

ANÁLISE DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DA VEGETAÇÃO TAMARISK ATRAVÉS DA RAZÃO DE BOWEN E DO MODELO SEBAL

CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, (UFCG),
Campina Grande, PB, Brasil.

carlostorm@gmail.com, carlos@dca.ufcg.edu.br.

Recebido Agosto 2009 – Aceito Maio 2010

RESUMO

O objetivo desse estudo foi determinar a evapotranspiração real diária (ET_r) da vegetação tamarisk utilizando dados micrometeorológicos e o modelo SEBAL. Foram utilizados dados provenientes do método da razão de Bowen, além do modelo SEBAL aplicado a imagens do Landsat 5 – TM, na obtenção da ET_r diária da vegetação tamarisk do Baixo Rio Colorado, CA/EUA. Na obtenção da evapotranspiração de referência (ET_0) foi utilizado o método da FAO/Penman-Monteith. Os resultados mostram características de forte advecção de ar, e que a radiação solar é o componente de maior influência na obtenção da ET_0 . Verifica-se também, que a vegetação tamarisk tem alto consumo hídrico e a sua rápida expansão poderá trazer impactos negativos para os rios da região. As estimativas da ET_r pelo modelo SEBAL são similares aos valores medidos na torre micrometeorológica pelo método da razão de Bowen, demonstrando a aplicabilidade do modelo SEBAL na obtenção da distribuição espacial da evapotranspiração real diária.

Palavras-Chave: Evapotranspiração, balanço de energia, micrometeorologia, Landsat 5 – TM

ABSTRACT: WATER DEMAND ANALYSIS OF THE TAMARISK VEGETATION THROUGH OF THE BOWEN RATIO AND SEBAL MODEL.

The objective of this study was to determine the daily actual evapotranspiration (ET_r) of the tamarisk vegetation using micrometeorological data and SEBAL model. Data originating from the Bowen ratio method were used, besides the SEBAL model applied to TM Landsat 5 image for obtaining the daily ET_r of the tamarisk vegetation of Lower Colorado River, CA/USA. For obtaining the reference evapotranspiration (ET_0) the FAO/Penman-Monteith method was used. The results show characteristics of strong air advection and that the solar radiation has the largest influence in obtaining ET_0 , as well as, that the tamarisk vegetation has high water demand and its fast expansion can bring negative impacts for the rivers of the area. The estimates of ET_r through the SEBAL model are similar to the measured values on the micrometeorological tower by the Bowen ratio method, demonstrating the applicability of the SEBAL model to obtain the spatial distribution of the daily actual evapotranspiration.

Keywords: Evapotranspiration, energy balance, micrometeorology, TM Landsat 5

1. INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais limitante em ambientes áridos e semi-áridos. Vegetação nativa, agricultura irrigada e desenvolvimento social, dependem da produção e conservação da água de rios e aquíferos. A obtenção da evapotranspiração (ET) (fenômeno físico que transfere grande volume de água

para a atmosfera através da evaporação do solo e do processo da transpiração vegetativa) da vegetação ribeirinha é um importante componente do balanço hídrico para bacias hidrográficas localizadas nas regiões áridas e semi-áridas. Os principais rios da região ocidental dos Estados Unidos da América (EUA), apresentam vegetações invasoras que causam prejuízos econômicos estimados em dezenas de bilhões de dólares por ano,

causando alterações nos ecossistemas (Pimentel et al., 2001), desse modo o consumo hídrico dessas vegetações necessita ser melhor estudado (Mack et al., 2000). Assim, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto orbital constitui um elemento indispensável na obtenção da *ET*.

A espécie conhecida como **Tamarisk** (*Tamarix spp.*) é uma vegetação arbustiva que invadiu a região oeste dos EUA, no início do século passado, e tem sido alvo de muitos esforços na tentativa de controlá-la, assim como, de restauração ambiental, começando na década de 1960 (Weeks et al., 1987). Atualmente, programas direcionam milhões de dólares por ano na tentativa de controlar a rápida expansão do tamarisk e, com isso, aumentar a produtividade da água e a saúde do ecossistema. Tamarisk é comumente conhecida por ter efeitos ecológicos e econômicos negativos, como a diminuição das correntes dos rios, resultante da alta taxa de *ET*, deslocamento da vegetação nativa, aumento da salinização, entre outros. No entanto, a presença de tamarisk tem aspectos benéficos como a sua alta capacidade de controlar erosão e é habitat para diferentes espécies de pássaros (van Ripper III et al., 2008), incluindo locais com alto teor de salinidade ou seco, onde a vegetação nativa não se desenvolve, como por exemplo, no Baixo Rio Colorado e no Rio Pecos (Shaffroth et al., 2005). Logo, quantificar o consumo hídrico sobre grandes áreas é importante para o manejo adequado, planejamento e gestão dos recursos hídricos. As diferenças entre a *ET* real e potencial, obtidas com alta resolução espacial, são de grande interesse para os recursos hídricos e constituem um indicador do déficit hídrico.

Com isso, várias técnicas têm sido desenvolvidas com a finalidade de obter precisamente a *ET*, entre elas destacam-se o método da razão de Bowen (Bowen, 1926), e a estimativa espacial da *ET* utilizando sensoriamento remoto orbital com o modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), proposto por Bastiaanssen et al. (1998a,b). O SEBAL é um modelo destinado à estimativa da *ET*, baseada em imagens de satélite via cômputo do balanço de energia à superfície, e tem sido validado em várias localidades do mundo, incluindo Estados Unidos, França, China, Turquia, Egito e outros países africanos, europeus e asiáticos (Bastiaanssen et al., 2005) e Brasil (Silva e Bezerra, 2006; Santos et al., 2007; Bezerra et al., 2008; Teixeira et al., 2009a,b).

O objetivo desse estudo é determinar a evapotranspiração real diária (*ET_r*) da vegetação tamarisk, utilizando dados micrometeorológicos e o algoritmo SEBAL, através de imagens Landsat 5-TM, e validar os resultados da *ET_r* estimados pelo algoritmo com os medidos através da técnica da razão de Bowen. Estudos prévios foram desenvolvidos por Nagler et al. (2008) para a região estudada utilizando sensoriamento remoto e a técnica de medidas de fluxos de seiva. Entretanto, o modelo SEBAL ainda não foi utilizado na região estudada e a

sua aplicação irá ajudar no entendimento do uso da água pela vegetação tamarisk.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de estudo foi uma reserva florestal que serve de refúgio para animais e pássaros silvestres, conhecida por *Cibola National Wildlife Refuge* (CNWR), situada a 33° 16' N, 114° 41' W e 70 m acima do nível do mar, localizada no Baixo Rio Colorado, no Estado da Califórnia, EUA, conforme ilustrado na Figura 1. O CNWR foi criado em 1964 com o objetivo de restaurar e preservar o histórico habitat de aves migratórias e outros animais silvestres. A região é circundada, de um lado pelo Rio Colorado, e do outro, pelo deserto de Sonora, apresentando clima típico de deserto com umidade relativa extremamente baixa e temperaturas extremamente altas no verão, de acordo com a classificação de Köppen. Suas temperaturas normais média, máxima e mínima anuais são de 22,2°C, 31,2°C e 13,2°C, respectivamente. A precipitação média anual da região é de 97,3 mm.

2.2 Metodologia

2.2.1 Método da razão de Bowen

Foram utilizados nesse estudo dados micrometeorológicos provenientes do método da razão de Bowen e do modelo SEBAL aplicado a imagens do Landsat 5 – TM, para a obtenção e comparação da *ET_r* diária da vegetação tamarisk.

Foi instalada uma torre micrometeorológica, denominada *Slitherin*, com altura de 8 m e *footprint* de 800 m, sobre a área de maior densidade da vegetação tamarisk, dentro da CNWR. Para a obtenção da *ET₀* foram utilizados os dados de uma estação meteorológica do Sistema de Informação e Monitoramento da Irrigação na Califórnia (CIMIS, em inglês), instalada próxima a área de estudo, com localização 33° 33' 24" N, 114° 39' 59" W e 84 m de altitude. A superfície de referência foi grama e o método utilizado foi o de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Todos os instrumentos utilizados na estação meteorológica estão descritos na Tabela 1.

A partição da energia na superfície entre fluxo de calor sensível e latente é usualmente obtido pelo método do balanço de energia pela razão de Bowen (BERB) (Perez et al., 2008). Nesse estudo foi utilizado o sistema do balanço de energia *CR10-3C* confeccionado pela *Radiation and Energy Balance Systems, Inc.* (REBS), com os sensores para a medição de temperatura e umidade instalados, em geral, a 2 e 3 metros acima do dossel da vegetação tamarisk, no CNWR. Os componentes do BERB

foram obtidos a cada 30 minutos. O método do BERB é baseado na teoria de que os fluxos unidimensionais de calor sensível e latente podem ser descritos em termos das relações fluxos-gradiente (Tanner et al, 1987; Tanner, 1988):

$$H = \rho c_p K_h (\Delta T / \Delta z) \tag{1}$$

$$LE = (\lambda \rho \varepsilon K_w / P) (\Delta e / \Delta z) \tag{2}$$

Tabela 1 - Instrumentação utilizada na estação meteorológica instalada nas proximidades de CNWR, Baixo Rio Colorado, CA, EUA

Medida	Instrumento	Altura (m)
Radiação solar total	LI200S (Li-Cor) (Piranômetro)	2
Temperatura do solo	107b (Fenwal/Campbell Scientific Inc.)	-0,15
Temperatura e umidade relative do ar	HMP35 (Vaisala/Campbell Scientific, Inc.)	1,5
Direção e velocidade do vento	024A/014A (Met-One)	2
Precipitação	TE525MM (Texas Electronics)	1

em que H é o fluxo de calor sensível da superfície ($W m^{-2}$), LE é o fluxo de calor latente da superfície ($W m^{-2}$), ρ é a densidade do ar ($kg m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$), T é a temperatura do ar ($^\circ C$), z é a altura em que são obtidas as medidas (m), λ é o calor latente de vaporização ($J kg^{-1}$), ε é a razão do peso molecular da água pelo do ar seco (0,622), P é a pressão atmosférica (kPa), e é a pressão de vapor (kPa), K_h é o coeficiente de difusão turbulenta para o calor sensível ($m^2 s^{-1}$) e K_w é o coeficiente de difusão turbulenta para o vapor de água ($m^2 s^{-1}$).

Bowen (1926) expressou a razão de Bowen (β) como:

$$\beta = H / LE \tag{3}$$

Substituindo as Equações 1 e 2 na Equação 3, e assumindo $K_h = K_w$ (Verma et al., 1978), β pode ser obtido por (Bowen, 1926):

$$\beta = \gamma (\Delta T / \Delta e) \tag{4}$$

onde γ é o fator psicrométrica ($kPa^\circ C^{-1}$), ΔT e Δe são obtidos pelas medidas da temperatura do ar e pressão de vapor ou ponto de orvalho para duas alturas sobre o topo do dossel, dentro da camada limite planetária (Payero et al., 2003).

A equação unidimensional do balanço de energia na superfície é dada a seguir:

$$LE = R_n - G - H \tag{5}$$

em que R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo, H é o fluxo de calor sensível e LE o fluxo de calor latente, todos

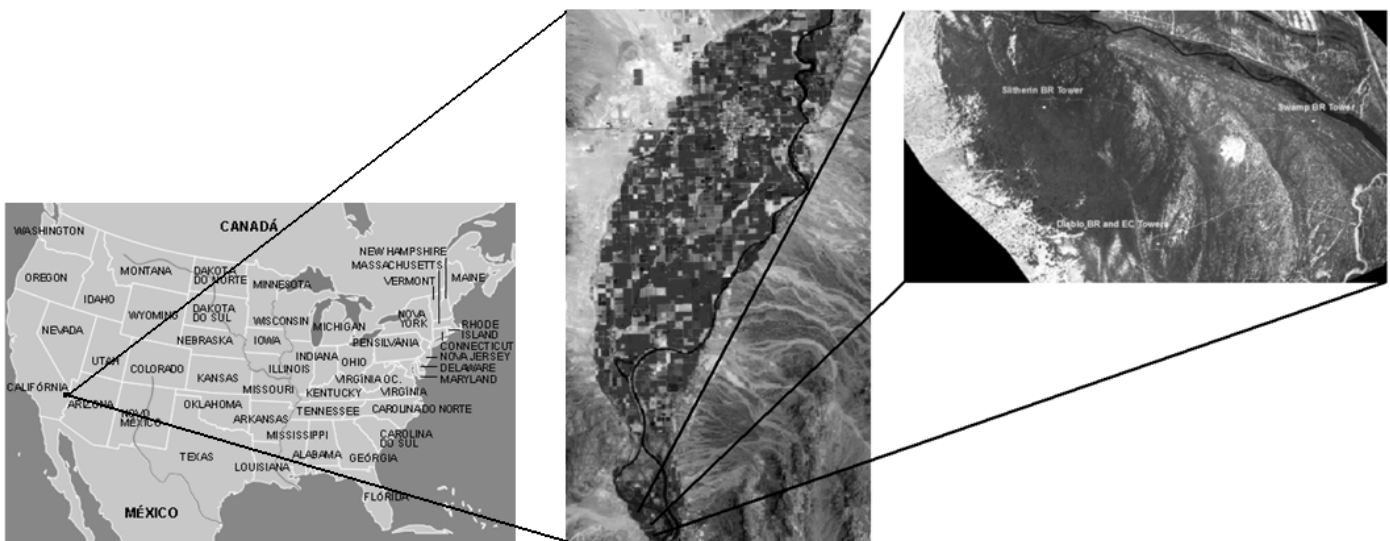


Figura 1 - Mapa da área de estudo na reserva Cibola National Wildlife Refuge (CNWR) no Baixo Rio Colorado juntamente com as áreas irrigadas.

expressos em $W m^{-2}$. Combinando as Equações 4 e 5 resulta na seguinte equação para calcular LE pelos dados da razão de Bowen (Bowen, 1926):

$$LE = (R_n - G)/(1 + \beta) \quad (6)$$

O fluxo de calor no solo foi obtido através de três fluxímetros, modelo HFT3.1, instalados a 8 cm de profundidade. O saldo de radiação foi medido com um saldo radiômetro modelo THRDS7.1 instalados a 2 m acima do dossel. Foi utilizado um piranômetro do modelo PDS7.1 para medir a densidade de fluxo de radiação solar incidente. Na obtenção da umidade e temperatura do solo foram utilizadas sensores dos modelos SMP1 e STP, respectivamente. Um sensor do modelo Met One 034-B foi utilizado para a obtenção da velocidade e direção do vento. Todos os instrumentos citados acima foram confeccionados pela Radiation and Energy Balance Systems (REBS), Seattle, WA.

Foram aplicados filtros para a identificação de dados errôneos, seguindo a metodologia proposta por Payero et al. (2003), tais como: a exclusão dos dados, quando $-1,25 < \beta < -0,75$; a exclusão dos dados, quando a razão de Bowen apresentou resultados imprecisos com valores irracionais e a exclusão dos dados noturnos ($R_n < 0 W m^{-2}$), ou seja, utilizou-se para a obtenção da ETr diária, somente os valores diurnos do LE . Estudos como os de Heilman et al. (1989) e Payero et al. (2003) afirmam que a razão entre o *fetch* e a altura dos instrumentos é de 100:1. Nesse estudo, se encontrou *fetch* suficiente para a aplicação da técnica.

Dados coletados na estação meteorológica da CIMIS instalada próxima a área de estudo, foram analisados usando regressão linear para identificar qual parâmetro meteorológico tem maior influência na estimativa da ET_0 , usando a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) na região estudada.

2.2.2 Algoritmo SEBAL

Foram utilizadas nesse estudo imagens do Mapeador Temático a bordo do Landsat 5. A Tabela 2 apresenta as sete imagens obtidas durante o período de estudo, com o “path” 38 e “row” 37. As imagens foram utilizadas, juntamente com os dados provenientes da estação meteorológica, na obtenção da ETr diária.

A estimativa do fluxo de calor latente instantâneo (LE), pelo algoritmo SEBAL, foi obtida através do método residual da equação do balanço de energia, com auxílio das medidas espectrais do sensor Landsat 5-TM, e do parâmetro de velocidade do vento, proveniente da estação meteorológica. Esse método possibilita assim, a obtenção do fluxo vertical de calor latente com imagens orbitais, através da diferença dos fluxos,

também verticais, de calor no solo (G), calor sensível (H) e o saldo de radiação (R_n), conforme mostrado na Equação 5.

Os componentes R_n e G foram obtidos através das Equações 2 e 3:

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (7)$$

em que $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta ou solar incidente ($W m^{-2}$), o termo $\alpha R_{s\downarrow}$ é a porção da radiação de onda curta refletida pela superfície ($W m^{-2}$), α é o albedo da superfície, $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície ($W m^{-2}$), $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície ($W m^{-2}$); o termo $(1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow}$ corresponde a radiação de onda longa refletida e ε_0 é emissividade da superfície. As etapas computacionais para a obtenção do balanço de radiação, através do algoritmo SEBAL estão apresentadas no fluxograma da Figura 2.

O valor de G foi computado segundo a equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) (1 - 0,98IVDN^4) \right] R_n \quad (8)$$

onde T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}C$), α é o albedo da superfície, $IVDN$ é o índice de vegetação da diferença normalizada e R_n é o saldo de radiação.

A obtenção de H pelo SEBAL foi feita a partir da velocidade do vento medida a uma altura de 2,0 m e da temperatura da superfície, pixel a pixel, usando uma “calibração interna” da diferença da temperatura do ar próximo à superfície como descrita por Bastiaanssen et al. (1998a,b), Allen et al. (2002) e Teixeira et al. (2009a,b).

$$H = \frac{\rho_{ar} c_p \Delta T}{r_{ah}} \quad (9)$$

em que ρ_{ar} é a densidade do ar úmido ($Kg m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 J Kg^{-1} K^{-1}$), r_{ah} é a

Tabela 2 - Data da aquisição e hora da passagem do satélite para as imagens do sensor TM do Landsat 5 (path/row = 216/64) disponíveis para a área de estudo (CNWR), em 2007

Data da aquisição	Hora da passagem
8/5/2007	11:04
24/5/2007	11:04
9/6/2007	11:04
11/7/2007	11:03
12/8/2007	11:03
28/8/2007	11:03
13/9/2007	11:03

resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s\ m^{-1}$), T_s é a temperatura da superfície (K) e “a” e “b” são coeficientes de calibração empíricos obtidos para cada imagem. O termo $\Delta T = a + bT_s$ representa na Equação 9 a diferença de temperatura próxima à superfície calculada entre as alturas 0,1 e 2,0 m. A definição dos coeficientes “a” e “b” requerem a escolha de dois pixels âncoras, que representem condições extremas de temperatura e umidade, os chamados pixels “quente” e “frio”, onde o ΔT foi calculado usando valores de H conhecidos para os referidos pixels.

Para o pixel frio, escolhido sobre uma área irrigada, onde se assumiu que $H = 0$ e, conseqüentemente $\Delta T = 0$ e $LE = R_n - G$. Já o pixel quente foi escolhido sobre área de solo exposto, onde se admitiu que $LE = 0$ e o valor de H foi calculado pela diferença, $H = R_n - G$ e $\Delta T = H r_{ah} / \rho_{air} c_p$. Tais valores iniciais de H não representam adequadamente o H de cada pixel, e servem apenas como parâmetros iniciais de um processo iterativo, no qual é considerada a condição de estabilidade de cada pixel, utilizando-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov (L) apresentada na equação a seguir:

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (10)$$

em que u_* é a velocidade de fricção de cada pixel da imagem ($m\ s^{-1}$), g é o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81\ m\ s^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$), pixel a pixel, obtido inicialmente considerando a condição de estabilidade neutra.

Os valores de L definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra. Dependendo das condições atmosféricas,

os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h) deverão ser considerados, conforme Bastiaanssen et al. (1998a).

A ET_r diária foi calculada a partir da evapotranspiração horária (ET_h) ($mm\ h^{-1}$), que foi obtida com base na densidade de fluxo de calor latente, de acordo com a Equação 11, onde L é o calor latente de vaporização da água ($L = 2,45 \times 10^6\ J\ kg^{-1}$), 3600 é o fator de conversão de valores instantâneo para valores horários.

$$ET_h = 3600 LE/L \quad (11)$$

O passo seguinte foi a obtenção da fração de evapotranspiração de referência horária, $FET_{0,h}$, que foi obtida pela razão entre a ET_h e a evapotranspiração de referência horária, $ET_{0,h}$, calculada pelo método da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), com dados da estação meteorológica instalada na área estudada:

$$FET_{0,h} = ET_h / ET_{0,h} \quad (12)$$

Considerando que o valor da $FET_{0,h} = FET_{0,24}$, pois de acordo com Trezza (2002) o comportamento de $FET_{0,h}$ é relativamente constante em todo o período diurno. Logo, a ET_r diária foi dada pela equação seguinte:

$$ET_r = FET_{0,24} ET_{0,24} \quad (13)$$

em que $FET_{0,24}$ é a fração de evapotranspiração real diária e $ET_{0,24}$ é a evapotranspiração de referência diária, calculada com metodologia similar à da $ET_{0,h}$.

Para avaliar a aplicabilidade do modelo SEBAL na obtenção da ET_r , quando comparado aos valores medidos pela técnica da razão de Bowen, foi utilizado os testes estatísticos

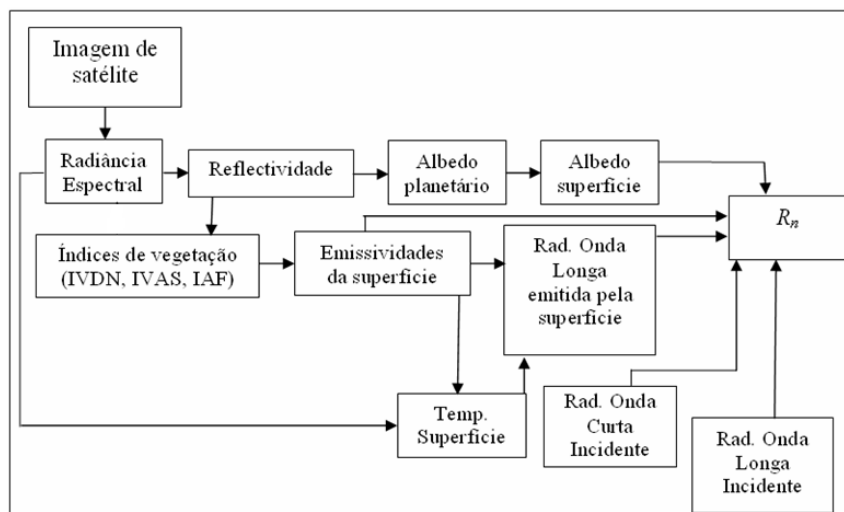


Figura 2 - Fluxograma das etapas do processamento, do modelo SEBAL, para obtenção do balanço de radiação à superfície (R_n).

de erro conhecidos como: erro quadrático médio e erro percentual médio.

3. RESULTADOS

3.1 Condições meteorológicas na área de estudo

Na Figura 3 estão representadas as médias diárias das variáveis meteorológicas durante o período estudado, na estação meteorológica instalada próxima a área experimental na CNWR. A velocidade do vento alcançou valores superiores a $2,0 \text{ ms}^{-1}$

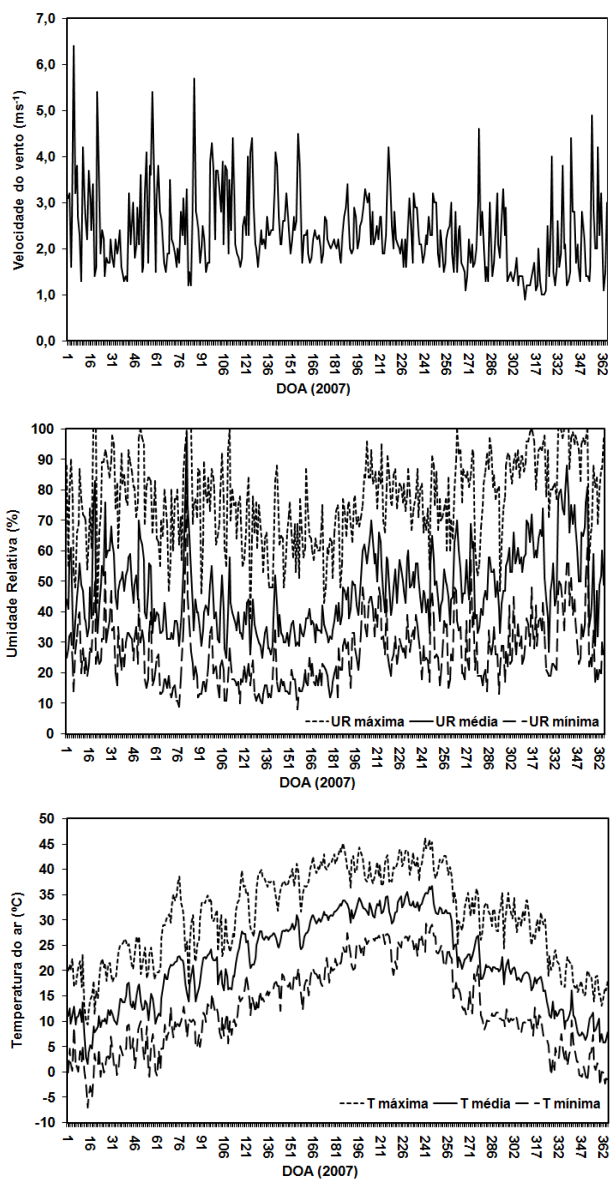


Figura 3 - Variação temporal ao longo do ano 2007 (DOA = Dia de ordem do ano) da velocidade do vento (a), umidade relativa (b) e temperatura do ar (c) na estação meteorológica, durante o ano de 2007, instalada próximo da área experimental de CNWR.

para a maioria dos dias estudados, e em alguns dias foram identificados valores médios diários superiores a $5,0 \text{ m s}^{-1}$. A maior variação na velocidade média diária do vento ocorre no período mais frio do ano (Figura 3a). Durante este período, os valores variaram de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ a valores superiores a $5,0 \text{ ms}^{-1}$.

A variação da umidade relativa está na Figura 3b, onde se observa que os valores máximos variaram entre 30% e 100%, os valores médios entre 20% e 90%, e os mínimos entre valores inferiores a 10% e superiores a 80%. A temperatura do ar (Figura 3c) alcançou valores máximos acima de 40°C , valores médios entre 3°C e 37°C , e mínimos abaixo de 0°C , padrão característico de local com clima desértico, ou seja, altos valores durante o período diurno e baixos durante o noturno.

A Figura 4 apresenta a distribuição anual das temperaturas do ar e do solo para a torre micrometeorológica instalada na área de estudo, dentro da CNWR, em 2007. Pode ser evidenciado que a temperatura do solo se mantém, durante todo o ano, bastante inferior à temperatura do ar, uma vez que, como a vegetação é densa, impede a incidência direta da radiação solar na superfície do solo.

3.2 Evapotranspiração de referência (ET_0)

A Tabela 3 mostra os coeficientes de correlação (r), os valores do teste t de Student (Devore, 2008) e os valores críticos do teste estatístico para o nível de significância de $p \leq 0.01$, com uma amostra $n = 365$. Todas as correlações foram significativas para o nível de significância especificado. Conforme esperado, na região estudada, a radiação solar é o componente de maior influência na obtenção da ET_0 (Tabela 3), seguido pela temperatura do ar, déficit de pressão de vapor (DPV) e umidade relativa. A velocidade do vento apresentou a menor correlação com a ET_0 , com um coeficiente de correlação igual a 0,07. Os resultados concordam com o estudo de Allen et al. (1998), que observaram que os parâmetros meteorológicos que afetam a ET_0 são, principalmente, a radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar.

3.3 Evapotranspiração real da vegetação tamarisk (CNWR, CA – EUA)

Na Tabela 4 estão apresentados os valores da ET_r média diária para o período de 1º de março a 31 de outubro, período em que a temperatura do ar é superior a 0°C e que as plantas estão em desenvolvimento, para o ano de 2007, da vegetação tamarisk juntamente com a ET_0 sobre grama. É possível identificar que a ET_r da vegetação tamarisk apresentou um valor médio de $3,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Este resultado está em concordância com os estudos desenvolvidos por Nagler et al. (2008), para a região estudada utilizando sensoriamento remoto e torres micrometeorológicas.

Nagler et al. (2005) encontraram que a *ETr* média diária da vegetação tamarisk foi de 3,9 mm dia⁻¹. Os valores anuais da *ET₀* para a grama, assim como, a *ETr* da vegetação tamarisk na área de estudo em 2007, estão apresentados na Tabela 4. A *ET₀* da grama foi de 1734,2 mm/ano, enquanto a *ETr* da vegetação tamarisk, no ano de 2007, foi de 1096,2 mm/ano. Os resultados concordam com os obtidos por Gay e Hartman (1982) e Cleverly et al. (2002).

As variações temporais da *ET₀* (grama) e *ETr* (tamarisk) para a área experimental no ano de 2007, estão ilustradas na Figura 5. Conforme discutido anteriormente, os resultados concordam com os obtidos por Gay e Hartman (1982) e Cleverly et al. (2002), que obtiveram valores da *ETr* da tamarisk variando entre 0 e 12 mm dia⁻¹ para a vegetação tamarisk. A vegetação tamarisk apresentou valores médio, máximo e mínimo para a *ETr* de 3,2 mm dia⁻¹, 7,6 mm dia⁻¹ e 0,1 mm dia⁻¹, respectivamente. Estes resultados mostram o alto consumo hídrico da vegetação

tamarisk e a rápida expansão da mesma, poderá trazer impactos negativos para os rios da região.

3.4 Validação do SEBAL na vegetação tamarisk

A Figura 6 contém os valores diários da *ETr* da vegetação tamarisk, medida na torre Slitherin com a razão de Bowen, assim como os valores estimados pelo algoritmo SEBAL. Observa-se que, em geral, os valores estimados pelo algoritmo baseado em técnicas de sensoriamento remoto se mantiveram muito próximos dos valores medidos na torre micrometeorológica. Os resultados concordam com os obtidos por Nagler et al. (2005), que obtiveram valores de *ETr* diária, utilizando imagens MODIS para o Rio Grande, no Estado do Novo México, variando entre 4,0 e 5,0 mm dia⁻¹ para a vegetação tamarisk. O erro quadrático médio e o erro percentual médio, entre os valores da *ETr* diária medidos e os estimados pelo SEBAL

Tabela 3 - Correlações lineares entre a temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e déficit de pressão do vapor (DPV) com a evapotranspiração de referência (ET₀) na CNWR, CA – EUA, no ano de 2007.

	Equação linear	r	t _{calculado}	t _(p ≤ 0.01) (n=365)
ET ₀ □ Temperatura do ar	y = 0,21x + 0,6	0,65 ^a	35,31	
ET ₀ □ Umidade relativa	y = -0,10x + 10,0	0,34 ^a	-18,44	
ET ₀ □ Radiação solar	y = 33,5x + 79,7	0,87 ^a	71,67	2.33
ET ₀ □ Velocidade do vento	y = 0,66x + 3,8	0,07 ^a	7,19	
ET ₀ □ DPV	y = 1,08x + 1,7	0,55 ^a	29,11	

Tabela 4 - Média sazonal (01/março a 31/outubro) e valores totais anuais da ET₀ e da ETr da vegetação tamarisk obtida para a torre instalada em CNWR em 2007 juntamente com a precipitação total.

Torre	ETr média (mm/dia)	ETr (mm/ano)	Precipitação Total (mm)
ET ₀ (grama)	4,8	1734,2	37,3
Tamarisk (Slitherin)	3,2	1096,2	

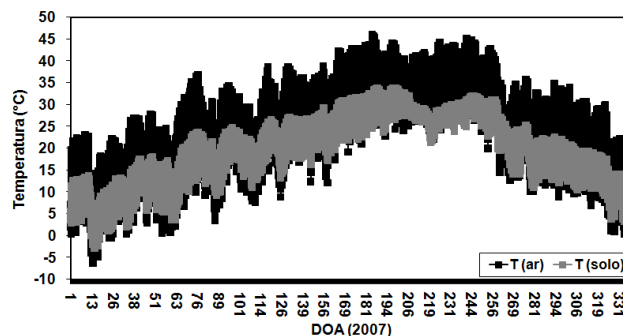


Figura 4 - Variação da temperatura do ar e do solo para a torre Slitherin, em CNWR no ano de 2007.

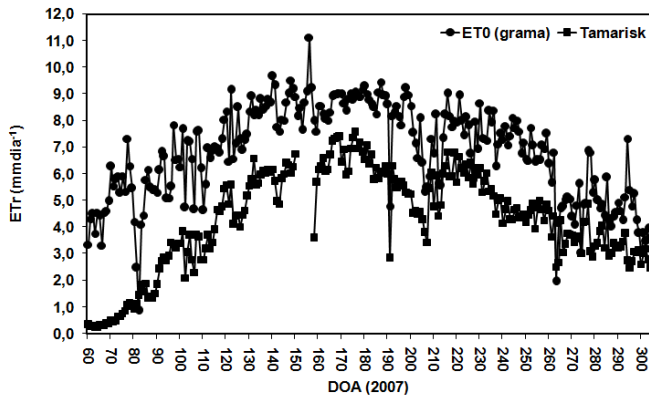


Figura 5 - Variação temporal da ET₀ e ETr para a área experimental (CNWR, CA - EUA) para 2007.

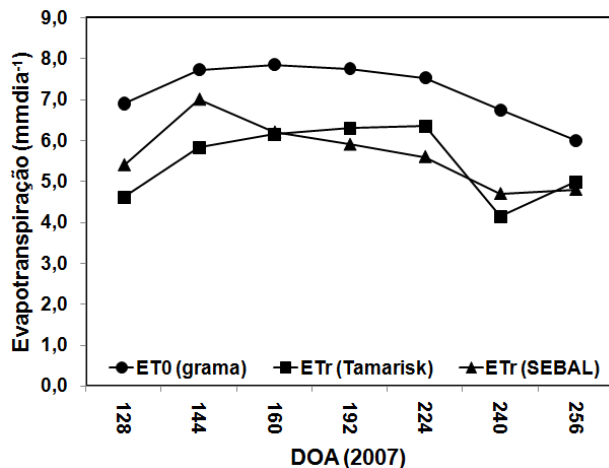


Figura 6 - Comparação entre a ETr diária medida na torre Slitherin (razão de Bowen) com as estimadas pelo algoritmo SEBAL.

foram de $0,4 \text{ mm dia}^{-1}$ e $9,5\%$, respectivamente. Os resultados evidenciam a aplicabilidade do algoritmo SEBAL na obtenção da evapotranspiração real diária. Com a expansão da vegetação tamarisk, que de acordo com os resultados, apresenta alta taxa evapotranspirativa, será liberado mais vapor de água para a atmosfera. Isto poderá acarretar em alterações no microclima local, tais como, diminuição da temperatura e/ou aumento na precipitação pluviométrica local. Assim como, diminuir a vazão dos rios, pois, a água utilizada no processo evapotranspirativo é proveniente dos rios da região.

4. CONCLUSÕES

Foi evidenciado através da velocidade do vento características de forte advecção e que a maior variação na velocidade média diária do vento ocorre no período mais frio

do ano. No clima desértico da região estudada, a temperatura do ar é elevada durante o dia e baixa à noite. Conforme esperado, na região estudada, a radiação solar é o componente de maior influência na obtenção da ET_0 .

A vegetação tamarisk tem alto consumo hídrico e a sua rápida expansão poderá trazer impactos negativos para os rios da região.

As estimativas da ETr pelo algoritmo SEBAL são similares aos valores medidos na torre micrometeorológica através do método da razão de Bowen. Os baixos erros quadrático médio e percentual médio entre os valores da ETr diária medidos e os estimados pelo SEBAL, demonstram a aplicabilidade do método na obtenção da distribuição espacial da evapotranspiração real diária.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de doutorado concedida ao autor. Ao prof. Dr. Christopher M. U. Neale (*BIE/Utah State University, EUA*) pelo acolhimento e apoio durante todo o período de estágio no exterior. Aos Drs. John Osterberg (*U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO*), Doyle Watts (*Wright State University*) e Subramania I. Sritharan (*Central State University*) pela liberação dos dados micrometeorológicos da vegetação tamarisk. Aos revisores anônimos pelas valiosas sugestões.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome-Italy, 1998.
- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 2002**.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.198–212. 1998a.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F. ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.213–229. 1998b.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87–100, 2000.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUN, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL Model with Remotely Sensed Data

- to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, p. 85-93, 2005.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 305-317, 2008.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, p. 779-787, 1926.
- CLEVERLY, J. R.; DAHM, C. N.; THIBAUT, J. R.; GILROY, D. J.; COONROD, J. E. A. Seasonal estimates of actual evapotranspiration from *Tamarix ramossissima* stands using three-dimensional eddy covariance. **Journal of Arid Environments**, v. 52, p. 181-197, 2002.
- DEVORE, J. L. **Probability and Statistics for Engineering and Sciences**. Enhanced Review Edition, 7th Edition, p. 768, 2008.
- GAY, L. W.; HARTMAN, R. K. ET measurements over riparian saltcedar on the Colorado River. **Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest**, v.12, p.133-139, 1982.
- HEILMAN, J. L.; BRITTIN, C. L.; NEALE, C. M. U. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.44, p. 261-273, 1989.
- MACK, R. N.; SIMBERLOFF, D.; LONSDALE, W. M.; EVANS, H.; CLOUT, M.; BAZZAZ, F. A. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. **Ecological Applications**, v. 10, p. 689-710, 2000.
- NAGLER, P. L.; SCOTT, R. L.; WESTENBURG, C.; CLEVERLY, J. R.; GLENN, E. P.; HUETE, A. R. Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 337-351, 2005.
- NAGLER, P. L.; GLENN, E. P.; DIDAN, K.; OSTERBERG, J.; JORDAN, F.; CUNNINGHAM, J. Wide-Area Estimates of Stand Structure and Water Use of *Tamarix* spp. On the Lower Colorado River: Implications for Restoration and Water Management Projects. **Restoration Ecology**, v. 16, p. 136-145, 2008.
- PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L.; ALLEN, R. G. Guidelines For Validating Bowen Ratio Data. **Transactions of the ASAE**, v. 46, p. 1051-1060, 2003.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTÍNEZ-COB, A. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 25-37, 2008.
- PIMENTEL, D.; MCNAIR, S.; JANECKA, J.; WIGHTMAN, J.; SIMMONDS, C.; O'CONNELL, C.; WONG, E.; RUSSEL, L.; ZERN, J.; AQUINO, T.; TSOMONDO, T. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 84, p. 1-20, 2001.
- SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B.; RAMANA RAO, T. V. Estimativa da ET diária utilizando os algoritmos SEBAL e S-SEBI. **Revista Ciência e Natura**, v. Especial, p. 71-74, 2007.
- SHAFROTH, P. B.; CLEVERLY, J. R.; DUDLEY, T. L.; TAYLOR, J. P.; VAN RIPPER III, C.; WEEKS, E. P.; STUART, J. N. Control of *Tamarix* in the Western United States: Implications for Water Salvage, Wildlife Use, and Riparian Restoration. **Environmental Management**, v. 35, p. 231-246, 2005.
- SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, p. 1-10, 2006.
- TANNER, B. D.; GREENE, J. P.; BINGHAM, G. E. A Bowen ratio design for long term measurements. In *Proc. ASAE 1987 International Winter Meeting*. St. Joseph, Mich.: ASAE, 1987.
- TANNER, B. D. Use requirement for Bowen ratio and eddy correlation determination of evapotranspiration. In *Proc. ASCE 1988 Specialty Conference of the Irrigation and Drainage Division of the ASCE*, 605-616. Reston, Va.: ASCE. 1988.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462-476, 2009a.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 477-490, 2009b.
- TREZZA, R. Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with standardized ground control. 247f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering). Utah State University. Logan, Utah, 2002.
- VAN RIPPER III, C.; PAXTON, K.; O'BRIEN, C.; SHAFROTH, P.; MCGRATH, L. Rethinking avian response to Tamarisk on the Lower Colorado River: a threshold hypothesis. **Restoration Ecology**, v. 16, p. 155-167, 2008.
- VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under

advective conditions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, p. 330–338, 1978.
WEEKS, E. P.; WEAVER, H. L.; CAMPBELL, G. S.; TANNER, B. D. Water use by saltcedar and by replacement vegetation

in the Pecos River floodplain between Acme and Artesia, New Mexico. **US Geological Survey Professional Paper**, 491-G, 33 p., 1987.