



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE**

**CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS – CFCH**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PPGeo**

**MUDANÇA ESPAÇO TEMPORAL DO USO E COBERTURA DO  
SOLO E ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA E  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA NO MUNICÍPIO DO RECIFE-PE**

**TIAGO HENRIQUE DE OLIVEIRA**

**Recife - PE  
2012**

Tiago Henrique de Oliveira

**Mudança espaço temporal do uso e cobertura do solo e  
estimativa do balanço de energia e evapotranspiração  
diária no município do Recife– PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Regionalização e Análise Regional  
Linhas de Pesquisa e subáreas: Ecossistemas e Impactos Ambientais / Geografia Física Aplicada

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Josiclêda Domiciano Galvínio  
Coorientadores: Prof. Dr<sup>a</sup>. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel  
Prof. Dr<sup>o</sup>. Bernardo Barbosa da Silva.

**Recife - PE  
2012**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria do Carmo de Paiva, CRB4-1291

O48m      Oliveira, Tiago Henrique de.  
Mudança espaço temporal do uso e cobertura do solo e estimativa do  
balanço de energia e evapotranspiração diária no município do Recife-PE  
/ Tiago Henrique de Oliveira. – Recife: O autor, 2012.  
154 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josiclêda Domiciano Galvêncio.  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel.  
Coorientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco.  
CFCH. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2012.  
Inclui bibliografia.

1. Geografia. 2. Sensoriamento remoto. 3. Vegetação urbana –  
Recife (PE). 4. Solo - Uso. 5. Solos – temperatura. 6. Radiação. I.  
Galvêncio, Josiclêda Domiciano (Orientadora). II. Pimentel, Rejane  
Magalhães de Mendonça (Coorientadora). III. Silva, Bernardo Barbosa da  
(Coorientador). IV. Título.

910 CDD (22. ed.)

UFPE (CFCH2012-120)

Tiago Henrique de Oliveira

**Mudança espaço temporal do uso e cobertura do solo e estimativa  
do balanço de energia e evapotranspiração diária no município do  
Recife– PE**

Defesa pública em:

Recife, 30 de agosto de 2012.

**Banca examinadora:**

**Presidente:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Josiclêda Domiciano Galvêncio (Orientadora)

---

Departamento de Ciências Geográficas - UFPE

1º Examinador: Prof. Drº. Ruskin Marinho de Freitas

---

Departamento de Arquitetura e Urbanismo – UFPE

2º Examinador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Werônica Meira de Souza

---

Unidade Acadêmica de Garanhuns - UFRPE

**Recife - PE  
2012**

*Dedico este estudo primeiramente a Deus que é digno  
de toda a honra e gloria.*

*A minha família por todo o apoio e exemplo que me foi  
dado.*

*A minha esposa Josemary Santos e Silva Oliveira por  
todo o amor e paciência que tem tido comigo. Eu te  
amo.*

## AGRADECIMENTO

*Ao Deus todo poderoso que com o poder de sua palavra criou este objeto de estudo maravilhoso (Gênesis cap.1 v.1-31) para o homem e por todo o amor que ele tem demonstrado por nós (João cap.3 v.16).*

*Aos meus pais, minha irmã, minhas avós por todo o amor e tudo que eles tem feito em minha vida.*

*A minha esposa Josemary Santos e Silva Oliveira por todo o amor demonstrado e por toda a dedicação e paciência que ela tem tido comigo e com as minhas pesquisas.*

*A minha orientadora e amiga Prof<sup>a</sup>. Josiclêda Domiciano Galvêncio por todo o conhecimento e incentivo que ela tem pacientemente fornecido em minha vida acadêmica.*

*Aos professores Dr<sup>a</sup>. Rejane Magalhães de M. Pimentel e Dr<sup>o</sup>. Bernardo Barbosa da Silva por toda a orientação, pelo fornecimento da base metodológica e por toda a confiança depositada.*

*A CAPES pela bolsa de pesquisa fornecida.*

*Aos meus queridos amigos do Grupo de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento – SERGEO e do Grupo de Pesquisa Geo-ambiental – GPGA por toda a amizade demonstrada e pelos riquíssimos momentos de alegria.*

*Aos meus amigos do Instituto da Cidade Pelópidas Silveira – ICPS - por todo o conhecimento e experiência que têm passado para mim.*

*Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco.*

*Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE pelo fornecimento gratuito de imagens de satélite do Brasil.*

*A Agencia CONDEPE-FIDEM pelas fotografias aéreas adquiridas e utilizadas nesta pesquisa e a Prefeitura da Cidade do Recife por ter cedido a base de dados vetorial e matricial do município.*

*...e aos demais amigos e parentes que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.*

*Louvai ao Senhor, porque ele é bom;  
porque a sua benignidade é para sempre.*

*Salmos 136 v.1*

## RESUMO

É possível observar a evolução espaço temporal do uso e cobertura da terra de diferentes paisagens e estimar os componentes do balanço de energia da superfície terrestre com sensoriamento remoto. A presente pesquisa teve por objetivo avaliar a dinâmica espaço temporal do uso e cobertura da terra e os impactos destas mudanças no balanço de radiação, balanço de energia e evapotranspiração no município do Recife – PE . Foram utilizadas oito imagens do sensor TM do satélite Landsat 5 (órbita e ponto 214/65 e 214/66) obtidas em 09 de maio de 1987, 28 de setembro de 1989, 14 de junho de 1991, 08 de maio de 2005, 26 de agosto de 2006, 28 de junho de 2007, 06 de setembro de 2010 e 25 de setembro de 2011. Foi utilizado o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) para estimar os componentes do balanço de energia e evapotranspiração diária. Para avaliar o uso e cobertura da terra foi realizada uma classificação não supervisionada nas imagens TM. Dados da estação meteorológica do Recife foram utilizados para a obtenção do Saldo de Radiação ( $R_n$ ). Os métodos utilizados se apresentaram eficazes para avaliar a dinâmica da cobertura vegetal e a expansão urbana em diversas áreas do município. Através da aplicação da técnica TsHARP foi possível realizar um refinamento na resolução espacial da temperatura da superfície e melhor visualizar a relação da mesma com as grandes construções e as áreas impermeabilizadas do município. As áreas vegetadas, seja de porte arbóreo ou mesmo as áreas de gramíneas, desempenharam um importante papel como amenizador da temperatura da superfície em diversas partes do município. Os grandes fragmentos florestais, distribuídos pelo município, apresentaram altos valores nos índice de vegetação, valores de albedo inferiores a 0,12, os maiores valores de Saldo de Radiação e Evapotranspiração superiores a  $4 \text{ mm dia}^{-1}$ . Também foi possível observar o grande impacto no balanço de energia provocado pela impermeabilização de grandes áreas e pela implantação de grandes empreendimentos sem a arborização adequada.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto, áreas vegetada, área urbana, SEBAL, TsHARP, Ilhas de calor;



## ABSTRACT

It is possible to observe the evolution of land use and cover of different landscapes and estimate the components of the energy balance of land surface with remote sensing. This study have the purpose to evaluate the space and time dynamic of land use and cover, and the impacts of these changes in the radiation balance, energy balance and daily evapotranspiration in Recife - PE. We used eight images from the Landsat 5 TM sensor (point/orbits and 214/65 and 214/66) obtained on May 9, 1987, September 28, 1989, June 14, 1991, May 8, 2005, 26 August 2006, June 28, 2007, September 6, 2010 and September 25, 2011. An SEBAL algorithm (Surface Energy Balance Algorithm for Land) was used to estimate the components of energy balance and evapotranspiration rates. To evaluate the land use and cover was performed unsupervised classification in TM. Data from the meteorological station of Recife was used to obtain the balance of radiation ( $R_n$ ). The methods presented are effective for accessing the dynamics of vegetation and urban expansion in several areas of the municipality. By applying the technique TsHARP was possible to perform a refinement in the spatial resolution of surface temperature and better visualize the relationship of the same with the big buildings and impermeable areas of the municipality. The vegetated areas, its sized arboreal or even grass covered areas, have an important role in the decrease of the surface temperature in various parts of the municipality. The large forest fragments, distributed throw the municipality, showed high values in the vegetation index albedo inferior to 0.12, and the highest values of radiation balance and evapotranspiration (over  $4 \text{ mm day}^{-1}$ ). It was also possible to observe the great impact on energy balance caused by the sealing of large areas and the implementation of large enterprises without adequate afforestation.

**Key words:** Remote sensing, vegetated area, urban area, SEBAL, TsHARP, heat islands;

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b>	Localização do município de Recife – PE e Regiões Politico Administrativo (RPA) .....	34
<b>Figura 2</b>	Distribuição dos bairros do Recife em Regiões Políticas Administrativas .....	35
<b>Figura 3</b>	Hipsometria do município do Recife – PE .....	37
<b>Figura 4</b>	Imagens utilizadas na realização da pesquisa e distribuição de nuvens e sombra de nuvens no dia de passagem do satélite Landsat .....	38
<b>Figura 5</b>	Fluxograma de pré-processamento das imagens .....	40
<b>Figura 6</b>	Fluxograma para obtenção dos valores de Balanço de Radiação a superfície e Fluxo de calor do solo .....	40
<b>Figura 7</b>	Fluxograma das etapas do processamento do fluxo de calor sensível. Modificado de: Silva et al, (2012) .....	47
<b>Figura 8</b>	Evolução espaço-temporal do uso e ocupação do solo no município do Recife para as imagens utilizadas .....	58
<b>Figura 9</b>	Aumento no número de unidades habitacionais e supressão da vegetação próximo a mata da Várzea, bairro da Várzea – Recife – PE .....	59
<b>Figura 10</b>	Aumento no número de unidades habitacionais e supressão da vegetação no bairro da Caxangá – Recife – PE .....	59
<b>Figura 11</b>	Área de pressão antrópica no entorno da Mata da Várzea, bairro da Várzea – Recife – PE .....	60
<b>Figura 12</b>	Gráfico de variação temporal da área urbana, solo exposto e vegetação da cidade do Recife em quilômetros quadrados (Km <sup>2</sup> ) .....	62
<b>Figura 13</b>	Diminuição de áreas de solo exposto e adensamento construtivo residencial nos bairros de Santo Amaro, Peixinhos e Campo Grande – Recife – PE .....	63
<b>Figura 14</b>	Diminuição de áreas de solo exposto e ampliação de áreas industriais no bairro do Curado – Recife – PE .....	63
<b>Figura 15</b>	Diminuição da cobertura vegetal nos bairros de Nova Descoberta e Vasco da Gama – Recife – PE .....	64
<b>Figura 16</b>	Diminuição da cobertura vegetal em áreas da RPA-2, Recife – PE .....	65
<b>Figura 17</b>	Distribuição da vegetação em áreas com elevada declividade em área da RPA-2, Recife – PE .....	66
<b>Figura 18</b>	Indicação de algumas das principais áreas públicas localizado na região do Centro expandido – Recife – PE .....	67
<b>Figura 19</b>	Distribuição da vegetação em áreas públicas do município do Recife – PE .....	67
<b>Figura 20</b>	Evolução espaço-temporal do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN) do município de Recife – PE .....	70
<b>Figura 21</b>	Distribuição de vegetação de porte arbóreo no bairro de Santo Amaro, Recife – PE .....	71
<b>Figura 22</b>	Aumento da quantidade de edificações no entorno da avenida Caxangá – bairro da Iputinga, Recife – PE .....	71
<b>Figura 23</b>	Regeneração da vegetação de mangue em parte do Manguezal do Pina, bairro do Pina, Recife – PE .....	73

<b>Figura 24</b>	Regeneração de vegetação em áreas desmatadas no interior da mata da Várzea, bairro da Várzea, Recife – PE .....	73
<b>Figura 25</b>	Representação temporal da quantidade de pixels por classe do IVDN .....	75
<b>Figura 26</b>	Evolução espaço-temporal do Índice de Vegetação Ajustado (EVI) do município de Recife – PE .....	77
<b>Figura 27</b>	Representação temporal da quantidade de pixels por classe do EVI .....	80
<b>Figura 28</b>	Evolução espaço-temporal do Índice de Área Foliar (IAF) do município de Recife – PE .....	81
<b>Figura 29</b>	Adensamento construtivo e distribuição de áreas com vegetação no bairro do Recife, Recife – PE .....	82
<b>Figura 30</b>	Diminuição de áreas de solo exposto e sensibilidade do IAF a diminuição no bairro da Várzea e Curado, Recife – PE .....	83
<b>Figura 31</b>	Aumento espacial da classe de IAF com variação entre 0 e 0,10 .....	84
<b>Figura 32</b>	Representação temporal da quantidade de pixels por classe do IAF .....	86
<b>Figura 33</b>	Evolução espaço-temporal do Índice de Umidade (NDWI) do município de Recife – PE .....	88
<b>Figura 34</b>	Evolução espaço-temporal do Índice de Área Foliar (IAF) e Índice de Umidade (NDWI) para o manguezal do Pina, Recife – PE .....	89
<b>Figura 35</b>	Evolução espaço-temporal do Índice de Área Foliar (IAF) e Índice de Umidade (NDWI) para bairros da RPA - 3, Recife – PE .....	89
<b>Figura 36</b>	Representação temporal da quantidade de pixels por classe do NDWI .....	91
<b>Figura 37</b>	Evolução espaço-temporal do Albedo da superfície do município de Recife – PE .....	92
<b>Figura 38</b>	Modificação espaço-temporal do uso e ocupação do solo no entorno da Mata de Dois Irmãos, Recife – PE .....	93
<b>Figura 39</b>	Modificação espaço-temporal do albedo da superfície no entorno do manguezal do Pina, Recife – PE .....	95
<b>Figura 40</b>	Representação temporal da quantidade de pixels por classe do Albedo da superfície .....	95
<b>Figura 41</b>	Evolução espaço-temporal da temperatura da superfície do município de Recife – PE .....	97
<b>Figura 42</b>	Distribuição da temperatura da superfície (°C) em parte da Avenida Caxangá (trecho BR-101 à Rua Dr. João Lacerda) no município de Recife – PE .....	99
<b>Figura 43</b>	Distribuição da temperatura da superfície (°C) em parte do bairro de Boa Viagem e Pina no município de Recife – PE .....	100
<b>Figura 44</b>	Distribuição da temperatura da superfície (°C) nos bairros do Recife, Santo Amaro, Santo Antônio e São José do município de Recife – PE .....	101
<b>Figura 45</b>	Galpões e áreas impermeabilizadas no Porto do Recife, bairro do Recife, Recife – PE .....	102
<b>Figura 46</b>	Distribuição de áreas verdes em parte do bairro de Santo Amaro, Recife – PE .....	103
<b>Figura 47</b>	Arrefecimento da temperatura da superfície no entorno do Hospital Geral de Areias, devido à arborização, bairro de Areias – Recife – PE .....	103
<b>Figura 48</b>	Arrefecimento da temperatura da superfície no entorno de grandes edificações devido à arborização, Prefeitura da cidade do Recife – Recife – PE .....	104

<b>Figura 49</b>	Temperatura da superfície (°C) para a Mata do Jardim Uchôa, Recife – PE.....	105
<b>Figura 50</b>	Temperatura da superfície (°C) para a Mata da Várzea/Curado, Recife – PE.....	105
<b>Figura 51</b>	Distribuição de ilhas de calor em grandes lojas e galpões entre as Avenidas Sul (linha de metrô) e Mascarenhas de Moraes, município do Recife – PE .....	106
<b>Figura 52</b>	Distribuição de ilhas de calor em áreas com grande concentração de edificações em área do bairro do Pina, município do Recife – PE .....	107
<b>Figura 53</b>	Representação do Transecto linear para a Região Político-Administrativo 4, município do Recife – PE .....	108
<b>Figura 54</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 9 de maio de 1987 .....	109
<b>Figura 55</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 28 de setembro de 1989 .....	110
<b>Figura 56</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 14 de junho de 1991.....	110
<b>Figura 57</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 26 de agosto de 2006 .....	111
<b>Figura 58</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 28 de julho de 2007.....	111
<b>Figura 59</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 6 de setembro de 2010 .....	112
<b>Figura 60</b>	Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 9 de maio de 1987 .....	113
<b>Figura 61</b>	Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 28 de setembro de 1989 .....	113
<b>Figura 62</b>	Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 14 de junho de 1991 .....	114
<b>Figura 63</b>	Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 26 de agosto de 2006 .....	114
<b>Figura 64</b>	Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 28 de julho de 2007.....	115
<b>Figura 65</b>	Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 6 de setembro de 2010 .....	115
<b>Figura 66</b>	Evolução espaço-temporal do Saldo de Radiação ( $W m^{-2}$ ) do município de Recife – PE .....	118
<b>Figura 67</b>	Distribuição dos valores de $R_n$ ( $W m^{-2}$ ) para áreas de solo exposto e áreas com cobertura vegetal menos densa, bairro de Torrões, Recife – PE .....	119
<b>Figura 68</b>	Distribuição dos valores de $R_n$ ( $W m^{-2}$ ) para áreas com alta densidade construtiva no bairro do Pina e Imbiribeira, Recife – PE .....	120
<b>Figura 69</b>	Evolução espaço-temporal do Fluxo de Calor Sensível ( $W m^{-2}$ ) no município de Recife – PE .....	122
<b>Figura 70</b>	Distribuição do Fluxo de Calor Sensível ( $W m^{-2}$ ) em fragmentos florestais no bairro do Ibura, Recife – PE .....	123
<b>Figura 71</b>	Fluxo de Calor Sensível ( $W m^{-2}$ ) para parte do bairro do Poço, Recife – PE .....	124
<b>Figura 72</b>	Fluxo de Calor Sensível ( $W m^{-2}$ ) para parte do bairro de Recife, Recife – PE .....	125
<b>Figura 73</b>	Evolução espaço-temporal do Fluxo de Calor Latente ( $W m^{-2}$ ) do município de Recife – PE .....	126
<b>Figura 74</b>	Fluxo de Calor Latente ( $W m^{-2}$ ) para parte do bairro do Poço, Recife – PE .....	127
<b>Figura 75</b>	Fluxo de Calor Latente ( $W m^{-2}$ ) para grandes áreas impermeabilizadas, Recife – PE .....	128

<b>Figura 76</b>	Evolução espaço-temporal da Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) do município de Recife – PE .....	130
<b>Figura 77</b>	Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) distribuídos no Complexo Industrial do Curado e entorno, bairro do Curado, Recife – PE .....	131
<b>Figura 78</b>	Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) distribuídos em galpões próximos ao Porto do Recife, bairro do Recife, Recife – PE .....	132
<b>Figura 79</b>	Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para área de estacionamento mais arborizada na Prefeitura da Cidade do Recife, bairro do Recife, Recife – PE.....	132
<b>Figura 80</b>	Distribuição da vegetação em área de estacionamento na Prefeitura da Cidade do Recife, do Tribunal Regional do Trabalho da 6ª Região e no Tribunal Regional Federal da 5ª Região, bairro do Recife, Recife – PE .....	133
<b>Figura 81</b>	Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para área dos bairros da Mustardinha, Mangueira e San Martin, Recife – PE .....	134
<b>Figura 82</b>	Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para área dos bairros de Santana, Poço e Casa Forte, Recife – PE .....	134
<b>Figura 83</b>	Mudança de cobertura do solo e impacto nos valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimado para área do novo Shopping Riomar, bairro do Pina, Recife – PE .....	135
<b>Figura 84</b>	Distribuição dos valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para os fragmentos florestais Mata da Várzea/Curado, bairro da Várzea, Recife – PE .....	136
<b>Figura 85</b>	Distribuição dos valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para o fragmento florestal Mata do Jardim Uchoa, bairro do Ibura, Recife – PE .....	136
<b>Figura 86</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 26 de agosto de 2006 .....	137
<b>Figura 87</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 6 de setembro de 2010 .....	138
<b>Figura 88</b>	Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 26 de agosto de 2006 .....	139
<b>Figura 89</b>	Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 6 de setembro de 2010 .....	139

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b>	Valores de Albedo para alguns tipos de alvos da superfície terrestre. Adaptado de Oke (1987) .....26
<b>Tabela 2</b>	Quantitativo de população na cidade do Recife e na Região Metropolitana do Recife. Modificado de: SOUZA <i>et al.</i> (2006) .....61
<b>Tabela 3</b>	Quantitativo de população na cidade do Recife para as Regiões Político Administrativas .....61
<b>Tabela 4</b>	Valores de Área Construída e Área Vegetada para as RPA 1, 2 e 6 em quilometro quadrado (Km <sup>2</sup> ) .....65
<b>Tabela 5</b>	Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do IVDN no município do Recife, para as datas estudadas .....75
<b>Tabela 6</b>	Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do EVI no município do Recife, para as datas estudadas .....79
<b>Tabela 7</b>	Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do IAF no município do Recife, para as datas estudadas .....85
<b>Tabela 8</b>	Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do NDWI no município do Recife, para as datas estudadas .....90
<b>Tabela 9</b>	Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do Albedo da Superfície no município do Recife, para as datas estudadas .....96
<b>Tabela 10</b>	Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do Saldo de Radiação (W m <sup>-2</sup> ) no município do Recife, para as datas estudadas .....121

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

CONDEPE-FIDEM - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IAF – Índice de Área Foliar

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IVDN – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

IVAS – Índice de Vegetação Ajustado ao efeito do Solo

ISODATA – Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique

LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite

NASA - National Aeronautics and Space Administration

PCD – Plataforma de coleta de dados

RPA – Região político-administrativa

SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land

S-SEBI – Simplified Surface Energy Balance Index

SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission

TM – Thematic Mapper

Rn - Saldo de Radiação

## Lista de Símbolos

m - Metro

Km – Quilômetro

K – Kelvin

°C – Celsius

ND – Número Digital

L - Radiância Espectral

i – Banda Espectral

$\lambda$  - Comprimento de Onda

k - Irradiância Solar Monocromática

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzman

Z – Ângulo Zenital

dr - Distancia Relativa Terra-Sol

S – Constante Solar

IVp – Reflectividade no Infra-vermelho próximo

Vp - Reflectividade no vermelho

$\alpha_p$  - Radiação solar refletida pela atmosfera

d<sub>r</sub> – Distância relativa terra-sol

$\tau_{sw}$  - Transmissividade atmosférica

UA – Unidade astronômica

$\alpha$  – Albedo da Superfície

toa - Albedo no Topo da Atmosfera

$\varepsilon_{NB}$  - Emissividade Termal

$\varepsilon_0$  - Emissividade da Banda Larga

T<sub>s</sub> - Temperatura da Superfície

$\varepsilon_a$  - Emissividade Atmosférica

T<sub>a</sub> - Temperatura do Ar

R<sub>L↑</sub> - Radiação de Onda Longa Emitida

R<sub>L↓</sub> - Radiação de Onda Longa Incidente

R<sub>s↓</sub> - Radiação de Onda Curta Incidente

G – Fluxo de calor no solo

H – Fluxo de calor sensível

LE – Fluxo de calor latente

ET – Evapotranspiração diária



# SUMÁRIO

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de abreviaturas e siglas

Lista de símbolos

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 Mudança espaço temporal do uso e cobertura do solo em ambiente urbano e consequências no balanço de radiação e energia.....	20
2.2. Índices de Vegetação e vegetação urbana.....	23
2.3. Variação nos valores de ALBEDO.....	25
2.4. Estudo da Temperatura da superfície e do fenômeno de ilhas de calor.....	27
2.5. Evapotranspiração.....	29
2.6. Surface Energy Balance Algorithm For Land – SEBAL.....	31
<b>3. MATERIAL E MÉTODO.....</b>	<b>34</b>
3.1 Caracterização da Área de Estudo.....	34
3.2 Dados Radiométricos.....	37
3.3 Etapas de pré-processamento das imagens do satélite Landsat.....	39
3.4 Etapas de aplicação do Algoritmo SEBAL.....	40
3.4.1. Calibração Radiométrica.....	41
3.4.2. Reflectância.....	41
3.4.3. Albedo planetário ( $\alpha_{toa}$ ) .....	41
3.4.4. Transmissividade Atmosférica .....	42
3.4.5. Albedo da superfície ( $\alpha$ ).....	42
3.4.6. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada.....	42
3.4.7. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo.....	43
3.4.8. Índice de Área Foliar.....	43
3.4.9. Emissividades.....	43
3.4.10. Temperatura da Superfície.....	44
3.4.11. Radiação de Onda Longa Emitida.....	44

3.4.12. Radiação de Onda Curta Incidente.....	44
3.4.13. Radiação de Onda Longa Incidente.....	45
3.4.14. Saldo de radiação.....	45
3.4.15. Fluxo de calor no solo.....	45
3.4.16. Fluxo de calor sensível.....	46
3.4.17. Fluxo de Calor Latente.....	51
3.4.18. Evapotranspiração Diária.....	51
3.5. Computo do Índice de Vegetação Ajustado e Índice de Umidade.....	52
3.5.1. Índice de Vegetação Ajustado.....	52
3.5.2. Índice de Umidade.....	52
3.6. Técnica TsHARP.....	53
3.7. Base de dados municipal e fotografias aéreas.....	54
3.8. Classificação Espaço temporal do Uso e cobertura do solo do Município do Recife.....	54
3.9. Dados SRTM.....	55
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>
4.1. Mudanças espaço temporal do Uso e cobertura do solo.....	57
4.2. Avaliação da cobertura vegetal.....	69
4.3. Distribuição espaço-temporal do Índice de Umidade (NDWI), Albedo da superfície e Temperatura da superfície.....	87
4.4. Saldo de Radiação, Balanço de Energia e Evapotranspiração (ET).....	117
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>141</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES .....	143
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>144</b>

# 1. INTRODUÇÃO

As rápidas mudanças espaço temporal do uso e cobertura do solo em ambiente urbano apresentam grandes impactos nas relações entre os ciclos energéticos e hidrológicos sobre a superfície. Neste sentido, o conhecimento dos componentes do balanço de radiação e de energia para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo, assim como a influência da substituição de algum uso ou cobertura em um ambiente urbano torna-se de extrema necessidade para a identificação de mudanças que podem estar ocorrendo no clima local.

Berman (1982) afirma que o espaço urbano acaba por se tornar objeto de constantes modificações e produção do espaço, sendo a vida na cidade definida pelas relações econômicas, sociais e culturais, que se apresentam altamente dinâmicas e mutáveis com o passar das décadas. Deste modo torna-se importante o planejamento do espaço urbano visando à prevenção de impactos danosos causados, em parte pela rápida expansão desordenada e adensamento urbano.

O processo de expansão desordenada e a impermeabilização de grandes áreas acarreta o surgimento e/ou intensificação de diversos fenômenos como as ilhas de calor urbana, o aumento no número de enchentes e o SMOG. O clima urbano difere consideravelmente do ambiente natural. A amplitude térmica, o regime pluviométrico, o balanço hídrico e a umidade do ar são fatores diretamente afetados pelo dimensionamento e disposição da arborização urbana (LIMA *et al.* 2009). Deste modo torna-se necessário a preservação de áreas com solo natural e vegetadas, visando à promoção da qualidade ambiental urbana e o bem estar social e psicológico da população.

Além do mais as áreas vegetadas se apresentam como importantes agentes de amenização da temperatura, redução do consumo de energia e aumento da qualidade do ar. Deste modo Mock (2005) afirma que para se alcançar a sustentabilidade dos ecossistemas urbanos em elevado ritmo de expansão, oferecendo o máximo de benefícios aos seus habitantes é necessário a gestão integral da vegetação urbana e o apoio da comunidade local.

Para Wolf (2005) é necessário à criação de políticas públicas voltadas para a ideia de que os benefícios proporcionados pelos bosques urbanos alcançam sua maior produtividade através da otimização de uma administração

de longo prazo que abarque toda a cidade. Torna-se, portanto necessário a realização de estudos que procurem analisar as relações entre os componentes bioclimáticos e os atributos urbanos, que exercerão influência na dinâmica do clima urbano.

A vegetação como um todo, tem representado grande importância na melhoria das condições de vida nos centros urbanos, tendo em vista que através do elevado ritmo de crescimento populacional, as cidades deparam-se com a falta de um planejamento urbano efetivo ocasionando uma elevada perda de biodiversidade em algumas áreas.

Para tal, o Sensoriamento remoto tem se tornado uma importante ferramenta para avaliar as mudanças espaço-temporais e as consequências, provenientes deste processo, de maneira ágil e satisfatória em diversas partes do mundo. Em geral, os componentes do balanço de energia são obtidos com equipamentos que fornecem apenas uma leitura pontual dos valores e a implantação desses equipamentos em áreas amplas tornaria esse tipo de medição onerosa.

Através do sensoriamento remoto é possível obter, para diferentes escalas, os componentes do balanço de radiação e energia espacializada para amplas áreas, com resolução temporal compatível a dinâmica espacial urbana (PINHO, 2005; NIEBERGALL et al., 2007; HOFMANN et al, 2008). Silva et al, (2010) afirmam que [...] *“em particular, grande atenção deve ser dada ao fluxo de calor latente, que essencialmente representa o fluxo de massa na forma de vapor d’água para a atmosfera do nosso planeta, e ao fluxo de calor sensível, grande responsável pelo aquecimento das áreas urbanas”*.

Portanto o objetivo deste trabalho é analisar a dinâmica espaço temporal do uso e cobertura do solo no município do Recife – PE e observar os impactos destas mudanças no balanço de radiação, balanço de energia e Evapotranspiração do município. Dentre os objetivos específicos podem ser destacados: a) evolução espaço temporal do uso e cobertura do solo; b) evolução espaço-temporal dos índices de vegetação (IVDN, EVI e IAF), Albedo da superfície, Índice de Umidade (NDWI) e Temperatura da superfície (°C) mapeamento dos componentes do balanço de energia e Evapotranspiração diária.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. *Mudança espaço temporal do uso e cobertura do solo em ambiente urbano e consequências no balanço de radiação e energia*

Atualmente os estudos de uso e cobertura do solo tem ganhado grande destaque em diversas pesquisas realizadas pelo mundo. As rápidas mudanças espaço temporal do uso e cobertura do solo em ambiente urbano apresentam grandes impactos nas relações entre os ciclos energéticos e hidrológicos sobre a superfície. Silva *et al.* (2010) afirmam [...] *“que o tempo e o clima exercem grande influência sobre o tipo e estado da vegetação terrestre, mas ao mesmo tempo podem ser afetados em decorrência de mudanças naturais e/ou antrópicas no uso da terra.”*

Através da utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG), é possível realizar a interligação do mapeamento de uso e cobertura do solo com diversos outros produtos obtidos através do sensoriamento remoto e associa-las ao conhecimento das condições meteorológicas e climáticas.

Para o ambiente urbano, Novack (2009) afirma que as técnicas de sensoriamento remoto possibilitam a distinção e categorização dos objetos do ponto de vista físico e espacial. Porém de forma indireta, e com certo grau de imprecisão, possibilita a coleta de informações sobre as práticas sociais e dinâmicas que ocorrem no território e que de certo modo individualizam o uso do solo. Esta limitação segundo Novack (2009) [...] *“está associada ao fato que o uso do solo envolve informações abstratas e subjetivas e que não apresentam expressão espacial ou espectral clara.”*

Pielke *et al.* (2002) afirma que uma grande quantidade de trabalhos tem demonstrado que as mudanças na cobertura da terra fornece uma quantidade adicional de força ao clima, por meio das mudanças das propriedades físicas da superfície terrestre. Para Betts (2000) as mudanças observadas no albedo da superfície, por exemplo, podem ser comparadas com as emissões de gases do efeito estufa.

Porém as mudanças na cobertura vegetal pode modificar diretamente o fluxo de calor da superfície, sendo necessárias novas formas de abordagens

para a correta quantificação dos impactos do uso e cobertura do solo no clima. Do mesmo modo, se faz necessário a realização de estudos que trabalhem com a perspectiva de análise da influência que as modificações locais ou regionais poderão impactar no sistema climático global ao longo do tempo.

Os grandes avanços oriundos da tecnologia espacial permitiu a disponibilidade de produtos de satélites imageadores para diferentes escalas e resoluções. Deste modo diversas concepções teóricas e metodologias têm sido desenvolvidas para o estudo do Uso e cobertura do solo [...] *“permitindo a gestão da apropriação do espaço geográfico global ou local, e aliando a visão do conjunto do uso da terra e revestimento do solo a preocupação ambiental”* (IBGE, 2006).

Berman (1982) afirma que o espaço urbano acaba por se tornar objeto de constantes modificações e produção do espaço, sendo a vida na cidade definida pelas relações econômicas, sociais e culturais, que se apresentam altamente dinâmicas e mutáveis com o passar das décadas. Com isto diversos autores (GARCIA, 1999; YUAN *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2006) têm apresentado, através de estudos realizados em diversas cidades do mundo, as consequências do não planejamento urbano e do processo de adensamento desordenado.

Estudos como os realizados por Whitford *et al.* (2001), Nowak *et al.* (2002) e Pauleit *et al.* (2005) demonstram a necessidade de realização de pesquisas em parâmetros ambientais importantes referentes ao uso do solo em ambiente urbano, como a temperatura da superfície, o escoamento das águas pluviais e o sequestro de carbono. Segundo Pauleit *et al.* (2005) estes elementos são diretamente afetados pelas características da cobertura do solo como a densidade de construções e distribuição de áreas verdes no espaço urbano que na maioria dos casos apresentam-se bastante fragmentados.

Nucci (2001) afirma, através de seus estudos, que a configuração espacial da cobertura vegetal e a sua devida quantificação podem ser utilizadas como instrumentos e parâmetros de avaliação da qualidade ambiental em áreas urbanas. Para Junior & Amorim (2009) o uso e a ocupação do solo urbano são talvez os principais definidores da qualidade ambiental urbana, sendo necessário, deste modo, haver uma regulamentação e direcionamento das formas de ocupações. Para tal o poder público conta com mecanismos como a

utilização do plano diretor municipal, o zoneamento urbano e a lei de uso e ocupação do solo.

Estudos realizados por Moreira & Galvêncio (2007) e Oliveira et al (2010) demonstram as modificações ambientais ocorridas no bairro de Boa Viagem, Recife – PE, ao longo de 19 anos e verificaram a acentuada diminuição das áreas de cobertura vegetal em virtude da expansão urbana e conseqüentemente o aumento nos valores de temperatura da superfície. O mesmo ainda afirma a formação de ilhas de calor em diversos pontos do bairro para as imagens utilizadas.

Outra consequência do rápido adensamento urbano, citado por Garcia (1999), [...] *“é a substituição da superfície natural por diversos tipos e formas de edificações, constituindo um conjunto compacto e denso, com os mais variados tipos de revestimento e propriedades físicas”*. Formasse então uma rugosidade que promove alterações no movimento do ar na superfície e provoca modificações no gradiente de radiação urbana, influenciando a temperatura do ar.

Outra implicação do adensamento urbano é a diminuição da infiltração provocada pela impermeabilização de grandes áreas, principalmente em períodos de maior precipitação (FENDRICH & IWASA, 1998). Tucci (2000) afirma que um habitante produz em média 49m<sup>2</sup> de área impermeável em uma bacia, e que a cada 10% de aumento na área impermeável ocorre cerca de 100% de aumento no coeficiente de cheia e no volume de escoamento superficial.

O calor proveniente das atividades humanas também se apresenta como um aspecto importante, provocando alterações no nível de energia. Do mesmo modo este incremento de calor influencia a temperatura do ar, em relação ao seu entorno, aumentando o processo de convecção, o que causa aumento na incidência de nebulosidade e precipitação.

Para Freitas (2005) [...] *“muitas vezes ao se avaliar retrospectivamente a urbanização é possível observar a sua associação a dois outros processos, sendo eles o adensamento construtivo e o processo de degradação do ambiente, e que muitas vezes esta abordagem dificulta a consideração de outras possibilidades, tais como a visão da cidade compacta sustentável e dotada de qualidade de vida.”*

O mesmo autor ainda afirma que o adensamento urbano quando aliada a sustentabilidade ambiental não apresenta graves consequências ao ambiente urbano. Para tal, o mesmo cita que é necessário realizar a distribuição e consolidação de áreas vegetadas e um maior espaçamento entre as edificações, permitindo uma maior permeabilidade do vento no ambiente urbano. As áreas vegetadas em ambiente urbano, por sua vez, desempenham um importante papel na infiltração das águas pluviais e na manutenção de condições climáticas favoráveis.

## ***2.2 Índices de Vegetação e vegetação urbana***

Fatores ligados à vegetação também têm uma grande parcela de influência no saldo de radiação e balanço de energia. Em estudos de quantificação do saldo de radiação e/ou da evapotranspiração, principalmente em atividades de agricultura irrigada, ou mesmo em áreas de vegetação natural, autores como Pereira et al., (2002) e Giongo (2008) afirmam que:

A espécie vegetal deve ser levada em consideração, tendo em vista que as variáveis da arquitetura foliar (como a distribuição espacial da folhagem, resistência interna da planta ao transporte de água e outros fatores morfológicos como número, tamanho e distribuição dos estômatos), são diferenciados de planta para planta e para diferentes biomas, que podem ser encontrados em um curto espaço de distância.

Atualmente o sensoriamento remoto tem se tornado uma importante ferramenta para o levantamento do estado da vegetação e do valor de biomassa vegetal em escala regional em um curto espaço de tempo, uma vez que os equipamentos mais utilizados para a realização de medições em campo fornecem apenas leituras pontuais. Na década passada diversos estudos em áreas urbanas foram beneficiados pela maior disponibilidade de imagens com alta resolução espacial, permitindo uma melhor quantificação dos diversos alvos urbanos e a avaliação e caracterização da vegetação urbana.

Segundo Giongo (2008) vários trabalhos têm sido realizados para estimar variáveis biofísicas através de imagens índices, como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - IVDN (Rouse et al., 1973) e o Índice de Vegetação Ajustado ao efeito do Solo - IVAS (Huete, 1988).



A base física dos índices de vegetação é dada pela absorção da radiação, na região espectral do vermelho, pela clorofila da planta e ao espalhamento da radiação pelas folhas das plantas na região espectral do infravermelho próximo. Desta forma, [...] *“cada banda é um indicador do total de vegetação, porém contribuições do solo e da atmosfera fazem com que ocorra uma incerteza na estimativa dos parâmetros biofísicos da vegetação”* (Liu e Huete, 1995; Giongo, 2008).

Deste modo a utilização de índices que trabalhem com a atenuação dos efeitos do solo e com correção dos efeitos atmosféricos como o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) e o Índice de Vegetação Ajustado (EVI), no caso do ambiente urbano, apresentam-se mais eficientes que os demais.

Com relação ao EVI, Ginciene e Bitencourt (2011) afirma que [...] *“na ausência de luz direta, as plantas pertencentes aos estratos inferiores passam a ter disponível uma maior proporção de comprimentos de onda referentes ao azul para realizar a fotossíntese”*, sugerindo que o EVI responda a variações ocorridas na vegetação do sub-bosque.

Autores como Tueller (1987) e Pinker & Karnieli (1995), citado por Maldonado (2004), afirmam que “[...] a influência dos solos no comportamento espectral da vegetação deve ser analisada separadamente, seja em áreas de baixas coberturas vegetais (cobertura inferior à 30%), como em altas coberturas vegetais (cobertura superiores à 30%)”.

Em áreas urbanas a vegetação desempenha importantes funções como elemento do espaço urbano, podendo ser destacado as funções ornamentais e paisagísticas, o controle de ruídos, aumento da umidade do ar, distribuição adequada dos ventos e a filtragem da poluição atmosférica. Outro papel importante desempenhado pela vegetação é a modificação do microclima, adequando o comportamento térmico do arranjo urbano.

Para Almeida (2009) a presença e distribuição da vegetação têm implicações termodinâmicas que repercutem decisivamente no desempenho energético da cidade. O mesmo afirma que [...] *“conhecimento de parâmetros que qualifiquem e quantifiquem os benefícios trazidos pela vegetação na amenização do comportamento climático nos recintos urbanos é de grande importância para profissionais que atuem no planejamento urbano”*.

Souza et al. (2006b) afirmam “que a arborização urbana traz muitos benefícios para a cidade, e tais benefícios devem ser preservados para minimizar os transtornos causados pela falta de arborização. Então não há dúvidas de que a arborização urbana é um instrumento eficaz para minimizar os impactos negativos nos centros urbanos”. Camargo et al. (2007) contribuem afirmando que nas áreas com vegetação, a absorção da radiação solar pela cobertura vegetal e por áreas de corpos hídricos provoca uma redução do calor sensível e das temperaturas.

Em estudo realizado por Cui & Yuan (2009) com a utilização de dados ASTER na cidade costeira de Beihai – Guangxi, costa sul da China, verificou-se que na área urbana, o NDVI e NDWI apresentaram valores baixos e temperatura da superfície alta, enquanto na área rural, o NDVI e NDWI são elevados e temperatura da superfície baixa. Para os grandes fragmentos florestais, é possível notar que o índice de umidade se apresenta mais sensíveis a perturbações provocadas pelo homem, como áreas desmatadas no interior do fragmento.

Porém a constante fragmentação das áreas vegetadas em ambiente urbano, devido à pressão antrópica exercida nas bordas de fragmentos, têm consequências negativas à vegetação. Como consequências do processo de fragmentação de áreas florestais são verificados, por exemplo, um aumento na susceptibilidade de quebra da árvore pelo vento (Zeng et al, 2009), redução na quantidade de habitat para espécies florestais que dependem de grandes fragmentos (Teixeira et al, 2009) e alterações nas condições microclimáticas locais (Bierregaard e Dale, 1996 citado por Ribeiro et al, 2009).

### **2.3 Variação nos valores de ALBEDO**

O Albedo, segundo autores como Blad & Baker (1972), Leitão (1989), Azevedo et al. (1990), Leitão & Oliveira (2000) representa a:

Razão entre as radiações de ondas curtas refletidas e incidentes, sendo também denominada como coeficiente de reflexão. O coeficiente de reflexão de uma superfície vegetada varia ao longo do período diurno, em função do ângulo de elevação do Sol e ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta, do grau de cobertura vegetal, tipo e estado de umidade do solo, condições de umidade do ar e da quantidade e tipo de cobertura de nuvens.

O estudo da influência das variáveis micrometeorológicas no albedo, tais como o vento e o orvalho, também é considerado importante. Minnis et al. (1997), citado por Gomes (2009), “[...] afirma que as variáveis micrometeorológicas podem causar uma assimetria no albedo diurno tão alto quanto 10%, sendo esta assimetria também detectada em dados oriundo de satélite”.

De acordo com Ayoade (1983), citado por Leitão & Oliveira (2000), “[...] o albedo de uma superfície é elevado após o nascer e antes do pôr-do-sol, enquanto que seus menores valores ocorrem em torno do meio dia”. Isto ocorre devido ao fato que os raios solares verticais geralmente produzem valores de albedo menores quando comparado aos raios solares oblíquos ou inclinado.

Outros fatores também contribuem para o aumento do albedo como afirma Charney et al. (1975), citado por Ponce (2009), concluindo que um decréscimo na cobertura vegetal é usualmente acompanhado por um aumento no albedo. Isso leva a um decréscimo na radiação absorvida e um aumento no resfriamento radiativo do ar. Dessa forma, massas de ar iriam permanecer próximas ao solo para manter equilíbrio térmico, e a convecção de cúmulos e precipitação associada seria suprimida.

Estudos desenvolvidos e publicados por Oke (1987) apresentam a variação dos valores de Albedo para diversos alvos da superfície terrestre. Através da Tabela 1 é possível observar os valores de albedo para diversos alvos e verificar, por exemplo, a influência da quantidade de água e umidade no valor exibido por um mesmo alvo.

**Tabela 1.** Valores de Albedo para alguns tipos de alvos da superfície terrestre.

Natureza da superfície	Valor de albedo
Água (ângulo zenital pequeno)	0,03 – 0,10
Água (ângulo zenital maior)	0,10 – 1,00
Pastagem com folhas longas	0,16
Pastagem com folhas curtas	0,26
Solos nus úmidos e escuros	0,05
Solos nus secos e claros	0,40
Asfalto	0,05 – 0,20
Concreto	0,10 – 0,35
Tijolos	0,20 – 0,40
Rochas	0,20 – 0,35
Telhados com tinta e cascalhos	0,08 – 0,18
Vidro limpo com ângulo zenital < 40°	0,08
Vidro limpo com ângulo zenital 40° - 80°	0,09- 0,52

Pinturas Brancas de gelo ou neve	0,50 – 0,90
Pinturas de vermelho, marrom ou verde	0,20 – 0,35
Pinturas pretas	0,02 – 0,15
Áreas urbanas	0,10 – 0,27

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Robinove et al. (1981) afirmam que uma sequência de imagens de albedo pode ser usada para mostrar mudanças sofridas na superfície, seja por causas naturais ou causas antrópicas. Ainda, segundo o mesmo autor, o aumento no albedo é primeiramente devido ao aumento do solo exposto, e a diminuição no albedo é inicialmente devido ao aumento da umidade do solo e ao aumento na densidade da vegetação.

Deste modo, devido aos diferentes alvos e tipos de materiais constituintes observados em um ambiente urbano, é possível realizar a caracterização de diversos tipos de uso através da utilização de cartas de albedo e verificar a evolução espaço-temporal destes alvos.

#### **2.4. Estudo da Temperatura da superfície e do fenômeno de ilhas de calor**

Lombardo (1985), afirma que o clima urbano [...] *“é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e a sua urbanização é o resultado de ações antrópicas conjugadas com os aspectos geoambientais do sítio urbano.”* A ocorrência de grandes mudanças espaciais nas áreas urbanas, como a diminuição da cobertura vegetal e a impermeabilização de grandes áreas, apresentam impacto significativo nas áreas urbanas.

Moreira & Nobrega (2011) afirmam que as [...] *“características do uso do solo da cidade do Recife têm apresentando nos últimos anos um elevado percentual de áreas cobertas por asfalto e concreto, as quais são superfícies capazes de converter e armazenar a radiação solar incidente.”* Esta realidade apresenta impacto no clima urbano gerando áreas com elevado desconforto térmico.

As ilhas de calor são formadas nas áreas urbanas ou suburbanas devido à absorção e retenção de calor do sol por materiais utilizados na construção civil. Isto ocorre por que os materiais utilizados, na maioria dos casos, são impermeáveis não possibilitando o acúmulo de água. Deste modo não ocorre à liberação ou dissipação do calor pela umidade. Fatores como o calor antropogênico, a diminuição da

distribuição e velocidade do vento e a poluição do ar, gerada na maioria dos casos pelo grande número de automóveis, contribui efetivamente para a formação das ilhas de calor.

Dentre os principais impactos causado pelo fenômeno de Ilhas de calor, podem ser citados, além do desconforto térmico, aumento da temperatura do ar, aumento no número de casos relacionados a problemas de saúde e a diminuição da eficiência energética de diversos empreendimentos. A geometria urbana também contribui para a intensificação do fenômeno. Para Gartland (2010) a distribuição dos edifícios pode diminuir a velocidade do vento, ocasionando o atraso na transferência do calor da superfície para o ar.

Diversos tipos de análises podem ser utilizadas para realizar a medição e simulação das ilhas de calor urbana, podendo ser citadas a utilização de estações fixas, transectos móveis, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e sensoriamento vertical e medição ou estimativa de balanço de energia. Freitas (2005) utilizou-se da observação dos dados disponíveis na PCD Recife e a coleta de informações de temperatura em 20 pontos distribuídos pelo município. Estudos realizados por Oliveira (2010) e Moreira & Nóbrega (2011), no município do Recife verificaram a ocorrência de ilhas de calor através da utilização de técnicas de sensoriamento remoto.

Estudos, como o realizado por Chen et al (2006), verificou a influência da mudança de uso e cobertura da terra na disposição da temperatura da superfície. O mesmo afirma que o dramático aumento da urbanização intensificou o surgimento das ilhas de calor urbana em diversas áreas. As áreas de solo exposto e área urbana, antes distribuídas espacialmente, com o passar dos anos se tornaram mais homogêneas, formando um padrão contínuo de ilhas de calor.

As áreas vegetadas se apresentam como importantes agentes de amenização da temperatura em ambiente urbano promovendo a redução do consumo de energia e o aumento da qualidade do ar. Estudo publicado por Mock (2005) afirma que para se alcançar a sustentabilidade dos ecossistemas urbanos, em elevado ritmo de expansão oferecendo o máximo de benefícios aos seus habitantes, é necessário à gestão integral da vegetação urbana e o apoio da comunidade local na preservação destas áreas.

Atualmente diversos sensores tem disponibilizado, para diferentes escalas espaciais, espectrais e temporal, o dado de temperaturas do ar e da superfície a nível global ou local. Podem ser citados os sistemas imageadores a bordo dos satélites MODIS, NOAA, GOES, ASTER e o sistema LANDSAT. Através da utilização da banda do termal do sensor TM, disponível no satélite Landsat, é possível realizar a estimativa da temperatura da superfície através da utilização de metodologias proposta por diversos autores (TSAY & LIU, 2000; ALLEN *et al.*, 2002; CHEN *et al.*, 2002 - 2006) com resolução espacial de 120 m.

Imhoff *et al.* (2010) afirma que para a realização de estudos em áreas urbanas que envolvam a caracterização de ilhas de calor é necessário a utilização de um sensor termal que possua uma boa resolução espacial. Tendo em vista a quantidade limitada de satélites que dispõem de sensor termal e a grande disponibilidade de imagens com baixa resolução espacial estudos realizado por Kustas *et al.* (2003) e por Agam *et al.* (2007) demonstram o desenvolvimento de uma técnica de refinamento da resolução espacial.

A técnica nomeada de TsHARP (AGAM, *et al.* 2007) parte da premissa de existência de uma relação estreita entre os índices de vegetação e a Temperatura da superfície (WHITE *et al.*, 1997; BADECK *et al.*, 2004) em uma cena de determinado sensor. Para as imagens do sensor TM, Agam *et al.*, (2007) encontrou um erro que variou entre 1,8 e 2,4°C na temperatura da superfície quando comparado ao observado em campo.

Porém foi possível observar a melhoria na caracterização da temperatura da superfície de diversos alvos e fenômenos que ocorrem à superfície. Deste modo os autores afirmam que mais estudos devem ser realizados, com maior número de imagens e de dados de superfície para se chegar a conclusões mais sólidas sobre a metodologia.

## **2.5. Evapotranspiração**

O processo de evapotranspiração representa o fechamento do ciclo hidrológico, onde a água precipitada retorna para a atmosfera. Deste modo até meados do século 18 não se tinha evidenciado a compreensão da importância do processo de evapotranspiração.

A evapotranspiração segundo Klocke *et al.* (1996), é composta pelo ocorrência de dois processos: a evaporação e transpiração. A evaporação esta relacionado ao processo de transferência de água líquida de corpos hídricos como lagos e rios, por exemplo, a água que umedece o solo para vapor do ar (ALLEN *et al.*, 1998). Já a transpiração corresponde a passagem de água para a atmosfera controlada pela abertura dos estômatos da folha (PEREIRA *et al.*, 2002).

Com relação à importância dos fenômenos a evapotranspiração influencia fortemente a quantidade de água precipitada que é transformada em vazão em uma bacia hidrográfica enquanto que a evaporação apresenta-se importante para a engenharia devido a ocorrência de perda de água em reservatórios e canais.

O processo de transformação do estado líquido da água para o estado gasoso demanda muita energia. Tucci e Silveira (2001) afirma que anualmente cerca de  $5,5 \times 10^5 \text{ km}^3$  de água é evaporada. Este processo utiliza cerca de 36% de toda a energia solar absorvida pela Terra, cerca de  $1,4 \cdot 10^{24}$  Joules por ano. A quantidade de energia utilizada por uma molécula de água líquida para romper a superfície e evaporar é chamada de calor latente de evaporação.

No caso da evapotranspiração, diversos fatores irão influenciar na intensidade do fluxo de evapotranspiração como a própria disponibilidade de água, fatores atmosféricos como a radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar e a velocidade do vento, e fatores ligados ao manejo do solo (ALLEN *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 2002, BEZERRA, 2006).

A vegetação apresentam mecanismos para evitar a perda de água para a atmosfera na ocorrência de períodos de longa estiagem por exemplo. Enquanto a disponibilidade de umidade no solo for elevado a vegetação produzirá muita evapotranspiração. À medida que a umidade do solo for diminuindo a vegetação responderá fechando os estômatos e preservando água dentro da vegetação. Este fato pode ser observado em áreas de caatinga do nordeste brasileiro onde em longos períodos de estiagem a vegetação diminui consideravelmente a evapotranspiração.

No ambiente urbano o processo de adensamento e impermeabilização de grandes áreas promove a diminuição da capacidade de retenção de água pelo

solo. Nas áreas impermeabilizadas a água é rapidamente perdida diminuindo consideravelmente a evapotranspiração e agravando o fenômeno de ilhas de calor urbana (WANG & XU, 2008). Esta diminuição na quantidade de água evapotranspirada irá impactar diretamente o balanço de água e de calor entre a superfície e a atmosfera.

Torna-se, portanto, importante à realização de estudos que venham a avaliar as consequências das mudanças de uso e ocupação do solo em ambiente urbano e os impactos gerados na distribuição da evapotranspiração. Para realizar a medição e estimativa da evapotranspiração diversos métodos tem sido recomendados pela literatura como o método de Balanço hídrico do solo (ALLEN *et al.*, 1998), Razão de Bowen (SAUER *et al.*, 1998; NAGLER *et al.*, 2005;), método de Lisímetros de pesagem (ALLEN *et al.*, 2002) e Correlações turbulentas (TOL *et al.*, 2003).

Para Allen *et al.* (2002), todos estes métodos apresentam grande confiabilidade para a obtenção dos valores de evapotranspiração com uma boa precisão. Porém para a medição de evapotranspiração em grandes áreas, estes métodos apresentam grandes limitações por realizarem a estimativa pontual. Deste modo diversos modelos de estimativa de balanço de radiação, energia e estimativa de evapotranspiração têm sido proposto (SEBAL, S-SEBI, SEBS), podendo ser destacado o algoritmo SEBAL, desenvolvido e aplicado por Bastiaanssen (1995).

Hafeez *et al.* (2002) afirma que a utilização das técnicas de sensoriamento para estimativa da evapotranspiração tem sido realizado desde a década de 90 do século passado e tem alcançado aplicações em diversas partes do mundo (HAFEEZ *et al.*, 2002; BASTIAANSSEN & CHANDRAPALA, 2003; CHEMIN *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2005a,b).

## **2.6. Surface Energy Balance Algorithm for Land – SEBAL**

A superfície terrestre recebe diariamente a energia da radiação solar considerada a mais importante fonte de energia para toda a biosfera. Segundo Liu (2006):

[...] desta radiação uma parte é refletida pela superfície terrestre, sendo chamada de albedo; a segunda parte aquece o ar, conhecido como fluxo de calor sensível manifestada através da temperatura do ar; a



terceira parte aquece a superfície terrestre, sendo chamado de fluxo de calor sensível ao solo manifestado pela temperatura do solo; e a quarta parte evapora à superfície terrestre, sendo o fluxo de calor latente que se manifesta através da evapotranspiração.

Segundo Correia (2000) o balanço de energia à superfície determina a quantidade de fluxo de energia disponível para a evaporação da água e para a variação na temperatura da superfície. O autor ainda afirma que:

[...] deste modo, apresenta-se mais complexo que no topo da atmosfera tendo em vista que o mesmo considera os fluxos de energia e de umidade por condução e por convecção no movimento dos fluidos, os quais dependem basicamente da insolação, das características da superfície tais como umidade, cobertura vegetal e albedo, e do estado da atmosfera.

Bastiaanssen (1995; 1998a; 1998b) propôs um algoritmo que proporciona a obtenção dos valores de Saldo de radiação, Fluxo de calor no solo e Evapotranspiração de modo satisfatório espacializado para amplas áreas através da utilização de imagens de satélite e um número reduzido de medidas da superfície.

Até então a obtenção destes valores por outros métodos, como o método do balanço de energia, método da razão de Bowen e o método das relações turbulentas, apresentavam limitações devido a heterogeneidade das áreas de estudo (Bastiaanssen *et al.*, 1998a; Allen *et al.* 2002).

O algoritmo foi chamado de *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e tendo em vista a sua potencialidade diversos autores (Bastiaanssen, 2000; Morse *et al.*, 2001; Allen *et al.*, 2002; Hafeez *et al.*, 2002; Bastiaanssen & Chandrapala, 2003; Chemin *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2005a,b) afirmam que o SEBAL é um dos mais destacados algoritmos utilizado para a obtenção e estudos dos fluxos de calor latente, fluxo de calor sensível à superfície e Evapotranspiração, alcançado valores satisfatórios em diversas partes do mundo.

Bezerra (2006) afirma que os principais produtos gerados pela utilização do SEBAL [...] “é o consumo de água, ou a evapotranspiração real, e a produção de biomassa de culturas agrícolas e vegetação nativa, pixel a pixel.” Dentre as principais aplicações podem ser citados a utilização em estudos ambientais como a gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas, na avaliação e administração de lâminas de irrigação e na modelagem hidrológica.

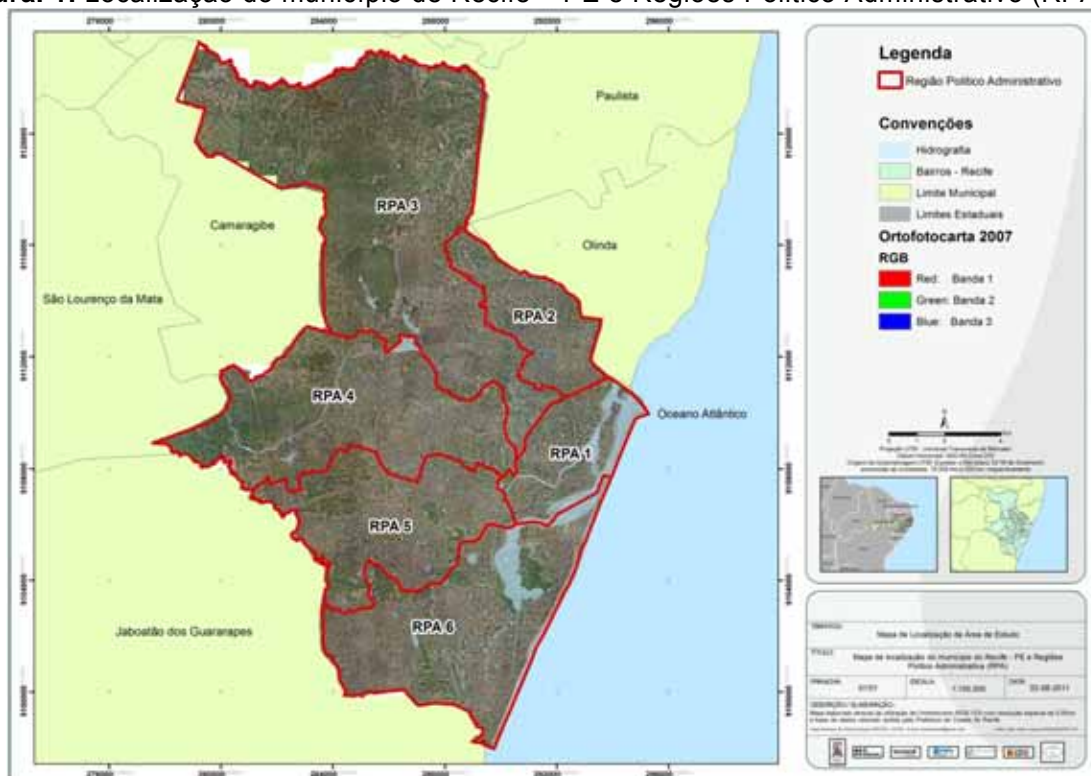
Bastiaanssen *et al.* (1998), afirma que o objetivo principal do SEBAL era suprir a carência de algoritmos para aplicação em escala regional. Deste modo o SEBAL permite aplicação nos mais diversos tipos de uso e ocupação que são encontradas em escalas maiores de paisagem (como nas áreas de solo exposto, vegetação nativa e cultura irrigada). Torna-se, portanto importante o conhecimento quantitativo destes fluxos visando a resolução de problemas relacionados aos recursos hídricos.

### 3. MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1. Caracterização da Área de estudo

O município do Recife, Figura 1, capital do Estado de Pernambuco, situa-se no litoral nordestino e ocupa uma posição central, a 800 km de outras duas metrópoles regionais, Salvador e Fortaleza, disputando com elas o espaço estratégico de influência na região. Apresenta uma superfície territorial de 218,50 km<sup>2</sup> limitando-se ao norte com as cidades de Olinda e Paulista, ao sul com o município de Jaboatão dos Guararapes, a oeste com São Lourenço da Mata e Camaragibe, e a leste com o Oceano Atlântico.

**Figura. 1.** Localização do município de Recife – PE e Regiões Politico Administrativo (RPA).



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

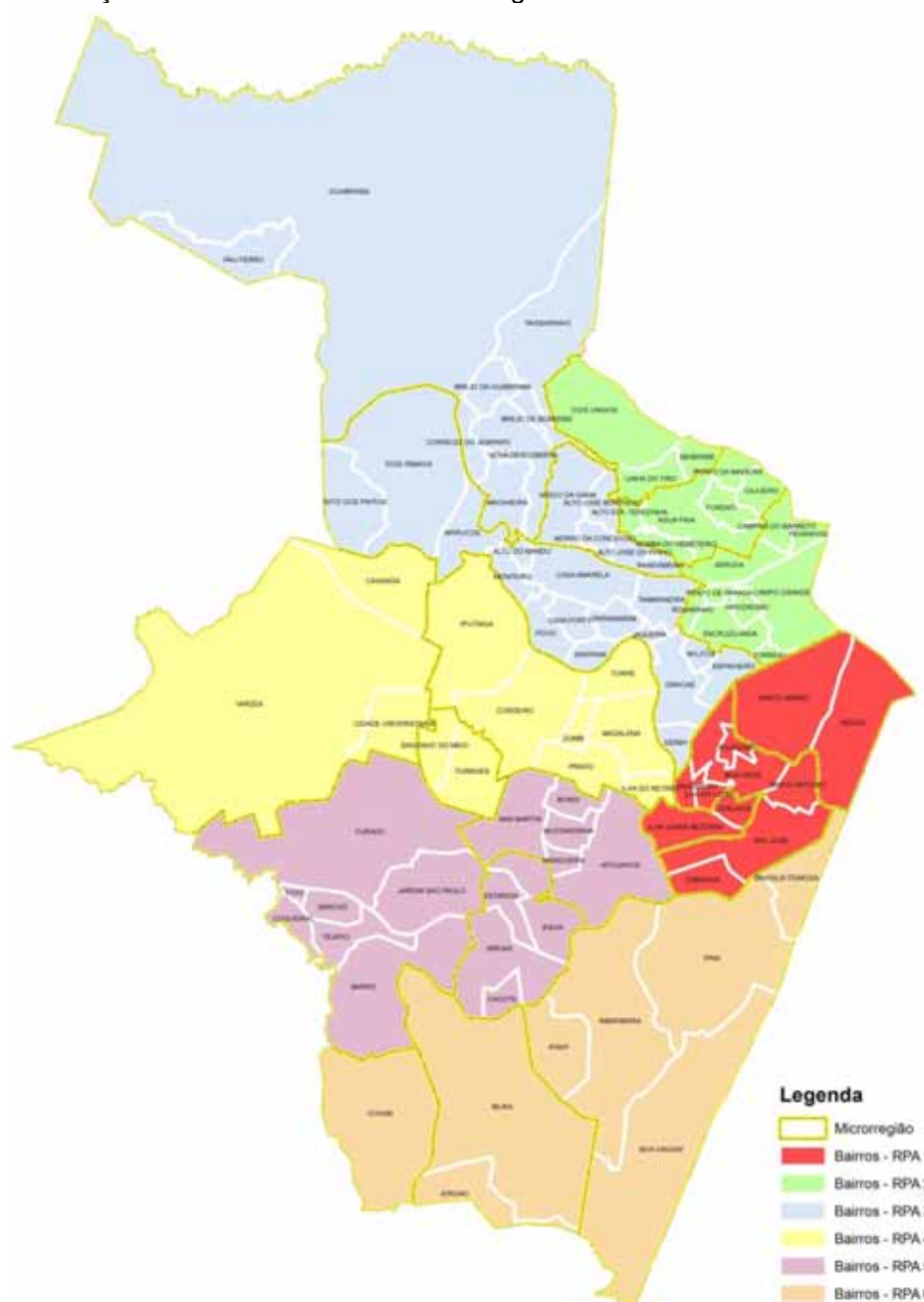
Segundo os dados do recenseamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – Censo 2010 – a Cidade do Recife possui uma população de 1.537.704 habitantes, correspondendo a 17,48% da população do Estado, e a 41.63% da RMR, o que lhe propicia uma densidade demográfica de 6.989 habitantes/km<sup>2</sup>. Segundo a Prefeitura da Cidade do Recife o município expressa na sua configuração físico-territorial as diferenças provocadas pelo quadro socioeconômico que se consolidou ao longo de sua história. Atualmente, o

espaço urbano do município encontra-se dividido em 94 bairros, 18 microrregiões e em seis Regiões Político-Administrativas (RPA), Figura 2, atendendo ao estabelecido no artigo 88, § 1º e 2º da Lei Orgânica do Recife que determina:

[...] § 1º - Para efeito de formulação, execução e avaliação permanente das políticas e de planejamento governamental, o Município será dividido em regiões político-administrativas na forma da Lei.

§ 2º - Na definição das regiões político-administrativas devem ser observadas as legislações pertinentes e assegurada a unidade histórico-cultural, demográfica, social e econômica do ambiente urbano”.

**Figura 2.** Distribuição dos bairros do Recife em Regiões Políticas Administrativas.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Climaticamente o município do Recife encontra-se situado dentro da faixa intertropical, apresentando a área urbana localizada a cerca de 8 graus ao sul do equador. Correa (2006) afirma que a Região Metropolitana do Recife *“encontra-se localizada na faixa de maior insolação da Terra, recebendo os raios solares quase perpendiculares à superfície e, pela baixa latitude, com horas de insolação praticamente constantes entre os meses de verão (de maior insolação) e inverno (de menor insolação)”*.

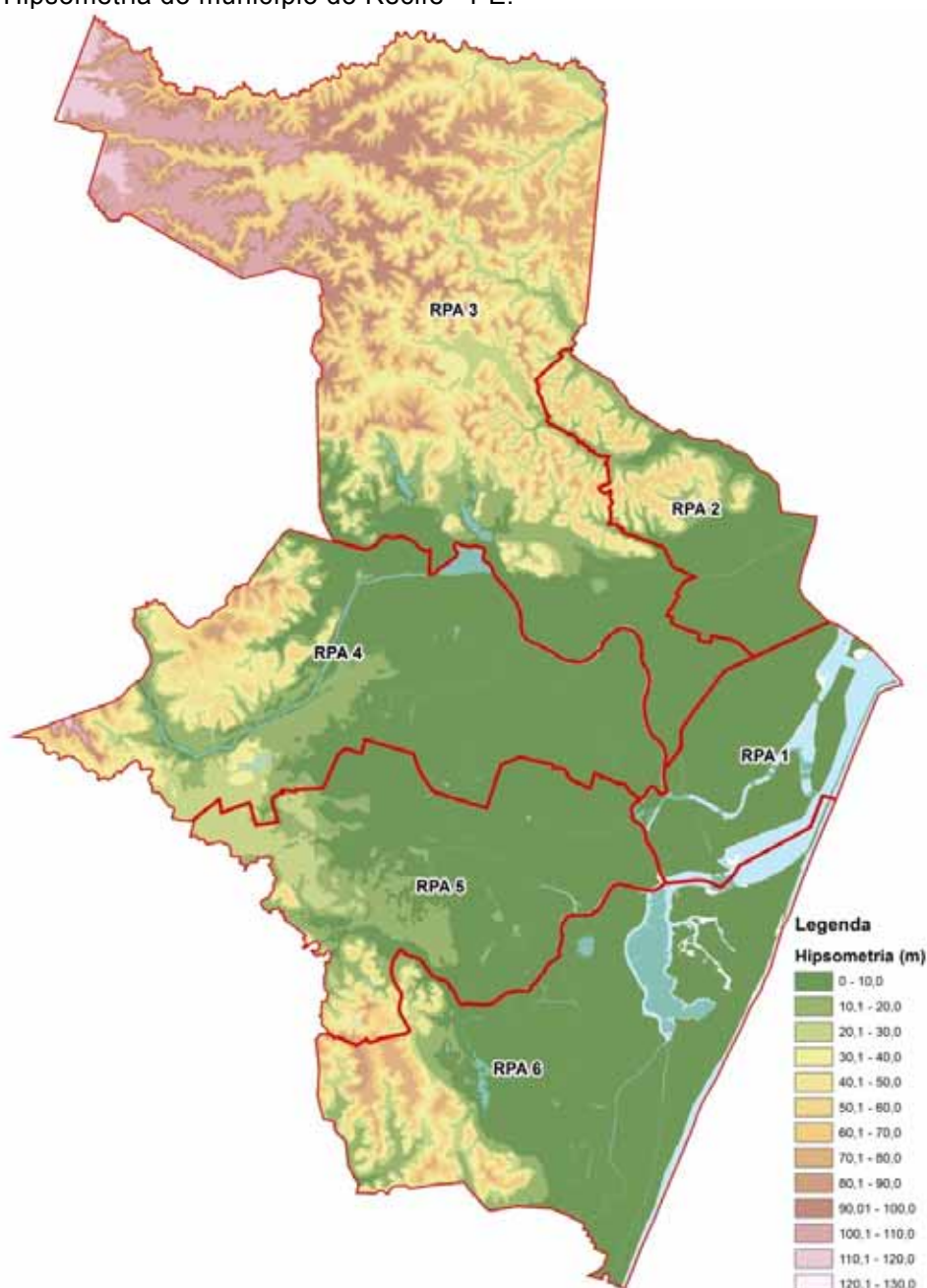
O litoral Pernambucano, localizado na Costa Oriental do Nordeste Brasileiro sofre influências de diversas Massas de ar, tais como: Massa Equatorial do Atlântico Sul (MEAS), e pelas perturbações que esta massa sofre ao longo dos anos, que na maioria dos casos, associa-se a gênese de chuvas no município, a Massa Tropical Atlântica (MTA) e Massa Polar Atlântica (MPA), que muitas vezes chega em processo de dissipação, não caracterizando um sistema frontal nítido.

Oliveira *et al.* (2011) também destaca que *“em Recife - PE foram identificados como responsáveis pelos eventos extremos de precipitação nos últimos anos os seguintes sistemas atmosféricos: ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), VCANs (Vórtices Ciclones de Altos Níveis) e DOLs (Distúrbios Ondulatórios de Leste)”*.

O município do Recife apresenta 67,43% de sua área caracterizada como áreas de morros; 23,26% de planícies; 9,31% de aquáticas; e 5,58% de Zonas Especiais de Preservação Ambiental – ZEPA. No mapa hipsométrico, Figura 3, é possível observar que mais de 50% do município encontra-se com altitude abaixo de 10 metros. As áreas mais ao norte, oeste e sudoeste do município apresentam valores de altitude superiores a 20 metros, apresentando altitude superiores a 100 metros em algumas localidades.

Estas áreas, segundo Correa (2006), são chamadas de *“Unidade de Colinas dissecadas ou morros, identificadas a partir da morfologia pluri-convexa e alta dissecação fluvial”*; e são geralmente associadas à Formação Barreiras. Segundo Filho (1997) a vegetação original é de Mata Atlântica, cuja principal característica são as áreas de mata densa, e os manguezais que ocupam as áreas mais baixas, sob a influência das águas das marés.

**Figura 3.** Hipsometria do município do Recife - PE.



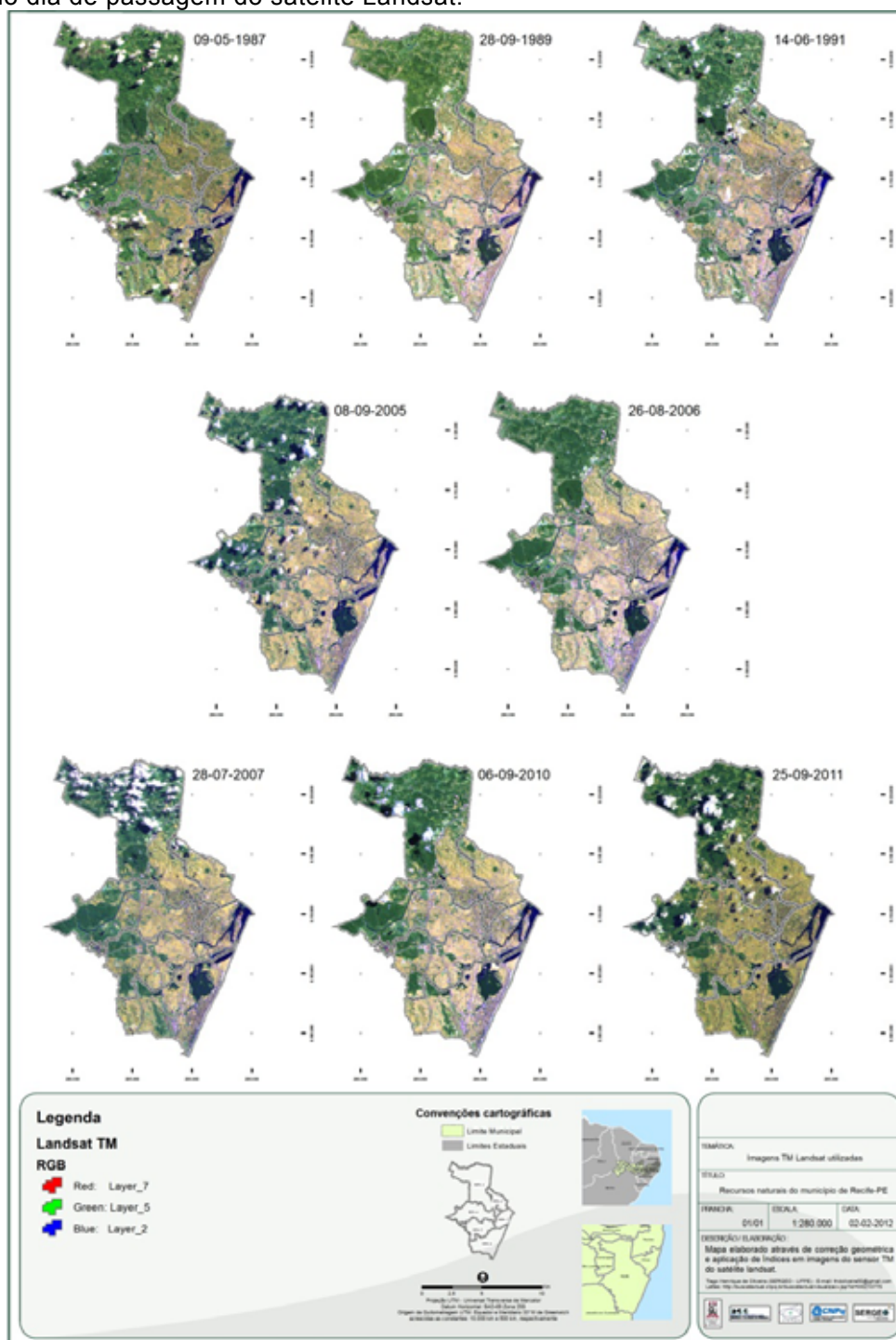
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

### **3.2. Dados Radiométricos**

Foram utilizadas oito imagens do sensor Thematic Mapper (TM), de órbita e pontos 214/65-66, a bordo do satélite Landsat 5, obtidas junto à Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As datas de passagem do satélite a área de estudo ocorreram em 9 de maio de 1987, 28 de setembro de 1989, 14 de junho de 1991, 8 de setembro de 2005, 26 de agosto de 2006, 28 de julho de 2007, 6 de setembro de 2010 e 25 de setembro de 2011, Figura 4.



**Figura 4.** Imagens utilizadas na realização da pesquisa e distribuição de nuvens e sombra de nuvens no dia de passagem do satélite Landsat.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

O sensor TM foi lançado a bordo dos satélites Landsat 4 e Landsat 5, e possui separação espectral adequada ao seu principal propósito, ou seja, oferecer subsídios para mapeamentos temáticos na área de recursos naturais. Este sensor continuou em atividade no satélite Landsat 5 operando com 7 bandas espectrais que englobam as regiões do visível, infravermelho próximo,

médio e termal, tendo finalizado as suas operações no início de 2012 devido a falhas no sistema.

Os dados do sensor TM foram utilizados em pesquisas e definições de metodologias em amplas áreas do conhecimento científico e tiveram importância singular para a evolução das técnicas desenvolvidas e utilizadas no sensoriamento remoto mundial (EMBRAPA, 2009).

### **3.3 Etapas de pré-processamento das imagens do satélite Landsat**

Após o download das imagens a serem utilizadas, todas as bandas de cada cena Landsat foram empilhadas e corrigidas geometricamente, tomando por base a imagem ortoretificada disponibilizada pelo site [landsat.org](http://landsat.org)<sup>1</sup>. Posteriormente foi realizada a exclusão dos números digitais referentes a nuvens e sombras de nuvens através da realização de uma classificação supervisionada, tendo em vista que a região do Recife apresenta uma alta incidência de nuvens, o que vem a inviabilizar a utilização de dezenas de imagens ao longo dos últimos 25 anos.

Deste modo evita-se a confusão dos números digitais destes alvos com os valores dos demais alvos, observados no município do Recife, impedindo uma interpretação errônea dos resultados em diversos índices, como índices de vegetação e temperatura da superfície. Assim, após a classificação os valores de nuvens e sombra de nuvens apresentaram o mesmo valor em toda a imagem, tornando possível excluí-los em cada índice e retirar estes valores das análises estatísticas e tabelas a serem geradas. Através da Figura 5 é possível observar o fluxograma de pré-processamento das imagens.

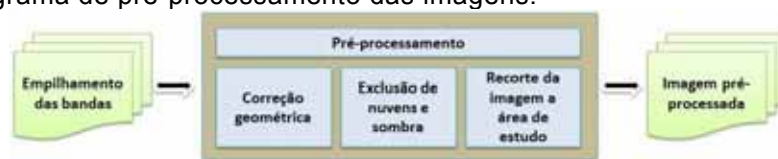
Através da observação dos dados meteorológicos disponíveis na PCD Recife (dados observados a partir do ano de 2000, para a PCD Recife, e disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE), foi verificada a ocorrência de precipitação nos dias anteriores ao dia do imageamento das imagens de 2005 a 2011. Porém os anos de 2005 e 2007 apresentaram elevados índices de precipitação para o mês em que a imagem foi obtida, o que pode explicar a maior ocorrência de nuvens dentre as imagens utilizadas.

---

<sup>1</sup> O site [Landsat.org](http://landsat.org) é um site de apoio a compra, distribuição e compartilhamento de imagens dos satélites Landsat 4, 5 e 7 de todo o planeta Terra. Deste modo é oferecido ao usuário uma plataforma simples de busca e encomenda on-line das imagens. Informações obtidas através de acesso em [[www.landsat.org](http://www.landsat.org)].



**Figura 5.** Fluxograma de pré-processamento das imagens.



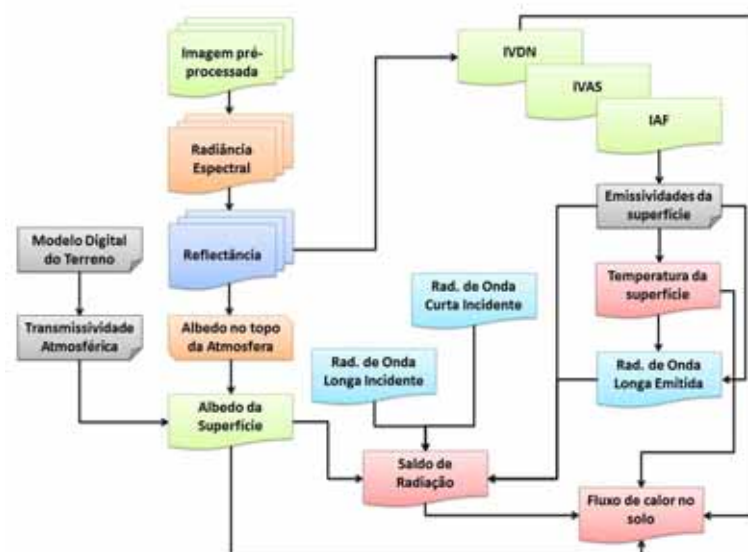
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Ao final deste processamento a imagem foi recortada ao limite da área de estudo, visando uma melhor visualização da dinâmica espacial ocorrida no local. Tendo em vista que o município do Recife se apresenta em pontos diferentes (pontos 65 e 66) da órbita 214 do satélite Landsat, todo o pré-processamento e computo dos índices foi realizado com as imagens separadas. Cada índice gerado ao final do processo foi mosaicado.

### 3.4. Etapas de aplicação do Algoritmo SEBAL

Para o processamento das imagens Landsat foram desenvolvidos modelos através da ferramenta Model Maker do programa ERDAS Imagine 9.3 (Licença em nome do Laboratório de Geoprocessamento do DCG-UFPE e do Grupo de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento - SERGEO). Através da Figura 6 pode ser observado as etapas do processamento das imagens e modelos elaborados para obtenção do Balanço de Radiação a superfície e do Fluxo de Calor no solo. Logo após é descrito cada uma das etapas para obtenção da Evapotranspiração conforme SILVA (2009).

**Figura 6.** Fluxograma para obtenção dos valores de Balanço de Radiação a superfície e Fluxo de calor do solo.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

### 3.4.1. Calibração radiométrica

A calibração radiométrica ou a radiância espectral (Equação 1) consiste na conversão do nível de cinza de cada pixel e banda, em radiância monocromática, que representa a energia solar refletida, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Para a banda termal, essa radiância representa a radiação emitida por cada pixel, sendo empregada na obtenção da temperatura da superfície. A radiância de cada pixel e banda foi obtida pela equação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (1)$$

onde  $a$  e  $b$  são as radiâncias espectrais mínima e máxima ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ),  $ND$  é a intensidade do pixel (valor inteiro entre 0 e 255) e  $i$  corresponde às bandas (1, 2, ... e 7) dos satélites Landsat 5 e 7. Os coeficientes de calibração utilizados para as imagens TM são os propostos por Chander e Markham (2003).

### 3.4.2. Reflectância

A reflectância (Eq. 2) de cada banda ( $\rho_{\lambda i}$ ) é definida como sendo a razão entre o fluxo de radiação solar refletido pela superfície e o fluxo de radiação solar global incidente, a qual é obtida através da equação (Allen et al., 2002):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

onde  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda,  $K_{\lambda i}$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ ),  $Z$  é o ângulo zenital solar e  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol ( $r$ ) em dado dia do ano (DSA).

### 3.4.3. Albedo planetário ( $\alpha_{toa}$ )

O albedo não corrigido (Eq. 3) é obtido através da combinação linear das reflectâncias monocromáticas, qual seja:

$$\alpha_{toa} = 0,293 \rho_1 + 0,274 \rho_2 + 0,233 \rho_3 + 0,157 \rho_4 + 0,033 \rho_5 + 0,011 \rho_7 \quad (3)$$

onde  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$  e  $\rho_7$  são os albedos planetários das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

#### 3.4.4. Transmissividade Atmosférica

Em condições de céu claro, a transmissividade atmosférica (Eq. 4) pode ser obtida como proposta por Allen et al. (2002):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} Z \quad (4)$$

onde Z corresponde a altitude média da área ou a altitude de cada pixel (m). Como a área apresenta uma grande variação de altitude foi necessário recorrer à utilização de um Modelo Digital de Elevação (MDT) elaborado através de dados de radar SRTM.

#### 3.4.5. Albedo da superfície ( $\alpha$ )

O albedo à superfície (Eq. 5) é o albedo corrigido quanto aos efeitos atmosféricos:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (5)$$

onde  $\alpha_p$  é a reflectividade da atmosfera, variando entre 0,025 e 0,04. Estudo realizado por Bastiaanssen (2000) afirma que o valor mais recomendado para o SEBAL seja o de 0,03.  $\tau_{sw}$  é a 'transmissividade atmosférica, obtida para condições de céu claro em função da altitude de cada pixel, por equação proposta por Allen et al. (2002).

#### 3.4.6. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) apresenta-se como um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores apresentam variação entre -1 a +1. Para superfícies com alguma tipo de vegetação o NDVI varia de 0 a 1; já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

O mesmo é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo ( $\rho_{IV}$ ) e do vermelho ( $\rho_V$ ), e a soma das mesmas, como pode ser visto através da equação 6:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (6)$$

onde  $\rho_{IV}$  e  $\rho_V$  correspondem, respectivamente, às bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM.

#### 3.4.7. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS)

Foi utilizado o índice de vegetação ajustado por solo (Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI) introduzindo um fator no IVDN para incorporar o efeito da presença do solo, mantendo-se o valor do IVDN dentro de -1 a +1, seguindo a equação proposta por Heute (1988). Esse índice é calculado através da equação 7:

$$IVAS = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (7)$$

onde  $\rho_{IV}$  e  $\rho_V$  correspondem, respectivamente, às bandas do infravermelho próximo e do vermelho e L é o fator de ajuste do solo, cujo valor mais frequentemente usado é 0,5 (Accioly et al., 2002; Boegh et al., 2002; Silva et al., 2005a).

#### 3.4.8. Índice de Área Foliar (IAF)

O índice de área foliar (Equação 8) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. Este índice é um indicador de biomassa de cada pixel da imagem sendo calculada por equação empírica proposta por Allen et al. (2002):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91} \quad (8)$$

#### 3.4.9 Emissividades

Para a obtenção da temperatura da superfície, é utilizada a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal  $\epsilon_{NB}$ , qual seja: 10,4 – 12,5  $\mu m$ .

Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga  $\epsilon_0$

(5 – 100  $\mu\text{m}$ ). Segundo Allen et al. (2002), as emissividades  $\varepsilon_{\text{NB}}$  (Eq. 9) e  $\varepsilon_0$  (Eq. 10) podem ser obtidas, para NDVI > 0 e IAF < 3, segundo:

$$\varepsilon_{\text{NB}} = 0,97 + 0,00331 \text{IAF} \quad (9)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \text{IAF} \quad (10)$$

Para pixels com  $\text{IAF} \geq 3$ ,  $\varepsilon_{\text{NB}} = \varepsilon_0 = 0,98$ . Para corpos de água (NDVI < 0), no caso do lago de Sobradinho e do leito do Rio São Francisco, Silva & Cândido (2004) utilizaram os valores de  $\varepsilon_{\text{NB}} = 0,99$  e  $\varepsilon_0 = 0,985$ , conforme Allen et al. (2002).

#### 3.4.10 Temperatura da Superfície (Ts)

Para a obtenção da temperatura da superfície são utilizadas a radiância espectral da banda termal  $L_{\lambda,6}$  e a emissividade  $\varepsilon_{\text{NB}}$ , obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície em kelvin (Eq. 11) pela seguinte expressão:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{\text{NB}} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (11)$$

onde  $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$  e  $K_2 = 1260,56\text{K}$  são constantes de calibração da banda termal do Landsat 5 –T (Allen et al., 2002; Silva et al., 2005).

#### 3.4.11. Radiação de Onda Longa Emitida

A radiação de onda longa emitida pela superfície  $R_{\text{L}\uparrow}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) é obtida através da equação de Stefan-Boltzman (Eq. 12):

$$R_{\text{L}\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (12)$$

onde  $\varepsilon_0$  é a emissividade de cada pixel,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) e  $T_s$  é a temperatura da superfície (K).

#### 3.4.12. Radiação de onda curta incidente

A radiação de onda curta incidente  $R_{\text{s}\downarrow}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) corresponde ao fluxo de radiação solar global (direta mais difusa) que atinge a superfície terrestre, que em condição de céu claro é dada pela seguinte expressão (Allen et al., 2002):

$$R_{s\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r^{-2} \cdot \tau_{sw} \quad (13)$$

onde  $S$  é a constante solar ( $1367 \text{ W m}^{-2}$ ),  $Z$  é ângulo zenital solar,  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica.  $R_{s\downarrow}$  pode ser considerado constante em toda a área de estudo, quando a mesma é de pequena dimensão (50 Km x 50 Km, por exemplo).

#### 3.4.13. Radiação de onda longa incidente

A radiação de onda longa incidente, Equação 14, emitida pela atmosfera na direção da superfície  $R_{L\downarrow}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ), pode ser computada pela equação de Stefan-Boltzman:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (14)$$

onde  $\varepsilon_a$  é a emissividade atmosférica, obtida por:  $\varepsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}$  (Allen et al., 2002),  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman e  $T_a$  é a temperatura do ar (K).

#### 3.4.14. Saldo de radiação (Rn)

O saldo de radiação à superfície ( $\text{W m}^{-2}$ ) é computado utilizando-se a seguinte equação do balanço de radiação à superfície:

$$Rn = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (15)$$

onde  $R_{s\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente (ou radiação solar global),  $\alpha$  é o albedo corrigido,  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel,  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e  $\varepsilon_o$  é a emissividade de cada pixel.

#### 3.4.15. Fluxo de calor no solo (G)

O fluxo de calor no solo ( $\text{W m}^{-2}$ ) pode ser obtido através da utilização da equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia:

$$G = [T_s(0,0038 + 0,0074 \alpha)(1 - 0,98 \text{NDVI}^4)] Rn \quad (16)$$

onde  $T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha$  o albedo da superfície e NDVI o índice de vegetação da diferença normalizada, todos computados pixel a pixel.

Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos de água (NDVI<0), pode ser utilizada a seguinte expressão:  $G = 0,3R_n$ , usada por Silva & Cândido (2004) ou  $G = 0,5R_n$ , segundo Allen et al.(2002).

#### 3.4.16. Fluxo de calor sensível (H)

O fluxo de calor sensível ( $W\ m^{-2}$ ), Eq. 17, o cerne do SEBAL, é estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura do ar entre dois níveis ( $Z_1 = 0,1\ m$  e  $Z_2 = 2\ m$ ), acima do pixel, segundo Bastiaanssen et al. (1998a):

$$H = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (17)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do ar ( $1,15\ kg\ m^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante ( $1004\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ),  $a$  e  $b$  são constantes (obtidas com o auxílio dos pixels âncoras) que representam a diferença da temperatura entre dois níveis  $Z_1$  e  $Z_2$ ,  $T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ ) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $sm^{-1}$ ).

Na Figura 7 está representado o esquema do cômputo de  $H$ , que é iniciado com dados de uma estação meteorológica no interior da cena estudada, quais sejam: a velocidade do vento ( $ms^{-1}$ ) no nível de  $2\ m$  (ou outro nível conhecido) e a altura média da vegetação ( $m$ ) circundante no local da medição da velocidade do vento.

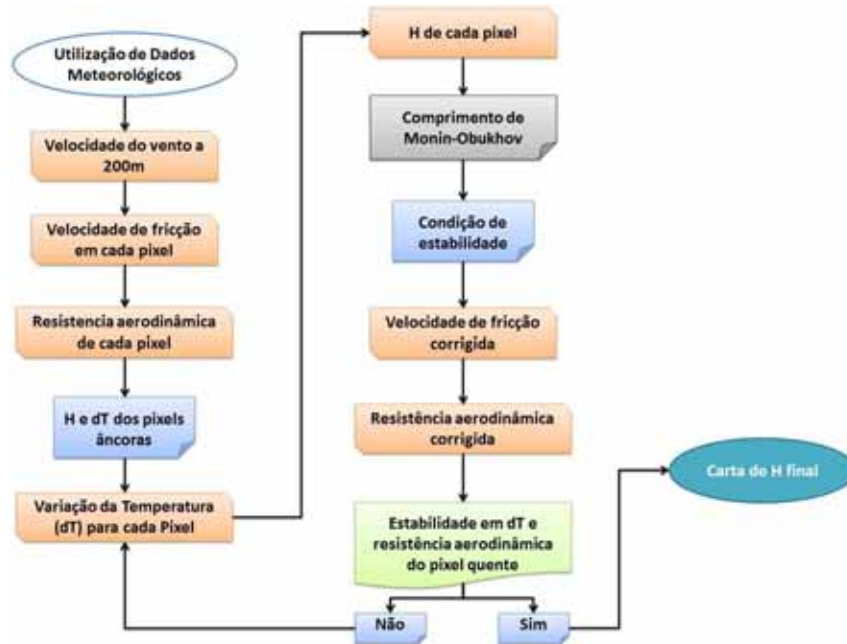
Para a obtenção de  $H$  com o modelo SEBAL, faz-se necessário o conhecimento de dois pixels, denominados pixels âncoras, para se determinar a variação de temperatura ( $dT$ ) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ) em todos os pixels da área de estudo.

Inicialmente, a resistência aerodinâmica  $r_{ah}$  ( $sm^{-1}$ ) é computada admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra, pela seguinte expressão:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k}$$

onde  $Z_1$  e  $Z_2$  são as alturas (em metros) acima da superfície (em alguns estudos mais recentes têm sido utilizados  $Z_1 = 0,1\ m$  e  $Z_2 = 2,0\ m$ ),  $u_*$  velocidade de fricção ( $ms^{-1}$ ) e  $k$  é a constante de von Karman (0,41).

**Figura 7.** Fluxograma das etapas do processamento do fluxo de calor sensível.



Fonte: Modificado de Silva et al, (2012)

Nesta etapa são reunidas as informações sobre a velocidade do vento  $u$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) e a altura média da vegetação  $h$  (m) que envolve a estação meteorológica. Considera-se um raio igual à metade da resolução espacial do Landsat 5 – TM e a altura de obtenção de  $u$ . Dessa forma, obtém-se o coeficiente de rugosidade local  $z_{0m}$  em função da altura média da vegetação segundo equação de Brutsaert (1982):

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

Ao considerar, por exemplo, uma  $h = 0,20$  m, obtém-se  $z_{0m} = 0,024$  m. No entanto, é importante que seja identificado em cada estação meteorológica o valor de  $h$ . Com uma mapa de ocupação do solo, poder-se-ia determinar  $z_{0m}$  mais consistentemente. No entanto, o que é mais usual é que se calcule  $z_{0m}$  em função do IVDN ou IVAS.

A velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) é computada usando o perfil logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra, qual seja:

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



onde  $k$  é constante de Von Karman,  $u_x$  é a velocidade do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) na altura  $z_x$  (2,0 m, por exemplo) e  $z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade (m).

Em seguida, considerando-se, ainda, a atmosfera em equilíbrio neutro, é estimada a velocidade do vento ao nível de  $z = 100$  m [ $u_{100}$  ( $\text{ms}^{-1}$ )], chamada de blending height, onde se assume que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, e que é dada pela equação:

$$u_{100} = u_* \frac{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)}{k}$$

Dessa forma, Silva & Cândido (2004) obtiveram para uma imagem de 2000  $u_{100} = 2,37 \text{ ms}^{-1}$  e para uma outra imagem de 2001  $u_{100} = 3,16 \text{ ms}^{-1}$ .

Com a hipótese de que  $u_{100}$  é constante em toda a cena estudada, pode ser obtida a velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) para cada pixel da imagem, através da equação:

$$u_* = \frac{ku_{100}}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)}$$

onde  $z_{0m}$  (m) pode ser obtido em função do SAVI segundo equação desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

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

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

$$dT = a + bT_s$$

onde os coeficientes  $a$  e  $b$  são obtidos através dos pixels âncoras (quente e frio), conforme visto na sequência.

O pixel “frio” da imagem é escolhido admitindo-se que este se encontra numa área bem irrigada, onde se assume que o fluxo de calor sensível é nulo ( $H_{\text{frio}} = 0$ ) e o fluxo de calor latente  $LE$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) é dado por:

$$LE_{\text{frio}} = R_n - G$$

Por sua vez, o pixel “quente” é escolhido numa área com grande fração de solo exposto, onde se assume que o fluxo de calor latente é nulo ( $LE = 0$ ) e o fluxo de calor sensível  $H_{\text{quente}}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) será, portanto, dado por:

$$H_{\text{quente}} = Rn - G = \frac{\rho c_p (a + bT_s)}{r_{ah}}$$

onde  $T_s$ ,  $Rn$ ,  $G$  e  $r_{ah}$  são obtidos exatamente no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obtém-se, no pixel quente:  $a + bT_s = r_{ah} (Rn - G) / \rho c_p$ . 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 de  $H$ .

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 são consideradas, efetivamente, a condição de estabilidade de cada pixel. Em virtude dos efeitos turbulentos afetar as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov. Portanto, com o processo iterativo, se processa a correção da estabilidade atmosférica em todos os pixels da área de estudo, inclusive no pixel “quente”.

O comprimento de Monin-Obukhov  $L$  ( $\text{m}$ ) é utilizado para definir as condições de estabilidade da atmosfera e é computado em função dos fluxos de calor e de momentum pela seguinte expressão:

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

onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar,  $u_*$  é a velocidade de fricção de cada pixel ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $T_s$  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 ( $\text{W m}^{-2}$ ), 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, utilizam-se das formulações de Paulson (1970) e Webb (1970):

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

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

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

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

onde;

$$x_{(100m)} = \left( 1 - 16 \frac{100}{L} \right)^{0,25}$$

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

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

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

$$\Psi_{m(200m)} = -5 \left( \frac{100}{L} \right)$$

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

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

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:

$$u_* = \frac{u_{100} \cdot k}{\ln \left( \frac{100}{z_{0m}} \right) - \Psi_{m(100m)}}$$

onde  $u_{100}$  é a velocidade do vento a 100 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  $\Psi_{m(100m)}$  é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 100m.

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:

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{Z_2}{Z_1} - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* \cdot k}$$

onde  $Z_2 = 2,0$  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.

Após obtidos os valores desses parâmetros, retorna-se ao cômputo da função da diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente até que se obtenha a convergência dos valores da resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ). Para isto, são em geral necessárias de cinco a sete iterações para se atingir a convergência do processo.

#### 3.4.17. Fluxo de Calor Latente (LE)

O fluxo de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ ), Eq. 18, corresponde ao fluxo de massa (água sob a forma de vapor) que deixa a superfície, através dos processos evaporação mais transpiração vegetal, e representa uma grande quantidade de energia invisível, daí o termo latente. Sua determinação é obtida como resíduo da equação do Balanço de Energia, qual seja:

$$LE = R_n - G - H \quad (18)$$

onde os fluxos correspondem ao instante da passagem do satélite.

#### 3.4.18. Evapotranspiração Diária ( $\text{mm.dia}^{-1}$ )

Para a determinação da evapotranspiração diária, Eq. 19, obtém-se, inicialmente, a evapotranspiração horária  $ETH$ , dada pela razão entre o fluxo de calor latente,  $LE$ , obtido pela equação anterior, e o calor latente de vaporização da água ( $L = 2,45 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ), multiplicada por 3600, que um fator de conversão do valor instantâneo para valor horário, conforme equação (Allen et al., 2002a, Trezza, 2002):

$$ET_H = 3600 \cdot \frac{LE}{L}$$

Em seguida, se obtém-se a fração da evapotranspiração de referência horária,  $FET0\_H$  que de acordo com Trezza (2002) é relativamente constante em todo o período diurno, qual seja:

$$FET_{0\_H} = \frac{ET_H}{ET_{0\_H}}$$

onde  $ET_{0\_H}$  é a evapotranspiração de referência horária.

Considerando que o valor da  $FET_{0\_H} = FET_{0\_24}$ , tem-se:

$$FET_{0\_H} = FET_{0\_24} = \frac{ET_H}{ET_0} = \frac{ET_{24}}{ET_{0\_24}}$$

Dessa forma, a evapotranspiração real diária é calculada pela seguinte equação:

$$ET = FET_{0\_24} \cdot ET_{0\_24} \quad (19)$$

Tanto a evapotranspiração de referência diária -  $ET_{0\_24}$ , e a evapotranspiração de referência horária -  $ET_{0\_H}$ , são calculadas usando o método da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), com dados de estação automática. Os valores de  $ET_{0\_H}$  devem ser obtidos no intervalo de tempo que compreenda o instante da passagem do satélite na área de estudo.

### 3.5. *Computo do Índice de Vegetação Ajustado (EVI) e Índice de Umidade (NDWI)*

#### 3.5.1. Índice de Vegetação Ajustado (EVI)

O Índice de Vegetação Ajustado (Enhanced Vegetation Index) pode ser obtido através da aplicação da equação (Eq. 20) proposta por Huete et al. (1997):

$$EVI = G \left( \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + C_1 \cdot \rho_V - C_2 \cdot \rho_A + L} \right) \quad (Eq. 20)$$

onde  $\rho_{IVP}$  é a reflectância no infravermelho próximo,  $\rho_V$  é a reflectância no vermelho,  $\rho_A$  é a reflectância no azul,  $C_1$  é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6),  $C_2$  é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5),  $L$  é o fator de correção para a interferência do solo (1) e  $G$  é o fator de ganho (2,5).

#### 3.5.2. Índice de Umidade (NDWI)

O Normalized Difference Water Index ou Índice de umidade (Eq. 21) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo ( $\rho_{IVP}$ ) e do infravermelho médio ( $\rho_{NIR}$ ), e a soma das mesmas:

$$NDWI = \frac{\rho_{IV} - \rho_{MIR}}{\rho_{IV} + \rho_{MIR}} \quad (21)$$

onde  $\rho_{IV}$  e  $\rho_{NIR}$  correspondem, respectivamente, às bandas 4 e 5 do TM - Landsat 5. Segundo Cardozo et al. (2009), “[...]o índice de vegetação proposto por Gao (1996), é relacionado com o conteúdo de água presente nas folhas”, em que os valores negativos representam áreas com vegetação seca e valores positivos para vegetação verde.

### 3.6 Técnica TsHARP

Tendo em vista que a banda do Infravermelho termal do sensor TM (banda 6) apresenta 120 metros de resolução espacial, Kustas *et al.* (2003) desenvolveu uma técnica de melhoramento de resolução espacial admitindo-se uma relação linear entre as carta de temperatura da superfície e IVDN. Agam *et al.* (2007) através de adaptação da técnica original a nomeou de Algoritmo TsHARP.

Esta técnica parte da premissa de existência de uma relação estreita entre os índices de vegetação e a Temperatura da superfície (WHITE et al., 1997; BADECK et al., 2004) em uma cena de determinado sensor. Abaixo são descritas as etapas que compõem a técnica de reamostragem.

3.6.1. Primeiramente é necessária reamostrar a resolução espacial do índice de vegetação utilizado para a menor resolução espacial das imagens a serem utilizadas no processo. No caso do sensor TM a carta de IVDN, com resolução espacial de 30 metros é reamostrada para a resolução espacial da carta de Temperatura da superfície com 120m.

Logo após é realizada a regressão entre a carta de temperatura da superfície e o IVDN (ambos com 120m de resolução espacial, Eq. 22).

$$\check{T}_s(IVDN\downarrow) = f(IVDN\downarrow) \quad (22)$$

onde: T é a carta de temperatura obtida através da regressão.

3.6.2. É necessário realizar também a obtenção de outra carta de temperatura, porém utilizando o IVDN com a resolução espacial natural (30m). Após esta

etapa é necessário gerar a carta erro (Eq. 23), sendo resultante da variabilidade de fatores não dependentes d cobertura vegetal, como a umidade.

$$\text{ERRO } \check{T}s_{\downarrow} = T s_{\downarrow} - \check{T}s(\text{IVDN}_{\downarrow}) \quad (23)$$

3.6.3. A carta erro é adicionada a carta de Temperatura da superfície, obtida através da utilização do IVDN de resolução natural (etapa 2). Os sub-pixels reamostrados da Temperatura da superfície dentro de cada pixel de resolução espacial mais grosseira são obtidos através da equação 24.

$$\check{T}s_{\uparrow} = \text{ERRO } \check{T}s_{\downarrow} - \check{T}s(\text{IVDN}_{\uparrow}) \quad (24)$$

Para este estudos apenas as imagens de julho de 2007 e setembro de 2010 apresentaram bons resultados com a aplicação da metodologia. Maiores informações sobre a metodologia do TsHARP pode ser obtido através de estudo realizado por Agam et al (2007).

### **3.7. Base de dados municipal e fotografias aéreas**

Foram utilizados dados vetoriais e matriciais da Base de Dados Georreferenciados do município do Recife adquirida junto a Prefeitura da Cidade do Recife. Deste modo foi possível a elaboração de Mapas como o da Distribuição dos bairros nas RPA e o mapa hipsométrico do município.

Para melhor visualizar os diferentes alvos presentes no município do Recife foi realizada a aquisição de Fotografias aéreas pancromáticas (P & B) do ano de 1974, através da Mapoteca da Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco (CONDEPE-FIDEM) posteriormente georreferenciada, e a Ortofotocarta Recife, do ano de 2007, com resolução espacial de 30 cm, através da Diretoria de Informação da Prefeitura da Cidade do Recife. A ortofotocarta também foi utilizada na visualização dos alvos nas cartas de temperatura.

### **3.8. Classificação espaço temporal do Uso e cobertura do solo do município do Recife**

Tendo em vista a necessidade de melhor observar as mudanças espaço-temporal do uso e cobertura do solo e realizar a quantificação de cada classe, para as imagens TM utilizadas, optou-se pela realização de uma classificação não supervisionada para o recorte espacial do município.

Deste modo foi utilizada a ferramenta *Unsupervised Classification* disponível no programa ENVI 4.5. Como método estatístico foi utilizado o classificador *ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique)* onde diversos estudos (COSTA & SOUZA JR., 2005; GALVÃO & MENEZES, 2005; JÚNIOR & ALMEIDA, 2010) obtiveram bons resultados para imagens de média resolução espacial.

Conforme recomendado por autores (NOVO, 1989; WATRIN & ROCHA, 1992 e VENTURIERI, 1996) foi utilizada a combinação de bandas RGB 3-4-5 (bandas do Vermelho, Infravermelho próximo e do Infravermelho médio, respectivamente) para o satélite Landsat. Ao todo foram definidas cinco categorias de uso e ocupação do solo para o município do Recife classificadas através da utilização do Manual técnico de Uso da Terra (IBGE, 2006):

- Área urbana:

[...] *“compreendem áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não-agrícolas. Estão incluídas nesta categoria as [...] áreas de rodovias, serviços e transporte, energia, comunicações e terrenos associados, áreas ocupadas por indústrias, complexos industriais e comerciais e instituições que podem em alguns casos encontrar-se isolados das áreas urbanas. As áreas urbanizadas podem ser contínuas, onde as áreas não-lineares de vegetação são excepcionais, ou descontínuas, onde as áreas vegetadas ocupam superfícies mais significativas.”* (IBGE, 2006).

- Vegetação:

[...] *“área que apresentava qualquer tipo de cobertura vegetal compreendendo um conjunto de estruturas florestal e campestre, abrangendo desde florestas e campos originais (primários) e alterados até formações florestais espontâneas secundárias, arbustivas, herbáceas e/ou gramíneo-lenhosas, em diversos estágios sucessionais de desenvolvimento, distribuídos por diferentes ambientes e situações geográficas.”* (IBGE, 2006).

- Solo exposto: compreende as áreas de solo natural sem vegetação, com pouca ou muita umidade e com área e forma variável;
- Água: corpos hídricos com representatividade espacial para a resolução do sensor utilizado, podendo ser identificado como rios, riachos, canais e outros corpos d'águas lineares, ou lagoas e açudes.
- Nuvem e sombra: Pixels relacionados à nuvem e sombra de nuvem com diferente grau de densidade que venham a prejudicar a classificação.

### **3.9. Dados SRTM**



A Missão Topográfica Radar Shuttle (Shuttle Radar Topography Mission) foi uma missão da Agência Espacial Norte Americana (NASA) com duração de 11 dias, ocorrida em fevereiro de 2000, a bordo do ônibus espacial Endeavour, visando a obtenção de um modelo digital do terreno em faixa da Terra compreendida entre 56°S e 60°N. Deste modo buscou-se gerar a base de dados topográfica mais completa da superfície terrestre.

Os dados de radar SRTM foram obtidos através de acesso a página do Brasil em Alto Relevo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (Miranda, 2009). Ao total foram obtidas duas cenas (SB-25-Y-C e SC-25-V-A), disponibilizadas em folhas com escala de 1:250.000. As mesmas foram submetidas ao processo de mosaico e reprojctadas para o mesmo sistema de coordenadas e datum das imagens do satélite Landsat (Sistema de projeção Universal Transversa de Mercator – Datum SAD-69).

Após estes procedimentos foi realizado o recorte da SRTM para à área correspondente a área da imagem Landsat. Neste etapa a mesma foi reamostrada para apresentar resolução espacial de 30 m e ser utilizada no cálculo para a obtenção da Transmissividade Atmosférica.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta pesquisa procurou-se observar as variações espaço-temporais do uso e cobertura do solo e dos componentes do balanço radiação e energia em áreas urbanas e áreas vegetadas do município do Recife. Deste modo, foram elaborados mapas temáticos destes componentes, assim como, da carta de evapotranspiração real. Estes dados possibilitaram identificar algumas alterações que a mudança de uso e cobertura do solo promove nas variáveis ambientais consideradas no estudo.

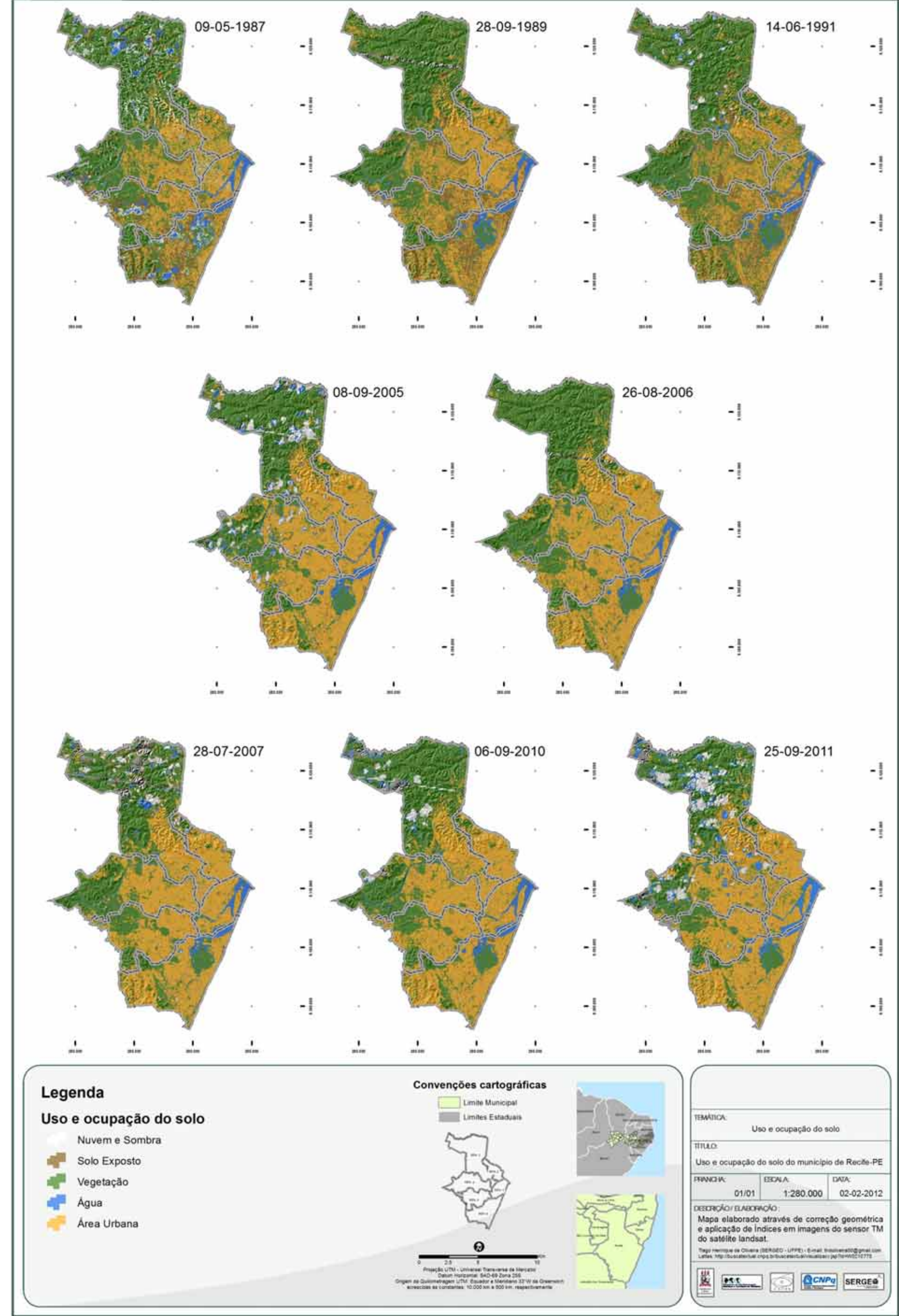
### *4.1. Mudanças espaço temporal do Uso e cobertura do solo*

Através da classificação não supervisionada (Isodata), realizado nas imagens estudadas, é possível observar mais facilmente a evolução espaço-temporal do uso e cobertura do solo no município do Recife (Figura 8). Nota-se que a cobertura vegetal observada na imagem de 1987 foi diminuindo gradativamente quando comparado a imagens superiores ao ano de 2005, principalmente nas áreas em que se encontravam mais esparsas nas Regiões Político-Administrativas - RPA 1, 2 e 6.

Estas áreas, assim como grandes áreas de solo exposto observadas principalmente nas RPA 4, 5 e 6 entre as imagens de 1987 e 1991, passaram a dar lugar, na maioria dos casos, a novas áreas industriais e/ou áreas urbana mais consolidadas. Quando observadas as imagens de 2005 a 2011 visualiza-se uma área urbana bem mais consolidada com a permanência de alguns pequenos fragmentos com vegetação de porte arbóreo mais espacializado no município, assim como, os grandes fragmentos vegetais, como as Matas da Várzea, Curado, Barro, Jardim Uchôa e Dois Irmãos, por exemplo, localizados mais ao norte e oeste, que a partir da Lei de Uso e Ocupação do Solo de 1996 passaram a gozar de uma maior proteção com sua classificação como unidades de conservação ambiental.

Deste modo é possível afirmar que o aumento no número de unidades habitacionais, influenciado principalmente pelo acréscimo populacional, foi seguindo da área mais central do município para as áreas mais periféricas como as áreas de morros ao norte (RPA 2) e ao sul do município (na RPA 6) e áreas localizadas nos bairros da Várzea e Caxangá, Figuras 9 e 10, respectivamente, o que em alguns casos acarretava na supressão da vegetação e impermeabilização do solo.

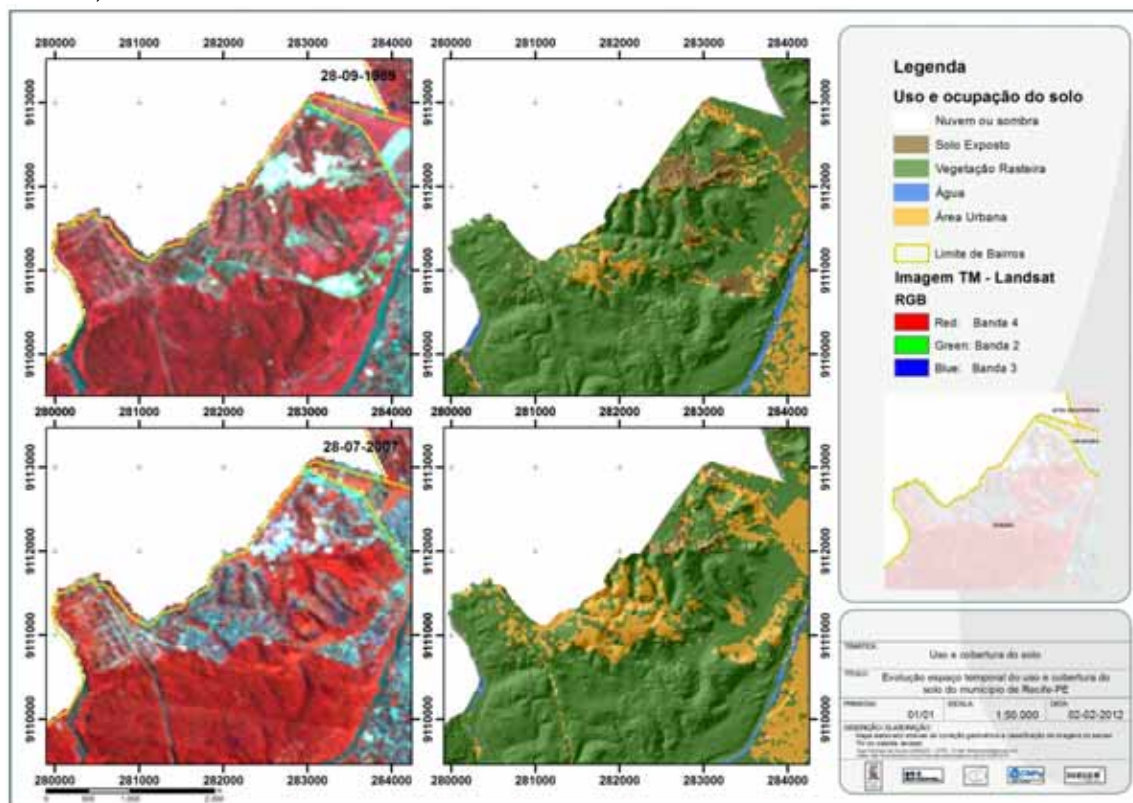
Figura 8. Evolução espaço-temporal do uso e ocupação do solo no município do Recife para as imagens utilizadas.



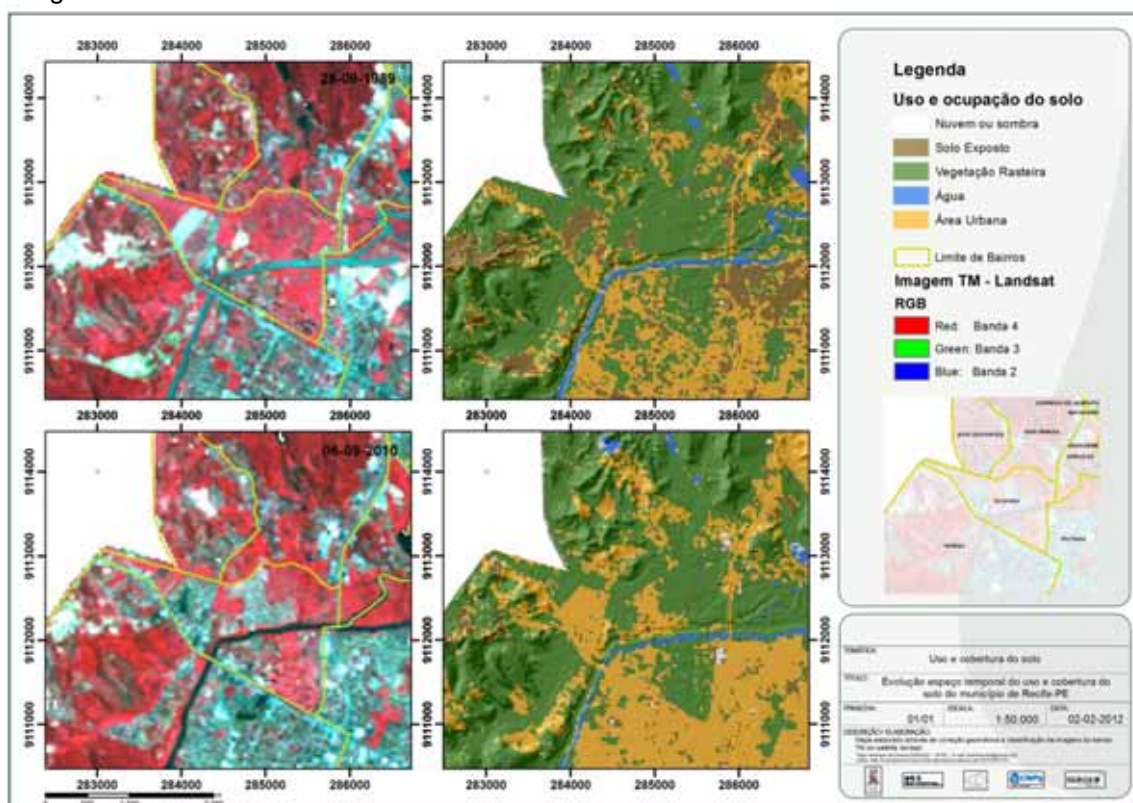
Fonte: Oliveira, T.H (2012)



**Figura 9.** Aumento no número de unidades habitacionais e supressão da vegetação próximo a mata da Várzea, bairro da Várzea – Recife – PE.



**Figura 10.** Aumento no número de unidades habitacionais e supressão da vegetação no bairro da Caxangá – Recife – PE.



Para a Caxangá o crescimento populacional foi de 4,12% ao ano do período de 1991 a 2000. O elevado incremento populacional que a Região Metropolitana do Recife vem sofrendo nas últimas décadas veio a influenciar consideravelmente a urbanização destas áreas, como observado por SOUZA *et al.* (2006a) através da análise realizada com apoio nos dados do CENSO – IBGE.

No caso do bairro da Várzea, Cavalcanti *et al.* (2008, p.101), através de estudo socioambiental realizados em todos os bairros do Recife, advertiram que o bairro da Várzea apresentou um crescimento populacional de 2,05% ao ano durante o período de 1991 a 2000, e que “esta realidade indica a presença de assentamentos que pressionam as áreas de preservação do bairro”, podendo ser observado na Figura 11, tendo em vista que mais de 50% da área do bairro encontra-se ocupadas pelas Unidade de Conservação da Natureza (UCN) Várzea e Várzea/Curado.

Estudo realizado pelo Instituto Polis (2009) demonstrou que a política de erradicação de mocambos, realizada na década de 40 do século passado, promoveu a remoção de 12.000 mocambos localizados no centro do Recife e [...] “*grande parte das famílias que antes ocupava o entorno da área central migrou para municípios vizinhos e para os morros da zona norte da cidade (INSTITUTO POLIS, 2009)*”.

**Figura 11.** Área de pressão antrópica no entorno da Mata da Várzea, bairro da Várzea – Recife – PE.







Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Através da tabela 2 é possível observar os valores de população residente e um forte incremento populacional na cidade do Recife em relação à Região Metropolitana do Recife para as décadas de 70, 80, 90 e 2000 do século passado.

**Tabela 2.** Quantitativo de população na cidade do Recife e na Região Metropolitana do Recife.

Local	População Residente						
	População 1970	Incremento 1970-80	Pop. 1980	Inc. 1980-90	Pop. 1991	Inc. 1990-00	Pop. 2000
<b>Recife</b>	1.060.701	143.198	1.203.899	94.330	1.298.229	124.676	1.422.905
<b>RM Recife</b>	1.827.173	568.169	2.395.342	524.655	2.919.981	417.583	3.337.565

Fonte: Modificado de SOUZA *et al.* (2006)

Já através da Tabela 3 é possível observar a distribuição populacional para cada Região Político Administrativo para os Censos de 1991, 2000 e 2010. Nota-se que a RPA 1, apesar de sua consolidação, apresentou diminuição na quantidade de habitantes entre os anos de 1991 e 2000. As demais RPA's apresentaram aumento progressivo da população para os três censos. Os maiores aumentos na quantidade de habitantes ocorreram na RPA 6.

**Tabela 3.** Quantitativo de população na cidade do Recife para as Regiões Político Administrativas.

Região Político Administrativa	População Residente			Diferença da População (1991-2000)	Diferença da População (2000-2010)
	1991	2000	2010		
<b>RECIFE</b>	<b>1.298.229</b>	<b>1.422.905</b>	<b>1.537.704</b>	<b>124.676</b>	<b>114.799</b>
<b>RPA 1 - Centro</b>	83.010	78.098	78.114	-4.912	16
<b>RPA 2 - Norte</b>	197.710	205.986	221.234	8.276	15.248
<b>RPA 3 - Noroeste</b>	258.096	283.525	312.981	25.429	29.456
<b>RPA 4 - Oeste</b>	222.936	253.015	278.947	30.079	25.932
<b>RPA 5 - Sudoeste</b>	231.523	248.483	263.778	16.960	15.295
<b>RPA 6 - Sul</b>	304.954	353.798	382.650	48.844	28.852

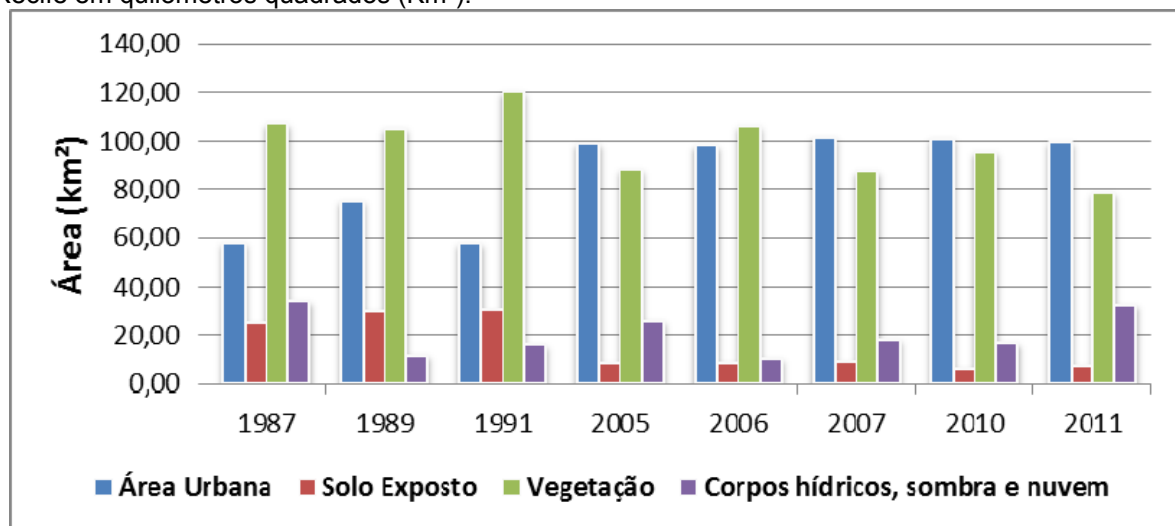
FONTE: IBGE, Censo Demográfico de 1991, Censo Demográfico 2000 e Censo Demográfico 2010.

Como consequência do rápido adensamento urbano, Garcia (1999) cita a substituição da superfície natural por diversos tipos e formas de edificações, constituindo um conjunto compacto e denso, com os mais variados tipos de revestimento e propriedades físicas diversas. Deste modo formasse uma rugosidade que promove alterações no movimento do ar na superfície o que provoca modificações no gradiente de radiação urbana, influenciando a temperatura do ar.

O Instituto Polis (2009) afirma que bairros periféricos da cidade, que já se apresentavam populosos, expuseram taxas de crescimento elevados entre os anos de 1991 – 2000, como [...] “Cohab (39%), Barro (57%), Macaxeira (71%), Passarinho (76%) e Caçote (77%) (INSTITUTO POLIS, 2009)” o que pode ser visualizado através da expansão da classe área urbana entre ao anos de 1987 e 2005, Figura 8, para o bairro da Cohab, por exemplo.

Através do gráfico da figura 12 é possível visualizar as mudanças nos valores dos principais usos e cobertura do município do Recife. É perceptível como a área de solo exposto foi aumentando entre os anos de 1987 e 1991 e a posterior diminuição a partir do ano de 2005 para praticamente 1/3 da área apresentada nos anos anteriores.

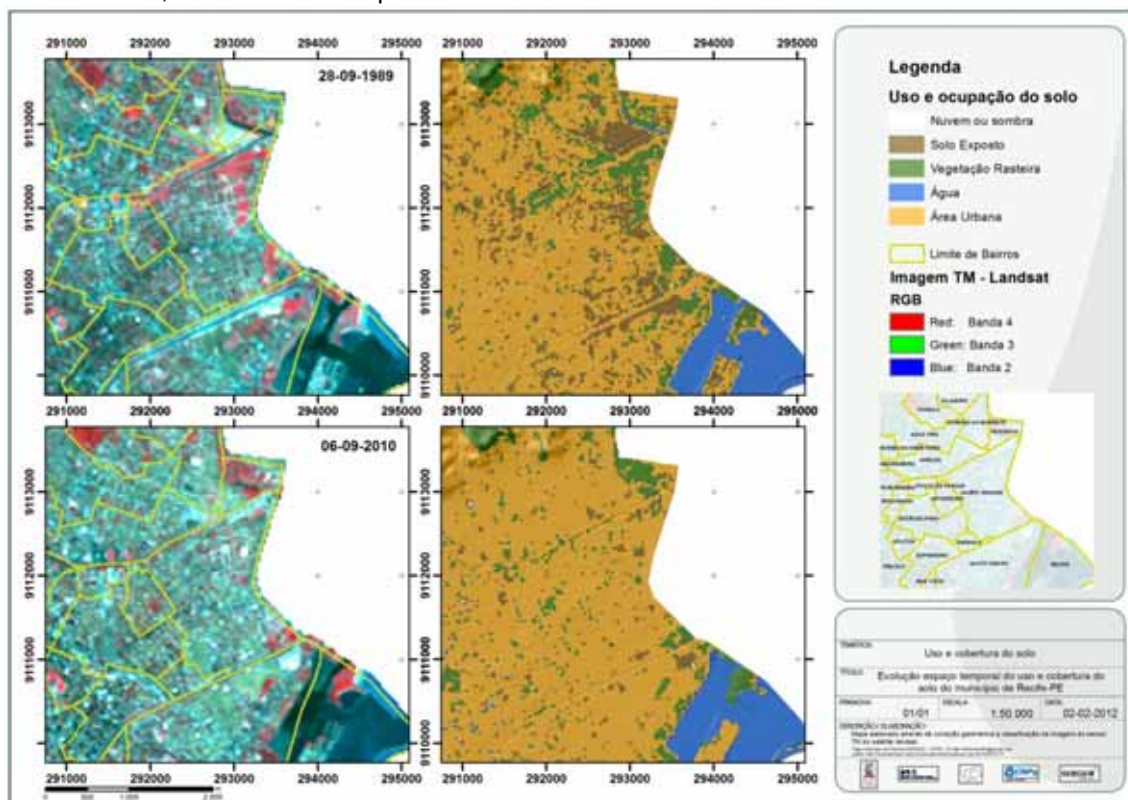
**Figura 12.** Gráfico de variação temporal da área urbana, solo exposto e vegetação da cidade do Recife em quilômetros quadrados (Km²).



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

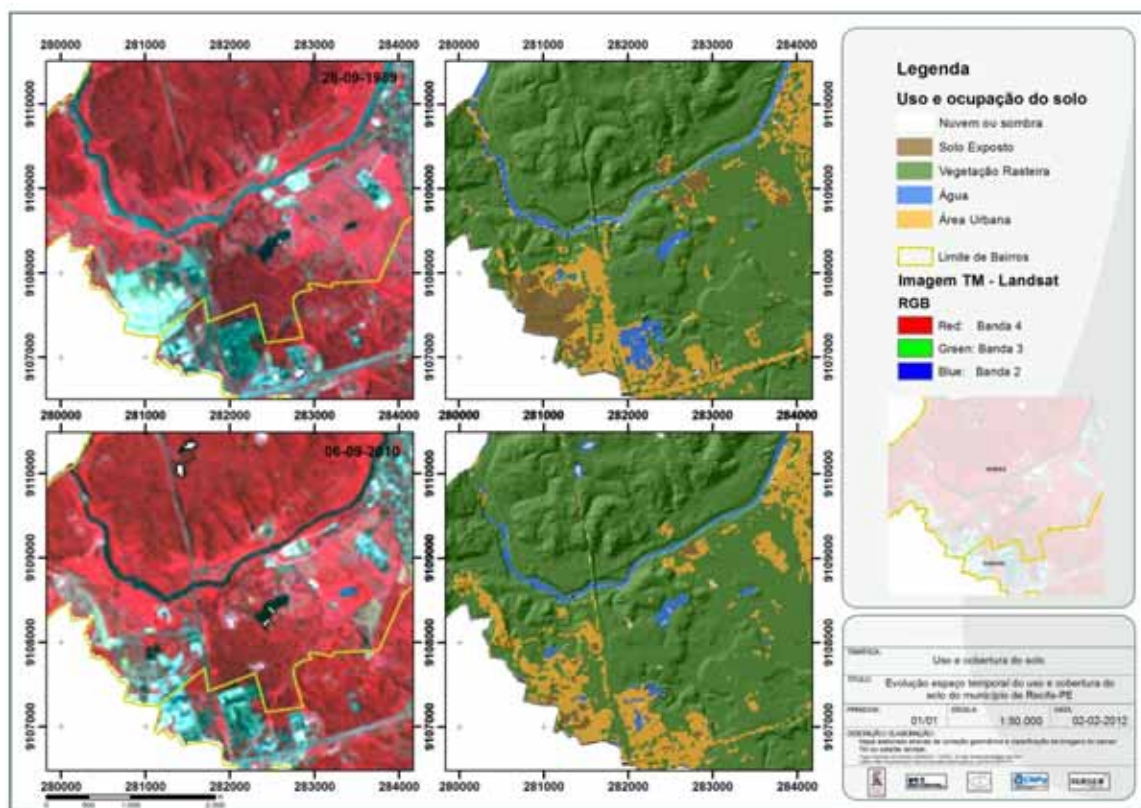
Estas áreas passaram na maioria dos casos por um processo de expansão no número de construções residenciais, como observados por exemplo nos bairros de Peixinhos, Santo Amaro e Campo Grande, através da Figura 13, e por ampliação ou implantação de novas indústrias, como observado no bairro do Curado, Figura 14.

**Figura 13.** Diminuição de áreas de solo exposto e adensamento construtivo residencial nos bairros de Santo Amaro, Peixinhos e Campo Grande – Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 14.** Diminuição de áreas de solo exposto e ampliação de áreas industriais no bairro do Curado – Recife - PE.



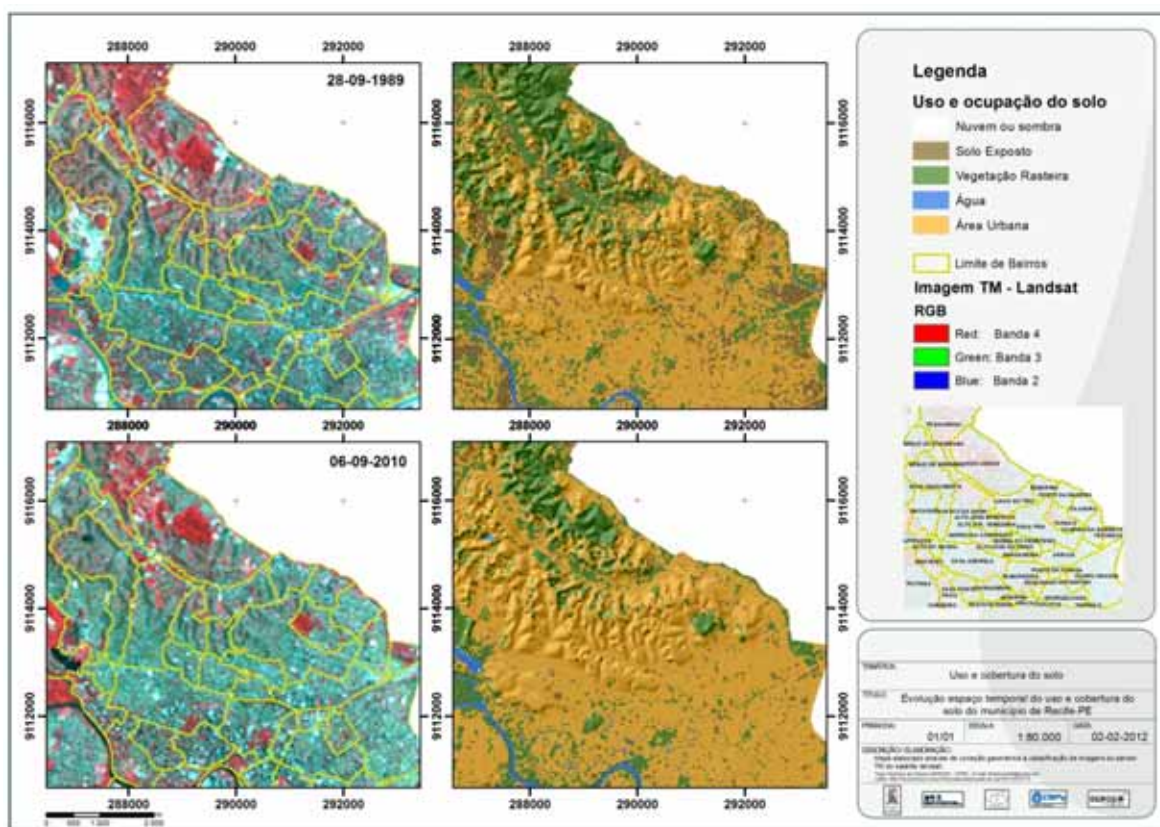
Fonte: Oliveira, T.H (2012)



Outra implicação do adensamento urbano é a diminuição da infiltração provocada pela impermeabilização de grandes áreas, principalmente em períodos de maior precipitação (FENDRICH & IWASA, 1998). Tucci (2000) afirma que um habitante produz em média 49m<sup>2</sup> de área impermeável em uma bacia, e que a cada 10% de aumento na área impermeável ocorre cerca de 100% de aumento no coeficiente de cheia e no volume de escoamento superficial.

A distribuição espacial das pequenas áreas com presença de cobertura vegetal também foi diminuindo espacialmente, principalmente em bairros da RPA 2 e RPA 3 (Figura 15). A declividade elevada em alguns locais da RPA 2 apresenta-se como um dos fatores que limitaram a ocupação de algumas áreas destes bairros, vindo a permitir que os indivíduos vegetais ali estabelecidos desenvolvessem uma maior biomassa foliar.

**Figura 15.** Diminuição da cobertura vegetal nos bairros de Nova Descoberta e Vasco da Gama – Recife - PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Através da Tabela 4 é possível observar a mudança temporal das áreas construídas e impermeabilizadas e das áreas vegetadas para as RPA 1, 2 e 6. Devido à alta incidência de cobertura de nuvens nas áreas que compõem as RPA 3,

4 e 5, foi preferível a não utilização dos valores obtidos para as mesmas. Contudo, através da tabela 4, nota-se que as áreas vegetadas foram diminuindo nestas RPA, principalmente na RPA 2, enquanto que a área urbanizada foi se adensando a cada ano.

**Tabela 4.** Valores de Área Construída e Área Vegetada para as RPA 1, 2 e 6 em quilometro quadrado (Km<sup>2</sup>).

Imagem	RPA 1 <sup>2</sup>		RPA 2 <sup>3</sup>		RPA 6 <sup>4</sup>	
	Área Construída	Área vegetada	Área Construída	Área vegetada	Área Construída	Área vegetada
09-05-1987	7,04	2,21	7,32	6,26	11,00	11,65
28-09-1989	8,02	1,03	9,11	3,80	15,34	9,76
14-06-1991	6,06	2,81	7,11	5,86	12,31	13,54
08-09-2005	9,75	1,15	12,01	2,39	24,83	9,93
26-08-2006	9,47	1,28	11,39	2,63	24,34	10,18
28-07-2007	9,69	1,38	11,19	1,94	24,57	10,80
06-09-2010	9,41	1,42	11,78	2,65	25,54	9,82
25-09-2011	8,41	1,85	12,26	1,92	26,8	8,87

Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Deste modo para a RPA 6 verifica-se, que em 1987, a vegetação que ocupava cerca de 27,68% da área total da RPA passou a ocupar em 2011 pouco mais de 21%. Já a área construída passou de 26,14% em 1987 para 63,68% no ano de 2011.

Para a RPA 2 o aumento da área mais urbanizada foi considerável, passando de 49,45% em 1987 para 82,83% de ocupação da área da RPA em 2011. Com relação à área vegetada ocorreu uma diminuição da área, de 42,29% em 1987 para 12,97% em 2011, Figura 16. Grande parte destas áreas de vegetação está localizada em áreas com alta declividade, o que impossibilita a ocupação destas áreas, Figura 17.

**Figura 16.** Diminuição da cobertura vegetal em áreas da RPA-2, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

<sup>2</sup> A RPA 1 possui uma área total de 15,25 Km<sup>2</sup>.

<sup>3</sup> A RPA 2 possui uma área total de 14,80 Km<sup>2</sup>.

<sup>4</sup> A RPA 6 possui uma área total de 42,08 Km<sup>2</sup>.

**Figura 17.** Distribuição da vegetação em áreas com elevada declividade em área da RPA-2, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

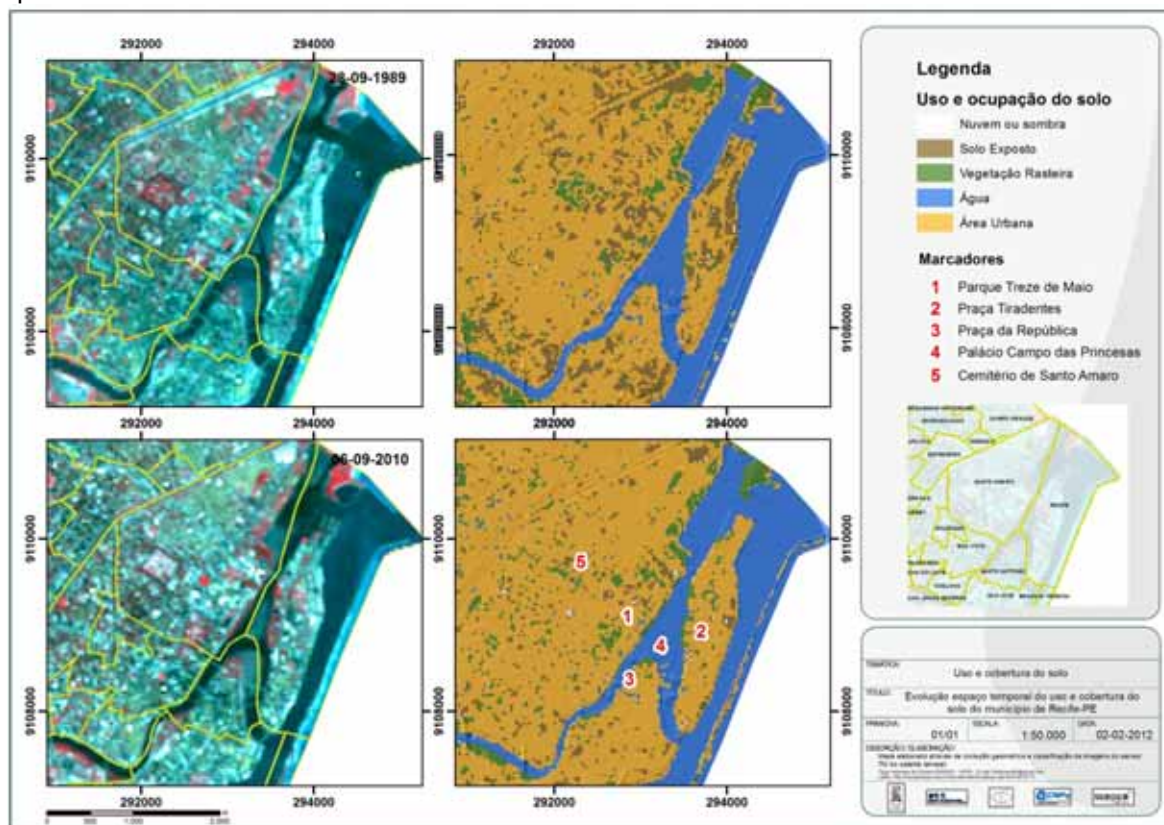
Para a RPA 1, área conhecida como o Centro Expandido<sup>5</sup> do município do Recife, não ocorreram grandes modificações nos valores das áreas vegetadas e área construída quando comparada a outras RPA's, devido a alta consolidação de grande parte de sua área, inclusive com a localização de diversos imóveis históricos. A área vegetada diminuiu de 14,49% em 1987 para 12,13% em 2011. Já a ocupação urbana passou de 46,16% em 1987 para 55,14% em 2011.

Através da Figura 18 é possível observar que grande parte das áreas vegetadas localizadas na RPA 1 encontra-se distribuídas em áreas públicas como o Parque Treze de Maio (Marcador 1), as Praças Tiradentes (Marcador 2) e da República (Marcador 3) e o Palácio Campo das Princesas (Marcador 4 e Figura 19) tornando mais difícil a supressão desta vegetação visando a mudança no padrão de uso.

<sup>5</sup> O termo Centro Expandido é uma convenção técnica adotada pela Prefeitura da Cidade do Recife que delimita o centro na Avenida Agamenon Magalhães compreendendo os bairros do Recife, Boa Vista, Santo Antônio, São José, Santo Amaro, Ilha do Leite e Cabanga.



**Figura 18.** Indicação de algumas das principais áreas públicas localizado na região do Centro expandido – Recife - PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 19.** Distribuição da vegetação em áreas públicas do município do Recife – PE



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Já outras áreas como o Cemitério Senhor Bom Jesus da Redenção (Marcador 5), também conhecido como Cemitério de Santo Amaro perdeu parte da área vegetada que continha, como pode ser observado entre as imagens de setembro de 1989 e setembro de 2010, Figura 18.

Para Morero *et al.* (2007) nas cidades brasileiras existe uma economia de espaços destinados a áreas verdes/lazer, apesar dos estudos realizados pela academia brasileira demonstrarem a importância destas áreas, o que segundo o autor “vem a deteriorar a qualidade de vida dos habitantes”. Do mesmo modo Caporusso e Matias (2008) afirmam que as áreas verdes não têm apresentado o mesmo crescimento quando comparado às áreas urbanizadas, e que na maioria dos casos são apresentadas apenas como expressão do desenho paisagístico e das características locais (VIEIRA, 2004).

Costa (2004, p. 68), em estudo realizado na região de Piracicaba (SP) com mosaicos de fotografias aéreas, mostra a redução das áreas verdes como resultado do elevado crescimento urbano entre os anos de 1960 e 1990. A mesma afirma que a partir de 1980 aumentou a necessidade de “se investir em áreas verdes dentro da área urbana consolidada e na preservação dos locais naturais do entorno urbano” na região.

Vieira & Biondi (2008) verificaram uma diminuição da cobertura vegetal do município de Curitiba, passando de 39% do território para 30% entre os anos de 1986 e 2004. Esta diminuição ocorreu como resultado do processo de crescimento urbano em todas as regionais administrativas do município. Para Carvalho (2001, p. 231) a vegetação apresenta benefícios relevantes, “principalmente no processo de amenização climática do meio urbano, pela criação de microclimas agradáveis que contribui significativamente para o conforto ambiental e para o bem estar da população”. Tornam-se importante deste modo a manutenção e preservação das áreas vegetadas, principalmente nas áreas mais adensadas do município do Recife.

#### 4.2. Avaliação da cobertura vegetal

Para realizar a avaliação dos impactos da diminuição espaço temporal da cobertura vegetal no uso e cobertura do solo no município do Recife foram utilizados três dos índices de vegetação mais utilizados em diversas partes do mundo, a saber, o NDVI (PRINCE & GOWARD, 1995; BARBOSA *et al*, 2006; CHEN *et al*, 2006; FENSHOLT & PROUD, 2012), o EVI (JIANG *et al*, 2008; GALVÃO *et al*, 2011) e o IAF (KERGOAT, 1998; BRAGA *et al*, 2009; ALVIM *et al*, 2010).

Através da figura 20 é possível visualizar os mapas temáticos do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN ou NDVI) para as imagens de 09 de maio de 1987, 28 de setembro de 1989, 14 de junho de 1991, 08 de setembro de 2005, 26 de agosto de 2006, 28 de julho de 2007, 06 de setembro de 2010 e 25 de setembro de 2011.

Nota-se grande variação espaço-temporal nas classes de IVDN adotadas, demonstrando grandes mudanças do uso e cobertura do solo em diversas áreas do município do Recife. Com relação às áreas urbanizadas, foi observado que o centro do município, constituído pelos bairros do Recife, Santo Antônio, São José e Boa Vista, já se apresentavam como áreas urbanas mais consolidadas.

Nestes bairros é possível observar que grande parte da sua área apresentava valores de IVDN inferiores a 0,30 para as imagens de 1987 a 1991. Isto se deve a grande impermeabilização e ao padrão de ocupação destes bairros, proporcionando a ocupação, na maioria das vezes, de todo o lote por grandes construções e ausência de quintais.

Valores semelhantes também foram encontrados para as áreas de solo exposto, que variavam com IVDN entre 0,10 e 0,30. Segundo Huete e Tucker (1991), os valores do IVDN para áreas de solo exposto estão englobados geralmente entre 0,05 e 0,30 e devido à grande variabilidade das propriedades óticas do solo, deste modo é citado que não se pode definir uma faixa rigorosa de valores de IVDN para solos com pouco ou nenhuma cobertura vegetal.

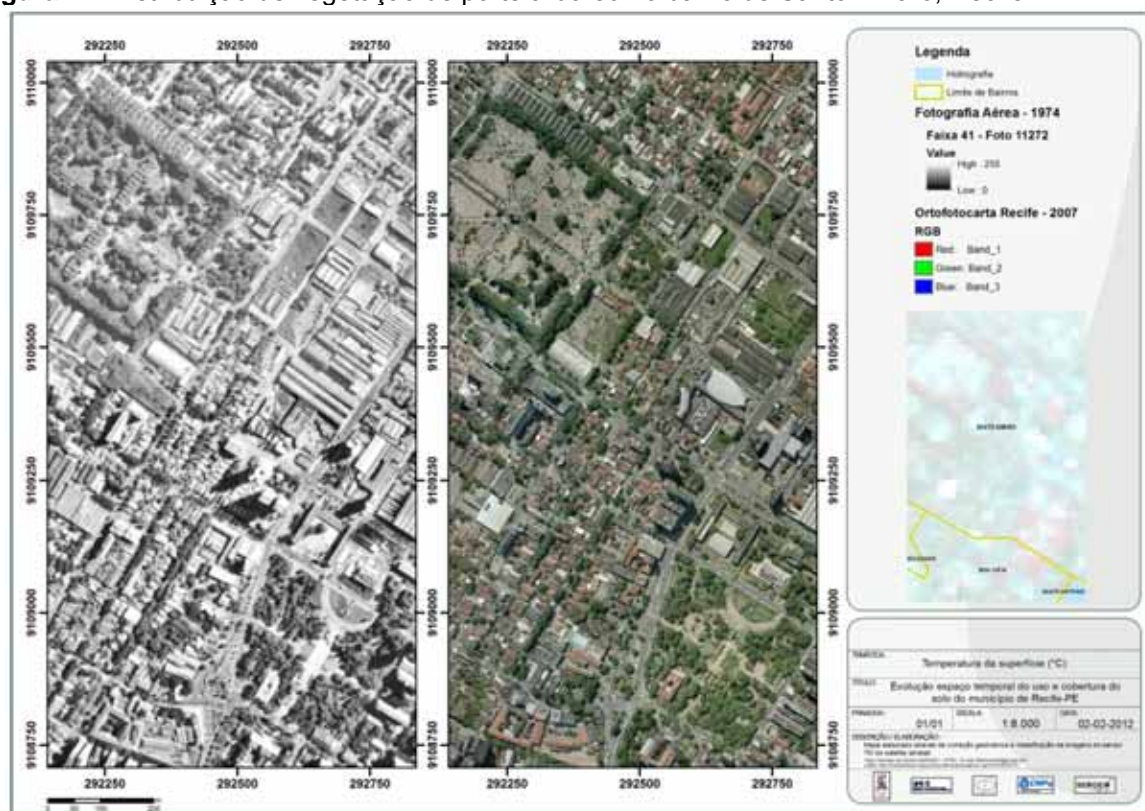


Fonte: Oliveira, T.H (2012)



A distribuição da cobertura vegetal nestas áreas era composta, na maioria dos casos, por indivíduos arbóreos em ruas, instituições públicas ou equipamentos públicos, como praças e parques ou manguezal nas margens de corpos hídricos, podendo ser mais bem observado através da figura 21. Estas áreas apresentavam valores de IVDN superiores a 0,30, dependendo da quantidade e porte da cobertura vegetal. As áreas com cobertura vegetal mais densa apresentavam valores de IVDN superiores a 0,60.

**Figura 21.** Distribuição de vegetação de porte arbóreo no bairro de Santo Amaro, Recife – PE.

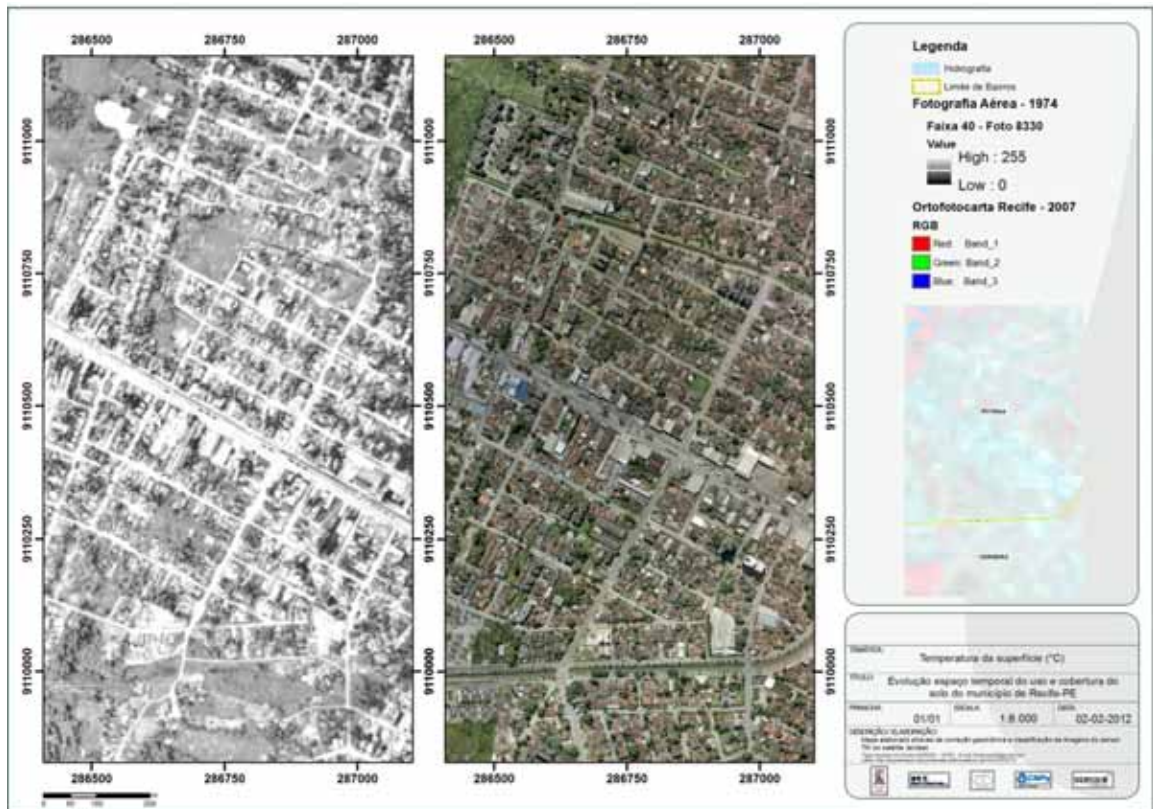


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Ainda para as imagens de 1987 a 1991 foi possível observar, o destaque para as principais vias municipais, como as Avenidas Caxangá (Figura 22), Avenida Norte, Avenida Agamenon Magalhaes, Avenida Marechal Mascarenhas de Moraes e as rodovias BR-101 e BR-232. Estas áreas, assim como seu entorno, apresentaram valores de IVDN baixos, variando entre 0 e 0,10, devido ao alto grau de impermeabilização e o surgimentos de serviços em seu entorno.

**Figura 22.** Aumento da quantidade de edificações no entorno da avenida Caxangá – bairro da Iputinga, Recife – PE.





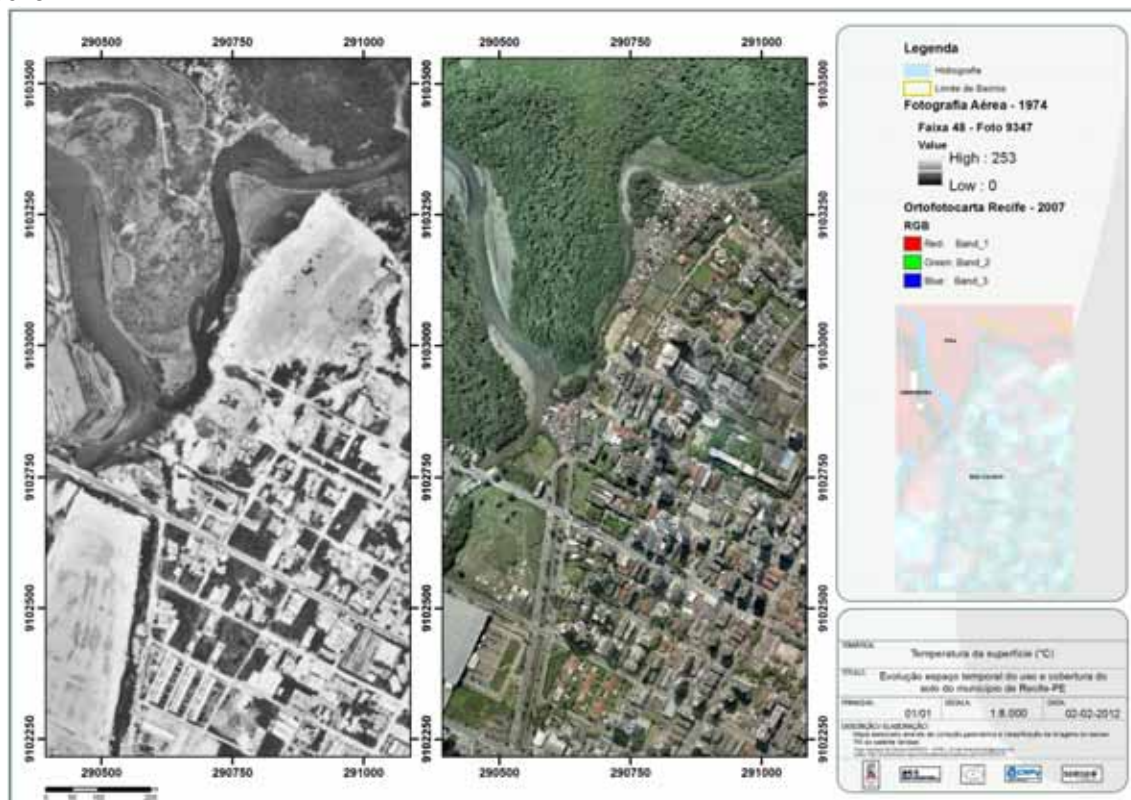
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Para as áreas vegetadas o IVDN apresentou variação de valores entre 0,50 a valores superiores a 0,70. Áreas com vegetação de porte arbóreo ou vegetação mais densa apresentaram valores de IVDN com variação entre 0,60 e valores superiores a 0,70. Já as áreas de borda da vegetação apresentaram valores variando entre 0,50 e 0,60.

Observando o manguezal do Pina, entre as imagens de 1987 e 1991, é possível visualizar grandes áreas de solo exposto com IVDN inferiores a 0,20, devido a grande degradação sofrida ao longo dos anos. Porém a partir da imagem de 2005 foi observado a regeneração destas áreas, com aumento da cobertura vegetal, vindo a apresentar valores de IVDN superiores a 0,60 e copas mais homogêneas, Figura 23.

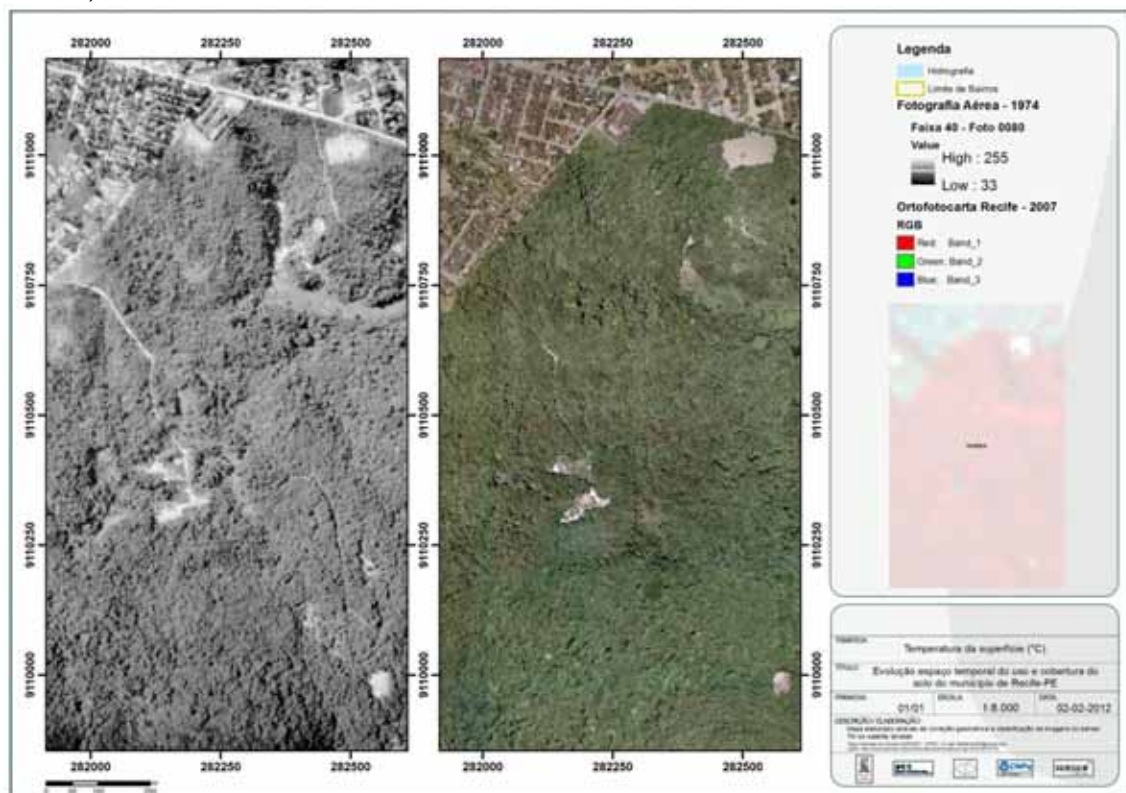
Os grandes fragmentos florestais como as Matas de Dois Irmãos, da Várzea, Figura 24, do Curado, do Barro e a Mata do Engenho Uchôa, apresentavam em seu interior áreas com IVDN variando entre 0,20 e 0,60 entre os anos de 1987 e 1991. Estes locais eram utilizados como caminhos pela população local para a extração de madeira ou como trilhas para outros bairros o que provocava áreas desmatadas no interior dos fragmentos.

**Figura 23.** Regeneração da vegetação de mangue em parte do Manguezal do Pina, bairro do Pina, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 24.** Regeneração de vegetação em áreas desmatadas no interior da mata da Várzea, bairro da Várzea, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Para Oliveira *et al.* (2011) este tipo de utilização impede que novos indivíduos vegetais venham a surgir nestas áreas e tenham oportunidade de crescer em consequência de uma maior interferência da população local ao utilizar caminhos abertos no interior da mata.

Do mesmo modo, assim como o Manguezal do Pina, a partir da imagem de 2005 é possível visualizar copas mais homogêneas com valores de IVDN superiores a 0,60, o que evidencia menor interferência na composição florística e aumento de biomassa foliar. Este fato também foi observado por Oliveira *et al.* (2011b) em estudo realizado na mata do Engenho Uchoa no município do Recife.

Estudos realizados por Wilson *et al.* (2003), através da aplicação do IVDN em imagens Landsat na cidade de Indianapolis – IN, nos Estados Unidos, verificaram que os menores valores de IVDN estavam associados às áreas mais densamente construídas, enquanto que os valores mais elevados associaram-se as áreas florestadas do entorno dos reservatórios de Eagle Creek e Geist. Já corpos hídricos apresentavam valores negativos.

Chen *et al.* (2006), em estudo realizado na região do Pearl River Delta (PRD), ao longo da Costa Sul da China, verificaram, através da utilização de imagens do sensor TM Landsat, que as áreas florestadas apresentavam valores de IVDN superiores a 0,50, enquanto que as áreas mais urbanizadas apresentavam valores inferiores a 0,20. Todos estes resultados vêm a corroborar com os resultados obtidos nesta pesquisa.

De modo geral para as imagens de 1987, 1989 e 1991 nota-se a subdivisão das mesmas em três grandes grupos de classes de IVDN. A primeira tendo em sua composição as áreas vegetadas e grandes fragmentos florestais (com IVDN superiores a 0,601), a segunda classe apresenta as áreas com a urbanização mais consolidada, grandes áreas impermeabilizadas e áreas de solo exposto (com IVDN inferiores a 0,30) e a terceira composta por áreas com o uso intermediário como áreas residenciais e/ou comerciais com alta ou baixa presença de vegetação (com IVDN variando entre 0,31 e 0,60).

A partir da visualização das imagens de 2005 a 2011, ainda na figura 20, é possível observar a grande variação espacial dos valores de IVDN inferiores a 0,60. A partir destas imagens nota-se a divisão dos valores de IVDN em dois grandes grupos: o primeiro ainda composto pelas grandes áreas vegetadas (agora com IVDN

superiores a 0,501) e o segundo grande grupo já demonstrando o alto grau de urbanização do município do Recife (com IVDN inferiores a 0,50).

Através da Tabela 5 é possível observar que o valor médio de IVDN das imagens utilizadas foi diminuindo, enquanto que o desvio padrão foi aumentando. Deste modo, compreende-se que devido ao aumento espacial das classes de IVDN inferiores a 0,30 a diferença entre as áreas urbanizadas e áreas vegetadas ficou mais evidente, o que vem a refletir no aumento do desvio padrão calculado nas imagens.

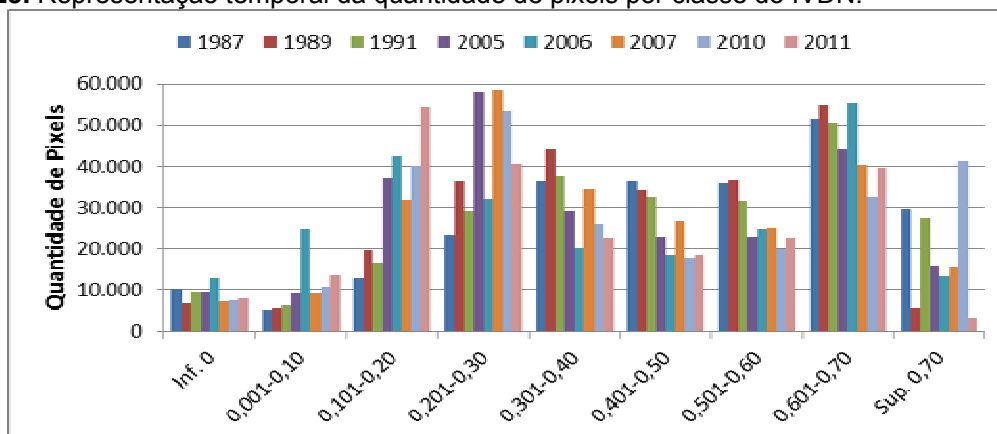
**Tabela 5.** Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do IVDN no município do Recife, para as datas estudadas.

IVDN	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
09-05-1987	-1,000	0,833	<b>0,485</b>	0,184
28-09-1989	-1,000	0,875	<b>0,437</b>	0,178
14-06-1991	-1,000	0,844	<b>0,471</b>	0,193
08-09-2005	-0,864	0,837	<b>0,391</b>	0,206
26-08-2006	-1,000	0,875	<b>0,392</b>	0,227
28-07-2007	-0,806	0,855	<b>0,393</b>	0,200
06-09-2010	-1,000	0,875	<b>0,412</b>	0,227
25-09-2011	-0,582	0,875	<b>0,353</b>	0,203

Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Através do gráfico da figura 25 é possível observar a mudança nos valores de IVDN sofridas pelas diversas classes com as imagens utilizadas. Nota-se como as classes de IVDN inferiores a 0,20 aumentaram com o passar dos anos. Já as classes de IVDN superiores a 0,50 foram diminuindo espacialmente. Deste modo, fica mais fácil perceber o aumento espacial das áreas impermeabilizadas e a diminuição das áreas vegetadas.

**Figura 25.** Representação temporal da quantidade de pixels por classe do IVDN.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Quando observado o Índice de Vegetação Ajustado (EVI), Figura 26, é perceptível a melhor discriminação dos diferentes alvos que compõem o ambiente urbano, tornando mais fácil a sua caracterização quando comparado com o IVDN. Este fato deve-se provavelmente a correção atmosférica realizada pelo EVI, tendo em vista que a banda do azul é inserida na formulação do índice assim como coeficientes de ajuste para influencia de aerossóis.

Huete *et al.* (1997) e Justice *et al.* (1998) afirmam que o EVI minimiza os efeitos da resposta espectral do solo e da influência atmosférica, como também apresenta alta sensibilidade as variações fenológicas. Almeida *et al.* (2008) encontraram bons resultados de EVI para estudo realizados com imagens MODIS em área florestal do município de Sooretama, ao norte do Espírito Santo.

Assim como observado no IVDN os valores de EVI para os corpos hídricos se apresentaram abaixo de 0. É possível visualizar que as áreas com de fragmentos florestais com vegetação densa se apresentam bem mais delineada com valores de EVI superiores a 0,60, entre as imagens de 1987 a 1991.

As bordas destes fragmentos apresentaram valores de EVI variando entre 0,30 e 0,50, assim como as áreas e caminhos utilizadas antropicamente no interior dos fragmentos, tendo em vista que a vegetação contida nestas áreas apresenta menor biomassa foliar devido as constantes pressões sofridas.

Para as demais imagens é observada que os grandes fragmentos florestais apresentam uma maior homogeneização dos valores. Grande extensão de suas áreas já apresentam valores de EVI superiores a 0,60 demonstrando a regeneração de grande parte deste fragmento. No caso do fragmento mata da Várzea, é possível verificar a regeneração de parte da mata mais próxima ao rio Capibaribe apresentando valores de EVI superiores a 0,70.

Oliveira *et al.* (2011c), através da realização de análise espaço temporal no fragmento Mata da Várzea com utilização de imagens TM do satélite Landsat e fotografias aéreas georreferenciadas, verificaram a utilização antrópica de algumas partes do fragmento para a atividades agropastoris. Deste modo através da implantação de cercas ao redor da mata a vegetação obteve oportunidade de desenvolvimento de biomassa. Assim era possível observar grande parte da área ocupada por indivíduos arbóreos.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)



Já para as áreas mais urbanizadas é possível visualizar a diminuição espacial da quantidade de vegetação em grande parte do município do Recife. No caso das áreas de morros nas RPA 2 e 6, nota-se a diminuição de cobertura vegetal de grande parte da sua área entre as imagens utilizadas, o que vem a validar a classificação realizada para as imagens, Figura 8.

Para estas áreas, na imagem de maio de 1989, é observado que as áreas com altitude superiores a 40 m, Figura 3, apresentavam valores de EVI variando entre 0,30 e 0,70. Porém, com a visualização das demais imagens, estas áreas começaram a se adensar, vindo a apresentar áreas de solo exposto e grande quantidade de áreas impermeabilizadas, baixando os valores de EVI e a distribuição das áreas com vegetação para as áreas com maior declividade.

Visualizando a mata de Dois Unidos é possível observar que a mesma perdeu contato com outros fragmentos menores próximos a sua área. Nas imagens de 1987 a 1991 é observado corredores de vegetação, com EVI superior a 0,60, interligando o fragmento de Dois Unidos a fragmentos inseridos nos bairros de Linha do Tiro e Passarinho. A partir de 2005 estes corredores diminuem significativamente apresentando ligação com as matas mais próximas ao bairro de Passarinho.

Torna-se mais fácil acompanhar a evolução do adensamento construtivo no tecido urbano de diversas áreas do município. Os bairros da RPA 1, por exemplo, passaram a apresentar valores de EVI inferiores a 0,20 em grande parte de sua área a partir da imagem de setembro de 2005. Neste mesmo ritmo seguiram os bairros mais próximos a RPA 1, como os bairros do Cordeiro, Areias, Imbiribeira, Boa Viagem.

Bairros como Poço da Panela, Parnamirim, Jaqueira e Casa Forte, que fazem parte da RPA 3, por exemplo, apresentavam grandes manchas com valores de EVI com variação entre 0,30 e 0,70 em áreas mais próximas ao Rio Capibaribe. Parte destas áreas está associadas a áreas públicas como Parque de Santana, Parque da Jaqueira o que vem em alguns casos a diminuir os efeitos negativos da rápida expansão urbana, como a formação de ilhas de calor, por exemplo.

À medida que foram surgindo novas vias ou alargamento de avenidas é possível observar que os valores de EVI no entorno destas áreas foram diminuindo consideravelmente. Estas áreas, agora com maior facilidade e atratividade para a ocupação, foram sendo adensadas paulatinamente.

Avenidas como a Agamenon Magalhães e Avenida Caxangá, facilmente visualizadas em todas as imagens utilizadas, apresentavam valores de EVI inferiores a 0,10. No entorno destas áreas o EVI, antes com média de 0,20 a 0,40 em 1987, passaram a apresentar valores de 0,10 na maior parte do seu entorno na imagem mais atual.

Estudos realizados por Huete *et al.* (2002) e Ginciene e Bitencourt (2011) verificaram que o EVI apresentou maior sensibilidade as alterações do dossel vegetal em relação ao IVDN, principalmente nas áreas que apresentavam maior densidade de biomassa, fato este observado nas áreas de fragmentos florestados observados nesta pesquisa.

Quando observado a tabela 6 é possível observar que a média dos valores de EVI também apresentou diminuição entre as imagens utilizadas. A imagem de maio de 1987 apresentou como média o EVI de 0,523 enquanto que em setembro de 2011 foi verificado o valor de 0,312.

Quando levado em consideração a questão do período mais chuvoso para as imagens de maio e junho, nota-se que entre as imagens de maio de 1987, junho de 1991 e julho de 2007 ocorreu uma diminuição no valor médio. Já para o período mais seco foi observado que entre as imagens de setembro de 1989, 2005 e 2010 ocorreu à diminuição no valor médio.

**Tabela 6.** Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do EVI no município do Recife, para as datas estudadas.

<b>EVI</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
09-05-1987	-0,466	2,870	<b>0,523</b>	0,236
28-09-1989	-0,346	0,969	<b>0,370</b>	0,163
14-06-1991	-0,706	1,140	<b>0,473</b>	0,202
08-09-2005	-0,360	1,480	<b>0,336</b>	0,215
26-08-2006	-0,993	4,140	<b>0,378</b>	0,228
28-07-2007	-0,436	1,150	<b>0,335</b>	0,212
06-09-2010	-0,424	1,060	<b>0,346</b>	0,220
25-09-2011	-0,614	1,310	<b>0,312</b>	0,197

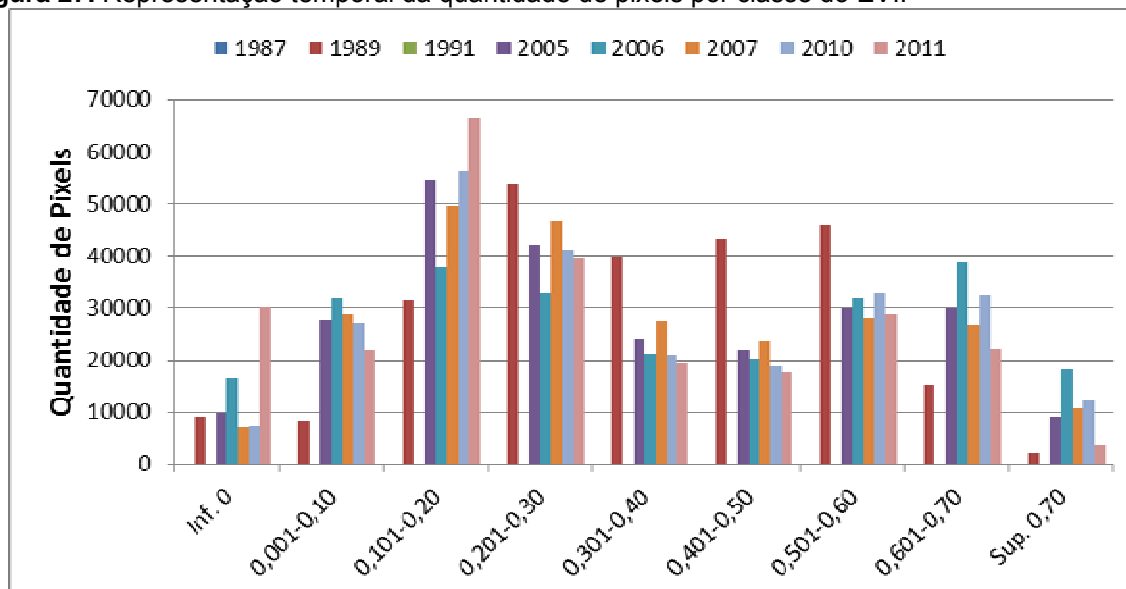
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Através da figura 27 é possível observar o aumento na quantidade de pixels que apresentavam valores de EVI variando entre 0,10 e 0,20 para cada imagem utilizada. Esta classe representava a classe com maior representação espacial para as imagens dos anos de 2005, 2007, 2010 e 2011. A partir da classe de EVI com



valores superiores a 0,30 nota-se a diminuição na quantidade de pixels a partir do ano de 2005.

**Figura 27.** Representação temporal da quantidade de pixels por classe do EVI.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Quando observado o Índice de Área Foliar (IAF), Figura 28, é perceptível a carência de cobertura vegetal em diversas áreas do município do Recife já na imagem de 1987. O IAF apresenta-se como uma variável biofísica que expressa a taxa de crescimento de uma determinada comunidade vegetal, apresentando estreita relação com a produtividade em que esta se encontra (Lang e Mcmurtrie, 1992; Xavier *et al.*, 2004 ; Paiva *et al.*, 2009).

Deste modo o IAF é considerado a mais importante variável biofísica diretamente relacionada com a evapotranspiração (Lang e Mcmurtrie, 1992; Sellers *et al.*, 1997; Xavier e Vettorazzi, 2004) e com a capacidade de interceptação da chuva pelo dossel (Kergoat, 1998; Dijk e Bruijnzeel, 2001).

As áreas que apresentavam corpos hídricos, assim como as áreas que não apresentavam qualquer tipo de vegetação como áreas construídas e/ou impermeabilizadas, exibiram valores de IAF igual à zero. Com relação às áreas de solo exposto os valores de IAF variaram entre zero, na maioria dos casos, para índices muito próximos a zero.

[illegible]

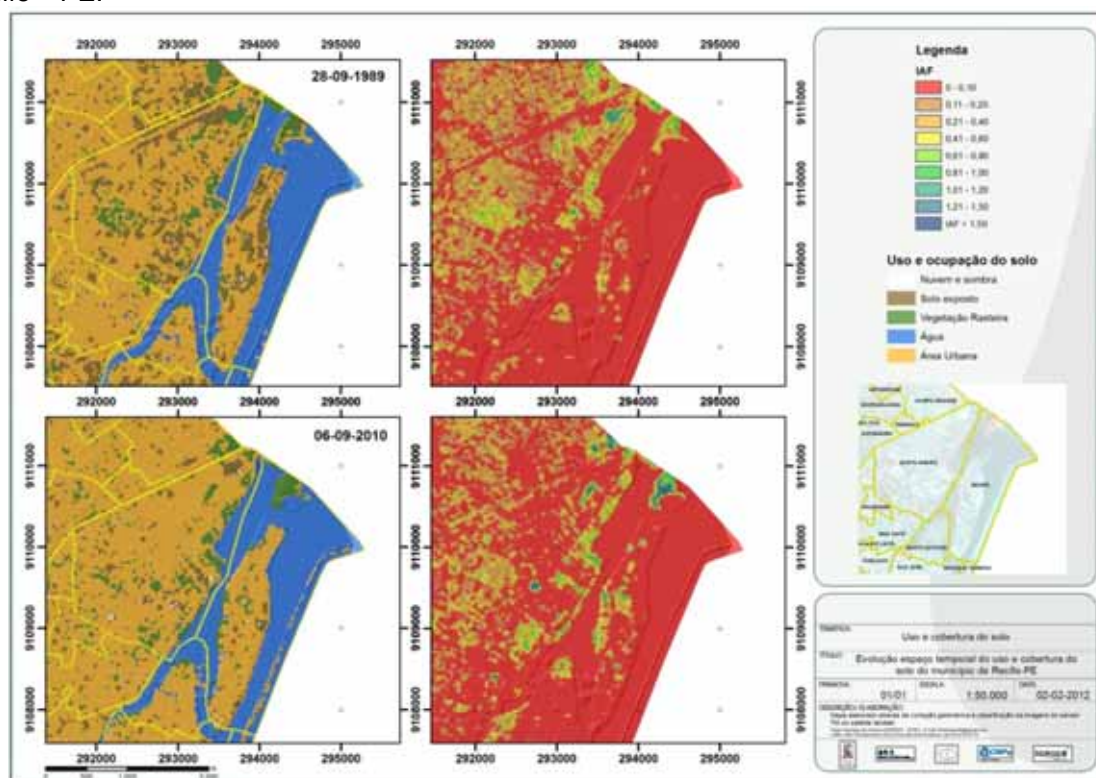
81



Em algumas imagens, como as imagens de 1987, 2005 e 2011, por exemplo, é possível visualizar áreas na maioria dos casos circulares, principalmente na área vegetada mais ao norte do município, com valores de IAF igual a zero. Estas áreas são o resultado da classificação e exclusão de nuvens e sombra de nuvem, vindo a apresentar o valor zero no pixel. Deste modo torna-se difícil realizar a exclusão automática destas áreas sem que ocorra a exclusão de áreas efetivamente sem cobertura vegetal.

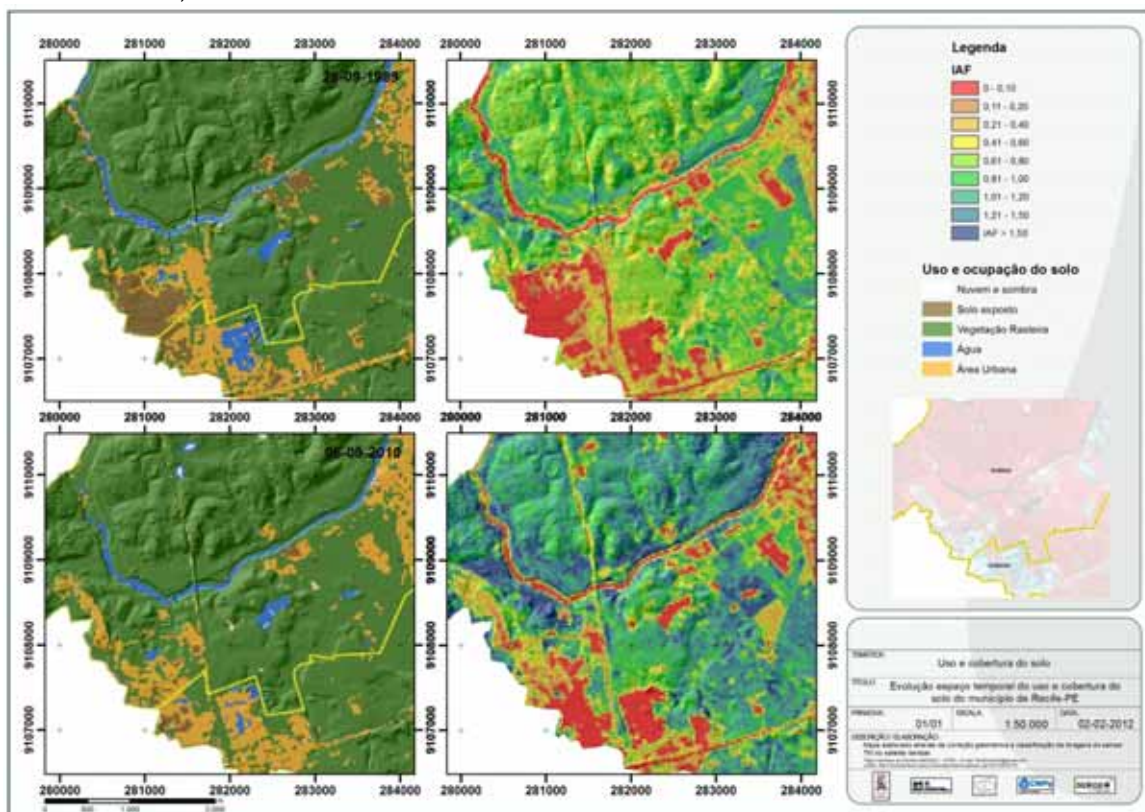
Nota-se como grande parte da RPA 1 já apresentava valores de IAF variando entre 0 e 0,10 para a imagem de 1987, e que as áreas que apresentavam qualquer tipo de cobertura vegetal mais expressiva, como a Praça do Arsenal, no bairro do Recife, Figura 29, demonstraram valores de IAF superiores a 0,40. As áreas de solo exposto observado no entorno da mata da Várzea e do Curado também apresentaram valores de IAF igual ou próximo à zero, Figura 30.

**Figura 29.** Adensamento construtivo e distribuição de áreas com vegetação no bairro do Recife, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 30.** Diminuição de áreas de solo exposto e sensibilidade do IAF a diminuição no bairro da Várzea e Curado, Recife – PE.

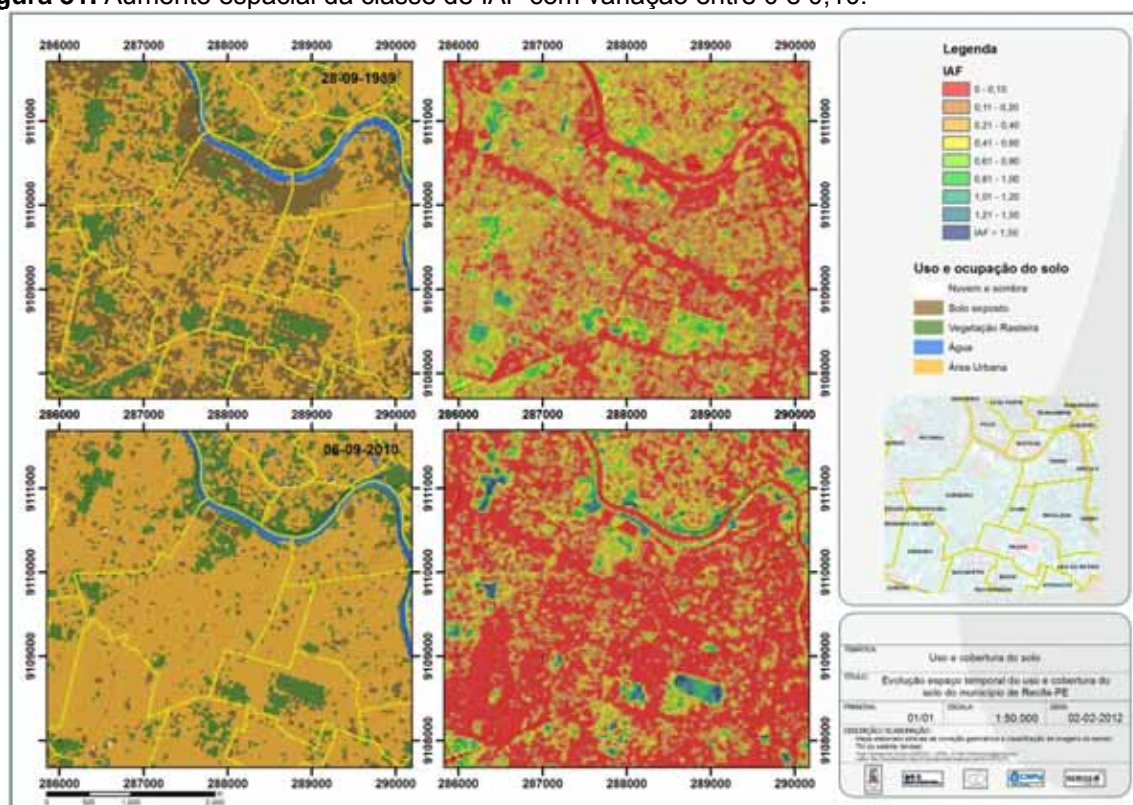


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

As grandes avenidas, por apresentar pouca cobertura vegetal, apareceram bem mais destacadas que nos índices abordados anteriormente. Deste modo é possível observar que estas áreas com IAF baixos foram se ampliando para grande parte do município, evidenciando a diminuição espacial da vegetação tanto em áreas publicas como em áreas particulares (Figura 31).

As áreas vegetadas apresentam grande importância para a área intra-urbano. Pode ser citada a “função de controle e prevenção de desastres naturais, causados por processos de erosão, tais como desmoronamentos e/ou deslizamentos de encostas em sítios montanhosos” como afirmam Rossetti *et al.* (2007). As mesmas completam que, de modo geral, a presença e manutenção de áreas vegetadas permite a melhor permeabilidade de terrenos intra-urbano, reduzindo o escoamento superficial das águas pluviais, causando problemas de inundações e assoreamento de corpos d’água (ROSSETTI *et al.*, 2007).

**Figura 31.** Aumento espacial da classe de IAF com variação entre 0 e 0,10.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Estudos realizados por diversos autores em diversos municípios e capitais brasileiras, seja por análise de imagens de satélite ou por fotografias aéreas georreferenciadas, demonstraram a gradativa diminuição da cobertura vegetal em virtude, na maioria dos casos, da falta de planejamento público adequado à expansão e adensamento urbano (RODRIGUES & LUZ, 2007, ROSSETTI *et al.*, 2007; VIEIRA *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2010).

Já para os grandes fragmentos florestais a oeste do município, como a mata da Várzea (Figura anterior), mata de Dois Irmãos, matas do Curado e Jardim Uchôa, foi observado grande desenvolvimento da vegetação entre os anos estudados. Estas áreas, seja como propriedade particular ou pública, passaram a gozar de proteção, como no caso das matas do Curado sob tutela do Exército Brasileiro (Guimarães *et al.*, 2012a-b), o que veio a diminuir a utilização antrópica permitindo a sua regeneração.

Deste modo, estas áreas, que na imagem de 1987 apresentavam valores de IAF superiores a 0,60 e em algumas áreas no interior do fragmento entre 0,40 e 0,60, passaram a apresentar copas mais homogênea em 2005, com grande parte de



seus valores superiores a 1,20. Para a mata da Várzea, a área de mata que apresentava maior contato com o rio Capibaribe, cujos valores de EVI era superior a 0,70 apresentou valores de IAF superiores a 1,50, como pode ser observado através de visualização da Figura 30.

Novas (2008), em estudo realizado na cidade de Maceió com imagens TM do satélite Landsat, verificou que os menores valores de IAF estavam associados às áreas urbanas e a corpos hídricos e à medida que ocorreu a intensificação da urbanização os valores de IAF foram diminuindo, enquanto que as áreas de vegetação nativa apresentaram os valores mais elevados o que vem a corroborar com resultados encontrados nesta pesquisa.

Braga *et al.* (2009) em estudo realizado nas proximidades da região de Quixeré – CE, encontrou valores de IAF elevados (com variação entre 1,2 a 2,4) em áreas com maior desenvolvimento da vegetação nativa e de agricultura irrigada. Através da tabela 7 é possível observar os valores mínimos, máximo, médio e o desvio padrão para as cartas de Índice de área foliar estimados.

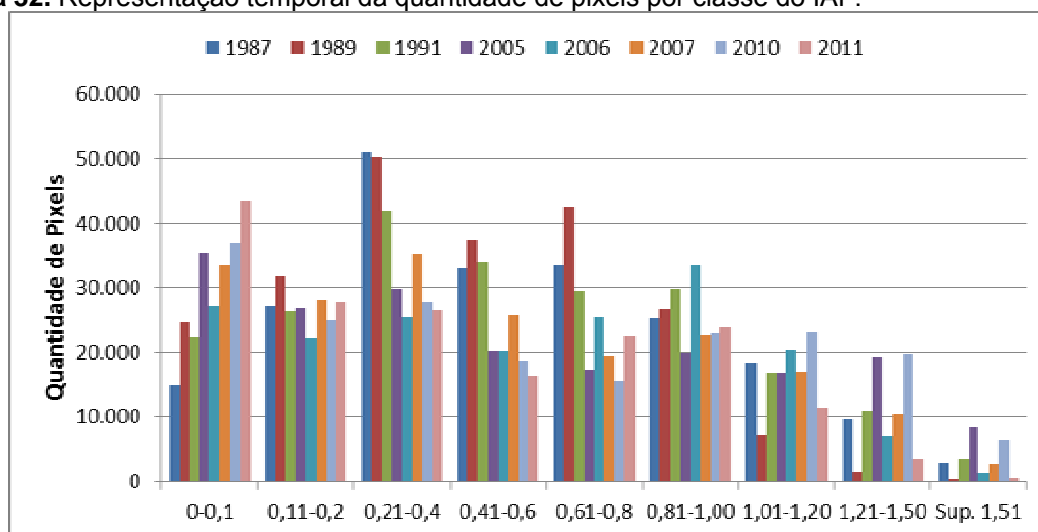
**Tabela 7.** Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do IAF no município do Recife, para as datas estudadas.

IAF	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
09-05-1987	0,000	6,770	0,548	0,383
28-09-1989	0,000	2,460	0,461	0,306
14-06-1991	0,000	6,000	0,545	0,397
08-09-2005	0,000	6,000	0,557	0,493
26-08-2006	0,000	3,730	0,550	0,406
28-07-2007	0,000	6,000	0,490	0,415
06-09-2010	0,000	6,000	0,571	0,490
25-09-2011	0,000	2,650	0,426	0,378

Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Através da Figura 32 é possível observar a diminuição espacial ocorrida nas classes que apresentavam os maiores valores de IAF, assim como, o aumento temporal na classe de IAF com variação entre 0 e 0,10. Deste modo é inferida a diminuição temporal da quantidade de vegetação do município e o aumento das áreas impermeabilizadas.

**Figura 32.** Representação temporal da quantidade de pixels por classe do IAF.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Deste modo através das cartas e gráficos do IVDN, EVI e IAF foi observado a diminuição da cobertura vegetal em diversas áreas do município do Recife. A área correspondente ao Centro Expandido, assim como áreas das RPA 2 e 6 apresentaram a impermeabilização de diversas áreas ao longo dos anos, o que foi evidenciado através da proximidade de grande parte destas áreas com valores próximos a zero para os índices utilizados.

Nota-se também o desenvolvimento temporal dos grandes fragmentos florestais presentes no município do Recife, concentrados principalmente nas áreas mais ao norte e oeste do município. Já as áreas que apresentavam uma cobertura vegetal mais dispersa pelo município, como alguns lotes vazios ou quintais distribuídos em diversos bairros, diminuíram espacialmente ao longo dos anos estudados.

#### *4.3. Distribuição espaço-temporal do Índice de Umidade (NDWI), Albedo da superfície e Temperatura da superfície*

Através do índice de umidade (NDWI), Figura 33, é perceptível a diminuição espaço temporal nos valores de umidade mais elevado e a fragmentação que as áreas de mata Atlântica vêm sofrendo, sendo mais evidente nos bairros da RPA 1, 2 e 6. Como consequências do processo de fragmentação de áreas florestais são verificados, por exemplo, aumento na susceptibilidade de quebra da árvore pelo vento (Zeng et al, 2009), redução na quantidade de habitat para espécies florestais que dependem de grandes fragmentos (Teixeira et al, 2009) e alterações nas condições microclimáticas locais (Bierregaard e Dale, 1996 apud Ribeiro et al, 2009).

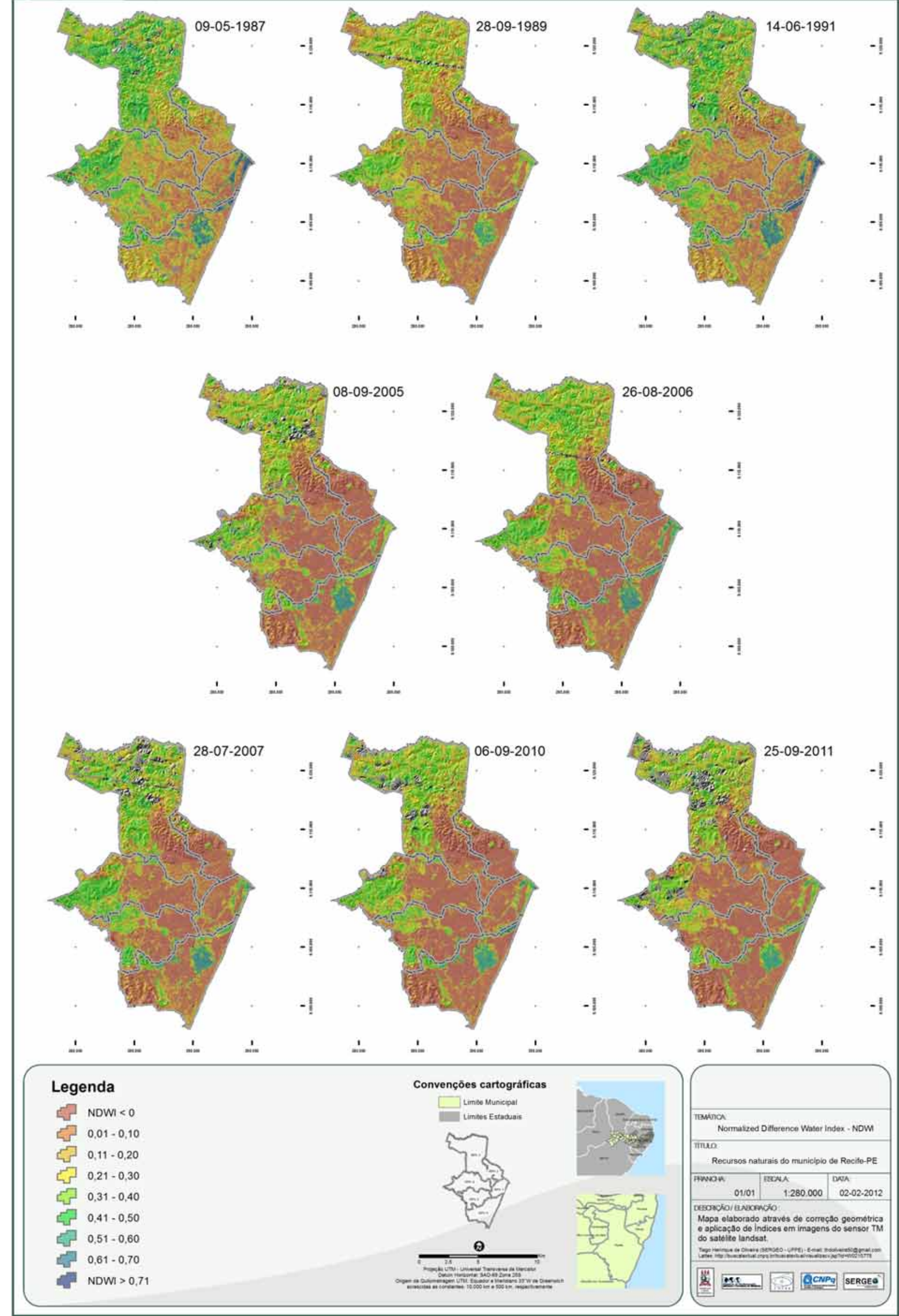
Assim como no IAF, os fragmentos florestais como a mata da Várzea e a mata de Dois Irmãos conseguiram manter elevados índices de umidade em todas as imagens, com valores de NDWI superiores a 0,30. As áreas de mata ciliar, assim como as áreas de mangue, apresentaram valores de umidade mais elevados, com umidade superior a 0,61 em diversas áreas. Estas áreas apresentavam grande destaque no IAF, com valores superiores a 1,51, como pode ser observado através da Figura 34 com o manguezal do Pina.

Mais uma vez é perceptível a grande homogeneização de valores de umidade inferiores a zero na maior parte dos bairros a partir da imagem do ano de 2005. Isto se deve à elevada urbanização e à gradativa substituição da cobertura vegetal por outros materiais. Segundo Cardozo et al. (2009), “[...]o índice de vegetação proposto por Gao (1996), é relacionado com o conteúdo de água presente nas folhas”, em que os valores negativos representam áreas sem vegetação ou com vegetação seca e valores positivos para vegetação verde.

Já áreas como na RPA 3, como os bairros de Nova Descoberta, Vasco da Gama e Alto José Bonifácio, que sofreram grandes modificações espaço temporal do uso e cobertura do solo, apresentaram valores de NDWI variando entre inferiores a zero até 0,10 em grande parte das áreas, conforme pode ser observado na Figura 35.



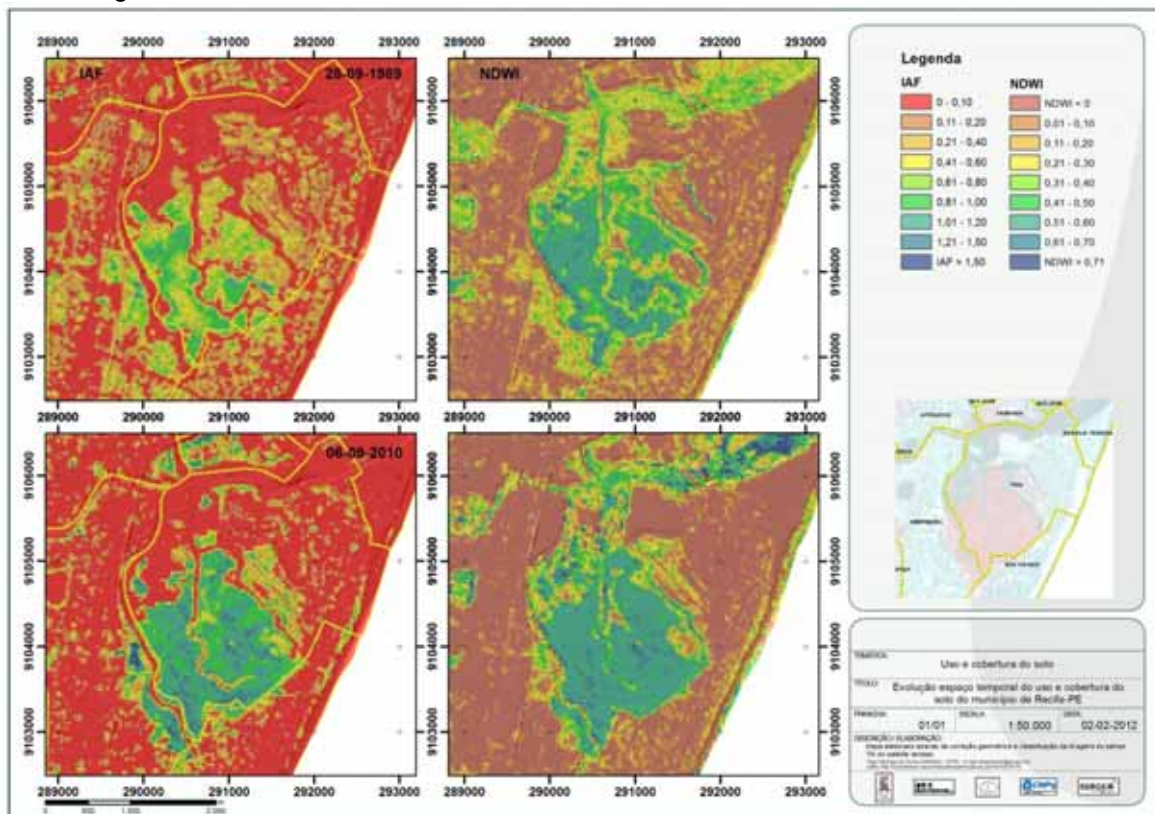
Figura 33. Evolução espaço-temporal do Índice de Umidade (NDWI) do município de Recife – PE



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

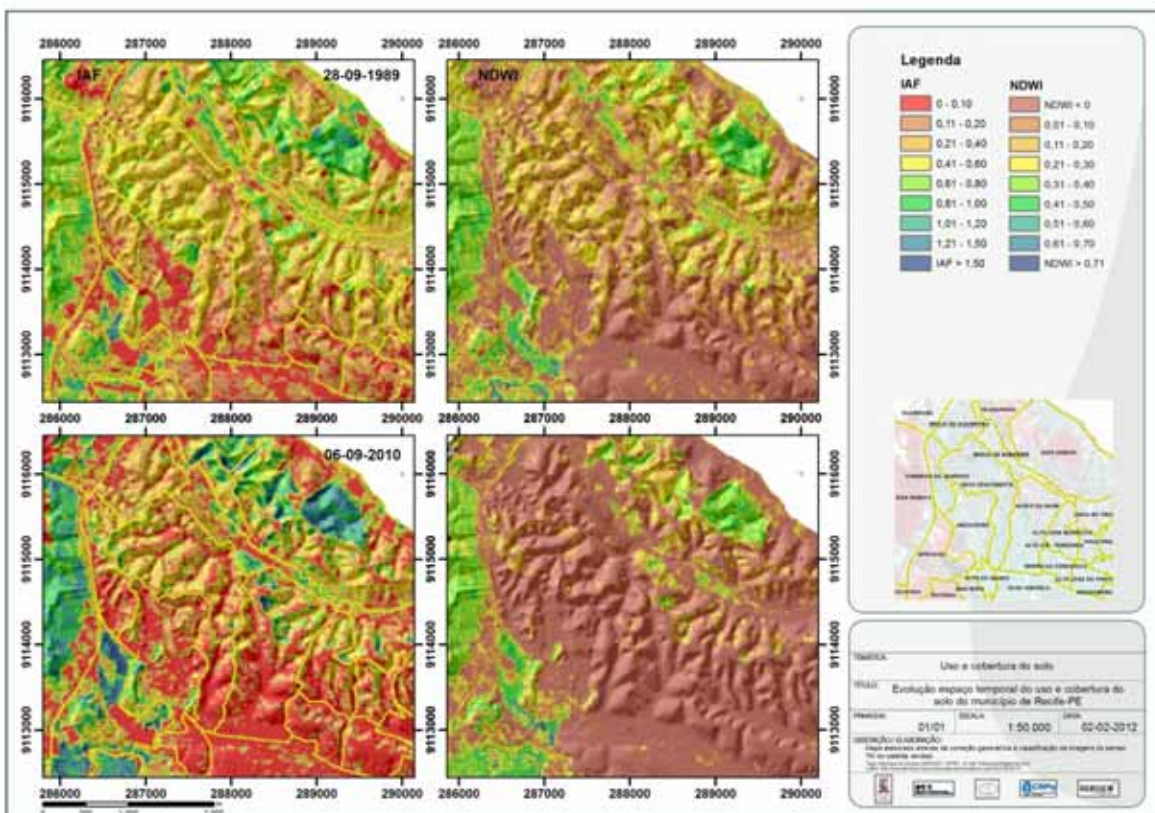


**Figura 34.** Evolução espaço-temporal do Índice de Área Foliar (IAF) e Índice de Umidade (NDWI) para o manguezal do Pina, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 35.** Evolução espaço-temporal do Índice de Área Foliar (IAF) e Índice de Umidade (NDWI) para bairros da RPA - 3, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Cardozo et al. (2009), em estudo realizado na região do Pantanal - área correspondente a órbita-ponto 226-73 do sensor TM do Landsat, verificaram que os valores de NDWI mais baixos estavam associados às áreas com predominância de solo, enquanto que os valores mais altos estavam associados às áreas com grande predominância de água, corroborando com os resultados encontrados por Oliveira et al. (2010) em estudo realizado na bacia hidrográfica do rio Moxotó, em ambiente semiárido do Nordeste brasileiro.

Holanda & Guerra (2010), na região do Eixo-Forte localizada a oeste do estado do Pará no município de Santarém, constataram que as zonas de floresta apresentam NDWI com valores que variaram entre 0,60 e 0,80. Em zonas com reduzida cobertura vegetal ou vegetação esparsa (savanas, por exemplo), os índices apresentaram variação de valores que iam de 0,2 a -0,4 (negativo). Para as áreas com pouca ou quase nenhuma cobertura vegetal, o índice de umidade foi aproximado de -1.

Quando observado os valores estatísticos do Índice de umidade, Tabela 8, é possível visualizar os valores mínimo, máximo, médio e o desvio padrão para as cenas utilizadas. Nota-se que não houve grande variação nos valores médios a partir da imagem de 2005, sendo observada a menor média na imagem de setembro de 1989. Já na imagem de maio de 1987 foi observada a maior média, provavelmente por ser um período chuvoso.

**Tabela 8.** Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do NDWI no município do Recife, para as datas estudadas.

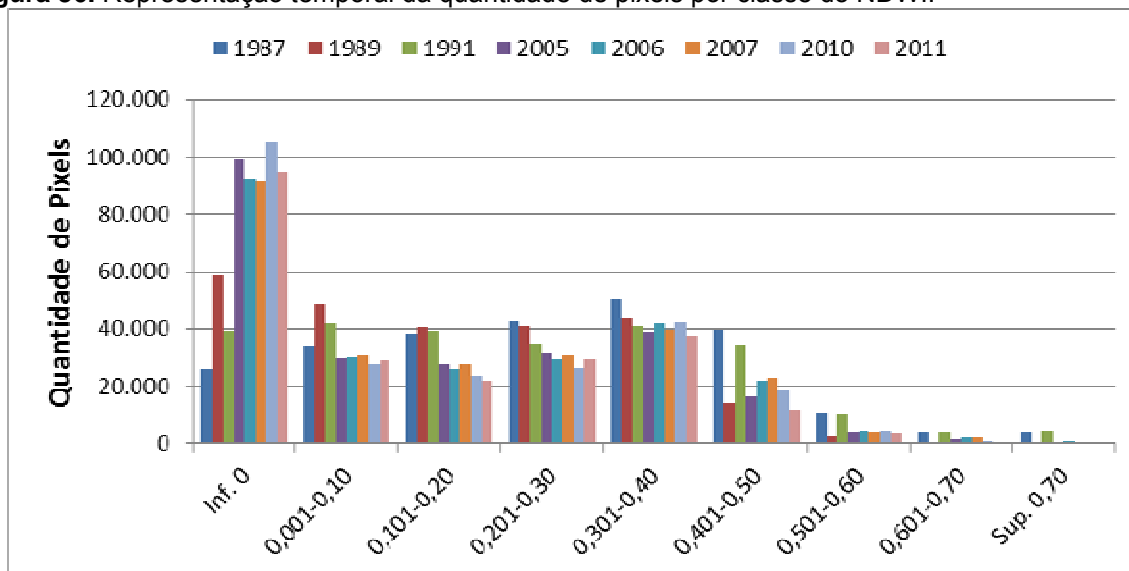
NDWI	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
09-05-1987	-0,999	0,999	0,290	0,166
28-09-1989	-1,000	0,999	0,219	0,136
14-06-1991	-1,000	1,000	0,277	0,178
08-09-2005	-0,774	1,000	0,251	0,147
26-08-2006	-1,000	1,000	0,265	0,154
28-07-2007	-0,718	0,999	0,261	0,150
06-09-2010	-1,000	0,999	0,262	0,148
25-09-2011	-0,598	1,000	0,244	0,143

Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Através do gráfico da Figura 36 é possível observar que a partir da imagem de 2005 uma grande parte dos pixels se encontrava na classe de NDWI inferior a 0. Já as classes intermediárias, com variação de umidade entre 0 e 0,40,

apresentavam em média 40.000 pixels por classe. A partir da classe de umidade superior a 0,41 esta quantidade foi diminuindo gradativamente.

**Figura 36.** Representação temporal da quantidade de pixels por classe do NDWI.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Já para o albedo da superfície, Figura 37, é perceptível como às áreas de vegetação densa apresentaram os menores valores de albedo da superfície, inferiores a 0,12. Isto se deve a alta absorção da radiação solar pela vegetação para realizar suas atividades fotossintéticas. Deste modo as áreas vegetadas apresentam albedos mais baixos, quando comparados a alvos urbanos por exemplo.

No caso do município de Recife, nota-se que até a imagem de 1991 os valores de albedo da superfície mais baixos eram bem distribuídos em todas as RPA, tendo em vista a distribuição da cobertura vegetal em muitas áreas. Porém quando observado a partir da imagem de 2005, nota-se a mudança no padrão de albedo do município, apresentando valores bem mais elevados.



**Legenda**

- 0 - 0,100
- 0,101 - 0,120
- 0,121 - 0,140
- 0,141 - 0,160
- 0,161 - 0,200
- 0,201 - 0,250
- 0,251 - 0,280
- 0,281 - 0,300
- Albedo > 0,301

**Convenções cartográficas**

- Limite Municipal
- Limites Estaduais

Projeção UTM - Universal Transversa de Mercator  
Datum horizontal: SAD-69 Zona 20S  
Origem de Coordenadas: UTM Equador e Meridiano 32°W de Greenwich  
Escala horizontal: 1:250.000 e 1:500.000, respectivamente

**TEMÁTICA:** Albedo da superfície

**TÍTULO:** Recursos naturais do município de Recife-PE

**FRONTO:** 01/01 **ESCALA:** 1:280.000 **DATA:** 02-02-2012

**DESCRIÇÃO / ELABORAÇÃO:** Mapa elaborado através de correção geométrica e aplicação de índices em imagens do sensor TM do satélite landsat.

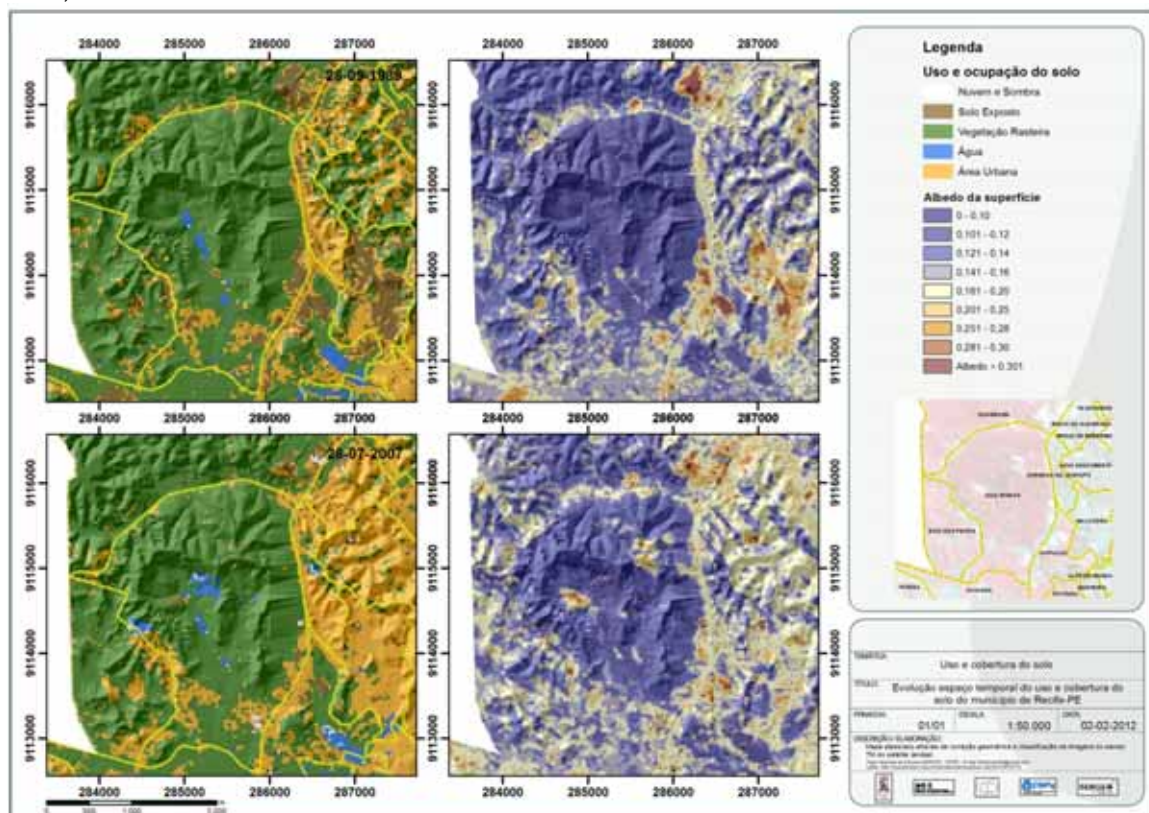
Tago Henrique de Oliveira (SERGEIO - UFPE) - E-mail: tholiveira10@gmail.com  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3110454610001000> - <http://orcid.org/0000-0002-1077-7777>

**Logos:** UFRPE, CNPq, SERGEIO



O processo de mudança no uso e cobertura do solo de algumas áreas no entorno dos grandes fragmentos florestais apresenta-se bem mais destacado, como no caso da mata de Dois Irmãos, Figura 38.

**Figura 38.** Modificação espaço-temporal do uso e ocupação do solo no entorno da Mata de Dois Irmãos, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

As demais áreas vegetadas, distribuídas nas áreas mais densamente construídas e/ou impermeabilizadas, apresentaram valores de albedo com variação entre 0,10 e 0,16. Este valor se deve a influência dos materiais utilizados na construção civil e na impermeabilização de diversas áreas. Deste modo grande parte das áreas vegetadas se apresenta confinada e cercada por grandes áreas construídas.

Estudo realizado por Silva et al. (2010), no município de Rio Branco, verificaram que os menores valores de albedo estavam associadas as áreas vegetadas e nas áreas com corpos hídricos. Já os maiores valores de albedo da superfície estavam sendo exibidos pelas classes de solo exposto e área urbana.

Autores como Correia et al. (2002) e Giongo (2008) verificaram em seus estudos que os valores elevados de albedo de superfície estão geralmente

associados a superfícies suaves, secas e de coloração clara, enquanto que albedos menores são associados a superfícies rugosas, úmidas e de coloração escura.

As áreas de solo exposto apresentaram valores de albedo da superfície superiores a 0,25 para o município do Recife. Silva et al. (2006), em áreas que apresentavam solos descobertos e área urbana do município de Petrolina, estimou valores de albedo superiores a 35%, assim como uma predominância de valores de albedo classificados entre 10 a 25% em áreas irrigadas e com vegetação nativa, o que corrobora com resultados encontrados neste estudo.

Boegh et al. (2002), em estudo realizado na Dinamarca com imagens TM do satélite Landsat 5, também obtiveram valores de albedo superiores a 35% em áreas com solo descoberto.

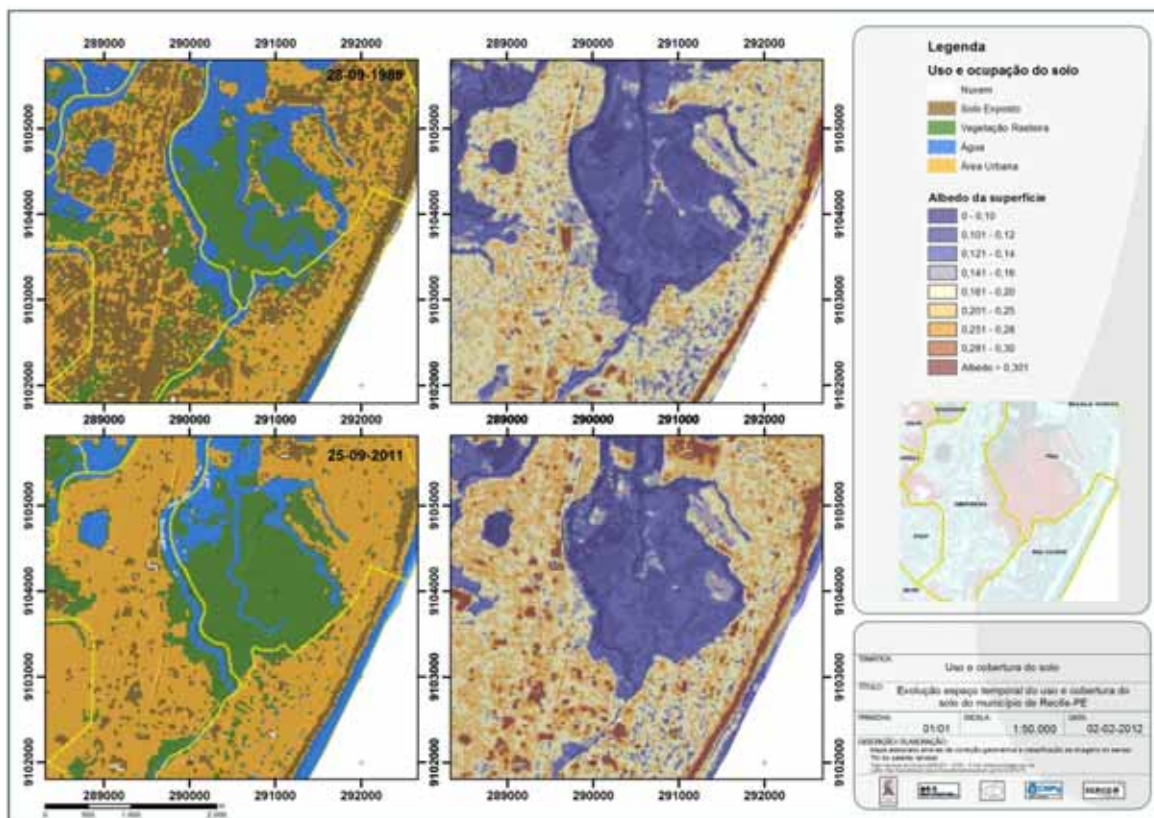
Gomes (2011), em estudo realizado na Região Metropolitana de Brasília – DF através de imagens TM do satélite Landsat nos anos de 1987, 1992, 1997, 2003, 2008 e 2011, encontrou valores de albedo variando entre 0,15 e 0,25 para a zona urbana, 0,11 a 0,20 para as áreas de vegetação e inferiores a 0,10 para os corpos hídricos.

As áreas classificadas como área urbana no mapeamento de uso e ocupação do solo apresentaram aumento nos valores de albedo da superfície principalmente a partir do ano de 2005. Devido ao adensamento e impermeabilização de grandes áreas, estes alvos apresentam alta refletividade, com valores de albedo superiores a 0,16.

Grandes empreendimentos, como o Shopping Recife, no bairro de Boa Viagem e outras grandes lojas e galpões distribuídos no bairro da Imbiribeira, Figura 39, apresentaram valores de albedo superiores a 0,30. Também é possível verificar isto para a construção do novo shopping Riomar, no bairro do Pina, onde grande parte da área vegetada do lote foi suprimida e passou a apresentar albedo superior a 0,30, como pode ser observado entre as imagens de 1989 e 2011.

Oke (1987), através de seus estudos, apresentou valores médios de albedo para diversos alvos. Como, por exemplo, áreas de solo exposto com variação entre 0,05 e 0,40 (influenciado principalmente pela cor do solo e pela quantidade de umidade), áreas urbanas com variação entre 0,16 e 0,27 e água, variando entre 0,03 e 0,10, o que vem a corroborar com os resultados encontrados nesta pesquisa.

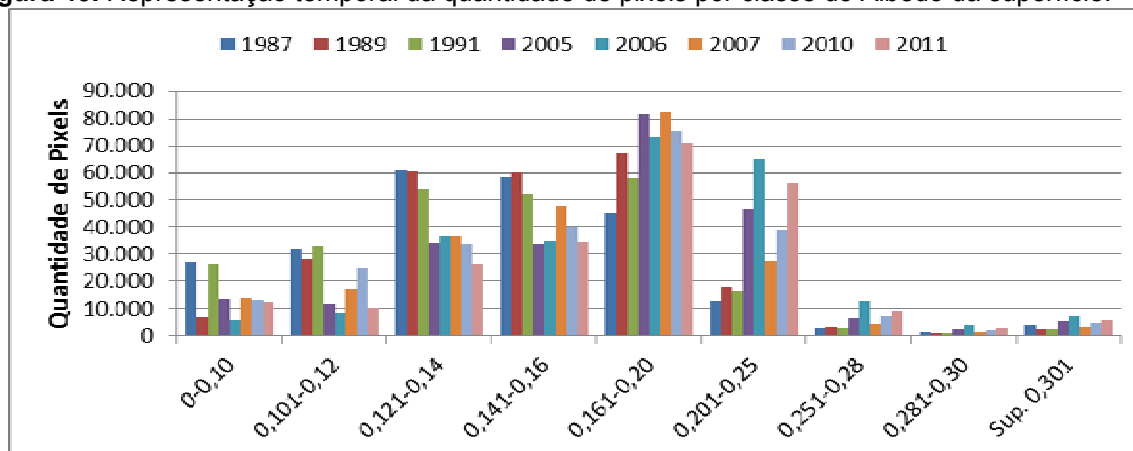
**Figura 39.** Modificação espaço-temporal do albedo da superfície no entorno do manguezal do Pina, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Através do gráfico de Albedo da superfície (Figura 40), é possível observar que a classe de albedo inferior a 0,16, apresentou diminuição na quantidade de pixels com o passar dos anos, chegando a apresentar pouco mais da metade dos elementos que apresentava nos anos anteriores à imagem de 2005.

**Figura 40.** Representação temporal da quantidade de pixels por classe do Albedo da superfície.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Já nas classes de albedo da superfície superiores a 0,16 foi ocorrendo um aumento na quantidade de pixels com o passar dos anos, devido principalmente a



impermeabilização de grandes áreas e aos diferentes tipos de materiais utilizados nos diversos tipos de construções, o que promove a reflexão de radiação solar.

Isto é mais facilmente observado na classe de albedo da superfície com variação entre 0,16 e 0,20. Quando observada a Figura 36 é possível observar o aumento espaço temporal desta classe em todas as imagens. Já para os anos de 2010 e 2011 ocorreu uma diminuição nesta classe e um aumento no número de pixels das classes de albedo variando entre 0,28 - 0,30 e superiores a 0,301 para estes dois anos.

Através da Tabela 9 é possível observar os valores estatísticos de albedo da superfície para as imagens utilizadas, onde foram observados dois aumentos na média do albedo. A primeira entre as imagens de 1987 e 2006 e a segunda entre as imagens de 2007 e 2011. Já o desvio padrão alternou entre aumento e diminuição a partir da imagem do ano de 2005.

**Tabela 9.** Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do Albedo da Superfície no município do Recife, para as datas estudadas.

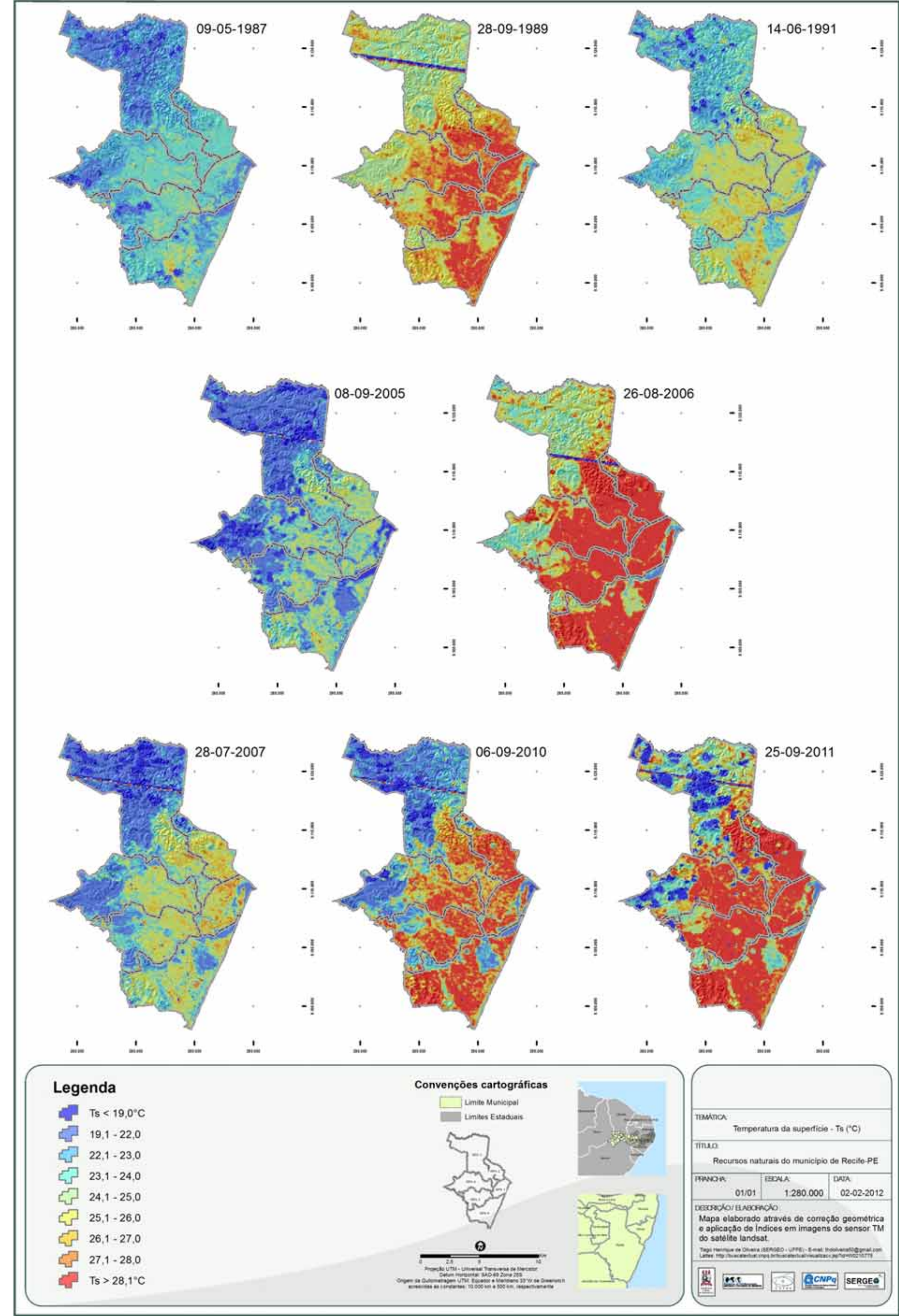
<b>Albedo da superfície</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
09-05-1987	0,022	0,514	0,145	0,046
28-09-1989	0,019	0,578	0,155	0,039
14-06-1991	0,034	0,487	0,147	0,044
08-09-2005	0,011	0,726	0,174	0,051
26-08-2006	0,041	0,751	0,186	0,054
28-07-2007	0,038	0,529	0,163	0,045
06-09-2010	0,024	0,879	0,168	0,054
25-09-2011	0,002	0,691	0,180	0,053

Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Para a temperatura da superfície - Ts (Figura 41), nota-se, como em períodos de maiores temperaturas (correspondentes aos meses de setembro a fevereiro em Recife), que as áreas vegetadas, assim como os corpos hídricos, desempenham um importante papel na amenização das temperaturas em um ambiente urbanizado ou adensado.

É possível observar um cinturão com temperaturas mais amenas na parte mais ao norte e oeste do município, onde em períodos mais úmidos são observados valores de temperaturas inferiores a 23°C, enquanto que em períodos mais secos existe uma variação de temperatura entre 23 a 26°C. Estas regiões apresentam como fator amenizante as áreas de mata dos bairros da Guabiraba, Várzea e Curado, por exemplo.

Figura 41. Evolução espaço-temporal da temperatura da superfície do município de Recife – PE



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

As áreas vegetadas refrescam as áreas circunvizinhas através da evapotranspiração, promovendo a conversão da energia solar em água evaporada ao invés do calor e mantendo a temperatura da vegetação e do ar mais baixas, assim como também através da promoção de áreas sombreadas (no caso da vegetação de porte Arbóreo), disponibilizando uma superfície mais fresca (GARTLAND, 2010 – p.64-65).

As margens de rios, como o rio Capibaribe e o rio Tejiú, também apresentam grande amenização nos valores de temperatura da superfície em virtude da quantidade de água liberada através da evaporação e da mata ciliar existente em grande parte destes rios. As áreas de solo exposto e área urbana, antes distribuídas espacialmente, com o passar dos anos se tornaram mais homogêneas, o que veio a formar um padrão contínuo de ilhas de calor. Os centros de altas temperaturas apresentam-se consistentes com as grandes áreas construídas e/ou impermeabilizadas.

Nota-se como a RPA-1 apresenta temperatura da superfície superior a 25°C em grande parte da sua área em quase todos os anos. No caso da RPA-2 é possível observar a grande influência da mudança do uso e cobertura do solo na distribuição da temperatura da superfície. A área mais a noroeste desta RPA, conseguiu manter temperaturas mais amenas ( $T_s < 25^{\circ}\text{C}$ ) na maior parte das imagens utilizadas, devido principalmente à quantidade de vegetação observada atualmente na área.

Estudo realizado por Souza & Azevedo (2012), através da utilização de dados meteorológicos da estação climatológica do Recife (Instituto Nacional de Meteorologia - INMET) e aplicação de índices climáticos, constatou a ocorrência de [...] “mudanças locais relacionadas a precipitação pluviométrica e às temperaturas máximas e mínimas durante o período compreendido entre 1961 e 2008” (p. 14). Os mesmos afirmam a ocorrência de um aumento de 1°C nas temperaturas máximas e mínimas nos 47 anos analisados para os modelos utilizados, o que provoca o aumento de ondas de calor agravando ainda mais a formação de ilhas de calor existente na cidade.

Para períodos mais úmidos, como nas imagens de 1987, 1991, 2005 e 2007, ou mais secos foi observada a recorrência de locais que apresentavam temperaturas mais elevadas em relação ao entorno, o que pode ser caracterizado como ilhas de calor. Estas áreas são diferenciadas por apresentarem a predominância de grandes

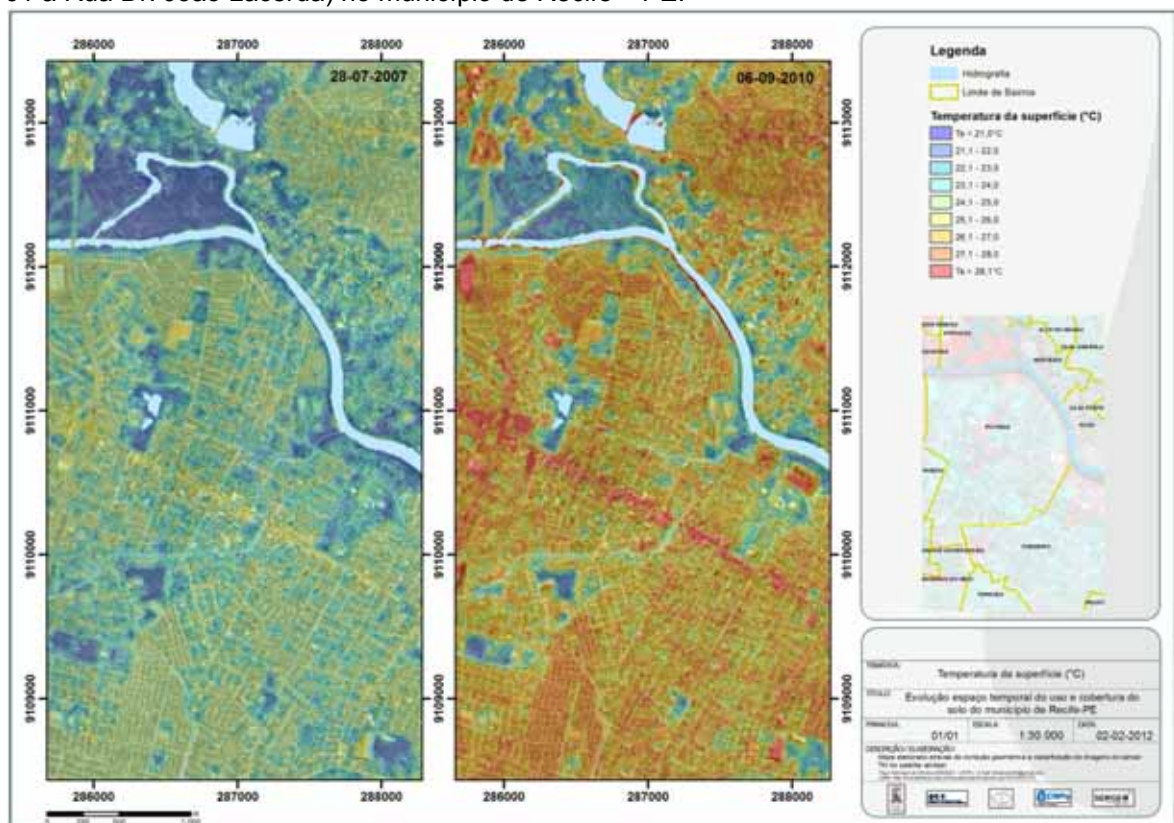


galpões e área com alta densidade construtiva ou impermeabilizada, o que vem a causar uma maior absorção e retenção de calor quando comparado com ambientes naturais por exemplo.

Através da utilização da metodologia TsHARP, proposta por Agam *et al.* (2007), é possível melhor visualizar espacialmente a distribuição da temperatura da superfície (°C) assim como verificar a influência dos diferentes tipos de materiais utilizados nas edificações e avenidas na temperatura da superfície, como pode ser observado através das Figura 42 a 44 para a Avenida Caxangá, parte do bairro de Boa Viagem e Pina e parte dos bairros do Recife, Santo Amaro e Santo Antônio, respectivamente.

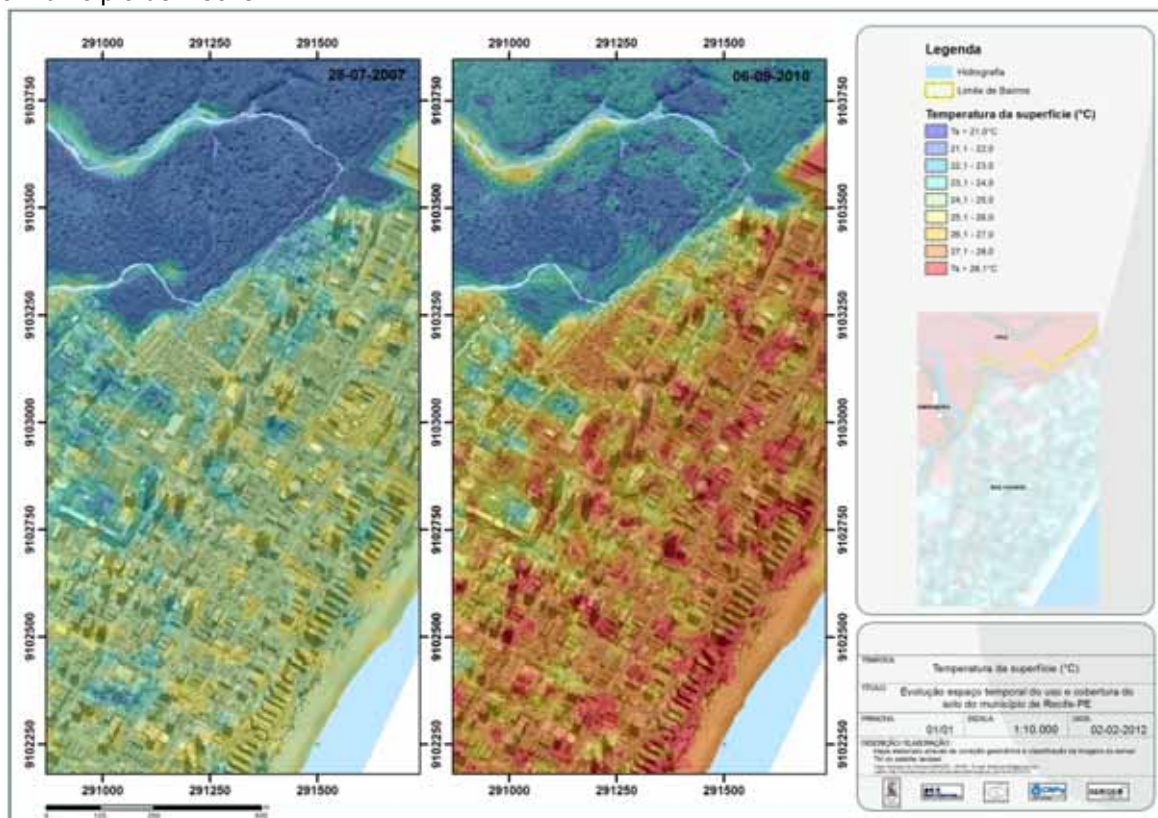
No caso da Avenida Caxangá, Figura 42, que na imagem de julho de 2007 apresentava temperaturas da superfície variando entre 25,1 e 26°C, em setembro de 2010 apresentou temperaturas superiores a 28°C em toda a sua extensão, apesar da quantidade de vegetação de porte arbóreo distribuído ao longo da avenida. O número de carros presente nas grandes avenidas também pode influenciar no valor da temperatura da superfície, corroborando no aumento dos valores de temperatura.

**Figura 42.** Distribuição da temperatura da superfície (°C) em parte da Avenida Caxangá (trecho BR-101 à Rua Dr. João Lacerda) no município de Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 43.** Distribuição da temperatura da superfície (°C) em parte do bairro de Boa Viagem e Pina no município de Recife – PE



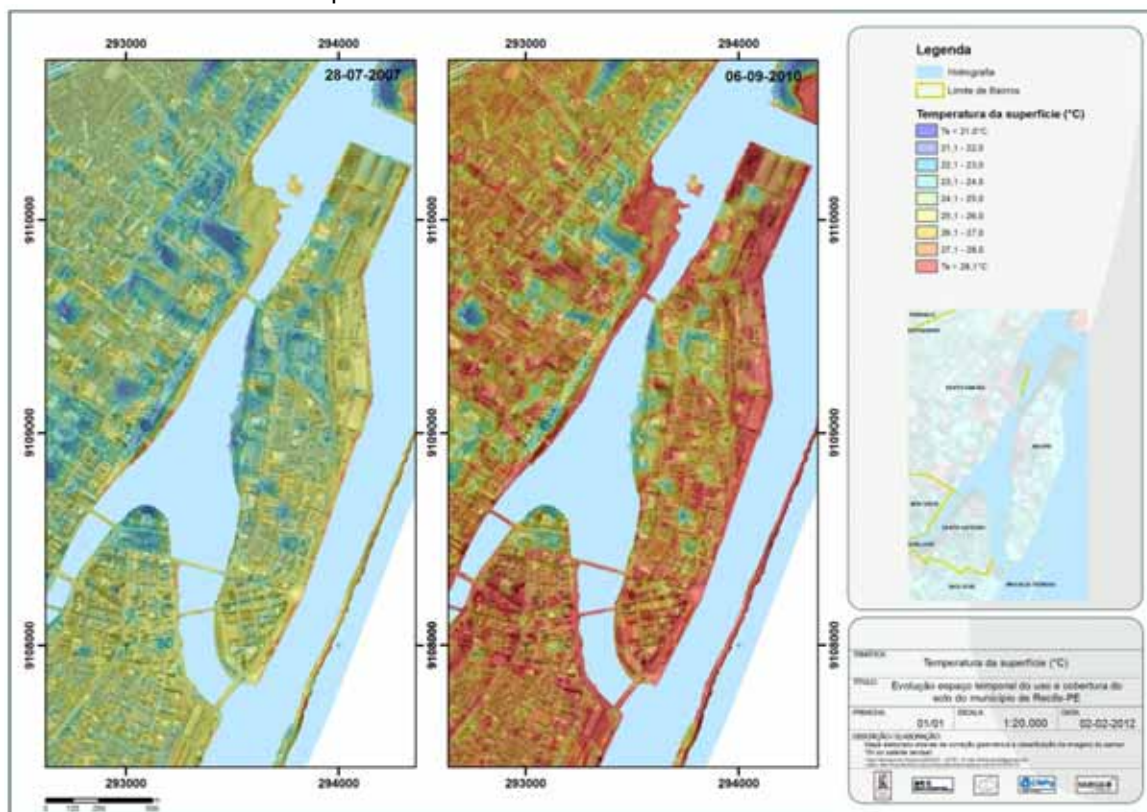
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Outro fato é que o alto grau de impermeabilização das áreas localizadas no entorno da avenida Caxangá influenciam no aumento da temperatura da via. É possível observar que a área vegetada do Parque de Exposição do Cordeiro desempenha um importante papel de arrefecimento da temperatura da superfície em parte da Avenida Caxangá.

Nota-se que apesar da diferença da temperatura da superfície (°C) tanto em período mais úmido (imagem de julho de 2007) como em período mais seco (imagem de setembro de 2010), as grandes áreas impermeabilizadas e/ou grandes empreendimentos como galpões e áreas residenciais com pouca vegetação, apresentam temperaturas bem mais elevadas que nas áreas vegetadas.

Dentre os impactos negativos causados pelas Ilhas de calor ao ser humano podem ser citados o desconforto térmico, causado em muitos casos pela falta de sombra, e o papel desempenhado no aumento da poluição do ar devido a grande quantidade de automóveis em circulação, o que segundo Gertland (2010, p. 179) apresenta grande impacto sobre a mortalidade e saúde da população em diversas partes do mundo.

**Figura 44.** Distribuição da temperatura da superfície (°C) nos bairros do Recife, Santo Amaro, Santo Antônio e São José do município de Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Estudo realizado por Lo & Quattrochi (2003, p. 1061) em Atlanta, entre os anos de 1973 e 2003 através da utilização de imagens do satélite Landsat, se constatou o que eles chamaram de mudança dramática do uso e cobertura do solo resultando na perda de floresta e áreas agrícolas, o que modificou o padrão de temperatura da superfície.

Os mesmos verificaram que as áreas de alta densidade urbana se desenvolveram ao longo dos grandes corredores rodoviários, o que pode ser visto em algumas áreas desta pesquisa. Deste modo, diversas ilhas de calor foram surgindo em Atlanta, mais frequentemente nas áreas adensadas, o que causou um aumento na incidência de doenças cardiovasculares e nas doenças respiratórias crônicas.

Chen *et al.* (2006), em estudo realizado na região do Pearl River Delta (PRD), ao longo da Costa Sul da China, verificaram através da utilização de imagens do sensor TM Landsat a influência da mudança de uso e cobertura da terra na disposição da temperatura da superfície. Os mesmos afirmam que o dramático



aumento da urbanização veio a mudar a distribuição dos diferentes usos e cobertura do solo e intensificar o surgimento de ilhas de calor.

Freitas (2005) também constatou a formação de varias ilhas de calor através de medições de temperatura realizada em diversos pontos do município do Recife. O mesmo aponta que os cruzamentos da Avenida Conde da Boa Vista com a rua do Hospício e o cruzamento entre a Avenida Domingos Ferreira e a Rua Antônio Falcão apresentavam temperaturas superiores a 30,0°C. Estas áreas foram classificadas como áreas desconfortáveis pelo autor.

Já a área situada na praia de Boa Viagem, na Praça Pinto Damásio e Apolônio Sales, apresentavam temperaturas mais amenas, com variação de temperatura entre 24 e 28,0°C, devido a quantidade de vegetação e influência antrópica de baixa densidade, sendo classificadas como espaços que apresentavam grande conforto.

No bairro do Recife, Figura 44, é possível visualizar que grande parte do bairro apresenta temperatura da superfície superior a 26°C em um período mais seco. Já as áreas vegetadas, mesmo as áreas de gramíneas, conseguiram manter as temperaturas mais amenas nos dois períodos, apresentando temperatura da superfície inferior a 22°C. Nota-se como a parte sul do bairro do Recife apresenta a predominância das temperaturas mais elevadas principalmente devido a localização do Porto do Recife com grande área impermeabilizada e/ou com grandes galpões, Figura 45.

**Figura 45.** Galpões e áreas impermeabilizadas no Porto do Recife, bairro do Recife, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)



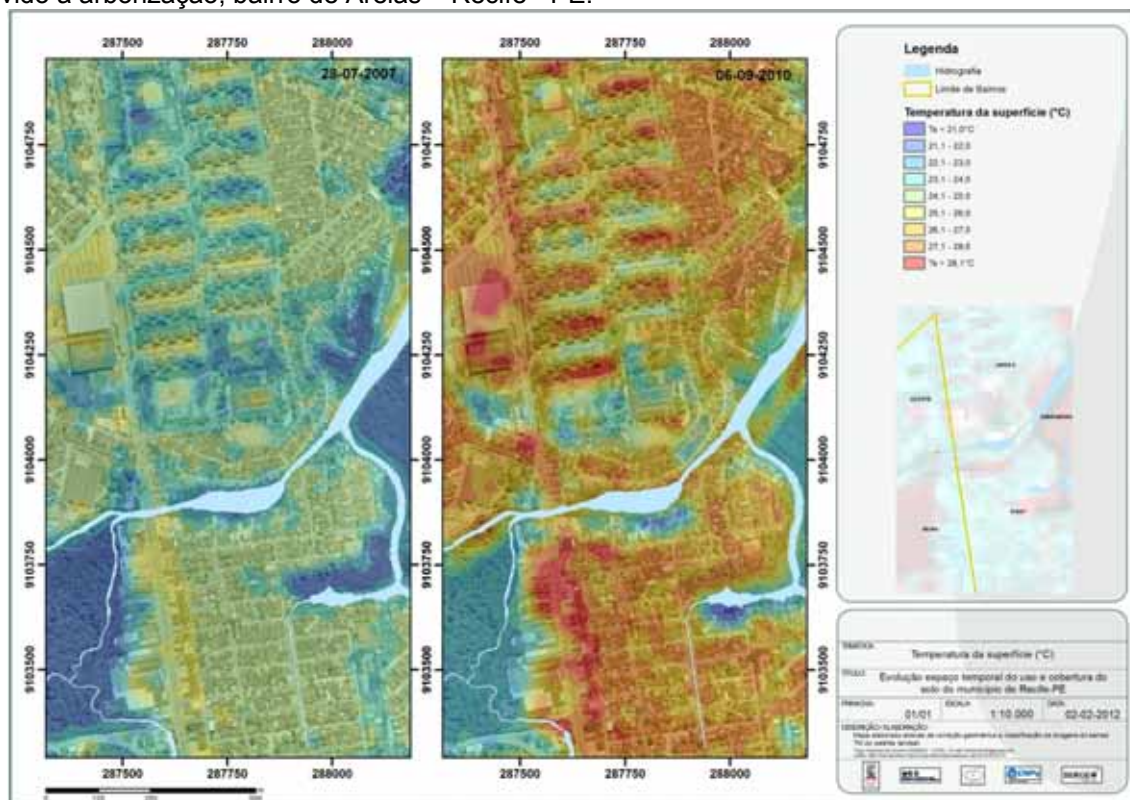
**Figura 46.** Distribuição de áreas verdes em parte do bairro de Santo Amaro, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Para o bairro de Santo Amaro, Figura 46 é possível observar que os lotes que apresentavam áreas verdes, conseguiram manter uma boa amenização da temperatura da superfície mesmo em períodos mais secos, como no mês de setembro. As áreas que apresentaram vegetação do porte arbóreo no entorno de grandes empreendimentos, como galpões e grandes edifícios, Figura 47 e 48 respectivamente, apresentaram arrefecimento da temperatura da superfície em seu entorno, diminuindo o impacto provocado na temperatura pelo mesmo.

**Figura 47.** Arrefecimento da temperatura da superfície no entorno do Hospital Geral de Areias, devido à arborização, bairro de Areias – Recife - PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Estudos realizados por autores como Meier (1990), Akbari *et al* (1997), Simpson e Mcpherson (1998) e Bass (2001; 2007), Ottele (2010) e Gertland (2010), demonstraram que os empreendimentos e edifícios que apresentava árvores e vegetação no seu entorno ofereciam superfícies mais frescas, e consequentemente redução do calor e do consumo de energia no interior dos mesmos. Meier (1990) comprovou que a redução na temperatura da superfície em paredes sombreadas por vegetação chegava a 20%.

**Figura 48.** Arrefecimento da temperatura da superfície no entorno de grandes edificações devido à arborização, Prefeitura da cidade do Recife – Recife - PE.

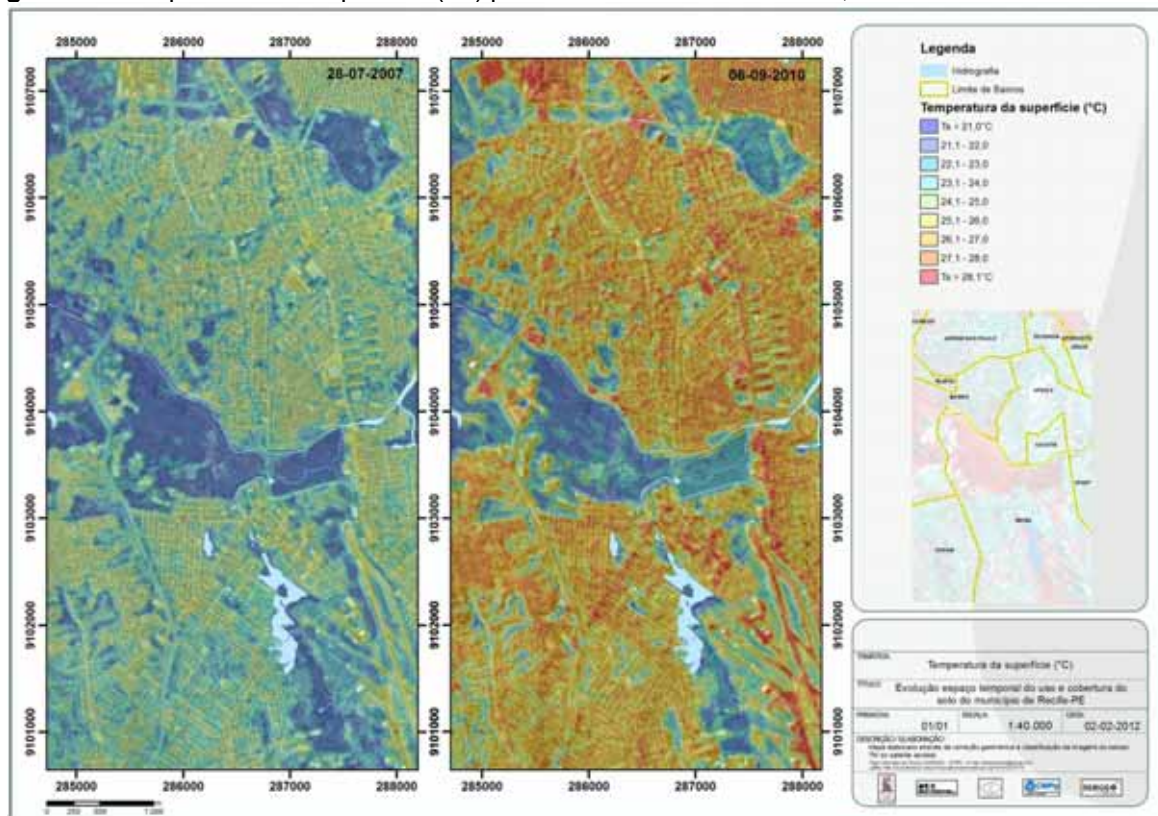


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Para os grandes fragmentos florestais é possível observar que a temperatura da superfície ficou abaixo de 22°C, como pode ser observado através das Figuras 49 e 50, Mata do Jardim Uchôa e Mata da Várzea/Curado respectivamente. As áreas que apresentam algum tipo de atividade antrópica no interior do fragmento, assim como as áreas com predominância de gramínea também se torna perceptível, apresentando temperaturas mais elevadas.

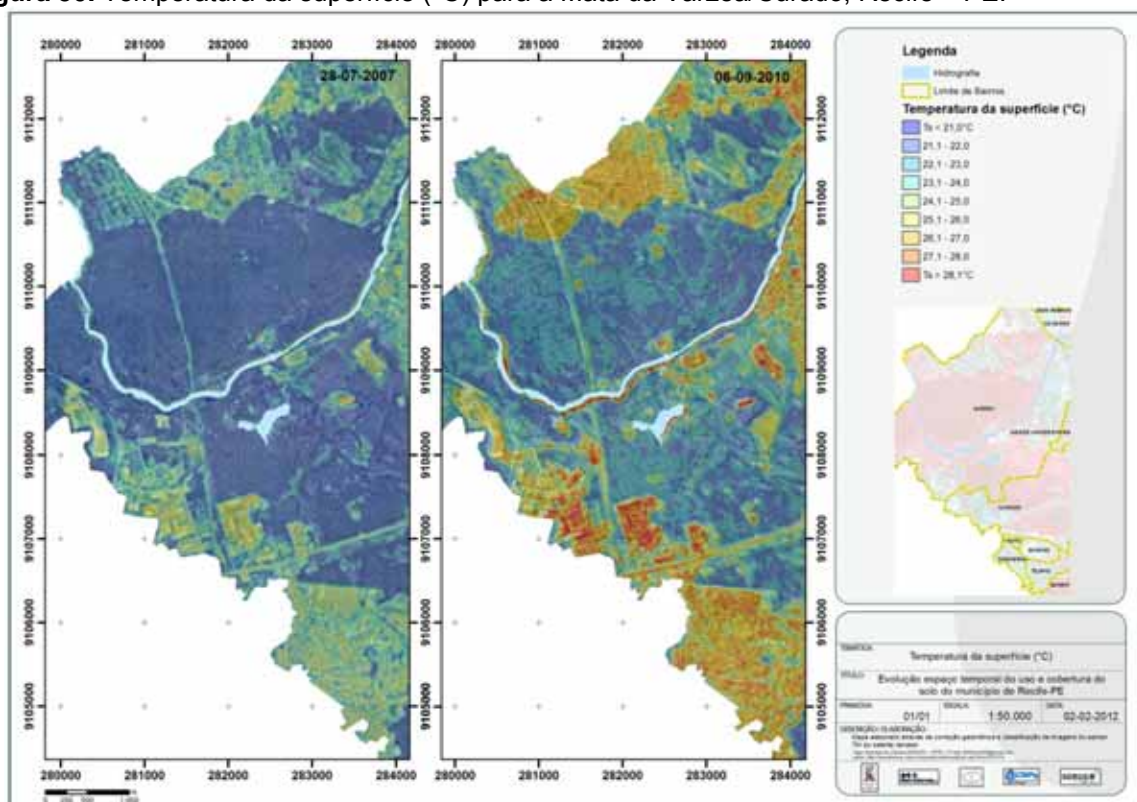


**Figura 49.** Temperatura da superfície (°C) para a Mata do Jardim Uchôa, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 50.** Temperatura da superfície (°C) para a Mata da Várzea/Curado, Recife – PE.

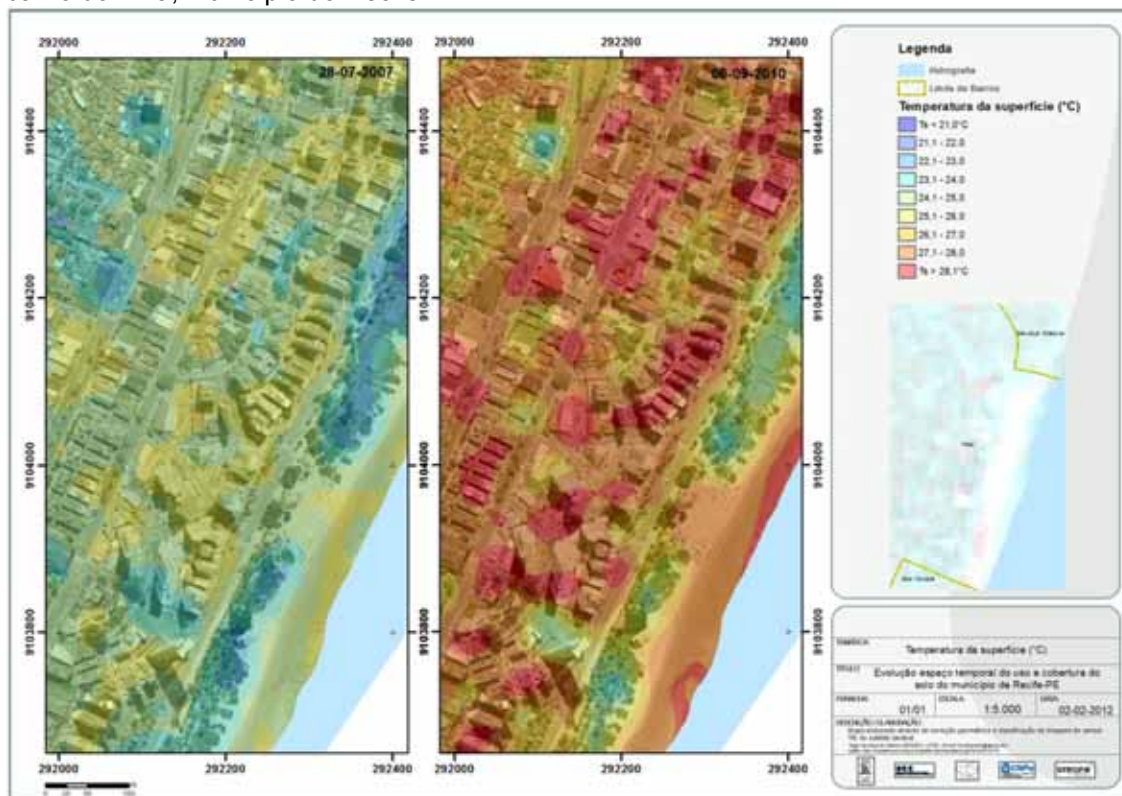


Fonte: Oliveira, T.H (2012)





**Figura 52.** Distribuição de ilhas de calor em áreas com grande concentração de edificações em área do bairro do Pina, município do Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

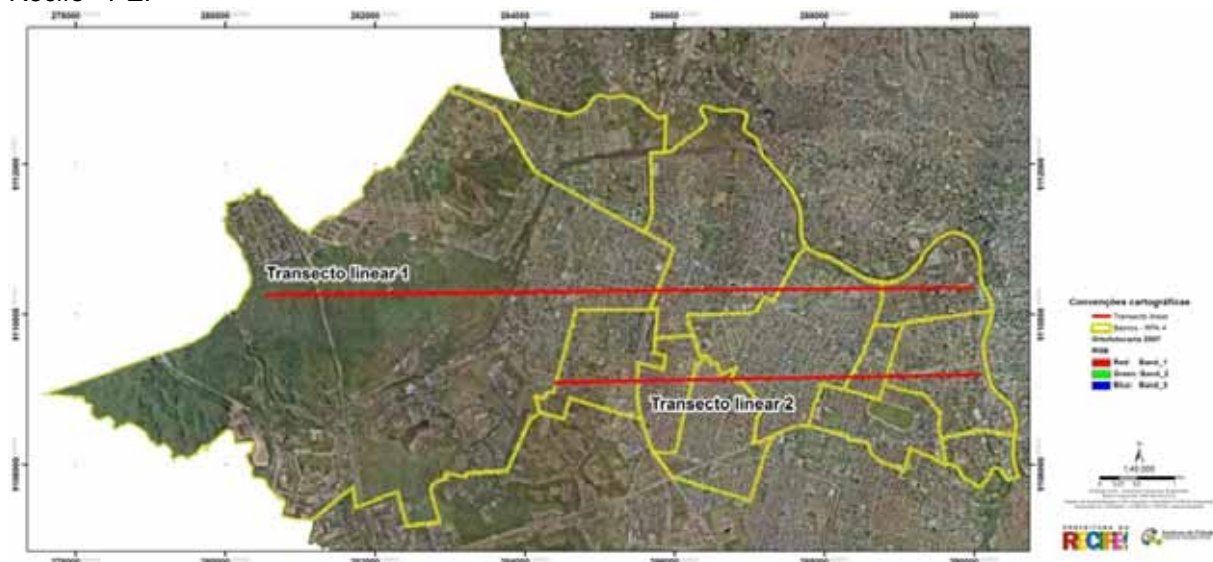
No caso de edifícios, Freitas (2005) contribui afirmando que dependendo da disposição dos mesmos, pode ocorrer um agravamento na retenção de calor devido a menor circulação do vento, impossibilitando uma maior dispersão do calor pelo ar e maior concentração de poluentes. Estas áreas apresentavam grandes manchas com temperaturas da superfície superiores a 25°C na imagem de julho de 2007 e superiores a 27°C na imagem de setembro de 2010.

No canto superior esquerdo da Figura 51, é possível observar o arrefecimento de uma árvore no entorno de uma área com grande quantidade de habitações. Na parte da orla vegetada é possível observar a diminuição na temperatura da superfície.

Para demonstrar a sensibilidade dos índices utilizados nesta pesquisa aos diversos usos e cobertura do solo, foram traçados dois transectos lineares, Figura 53, e criados perfis dos valores de IAF, NDWI e Temperatura da superfície para as imagens dos anos de 1987, 1989, 1991, 2006, 2007 e 2010, Figura 54 a 65. Deste modo é possível observar o papel amenizador desempenhado pela vegetação na

temperatura da superfície assim como a evolução temporal das temperaturas em áreas mais urbanizadas.

**Figura 53.** Representação do Transecto linear para a Região Político-Administrativo 4, município do Recife - PE.



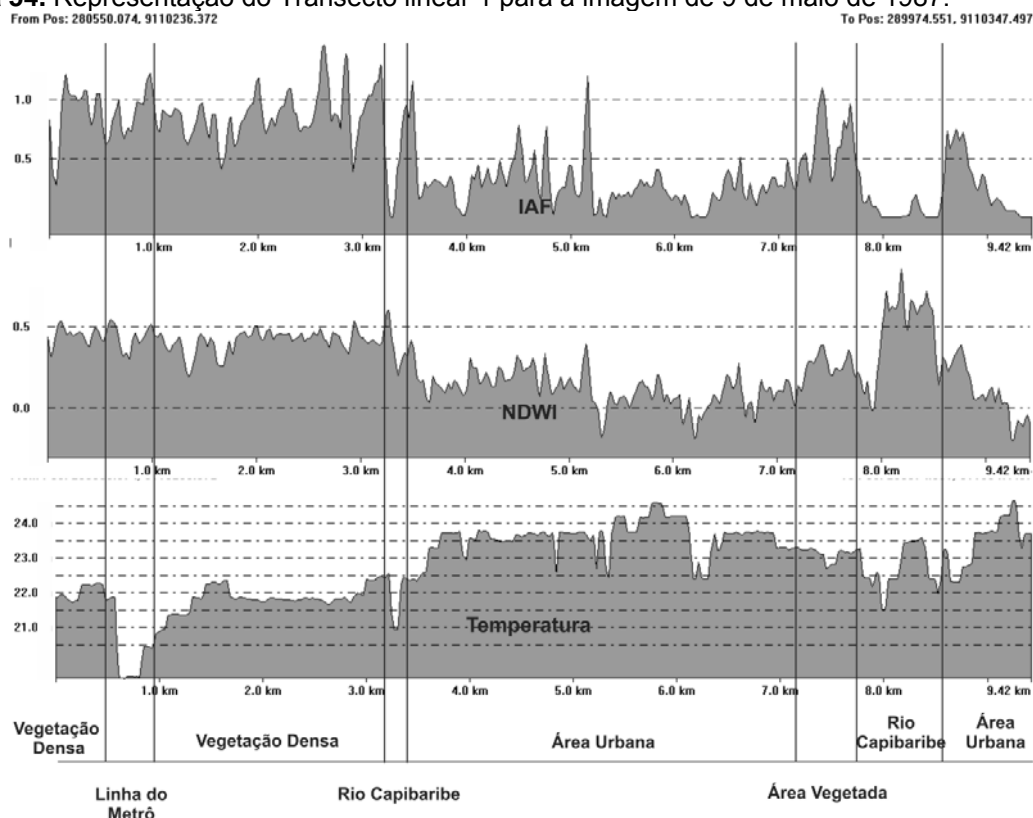
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

As Figuras 54 a 59, com o transecto linear 1, engloba as áreas que compreendem os bairros da Várzea ao bairro da Torre. Já as Figuras 60 a 65 demonstram os valores obtidos no transecto linear 2, cruzando os bairros da Cidade Universitária ao bairro da Madalena.

A exemplo da Figura 54, com o transecto do IAF, NDWI e Temperatura da superfície do ano de 1987, nota-se a diferença nos valores dos índices em relação aos diferentes tipos de usos e quantidade de vegetação. As áreas com predominância de uso urbano, com alta densidade construtiva, apresentam altos valores de temperatura da superfície e valores de umidade e IAF mais baixos.

Já em áreas vegetadas, como na mata da Várzea, é perceptível a amenização da temperatura da superfície causada pela maior absorção da radiação solar por parte da vegetação. O NDWI e o IAF apresentam valores mais elevados evidenciando uma maior densidade da vegetação, quando comparada com outras áreas verdes da cidade.

**Figura 54.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 9 de maio de 1987.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

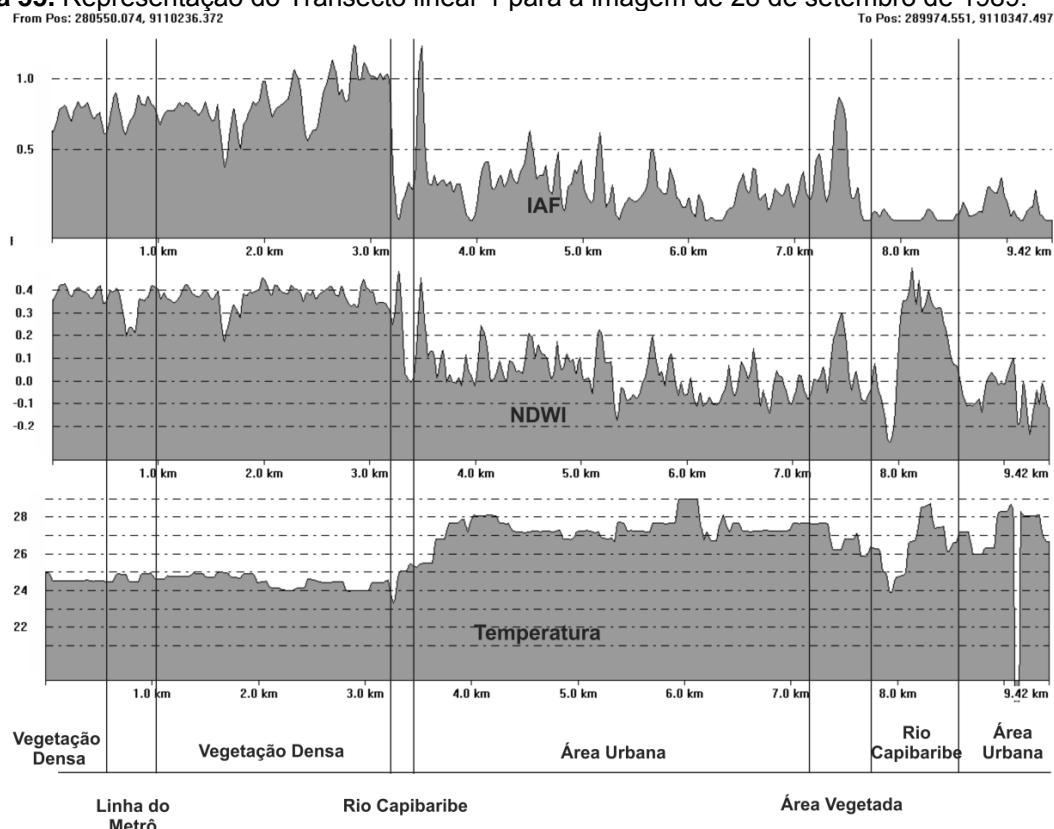
Quando observado os demais transectos, Figuras 55 a 59, nota-se que nas áreas urbanas alguns picos de IAF mais elevados (picos próximos a 0,5 e superiores a 0,7) e NDWI (superiores a 0,30) vão diminuindo espaço-temporalmente entre as imagens dos anos de 1989 e 2010 apresentando suavização nos anos de 2006, 2007 e 2010, o que se caracteriza pela diminuição da cobertura vegetal.

Para a temperatura da superfície é observado que em 1987 os valores médios de temperatura na área urbana eram de 24°C e com o passar dos anos estes valores foram aumentando devido ao aumento na impermeabilização nos bairros da Várzea, Iputinga e Cordeiro. A diferença de temperatura entre áreas vegetadas e as áreas mais urbanizadas foram aumentando consideravelmente entre os anos estudados.

Os valores de NDWI também foram diminuindo consideravelmente na área urbana, com predominância de valores inferiores a 0. Já na área vegetada correspondente ao bairro da Várzea os valores se tornaram mais homogêneos com o passar dos anos através das imagens utilizadas. Visualizando o transecto entre 4 e 5 km nota-se a algumas áreas com picos de IAF e NDWI correspondentes a área vegetada de um corpo hídrico.

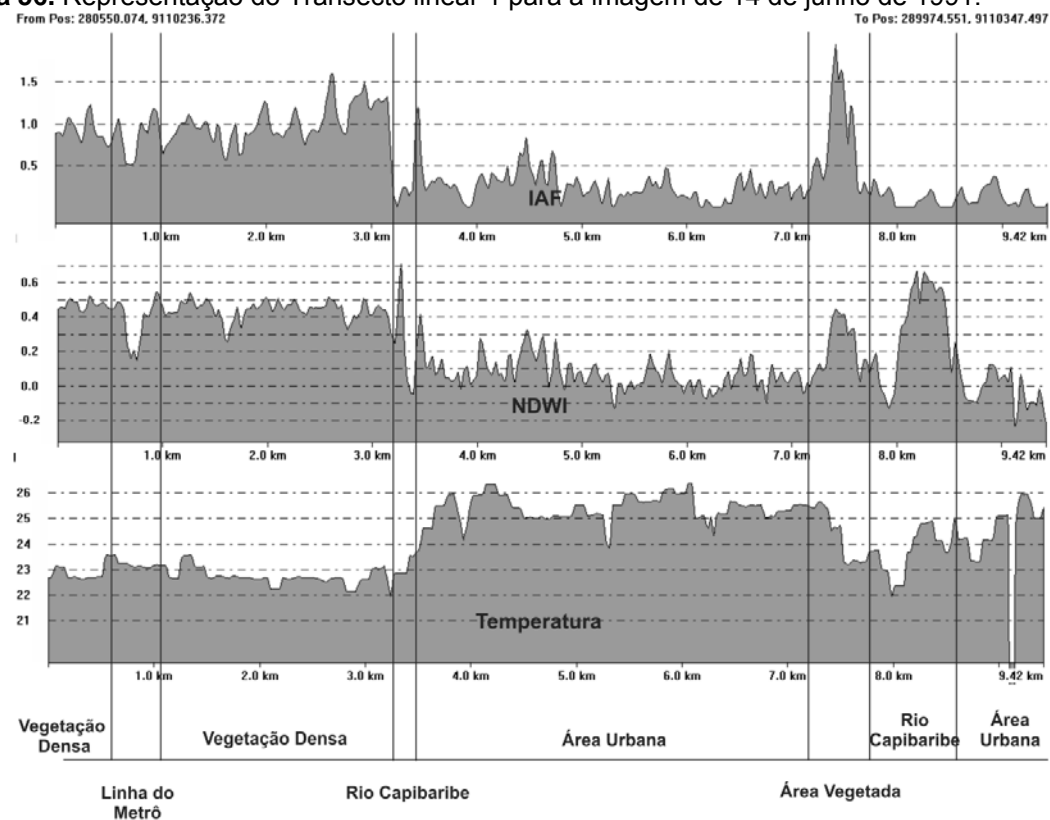


**Figura 55.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 28 de setembro de 1989.



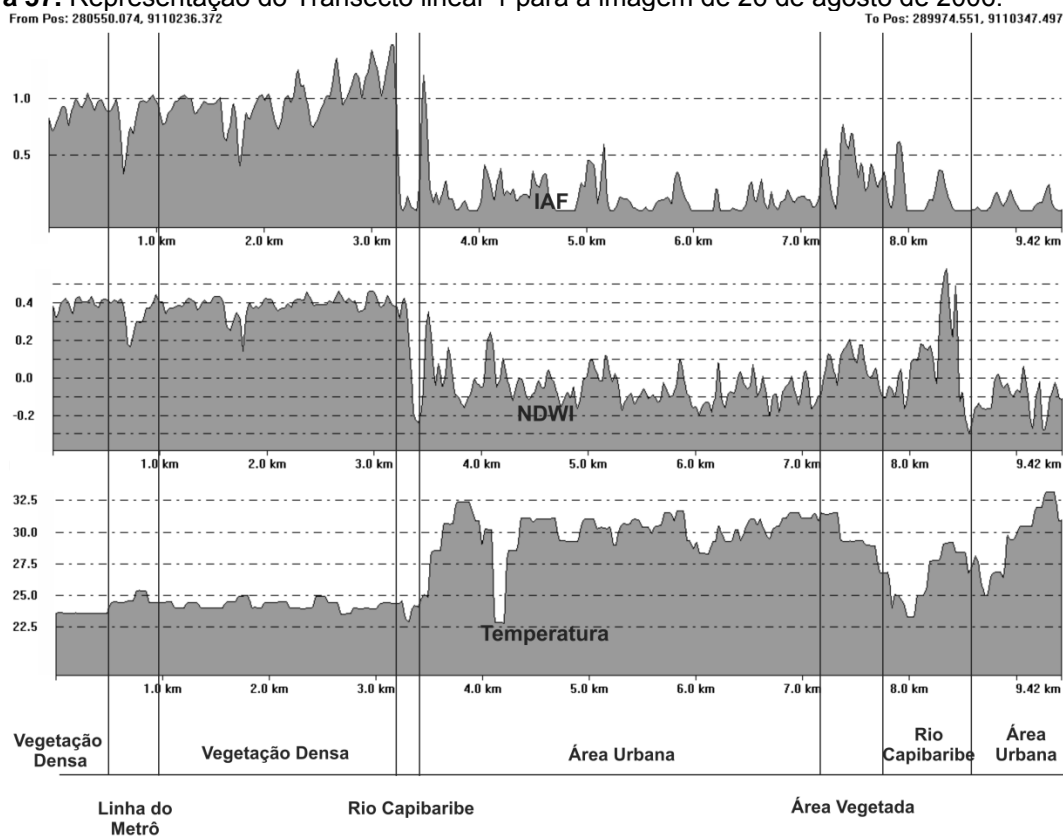
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 56.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 14 de junho de 1991.



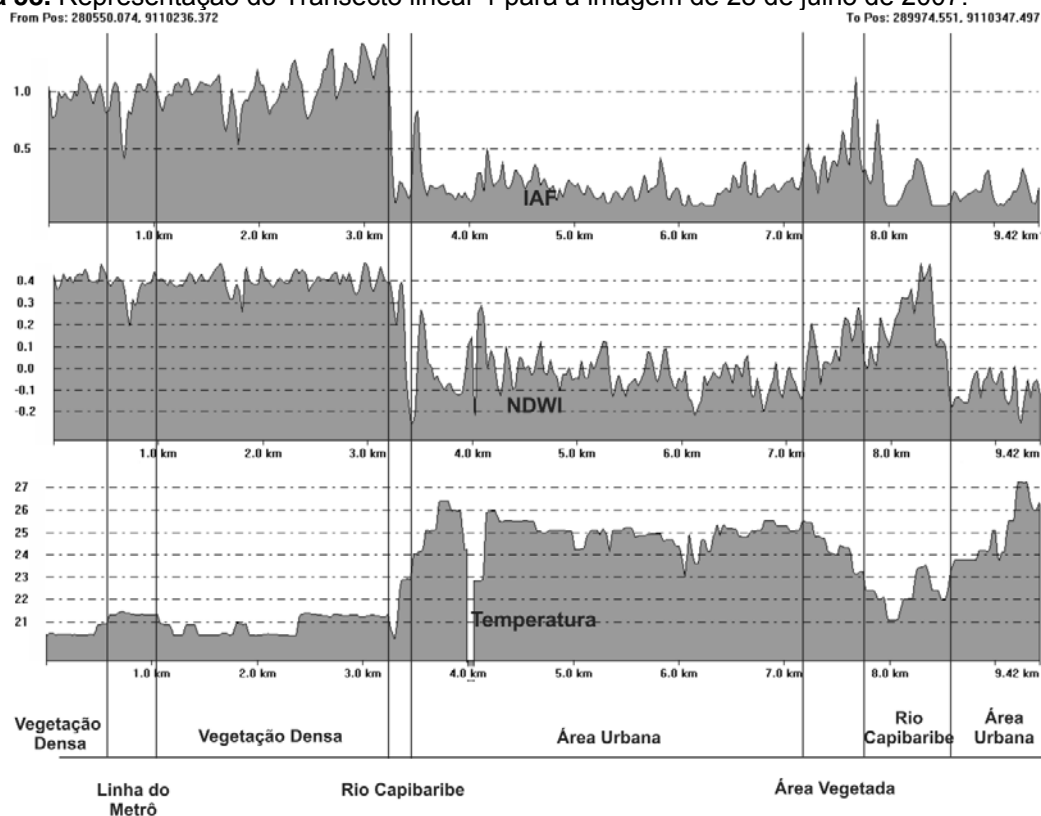
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 57.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 26 de agosto de 2006.



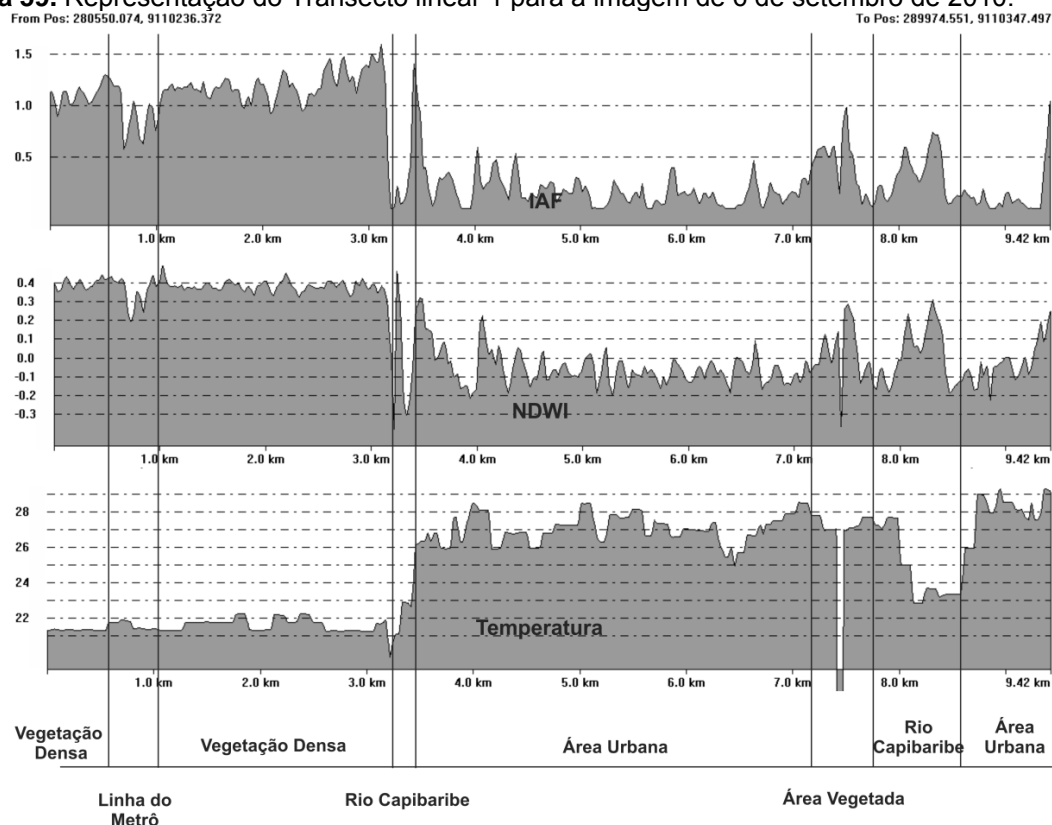
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 58.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 28 de julho de 2007.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 59.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 6 de setembro de 2010.



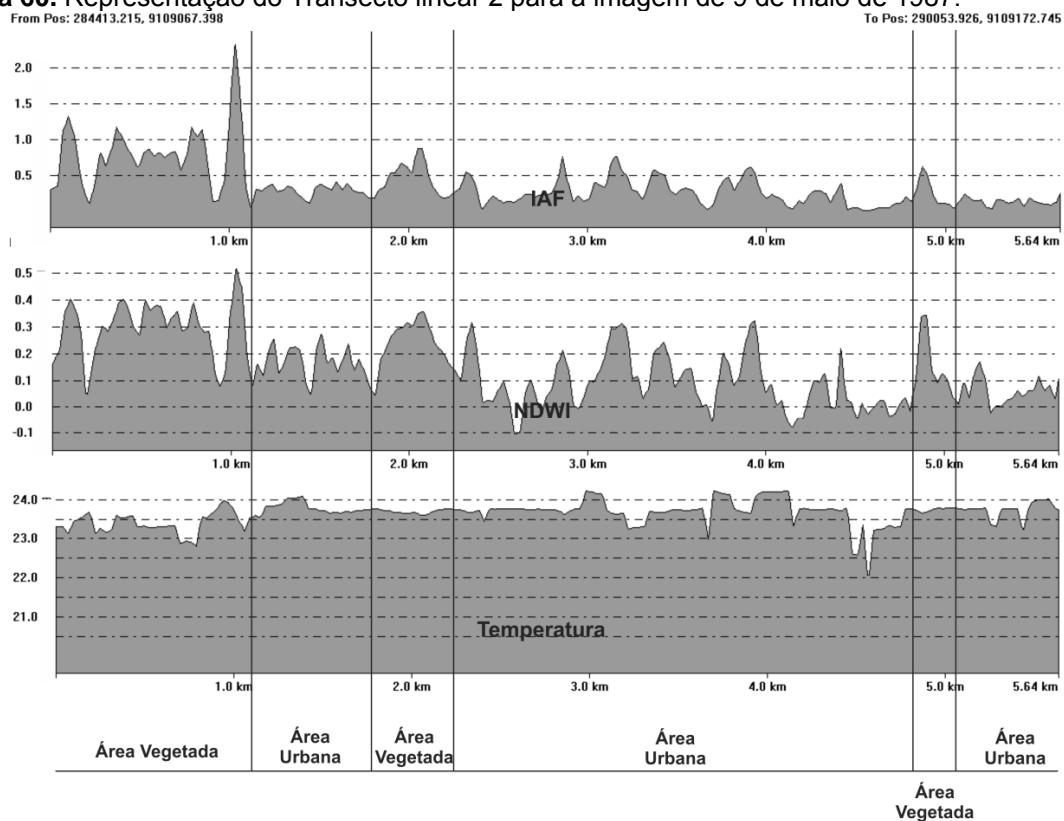
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Já o transecto linear 2 está sobreposto sobre uma área mais urbanizada. Deste modo é possível observar que o bairro da Cidade Universitária, por apresentar o campus da UFPE com uma grande distribuição espacial dos centros e amplas áreas verdes, apresenta valores de temperatura mais baixos e IAF e NDWI mais elevadas. A partir do ano de 2006 é possível observar alguns picos mais baixos de NDWI e IAF devido à reforma e construção de novos centros.

Para a área urbana é observada uma acentuada diminuição nos valores de IAF, onde para o perfil da imagem de 1987 era possível observar uma predominância de valores próximo a 0,700. Já para os perfis de 1989 e 1991 os valores de IAF ficavam em torno de 0,300, e para as demais cenas 0,250, com picos mais elevados em algumas áreas devido à presença de vegetação.

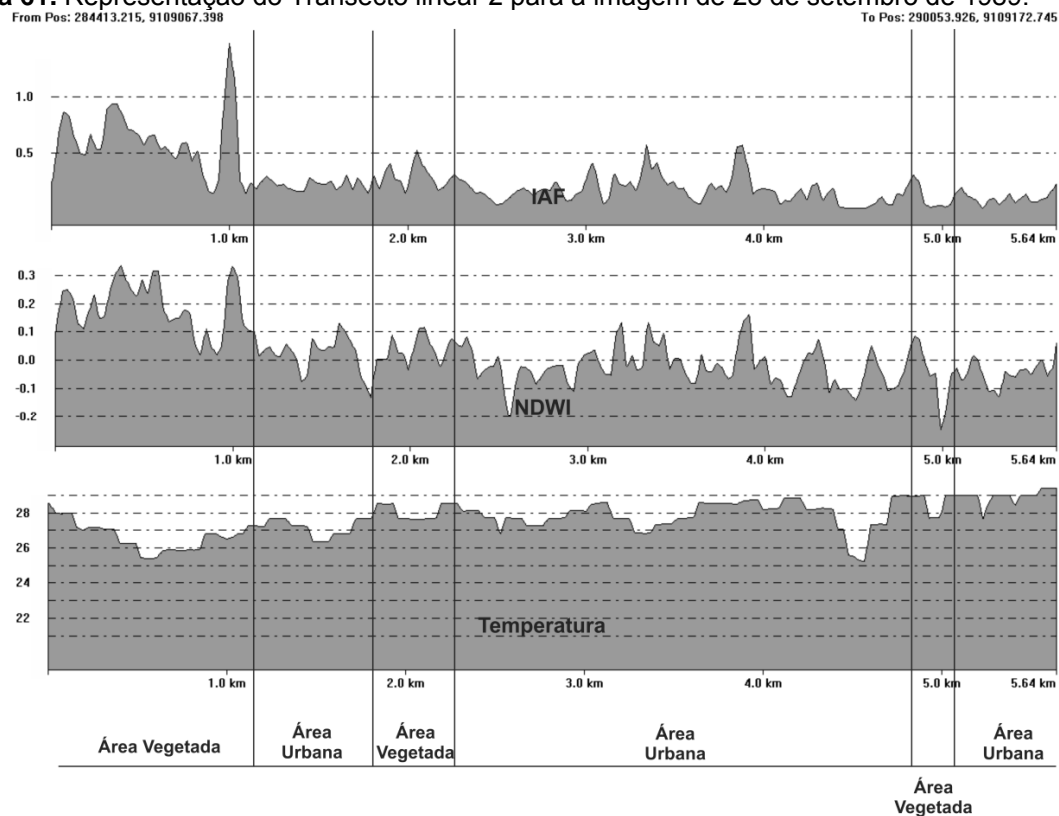
O índice de umidade apresentou a mesma configuração, com valores extremamente baixos, onde a partir de 1989 é possível observar grandes extensões com valores de umidade inferiores a 0. Como consequência estas áreas apresentam temperaturas bem mais elevadas, com variação de 2 a 5°C quando comparadas as áreas mais vegetadas.

**Figura 60.** Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 9 de maio de 1987.



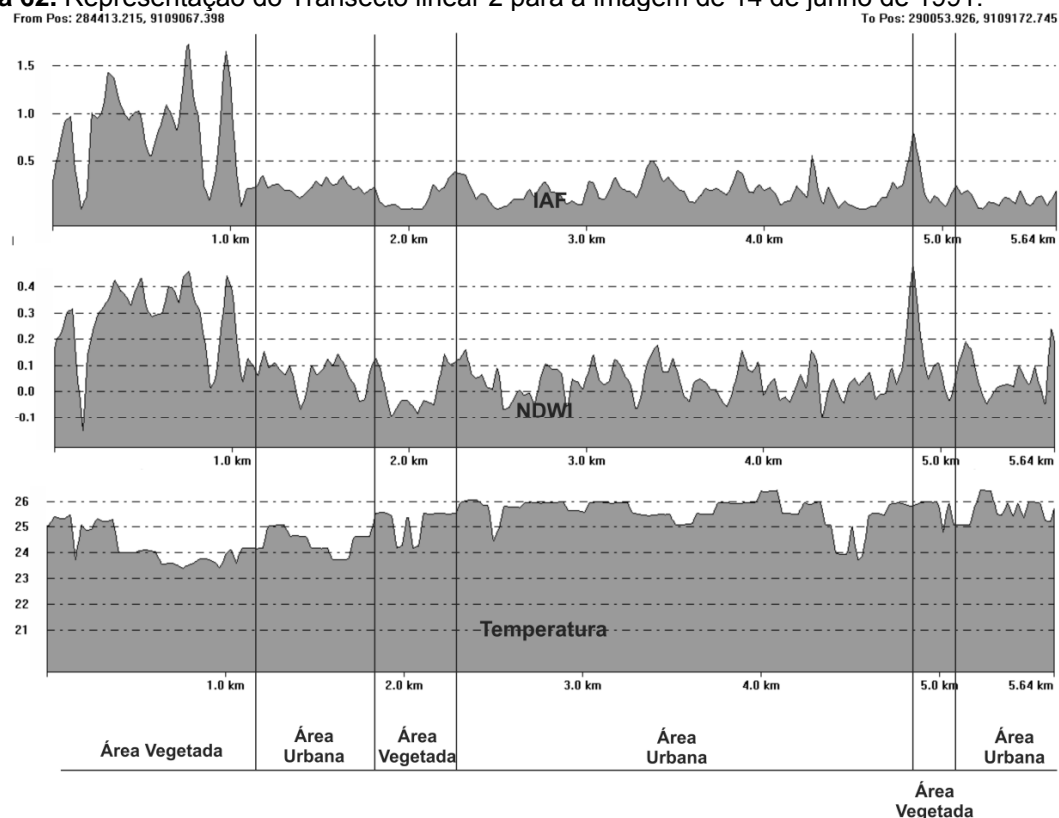
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 61.** Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 28 de setembro de 1989.



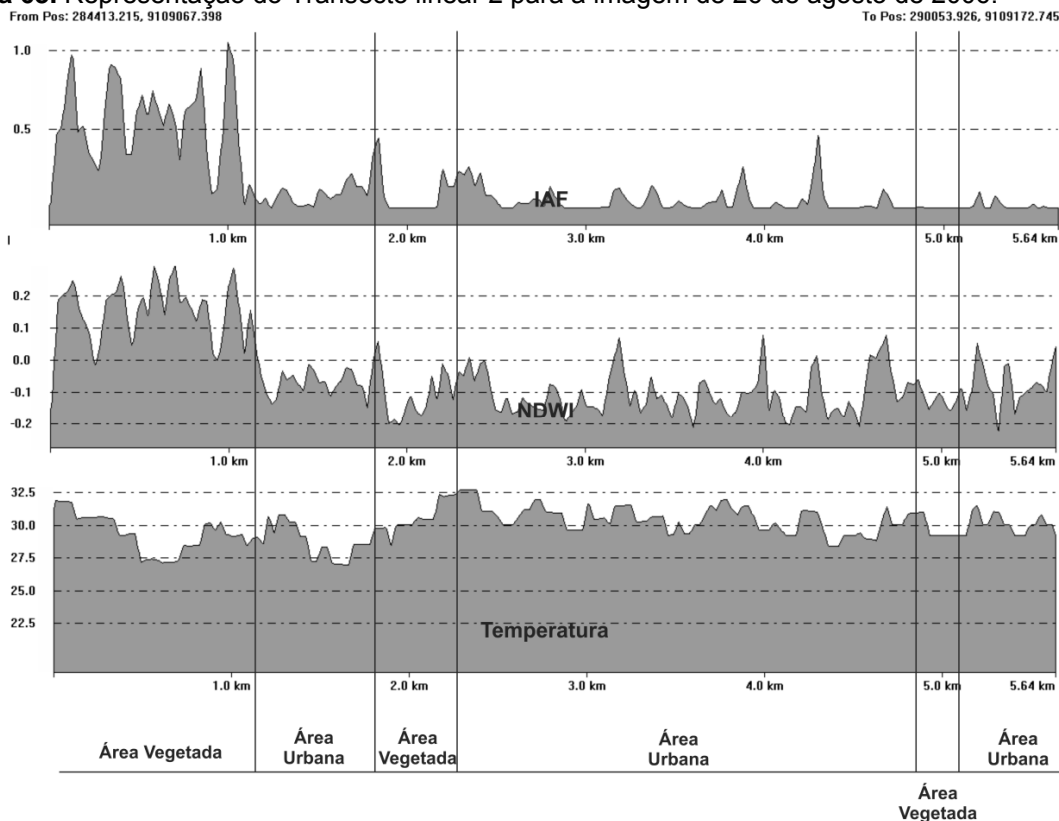
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 62.** Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 14 de junho de 1991.



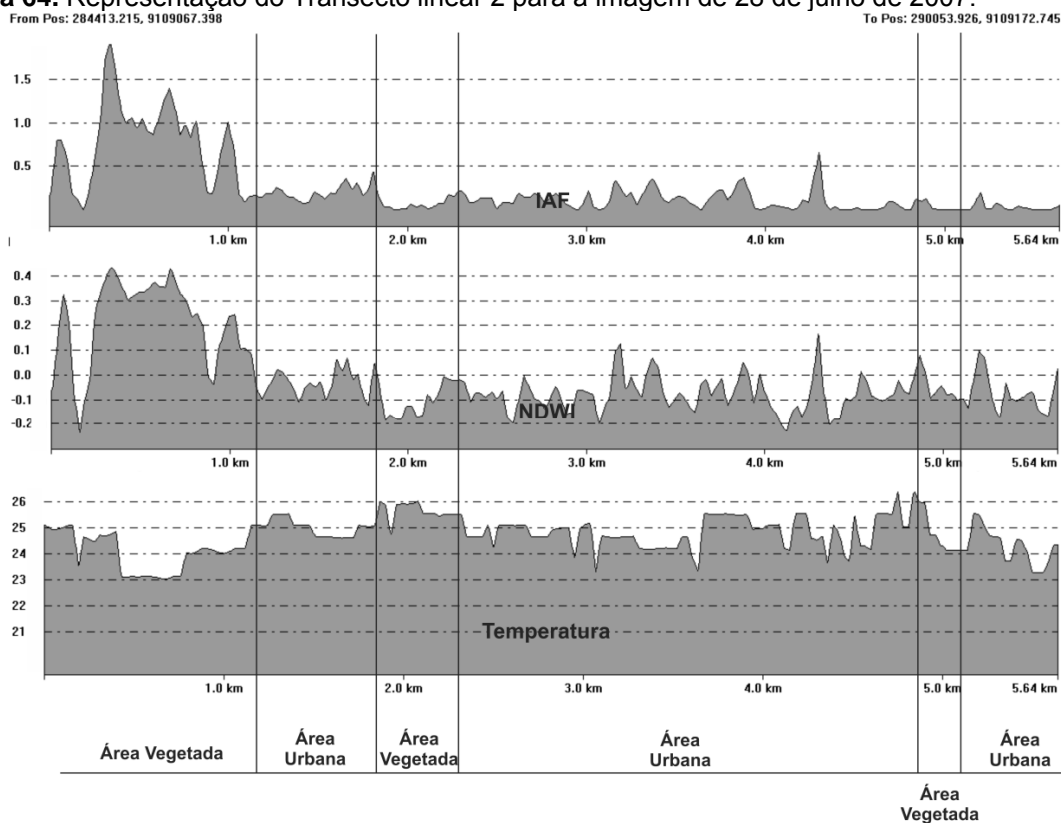
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 63.** Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 26 de agosto de 2006.



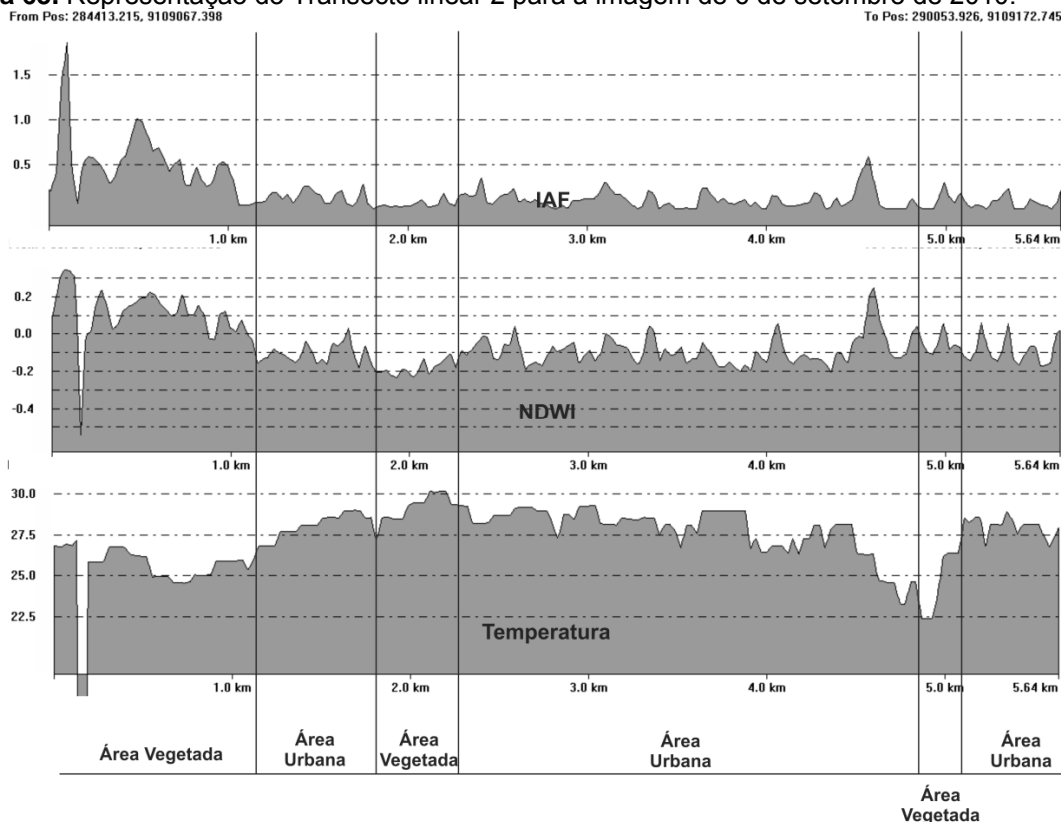
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 64.** Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 28 de julho de 2007.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 65.** Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 6 de setembro de 2010.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Diversos estudos (SIMPSON e MCPHERSON, 1998; THOMPSON, 2002; ROSSA et al., 2005; SHAMS et al., 2009; MOREIRA, 2010) têm comprovado a eficiência da utilização de pavimentos frescos e vegetação na redução da temperatura da superfície e absorção de poluentes atmosféricos em diversas partes do mundo. A utilização de recursos como jardins verticais e cobertura vegetal em telhados, por exemplo, tem reduzido parte dos impactos provocados pela utilização de certos materiais na temperatura da superfície.

Dentre estes pode ser destacado estudo realizado por Rossa et al. (2005), na Região Metropolitana de West Midlands – Reino Unido, que através de um Modelo de Química Atmosférica conseguiu comprovar a eficiência da vegetação no aumento da qualidade do ar e indicou as espécies que apresentava potencial para a formação de ozônio ( $O_3$ ), o que em excesso vem a provocar doenças respiratórias e o fenômeno conhecido como SMOG.



#### 4.4. Saldo de Radiação, Balanço de Energia e Evapotranspiração (ET)

Através da Figura 66 é possível observar a evolução espaço-temporal do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) ao longo dos anos estudados. Nota-se a diferença na distribuição das classes de  $R_n$  nas imagens do mês de maio de 1987 e junho de 1991 quando comparada as demais imagens. Este fato pode ser explicado devido à declinação solar, que faz com que a região estudada receba uma menor quantidade de radiação solar neste período.

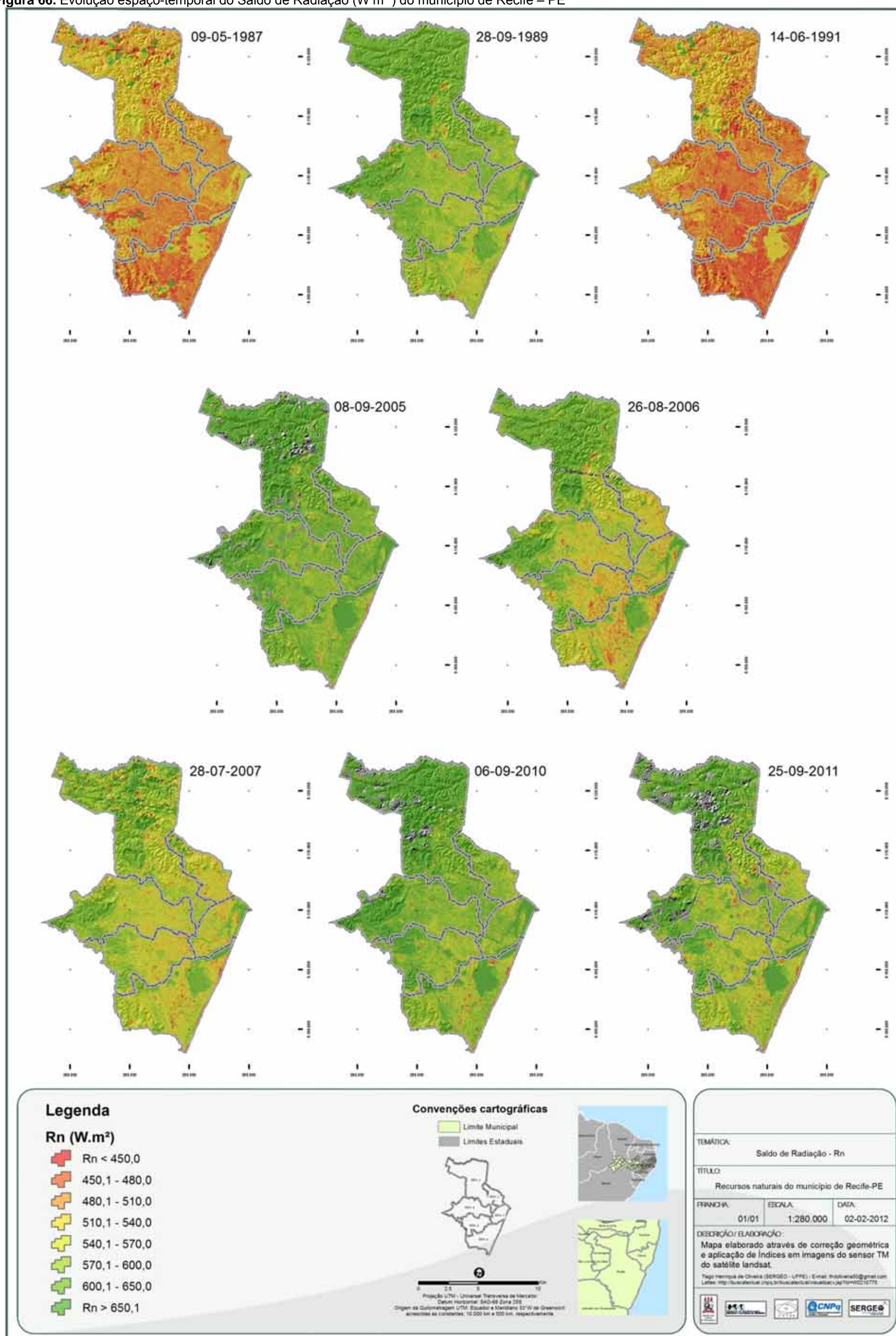
Deste modo para as imagens de 09 de maio de 1987 e 14 de junho de 1991 foram estimados valores de  $R_n$  que variaram entre valores inferiores a  $450,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $600,0 \text{ W m}^{-2}$ . Já as demais imagens demonstraram uma variação de  $R_n$  entre valores inferiores a  $450,0 \text{ W m}^{-2}$  e superiores a  $650,0 \text{ W m}^{-2}$ . As áreas vegetadas e os corpos hídricos apresentaram os maiores valores de  $R_n$  para todas as imagens.

Para as imagens de 1987 e 1991 estes alvos apresentaram valores de  $R_n$  variando entre  $510,0$  e  $600,0 \text{ W m}^{-2}$ . Já as demais imagens apresentam uma variação de valores bem maiores, com valores superiores a  $570,0 \text{ W m}^{-2}$ . Para ambos os períodos, os corpos hídricos e os grandes maciços vegetais sempre apresentaram os maiores valores de  $R_n$ , se destacando visualmente dos demais alvos distribuídos pelo município do Recife (valores de  $540,0$  a  $600,0 \text{ W m}^{-2}$  nas imagens de 1987 e 1991 e valores superiores a  $650,0 \text{ W m}^{-2}$  para as demais).

Giongo (2008) afirma que quando se comparam as cartas de  $R_n$  com outros índices, como o Albedo da superfície por exemplo, é possível visualizar uma forte ligação do Balanço de onda curta com o Saldo de Radiação. As áreas onde foram estimados os menores valores de Albedo da superfície apresentaram os maiores valores de  $R_n$ . Este resultado também foi observado nesta pesquisa nas áreas vegetadas e nos corpos hídricos distribuídos pelo município.

Já as áreas que apresentaram valores mais elevados de Albedo da superfície, como as áreas de solo exposto e áreas construídas, apresentaram os menores valores de Saldo de Radiação. Através da Figura 67 é possível observar os valores de  $R_n$  para as áreas de solo exposto e para as áreas com cobertura vegetal menos densa em área mais urbanizada no entorno do bairro do Cordeiro.

**Figura 66.** Evolução espaço-temporal do Saldo de Radiação ( $W\ m^{-2}$ ) do município de Recife – PE

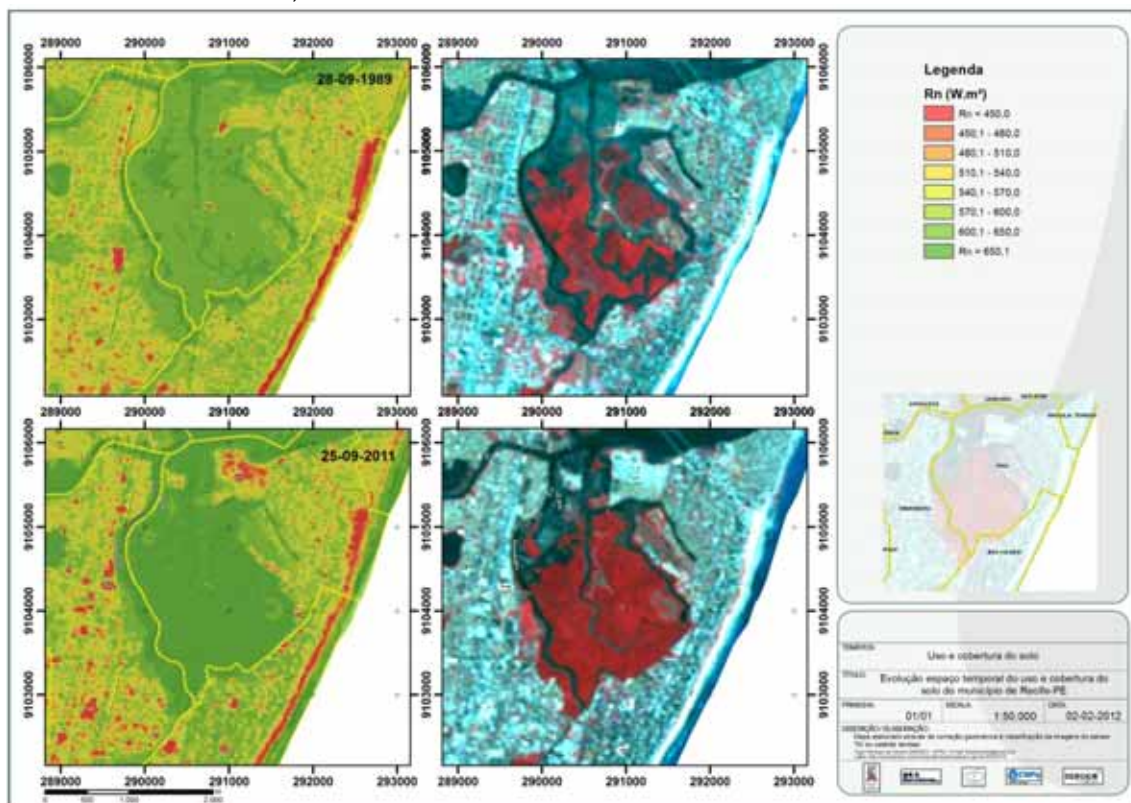


Fonte: Oliveira, T.H (2012)





**Figura 68.** Distribuição dos valores de  $R_n$  ( $W\ m^{-2}$ ) para áreas com alta densidade construtiva no bairro do Pina e Imbiribeira, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Ainda através da Figura 69 é possível observar a mudança ocorrida na área da antiga fábrica da Bacardi onde hoje ocorre a construção do Shopping Riomar Recife. Para a imagem de 1989 é possível observar a predominância de valores de  $R_n$  superiores a  $570,1\ W\ m^{-2}$  devido a grande quantidade de vegetação existente na área. Já após a construção do shopping foram estimados valores de  $R_n$  inferiores a  $450,0\ W\ m^{-2}$  a partir da imagem de setembro de 2010.

Zhou *et al.* (2010), em estudo realizado no período de inverno e verão na Região Metropolitana de Beijing – China, obtiveram os menores valores de  $R_n$  para as áreas urbanas e áreas de solo exposto. Já as áreas vegetadas e os corpos hídricos apresentaram os maiores valores de  $R_n$ . Para o período de verão os mesmo estimaram valores de  $R_n$  de  $616,6\ W\ m^{-2}$ ,  $540,1\ W\ m^{-2}$ ,  $520,2\ W\ m^{-2}$ ,  $575,1\ W\ m^{-2}$  e  $694,2\ W\ m^{-2}$  para os alvos floresta, solo exposto, área urbana densa, área urbana menos densa e água, respectivamente.

Silva *et al.* (2005a) encontraram os maiores valores de  $R_n$  para o Lago de Sobradinho, com  $R_n$  superiores a  $712,2\ W\ m^{-2}$  enquanto que os menores valores de  $R_n$  foram estimados para as áreas de solo exposto, com valores de  $458,1\ W\ m^{-2}$  em

estudo realizado na áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho e parte da área urbana dos municípios de Petrolina – PE e Juazeiro - BA. Para a área urbana foram observados valores de  $R_n$  inferiores a  $498,6 \text{ W m}^{-2}$ .

Novas (2008), em pesquisa realizada na bacia do rio Pratygy no município de Maceió - AL, estimaram valores de  $R_n$  inferiores a  $540,0 \text{ W m}^{-2}$  para a área urbana e para as áreas de vegetação densa e corpos hídricos os valores mais elevados. As áreas com vegetação menos densa apresentaram valores de  $540 \text{ W m}^{-2}$  para a região. Deste modo, os valores obtidos nesta pesquisa corroboram com os resultados obtidos em varias estudos, estando concordante com a literatura atual.

Através da Tabela 10 e possível observar os valores estatísticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) para as imagens estudadas. Deste modo é possível observar a variação entre os valores mínimo, máximo e médio. Já o desvio padrão apresentou valores superiores a  $50 \text{ W m}^{-2}$  para as imagens dos anos de 2005, 2006, 2010 e 2011, o que vem a demonstrar uma maior diferença entre as classes de valores que compreendem as áreas vegetadas e as áreas construídas.

**Tabela 10.** Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, média, e desvio padrão obtidos na análise estatística do Saldo de Radiação ( $\text{W m}^{-2}$ ) no município do Recife, para as datas estudadas.

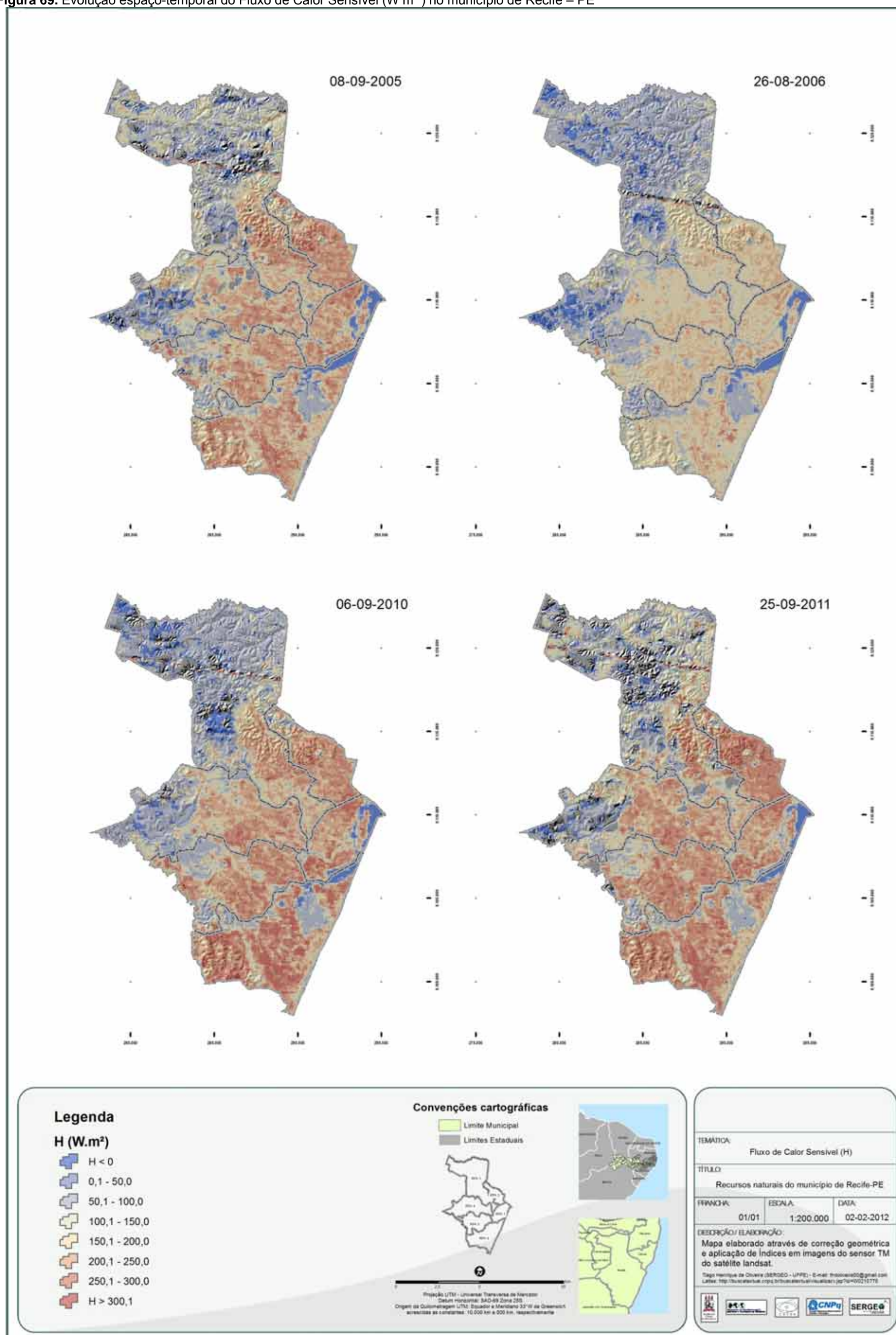
Saldo de Radiação	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
<b>09-05-1987</b>	240,4	595,2	500,8	33,1
<b>28-09-1989</b>	227,3	754,7	601,6	38,1
<b>14-06-1991</b>	248,0	586,8	490,0	33,5
<b>08-09-2005</b>	149,6	872,6	632,9	50,3
<b>26-08-2006</b>	89,4	786,8	582,9	57,2
<b>28-07-2007</b>	279,9	696,6	567,9	39,4
<b>06-09-2010</b>	22,0	847,4	628,7	57,5
<b>25-09-2011</b>	130,4	898,8	606,6	57,0

Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Devido à falta de alguns dados, obtidos através da PCD Recife e necessários ao cômputo do balanço de energia, apenas as imagens de 08 de setembro de 2005, 26 de agosto de 2006, 06 de setembro de 2010 e 25 de setembro de 2011 foram utilizadas para realizar a obtenção dos componentes do balanço de energia. Deste modo, através da Figura 69 é possível visualizar as cartas de Fluxo de Calor Sensível (H), sendo calculada em função do gradiente de temperatura entre dois níveis de referência e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor.



**Figura 69.** Evolução espaço-temporal do Fluxo de Calor Sensível ( $W\ m^{-2}$ ) no município de Recife – PE



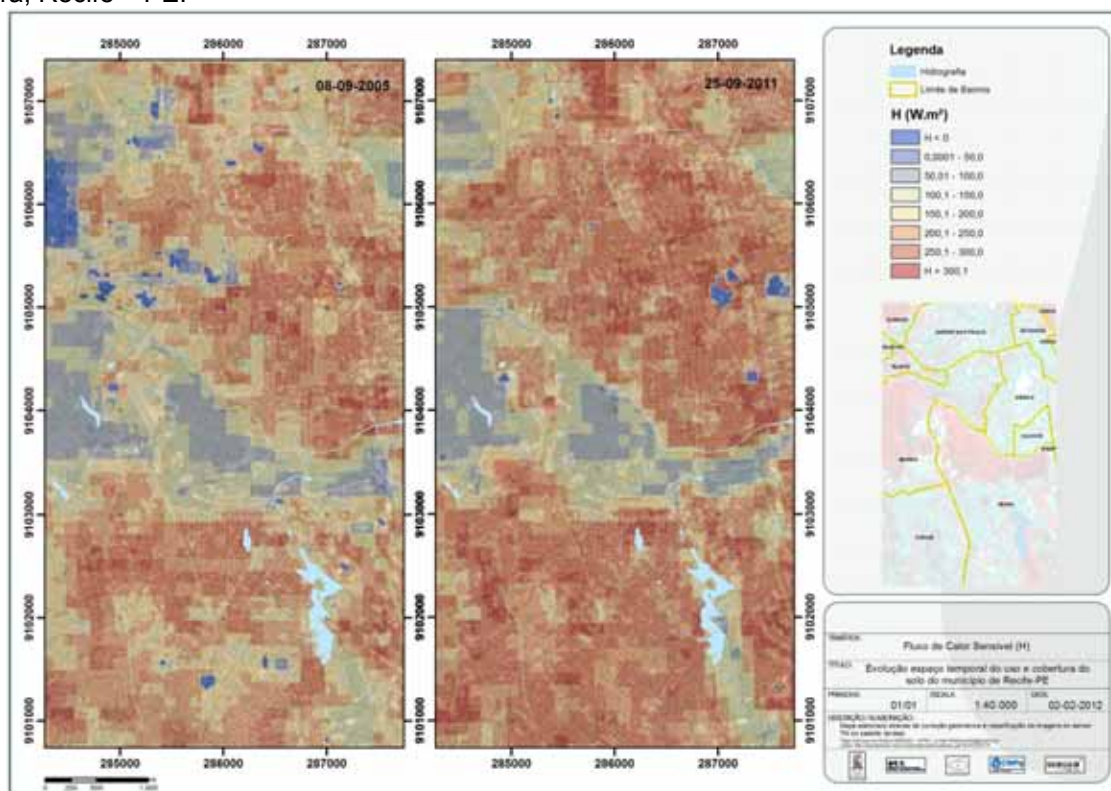
Fonte: Oliveira, T.H (2012)



Nota-se como os corpos hídricos apresentam valores de  $H$  inferiores a  $0 \text{ W.m}^{-2}$ . Silva e Bezerra (2006) afirmam que estas áreas, assim como as áreas que apresentam temperatura da superfície inferior à temperatura estimada e utilizada como pixel âncora, apresentam-se destacadas nesta classe.

As áreas vegetadas apresentam valores de  $H$  variando entre 0, 1 e  $150,0 \text{ W m}^{-2}$ . A densidade da vegetação definirá a distinção das classes, sendo possível observar que as áreas que apresenta contato direto com áreas antropizada e as áreas com gramíneas estão classificadas com valores entre 100 e  $150 \text{ W m}^{-2}$ . Já os grandes fragmentos florestais, que apresentaram valores de IVDN e EVI superiores a 0,70 e 0,60, respectivamente, assim como as áreas mais interna de fragmentos menores, apresentam valores de  $H$  inferiores a  $100 \text{ W m}^{-2}$  (Figura 70).

**Figura 70.** Distribuição do Fluxo de Calor Sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) em fragmentos florestais no bairro do Ibura, Recife – PE.



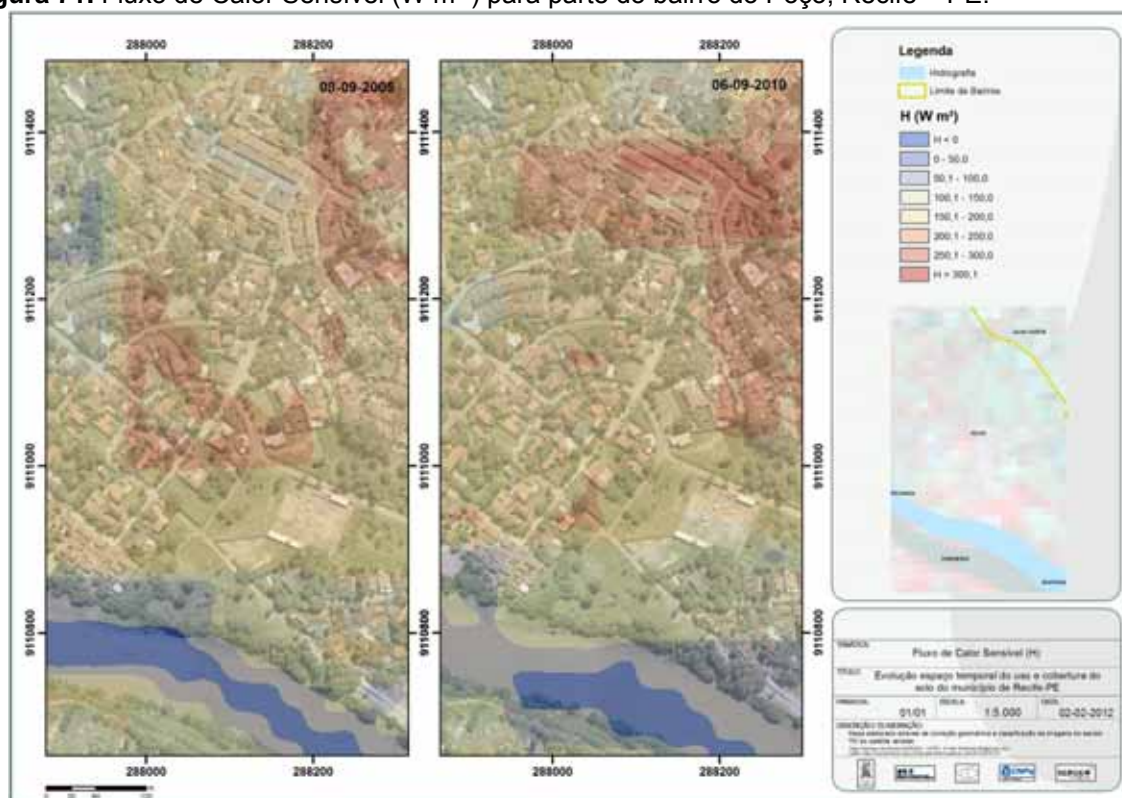
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Estudo realizado por Bezerra (2006) em área semiárida dos municípios de Barbalha, Crato e Juazeiro do Norte – CE, assim como por Gomes (2009), em área compreendida na bacia hidrográfica de Mogi-Guaçu em São Paulo, estimaram valores de  $H$  para áreas vegetadas compreendidos entre 0 e  $60,0 \text{ W m}^{-2}$  em áreas com vegetação densa e 0 a  $150,0 \text{ W m}^{-2}$  para as áreas vegetadas, respectivamente.

Também foi observado que os demais tipos de uso no município do Recife apresentaram valores de  $H$  superiores a  $150 \text{ W m}^{-2}$ . As áreas vegetadas inseridas em áreas mais adensada apresentaram valores de  $H$  variando entre  $150,0$  e  $250,0 \text{ W m}^{-2}$  (Figura 71). Nota-se como o modelo responde bem as mudanças de predominância de alho. As demais áreas (com  $H$  superiores a  $250,0 \text{ W m}^{-2}$ ) são caracterizadas como áreas que apresentam pouca ou quase nenhuma vegetação, podendo ser observadas através da Figura 72.

É possível observar que as áreas de estacionamento que continha vegetação distribuída espacialmente apresentaram valores de  $H$  variando entre  $50,0$  e  $150,0 \text{ W m}^{-2}$ . Os galpões localizados no bairro do Recife, com pouca ou quase nenhuma vegetação em seu entorno demonstraram valores de  $H$  bem mais elevados quando comparados a outros que possuíam gramíneas ou indivíduos arbóreos em seu entorno, com variação de valores de até  $100,0 \text{ W m}^{-2}$ .

**Figura 71.** Fluxo de Calor Sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) para parte do bairro do Poço, Recife – PE.



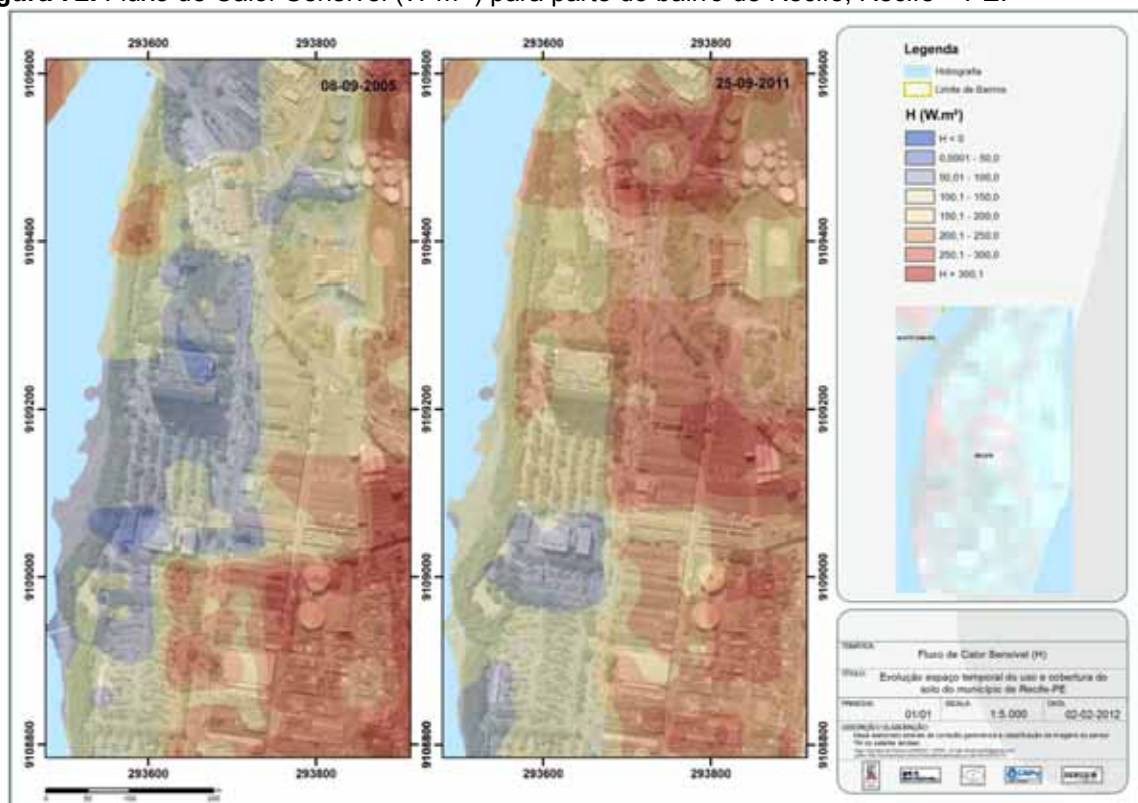
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Do mesmo modo Gomes (2009) encontrou valores de  $H$  superiores a  $300,0 \text{ W.m}^{-2}$  para as áreas com pouca ou quase nenhuma vegetação. Meireles (2007), em estudo realizado na bacia hidrográfica do Acaraú – Ceará, estimou valores de  $H$

superiores a  $350,0 \text{ W m}^{-2}$  em áreas que apresentavam pouca vegetação, assim como valores inferiores a  $60,0 \text{ W m}^{-2}$  em corpos hídricos.

Amanajás *et al.* (2012), em estudo realizado no município de Teresina – PI, através da aplicação do modelo S-SEBI em imagem TM Landsat, estimou valores de H inferiores a  $130,0 \text{ W m}^{-2}$  para as áreas vegetadas do município e valores variando entre  $130,0$  e  $200,0 \text{ W m}^{-2}$  para áreas que apresentavam quantidade de vegetação intermediária e superiores a  $200,0 \text{ W m}^{-2}$  para a área urbana. Deste modo estes estudos vêm a corroborar com os resultados obtidos nesta pesquisa.

**Figura 72.** Fluxo de Calor Sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) para parte do bairro de Recife, Recife – PE.

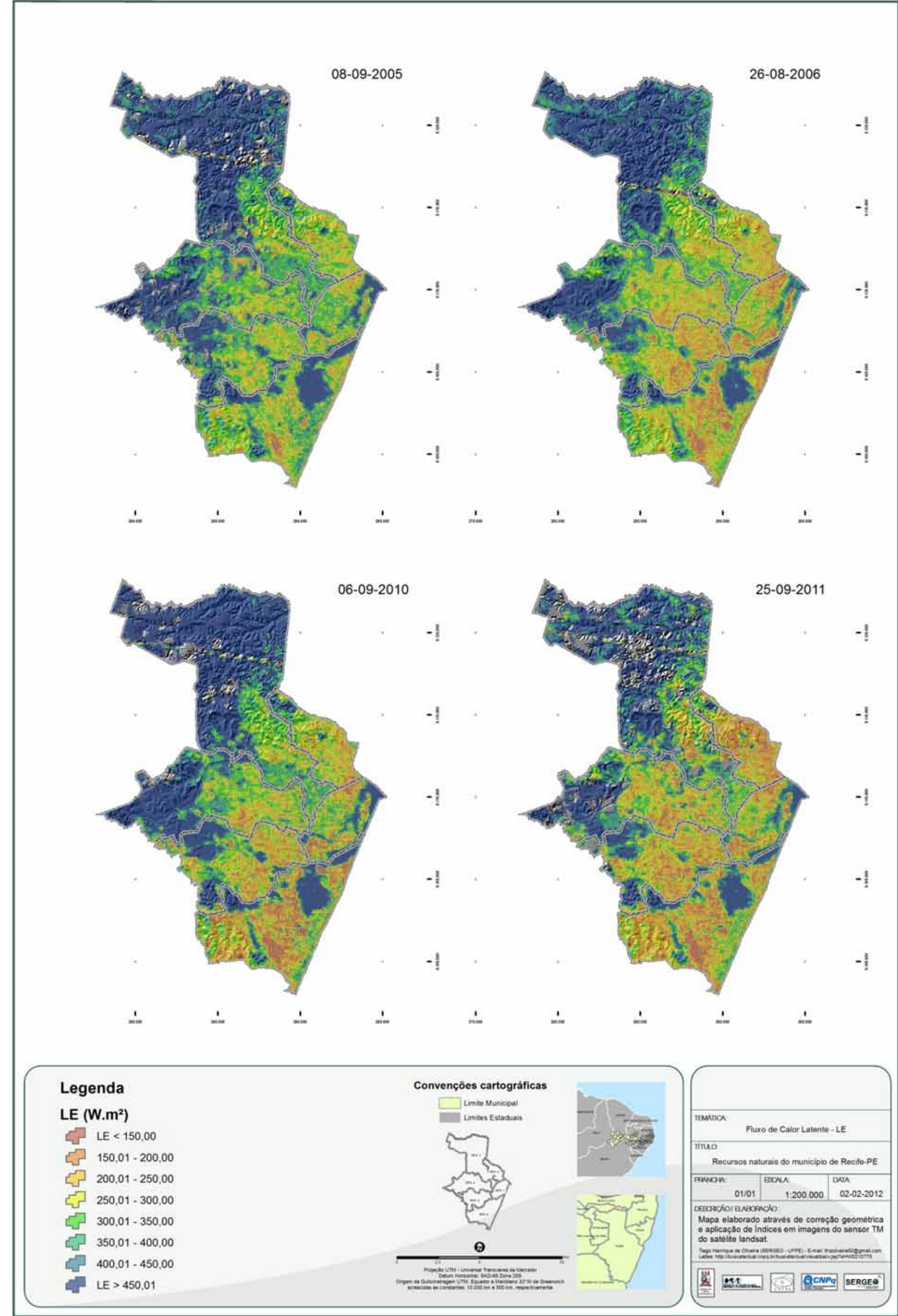


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Para a carta de Fluxo de calor latente (LE), Figura 73, é possível observar que os grandes fragmentos florestais, assim como os corpos hídricos, apresentaram valores de LE superiores a  $450,0 \text{ W m}^{-2}$ . Os valores de Fluxo de calor latente representam a fração de energia do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) que é empregada na evaporação das superfícies e na transpiração dos seres vivos. Deste modo sua obtenção, para a metodologia adotada, é realizada como sendo o termo residual do balanço de energia. A variabilidade espacial dos fluxos de energia vai estar diretamente ligada à estrutura do dossel ou tecido urbano.



Figura 73. Evolução espaço-temporal do Fluxo de Calor Latente ( $Wm^{-2}$ ) do município de Recife – PE

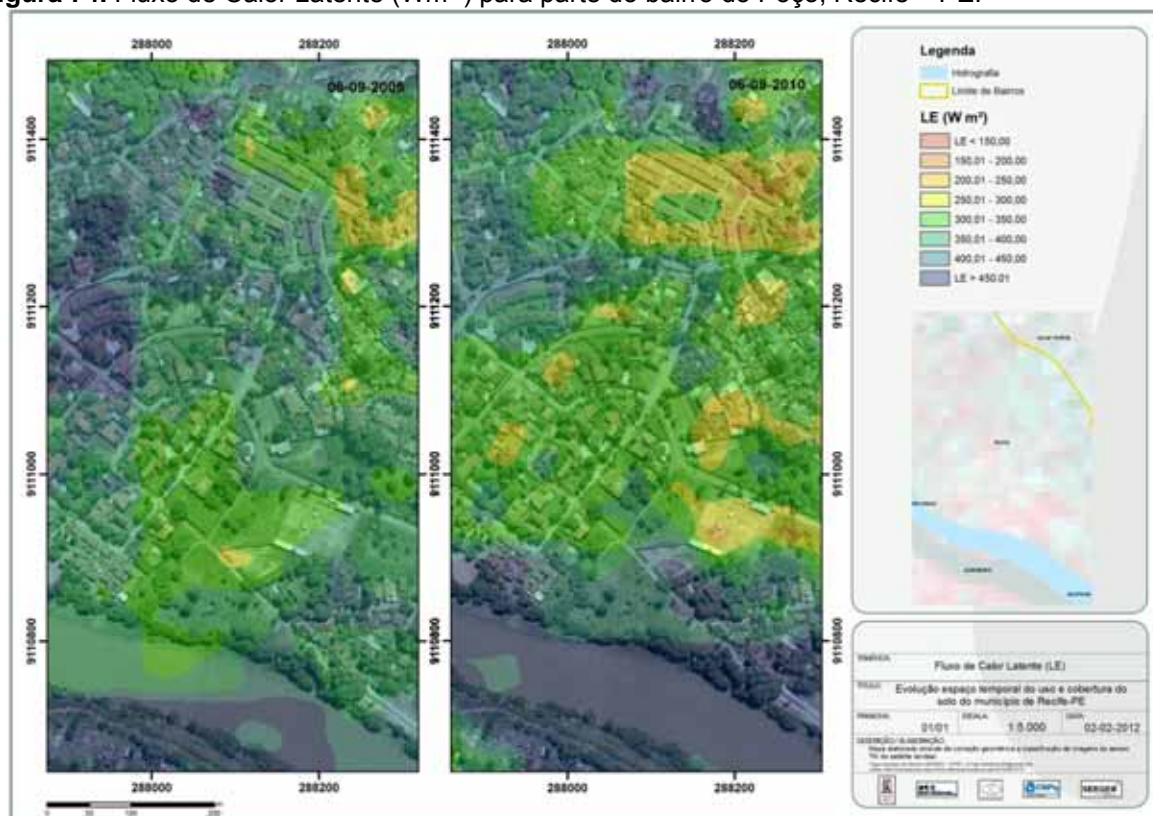


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Diversos fatores, como a razão da área construída, altura e disposição dos edifícios, a largura e a orientação das ruas, condicionam os valores dos parâmetros aerodinâmicos da superfície (LAGOUARDE *et al.*, 2006). Nota-se como a carta de Fluxo de calor latente (LE) também apresentou uma grande sensibilidade aos diferentes padrões de uso e construções observados em ambiente urbano.

Através da Figura 74, é possível observar que as áreas que apresentavam certa quantidade de vegetação conseguiram apresentar valores mais altos de LE. As áreas que continha pouca vegetação distribuída espacialmente apresentaram valores de LE variando entre 150,0 e 300,0  $W m^{-2}$ .

**Figura 74.** Fluxo de Calor Latente ( $Wm^{-2}$ ) para parte do bairro do Poço, Recife – PE.



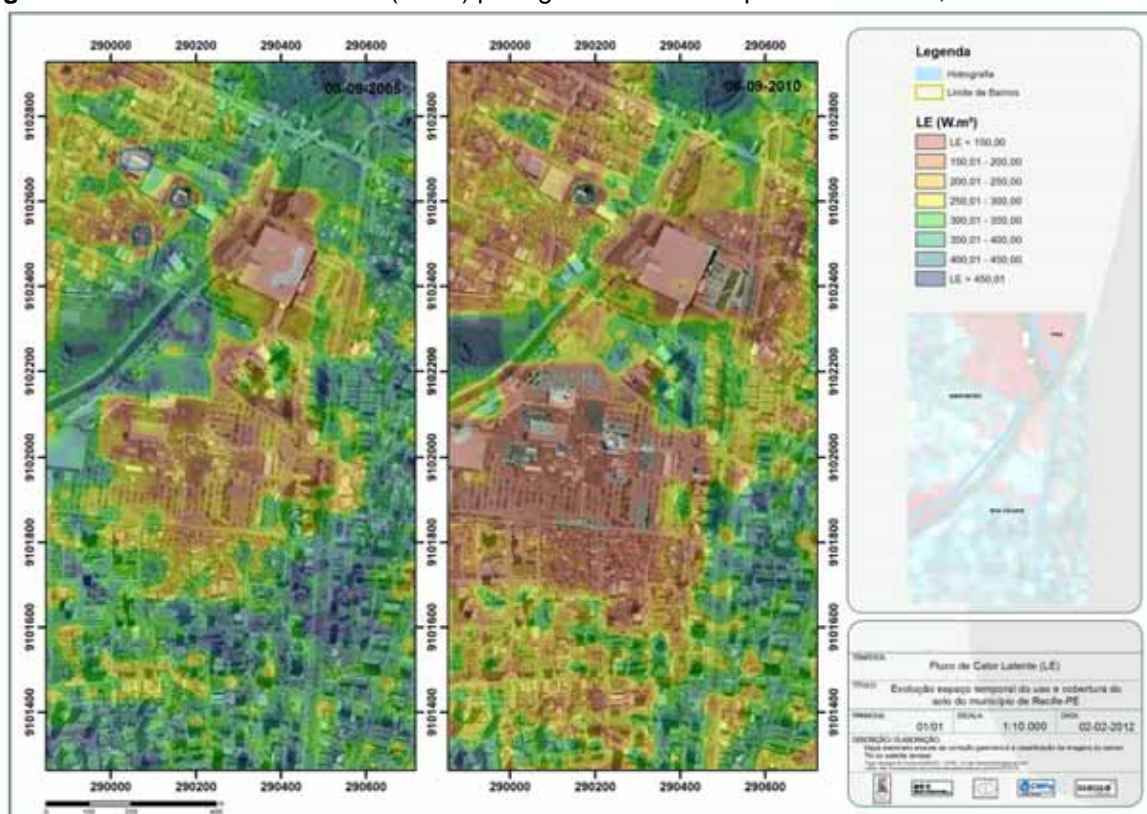
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

As áreas que apresentam pouca ou quase nenhuma vegetação exibiram valores de LE inferiores a 150,0  $W m^{-2}$ , como pode ser observado através da Figura 75, a exemplo da área do Shopping Recife e de outras áreas no bairro de Boa Viagem e Imbiribeira. Estudo realizado por Malek & Bingham (1997) demonstrou que a variabilidade espacial do fluxo de calor latente (LE) apresenta uma grande relação entre a umidade do solo e a variabilidade das espécies vegetais.



Pesquisa realizada por Giacomoni (2005), através da aplicação e comparação do algoritmo SEBAL e S-SEBI no estado do Rio Grande do Sul, encontrou os menores valores de LE associados à área urbana enquanto que as áreas de cultivo, áreas vegetadas e os grandes corpos hídricos apresentaram os maiores valores.

**Figura 75.** Fluxo de Calor Latente ( $\text{Wm}^{-2}$ ) para grandes áreas impermeabilizadas, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Gomes (2009) encontrou valores de LE inferiores a  $150,09 \text{ W m}^{-2}$  para as áreas que apresentavam pouquíssima cobertura vegetal. Já os valores de LE superiores a  $450,0 \text{ W m}^{-2}$  estavam localizados nas áreas que apresentavam áreas de agricultura ou vegetação de Cerrado, apresentando maior densidade vegetativa.

Meireles (2007) também encontrou valores de LE inferiores a  $100,0 \text{ W m}^{-2}$  para as áreas onde o cristalino se encontrava exposto, apresentando deste modo pouca ou quase nenhuma cobertura vegetal. As áreas irrigadas da bacia do Acaraú – CE apresentaram valores de LE variando entre 340 e  $460,0 \text{ W m}^{-2}$ . Já os corpos hídricos da região apresentaram valores de LE variando entre 460 e  $580,0 \text{ W m}^{-2}$ .

Bezerra (2006) encontrou valores de LE abaixo de  $125,0 \text{ W m}^{-2}$  para as áreas com pouca cobertura vegetal enquanto que as áreas de vegetação nativa apresentaram variação de LE entre 125 e  $400,0 \text{ W m}^{-2}$ . Já as áreas com vegetação

densa da Chapada do Araripe apresentaram valores de LE superiores a  $620,0 \text{ W m}^{-2}$ .

Através da Figura 76 podem ser visualizados os valores de Evapotranspiração ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) distribuídos espacialmente pelo município do Recife – PE. Nota-se como os grandes fragmentos florestais apresentam os maiores valores de  $\text{ET}_{24\text{h}}$ , podendo ser diferenciados visualmente de outras áreas que apresentam áreas vegetadas.

Todos os grandes fragmentos florestais apresentaram valores de ET 24h superiores a  $4,0 \text{ mm.dia}^{-1}$ . Já as demais áreas vegetadas apresentaram uma variação de valores entre  $3,0$  e  $4,0 \text{ mm.dia}^{-1}$  de evapotranspiração. As áreas que apresentam uma grande quantidade de área edificada ou impermeabilizada, mas com a presença de indivíduos arbóreos ou pequenas áreas verdes demonstraram valores de ET 24h variando entre  $1,0$  e  $2,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ .

As áreas de solo exposto, assim como as áreas que apresentam grande quantidade de área impermeabilizada e/ou construída, como grandes galpões ou indústrias, apresentaram valores de evapotranspiração englobado na classe de ET inferiores a  $1 \text{ mm.dia}^{-1}$ .

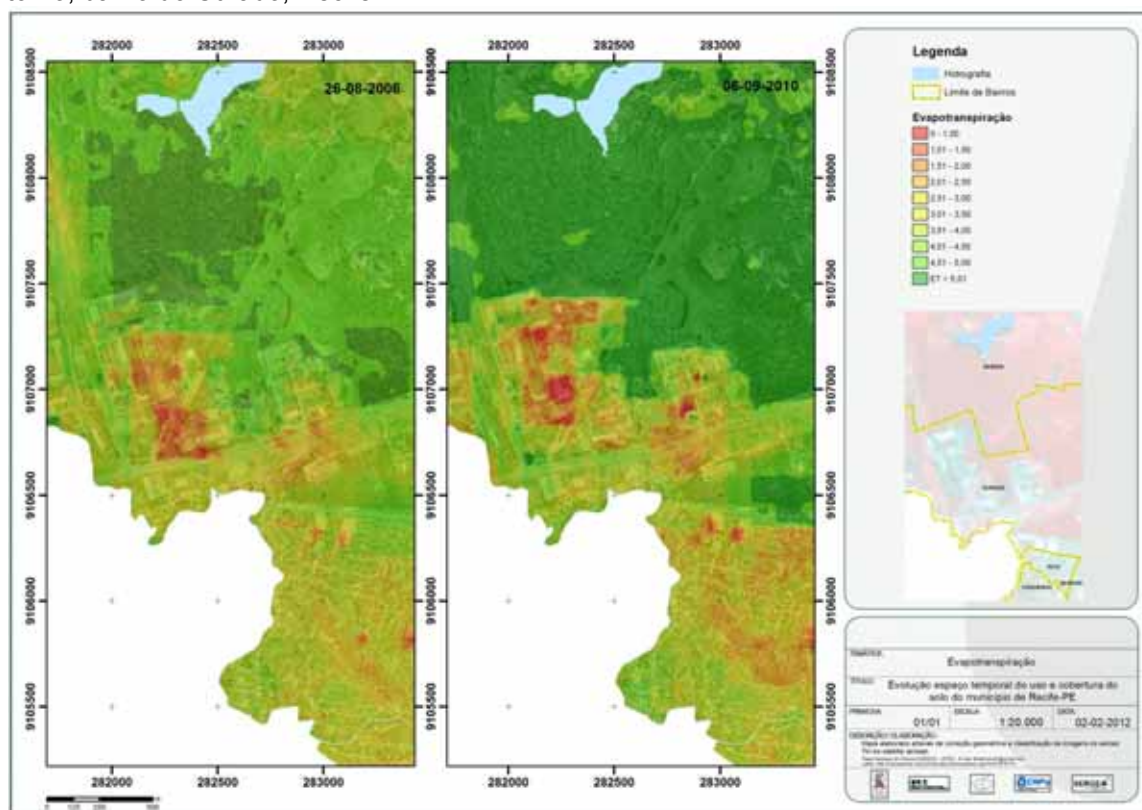
Fonte: Oliveira, T.H (2012)





Deste modo é possível observar o impacto que as grandes áreas impermeabilizadas ou grandes áreas construídas provocam no balanço de energia e na evapotranspiração devido a não presença de áreas vegetadas no seu interior ou entorno, podendo ser observado como exemplo à área do Complexo Industrial do Curado, Figura 77, e os galpões localizados próximo ao Porto do Recife, bairro do Recife – PE, Figura 78.

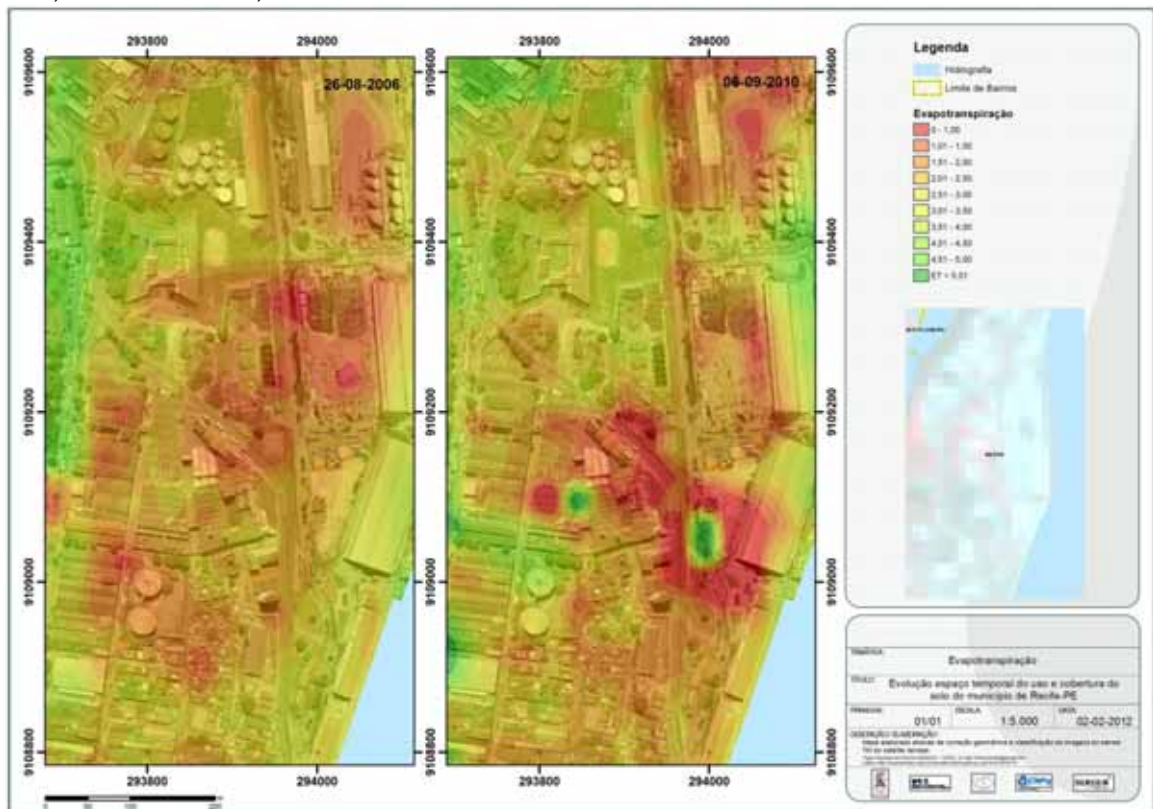
**Figura 77.** Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) distribuídos no Complexo Industrial do Curado e entorno, bairro do Curado, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

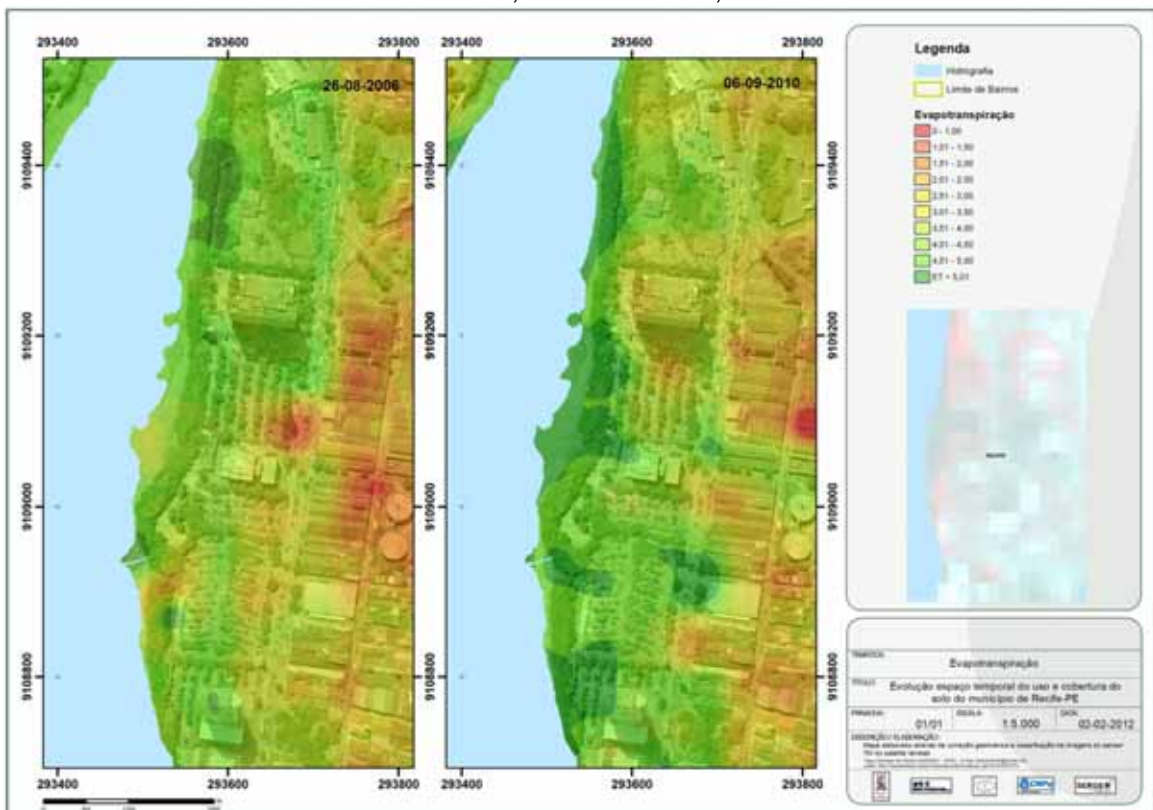
No caso das grandes avenidas, aquelas que apresentam uma grande quantidade de arborização em sua extensão, apresentaram valores de Evapotranspiração mais elevados, fato que também pôde ser observado nas áreas de estacionamento da Prefeitura da Cidade do Recife, do Tribunal Regional do Trabalho da 6ª Região e no Tribunal Regional Federal da 5ª Região, sendo estimado valores de ET variando entre 3,0 e 4,5  $\text{mm dia}^{-1}$  (Figuras 79 e 80).

**Figura 78.** Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) distribuídos em galpões próximos ao Porto do Recife, bairro do Recife, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 79.** Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para área de estacionamento mais arborizada na Prefeitura da Cidade do Recife, bairro do Recife, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)



**Figura 80.** Distribuição da vegetação em área de estacionamento na Prefeitura da Cidade do Recife, do Tribunal Regional do Trabalho da 6ª Região e no Tribunal Regional Federal da 5ª Região, bairro do Recife, Recife – PE.

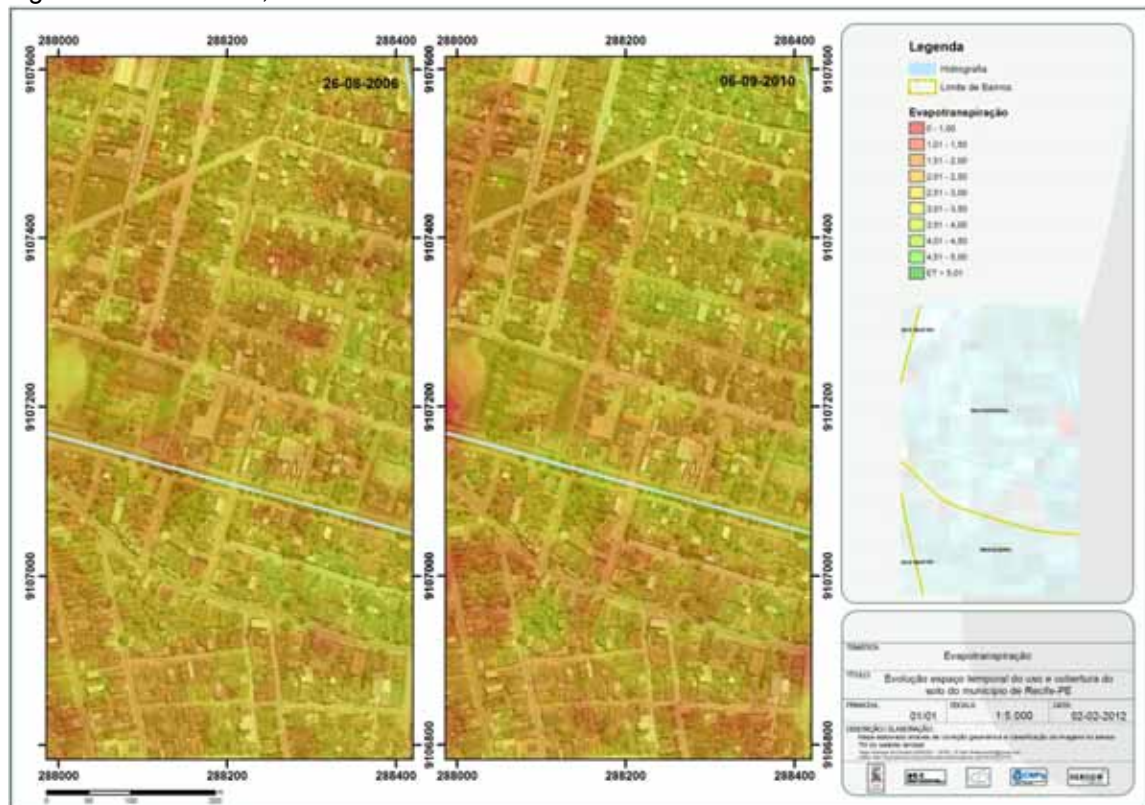


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Bairros como o da Mustardinha, Mangueira e San Martin (Figura 81), e bairros como Santana, Poço e Casa Forte (Figura 82), que, respectivamente, apresentam pouca quantidade de quintais nos lotes do primeiro grupo e uma maior quantidade de áreas verdes particulares no segundo grupo, é possível observar a diferença na distribuição da evapotranspiração entre as imagens de agosto de 2006 e setembro de 2010.

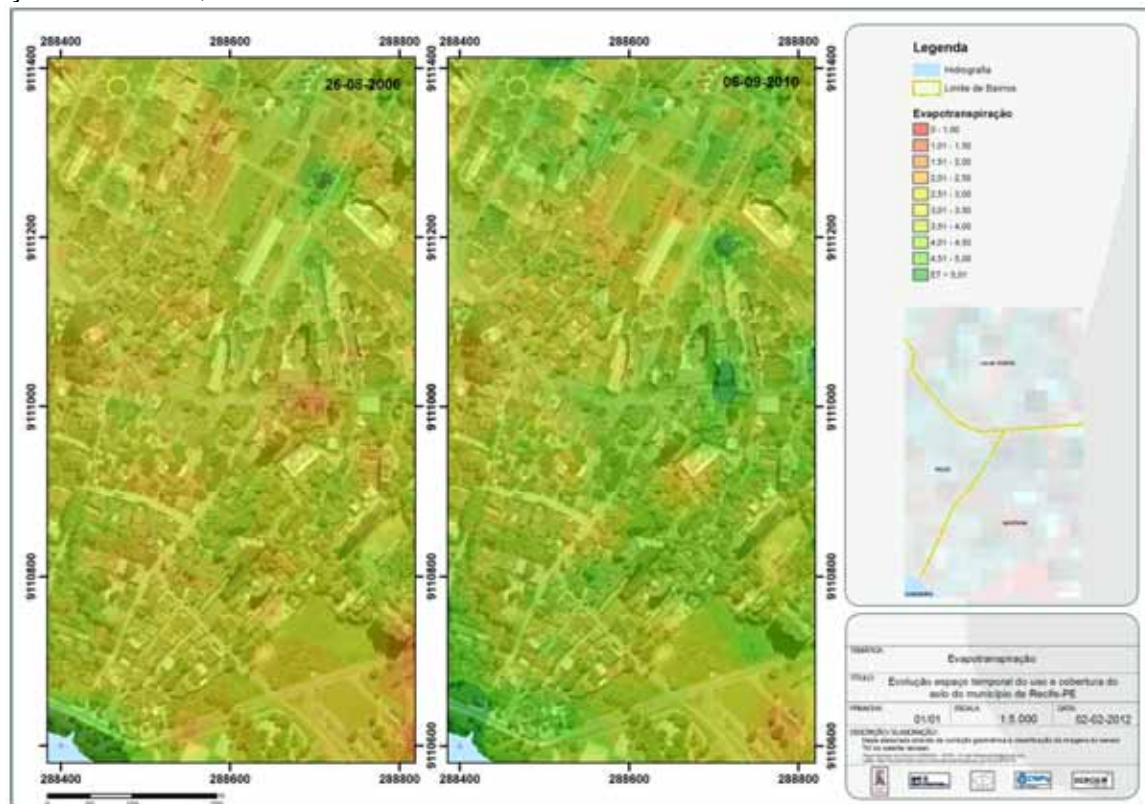
No caso do bairro de Casa Forte é possível observar valores de evapotranspiração variando entre 3,0 e 5,0 mm.dia<sup>-1</sup> nas áreas mais arborizadas e nas áreas de solo natural com vegetação. Já nos bairro da Mustardinha é possível observar a predominância de valores de evapotranspiração inferiores a 3,0 mm.dia<sup>-1</sup>.

**Figura 81.** Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para área dos bairros da Mustardinha, Mangueira e San Martin, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

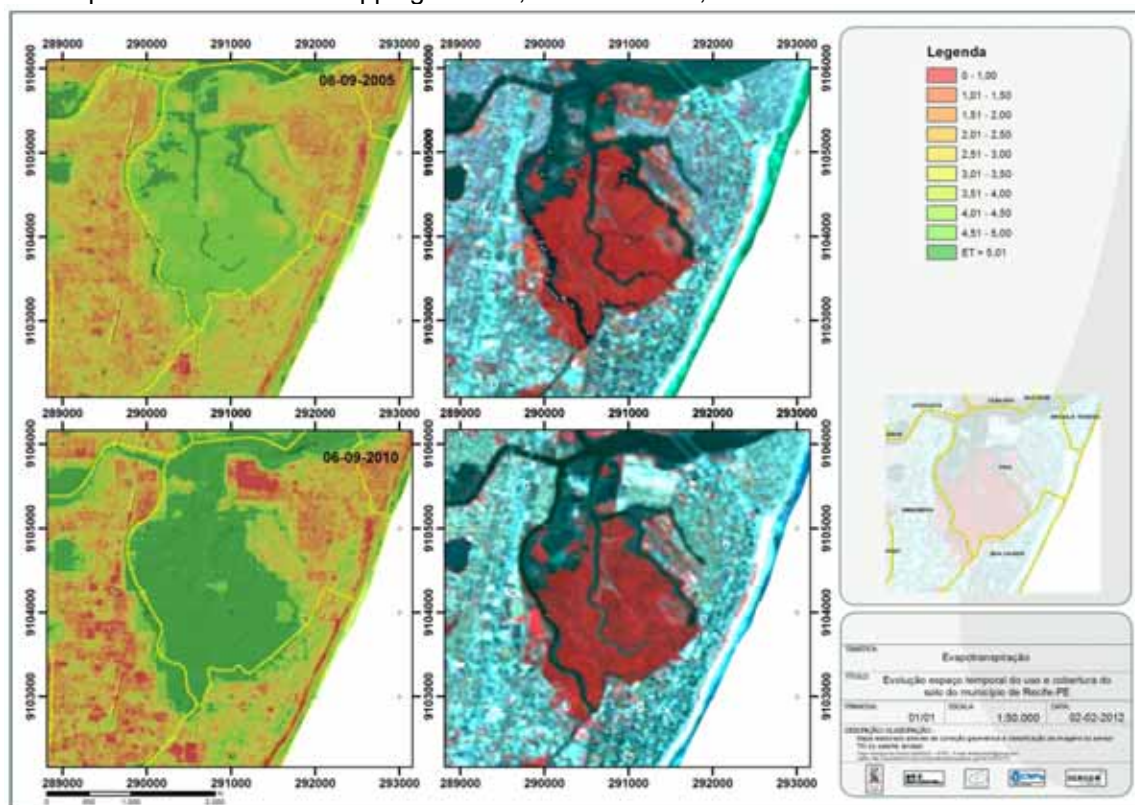
**Figura 82.** Valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para área dos bairros de Santana, Poço e Casa Forte, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Também foi observado o impacto na Evapotranspiração causado pela supressão da vegetação existente na antiga fábrica da Bacardi em virtude da construção do novo Shopping Riomar, Figura 83. A área, que em setembro de 2005 apresentava valores de ET variando entre 2,5 e 4,5 mm.dia<sup>-1</sup>, passou a apresentar valores de ET inferiores a 1,0 mm.dia<sup>-1</sup> em grande parte da área.

**Figura 83.** Mudança de cobertura do solo e impacto nos valores de Evapotranspiração (mm dia<sup>-1</sup>) estimado para área do novo Shopping Riomar, bairro do Pina, Recife – PE.

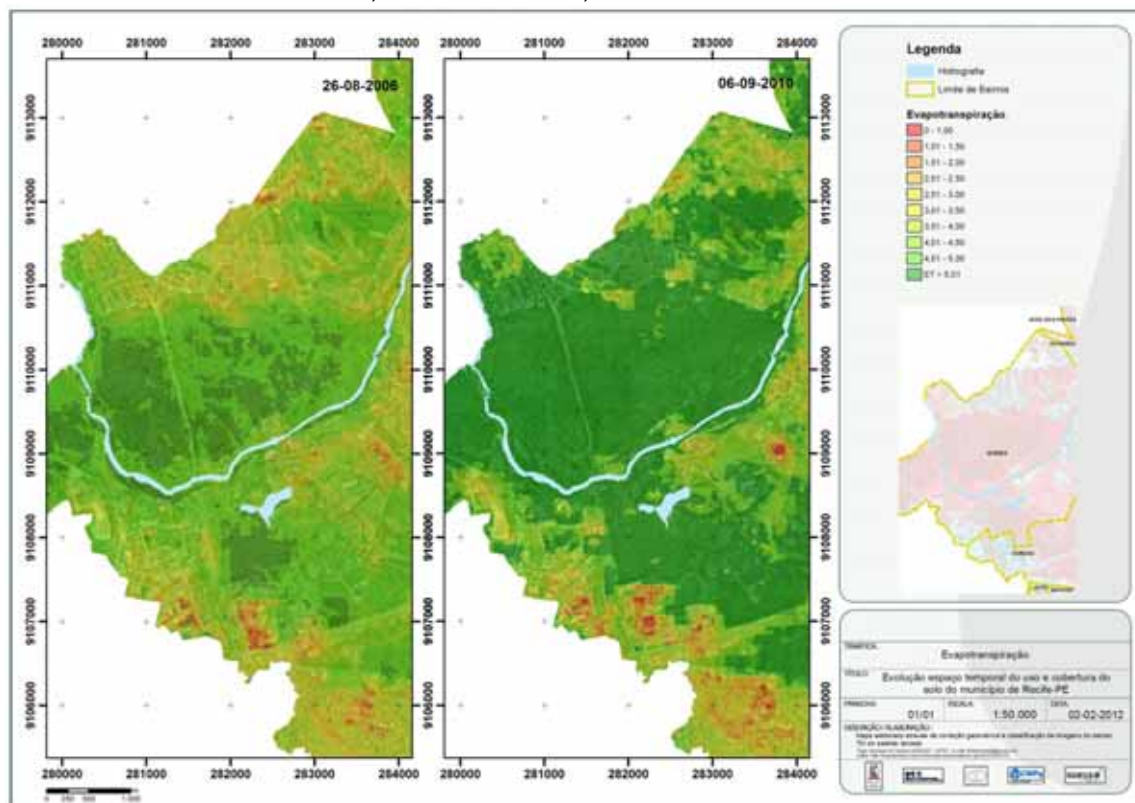


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

No caso dos grandes fragmentos florestais, como a Mata da Várzea/Curado, Figura 84, e Mata do Jardim Uchoa, Figura 85, foram estimados valores de evapotranspiração superiores a 4,0 mm.dia<sup>-1</sup>. Nas bordas dos fragmentos, devido ao contato com a área urbana, foram observados uma variação de valores de evapotranspiração entre 2,5 e 4,5 mm.dia<sup>-1</sup>, o que varia de acordo com o impacto ao qual o entorno do fragmento está submetido. Nota-se como as áreas utilizadas antropicamente no interior do fragmento apresentam valores de ET mais baixos.

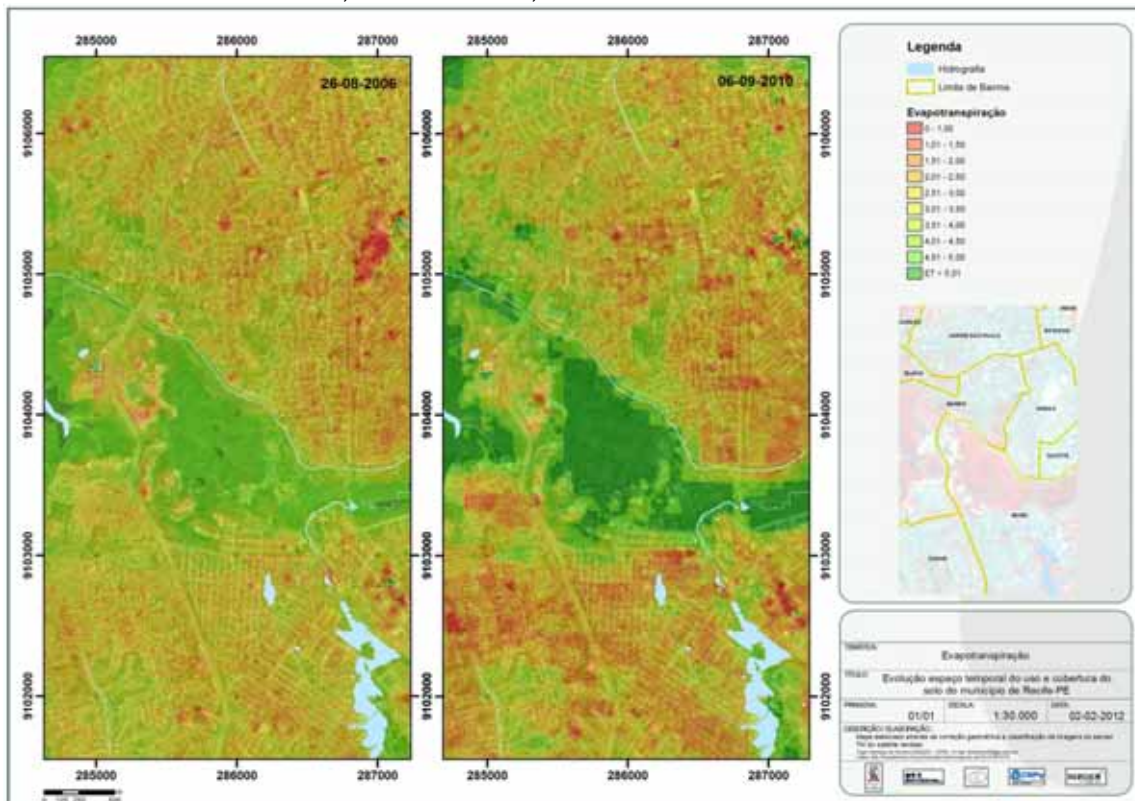


**Figura 84.** Distribuição dos valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para os fragmentos florestais Mata da Várzea/Curado, bairro da Várzea, Recife – PE.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 85.** Distribuição dos valores de Evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimados para o fragmento florestal Mata do Jardim Uchoa, bairro do Iburá, Recife – PE.

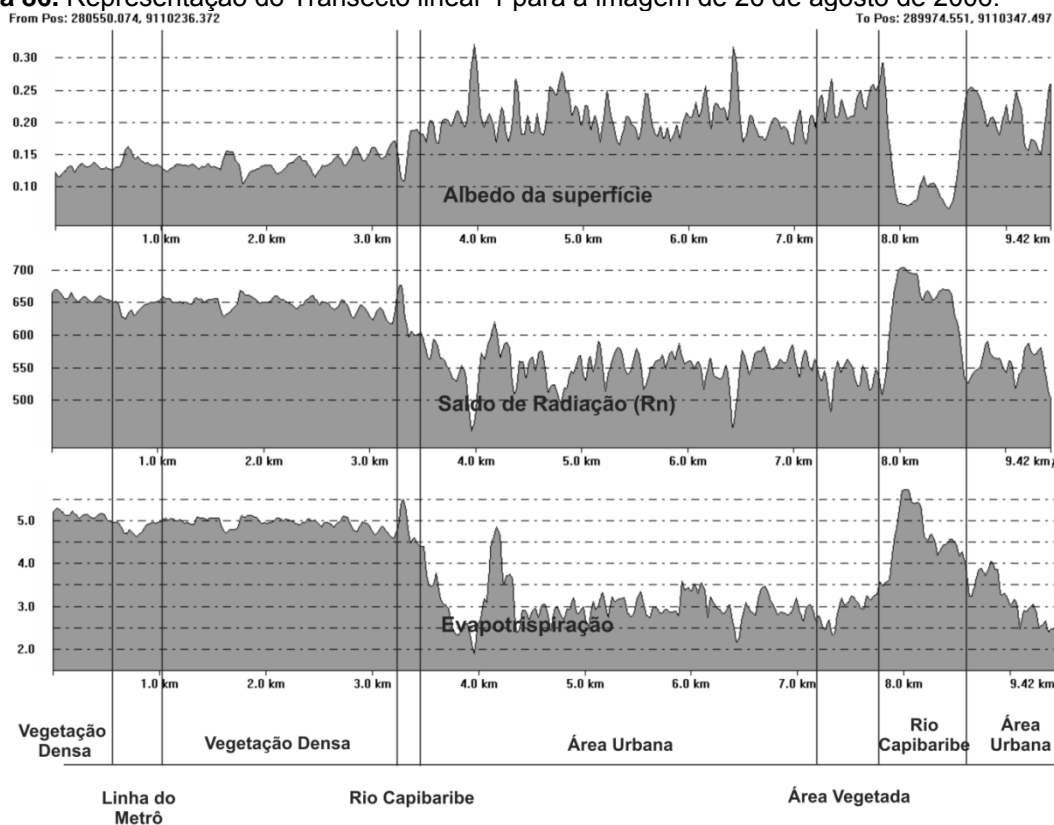


Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Do mesmo modo como foi feito para o Índice de Área Foliar (IAF), NDWI e Temperatura da superfície, foram traçados transectos lineares e gerados perfis dos dados de Albedo da superfície, Saldo de Radiação e Evapotranspiração para parte da área da RPA 4. Devido à incidência de nuvens em algumas áreas das imagens de 2005 e 2011 só foi possível realizar a utilização dos transectos linear e a criação dos perfis para as imagens de agosto de 2006 e setembro de 2010.

Através dos transectos lineares (Figura 86 a 89), é possível observar a mudança nos valores dos índices estudados de acordo com a variação de predominância de cada uso e cobertura do solo sobre a qual foi traçada. Nota-se, através da Figura 86, que os valores de albedo da superfície apresentam-se abaixo de 0,15 para a área de vegetação densa, neste caso a mata da Várzea, para as duas imagens utilizadas.

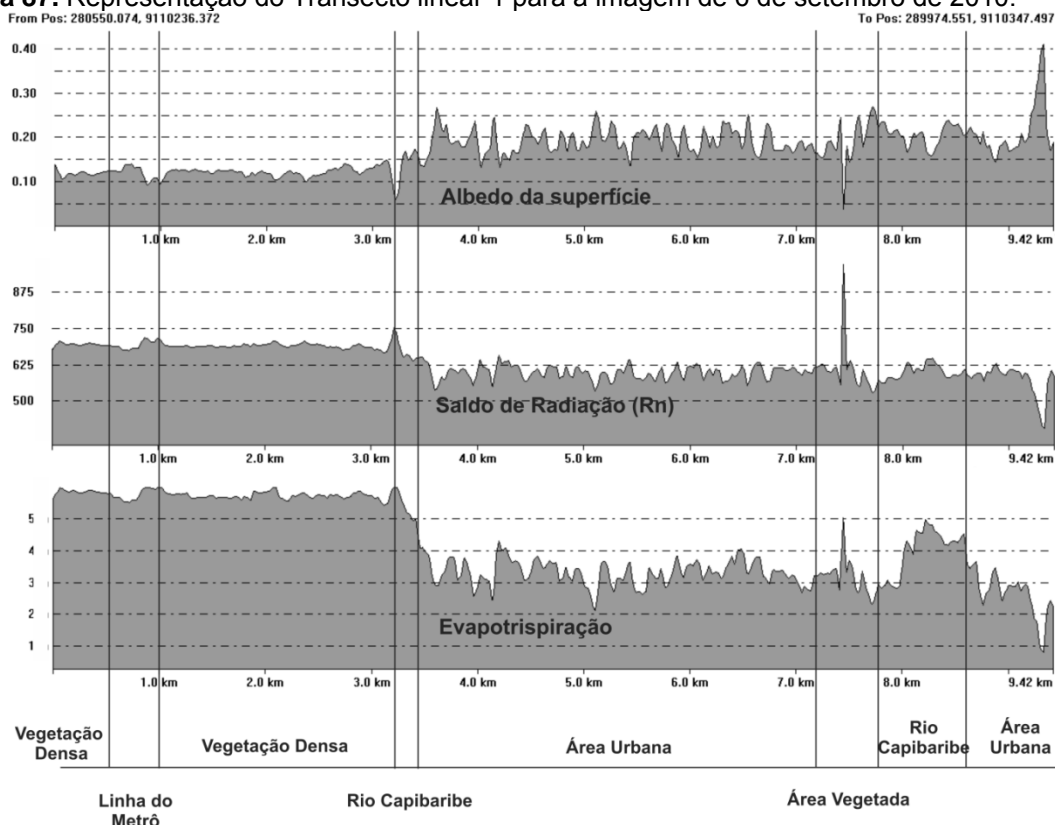
**Figura 86.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 26 de agosto de 2006.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)



**Figura 87.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 6 de setembro de 2010.



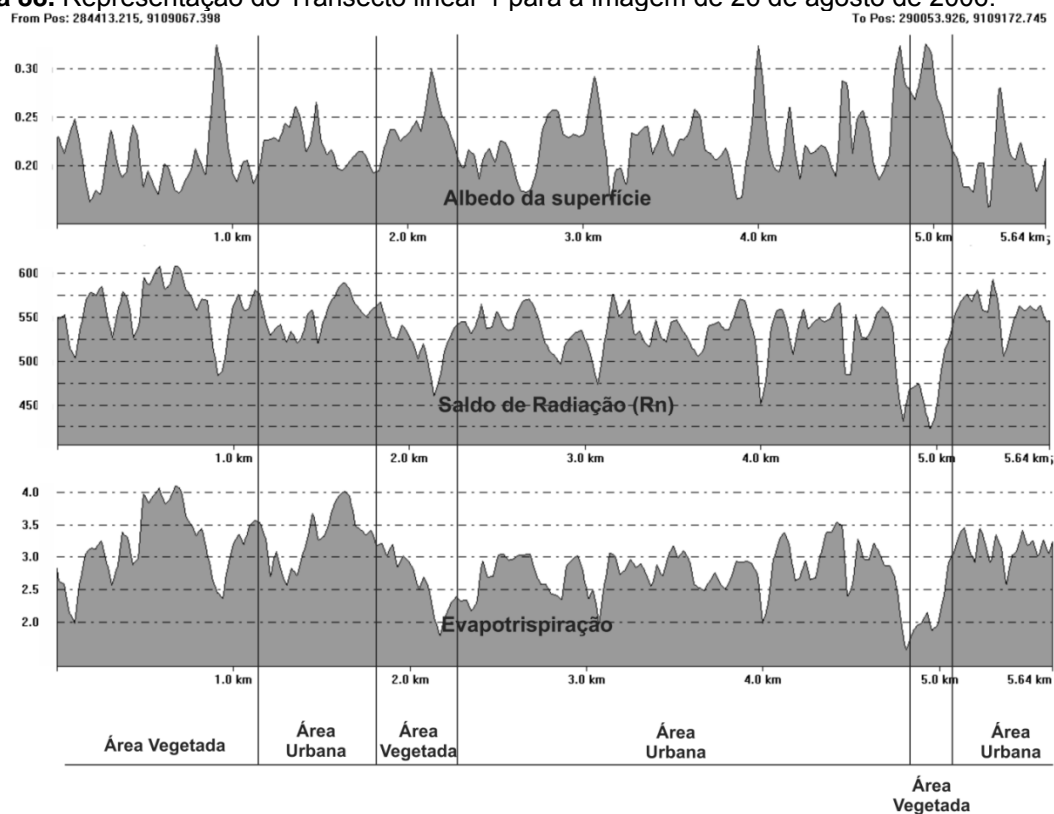
Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Já os valores de saldo de radiação (Rn) e Evapotranspiração apresentam-se bem mais elevados quando comparado os dois períodos. Com relação à área mais adensada ou urbanizada é possível observar a inversão dos resultados citados anteriormente. Os valores de Rn e ET apresentam uma grande diminuição quando comparado as demais áreas.

O Albedo da superfície apresenta um aumento em seus valores. Nestas áreas os picos observados no Rn e ET na área urbana se devem à quantidade e distribuição da vegetação que compõem a área. Deste modo, torna-se importante a manutenção destas áreas que desempenham um importante papel no balanço de radiação e de energia em área urbana.

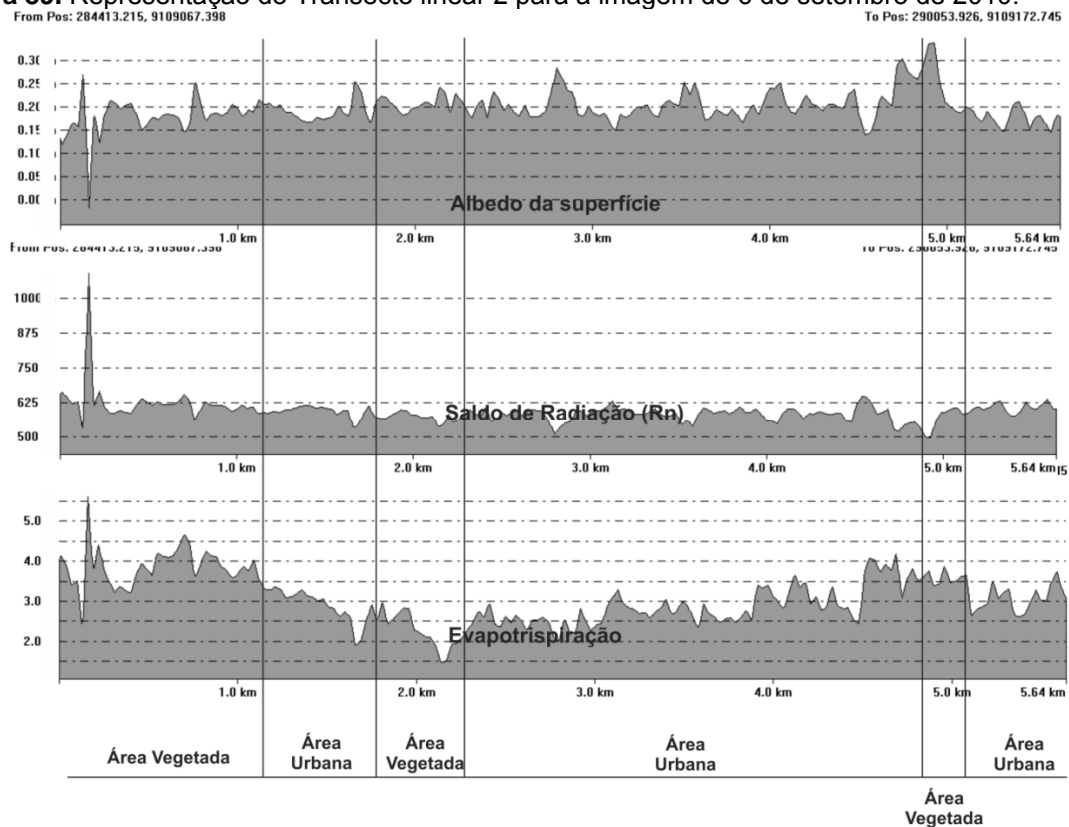
Já através do transecto linear 2 (Figuras 88 e 89), é possível observar que a área mais vegetada, situado entre 0 e 1 km, apresenta os maiores valores de evapotranspiração dos perfis.

**Figura 88.** Representação do Transecto linear 1 para a imagem de 26 de agosto de 2006.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

**Figura 89.** Representação do Transecto linear 2 para a imagem de 6 de setembro de 2010.



Fonte: Oliveira, T.H (2012)

Nesta área fica localizado o bairro de Cidade Universitária, onde é possível observar uma grande quantidade de área natural vegetada e a distribuição de vários indivíduos de porte arbóreo sobre todo o Campus. Já as demais áreas do transecto, por apresentar uma grande quantidade de áreas impermeabilizadas e construções com pouca presença de solo natural vegetado apresentou valores de albedo da superfície mais elevado.

Estudo realizado por Bezerra (2006, p.97) em parte da microrregião do Cariri do estado do Ceará abrangendo territórios dos municípios de Barbalha, Crato e Juazeiro do Norte, apresentou valores de evapotranspiração variando entre 2 e 6,0 mm.dia<sup>-1</sup> para a região da Chapada do Araripe, com predominância de vegetação densa.

Santos et al. (2010) em estudo compreendendo uma região orizicultora próxima ao município de Paraíso do Sul - RS, estimou valores de ET inferiores a 1,7 mm.dia<sup>-1</sup> para as áreas de solo exposto e valores variando entre 3,97 e 5,80 mm.dia<sup>-1</sup> para as áreas com vegetação nativa. Já os grandes corpos hídricos apresentaram valores de ET superiores a 6,41 mm.dia<sup>-1</sup>.

Wang & Xu (2008) realizaram estudo na cidade de Fuzhou – CH e áreas no entorno visando estabelecer a relação entre as ilhas de calor urbana e expansão urbana e os valores de evapotranspiração. Deste modo os autores verificaram que a medida que a expansão urbana foi se intensificando, os valores regionais de evapotranspiração foram diminuindo expressivamente, entre os anos de 1996 e 2003.

Com a ocorrência do aumento no número de prédios e áreas impermeabilizadas e a rápida diminuição das áreas de corpos hídricos e vegetação, Wang & Xu (2008) concluíram que a retenção de água no solo e o processo de evaporação diminuiu, o que apresentou impacto negativo na evapotranspiração da vegetação devido ao aumento da temperatura.

Deste modo torna-se necessário a adoção de políticas públicas que venham a preservar as áreas de solo natural existentes nas áreas com urbanização mais consolidadas e nas áreas que apresentam elevada expansão urbana visando a manutenção do conforto térmico e ambiental urbano assim como a promoção do bem estar social e psicológico da população.

## 5. CONCLUSÕES

1. Através da utilização das imagens do sensor TM do satélite Landsat foi possível observar as mudanças espaço-temporal ocorrida no município do Recife entre os anos de 1987 e 2011 devido a expansão urbana (no sentido centro para áreas mais periféricas do município) e o aumento da pressão urbana sobre os grandes fragmentos florestais, o que causa o fenômeno chamado de efeito de borda nestes fragmentos causando em alguns casos a perda da qualidade genética de algumas espécies e a maior susceptibilidade a quebra de árvores.
2. Observou-se que Recife ainda possui uma grande quantidade de áreas verdes, porém a distribuição destas áreas no município é desigual, estando localizada grande parte nas áreas ao norte e oeste do município.
3. Verificou-se a importância da preservação de áreas verdes (seja de porte arbóreo, herbácea ou arbustiva), não só nas áreas públicas como também nas grandes áreas privadas, propiciando a manutenção da qualidade ambiental urbana.
4. As áreas industriais, áreas com galpões e áreas com grandes empreendimentos, que preservaram uma maior quantidade de solo natural ou vegetação de porte arbóreo, apresentaram valores de Temperatura da superfície mais amena e melhores valores de Albedo da superfície, Saldo de Radiação e Evapotranspiração quando comparados a outros empreendimentos no município.
5. Diversos índices gerados através do algoritmo SEBAL apresentaram grande sensibilidade as mudanças ocorridas no interior dos fragmentos florestais, como no caso da Mata da Várzea/Curado e da Mata do Jardim Uchôa.
6. Através do refinamento espacial na carta de temperatura da superfície, com a utilização da técnica TsHARP, foi possível observar a relação entre os diferentes materiais que compõem o ambiente urbano e a temperatura da superfície, podendo ser identificados as áreas que apresentam ilhas de calor e as áreas de amenidade em diferentes escalas.

7. O Fluxo de Calor Sensível e o Fluxo de Calor Latente, a pesar da resolução espacial do sensor utilizado, demonstraram sensibilidade aos diferentes níveis de uso e cobertura do solo existentes no município do Recife.
8. Através da carta de evapotranspiração foi possível identificar as áreas do município que apresentam déficit de evapotranspiração e verificar a sensibilidade do índice às variações nos valores de uso e cobertura do solo.



## 5.1 RECOMENDAÇÕES

1. Recomenda-se a elaboração de um mapa indicando as áreas prioritária de implantação de vegetação (seja de porte arbórea, herbácea ou arbustiva) para manutenção da qualidade ambiental urbana.
2. No caso das áreas que apresentam um alto grau de verticalização ou elevado nível de adensamento urbano segure-se a manutenção das áreas verdes e da arborização existente, assim como a adoção de políticas que induzam a arborização no entorno de grandes empreendimentos, diminuindo deste modo o consumo de energia conforme observado em pesquisas realizadas em diversas cidades do mundo e propiciando áreas sombreadas próximas as paredes do empreendimento.
3. Em alguns casos, onde não seja possível a arborização devido à falta de área disponível ou tamanho de calçadas, sugere-se a adoção de políticas públicas que incentive a implantação de jardins verticais visando a diminuição da refletividade, do nível de poluentes e amenização das altas temperaturas.
4. Implantação de mais estações meteorológicas pelos órgãos competente distribuídas em diferentes regiões do município do Recife objetivando a coleta de importantes variáveis meteorológicas e evitando-se a falta de dados para aplicação como variáveis de diversos estudos a serem realizados futuramente e a realização de manutenção preventiva evitando a perda de dados.

## REFERENCIAS

- ACCIOLY, L. J.; PACHECO, A.; COSTA, T. C. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.492-498, 2002.
- AGAM, N., KUSTAS, W. P., ANDERSON, M. C., LI, F., NEALE, C. M. U. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.107, p.545-558, 2007.
- AKBARI, H. **A cost-benefit analysis of urban trees**. Berkeley, CA. Lawrence Berkeley National Laboratory. 1997
- 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. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). **Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation**, version 1.0, 97p., 2002.
- ALMEIDA, A. Q.; SILVA, G. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; RIBEIRO, C. A. D. Enhanced Vegetation Index (EVI) na análise da dinâmica da vegetação da Reserva Biológica de Sooretama, ES. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.6, p.1099-1107, 2008
- ALMEIDA, A. M. de. **Conforto térmico e eficiência energética em edifício multifamiliar na cidade de Maceió – AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Dinâmica do espaço habitado). Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 220 f : il. grafs., tabs. 2009
- ALVIM, K. R. de T.; BRITO, C. H.; BRANDÃO, A. M.; GOMES, L. S.; LOPES, M. T. G. Quantificação da área foliar e efeito da desfolha em componentes de produção de milho. **Cienc. Rural** [online]. 2010, vol.40, n.5, pp. 1017-1022. ISSN 0103-8478.
- AMANAJÁS, J. C.; GUEDES, R. V. de S.; BRAGA, C. C. Estimativa do balanço de energia à superfície sobre a cidade de Teresina/PI utilizando o algoritmo S-SEBI. In XI Congresso Argentino de Meteorologia, **Anais**, Mendoza – Argentina. Maio de 2012. Sítio: <http://www.congremet.prmarg.org/upload/amanajasjonathan.pdf>
- AZEVEDO, P.V.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; SOUSA, I.F.; MACIEL, G.F. Balanço de radiação sobre culturas irrigadas no semi-árido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.5, n.1, p.403-410, 1990.
- AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Amsterdam: Ed. Bertrand Brasil S.A. 2a ed., 1983, p.332.
- BADECK, F. W., BONDEAU, A., BOTTCHER, K., DECKTOR, D., LUCHI, W., SCHABER, J. 2004. Responses of spring phenology to climate change. **New Phytologist**, 162, 295-309.
- BARBOSA, H. A., HUETE, A. R., BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, 67, 288–307. 2006
- BASS, B. **Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas**. National Research Centre of Canada. Disponível em: <http://www.slideshare.net/ElisaMendelsohn/evaluating-rooftop-and-vertical-gardens-as-an-adaptation-strategy-for-urban-areas>. 2001. Acesso em: 01-02-2012
- BASS, B. **Green Roofs and Green Walls: Potential Energy Savings in the Winter**. Toronto: Adaptation & Impacts Research Division Environment Canada at the University of Toronto Centre for Environment. Disponível em: <http://www.upea.com/pdf/greenroofs.pdf>. 2007. Acesso em: 01-02-2012

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates.** Agricultural University of Wageningen. PhD Thesis. 273 pp, 1995.

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.

BASTIAANSEN, W. G. M. & CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, vol. 58, p. 171-192, 2003.

BERMAN, M. **All that is solid melts into air: The Experience of Modernity.** 1.ed. New York: Simon and Schuster, 1982. 465 p. ISBN (978-85-359-1030-8). Disponível em: [http://books.google.com.br/books?id=mox1ywyhtgC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.br/books?id=mox1ywyhtgC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 05-06-2010

BETTS, R. A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. **Nature** 408, 187-189. Disponível em: <http://www.nature.com/nature/journal/v408/n6809/full/408187a0.html>. 2000

BEZERRA, B. G. **Balço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL.** Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Fev. de 2006

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, v.79, n.1, p.329-343, 2002.

BLAD, B.L.; BAKER, D.G. Reflected radiation from a soybean crop. **Agronomy Journal**, v.64, p.277-280, 1972.

BRAGA, C. C., SOARES, F. R., DANTAS, F. R. C., BARBIERI, L. F. P. Determinação do albedo e índice de área foliar usando o sensor TM / LANDSAT 5. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 935-942.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: Theory, History and Applications.** 299 p. D. Reidel, Hingham, Mass. 1982.

CAMARGO, F. F., PEREIRA, G., MORAES, E. C., OLIVEIRA, L. G. L., ADAMI, M. Análise multitemporal da evolução urbana e sua influência na modificação do campo térmico na Região Metropolitana de São Paulo para os anos de 1985, 1993 e 2003. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis. **Anais** do XIII SBSR, Florianópolis, 2007. p. 5127–5134.

CAPORUSSO, D. & MATIAS, L. F. **Áreas verdes urbanas: avaliação e proposta conceitual.** VIII Seminário de Pós-graduação em Geografia da UNESP. Rio Claro – SP. 2008

CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SILVA, G. B. S. S.; SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. Discriminação de áreas alagadas no Pantanal sul matogrossense a partir de imagens orbitais. In: 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, **Anais**, Corumbá, 7-11 novembro, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, pp. 99-106. 2009

CARVALHO, M. M. **Clima urbano e vegetação: estudo analítico e prospectivo do Parque das Dunas em Natal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Arquitetura. s.n., 2001.

CAVALCANTI, H.; BRITTO LYRA, M. R.; AVELINO, E. (Orgs.). Diferentes padrões de desigualdades da cidade do Recife. In: **Mosaico urbano do Recife. Exclusão Inclusão Socioambiental**. Recife, Editora Massangana, 2008, 324 p.

CORREA, A. C. B. Contribuição à análise do Recife como um geossistema urbano. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 23, p. 86-101, 2006.

CORREIA, F. W. S. **Estudo do balanço de radiação em área de policultivo na Amazônia**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - São José dos Campos: INPE. 137p. - (INPE-8176-TDI/758). 2000.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S.; GIELOW, R. Albedo do Pantanal Sul Matogrossense durante o período de transição seco-úmido de 2001-2002, In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12., Foz do Iguaçu, **Anais...** Foz do Iguaçu: [s.n.], 2002.

COSTA, F. P. S. **Evolução urbana e da cobertura vegetal de Piracicaba – SP (1940-2000)**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

COSTA, A. S. & SOUZA JR., C. L. Comparação entre imagens Landsat ETM+ e MODIS/TERRA para detecção de incrementos de desmatamento na região do baixo Acre. RBC - **Revista Brasileira de Cartografia**, No 57/02, 2005. (ISSN 1808-0936).

CUI, H. & YUAN, L. Study on Thermal Environmental Distribution in Coastal City Using ASTER Data. In: Urban Remote Sensing Joint Event. **Anais**. 978-1-4244-3461-9/09/\$25.00 ©2009 IEEE. 2009

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing**. v. 41. n. 11. 2003.

CHEMIN, Y.; PLATONOV, A.; UL-HASSAN, M.; ABDULLAEV, I. Using remote sensing data for water depletion assessment at administration and irrigation-system levels: case study of the Ferghana Province of Uzbekistan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.64. p.183-196, 2004.

CHEN, Y., WANG, J., & LI, X. A study on urban thermal field in summer based on satellite remote sensing. **Remote Sensing for Land and Resources**, 4, 55–59. 2002.

CHEN, X.; ZHAO, H.; LI, P.; YIN, Z. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing of Environment**, 104 (2006) 133–146.

DIJK, A. I. J. M.; BRUIJNZEEL, L. A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2 - Model validation for a tropical upland mixed cropping system. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.247, p.239-62, 2001.

EMBRAPA. **Sistema Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial – LANDSAT – Land Remote Sensing Satellite**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/landsat.htm>. 2009. Acesso em: 15-06-2010

FENSHOLT, R & PROUD, S. R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, Volume 119, 16 April 2012, Pages 131-147.

FENDRICH, R & IWASA, O. Y. Controle de erosão urbana. In: **Geologia de Engenharia**, São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia (ABGE), 1998. p. 271-281.

FILHO, W. D. C. **Estudo hidroquímico nos aquíferos da planície do Recife**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE. 1997

FREITAS, R. M. de. **Entre mitos e limites: as possibilidades do adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura. Tese (Doutorado – Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura). 280 p.: il. Porto Alegre – RS, 2005.

GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; MOURA, Y. M. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: A case study with MODIS and hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, Volume 115, Issue 9, 15 September 2011, Pages 2350-2359.

GALVÃO, W. S. & MENESES, P. R. Uso de SIG e do classificador ISODATA na geração do mapa de regiões geoambientais homogêneas na bacia do rio São Francisco, como um produto estratégico de apoio às ações de planejamento de redes fluviométricas. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2177-2184.

GAO, B. C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, 58, 257-266. 1996

GARCIA, M. C. M. **Climatologia urbana**. Barcelona: Universitat de Barcelona, 1999. 71p. (Textos docentes, 160).

GARTLAND, L. De Ilhas de calor para comunidades frescas. In: **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas** / Lisa Gatland; Tradução Sílvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GIACOMONI, M. H. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto integradas a modelos de Balanço de Energia: Aplicação no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 193 p. Porto Alegre, 2005.

GINCIENE, B. R.; BITENCOURT, M. D. Utilização do EVI (Enhanced Vegetation Index) para maior sensibilidade na detecção de mudanças temporais em fragmentos de floresta estacional semidecidual. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil. INPE p.1620. 2011.

GIONGO, P. R. **Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Tecnologia Rural. 92 f. Recife, 2008.

GOMES, H. B. **Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), UFCG. Campina Grande – PB. 2009

GOMES, L. C. F. **Dinâmica da temperatura da superfície em resposta às alterações na cobertura e uso do solo utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), UFCG. Campina Grande – PB. 2011

GUIMARÃES, H. B.; BRAGA, R. A. P.; OLIVEIRA, T. H. Evolução da condição ambiental em fragmentos de mata atlântica na região metropolitana do Recife–PE - DOI:10.5039/agraria.v7i2a1439. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)** Brazilian Journal of Agricultural Sciences, América do Norte, 719 07-2012a.

GUIMARÃES, H. B.; BRAGA, R. A. P.; OLIVEIRA, T. H. Serviços Ambientais Gerados por Matas Tuteladas ao Exército Brasileiro na Região Metropolitana no Recife. doi 10.4322/floram.2012.043. **Revista Floresta e Ambiente**. Recife, 2012b.



HAFEEZ M. M. et al. Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: Simposium On Geospatial Theory, Processing and Applications, 2002, Ottawa, **Anais...** [s.n.], 2002.

HOFMANN, P.; STROBL, J.; BLASCHKE, T.; KUX, H.J.R. Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object-based approach. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G.J. (Eds.). **Object-based image analysis – spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications**. Berlin, Germany: Springer Verlag, 2008. cap. 6.1, p.531-553.

HOLANDA, A. S. S.; GUERRA, C. E. 2010. Monitoramento da vegetação da região do eixo-forte no município de Santarém-PA utilizando imagens dos índices de vegetação NDVI e NDWI. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais**, pp. 1-5.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, v.4, n.4, p.367-376, 1988.

HUETE, A. R.; TUCKER, C. J. Investigation of soil influence in AVHRR red and near infrared vegetation index imagery. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v.12, p.1223-1242. 1991.

HUETE, A. R., LIU, H. Q., BATCHILY, K., AND VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. V. 59, p. 440-451, 1997

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p. 195-213, 2002.

IMHOFF, M. L., ZHANG, P., WOLFE, R. E., BOUNOUA, L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. **Remote Sensing of Environment**, 114, 504-513. 2010

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual técnico de uso da Terra. **Manuais técnicos em Geociências**. n.7. 2ª Edição. Rio de Janeiro. 2006

INSTITUTO POLIS. **Moradia é central: inclusão, acesso e direito a cidade – Recife**. Disponível em: < <http://www.moradiacentral.org.br/pdf/recife.pdf>>. 2009

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, 112 (2008) 3833–3845

JUNIOR, J. S. B. & ALMEIDA, A. S. Análise multitemporal com a utilização da técnica de sensoriamento remoto e geoprocessamento no município de Bonito – PARÁ. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais**, Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010. p. 001 de 007

JUNIOR, J.C.U. & AMORIM, M.C.C.T. Indicadores ambientais e planejamento urbano. Caderno Prudentino de Geografia, n. 31, v. 2, p. 5-35, jul/dez, 2009

JUSTICE, C. O. et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1228-1249, 1998.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 30:261-270, 1992.

KERGOAT, L. A model for hydrological equilibrium of leaf area index on a global scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.212-13, p.268–86, 1998.

KUSTAS, W. P., NORMAN, J. M., ANDERSON, M. V., FRENCH, A. N. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index–radiometric temperature relationship. **Remote Sensing of Environment**, 85, 429-440. 2003

KLOCKE, N. L.; HUBBARD, K. G.; KRANZ, W. L.; WATTS, D. G. **Evapotranspiration (ET) for Crop Water Use**. Disponível em: <http://ianrpubs.unl.edu/irrigation/g992.htm> .. Acesso em: 05 de julho de 2011. 1996

LAGOUARDE, J. P.; IRVINE, M.; BONNEFOND, J. M.; GRIMMOND, C. S. B.; LONG, N.; OKE, T. R.; SALMOND, J. A. e OFFERLE, B. Monitoring the sensible heat flux over urban areas using large aperture scintillometry: case study of marseille city during the escompte experiment. **Boundary - Layer Meteorology** (2006) 118: 449–476. DOI 10.1007/s10546-005-9001-0

LANG, A. R. G; MCMURTRIE, R. E. Total leaf areas of single trees of Eucalyptus grandis estimated from transmittances of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.58, p.79-92, 1992.

LEITÃO, M.M.V.B.R. Balanço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada. **Dissertação Mestrado**, Campina Grande: DCA/CCT/UFPB, 1989. 111p.

LEITÃO, M. M V.B.R & OLIVEIRA, G. M.; Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.2, p.214-218, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 2000.

LIMA, M. O.; VIEIRA, V. C. B.; TEIXEIRA, M. A. C. M. T. Uso de geotecnologias para análises da cobertura vegetal urbana. **Revista MundoGeo – On-line**. Acesso em: [http://www.mundogeo.com.br/revistas-interna.php?id\\_noticia=13552](http://www.mundogeo.com.br/revistas-interna.php?id_noticia=13552) . Curitiba, 2009

LIU, H.Q.; HUETE, A. A. Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy IEEE Transactions on Geosciences and background and atmosphere noise. **Remote Sensing**, v.3, n.2, p.457-465, 1995.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande - MS, Ed. UNIDERP, 908 p. 2006

LO, C. P. & QUATTROCHI, A. D. Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications: A Remote Sensing Approach. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Vol. 69, No. 9, September 2003, pp. 1053–1063.

LOMBARDO, M. A. Ilhas de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec. 1985. 224p.

MACHADO, R. R. B.; PEREIRA, E. C. G.; ANDRADE, L. H. C. Evolução temporal (2000-2006) da cobertura vegetal na zona urbana do município de Teresina – Piauí – Brasil. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana - REVSBAU**, Piracicaba – SP, v.5, n.3, p.97-112, 2010

MALEK, E.; BINGHAM, G. E., Partitioning of radiation and energy balance components in an inhomogeneous desert valley, **Journal of Arid Environments**, n. 37, p. 193-207, 1997.

MALDONADO, F. D. **Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semi-árido**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), 311 f. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE – São José dos Campos, São Paulo (INPE-12679-TDI/1007). 2004.

MARKHAM, B. L. & BARKER, L. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.3, p.517-523, 1987.

MEIRELES, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5 - TM na bacia do Acaraú – CE**. Dissertação de Mestrado, UFCE, Fortaleza, CE, Brasil, 2007.

MEIER, A. Measured cooling savings from vegetative landscaping. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, **American Council for an Energy Efficiency Economy**. 1990.

MINNIS, P.; MAYOR, S.; SMITH, W. L.; YOUNG, Jr., D. F. Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo. **IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing**, v. 35, p. 879-891, 1997.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Dados SRTM. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 01 de maio 2009.

MOCK, T. E. Construyendo un bosque urbano sostenible. **Revista AU – Arquitetura e Urbanismo**. p. 30-32. Dezembro de 2005.

MOREIRA, E.B.M.; GALVINCIO, J. D. Distribuição Espacial das Temperaturas à Superfície na cidade do Recife, utilizando imagens TM Landsat – 7. **Revista de Geografia UFPE/DCE**, v.24, n 3, p. 122-135, 2007.

MOREIRA, E. B. M. & NÓBREGA, R. S. Uso de imagens multiespectrais aplicada à análise espaço-temporal dos padrões de temperatura e albedo da superfície. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil., INPE p.0776. 2011

MOREIRA, T. C. L. **Interação da vegetação arbórea e poluição atmosférica na cidade de São Paulo**. Mestrado em Ciências (área de concentração: Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ – USP - Piracicaba, 2010.

MORERO, A. M.; SANTOS, R. F.; FIDALGO, E. C. C. Planejamento ambiental de áreas verdes: estudo de caso de Campinas-SP. **Revista do Instituto Florestal**, v19, n1, p. 19-30, jun. 2007.

MORSE, A., ALLEN, R. G., TASUMI, M., KRAMBER, W. J., TREZZA, R. & WRIGHT, J. **Application of the SEBAL Methodology for Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Through Remote Sensing**. Final Report, 220p, 2001.

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 correlation and Bowen ratio flux towers. **Remote Sensing of environment**. 2005.

NIEBERGALL, S.; LOEW, A.; MAUSER, W. Application of Very High-Resolution Satellite Imagery for Vulnerability Assessment in Mega Cities: A Case Study in Delhi/India. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 23, n. 28, p. 663-666, July 2007. Special issue on the 2007 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'07).

NOVACK, T. **Classificação da cobertura da terra e do uso do solo urbano utilizando o sistema InterIMAGE e imagens do sensor Quick-Bird**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). 214 p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos; (INPE-16594-TDI/1580), 2009.

NOVAS, M. F. B. **Mapeamento das estimativas do saldo de radiação e índices de vegetação em área do estado de Alagoas com base em sensores remotos**. Dissertação de mestrado em Meteorologia (UFAL). 158f. 2008

NOVO, E. M. L. M. (1989). **Sensoriamento Remoto – Princípios e aplicações**, São Paulo, 2. Ed. Edigard Bliicher Ltda, 277-283p. 1989

NOWAK, D.J., CRANE, D.E., STEVENS, J.C., IBARRA, M. Brooklyn's Urban Forest. United States Department of Agriculture, Forest Service, North-Eastern Forest Experiment Station, General Technical Report NE-290. Radnor, Pennsylvania. 2002

NUCCI, J.C. Qualidade ambiental e adensamento urbano. São Paulo: Humanitas/FAPESP, 2001, 236p.

OLIVEIRA, T. H.; MACHADO, C. C. C.; SILVA, J. S.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M.; SILVA, B. B. Índice de Umidade (NDWI) e Análise Espaço-Temporal do Albedo da Superfície da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física** 03 (2010) 55-69. Disponível em: <http://www.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/130/106>

OLIVEIRA, G. C. S.; JUNIOR, J. P. S.; NÓBREGA, R. S.; GIRÃO, O. Uma Abordagem da Geografia do Clima Sobre os Eventos Extremos de Precipitação em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física** 02 (2011) 238-251. 2011a

OLIVEIRA, J. S. S.; SOUZA, J. R.; OLIVEIRA, T. H.; GALVINCIO, J. D.; TORRES, M. F. A. Análise multitemporal de um fragmento de Mata Atlântica como gerador de ilha de amenidade em área urbana através do IVAS e a temperatura da superfície, estudo de caso: Mata do Engenho Uchôa, Recife – PE. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2011, Curitiba - PR. **Anais**. São José dos Campos - SP: INPE, 2011. v. 01. p. 1873-1880. 2011b

OLIVEIRA, T. H.; SILVA, J. S.; MACHADO, C. C. C.; RODRIGUES, G. T. A.; GALVINCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M. Avaliação espaço-temporal do Índice de área foliar e impacto das atividades antrópicas na Reserva Ecológica Estadual Mata São João da Várzea, Recife PE. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2011, Curitiba - PR. **Anais**. São José dos Campos - SP : INPE, 2011. v. 01. p. 2105-2112. 2011c

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2ª edição. Methuen, Nova Iorque e Londres, 435p. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=1j6rUfnnpS8C&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>. 1987

OTTELE, M. **Vertical greened surfaces and the potential to reduce air pollution and the improvement of the insulation value of buildings**. Delft University of Technology. 2010

PAIVA, Y. G.; RIBEIRO, A.; ALMEIDA, A. Q.; GLERIANE, J. M.; PEZZOPANE, J. E. M. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) através de Fotografias Hemisféricas e Índices de Vegetação em plantios clonais de Eucalipto. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, p. 2873-2880. 2009

PAULEIT, S., ENNOS, R., GOLDING, Y. Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change—a study in Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*. 71. 295–310. 2005

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **J. Appl. Meteorology**, 9, 857–861. 1970

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

PIELKE RA, MARLAND G, BETTS RA, CHASE TN, EASTMAN JL, NILES JO, NIYOGI DDS, RUNNING SW. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philos Trans R Soc Lond A Math Phys Eng Sci* 360:1705–1719. 2002

PINHO, C. M. D. **Análise orientada a objetos de imagens de satélites de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos**. 2005. 180 p. (INPE-14183-TDI/1095). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/11.23.13.40>. Acesso em: 11 de Agosto de 2011.

PONCE, V. M. Impacto hidrológico e ambiental da hidrovía no Pantanal Matogrossense. Disponível em: <http://ponce.sdsu.edu/hidroviareportportuguesechapter4.html>. Acessado em 10 de Abril de 2009.

PRINCE, S. D., & GOWARD, S. N. Global primary production: A remote sensing approach. **Journal of Biogeography** (1995), 22, 815–835.

RIBEIRO, M. T.; RAMOS, F. N.; SANTOS, F. A. M. Tree structure and richness in an atlantic forest fragment: distance from anthropogenic and natural edges. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1123-1132, 2009

ROBINOVE, C.J.; CHAVEZ, P.S.; GEHRING, D.; HOLMGREN, R. Arid Land Monitoring Using Landsat Albedo difference Images. **Remote Sensing of Environment**. v. 11, p. 133-156. 1981.

RODRIGUES, J. E. C. & LUZ, L. M. Mapeamento da cobertura vegetal da Área Central do município de Belém PA, através de sensores remotos de base orbital (sensor TM, LANDSAT 5 e sensor CCD, CBERS 2). In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 1063-1070.

ROUSE, J. W., JR., R. H. HAAS, J. A. SCHELL, AND D.W. DEERING. 1973. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Prog. Rep. RSC 1978-1. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station.

ROSSA, G. D.; HOPE, E. S.; SUSAN M. O.; MACKENZIE, A. R.; & HEWITT, C. N. Development and Application of an Urban Tree Air Quality Score for Photochemical Pollution Episodes Using the Birmingham, United Kingdom, Area as a Case Study. **Environmental Science & Technology**, 2005, 39 (17), p. 6730–6738. DOI: 10.1021/es050581y. 2005.

ROSSETTI, L. A. F.G.; PINTO, S. A. F.; ALMEIDA, C. M. Geotecnologias aplicadas à caracterização das alterações da cobertura vegetal intra-urbana e da expansão urbana da cidade de Rio Claro (SP). In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5479-5486.

SANTOS, T. V.; FONTANA, D. C.; 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, n.5, p.488-496, maio 2010

SAUER, T. S.; HATFIELD, J. C.; PRUEGER, J. H.; NORMAN, J. M. Surface energy balance of a corn residue-covered field.. **Agricultural and Forest Meteorology**, V. 89, p.155 - 168. 1998.

SELLERS, P. J.; DICKINSON, R. E.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; DENNING, A. S.; MOONEY, H. A.; NOBRE, C. A.; SATO, N.; FIELD, C. B.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, v.275, p.502-509, 1997.

SHAMS, J. C. A.; GIACOMELI, D. C.; SUCOMINE, N. M. Emprego da arborização na melhoria do conforto térmico nos espaços livres públicos. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana - REVSBAU**, Piracicaba – SP, v.4, n.4, p.1-16, 2009.

SILVA, A. P. N.; GUSMÃO, A. C. V. L.; GOMES, N. V. SILVA, B. B.; MOURA, G. B. A. Características do saldo de radiação na Amazônia Ocidental. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais**. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Belém – PA. 2010

SILVA, B.B. & CÂNDIDO, M. V. Determinação da evapotranspiração em escala regional através do SEBAL e imagens Landsat 5 – TM. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza. 2004

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005a.

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Determinação do albedo de áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005b.



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, p. 1-10, 2006.

SILVA, B. B. da. Determinação da evapotranspiração com imagens Landsat 5 – TM E SEBAL. **Apostila de Minicurso**. Recife – PE. 20p. 2009

SILVA, B. B. da; SILVA, S. T. A.; GOMES, H. B. Alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante sensoriamento remoto. **Mercator** – v. 9, p. 91 – 106. Número especial (1). Dez. 2010.

SILVA, B. B. da; GALVÍNCIO, J. D.; BORGES, V. P.; MACHADO, C. C. C. Estimativa do sequestro de carbono por Sensoriamento Remoto. In: **Mudanças climáticas e modelos ambientais: caracterização e aplicações**. Organizadora: Josiclêda Domiciano Galvínio – Recife: Editora Universitária da UFPE, 2012. 456 p.: il., figs., gráfs.

SIMPSON, J. R. & MCPHERSON, E. G. Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. **Atmospheric Environment** 32 (1): p. 69 – 74. 1998

SOUZA, W. M. de; AZEVEDO, P. V. Índices de detecção de Mudanças Climáticas derivados da precipitação pluviométrica e das temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 01 (2012). p. 143-159

SOUZA, C. L. & PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/LANDSAT para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de Pinus SPP. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 1537-1547.

SOUZA, M. A. A.; BITOUN, J.; MIRANDA, L. **Como anda a Região Metropolitana do Recife**. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: [http://www.observatoriodasmetropoles.ufrj.br/como\\_anda/como\\_anda\\_RM\\_recife.pdf](http://www.observatoriodasmetropoles.ufrj.br/como_anda/como_anda_RM_recife.pdf) Acesso em: 13-01-2012. 2006a

SOUZA, I. M. C. de, PALMERIM, M. S. dos S., CANTUÁRIA, P. de C. **Diagnóstico da arborização de praças públicas do município de Macapá-AP, Brasil**. Macapá: IMMES, 2006. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Florestas Tropicais). 66 p., 2006b.

TEIXEIRA, A. H. de 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. 2009.

TOL, C. V.; GASH, J. H. C.; MCNEIL, D. D.; ROBINSON, M. Average wet evaporation for a Sitka spruce forest derived using the eddy correlation-energy balance technique. **Journal of Hydrology**. V. 276, p.12-19. 2003.

TUCCI, C. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, Porto Alegre, RS. 2000. v.5, n.1, p. 61-68.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. Gerenciamento da Drenagem Urbana. Departamento de Hidromecânica e Hidrologia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001. Disponível em: <http://galileu.iph.ufrgs.br/joel/IPH014/Gerdre.pdf>. **Apostila de disciplina**. Acesso em: Maio de 2012.

THOMPSON, R. Chicago means green. **Conscious choice: the journal of ecology and natural living**. Abril, 2002.

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.

TSAY, C. M.; LIU, W. T. Estimativa de albedo, temperatura e NDVI do estado de São Paulo através de dados AVHRR do satélite NOAA. **Anais... XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro – RJ. P. 3842-3850. 2000

VENTURIERI, A. **Segmentação de imagens e lógica nebulosa para treinamento de uma rede neural artificial na caracterização do uso da terra na região de Tucuruí (PA)**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP. 1996

VIEIRA, P. B. H. **Uma visão geográfica das áreas verdes de Florianópolis, SC: estudo de caso do Parque Ecológico do Córrego Grande (PECG)**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2004.

VIEIRA, C. H. S. D.; BIONDI, D. Análise da dinâmica da cobertura vegetal de Curitiba, PR (de 1986 a 2004), utilizando imagens Landsat TM. **Revista Árvore** [online]. vol.32, n.3, pp. 479-487. ISSN 0100-6762. 2008

WANG, L.; XU, H. Study on the Information Extraction of Evapotranspiration and Its Relation with the Urban Heat Island and Urban Expansion in Fuzhou City with Its Surrounding Areas of SE China. **Anais... International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications**. 2008

WATRIN, O. S.; ROCHA, A. M. A. Levantamento da Vegetação Natural e do Uso da Terra no Município de Paragominas (PA) Utilizando Imagens TM/Landsat. Belém, EMBRAPA/CPATU, fev. 1992, 40 p. (EMBRAPA/CPATU, **Boletim de Pesquisa**, 124). 1992

WEBB, E. K. Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96, 67–90. 1970

WILSON, J. S.; CLAY, M.; MARTIN, E.; STUCKEY, D.; VEDDER-RISCH, K. Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.86, n.3, p. 303-321, 2003.

WOLF, K. L. Economia y valor público de los bosques urbanos. **Revista AU – Arquitetura e Urbanismo**. p. 32-35. Dezembro de 2005.

WHITE, M. A., THORNTON, P.E., RUNNING, S.W. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. **Biogeochemical Cycles**, 11, 217-234.

WHITFORD, V., HANDLEY, J., ENNOS, R. City form and natural process—indicators for the ecological performance of urban areas. *Landscape Urban Plann.* 57, 91–103. 2001

XAVIER, A. C., VETTORAZZI, C. A., MACHADO, R. E. Relação entre Índice de Área Foliar e frações de componentes puros do Modelo Linear de Mistura Espectral, usando imagens ETM+/LANDSAT. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.421-430, maio/ago. 2004

XAVIER, A. C., VETTORAZZI, C.A.. Monitoring leaf area index at watershed level Through NDVI from LANDSAT-7/ETM+ data. **Sci. Agric.** (Piracicaba, Brasil), v.61, n.3, p.243-252, May/June 2004

YUAN, F.; SAWAYA, K.E.; LOEFFELHOLZ, B.C.; BAUER, M.E. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 317 – 328

ZENG, H.; PELTOLA, H.; VAISANEN, H.; KELLOMAKI, S. The effects of fragmentation on the susceptibility of a boreal forest ecosystem to wind damage. **Forest Ecology and Management**, 257 (2009) 1165–1173

ZHOU, J.;HU, D.; WENG, Q. Analysis of surface radiation budget during the summer and winter in the metropolitan area of Beijing, China. **Journal of Applied Remote Sensing**, 04(01). DOI: 10.1117/1.3374329. 2010.