



O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

THE SEBAL MODEL FOR CLIMATE INTRA-URBAN STUDIES: APPLICATION IN RECIFE, PERNAMBUCO, BRAZIL

Elvis Bergue Mariz Moreira¹, Ranyére Silva Nóbrega², Bernardo Barbosa da Silva³, Eberson Pessoa Ribeiro⁴

RESUMO

O conhecimento dos componentes do balanço de energia em áreas urbanas é relevante para os estudos do clima urbano, principalmente quando estes são objeto de análise espacial. O objetivo deste estudo é adaptar o modelo SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land (comumente utilizado para fins agroclimáticos) em um ambiente intraurbano, possibilitando análises de componentes microclimáticas com metodologia de baixo custo, através de dados de sensores remotos. A fim de alcançar este objetivo, seis imagens do satélite Landsat 5 TM, entre os anos de 1998 a 2011, foram processadas. Densidade dos fluxos de calor sensível e latente foram calculadas usando o algoritmo SEBAL. De acordo com os resultados, o elevado percentual de superfícies impermeáveis e a distribuição espacial reduzida de áreas verdes modificam as trocas entre os fluxos de radiação, proporcionando assim altos níveis de fluxos de energia disponíveis para o aumento da temperatura do ar. A este respeito, o setor oriental se destaca por seus valores de magnitude mais altas, entre 216 e 425 W m⁻². A área Sul produziu alguns valores em excesso de 426 W m⁻². O fluxo de calor latente (LE) apresentou diminuição da distribuição espacial; sendo concentrada em áreas protegidas designadas e corpos d'água com valores superiores a 431 W m⁻². Torna-se evidente que os padrões intensivos de uso da terra não coincidem com planejamento adequado e refletem sobre a qualidade de vida da população.

PALAVRAS-CHAVE: ilhas de calor, planejamento urbano, superfícies heterogêneas, zonas verdes, densidade construtiva.

ABSTRACT

The knowledge of the components of the energy balance in urban areas is of relevant to the studies of the urban climate, mainly when those are subject to spatial analysis. The objective of this study is to adapt the SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land model (commonly used to agroclimatic purposes) in a intra-urban environment, enabling analysis of microclimate components with low cost methodology through remote sensing data. In order to accomplish this goal, six satellite Landsat 5 TM images, between the sequential days of the years 1998 to 2011 were processed. Sensible and latent heat fluxes density were calculated using the SEBAL algorithm. According to the results, the high percentage of impervious surfaces and the reduced spatial distribution of green areas alter the exchanges among radiation fluxes, thus providing high levels of available energy fluxes for increasing air temperature. In this regard, the eastern sector stands out for its higher magnitude values, between 216 and 425 W m⁻². The South area yielded some values in excess of 426 W m⁻². Latent heat flux (LE) exhibited reduced spatial distribution; being concentrated in designated protected areas and water bodies with values higher than 431 W m⁻². It becomes evident that intensive land use patterns not matched by adequate planning reflect upon the quality of life of the population.

KEY-WORDS: heat islands, urban planning, heterogeneous surfaces, green areas, constructive density.

Recebido em: 02/03/2016. Aceito em: 13/06/2016.

¹ Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreira/BA, e-mail: elvisberg@hotmail.com

² Universidade Federal do Pernambuco, Recife/PE, e-mail: ranyere.nobrega@yahoo.com.br

³ Universidade Federal do Pernambuco, Recife/PE, e-mail: bbdasilva.ufpe@gmail.com

⁴ Instituto Federal de Pernambuco, Recife/PE, e-mail: eberson_pessoa@yahoo.com.br

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL**INTRODUÇÃO**

Nas últimas décadas o clima das áreas urbanas vem sendo objeto de estudos em todo o mundo, sobretudo com o atual enfoque das mudanças climáticas e as elevadas taxas de crescimento populacional evidenciada nas grandes cidades. O reflexo do referido crescimento imprime uma nova conotação no uso do solo, proporcionando progressiva deterioração dos ambientes urbanos e periurbanos, especificamente impulsionado pelas pressões econômicas e especulativas nas grandes cidades, refletindo na substituição de áreas verdes por áreas artificiais que imprime uma dependência crescente por materiais de construção civil (MOREIRA, 2014).

As cidades por seu tamanho e/ou função desempenham papel importante no clima local e nas relações com a sociedade. Segundo Christen et al. (2011) e Almeida Júnior (2005), os padrões de temperatura do ar, ventos, umidade do ar e pluviosidade mudam de acordo com a posição geográfica da cidade, seu sítio, e da distribuição dos elementos urbanísticos. Os mecanismos para entender esta relação estão inseridos na climatologia urbana, devendo ser observados de uma forma sistêmica dentro de sua área de estudo. É neste sentido que Amorim (2005) disserta que as cidades acabam sendo geradoras de um clima próprio, resultante da interferência de fatores que se processam sobre a camada limite urbana e que agem no sentido de condicionar o clima em escala local.

Quando o tema clima urbano é referido, normalmente é atribuído as ilhas de calor como sua principal representação. De fato, a temperatura do ar depende de fatores tais como uso do solo, geometria e orientação do local, e incidência de radiação solar. Porém, a heterogeneidade térmica urbana está relacionada, a princípio, na modificação da partição do fluxo de energia à superfície. Ao substituir uma área de vegetação ou de água, que possuem um pequeno potencial energético, por telhado e asfalto, que apresentam grande potencial energético, ocorre uma alteração na partição do fluxo energético. A energia que antes

era utilizada na evapotranspiração da vegetação e na evaporação da água, através do fluxo de calor latente, será utilizada no aquecimento da superfície e, conseqüente, aumento da temperatura do ar, através do fluxo de calor sensível.

O balanço de energia em um sistema está baseado na primeira lei da termodinâmica (princípio de conservação), que estabelece que a energia não pode ser criada e nem destruída, somente convertida para outra forma, sendo condicionada aos ganhos e perdas de energia. Na área urbana o armazenamento da energia no dossel urbano ocorre através de superfícies impermeáveis (edificações, pavimentos, concreto, asfalto etc). Esse mecanismo de trocas de energia em forma de calor e evapotranspiração determinam os valores do saldo de radiação, fluxos verticais de calor no solo, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. O valor dessa soma de energia a ser repartida entre calor sensível e latente depende da energia total recebida pelo sistema urbano. A energia disponível para a troca de calor e para a evapotranspiração é definida como a diferença entre a energia total recebida pela cidade, menos a energia utilizada e armazenada em outras formas (GRIMMOND; OKE, 2002).

O fluxo de calor no solo armazenado no meio urbano representa o principal responsável na formação das ilhas de calor, sobretudo porque se baseia-se na premissa que a condutividade térmica e a capacidade de armazenar calor dos materiais urbanos são maiores que os solos providos de vegetação (LORIDAN; GRIMMOND, 2012). Segundo Best e Grimmond (2014) e Kotthaus e Grimmond (2013), estudos de fluxo de energia em superfícies urbanas podem ser realizados através de dados observados em pontos fixos do ambiente urbano e modelagem computacional de superfície urbana. A dificuldade é que os modelos de superfície urbana são comumente calculados por um período curto de tempo (algumas semanas até meses) por causa da limitação dos dados observados.

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

Esse componente do balanço de energia apresenta-se complexo no processo de sua mensuração quando comparado com outros componentes do balanço de energia estimados via sensoriamento remoto (BASTIAASSEN et al., 1998; BEZERRA et al., 2008), sobretudo por ser influenciado por diversos fatores e ter seu aquecimento superficial condicionado pelo percentual de radiação solar absorvida, sendo assim destaca-se como dependente da radiação solar, propriedades do solo e tipo de cobertura vegetal com grande variação temporal e espacial. Bezerra (2006) e Santos et al. (2010) utilizaram o modelo SEBAL e imagens dos sensores ASTER e TM Landsat 5 na estimativa do balanço de energia em áreas urbanas, encontraram valores do fluxo de calor no solo com intervalos de aproximadamente 100 W m^{-2} em área urbana e valores inferiores a 40 W m^{-2} nas áreas providas de vegetação. Gomes et al. (2013) realizaram estudo do balanço de energia através de técnicas de sensoriamento remoto com uso de imagem do TM Landsat 5 e aplicação do algoritmo SEBAL na cidade de Patos (PB). O fluxo de calor latente apresentou os maiores valores para os corpos d'água e área vegetadas e menores valores para a zona urbana e solo exposto, devido à sua baixa disponibilidade de umidade.

Além disso, Christen et al. (2011) citam que o grande desafio nas estimativas das componentes do balanço de energia em áreas urbanas é a complexidade apresentada pelas mesmas pois as equações propostas consideram o dossel urbano como um todo homogêneo, e desta forma mascaram a realidade entre as trocas de energia.

É neste sentido que o objetivo do presente artigo é adaptar o modelo SEBAL (comumente utilizado para fins agroclimatológicos) para um ambiente intraurbano, possibilitando análises de componentes microclimáticas com metodologia de baixo custo, através de dados de sensores remotos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto do estudo é a cidade do Recife localizada a $8^{\circ} 04' 03''$ de latitude Sul e $34^{\circ} 55' 00''$ de longitude Oeste (Figura 1), capital do estado de Pernambuco, localizada no litoral do Nordeste brasileiro na porção centro leste da região, compreendendo uma área territorial de $217,494 \text{ km}^2$, limitando-se, ao norte, com as cidades de Olinda e Paulista, ao sul com o município de Jaboatão dos Guararapes, à oeste com São Lourenço da Mata e Camaragibe e à leste com o Oceano Atlântico.

O clima da cidade é caracterizado por ser quente e úmido As' com chuvas de outono a inverno, iniciadas nos meses de março e isotermas que variam entre $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$, apresentando elevada umidade relativa do ar, com valores médios anuais superiores 84%, de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2014). A região estudada está situada dentro da Zona Intertropical, e com latitude próxima ao Equador, apresenta alta taxa de isolamento em virtude de receber os raios solares de forma perpendicular em sua superfície e altos índices de insolação, praticamente constantes entre os meses de verão (maior insolação) e inverno (menor insolação). Devido a isto, apresenta temperatura do ar média mensal em torno de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo os meses de janeiro e fevereiro os mais quentes, com temperaturas superiores a $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto os meses de julho e agosto apresentam temperaturas iguais ou inferiores a $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, constituindo-se os mais frios, registrando uma diferença anual de apenas $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ entre janeiro e julho e com amplitude térmica diária podendo chegar $> 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (CORRÊA, 2006).

O município cidade do Recife manteve um acelerado crescimento da sua população até princípios da década de 1970. Já na segunda metade do século XX ultrapassou um milhão de habitantes. Conforme o IBGE, em 1970 a população era 1.060.700 habitantes e no ano de 2014 a população é de 1.680.488.

MOREIRA, E.B.M., NÓBREGA, R.S., SILVA, B.B. e RIBEIRO, E.P.
O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

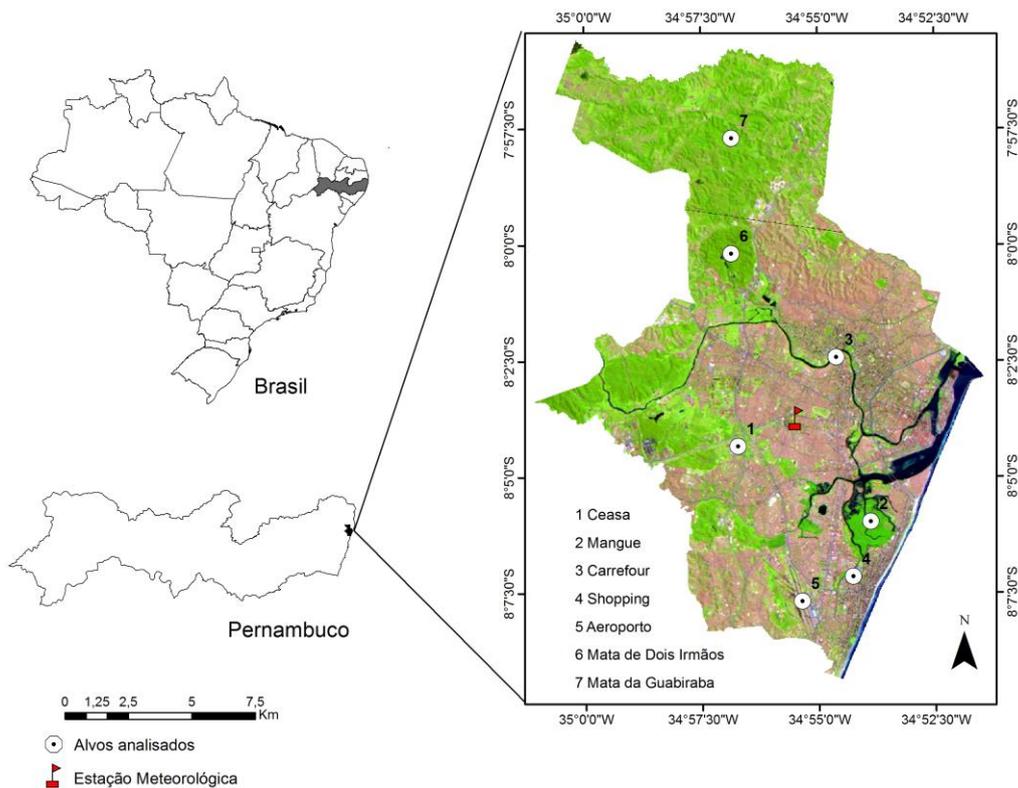


Figura 01 - Localização da área objeto do estudo. Mapa do Brasil, mapa de Pernambuco e imagem do TM Landsat 5 destacando a cidade do Recife na composição R(5), G(4), B(3) e alguns alvos analisados.

2.1. DADOS ORBITAIS

Foram utilizadas seis imagens digitais geradas pelo sensor Mapeador Temático (Thematic Mapper – TM), abordo do satélite Landsat 5, obtidas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, características apresentadas na Tabela 1. O recorte espacial da cidade do Recife realizado pelo INPE, compreende duas imagens referentes à órbita 214 e pontos 66 e 67. A seleção das imagens baseou-se na disponibilidade na cobertura espacial da área e na menor cobertura de nebulosidade. As cenas TM Landsat 5 foram empilhadas e corrigidas geometricamente, e posteriormente foi realizado o mosaico e a exclusão dos números digitais referentes a nuvens e sombras de nuvens através

da realização de uma classificação supervisionada. O intervalo temporal compreende 13 anos referentes às estações do inverno e início do verão. Nas datas onde ocorreu a passagem do satélite não foi registrado eventos de precipitação na área, proporcionando assim maior precisão na escolha dos pixel quente para calibração da resistência aerodinâmica.

Também foi utilizado o Modelo de Elevação Digital (MED) adquirido na Embrapa Monitoramento por Satélite (Brasil Relevo) do produto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) referente aos mosaicos SB-25-Y-C e SC-25V-A. As imagens foram utilizadas como base no cômputo da transmitância atmosférica.

MOREIRA, E.B.M, NÓBREGA, R.S., SILVA, B.B. e RIBEIRO, E.P.
O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

Tabela 01 - Descrição das bandas e faixas espectrais correspondentes ao TM - Landsat 5, coeficientes de calibração mínimo (a) e máximo (b), irradiância solar espectral ($K\lambda$) no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Faixa espectral (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)							
		01/03/1984 até 04/05/2003		05/05/2003 até 01/04/2007		Após 02/04/2007		$K\lambda$ (λ_i) ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)	
		a	b	a	b	a	b		
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	152,10	-1,52	193,00	-1,52	169,00	1957	0,93
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	296,81	-2,84	365,00	-2,84	333,00	1826	0,274
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	204,30	-1,17	264,00	-1,17	264,00	1554	0,233
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,90	-1,51	206,20	-1,51	221,00	-1,51	221,00	1036	0,155
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	27,19	-0,37	30,20	-0,37	30,2	215,0	0,032
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	1,2378	15,303	1,2378	15,03	-	-
7 (IV-médio)	2,10 – 2,35	-0,15	14,38	-0,15	16,50	-0,15	16,50	80,67	0,012

Fonte: Adaptado de Chander *et al.* (2007).

2.2. DADOS MICROMETEOROLÓGICOS

São utilizados os seguintes dados micrometeorológicos complementares para implementação do modelo SEBAL: velocidade do vento a uma altura de 10m da superfície, temperatura do ar e umidade relativa do ar, ambos no instante da passagem do satélite. No computo da transmissividade atmosférica foi utilizado a pressão atual de vapor e a pressão de saturação, estimados com os parâmetros supracitados. Estes dados foram obtidos junto

ao Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA), da PCD (Plataforma de Coleta de Dados) pertencente ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) situada no bairro do Bongi, em -8.059280° latitude e -34.959239° de longitude, Figura 1, área centro-leste da região em estudo. A Tabela 2, apresenta as informações coletadas da PCD (Plataforma de Coleta de Dados), assim como as que foram extraídas das imagens.

Tabela 02 - Parâmetros utilizados na calibração e no cômputo do balanço de radiação, balanço de energia e seus componentes, obtidos das imagens e da estação meteorológica automática (PCD Recife).

DJ	216	269	238	209	249	268
Data da Imagem	04/08/1998	26/09/2000	26/08/2006	28/07/2007	06/09/2010	25/09/2011
E ($^\circ$)	47,0266	58,2887	55,6194	48,7782	56,6385	60,4358
Cos Z	0,7317	0,8507	0,8253	0,7522	0,8352	0,8698
Hora	12:07:48	12:07:49	12:22:36	12:22:59	12:19:42	12:17:46
dr	0,9723	0,9973	0,9809	0,9704	0,9864	0,9967
T _{ar} ($^\circ\text{C}$)	22,5	25,0	24,5	21,0	21,0	22,5
UR%	96	80	100	98	88	90

DJ: Dia Juliano; E ($^\circ$) = Ângulo de elevação solar, cos Z = Cosseno do ângulo zenital solar, Hora: (Tempo Central GMT), dr: Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol; Tar ($^\circ\text{C}$): Temperatura do ar; UR% = Umidade relativa do ar

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

2.3. O MODELO SEBAL - SURFACE ENERGY BALANCE ALGORITHM FOR LAND

O modelo (ou algoritmo, como denominado em alguns trabalhos) SEBAL, é um método que objetiva a estimativa dos componentes do balanço de energia, tendo como base combinações empíricas e parametrizações físicas (BASTIAANSSEN et al., 1998). O algoritmo é sustentado com imagens de satélite que propiciam a determinação do albedo e temperatura da superfície, além de outras informações usualmente obtidas em estações meteorológicas de superfície (BASTIAANSSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2002; SILVA e BEZERRA, 2006; BEZERRA et al., 2008).

Vários estudos em diversos países tem utilizado esse modelo e apresentado resultados com alta precisão no balanço de energia e evapotranspiração (BASTIAANSSEN et al., 1998) com intuito de quantificação das perdas de água da superfície para atmosfera. A primeira aplicação do método foi realizada no Egito por Bastiaanssen em 1995 e posteriormente em outros países do Mediterrâneo, como Turquia Bastiaanssen (2000), Grécia (ALEXANDRIDIS et al., 2008; SPILIOPOULOS et al., 2009) e, recentemente Chipre (PAPADAVID et al., 2011), Grécia (SPILIOPOULOS et al., 2012), Brasil (SILVA; BEZERRA, 2006; TEIXEIRA et al., 2009 a,b).

2.4. SALDO DE RADIAÇÃO INSTANTÂNEO

O cômputo do saldo de radiação instantanea (Rn) foi realizado através da seguinte equação:

$$Rn = R_{SI}(1 - \lambda) + R_{L1} - R_{L1} - (1 - \epsilon_0)R_{L1} \quad (1)$$

em que R_{SI} é a radiação de onda curta incidente em cada pixel, λ é o albedo corrigido de cada pixel, R_{L1} é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção do pixel, ϵ_0 é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ϵ_0 é a emissividade de cada pixel da cena estudada.

2.5. FLUXO DE CALOR NO SOLO

O fluxo de calor constitui-se na segunda dos três componentes do balanço de energia a ser estimado. Para tanto, se usa o saldo de radiação instantâneo estimado (Rn) na etapa anterior e uma relação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia:

$$G = T_s / \alpha(0,0038.\alpha + 0.0074.\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4)Rn \quad (2)$$

em que: T_s é a temperatura da superfície (°C), α é o albedo da superfície e NDVI (Índice de vegetação da diferença normalizada).

2.6. FLUXO DE CALOR SENSÍVEL

Mediante a obtenção do Rn e G nas etapas anteriores é possível calcular o fluxo de calor sensível, construindo assim a terceira partição do balanço de energia, entendido como o percentual de calor transferido para o ar através da condução e/ou convecção em virtude da diferença de temperatura, destacando-se como a etapa mais relevante e complexa do SEBAL, envolvendo uma série de correções para obter resultados mais precisos.

A estimativa do fluxo de calor sensível H ($W m^{-2}$) é obtido com base na velocidade do vento e na temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis da superfície segundo Bastiaanssen et al. (1998), conforme equação:

$$H = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{r_a} \quad (3)$$

em que ρ é a densidade do ar, c_p é o calor específico do ar, ΔT (K) é a diferença de temperatura entre a superfície e um nível de referência e r_a é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor, sendo H função do gradiente vertical de temperatura, rugosidade da superfície e velocidade do vento. Para a sua obtenção faz-se necessário o conhecimento da velocidade do vento e na seqüência a resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_a e valores de Rn e G em dois pixels âncoras, através dos

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

quais será possível determinar a variação de temperatura (dT). Mais detalhes sobre as equações podem ser obtidos em Allen et al. (2002), Trezza (2002), Silva e Bezerra (2006), Moreira (2014).

Inicialmente, é determinada a velocidade de fricção u^* (m s⁻¹), calculada usando-se o perfil logarítmico do vento em atmosfera com equilíbrio neutro, através da equação:

$$u_x = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (4)$$

em que k é constante de Von Karman = 0,41(FILHO et al., 1992), u_x é a velocidade do vento na altura z_x e z_{0m} é o coeficiente de rugosidade para o transporte de momento (m), obtido através da altura (h) da vegetação média existente no entorno da estação meteorológica, que segundo Brutsaert (1982) é dada por $z_{0m} = 0,12 h$.

Quando aplicado no meio rural, o modelo adota a parametrização que a velocidade do vento projetada para um nível de 10 metros de altitude não será afetada pela rugosidade da superfície, esta altura é denominada de blending height, e utilizada para o cálculo do calor sensível.

Em um ambiente urbano este valor de 10 metros não é uma parametrização adequada. Edifícios com mais de 10 metros, topografia acidentada e ocupação em áreas de morro são exemplos de que o parâmetro precisa ser modificado.

É nesse momento que há a necessidade de adaptar o modelo SEBAL para o ambiente intraurbano. A exatidão do modelo SEBAL muda com o grau de heterogeneidade da superfície e com o tamanho do pixel (MEDINA et al., 1998; BASTIAANSEN et al., 1998; TIMMERMANS et al., 2011).

No caso do Recife, a altitude média é de 4 metros, porém há localidades que se localizam até 2 metros abaixo do nível do mar e mais de 150 metros acima do mar. Moreira (2014) validou a modificação na parametrização para verificar a

influência da parametrização nos resultados. O autor constatou para Recife o que os autores acima também concluíram sobre a influência da heterogeneidade da cobertura da terra.

Devido o mosaico de ocupação do espaço geográfico da cidade do Recife e a variabilidade topográfica, foi adotado Z de 200 metros. A maior edificação vertical da cidade possui altura máxima de 148m, conforme estudo realizado por Goncalves et al. (2011). Além disso, para o melhor desempenho do modelo, é necessário a determinação de um pixel quente e um pixel frio, o mais preciso possível. No caso de áreas urbanas, mais uma vez a diversidade da paisagem não pode ser aproximada de uma homogeneidade em uma área rural.

Neste caso, o pixel frio (âncora) deve ser, sobretudo sobre e/ou próximos de corpos hídricos, possibilitando assim alta amplitude com o pixel quente (âncora) e, que a feição seja contemplada pela resolução espacial do satélite. No trabalho em análise, a seleção dos pixels supracitados foi realizada com base na carta de temperatura da superfície, onde o pixel frio situou-se dentro do Manguezal do Pina (superfície com água), enquanto o pixel quente foi representado no Shopping Center Recife (superfície impermeável). Estes pixels âncoras são utilizados para definir uma relação linear entre a temperatura da superfície (T_s) e a dT, visando estabelecer os valores constantes de calibração de dT (a e b). O fluxo de calor sensível H_{quente} (W m⁻²), então é dado por:

$$H_{quente} = R - G = \frac{\rho c_p (a + bT_{sup})}{r_{ah}} \quad (5)$$

em que ρ (kg.m⁻³) é a massa específica do ar, c_p o calor específico a pressão constante (J.kg⁻¹ k⁻¹) e T_{sup} (°C), R_n (W m⁻²) e G (W m⁻²) foram obtidos no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obteve-se:

$$a + bT_{sup} = r_{ah} (R_n - G) / \rho c_p \quad (6)$$

Como no pixel frio dT = 0, ou seja, $a + bT = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo de a e

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

b. Logo, e obtêm-se H. No entanto, os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem, tão somente, como valores iniciais de processo iterativo, e que nas etapas seguintes se considerada, efetivamente, a condição de estabilidade de cada pixel. Dessa forma, devido os efeitos turbulentos afetar as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov, (BASTIAANSSEN, 2000) sendo considerada no cálculo do fluxo de calor sensível em todos os pixels da área de estudo, realizada pela seguinte equação:

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_{sup}}{KgH} \quad (7)$$

em que ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}); c_p é o calor específico do ar à pressão constante; u_* é a da velocidade de fricção de cada pixel das imagens ; T_s é a temperatura da superfície (K); g é o módulo do campo gravitacional terrestre e H é o fluxo de calor sensível (W m^{-2}), obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade.

2.7. FLUXO DE CALOR LATENTE

O último componente do balanço de energia pode ser definido como fluxo total do transporte de água da superfície do solo ou da água para a atmosfera, pelo processo de evaporação e do transporte de água da superfície de folhas da vegetação através do processo de transpiração (LIU, 2006). O cálculo deste parâmetro se deu como resíduo do balanço de energia (BASTIAANSSEN et al., 2007; ALLEN et al., 2007; SILVA e BEZERRA, 2006; BEZERRA et al., 2008):

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição temporal e espacial do fluxo de calor sensível (H) pode ser observada na Figura 2. Aos valores menores que 110 W m^{-2} representam a classe inferior, que são feições com cobertura verde e corpos hídricos. Os valores, entre 111 e 320 W m^{-2} representam a classe intermediária, que é a mancha urbana,

enquanto os valores acima de 321 W m^{-2} representam a classe superior, que são áreas com intenso uso do solo como ambientes antropizados grandes. A classificação está em consonância com Araújo et al. (2010) na mesma área objeto desse estudo, os autores encontram intervalos entre 350 e 500 W m^{-2} através do modelo BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) e Sousa (2010), através do modelo SEBAL, para a área urbana da cidade de Paraíso do Sul. Os valores em branco são devido a presença de nuvens na atmosfera.

A variabilidade temporal sofre interferência do comportamento sazonal da radiação solar, como observado na interrupção do aumento temporal de H, no ano de 2006, porém a mancha urbana permanece com valores elevados, destacando-se quase todos os bairros com predomínio de valores intermediários. Best e Grimmond (2014) comentaram sobre a importância do estado inicial das condições atmosféricas nos estudos sobre superfícies urbanas, as autoras destacaram o papel da nebulosidade interferindo no desempenho dos modelos, sobretudo, de balanço de radiação.

Comparando a primeira cena do satélite (1998) com a última (2011), evidencia-se uma mudança no arranjo espacial dos valores de H, sendo possível constatar o predomínio de intervalos superiores a 320 W m^{-2} na mancha urbana. Nas áreas verdes e corpos hídricos a radiação absorvida é empregada nos processos evapotranspirativos onde existe as trocas de calor por vapor d'água, favorecendo altos valores de LE e baixos de H, portanto não houve alteração dos valores quando comparados com os anos anteriores.

Na parte norte das cenas destacam-se valores inferiores. Nesta, há presença de corpos hídricos e vegetação, como a região da mata de Dois Irmãos e da Guabiraba, seguidos da porção oeste da cena onde se situa o corredor verde da cidade. Outros pontos de destaque são de valores inferiores está na parte sudeste-leste, em direção ao litoral, como rio Capibaribe e o manguezal, na parte sul da cidade. As áreas

MOREIRA, E.B.M, NÓBREGA, R.S., SILVA, B.B. e RIBEIRO, E.P.
O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

vegetadas situadas na região norte das cenas vegetadas acima estão inseridas em unidades de conservação e, portanto, apesar de apresentarem baixos valores de energia disponível para o aquecimento do ar não possuem especulação imobiliária, sobretudo por não estarem inseridas no eixo das conexões

econômicas, ou seja, menor produção/transformação do espaço, com baixa densidade demográfica, sobretudo a região da Guabiraba, localizada no setor norte da cena.

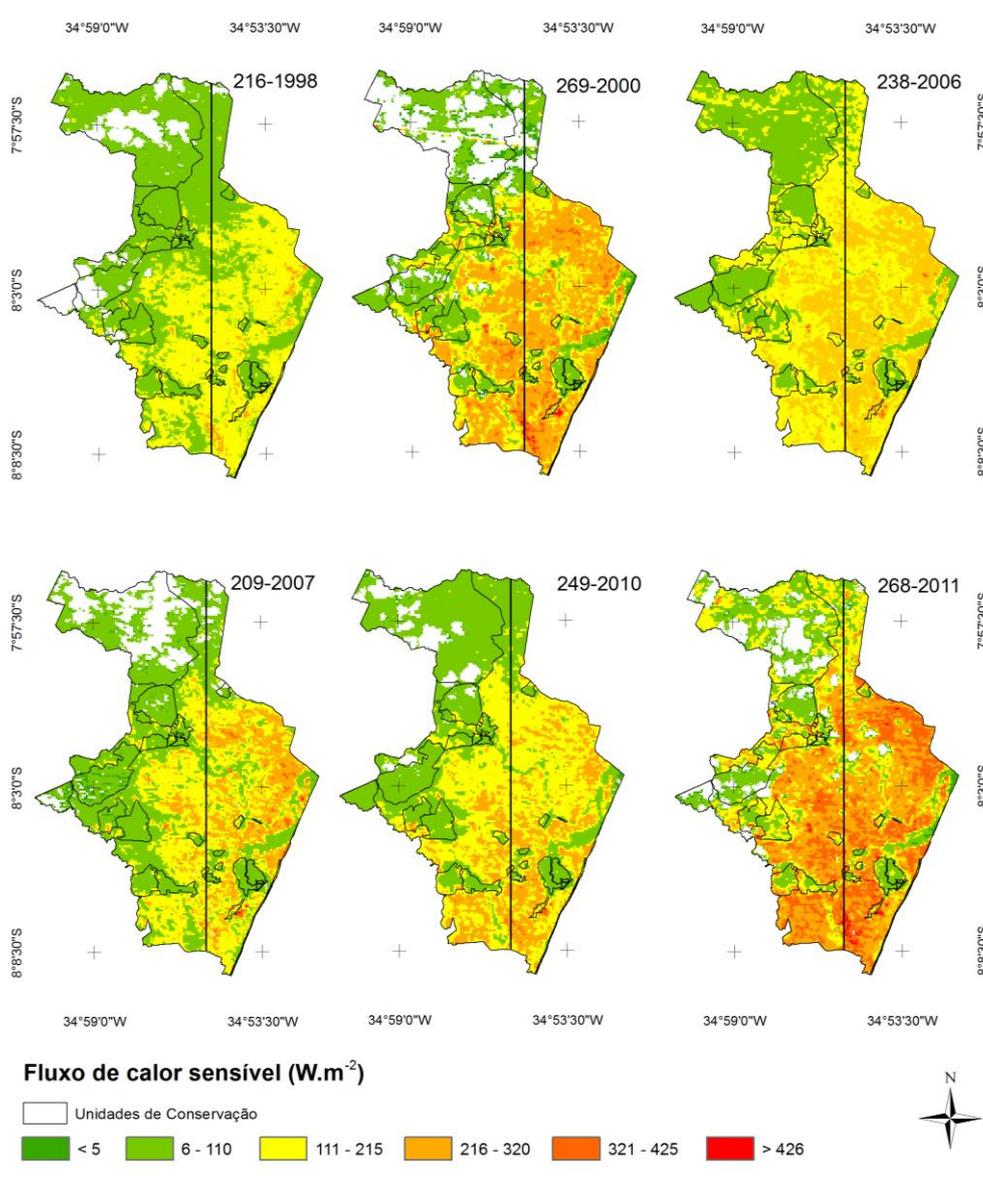


Figura 02 - Variabilidade temporal e espacial do fluxo de calor sensível em Recife, PE, para os anos de 1998, 2000, 2006, 2007, 2010 e 2011.

A Tabela 3 representa a percentagem de pixels em cada classe do fluxo de calor sensível. É possível observar as classes, ($321 < H < 425 \text{ W m}^{-2}$)

e ($H > 426 \text{ W m}^{-2}$) destacadas em 268/2011 com maior representatividade entre as datas, com percentuais de 16,24% e 0,52%,

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

respectivamente, enquanto a data 209/2007 ($W m^{-2}$), com percentuais em torno de 2,92%. apresentou os menores valores na classe ($H < 5$

Tabela 03 - Distribuição percentual das classes do fluxo de calor sensível para as datas em análise.

H ($W m^{-2}$)	216/1998	269/2000	238/2006	209/2007	249/2010	268/2011
$H < 5$	0,19%	1,63%	0,03%	2,92 %	0,53 %	1,26 %
$6 < H < 110$	54,36 %	32,90 %	31,33 %	47,01 %	43,56 %	23,45 %
$111 < H < 215$	43,16 %	25,56 %	42,48 %	32,93 %	39,35 %	24,26 %
$216 < H < 320$	2,27 %	35,61 %	25,91 %	14,93 %	16,25 %	34,27 %
$321 < H < 425$	0,02%	4,07 %	0,27 %	0,77 %	0,31 %	16,24 %
$H > 426$	0 %	0,23 %	0 %	0,04 %	0 %	0,52 %

Os maiores valores são observados nas áreas onde o adensamento construtivo é mais intenso e com baixo percentual de áreas verdes e superfícies líquidas. Nessas áreas toda a energia solar está sendo empregada para aquecer a temperatura da superfície e, com isto propiciam aumento da temperatura do ar vertical, considerando as características de absorção térmica presentes nas propriedades dos materiais construtivos. O Shopping Center Recife e o Aeroporto Internacional dos Guararapes são as áreas de maior aprisionamento de energia disponível para o aquecimento, localizadas na

parte sul (áreas em vermelho, mais visíveis na cena de 2011).

Para analisar a influência da vegetação, com base no NDVI, no fluxo de calor sensível H, selecionou-se cinco pontos de 2011 (Figura 3). Os pontos Ceasa, Shopping Recife, Mangue, Aeroporto e Carrefour, apresentaram valores de H superiores a $400 W m^{-2}$, enquanto o ponto Manguezal apresentou valores de H inferior a $55 W m^{-2}$, validando a relação inversa existente entre a magnitude do H e as áreas com baixo índice de vegetação. (Figura 4).



Figura 03 – Localização Espacial dos Pontos Analisados: Ceasa, Shopping Recife, Mangue, Aeroporto e Carrefour.

Os pontos com os maiores valores de H possuem coberturas com materiais de alta absorção de calor e contribuem significativamente para o aprisionamento da energia empregada para a elevação do gradiente

de temperatura do ar próximo a superfície, criando ambiente propício ao surgimento das ilhas de calor em escala local. (GRIMMOND; OKE, 2002; LORIDAN/ GRIMMOND, 2012).

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

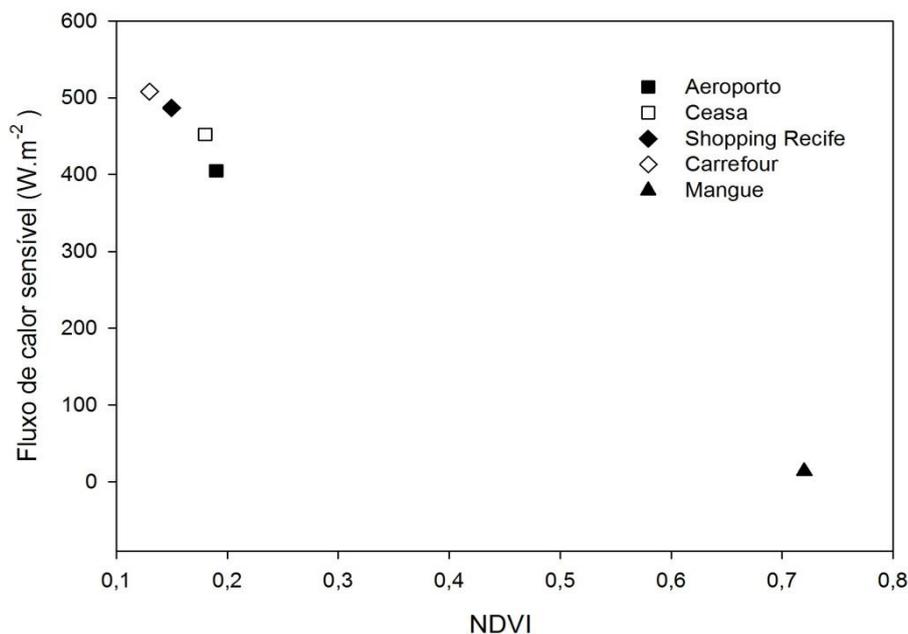


Figura 04 - Relação entre os fluxos de calor sensível e o índice de vegetação NDVI em 2011 para os seguintes pontos: Manguezal, Carrefour, Shopping Recife, Aeroporto e Ceasa.

Procurando detalhar a espacialização do H e a relação com o tipo de cobertura do solo dentro da malha, traçou-se um transecto sob forma de perfis compreendendo uma extensão de aproximadamente 22.500m, compreendendo o eixo Norte/Sul da cidade, visando a identificação de pontos em destaque (o transecto está representado na (Figura 4), durante os anos de 1998 e 2011 (Figura 5).

Em 1998 observa-se menor representação dos pontos entre os perfis, destacando-se o Aeroporto situado na distância 21.000 metros, com maior valor, compreendendo 300 W m⁻², sendo os menores valores localizados nas áreas de mata atlântica e fragmento de mata

ciliar do Rio Capibaribe com distância de aproximadamente 0 e 11.000 m, respectivamente, apresentando valores inferiores a 25 W m⁻². Os valores intermediários compreendidos entre 100 e 150 W m⁻² apresentaram maior representatividade em todo perfil, identificados como mancha urbana. Em 2011 observa-se menores valores representados entre a distância 0 e 5.000m indicando a mudança espaço-temporal na configuração do uso do solo com predominância de intensa urbanização.

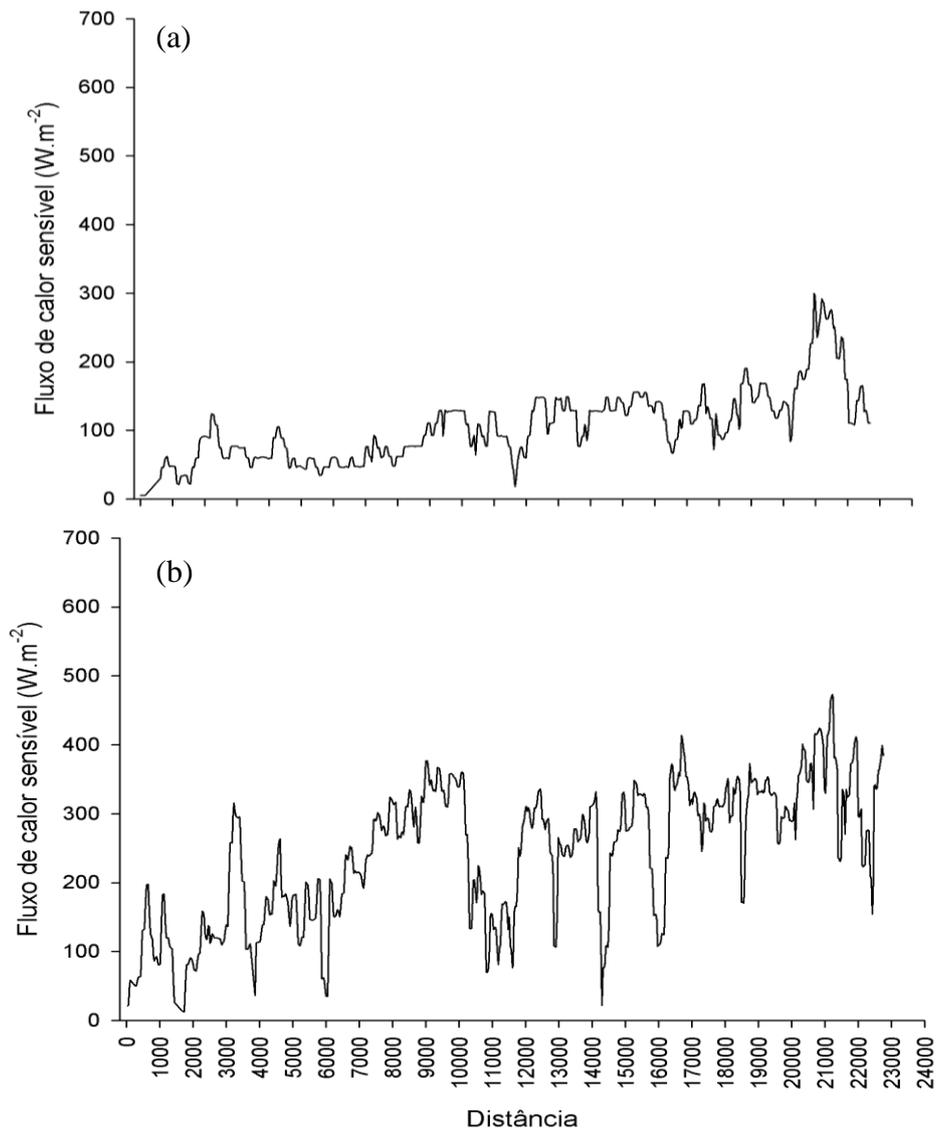


Figura 05 - Perfil norte-sul do fluxo de calor sensível representado pelo transecto Norte Sul, com distância 0 - 22.500 m, em 216/1998(a) e 268/2011(b).

Os pontos situados entre as distâncias 8.000, 10.000, 12.000 e 21.000 m aproximadamente apresentam valores altos, destacando intervalos superiores a $300 W m^{-2}$ e, com maior magnitude em 2011, situados na

porção sul do perfil. Na Figura 6, observa-se a imagem dos pontos com pico nos valores, para analisar o tipo de cobertura superficial (do ponto de vista do satélite)



Figura 06. Pontos com valores elevados correspondendo às distâncias: 8.000, 10.000, 12.000 e 21.000 m, respectivamente.

Conforme pode ser observado, os materiais presentes são compostos por coberturas de zinco, alumínio e amianto, e betume, materiais com propriedades absorvedoras capazes de converter energia em calor com eficiência, sendo responsáveis em proporcionar maior percentual de energia a ser transferida para aquecimento do ar junto a superfície e, refletindo no surgimento de zonas quentes em escala local.

Na Figura 7 representa-se a distribuição espaço-temporal do fluxo de calor latente (LE). Os valores entre 0 a 210 W m^{-2} (cores vermelhas e laranjas) representam as classes inferiores, entre 211 e 430 W m^{-2} , tem-se a classe intermediária e acima de 321 W m^{-2} a classe superior. Durante todos os anos se destacam a classe superior na parte norte e oeste.

A classe intermediária na parte leste das cenas, sendo com maior representatividade entre

os anos de 1998 e 2010, podendo está associado ao evento pluviométrico ocorrido onde proporcionou aumento de umidade na superfície. A classe inferior é mais representada nas áreas onde o adensamento construtivo é mais evidente, em destaque a parte leste das cenas. Os pontos localizados no Shopping Recife e Aeroporto permaneceram com a mesma configuração em todas as datas analisadas, com valores inferiores a 100 W m^{-2} .

A Tabela 4, apresenta a percentagem de pixels em cada classe do fluxo de calor latente (LE), evidencia-se que a classe entre os intervalos $321 < LE < 430 \text{ W m}^{-2}$ referente a data 216/1998, apresenta a maior distribuição espacial entre todas as cenas, com percentual de 54,15%, enquanto a classe de menor intervalos $LE < 100 \text{ W m}^{-2}$, evidenciou a maior representação 2,61% em 268/2011.

MOREIRA, E.B.M, NÓBREGA, R.S., SILVA, B.B. e RIBEIRO, E.P.
O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

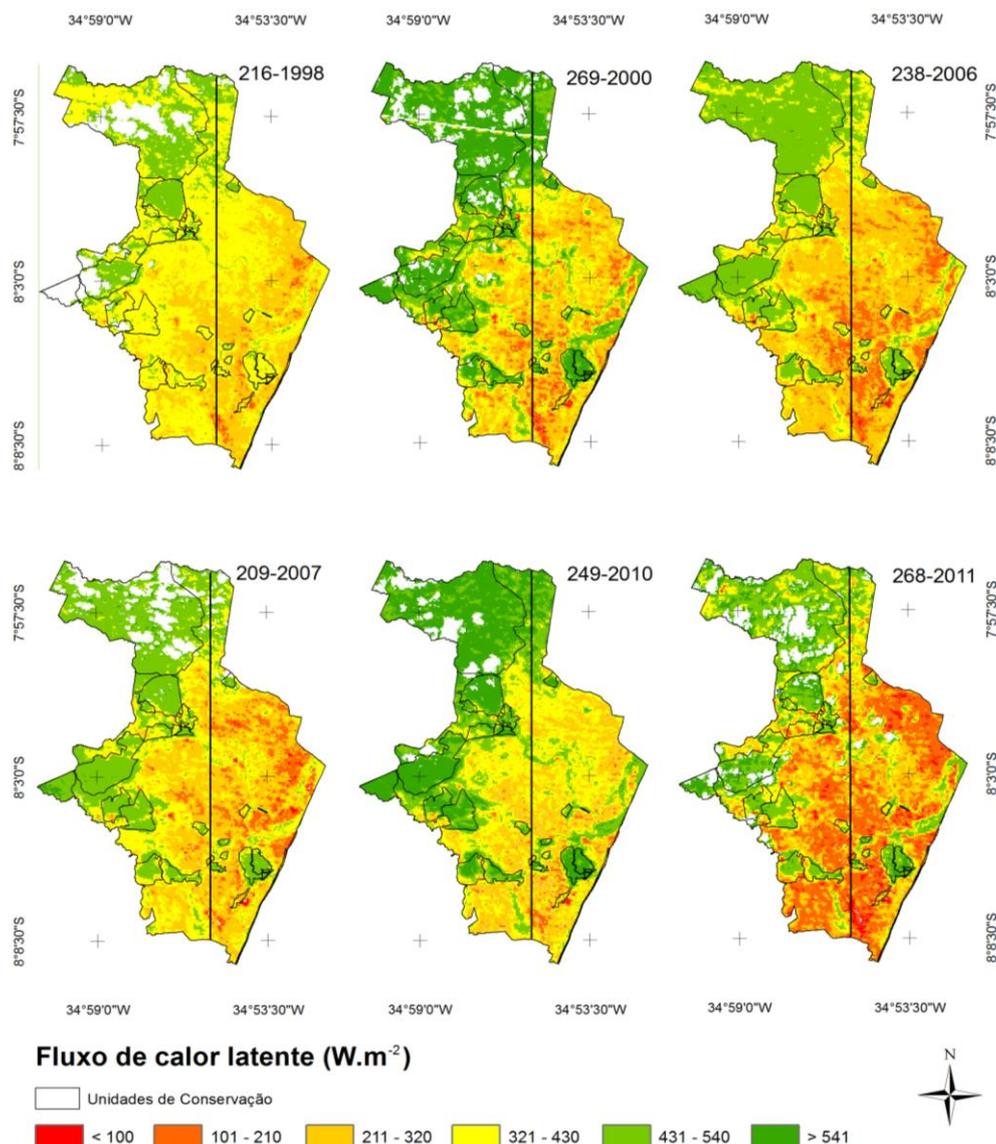


Figura 07. Variabilidade temporal e espacial do fluxo de calor latente em Recife, PE, para os anos de 1998, 2000, 2006, 2007, 2010 e 2011.

Tabela 04 - Distribuição percentual das classes do fluxo de calor latente para as datas em análise.

LE (W m ⁻²)	216/1998	269/2000	238/2006	209/2007	249/2010	268/2011
LE < 100	0,05 %	0,54 %	0,42 %	0,49 %	0,12 %	2,61 %
101 < LE < 210	2,11 %	6,74 %	10,69 %	7,67 %	2,22 %	26,40 %
211 < LE < 320	24,88 %	23,93 %	34,90 %	29,19 %	20,55 %	22,13 %
321 < LE < 430	54,15 %	22,48 %	21,70 %	27,73 %	29,46 %	16,40 %
431 < LE < 540	18,32 %	20,26 %	31,81 %	34,92 %	21,39 %	25,97 %
LE > 541	0,48 %	26,05 %	0 %	0 %	26,23 %	6,49 %

Do mesmo modo que para o H, procurando detalhar a espacialização do LE e a relação com o tipo de cobertura do solo dentro da malha, traçou-se um transecto sob forma de

perfis compreendendo uma extensão de aproximadamente 22.500m, compreendendo o eixo Norte/Sul da cidade, visando a

identificação de pontos em destaque, durante os anos de 1998 e 2011 (Figura 8).

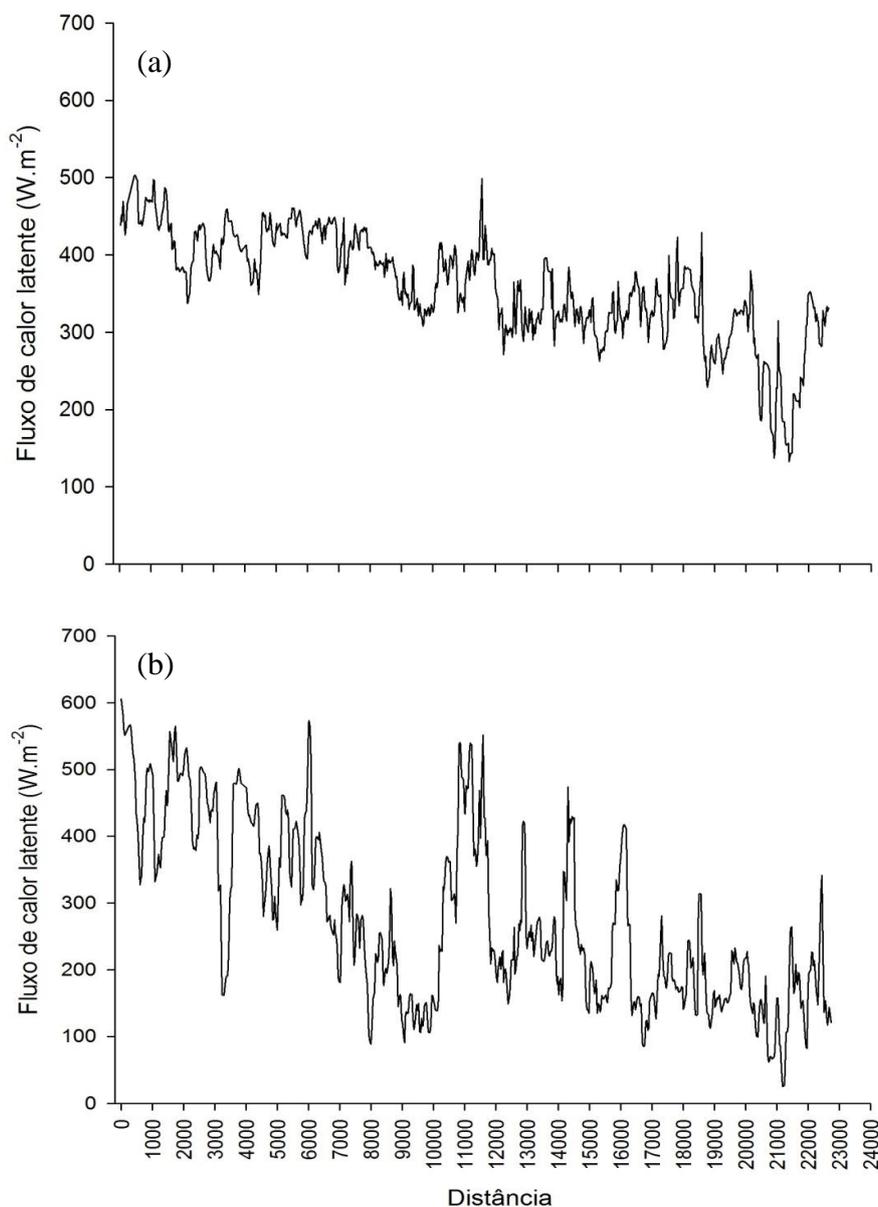


Figura 8. Perfil norte-sul do fluxo de calor latente representado pelo transecto Norte Sul, com distância 0 - 22.500 m, em 216/1998(a) e 268/2011(b).

A análise evidencia que na parte inicial dos perfis, entre a distância 0 e 5.000 m, localizado nas feições compreendidas por cobertura verde, estão os pontos com maiores valores, com intervalos superiores a 450 W m⁻². Foi observado, também, padrão de declínio entre os valores após 5.000m, voltando a ter alguns picos nos pontos representados por características semelhantes ao supracitado e

corpos hídricos, encontrados entre as distâncias 11.500, 14.000, 18.000 e 22.500 m, respectivamente, representados na Figura 9.

Os menores valores foram observados na distância de aproximadamente 22.000 metros, localizados no Shopping Recife, apresentando intervalos próximos de 0 (zero) e, valores intermediários inferiores a 200 W m⁻² situados na malha urbana. Em 1998 os valores nos pontos

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

apresentaram-se de modo mais homogêneo. Já os maiores valores apresentam-se distribuídos em regiões distintas e com representação reduzida na superfície urbana, entretanto exercem influência em escala local na conversão da radiação solar incidente em umidade, proporcionando temperaturas amenas nas áreas adjacentes.

De um modo geral, os resultados sugerem que o modelo particiona o balanço de radiação com coerência, o que possibilita a utilização em estratégias de planejamento urbano sustentável para mitigar os efeitos climáticos urbanos negativos e entender como o uso do solo intraurbano influencia nos condicionantes climáticos.

Diversos estudos mostram que os centros da cidade são caracterizados por complexidade temporal e espacial na dinâmica

do uso do solo. Lombardo (1985) aponta as modificações ocorridas no uso do solo, especificamente o incremento de materiais absorvedores de calor, a exemplo os usados na construção civil como responsáveis no aquecimento da superfície. É evidente que as características da superfície, tais como a disposição da rugosidade dos elementos, os locais de fonte de calor e umidade, a textura do material que recobre a superfície, desempenham um papel importante na formação das condições climáticas da camada limite urbana, como Kottahaus e Grimmond (2014) comentam. Quando se trata de grandes áreas urbanas, como Recife, esta complexidade fica mais evidente, com misturas de materiais sobre a superfície, como pavimentação de asfalto, concreto e rochas, junto ou distante da vegetação (como em parques e shoppings).



Figura 09. Pontos com valores elevados de (LE) correspondendo às distâncias: 11.500, 14.000, 18.000 e 22.500 m, respectivamente.

Uma característica particular do local de estudo observada através dos resultados é que a cidade se distingue dos padrões climáticos urbanos de grandes cidades no Brasil e no mundo por apresentar um balanço de energia com valores mais elevados distantes do centro. A construção clássica do clima urbano segue o modelo de ocupação do espaço radial, na maior parte das cidades, com maiores valores no centro, diminuindo para a periferia. Já em Recife, os maiores valores são encontrados na parte Sul, onde está o bairro de Boa Viagem, zona econômica mais ativa, com grandes empreendimentos imobiliários, em contrapartida no próprio bairro, há o manguezal, com

considerável área verde, e particionamento de energia contrário.

Chirsten et al. (2011) passaram a chamar a relação homem-cidade-urbanização-clima de pegada climatológica, que deve ser calculada por períodos individuais espaço-temporais. Os resultados aqui também podem ser direcionados semelhante ao dos autores, uma vez que esta abordagem demonstrou ser benéfica para interpretação de fluxos urbanos.

O armazenamento de calor sensível em áreas mais antropizadas, como no shopping Recife e Aeroporto alteram não apenas o valor pontual, mas ao redor do ponto também, há uma distância que não foi determinada neste trabalho, mas que através desta metodologia, é

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

possível de aferição, porém não fazendo parte do escopo deste trabalho. Este calor sensível excede o calor latente em grande parte da cidade.

Há uma questão termodinâmica que precisa ser explorada com base nos resultados aqui apresentados. As áreas vegetadas podem ter potencial para incrementar e manter o fluxo de calor de latente sobre a cidade, contribuindo para prolongar o suporte de umidade para a formação de precipitação, ao mesmo tempo que com os maiores valores do fluxo de energia sensível a leste da região, pode vir então, a convergir umidade do corredor oeste e também do oceano Atlântico. Caso esta mudança no balanço de energia venha a interferir na precipitação, os impactos em uma área mais urbanizada, consequentemente que produz mais calor sensível, tendem a intensificar. Fato semelhante também foi apontado por Kotthaus e Grimmond (2013) no centro de Londres.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada baseada em detecção remota implementado a imagens de satélite TM Landsat 5 com uso do algoritmo SEBAL, representou de forma coerente a distribuição dos valores na superfície em função morfologia urbana, possibilitando um avanço significativo nas informações dos fluxos de energia da superfície disponíveis para o monitoramento do clima intraurbano face às mudanças temporais e espaciais do uso do solo.

A superfície urbana da cidade do Recife contemplada por consideráveis percentuais de superfícies impermeáveis e reduzida cobertura arbórea exerce influência no balanço de energia, alterando significativamente as trocas entre os fluxos de radiação, proporcionando elevados valores de fluxos de energia disponível para aquecimento do ar (H) em toda extensão, destacando-se com maior magnitude na RPA 6 (Sul).

Enquanto o fluxo de calor latente (LE) apresentou-se reduzido em sua distribuição espacial concentrados nas Unidades de Conservação, áreas verdes e corpos hídricos. Evidenciando com isto o intenso uso do solo de

forma não planejada e refletindo sobremaneira na qualidade de vida da população, onde as zonas quentes são demarcadas com maior abrangência em detrimento de áreas produtoras de umidade. Considerando os resultados obtidos no particionamento de energia as informações poderão servir como subsídios nas práticas e tomadas de decisão dos órgãos competentes no planejamento visando à mitigação de ambientes climaticamente agradáveis, inseridos nos arranjos espaciais da cidade.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRIDIS, T. K.; CHEMIN, Y. CHERIF, I, TSAKOUKIS, G, GALANIS, G, ARAMPATZIS, G, ZALIDIS, GC, SILLEOS, NG, STAVRINOS, E. **Improving spatial resolution of agricultural water use estimation using ALOS AVNIR-2 imagery. In Proceedings of ALOS.** Principal Investigators Symposium 2008, 03-07 November, Rhodes, Greece, 2008.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TEREZZA, R. **Sebal (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and User Manual – Idaho Implementation.** Version 1.0, 2002.

ALLEN, R. G, TASUMI, M.; TREZZA, R. **Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.133, p. 380-394, 2007.

ALMEIDA JÚNIOR, NL. **Estudo do clima urbano: uma proposta metodológica.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Física e Meio Ambiente, UFMT, 109p, 2005.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C, GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift, v. 22, nº6, 711–728, 2014.

AMORIM, M. C. C. T. **Intensidade e forma da ilha de calor urbana em Presidente Prudente/SP:**

O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL

- episódios de inverno. Geosul, Florianópolis, 20 (39): 65-82, 2005.
- ARAÚJO, T. L .S.; SOUZA, E. P. **Influência da Superfície no Balanço de Energia e na Intensidade da Precipitação Urbana**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 3, p. 204-217, 2010.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM H.; WANG, J.; MORENO, Y. M. J.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL T. **The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation**. Journal of Hydrology, 21: 213-229, 1998.
- BASTIAANSEN, W.G. M. **SEBAL – based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey**. Journal of Hydrology, 229: 87-100, 2000.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; ZWART, S. J. **SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems**. Agricultural Water Management. v.89, p.287-296, 2007.
- BEST, M. J.; GRIMMOND, C. S. B. (2014). **Importance of initial state and atmospheric conditions for urban land surface models performance**. *Urban Climate*, em publicação, disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095513000540>.
- BEZERRA, B. G. **Obtenção da evapotranspiração diária no Cariri Cearense utilizando imagens Landsat 5-TM e o algoritmo SEBAL**. (2006). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- 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, 23: 305-317, 2008.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation Into the Atmosphere: Theory, History and Applications**. D. Reidel Pub, Co, 1982.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. **Revised Landsat - 5 Thematic Mapper Radiometric Calibration**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v. 4, n. 3, p. 490-494, 2007.
- CHRISTEN A, COOPS NC, CRAWFORD BR, KELLETT R, LISS KN, OLCHOVSKI I, TOOKE TR, VAN DER LAAN M, VOOGT JA. **Validation of modelled carbon-dioxide emissions from an urban neighbourhood with direct eddy-covariance measurements**. Atmospheric Environment, 45: 6057-6069, 2011.
- CORRÊA, A. C. B. **Contribuição à análise do Recife como um geossistema urbano**. Revista de Geografia (Recife), v. 23, n. 3, 86-101, 2006.
- FILHO VPS, VISWANADHAM Y, SANTOS JM. **Determinação da constante de von-Karman a partir de dados coletados na Amazônia**. Revista Brasileira de Meteorologia, 7 (1): 535-541, 1992.
- GOMES, L. C. F.; SANTOS, C. A. C.; ALMEIDA, H. A. **Balanço de Energia à Superfície para a Cidade de Patos-PB Usando Técnicas de Sensoriamento Remoto**, Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, p.15-28, 2013.
- GONÇALVES, R. M.; PACHECO, A. P.; TANAJURA, E. L. X.; SILVA, M. L. **Urbanização costeira e sombreamento na praia de Boa Viagem, Recife-PE, Brasil**, Revista de Geografia Norte Grande, v. 54, p.241-255, 2013.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. **Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS)**. Journal of Applied Meteorology, v. 41, p. 1-19, 2002.
- KOTTHAUS, S.; GRIMMOND, C. S. B. **Energy exchange in a dense urban environment - Part II:**

Impact of spatial heterogeneity of the surface.

Urban Climate, 10, 281–307, 2014.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande, ed. Uniderp, 2006.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo, 1 ed. Hucitec, 1985.

LORIDAN, T. and GRIMMOND, C. S. B. **Characterization of energy flux partitioning in urban environments: links with surface seasonal properties**. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51 (2). 219-241. ISSN 1558-8432 doi: 10.1175/JAMC-D-11-038.1

MEDINA, J. L.; CAMACHO, E.; RECA, J.; LÓPEZ, R.; ROLDÁN, J. **Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on Remote Sensing and GIS**. *Physical and Chemistry of the Earth*, vol. 23, No. 4, 427-432, 1998.

MONTEIRO, A.; CARVALHO, V. **Clima e planejamento regional**. IN: *Climatologia urbana e regional: questões teóricas e estudos de caso*. Orgs.: Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim, João Lima Sant'Anna Neto; Ana Monteiro, São Paulo, 2013.

MOREIRA, E. B. M. **Balço de energia e evapotranspiração na cidade do Recife por sensoriamento remoto**. (2014). Tese. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

PAPADAVID G.; HADJIMITSIS D.; TOULIOS L., MICHAELIDES L. **Mapping Potatoes Crop Height and LAI through Vegetation Indices using Remote Sensing, in Cyprus**. *Journal of Applied Remote Sensing*, v.5, p.1-17, 2011.

SANTOS, T. V.; FONTANA, C. D.; ALVES, R.C.M. **Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v.45, p.488-496, 2010.

SILVA, B. B. da., 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, n. 2, p. 174-186, 2006.

SOUSA, A. M. L. **Estimativa dos fluxos de calor a partir de imagens orbitais e aplicação na modelagem hidrológica**. 128f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). 162. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2010.

SPILIOTOPOULOS, M.; MICHALOPOULOU, H.; LOUKAS, A. **Comparison of ground based and satellite derived regional actual evapotranspiration estimation for continental Greece**. *Geophysical Researchs Abstracts*, v. 11, EGU2009-12585, 2009

SPILIOTOPOULOS, M.; LOUKAS, A.; MICHALOPOULOU, H. **Contribution to the Study of Regional Actual Evapotranspiration with the Use of Surface Energy Balance and Remote Sensing for Central Greece**, *Climatology and Atmospheric Physics*, p. 309-315, 2012.

TEIXEIRA, A. H. C.; W. G. M. BASTIAANSEN, AHMAD, M–UD–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.; W. G.M., BASTIAANSEN, AHMAD, M–UD–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 large scale**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, p.477-490, 2009b.

MOREIRA,E.B.M, NÓBREGA,R.S., SILVA, B.B. e RIBEIRO,E.P.
**O MODELO SEBAL PARA ESTUDOS DE CLIMA INTRAURBANO: APLICAÇÃO EM RECIFE, PERNAMBUCO,
BRASIL**

TIMMERMANS, J. W.; JIMÉNEZ-MUNÓZ, J. C.; HIDALGO, V.; RICHTER, K.; SOBRINHO, J. A. **Estimation of the spatially distributed surface energy budget for AgriSAR 2006, part I: remote sensing model intercomparison.** Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v.4, p.465-481, 2011.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control.** (2002). Ph.D. dissertation, Utah State University., Logan, Utah.