

## **INFLUÊNCIA DA EXPANSÃO URBANA EM RECIFE (PE) NO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL ATRAVÉS DE IMAGENS DIGITAIS DO TM LANDSAT 5**

*Elvis Bergue Mariz Moreira<sup>1</sup>, Ranyére Silva Nóbrega<sup>2</sup> Bernardo Barbosa da Silva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Doutorando em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: elvisberg@hotmail.com*

<sup>2</sup> *Professor da Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas, ranyere.nobrega@yahoo.com.br, bbdasilva.ufpe@gmail.com*

*Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901 | Fone PABX: (81) 2126.8277*

*Artigo recebido em 22/10/2012 e aceito em 10/02/2013*

### **RESUMO**

O fluxo de calor sensível (H) é um importante componente do balanço de energia e tem grande relevância em estudos de clima urbano, podendo ser determinante nas áreas susceptíveis ao aquecimento da temperatura do ar e desconforto térmico, subsidiando informações para planejamento urbano e monitoramento de variáveis ambientais. O trabalho em tela objetivou-se analisar a influência da superfície urbana no fluxo de calor sensível H, através do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) na cidade do Recife. Destarte, obteve-se, a estimativa do fluxo de calor sensível mediante imagens multiespectrais do Mapeador Temático do satélite Landsat 5, referente as datas 2000, 2006, 2007, 2010 e 2011. Os resultados encontrados elucidaram para as imagens em estudo, os maiores valores no dossel urbano com estimações acima de  $350 \text{ Wm}^{-2}$  em todas as cenas analisadas, e os menores destacaram-se nas áreas com predomínio de vegetação e superfícies líquidas apresentando valores menores de  $250 \text{ W}^{-2}$ . Observou-se que as mudanças ocorridas no uso do solo ao longo dos anos na cidade do Recife, exerceram influência entre as trocas dos fluxos energéticos e por conseguinte, criam áreas de desconforto térmico e susceptível ao fenômeno das ilhas de calor.

**Palavras-Chave:** área urbana, sebal, fluxo de calor sensível.

### **INFLUENCE OF URBAN EXPANSION ON RECIFE (PE) IN THE HEAT SENSITIVE FLOW THROUGH DIGITAL IMAGES OF LANDSAT 5**

### **ABSTRACT**

The sensible heat flux (H) is an important component of the energy balance and has great relevance in urban climate studies aimed at monitoring environmental variables, which can be crucial in areas susceptible to warming of the air temperature and thermal discomfort. The screen work aimed to analyze the influence of the urban surface sensible heat flux H, through the algorithm SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) in Recife. Thus, we obtained the estimated sensible heat flux through multispectral images of the Landsat Thematic Mapper 5, regarding the dates 2000, 2006, 2007, 2010 and 2011. The results elucidated for the images under study, the highest values in the urban canopy with estimates above  $350 \text{ Wm}^{-2}$  in all the scenes analyzed, and the highlights were lower in areas with a prevalence of vegetation and liquid surfaces with values smaller than  $250 \text{ W}^{-2}$ . It was observed that changes in land use over the years in the city of Recife, exerted influence trade flows between energy and therefore create areas susceptible to thermal discomfort and heat island phenomenon.

**Keywords:** urban area, SEBAL, sensible heat flux

## INTRODUÇÃO

As transformações das propriedades radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmicas que o processo urbano causa na superfície, implicam em alterações no balanço de radiação e no balanço de energia (OKE, et al, 1999).

O fluxo de calor sensível (H) é um importante componente do balanço de energia e tem grande relevância em estudos de clima urbano que visam o monitoramento de variáveis ambientais, podendo ser determinante nas áreas susceptíveis ao aquecimento da temperatura do ar e desconforto térmico. Em virtude das superfícies urbanas apresentarem-se bastante heterogênea com diversos materiais que apresentam capacidade de absorção e reflexão de radiação solar, tais estudos necessitam de um conhecimento apurado da estrutura estudada e a distribuição desses elementos para obtenção de bons resultados.

Nos últimos anos o clima das áreas urbanas vem sendo objeto de estudos em todo o mundo, sobretudo com o atual enfoque do aquecimento global. O intenso crescimento populacional somado as alterações impostas nas superfícies naturais, tais como substituição de áreas verdes por áreas artificiais, contribui na alteração das trocas de energia entre superfície, vegetação e atmosfera, e com isto mais energia está sendo empregada para aquecimento da superfície e aumento da temperatura do ar. Moreira, 2010, concluiu que a cidade do Recife está inserida nesse contexto, apresentando-se com sua superfície com alto índice de impermeabilização e diversos padrões de refletividade e absorção de energia.

A maior parte dos trabalhos realizados no Brasil e no mundo sobre fluxos de energia em áreas urbanas utilizam como metodologia teorias micrometeorológicas e técnicas de observação, dentre estes podem ser destacados, Kerschgens and Kraus (1990), Voogt et al. (2000), Piringer et al. (2002), Grimmond et al. (2002), Lemonsu et al. (2003), Martinez et al. (2005), Niachou et al. (2005), Lagouarde et al. (2005), Newton et al. (2007), Lin (2007), Hidalgo (2008), Li et al. (2008), Oleson et al. (2008), Synnefa et al. (2008), Trusilova e Jung (2008) e Zhang et al. (2008), Araújo et al. (2010), Saitoh et al (2011), Callejas et al. (2012). Os autores destacaram a relevância da temática para estudos sobre clima urbano.

De acordo com Xu et al. (2008), esses trabalhos são realizados através de equipamentos que conseguem o computo dos parâmetros do balanço de energia em áreas urbanas limitando-se a escala local e apresentam resultados pontuais, portanto não contemplam a heterogeneidade da área urbana onde estão inseridos diversos tipos de materiais com comportamento espectral diferenciados.

Por esta razão, abordagens de detecção remota são muito atraentes para elucidar informações espacialmente representativa. O conhecimento dos valores de fluxo de calor sensível espacializados em áreas urbanas é fundamental em estudos de monitoramento de variáveis ambientais, sobretudo para a identificação das áreas vulneráveis ao aquecimento da temperatura do ar e desconforto térmico.

O algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) desenvolvido e validado por Bastiaanssen em (1995) permite a estimativa dos fluxos energético através de imagens de satélite e com poucos dados de superfície, possibilitando assim a representação dos valores conforme a configuração espacial da área em estudo. Fazendo uso deste algoritmo e com imagens do satélite Modis, Mendonça (2012) estimou o fluxo de calor sensível na região norte fluminense do Rio de Janeiro com êxito nos resultados encontrados.

Conforme Silva e Bezerra (2006) o fluxo de calor sensível é o cerne do SEBAL, sendo obtido através de processo iterativo, que se inicia considerando a atmosfera em condições de equilíbrio neutro, servindo apenas como valor inicial da iteração até chegar a condição de estabilidade.

Destarte, esse trabalho objetiva analisar a influência da superfície urbana no fluxo de calor sensível H da cidade do Recife ao longo dos anos, utilizando-se do algoritmo SEBAL e imagens multiespectrais do TM Landsat 5.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Localização da Área de Estudo**

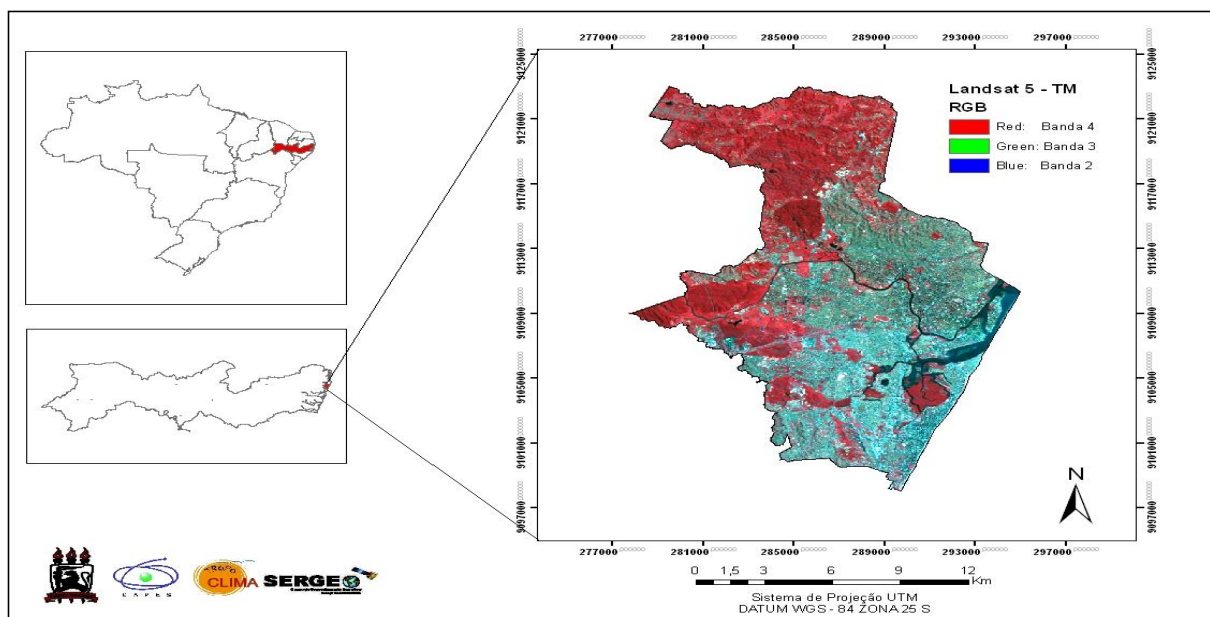
O local do estudo é a cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco, localizada no litoral do Nordeste brasileiro na porção centro leste da região, compreendendo uma área de 217,494 km<sup>2</sup>, Figura 01. A cidade está inserida na latitude 34° 54` W e 8° 2` S, estando boa parte da mancha urbana situada sobre uma planície flúvio-marinha, sua altitude média varia entre 4 e 10 metros aproximadamente.

A cidade mantém acelerado ritmo de crescimento da sua população tendo, na segunda metade do século XX, ultrapassando um milhão de habitantes. Segundo dados do IBGE/2007, a região metropolitana do Recife é a mais populosa do Nordeste e a quinta maior do Brasil ao lado de Fortaleza e Salvador, com uma população de 1,55 de habitantes em Recife e total de 3,73 milhões em toda área metropolitana, sendo considerada uma das cidades com maior desenvolvimento do Nordeste do Brasil. Diante disto, assegura-se que a mancha urbana

apresenta-se com solo bastante influenciado por pressões econômicas, destacando-se com elevado grau de adensamento construtivo.

O clima da cidade é caracterizado por ser quente e úmido, do tipo AS` com chuvas de outono a inverno , apresentando elevada umidade relativa do ar, com valores médios anuais superiores 84% (KÖEPPEN, 2004). A região estudada, por está situada em zona de baixa latitude, apresenta temperatura do ar médias mensal em torno de 25°C, sendo os meses de janeiro e fevereiro os mais quentes com temperaturas superiores a 26°C. Os meses de julho e agosto apresentam temperaturas iguais ou inferiores a 24°C.

Figura 01: Localização da área objeto de estudo, destacando a cidade do Recife.



### Processamento das imagens de satélite e dados meteorológicos

Para a realização deste trabalho foram utilizadas seis imagens digitais do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat 5, obtidas no site de geração de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, com órbita 214 e ponto 66, referente aos anos de 1998, 2000, 2006, 2007, 2010 e 2011. A cena Landsat foi empilhada e corrigida geometricamente, tomando por base a imagem disponibilizada pelo site landsat.org, onde posteriormente foi realizada a exclusão dos números digitais referentes a nuvens e sombras de nuvens através da realização de uma classificação supervisionada. Para o pré-processamento das imagens de satélite e o cômputo dos parâmetros do balanço de energia como também a montagem final do layout na geração

dos mapas utilizou-se o programa Erdas Imagine 9.3 e ArcGis 9.3 (licença do Tropoclima – Grupo de Pesquisas em Climatologia Dinâmica e Eventos Extremos).

Os dados meteorológicos complementares para estimativa do fluxo de calor sensível (velocidade do vento 10 m, temperatura do ar) além de dados de precipitação, foram obtidos na PCD Recife (plataforma de coleta de dados automática) localizada na latitude (graus) -8,06 situada no bairro do Curado, inserida dentro da área em estudo (Quadro01).

Quadro 01: Temperatura do ar e velocidade do vento 10 m.

<b>Datas</b>	<b>Temperatura do ar °C (9h)</b>	<b>Velocidade do vento a 10 m</b>
04/08/1998	22.5	1,5 m/s
26/09/2000	25	2,6 m/s
26/08/2006	24.5	4,6 m/s
28/07/2007	21	1,8 m/s
06/09/2010	21	1,5 m/s
25/09/2011	22.5	10,8 m/s (considerou 1,5 m/s)

## Método

Para obtenção do fluxo de calor sensível, considerado como o cerne do SEBAL, foi computado no primeiro momento o saldo de radiação ( $R_n$ ) que é baseado em onze passos computacionais correspondentes aos parâmetros do balanço de energia, onde envolve a calibração raídométrica, cálculo de radiância espectral, reflectância espectral, reflectância planetária, índices de vegetação, albedo e emissividades da superfície, temperatura da superfície, radiação de onda longa da superfície, radiação solar e atmosférica e por fim o saldo de radiação, conforme equação (1).

$$R_n = R_{sol,inc} (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol,emit} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_o)R_{ol,atm}$$

De posse desse dado, foi calculado o fluxo de calor no solo ( $G$ ) de acordo com a seguinte expressão:

$$G = [(T_s (0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98 IVDN))] \quad A$$

estimativa do fluxo de calor sensível  $H$  ( $Wm^{-2}$ ) é baseado 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:

$$H = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad \text{em}$$

que  $\rho$  é a massa específica do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar ( $1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $a$  e  $b$  são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis  $Z_1$  e  $Z_2$ ,  $T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{sm}^{-1}$ ).

Inicialmente, estimou-se  $H$  com base na velocidade do vento e na temperatura da superfície, usando-se uma calibração interna da diferença de temperatura entre dois níveis próximos à superfície.

A velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) foi calculada usando-se o perfil logarítmico do vento, considerando-se a condição de neutralidade atmosférica dado por:

$$u_* = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad \text{em}$$

que,  $k$  é constante de Von Karman = 0,41 (Silva Filho et al., 1992),  $u_x$  é a velocidade do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) na altura  $z_x$ , e  $z_{0m}$  é a coeficiente de rugosidade estimado de acordo com o valor da altura média da vegetação existente no entorno da estação meteorológica. sendo calculada pela equação apresentada por Brutsaert (1982). Neste estudo a altura média da vegetação considerada foi de 0,15(m).

$$z_{0m} = 0,12 h$$

Considerando a atmosfera em equilíbrio neutro e o perfil logaritmo do vento projetou-se a velocidade do vento a 200 m (*blending height*), atendendo que os efeitos da rugosidade da superfície já não exerce influência na velocidade do vento, admitindo-se, que naquele nível essa velocidade é espacialmente constante. Sendo assim, a velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) para cada pixel da imagem, é obtida segundo a equação 11 (ALLEN et al., 2002; TREZZA et al., 2002, SILVA; BEZERRA, 2006).

$$u_* = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)}$$

em que  $u_{200}$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) é a velocidade do vento a 200 m e  $z_{0m}$  (m) é obtido pixel a pixel em função do imagem do IVAS (Índice de vegetação ajustado ao solo) segundo equação desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62\text{SAVI})$$

Adquirido os valores de  $u_*$  para cada pixel, estimou-se a resistência aerodinâmica ao transporte de momentum  $r_{ah}$ , admitindo-se também a atmosfera em condições de estabilidade neutra, segundo a equação abaixo (Allen et al., 2002; Trezza et al., 2002, Silva & Bezerra, 2006; Mendonça et al., 2012)

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \cdot k}$$

onde  $z_1$  e  $z_2$  são as alturas em metros acima da superfície (em alguns estudos mais recentes têm sido utilizados 0,1 m e 2,0 m, respectivamente).

O cômputo da diferença de temperatura próxima à superfície  $dT$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para cada pixel é computada através de uma relação linear entre  $dT$  e  $T_{sup}$ .

$$dT = a + bT_{sup}$$

em que, os coeficientes  $a$  e  $b$  são obtidos através dos pixels âncoras (quente e frio) e  $T_s$  é a temperatura de cada pixel ( $^{\circ}\text{C}$ ).

O pixel “frio” escolhido nas imagens correspondeu ao manguezal do pina, considerando ser uma área com água e vegetação, onde se assume que o fluxo de calor sensível é nulo ( $H_{frio} = 0$ ). Por sua vez, o pixel “quente” foi identificado numa área onde apresentou o maior valor de temperatura entre as cena (pode citar nosso trabalho da revista de geografia física, é importante citações nossas). Para tanto se usou como referência o estacionamento do Shopping Center Recife, e portanto o fluxo de calor sensível  $H_{quente}$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) é dado por:

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

Em que,  $\rho$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) é a massa específica do ar,  $c_p$  o calor específico a pressão constante ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ) e  $T_s$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R_n$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) e  $G$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) foram obtidos no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obteve-se:

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

Como no pixel frio  $dT = 0$ , ou seja,  $a + bT_s = 0$ , tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo de  $a$  e  $b$ . Logo, pode-se obter  $H$ , segundo a equação mencionada anteriormente.

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

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{\text{kgH}}$$

Em que,  $\rho$  é a densidade do ar ( $1,15 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante,  $u_*$  é a da velocidade de fricção de cada pixel das imagens ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $T_{\text{sup}}$  é a temperatura da superfície (K),  $g$  é o módulo do campo gravitacional terrestre ( $9,81 \text{ ms}^{-2}$ ) e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $\text{Wm}^{-2}$ ), obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade. 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 ( $\psi_m$ ) e de calor ( $\psi_h$ ) deverão ser considerados. Para isto, utilizou-se das formulações de Paulson (1970) e Webb (1970):

a) Se  $L < 0$  (condição de instabilidade):

$$\psi_{m(100\text{m})} = 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(200\text{m})}}{2} \right) + \ln \left( \frac{1 + x_{(200\text{m})}^2}{2} \right) - 2 \arctg(x_{(200\text{m})}) + 0,5 \pi$$

$$\psi_{h(2\text{m})} = 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(2\text{m})}}{2} \right)$$



$$\Psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2} \right)$$

Em que,

$$x_{(200m)} = \left( 1 - 16 \frac{200}{L} \right)^{0,25}$$

$$x_{(2m)} = \left( 1 - 16 \frac{2}{L} \right)^{0,25}$$

$$x_{(0,1m)} = \left( 1 - 16 \frac{0,1}{L} \right)^{0,25}$$

b) Se  $L > 0$  (condição de estabilidade):

$$\Psi_{m(200m)} = -5 \left( \frac{200}{L} \right)$$

$$\Psi_{m(2m)} = -5 \left( \frac{2}{L} \right)$$

$$\Psi_{m(0,1m)} = -5 \left( \frac{0,1}{L} \right)$$

c) Se  $L = 0$  (condição de neutralidade):  $\Psi_m = 0$  e  $\Psi_h = 0$ .

O valor corrigido para a velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) é dado por:

$$u_* = \frac{u_{200} \cdot k}{\ln \left( \frac{200}{z_{0m}} \right) - \Psi_{m(200m)}}$$

Em que,  $u_{200}$  é a velocidade do vento a 200 m ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $k$  é a constante de von Karman (0,41),  $z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e  $\Psi_{m(200m)}$  é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 200 m.

Tendo obtido  $u_*$  corrigido, foi obtido o valor corrigido para a resistência aerodinâmica ao transporte de calor  $r_{ah}$  ( $\text{sm}^{-1}$ ) através da seguinte equação:

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_1} - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u_* \cdot k}$$

Em que  $z_2 = 2,0$  m,  $z_1 = 0,1$  m, e  $\psi_{h(z_2)}$  e  $\psi_{h(z_1)}$  são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente.

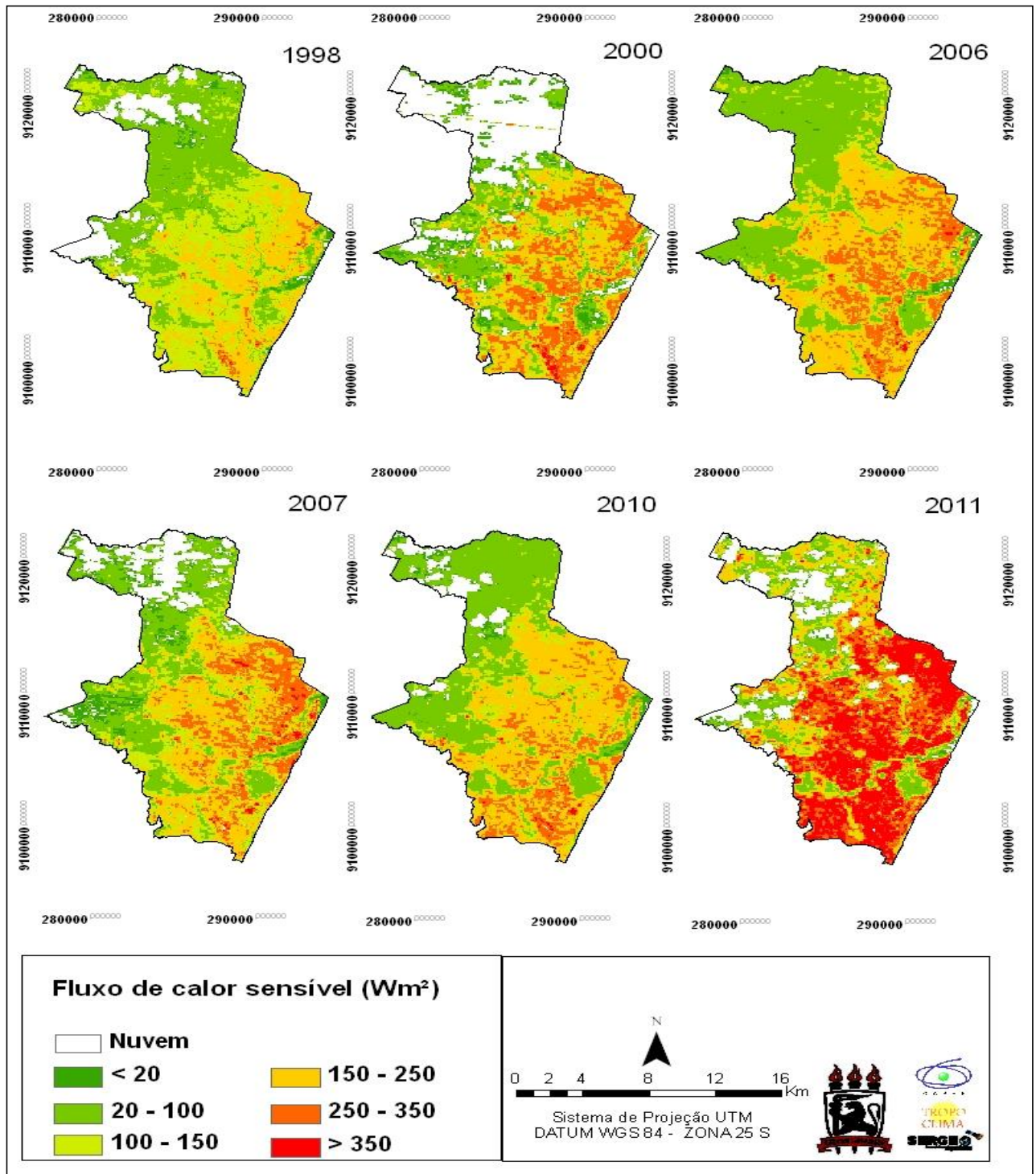
Uma vez corrigidos  $u_*$  e  $r_{ah}$  retorna-se ao cômputo da função da diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente até que se obtenha estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura ( $dT$ ) e da resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ). Repetiu-se esse processo iterativo entre sete e oito vezes em todas as imagens analisadas até os valores de erros ficarem  $< 2$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 abaixo apresenta a distribuição espacial do fluxo de calor sensível (H) para as datas de 1998, 2000, 2006, 2007, 2010 e 2011 respectivamente. Os menores valores encontrados estão representados pela tonalidade verde escuro, com intervalos  $< 20 \text{ Wm}^2$ , o tom verde limão apresentou intervalos entre  $20 \text{ Wm}^2$  e  $100 \text{ Wm}^2$ , o amarelo com valores entre  $100 \text{ Wm}^2$  e  $150 \text{ Wm}^2$ , laranja  $150 \text{ Wm}^2$  e  $250 \text{ Wm}^2$ , laranja escuro  $250 \text{ Wm}^2$  e  $350 \text{ Wm}^2$ . A tonalidade branca representa as áreas onde foram retiradas as nuvens, portanto não apresentam valores. O tom vermelho apresentou os maiores valores com intervalos superiores a  $350 \text{ Wm}^2$  destacando-se com maior intensidade na imagem de 2011.

Na imagem de 1998 os menores valores foram apresentados nas áreas com presença de vegetação e corpos hídricos localizados na parte norte e oeste da cena, assim como o manguezal do Pina, inserido na parte sul da cidade.

Figura 02: Imagem do fluxo de calor sensível (H) nos anos 1998, 200, 2006, 2007, 2010 e 2011 respectivamente. Os aspectos em branco correspondem a nuvens e suas sombras, onde seus valores foram desconsiderados.



Tais áreas apesar de apresentarem baixos valores de energia disponível para o aquecimento do ar, não apresentam especulação imobiliária, sobreveste por não estarem inseridas no eixo das conexões econômicas e com isto destacam-se com baixos valores do fluxo de calor sensível, compreendendo assim as áreas com menor densidade demográfica da região em estudo. Os maiores valores culminaram nas áreas onde o adensamento construtivo é mais intenso e com baixo percentual de áreas verdes e superfícies líquidas. Nessas áreas toda energia

está sendo empregada para aquecer a temperatura da superfície e, com isto propiciam aumento da temperatura do ar, considerando as propriedades dos materiais construtivos serem favorecerem ao aquecimento, sendo o estacionamento do Shopping Center Recife e o Aeroporto Internacional dos Guararapes com as áreas de maior aprisionamento de energia disponível para o aquecimento. Esses empreendimentos apesar de contribuírem com a economia da cidade e empregarem mão de obra, contribuem para a calefação da temperatura e, por conseguinte altera as trocas de energia entre superfície e atmosfera.

Na cena do ano 2000 nota-se um sensível aumento dos valores na mancha urbana, destacando-se a tonalidade laranja em quase toda área. Nas áreas do shopping e aeroporto nota-se uma predominância da tonalidade vermelha com valores superiores a  $350 \text{ Wm}^2$  indicando que há muita energia sendo empregada para aquecer o ar, e os menores valores permanecem nas áreas com vegetação e superfícies líquidas representadas na tonalidade verde limão.

Em 2006 a cena não apresenta presença de nebulosidade. A mancha urbana permanece com os maiores valores, destacando-se quase todos os bairros com predomínio da tonalidade laranja representadas com intervalos entre  $250 \text{ Wm}^2$  e  $350 \text{ Wm}^2$ , o estacionamento do shopping apresenta os maiores valores, o aeroporto apresentou uma sensível redução quando comparado com o ano anterior, tal aumento pode está associado ao crescimento das construções e por conseguinte a retirada da vegetação, favorecendo assim o aprisionamento de energia para aquecimento do ar.

Em 2010, a configuração espacial dos valores permanece com o mesmo padrão apresentado no ano anterior, apenas no setor norte apresenta uma sensível redução onde os maiores valores foram concentrados na mancha urbana e os menores nas áreas com vegetação e superfícies líquidas.

No ano de 2011 houve uma mudança no arranjo espacial dos valores em toda cena, sendo possível constatar o predomínio dos valores  $> 350 \text{ Wm}^2$  na mancha urbana. Nas áreas verdes e corpos hídricos, não houve alteração dos valores quando comparados com os anos anteriores, permanecendoAs áreas verdes e os corpos hídricos permaneceram com os mesmos valores dos anos anteriores e valores entre  $100 \text{ Wm}^2$  e  $150 \text{ Wm}^2$  em alguns pontos de vegetação. Esse aumento considerável nos valores pode ser atribuído às mudanças no uso do solo ocorrido no decorrer dos anos apresentando uma intensa pressão econômica especialmente o aumento das áreas com impermeabilização do concreto e/ou a sazonalidade da radiação solar.

Mendonça et al. (20012), aplicaram o SEBAL em imagens MODIS nos dias 15/08/2005 e 16/11/2005 na Região Norte Fluminense. Os autores encontram valores médios de H variando entre 125,4 e 285,7 Wm<sup>2</sup> em áreas de agricultura irrigada.

Araújo et al (2010), analisando a influência da superfície no balanço de energia e na intensidade da precipitação urbana na cidade do Recife, através do modelo BRAMS, encontrou valores do fluxo de calor sensível com entre 350 e 500 Wm<sup>2</sup>, o que vem a corroborar com os resultados encontrados neste trabalho, sobretudo nas áreas onde há o intenso adensamento construtivo.

De modo geral, as variações espaciais e temporais apresentadas nos valores do fluxo de calor sensível pode estar atreladas ao acréscimo populacional da cidade que contribui para a ocupação de novas áreas e criação de ambientes artificiais somado a diminuição da vegetação, ocasiona mudanças no uso e cobertura do solo, favorecendo o aumento da temperatura do ar.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou-se analisar a influência da superfície urbana no fluxo de calor sensível H através do algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) na cidade do Recife. Foi possível representar os valores espacializados em todas as cenas em estudo, permitindo assim, contemplar as diferenças existentes na heterogenidade da superfície urbana.

1. Os resultados encontrados em todas as cenas analisadas elucidaram para os maiores valores do fluxo de calor sensível no dossel urbano, sendo os menores encontrados nas áreas com predomínio de vegetação onde estão situadas as APA (Áreas de proteção ambiental) e superfícies líquidas, independente das condições climáticas atuantes no dia e hora da passagem do satélite.
2. Foi possível constatar que os espaços onde há o predomínio da impermeabilização do solo com concreto e ausência de vegetação, alteram significativamente as trocas dos fluxos energéticos entre superfície e atmosfera, maiormente pelas propriedades de absorção térmicas contidas nos materiais, e com isto contribuem para o aprisionamento da energia e com o aquecimento da temperatura do ar e, por conseguinte criam áreas de desconforto térmico e susceptível ao fenômeno das ilhas de calor.

3. Percebe-se a necessidade de estabelecer parâmetros com percentuais máximos e mínimos de áreas impermeabilizadas e vegetadas dentro dos sítios urbanos para que haja uma diminuição da energia aprisionada disponível para o aquecimento da temperatura do ar e redução do desconforto térmico.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de doutorado ao primeiro autor, INPE/CPTEC pelos dados fornecidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 97p., 2002.
- ANDRADE, R. G.; BATISTELLA, M.; AMARAL, T. B.; MENEZES, S. J. M. C. Análise preliminar da variabilidade espacial da evapotranspiração de pastagens com o uso de imagens orbitais. In: Congresso Brasileiro de Agroinformática, 7., 2009, Viçosa. Anais... Viçosa: UFV, 2009. p. 1-5, 2009.
- ARAUJO, T. L., SOUZA, E. P. Influência da Superfície no Balanço de Energia e na Intensidade da Precipitação Urbana. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 03, p. 204-217, 2010.
- 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.; MORENO, Y.M.J.; ROERINK, G.J.; VAN DER WAL, T. The 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.
- BRUTSAERT, W. *Evaporation Into the Atmosphere: Theory, History and Applications*. D. Reidel Pub, Co, 299 p. 1982.
- CALLEJAS, I. J. A. Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT. Tese (doutorado), 264 f. Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de pós-graduação em Física Ambiental, 2012.
- 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.

HIDALGO, J. Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: numerical simulations. *Meteor. and Atmospheric Physics*, v. 102, p. 243-262, 2008.

LEMONSU, A.; GRIMMOND, C. S. B.; MASSON, V. Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City: Marseille. *Journal of applied meteorology*. v. 43, p. 1-16, 2003.

LI, X.-X.; et al. 2008. Physical Modeling of Flow Field inside Urban Street Canyons. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. v. 47, p. 2058-2067.

LIN, W. S. A numerical study of the influence of urban expansion on monthly climate in dry autumn over the Pearl River Delta, China. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 89, p. 63-72, 2007.

MARTINEZ, T. A; JÁUREGUI, E. Surface energy balance measurements in the México city region: a review. *Atmósfera*, p. 1-23, 2005.

MENDONÇA, J. C; SOUSA, E. F; BOUHID, R. G; SILVA, B. B; FERREIRA, N. J. Estimativa do fluxo do calor sensível utilizando o algoritmo sebal e imagens modis para a região norte fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.27, n.1, p. 85 – 94, 2012.

MOREIRA, E.B. M. Estimativa do saldo de radiação instantâneo na cidade do Recife, através de imagens do satélite Landsat 5 TM. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.03, p. 614-627.

OLESON, K. W.; et al. 2008. An urban parameterization for a Global Climate Model. Part I: Formulation and Evaluation for two cities. *American Meteorological Society*. v. 47, p. 1038 – 1060.

OKE, T. R; SPRONKEN-SMITH, E. JÁUREGUI, AND C. S. B. GRIMMOND. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*., 33, 3919–3930, 1999.

PAULSON, C.A. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Journal of Applied Meteorology*, v.9, p.856-861, 1970.

SAITOH, T. M.; TAMAGAWA, I.; MURAOKA, H. Energy balance closure over a cool temperate forest in steeply sloping topography during snowfall and snow-free periods.

SILVA, BERNARDO 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*, Piracicaba, SP, v.14, p.1-10, 2006.

SILVA FILHO, V.P., VISWANADHAM, Y., SANTOS, J.M. Determinação da constante de von-Karman a partir de dados coletados na Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.7, n.1, p.535-541, 1992.

SYNNEFA, A.; et al. 2008. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. v. 47. p. 2846–2856.

TREZZA, R. Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control.” Ph.D. dissertation, Utah State University., Logan, Utah, 247p. 2002

TRUSILOVA, K.; JUNG, M. 2008. Urbanization Impacts on the Climate in Europe: Numerical Experiments by the PSU-NCAR Mesoscale Model (MM5). *Journal of Applied Meteorology Climatology*. v. 47, p. 1442-1455.

KÔEPPEN, W. 2004. Sistema Geográfico dos Climas. *Notas e Comunicações de Geografia*. n. 12, p. 4-29. Tradução Antonio Carlos de Barros Correa.

WEBB, E.K. Profile Relationships: the Log-linear Range and Extension to Strong Stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v 96 p. 67-90, 1970

VOOGT, J. A.; GRIMMOND, C. S. B. Modeling Surface Sensible Heat Flux Using Surface Radiative Temperatures in a Simple Urban Area. *American Meteorological Society*, v. 39, pg. 1679-1699, 2000.

XU, W.; WOOSTER, M. J.; GRIMMOND, C. S. B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature–emissivity separation approach. *Remote Sensing of Environment* 112 (2008) 3493–3510.

ZHANG, H.; et al. 2008. Modified RAMS-Urban Canopy Model for Heat Island Simulation in Chongqing, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 47. p. 509-524.