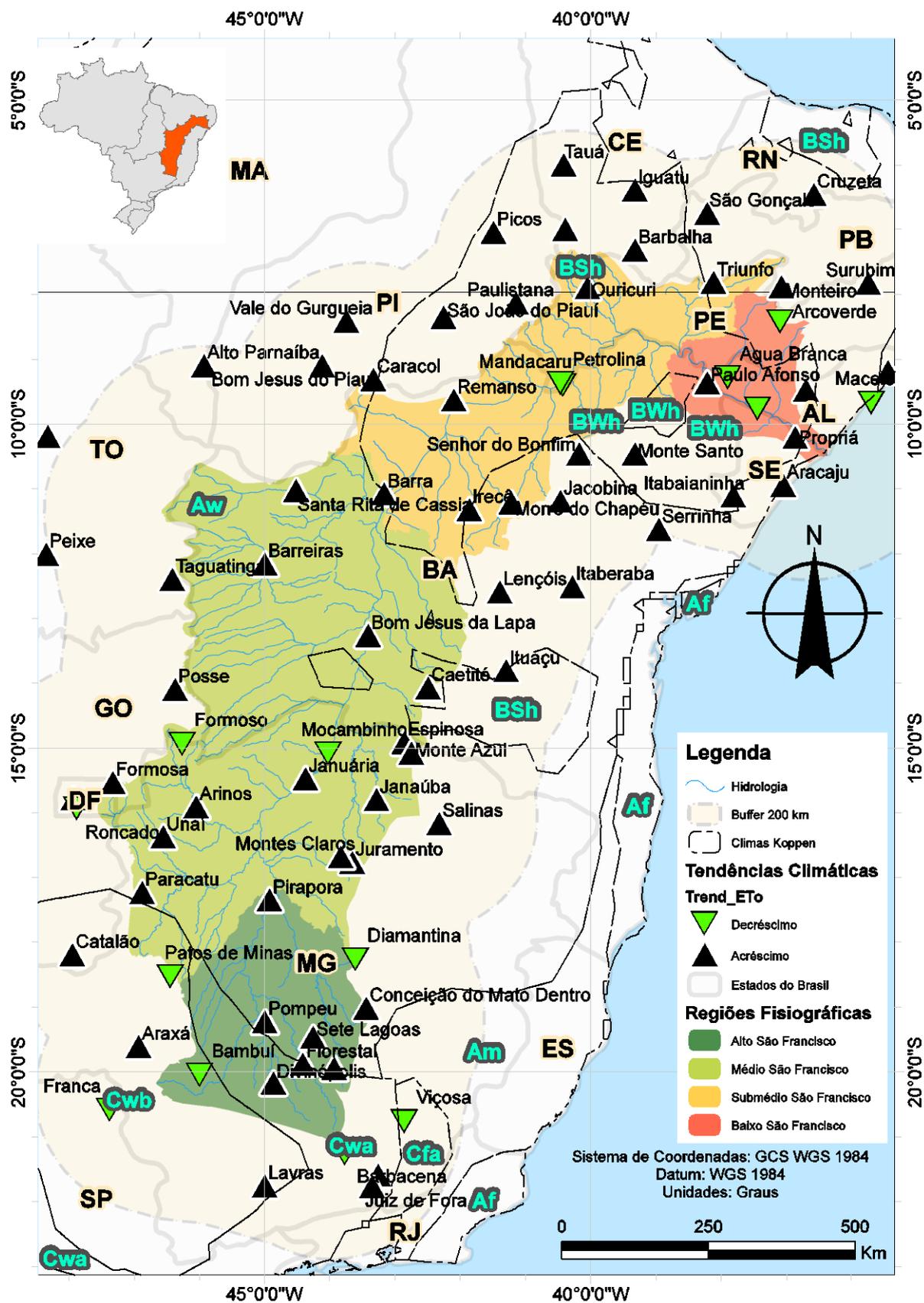


Figura 2. Distribuição espacial das tendências da ET0 na bacia do rio São Francisco.

Uma análise de distribuição de frequência das principais variáveis meteorológicas contemplando toda a bacia é representada pela Figura 2. O cenário em toda a bacia do rio São Francisco é de aumento dos valores das variáveis climáticas, dado importância principalmente a evapotranspiração (85% da área bacia com acréscimos, (Figura 3) e a precipitação (52% área da bacia com decréscimo) ambas determinantes no balanço hídrico, já que representam a entrada e saída de água no sistema solo-planta-atmosfera. Para as demais variáveis, mais da metade da bacia tem apresentado acréscimos do saldo de radiação, déficit de pressão de vapor d'água e temperatura do ar. A velocidade do vento é a única variável com maior percentual com decréscimo (55% da área da bacia).

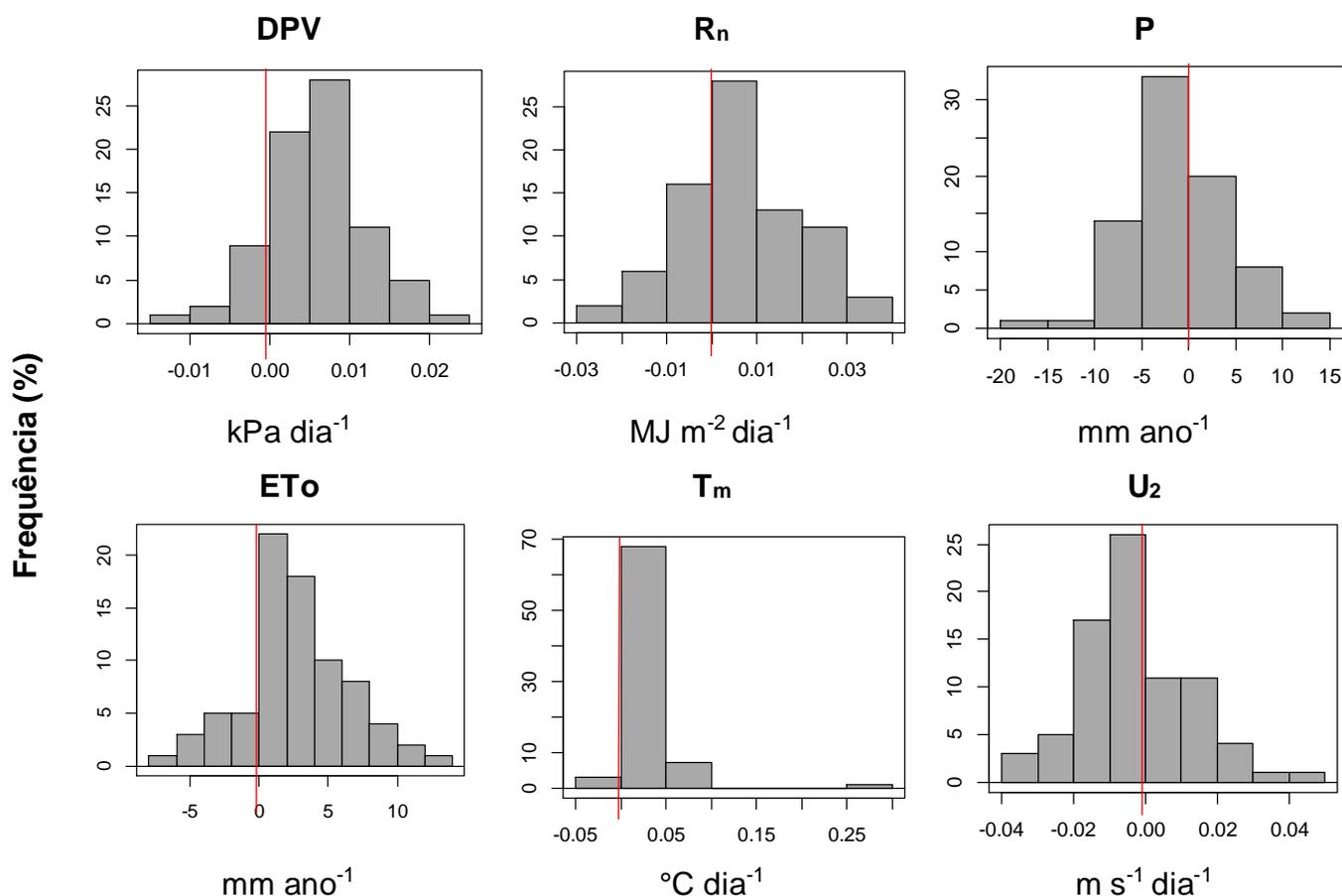


Figura 3. Distribuição de frequência para as tendências das variáveis meteorológicas em toda a bacia do rio São Francisco

Análise de sensibilidade e impactos das variáveis de entrada da ETo

A Tabela 2 apresenta a partição da contribuição das mesmas estações citadas na Tabela 1, representando também uma amplitude de resultados quanto a análise

de sensibilidade para cada termo da equação de Penman–Monteith FAO 56. Nas estações com reduções das taxas da ETo, principalmente nas estações de Água Branca e Arcoverde apresentando maior sensibilidade da pressão atual de vapor d'água (e_a) e isso proporcionou uma maior contribuição do termo aerodinâmico nessas estações. Para as estações com aumento das taxas da ETo o termo energético passa a ter maior contribuição, ao passo que, há a uma redução da participação da pressão atual de vapor d'água e uma contribuição positiva da pressão de saturação (e_s) e principalmente o saldo de radiação.

Conforme é sugerido por McCuen (1974), para regiões próximas ao oceano, a disponibilidade de vapor de água serve como barreira ao aumento das taxas de evaporação e, portanto, a variação no nível de umidade influencia no gradiente e na variação em taxas de evapotranspiração. Quanto menor a contribuição de e_a , maior o déficit de pressão de vapor d'água e maior será a ETo. O aumento da sensibilidade do saldo de radiação (R_n) em relação a contribuição da declividade da curva de pressão de vapor d'água, teve papel fundamental nas alterações no termo energético, ora contribuindo para a redução das taxas de ETo nas estações (a exemplo de Barbacena) onde houve decréscimos de R_n , ou aumentando, em conjunto com a temperatura do ar (a exemplo de Araxá).

Tabela 2. Sensibilidade dos termos e seus componentes das derivadas parciais

Estação	Termo energético				Termo aerodinâmico				
	Δ	R_n	u_2	ET_{TE}	Δ	e_s	e_a	u_2	ET_{TA}
	$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt}$	$\frac{dET_{TE}}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt}$	$\frac{dET_{TA}}{dt}$
	mm ano ⁻²								
Água Branca	-0,046	2,084	0,228	2,267	0,033	0,175	-7,596	-1,008	-8,396
Arcoverde	0,171	1,141	0,071	1,383	-0,156	1,114	-6,543	-0,445	-6,032
Araxá	0,866	0,371	-0,254	0,982	-0,521	4,141	1,311	1,674	6,605
Barbacena	0,373	-1,806	0,018	-1,414	-0,132	1,215	-0,899	-0,085	0,097
Barra	0,929	1,349	0,422	2,701	-1,032	3,962	1,255	-4,256	-0,071
Barbalha	0,931	1,157	0,386	2,476	-1,032	3,971	0,771	-3,879	-0,169
Belo Horizonte	0,328	-1,184	0,038	-0,818	-0,193	1,076	0,777	-0,266	1,395
Bom Jesus da Lapa	0,999	0,659	0,353	2,012	-0,760	2,792	-0,335	-3,311	-1,615

A distribuição da participação das variáveis meteorológicas em cada termo da equação de Penman-Monteith é dada pela Figura 4. Para o termo energético, as derivadas de R_n e Δ apresentam as maiores contribuições, visto que, Δ está em função

da temperatura do ar, e juntas, em linhas gerais, apresentam grande impacto no cálculo da ETo, dando inclusive embasamento para vários métodos de estimativa. O termo aerodinâmico, por teoria, é definido segundo a equação genérica de Slatyer-McIlroy (1961), baseando-se nas resistências da superfície e aerodinâmicas, e no déficit de pressão de vapor d'água. Tal relação é confirmada com o percentual majoritário da velocidade do vento dentro do termo aerodinâmico seguido das pressões atual e de saturação.

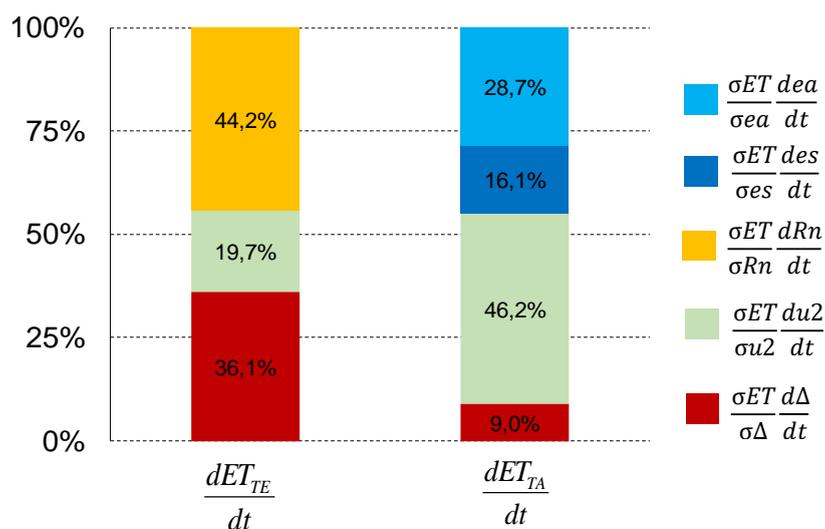


Figura 4. Percentuais de participação das variáveis meteorológicas nas derivadas parciais do termo energético e aerodinâmico para toda a bacia do Rio São Francisco.

A Tabela 3 apresenta a partição dos termos energético e aerodinâmico e seus respectivos componentes meteorológicos para toda a bacia do Rio São Francisco. Há uma predominância do termo energético sobre o termo aerodinâmico, ao passo que, ambos convergem no sentido de aumentar da evapotranspiração em todo o território da bacia.

O principal componente meteorológico que faz as taxas de variação da ETo dentro do termo aerodinâmico aumentar é o DPV, uma vez que, os outros componentes dentro desse termo, contribuirão de forma a reduzir a evapotranspiração. Em se tratando do termo energético, todos os componentes meteorológicos contribuem de forma a aumentar a ETo. Os resultados indicam um aumento nas taxas de variação na ordem de $2,424 \text{ mm ano}^{-2}$ em média em toda a bacia. Tais resultados, do ponto de vista climático são contrastantes, quando

comparados aqueles encontrados por Donohue et al. (2010), Tang et al. (2011) e Xie et al. (2013). Ambos os autores verificaram reduções nas taxas de evapotranspiração, tendo como fator de maior peso o termo aerodinâmico.

Em se tratando dos componentes propriamente ditos, a contribuição do vento no termo aerodinâmico seguiu a mesma tendência encontrada por esses autores, que é, a de contribuir de forma negativa nas variações da evapotranspiração ao longo de toda a série histórica. Em termos percentuais, em 81% do território da bacia, o termo energético prevalece sobre o termo aerodinâmico.

Tabela 3. Partição da sensibilidade em função dos termos energético e aerodinâmico da equação FAO 56 Penman-Monteith.

Termo Energético mm ano ⁻²			Termo Aerodinâmico mm ano ⁻²		
Declividade da curva de pressão saturação	Saldo de radiação	Velocidade do vento	Declividade da curva de pressão saturação	Velocidade do vento	Déficit de pressão de vapor d'água
$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt}$	$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{dt}$ $\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt}$
0,638	0,592	0,064	-0,495	-0,500	2,341 -0,215
			2,126		
1,294			1,130		
2,424					

A Figura 5 representa a distribuição de frequência das derivadas parciais para toda a bacia do Rio São Francisco. Confirmando que foi observado na Tabela 3, o termo energético representa maior peso no cálculo da evapotranspiração. O saldo de radiação (Figura 5A) em 72% da bacia do Rio São Francisco contribui de forma a aumentar as taxas de evapotranspiração. Seguindo essa mesma tendência, tem-se a temperatura do ar (Figura 5B) que em 97% da área contribui para aumento das taxas de evapotranspiração. Por outro lado, quando se trata do termo aerodinâmico, os papéis se invertem. Conforme é visto nas Figuras 5C e 5D respectivamente, em 56% das localidades a velocidade do vento atua de maneira a reduzir das taxas da evapotranspiração, seguido da pressão atual de vapor d'água, que também apresenta contribuição negativa no cálculo da evapotranspiração, isso foi verificado em 83% das localidades estudadas.

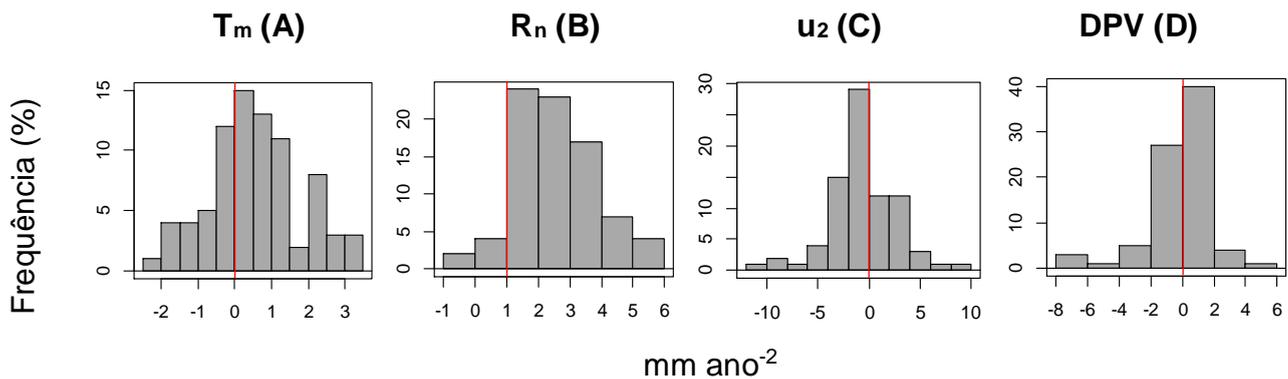


Figura 5. Distribuição de frequência das derivadas parciais das variáveis meteorológicas na bacia do Rio São Francisco.

Partição da contribuição das variáveis de entrada no cálculo da ETo

A Figura 6, apresenta a distribuição espacial das atribuições percentuais das variáveis de entrada no cálculo da ETo em escalas mensal e diária. Na Figura 6A a radiação solar e a umidade relativa do ar apresentaram as maiores contribuições no cômputo da ETo em escala mensal.

Face à grande influência do déficit de vapor d'água, a umidade relativa do ar em escala mensal apresenta uma maior contribuição na ETo, isso se observa principalmente nas estações de Água Branca e Arcoverde, onde foi verificado um acréscimo da UR e redução do déficit de pressão de vapor d'água, proporcionando assim decréscimos da ETo no tempo (Tabela 1). De maneira análoga, nas estações de Araxá e Aracaju, a redução da umidade ao longo dos anos permitiu o aumento significativo da ETo.

A espacialização diária das atribuições percentuais é observada na Figura 6B. A temperatura do ar e a radiação solar, juntas representaram mais de 70% da sensibilidade causada no cômputo da ETo. Diferentemente do que acontece em escala mensal, a umidade deixa de ter grande papel nos percentuais e dá lugar agora a temperatura do ar. Na região do médio São Francisco, a velocidade do vento entra como fator chave com altos percentuais (na ordem de 30%) chegando a ter mesma relevância da radiação solar, e juntas tem um percentual majoritário de 65%, nas estações de Barreiras, Barra, Bom Jesus da Lapa.

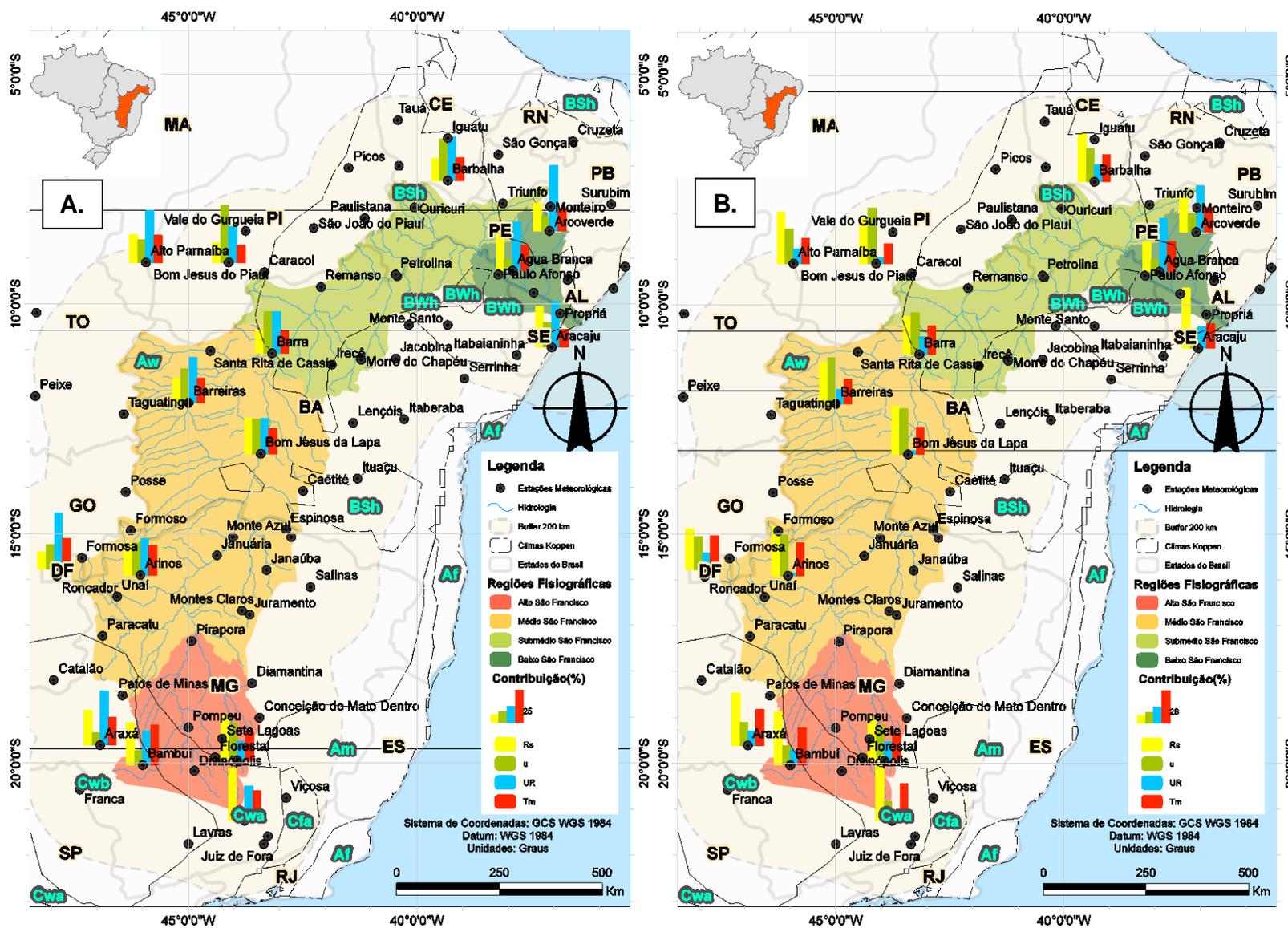


Figura 6. Atribuição percentual do impacto mensal (A) e diário (B) das variáveis de entrada no cálculo da ET_o.

Tanto em escala mensal ou diária a umidade relativa do ar tem maior atribuição sobre a ETo nas estações de Arcoverde e Água Branca, nestas estações tais variáveis têm grande influência, pois proporcionaram reduções nas taxas de ETo diárias e mensais. Em escala diária a radiação solar passar a ter maior impacto no cálculo da ETo devido a não variação causada pela média dos valores diários utilizados no cômputo mensal da ETo, atribuindo assim um dia de referência (15º dia de cada mês) como sendo aquele representativo para todos os dias do mês, conforme é proposto por Allen, (1998). Devido a isso, as médias provocam uma suavização dos valores de R_s e R_n para períodos mensais, isso não acontece para às demais variáveis, visto que, não há uma variação brusca para o DPV em escala diária como ocorre com a radiação solar.

CONCLUSÕES

O cenário em toda a bacia do rio São Francisco é de aumento dos valores das variáveis climáticas, dado importância principalmente a evapotranspiração com 85% da área bacia com acréscimos, e a precipitação com 52% área da bacia com decréscimo.

A velocidade do vento é a variável meteorológica que mais influencia diretamente na sensibilidade do termo aerodinâmico. Em função principalmente do poder de advecção, quanto maior a contribuição da velocidade do vento no termo energético, menor a influência do termo aerodinâmico no cálculo da ETo.

O termo energético, representado principalmente pela temperatura do ar e do saldo de radiação, se sobressai ao termo aerodinâmico em 81% do território da bacia. Embora, o termo aerodinâmico tem participação importante nas determinações da ETo, devido a presença da velocidade do vento atuando como fator atenuador da influência do termo aerodinâmico no cálculo da evapotranspiração de referência.

O déficit de pressão de vapor d'água em escala mensal é a variável meteorológica de maior peso sobre a ETo. No computo final da ETo, há uma diferença marcante quanto a influências de variáveis meteorológicas. Em escala mensal, a umidade relativa do ar, tem maior contribuição, seguido da radiação solar. Em escala diária os papéis se invertem, a radiação solar passa a ter impacto maior sobre o cálculo da ETo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-ANSARI, N., E. SALAMEH, H. AL-OMARI, Analysis of rainfall in the badia region, Jordan. **Research Paper** No. 1, Al-al-Bayt University, Jordan, 1999.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56. Rome: FAO, 1998. 310p.
- ALLEN, R.G., I.A. WALTER, R.L. ELLIOTT, T.A. HOWELL., D. ITENFISU. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. 1st Edn. **American Society of Civil Engineers Reston**, America, ISBN-10: 078440805X, pp: 216, 2005.
- ALLEN, R. G. **Manual REF-ET** version Windows 4.1. Available online at www.kimberly.idaho.edu, 2015.
- AMIRATAEE, B., MONTASERI, M. & SANIKHANI, H. The analysis of trend variations of reference evapotranspiration via eliminating the significance effect of all autocorrelation coefficients. **Theoretical and Applied Climatology**. 126: 131, 2016.
- CHEN, S. B., LIU, Y.F., THOMAS, A. Climatic change on the Tibetan plateau: potential evapotranspiration trends from 1961–2000. **Climatic Change** 76:291–319, 2006.
- CHEN, H., GUO, S., XU, C.Y., SINGH, V.P. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. **Journal of Hydrology** 344:171–184, 2007.
- COHEN, S., G. STANHILL. Contemporary climate change in Jordan Valley. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 35: 1051-1058, 1996.
- COLEMAN, G., DECOURSEY, D.G. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models. **Water Resource Research** 12 (5), 873–879. 1976.
- DONOHUE, R. J., McVICAR, T. R., Roderick, M. L. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. **Journal of Hydrology**, 386, 186–197, 2010.
- GADGIL, A., DHORDE, A. Temperature trends in twentieth century at Pune, India. **Atmospheric Environment**, 39:6550– 6556, 2005.
- GELLENS, D. Trend and correlation analysis of k-day extreme precipitation over Belgium. **Theoretical and Applied Climatology**, 66:117–129, 2000.
- HAKAN, A., K. SAVAS, S. OSMAN. Trend analysis of hydrometeorological parameters in climate regions of Turkey. **Conference prerelease, BALWOIS 2010-Ohrid**, Republic of Macedonia, 2010.
- HIRSCH, R. M., SLACK, J. R., SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water Resources Management** 18:107–121, 1982.

KAHYA, E., KALAYCI, S. Trend analysis of streamflow in Turkey. **Journal Hydrology** 289:128–144, 2004.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**, 4th ed. Charles Griffin, London, 1975.

KÖPPEN, W., GEIGER, R. Überarbeitete Neuauflage von / Klima der Erde. (Wandkarte 1:16 Mill.). – **KlettPerthes**, Gotha, 1961.

KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B., RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorology. Z.**, 15, 259-263, 2006.

LIU, X., ZHANG, D. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: The roles of changing wind speed and surface air temperature. **Hydrology Process**. 27, 3941–3948, 2013.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. **Econometrica** 13:245–259, 1945.

McCUEN, R. H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evapotranspiration. **Water Resources. Bull.**, 10, 3,486–498. 1974.

NORRIS, J.R, WILD, M. Trends in aerosol radiative effects over China and Japan inferred from observed cloud cover, solar “dimming,” and solar “brightening”. **Journal of Geophysical Research** 114, 2009.

NOVOTNY, E. V., STEFAN, H. G. Stream flow in Minnesota: indicator of climate change. **Journal Hydrology** 334:319–333, 2007.

OLIVER, M. A. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems." **International Journal of Geographic Information Systems** 4: 313–332, 1990.

PAPAIOANNOU, G., KITSARA, G., ATHANASATOS, S. Impact of global dimming and brightening on reference evapotranspiration in Greece. **Journal of Geophysical Research** 116: D09107, 2011.

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

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

RODERICK, M.L., ROTSTAYN, L.D., FARQUHAR, G.D., HOBBS, M.T. On the attribution of changing pan evaporation. **Geophysical Research Letters** 34, 2007.

ROYLE, A. G., CLAUSEN, F. L., FREDERIKSEN, P. "Practical Universal Kriging and Automatic Contouring." **Geoprocessing** 1: 377–394. 1981.

SAXTON, K. E. Sensitivity Analysis of the Combination Evapotranspiration Equation. **Agricultural Meteorology**, 15: 343-353, 1975.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal American Statistical Association**, 63:1379–1389, 1968.

SLATYER, R.O., McLLROY, I.C. **Practical Micrometeorology**. CSIRO, Melbourne, 310 pp, 1961.

TABARI, H., HOSSEINZADEH TALAEI, P. Moisture index for Iran: spatial and temporal analyses. **Global Planet Change** 100:11–19, 2013.

TALAEI, P. H., SOME'S, B. S., ARDAKAN, S. A. Time trend and change point of reference evapotranspiration over Iran. **Theory Applied Climatology**, 116-639, 2014.

TANG, B., TONG, L., KANG, S., ZHANG, L. Impacts of climate variability on reference evapotranspiration over 58 years in the Haihe river basin of north China. **Agricultural Water Management** 98, 1660–1670, 2011.

THORNTHWAITE, C. W., HOLZMAN, B. The determination of evaporation from land and water surfaces. **Monthly Weather Review** 67(1): 4-11, 1939.

VAREJÃO–SILVA, M. A. **METEOROLOGIA. E. CLIMATOLOGIA. VERSÃO DIGITAL 2**. Recife, Pernambuco. Brasil. Março de 2006.

XIE, H., ZHU, X. Reference evapotranspiration trends and their sensitivity to climatic change on the Tibetan Plateau (1970– 2009). **Hydrology Process**. 27, 3685–3693, 2013.

XIE, H. ZHU, X., YUAN, D. Pan evaporation modelling and changing attribution analysis on the Tibetan Plateau (1970–2012). **Hydrology Process**. 29, 2164–2177, 2015.

WALLER, P., YITAYEW, M. **Irrigation and Drainage Engineering**. Springer International Publishing Switzerland. DOI 10.1007/978-3-319-05699-9. 2016.

WU, S. H., YANG, Q. Y., ZHENG, D. An index system for boundaries of eco-geographical regions of China. **Progress in Geography** 21: 302–310, (in Chinese), 2002.

YE, X., LI, X., LIU, J., XU, C., ZHANG, Q. Variation of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in the Poyang Lake catchment, China. **Hydrology Process**. 28, 6151–6162, 2014.

YUE, S., WANG, C. Y. The Mann–Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. **Water Resources Management**, 18:201–218, 2004.

ZHANG, Q., LIU, C., XU, C. Y., XU, Y. P., JIANG, T. Observed trends of water level and streamflow during past 100 years in the Yangtze River basin, China. **Journal Hydrology**, 324:255–265, 2006.

ZHANG S. H., LIU, S.X., MO, X. G, SHU, C., SUN, Y., ZHANG, C. Assessing the impact of climate change on potential evapotranspiration in Aksu River basin. **Journal of Geographical Science** 21: 609–620, 2011.

ZHAO, L., XIA, J., SOBKOWIAK, L., LI, Z. Climatic Characteristics of Reference Evapotranspiration in the Hai River Basin and Their Attribution. **Water**, 6, 1482-1499, 2014.

ANEXOS

ANEXO A ----- CAPÍTULO 1 e 2

Tabela 1. Estações meteorológicas selecionadas pertencentes à rede oficial do INMET. *OMM – Organização Mundial de Meteorologia*

Código OMM	Estação	Período	UF	Latitude (Graus)	Longitude (Graus)	Altitude (Metros)
82989	Água Branca	1977 - 2015	AL	-9,28	-37,90	605,34
82970	Alto Parnaíba	1976 - 2015	MA	-9,10	-45,93	285,05
83096	Aracaju	1961 - 2015	SE	-10,95	-37,05	4,72
83442	Araçuaí	1961 - 2015	MG	-16,83	-42,05	289,00
83579	Araxá	1963 - 2015	MG	-19,61	-46,93	1023,61
82890	Arcoverde	1973 - 2015	PE	-8,42	-37,09	680,70
83384	Arinos	1976 - 2015	MG	-15,91	-46,05	519,00
83582	Bambuí	1961 - 2015	MG	-20,04	-46,00	661,27
83689	Barbacena	1961 - 2015	MG	-21,26	-43,77	1126,00
82784	Barbalha	1973 - 2015	CE	-7,32	-39,33	409,03
83179	Barra	1977 - 2015	BA	-11,08	-43,17	401,58
83236	Barreiras	1961 - 2015	BA	-12,16	-45,00	439,29
-	Bebedouro	1975 - 2015	PE	-9,15	-40,37	365,30
83587	Belo Horizonte	1961 - 2015	MG	-19,94	-43,93	915,00
83533	Bom Despacho	1981 - 2015	MG	-19,68	-45,36	695,00
83288	Bom Jesus da Lapa	1969 - 2015	BA	-13,27	-43,42	439,96
82975	Bom Jesus do Piauí	1971 - 2015	PI	-9,10	-44,12	331,74
83377	Brasília	1961 - 2015	DF	-15,78	-47,93	1159,54
82886	Cabrobó	1961 - 2015	PE	-8,52	-39,33	341,46
83339	Caetitê	1961 - 2015	BA	-14,08	-42,49	882,47
82795	Campina Grande	1961 - 2015	PB	-7,24	-35,88	547,56
82777	Campos Sales	1962 - 2015	CE	-7,00	-40,39	583,50
82976	Caracol	1975 - 2015	PI	-9,31	-43,33	522,77
83408	Caririnha	1977 - 2015	BA	-14,28	-43,76	450,18

83526	Catalão	1961 - 2015	GO	-18,19	-47,95	840,47
83192	Cipó	1961 - 2015	BA	-11,08	-38,51	145,31
83589	Conceição do Mato Dentro	1961 - 2015	MG	-19,02	-43,44	652,00
83037	Coronel Pacheco	1966 - 2015	MG	-21,59	-43,26	435,00
83286	Correntina	1977 - 2015	BA	-13,34	-44,63	549,47
82693	Cruzeta	1962 - 2015	RN	-6,46	-36,58	226,46
83536	Curvelo	1961 - 2015	MG	-18,76	-44,45	672,00
83538	Diamantina	1961 - 2015	MG	-18,26	-43,61	1296,12
83635	Divinópolis	1995 - 2015	MG	-20,17	-44,87	788,35
83338	Espinosa	1974 - 2015	MG	-14,92	-42,86	569,64
82887	Floresta	1961 - 2015	PE	-8,61	-38,57	309,73
83581	Florestal	1961 - 2015	MG	-19,88	-44,42	753,00
83379	Formosa	1961 - 2015	GO	-15,53	-47,33	935,19
83334	Formoso	1976 - 2015	MG	-14,93	-46,26	840,00
83630	Franca	1961 - 2015	SP	-20,58	-47,38	1026,20
82893	Garanhuns	1963 - 2015	PE	-8,89	-36,52	822,76
83632	Ibirité	1961 - 2015	MG	-20,02	-44,05	814,54
82686	Iguatu	1961 - 2015	CE	-6,39	-39,33	217,67
83522	Ipameri	1977 - 2015	GO	-17,71	-48,16	772,99
83182	Irecê	1973 - 2015	BA	-11,33	-41,87	747,16
83195	Itabaianinha	1963 - 2015	SE	-11,12	-37,82	208,00
83244	Itaberaba	1961 - 2015	BA	-12,52	-40,28	249,89
83488	Itamarandiba	1962 - 2015	MG	-17,85	-42,86	1097,00
83292	Ituaçu	1977 - 2015	BA	-13,81	-41,30	531,43
83186	Jacobina	1961 - 2015	BA	-11,19	-40,47	484,74
83395	Janaúba	1977 - 2015	MG	-15,80	-43,29	516,00
83386	Januária	1961 - 2015	MG	-15,48	-44,38	473,71
83591	João Monlevade	1961 - 2015	MG	-19,83	-43,12	859,84
83481	João Pinheiro	1961 - 2015	MG	-17,70	-46,17	760,36
83692	Juiz de Fora	1961 - 2015	MG	-21,77	-43,35	939,96
83452	Juramento	1987 - 2015	MG	-16,77	-43,66	648,00
83687	Lavras	1961 - 2015	MG	-21,76	-45,00	918,84
83023	Lavras-ESAL	1961 - 2015	MG	-21,23	-45,00	842,42
83242	Lençóis	1961 - 2015	BA	-12,59	-41,39	438,74
82994	Maceió	1961 - 2015	AL	-9,67	-35,70	64,50
-	Mandacaru	1975 - 2015	BA	-9,40	-40,43	356,20
83389	Mocimbinho	1976 - 2015	MG	-15,08	-44,03	452,00
83388	Monte Azul	1974 - 2015	MG	-15,08	-42,75	603,63
83090	Monte Santo	1961 - 2015	BA	-10,46	-39,33	464,60
82792	Monteiro	1962 - 2015	PB	-7,88	-37,08	603,66
83437	Montes Claros	1961 - 2015	MG	-16,68	-43,83	646,29
83184	Morro do Chapéu	1961 - 2015	BA	-11,22	-41,22	1003,27
83637	Oliveira	1961 - 2015	MG	-20,68	-44,82	966,50
82753	Ouricuri	1975 - 2015	PE	-7,90	-40,05	459,28
83033	Palmas	1993 - 2015	TO	-10,19	-48,33	280,00

82992	Palmeira dos Índios	1961 - 2015	AL	-9,48	-36,70	274,90
82990	Pão de Açúcar	1977 - 2015	AL	-9,76	-37,44	19,10
83479	Paracatu	1973 - 2015	MG	-17,23	-46,88	712,00
83531	Patos de Minas	1961 - 2015	MG	-18,53	-46,44	940,28
82882	Paulistana	1975 - 2015	PI	-8,13	-41,14	374,22
82986	Paulo Afonso	1962 - 2015	BA	-9,37	-38,22	252,69
83228	Peixe	1975 - 2015	TO	-12,01	-48,35	242,49
82983	Petrolina	1962 - 2015	PE	-9,37	-40,47	370,46
82780	Picos	1965 - 2015	PI	-7,04	-41,49	207,93
83483	Pirapora	1961 - 2015	MG	-17,35	-44,93	505,24
83570	Pompeu	1973 - 2015	MG	-19,23	-45,00	690,91
82996	Porto de Pedras	1961 - 2015	AL	-9,19	-35,44	50,02
83332	Posse	1975 - 2015	GO	-14,10	-46,38	825,64
83097	Propriá	1963 - 2015	SE	-10,21	-36,87	19,92
82979	Remanso	1961 - 2015	BA	-9,63	-42,10	400,51
83373	Roncador	1994 - 2015	DF	-15,93	-47,88	1100,57
83441	Salinas	1961 - 2015	MG	-16,17	-42,33	471,32
83076	Santa Rita de Cassia	1961 - 2015	BA	-11,03	-44,52	450,30
82689	São Gonçalo	1961 - 2015	PB	-6,75	-38,22	233,06
83688	São João Del Rei	1961 - 2015	MG	-21,33	-44,28	991,00
83088	Senhor do Bonfim	1977 - 2015	BA	-10,46	-40,18	558,24
83190	Serrinha	1961 - 2015	BA	-11,63	-38,96	359,63
83586	Sete Lagoas	1961 - 2015	MG	-19,47	-44,26	732,00
82797	Surubim	1961 - 2015	PE	-7,83	-35,74	418,32
82879	São João do Piauí	1975 - 2015	PI	-8,35	-42,26	235,33
83235	Táguatinga	1961 - 2015	TO	-12,40	-46,42	603,59
82683	Tauá	1964 - 2015	CE	-6,00	-40,42	398,77
82789	Triunfo	1961 - 2015	PE	-7,82	-38,12	1105,00
83428	Unai	1978 - 2015	MG	-16,38	-46,56	460,00
83594	Usiminas	1961 - 2015	MG	-19,49	-42,53	298,60
82870	Vale do Gurgueia	1979 - 2015	PI	-8,42	-43,74	265,00
83642	Viçosa	1961 - 2015	MG	-20,76	-42,86	689,73

ANEXO B ----- CAPÍTULO 1 e 2

Determinação da evapotranspiração de Referência

a) Distância relativa Terra-Sol

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

em que,

dr – distância relativa Terra-Sol;

J – dia juliano.

b) Declinação solar

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (2)$$

em que,

δ – declinação solar (radianos);
 J – dia juliano

c) Ângulo horário ao nascer e ao pôr do sol

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (3)$$

em que,

ω_s – ângulo horário ao nascer e ao pôr do sol;
 δ – declinação solar (radianos);
 φ – latitude do local (radianos);

d) Fotoperíodo

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s \quad (4)$$

em que,

N – Fotoperíodo (h);
 ω_s – ângulo horário ao nascer e ao pôr do sol.

e) Radiação solar extraterrestre

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} \cdot G_{SC} \cdot dr \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (5)$$

em que,

dr – distância relativa Terra-Sol;
 δ – declinação solar (radianos);
 ω_s – ângulo horário ao nascer e ao pôr do sol;
 φ – latitude do local (radianos);
 G_{SC} – constante solar ($0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
 R_a – radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

f) radiação solar global

$$R_s = \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (6)$$

em que,

R_s – radiação solar global ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

a – coeficiente angular da reta (0.25);

b – coeficiente linear da reta (0.50);

n – insolação (h);

N – fotoperíodo (h);

R_a – radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

g) Radiação solar em dia de céu claro

$$R_{so} = \left(0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot A \right) \cdot R_a \quad (7)$$

em que,

R_{so} – radiação solar em dia de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

A – altitude (m);

R_a – radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

h) Saldo de radiação de ondas curtas

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (8)$$

em que,

R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

α – albedo da superfície;

R_s – radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

i) saldo de radiação de ondas longas

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] \cdot \left(0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a} \right) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (9)$$

em que,

R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

σ – constante de Stefan-Boltzmann ($4,03 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

T_{\max} – temperatura máxima do ar (K, sendo $\text{K} = \text{°C} + 273,16$);

T_{\min} – temperatura mínima do ar (K, sendo $\text{K} = \text{°C} + 273,16$);

e_a – pressão atual de vapor d'água do ar atmosférico (kPa);

R_s – radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

R_{so} – radiação solar em dia de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

j) Saldo de radiação

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (10)$$

em que,

R_n – saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

k) Pressão atmosférica

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot A}{293} \right)^{5,26} \quad (11)$$

l) Constante psicrométrica

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} \therefore \gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P \quad (12)$$

m) Pressão atual de vapor d'água

$$e_a = \frac{UR}{100} \cdot \left[\frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2} \right] \quad (13)$$

$$e^\circ(T_{\max}) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{\max}}{T_{\max} + 273,3}\right) \quad (14)$$

$$e^\circ(T_{\min}) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{\min}}{T_{\min} + 273,3}\right) \quad (15)$$

n) Pressão de saturação de vapor d'água

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max})}{2} + \frac{e^\circ(T_{\min})}{2} \quad (16)$$

o) Declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 273,3}\right) \right]}{(T + 273,3)^2} \quad (17)$$

p) velocidade do vento à 2 metros de altura

$$u_2 = u_z \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)} \quad (18)$$

em que,

P – pressão atmosférica (kPa);

λ – calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹);

γ – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹);

e_a – pressão atual de vapor d'água (kPa);

e_s – pressão de saturação de vapor d'água (kPa);

C_p – calor específico do ar (MJ kg⁻¹ °C⁻¹);

\mathcal{E} – razão molecular entre do vapor d'água e do ar seco na atmosfera =0,622;

A – altitude (m);

Z – altura do anemômetro a partir da superfície do solo (m);

T_a – temperatura média do ar (°C);

Δ – declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água (kPa°C⁻¹);

u_2 – velocidade do vento à 2m de altura (m s⁻¹);

T_{\min} – temperatura mínima do ar (°C);

T_{\max} – temperatura máxima do ar (°C);

UR – umidade relativa média do ar (%).

ANEXO C ----- CAPITULO 2

Determinação das derivadas parciais

$$ET_o = ET_{TE} + ET_{TA} \quad (1)$$

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} + \frac{\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

1. Derivação

A derivada de uma função $y = f(x)$ num ponto $x = x_0$, é igual ao valor da tangente trigonométrica do ângulo formado pela tangente geométrica à curva representativa de $y=f(x)$, no ponto $x = x_0$, ou seja, a derivada é o coeficiente angular da reta tangente ao gráfico da função no ponto x_0 , Equação 3.

$$\frac{df}{dx}(x_o) = f'(x_o) \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_o} \frac{f(x) - f(x_o)}{x - x_o} \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_o} \frac{f(x_o + h) - f(x_o)}{h} \quad (3)$$

A Equação 1 dispõe de variáveis que podem ser observadas ora no numerador, ora no denominador ou em ambos, logo, observando ainda a Equação 1, verifica-se que é possível aplicar as seguintes regras de derivação:

q) Regra do quociente

Quando a variável de entrada aparecer tanto no numerador quando no denominador da Equação 31, aplica-se a regra observada na Equação 4.

$$z(x) = \frac{f(x)}{g(x)} = z'(x) = \frac{f'(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot g'(x)}{[g(x)]^2} \quad (4)$$

r) Regra básica de derivação

Quando a variável de entrada aparecer apenas no numerador da Equação 31, aplica-se a regra observada na Equação 5.

$$z(x) = f'(x) \quad (5)$$

2. Termo Energético (ET_{TE})

No termo energético, temos as seguintes variáveis de entrada: Saldo de Radiação (R_n), Temperatura média do ar (T_a), e velocidade do vento (u_2).

$$ET_{TE} = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (6)$$

Como Δ está em função da temperatura, aplica-se uma segunda derivada. Sendo assim, o termo energético será composto pelo somatório de três derivações:

$$\frac{ET_{TE}}{dt} = \frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TE}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} + \frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} \quad (7)$$

d) Declividade da curva de pressão de saturação

Em se tratando apenas do termo energético a temperatura do ar aparece como variável dependente tanto no numerador quando denominador da Equação 6, logo a regra de derivação a ser utilizada é dada pela Equação 4.

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (8)$$

Assim, temos as funções $f(x)$ e $g(x)$ definidas por:

$$f(x) = 0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \quad (9)$$

$$g(x) = \Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2) \quad (10)$$

Derivando $f(x)$ e $g(x)$ em função de Δ , temos:

$$f'(x) = 0,408 \cdot R_n \quad (11)$$

$$g'(x) = 1 \quad (12)$$

Aplicando a regra de derivação da Equação 4, e substituindo suas respectivas equações $f'(x)$, $f(x)$, $g'(x)$ e $g(x)$, temos:

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{[0,408 \cdot R_n] \cdot [\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)] - [0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G)]}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \quad (13)$$

Simplificando a Equação 13, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{0,408 \cdot R_n \cdot \Delta - 0,408 \cdot R_n \cdot \Delta + R_n \cdot \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{R_n \cdot \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2) \cdot 0,408}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (15)$$

e) **Saldo de radiação**

O saldo de radiação aparece como variável dependente apenas no numerador da Equação 6, logo a regra de derivação básica utilizada será aquela dada pela Equação 5.

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} \quad (16)$$

Se $f(x)$ é dada por:

$$f(x) = 0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \quad (17)$$

A função derivada de $f(x)$ será:

$$f'(x) = 0,408 \cdot \Delta \quad (18)$$

Substituindo a função $f'(x)$ regra de derivação da Equação 5 temos:

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} = \frac{0,408 \cdot \Delta}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \frac{dR_n}{dt} \quad (19)$$

f) Velocidade do vento

A velocidade do vento como variável de entrada, como variável dependente tanto no numerado quanto denominador da Equação 6, logo a regra de derivação a ser utilizada é dada pela Equação 4.

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} \quad (20)$$

Tendo as funções $f(x)$ e $g(x)$ definidas como:

$$f(x) = 0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \quad (21)$$

$$g(x) = \Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2) \quad (22)$$

Assim, na função $f(x)$ nenhuma variável depende de u_2 , logo sua derivada zero.

$$f'(x) = 0 \quad (23)$$

A função derivada de $g(x)$ é:

$$g'(x) = \gamma \cdot 0,34 \quad (24)$$

Substituindo as funções $f(x)$, $f'(x)$, $g(x)$ e $g'(x)$ regra de derivação da Equação 4, temos:

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} = \frac{[0] \cdot [\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)] - [0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G)] \cdot [\gamma \cdot 0,34]}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \quad (25)$$

$$\frac{\partial ET_{TE}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} = - \frac{0,13872 \cdot \Delta \cdot \gamma \cdot R_n}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \frac{du_2}{dt} \quad (26)$$

3. Termo Aerodinâmico (ET_{TA})

No termo aerodinâmico, temos as seguintes variáveis de entrada: Temperatura média do ar (T_a), pressão de saturação do vapor d'água (e_s), pressão atual do vapor d'água (e_a) e velocidade do vento (u_2).

$$ET_{TA} = \frac{\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (27)$$

Uma vez que Δ , e e_s , estão em função da temperatura do ar, aplica-se uma segunda derivada nos seus respectivos termos. Sendo assim, o termo energético será composto pela de quatro derivações:

$$\frac{ET_{TA}}{dt} = \frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} + \frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} \quad (28)$$

e) Declividade da curva de pressão de saturação

Em se tratando apenas do termo energético a temperatura do ar aparece como variável dependente tanto no numerador quanto denominador da Equação 27, logo a regra de derivação a ser utilizada é dada pela Equação 4.

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (29)$$

As funções $f(x)$ e $g(x)$ são dadas pelas Equações 30 e 31:

$$f(x) = \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \quad (30)$$

$$g(x) = \Delta + \gamma(1 + 0,34u_2) \quad (31)$$

Sendo assim, as derivadas de $f(x)$ e $g(x)$ são representadas pelas Equações 32 e 33.

$$f'(x) = 0 \quad (32)$$

$$g'(x) = 1 \quad (33)$$

Substituindo as funções $f(x)$, $f'(x)$, $g(x)$ e $g'(x)$ no regra de derivação da Equação 4, temos:

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{[0] \cdot [\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)] - [\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 (e_s - e_a)] \cdot [1]}{[\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)]^2} \quad (34)$$

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = - \frac{\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{[\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)]^2} \frac{d\Delta}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (35)$$

f) Pressão de saturação do vapor d'água

A pressão de saturação do vapor d'água aparece como variável dependente no denominador da Equação 27, logo a regra de derivação a ser utilizada é dada pela Equação 5.

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{T_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (36)$$

A função f(x) é dada pela Equação 37.

$$f(x) = \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \quad (37)$$

A derivada da função f(x) é:

$$f(x) = \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \quad (38)$$

Substituindo a função f'(x) na regra de derivação da Equação 5, temos:

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_s} \frac{de_s}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} = \frac{\gamma \cdot u_2 \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \frac{de_s}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} \quad (39)$$

g) Pressão atual do vapor d'água

Tendo a Pressão atual do vapor d'água em função da temperatura do ar, aparece como variável dependente apenas no numerador da Equação 27. Logo, a regra de derivação a ser utilizada é dada pela Equação 5.

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} \quad (40)$$

A função f(x) é dada pela Equação 41.

$$f(x) = \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \quad (41)$$

A derivada da função $f(x)$ é:

$$f'(x) = - \left[\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \right] \quad (42)$$

Substituindo a função $f'(x)$ na regra de derivação da Equação 5, temos:

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} = - \frac{\gamma \cdot u_2 \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \frac{de_a}{dt} \quad (43)$$

h) Velocidade do vento

Com a velocidade do vento como parâmetro de entrada, aparece como variável dependente tanto no numerador quanto denominador da Equação 27. Logo, a regra de derivação a ser utilizada é dada pela Equação 4.

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} \quad (44)$$

As funções $f(x)$ e $g(x)$ são dadas pelas Equações 45 e 46:

$$f(x) = \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \quad (45)$$

$$g(x) = \Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2) \quad (46)$$

Sendo assim, as derivadas de $f(x)$ e $g(x)$ são representadas pelas Equações 47 e 48.

$$f'(x) = \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \quad (47)$$

$$g'(x) = 0,34 \cdot \gamma \quad (48)$$

Substituindo as funções $f(x)$, $f'(x)$, $g(x)$ e $g'(x)$ na regra de derivação da Equação 4, temos:

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} = \frac{\left[\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right] \cdot [\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)] - \left[\gamma \cdot \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \right] \cdot [0,34 \cdot \gamma]}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \quad (49)$$

Reorganizando e simplificando os termos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} &= \frac{\left\{ \left[\Delta \cdot \gamma \cdot \left[\left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right] \right] + \left[\gamma \cdot \gamma \cdot \left[\left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right] \right] + \left[\gamma \cdot 0,34 \cdot u_2 \right] \cdot \gamma \cdot \left[\left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right] \right\}}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \\ &= \frac{\left\{ \left[\Delta \cdot \gamma \cdot \left[\left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right] \right] + \left[\gamma \cdot \gamma \cdot \left[\left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right] \right] \right\}}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \end{aligned} \quad (50)$$

Colocando os termos evidência, temos:

$$\frac{\partial ET_{TA}}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} = \frac{\gamma \cdot (\Delta + \gamma) \cdot \left[\left(\frac{900}{T_a + 273} \right) \cdot (e_s - e_a) \right]}{[\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)]^2} \frac{du_2}{dt} \quad (51)$$