

**UNIVERSIDADE RURAL FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM RECIFE-PE  
POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS  
METEOROLÓGICOS DE SUPERFÍCIE**

**TACIANA OLIVEIRA DOS SANTOS**

**RECIFE**

**2011**

**TACIANA OLIVEIRA DOS SANTOS**

**IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM RECIFE-PE  
POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS  
METEOROLÓGICOS DE SUPERFÍCIE**

**Orientador:**

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura

**Co- orientador:**

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na área de Concentração: Engenharia de Água e Solo, Linha de Pesquisa Agrometeorologia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola (PGEA).

**RECIFE**

**2011**

**UNIVERSIDADE RURAL FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Parecer da comissão examinadora da dissertação de:**

**Taciana Oliveira dos Santos**

**Intitulada:**

**Identificação de ilhas de calor em Recife-PE por meio de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de superfície**

**A comissão examinadora considera o presente trabalho**

---

**Portanto, cumpridas todas as exigências regimentais, Taciana Oliveira dos Santos faz jus ao grau de Mestre em Engenharia Agrícola pela UFRPE.  
Recife, 08/09/2011.**

---

**1º Examinador: Heliton Pandorfi - UFRPE**

---

**2º Examinador: Fabrício Marcos Oliveira Lopes - UFRPE**

---

**3º Examinador: Bernardo Barbosa da Silva - UFPE**

---

**Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura – UFRPE**

“Nenhuma grande vitória é possível sem que tenha sido precedida de pequenas vitórias sobre nós mesmos”.

(L. M. Leonov)

## **DEDICO**

À Deus,  
por tudo o que ele representa em minha vida.  
Por ter iluminado os meus caminhos para que  
eu pudesse vencer os obstáculos e de não permitir  
que eu desistisse do meu sonho.

## **OFEREÇO**

Aos meus filhos Ana Beatriz e Augusto Rennan  
por ser minha fonte de inspiração.  
Ao meu marido Alexandro pelo amor e incentivo.  
Aos meus pais Ivan dos Santos e Irleide Cavalcanti  
de Oliveira, pelo apoio e incentivo.  
A minha avó Izaura Pereira de Oliveira (*in memoriam*)  
por sempre ter acreditado em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela graça, força e sustentação em todos os momentos da minha vida, e por ter me permitido chegar a esse momento tão especial, pois sem ele nada do que foi feito se realizaria.

Aos meus filhos Ana Beatriz e Augusto Rennan, pelo carinho e amor, que fez com que eu suportasse todas as dificuldades.

Aos meus pais, Irlaide e Ivan, pela vida, pelo amor, apoio e oportunidade criada.

A minha avó Izaura, grande exemplo de fé e força, que enquanto estavam fisicamente entre nós, torceu pelas minhas vitórias.

Ao meu marido Alexandro pelo apoio, carinho e presença em todo o desenvolvimento da dissertação de mestrado.

A minha irmã Fabiana e ao meu cunhado Amaro, pela participação, apoio e estímulo durante a realização do mestrado.

Ao meu tio Omir, que sonhou comigo, incentivou e hoje faz parte desta conquista.

A minha sogra Maria do Carmo e ao meu sogro Geraldo pelo apoio.

Ao meu orientador professor Dr. Geber Barbosa Moura pela importante orientação acadêmica, pelo incentivo, atenção, paciência, confiança e, principalmente, pelos ensinamentos que levarei por toda a minha vida.

Ao meu Co-orientador professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva pelo total apoio, dedicação, incentivo, sugestões e principalmente pela amizade sincera e acolhedora.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em especial a Raimundo Jaildo e Karoline, que disponibilizaram os dados meteorológicos de superfície para realização deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa durante os anos de 2009 a 2011.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de crescimento profissional.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelo aprendizado.

Aos amigos que me ajudaram neste percurso, incentivando, colaborando e participando. A estes com muito carinho agradeço: Alexsandro, Rogério, Gledson, Moacir e Celestino.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola Antônio, Waldirene, Caetano, Ricardo, Adriana, Rochele, Joel, Marcelo, Raqueli e Mara, pelo apoio e amizade.

Aos colegas de entrada no curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola Marcela, Thais, Sonyvagno e Samuel pelas horas de estudo e convivência.

A UFPE por ter me recebido de braços abertos no momento em que mais precisei.

As amigas da UFPE e UFCG, que foram verdadeiros anjos enviados por Deus em minha vida, Leidjane, Célia e Ana Cláudia.

Aos colegas da UFPE que tornaram minha vida mais feliz nos momentos de angústia: Albert, Dayana, Pedro, Janaina, dona Valquiria, Thiago, Alex e Elvis.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

# SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1 - Clima.....	20
2.1.1 - Clima Urbano .....	21
2.1.2 - Alterações do ecossistema urbano .....	22
2.2 - Ilhas de calor .....	24
2.2.1 - Desenvolvimento das ilhas de calor .....	26
2.3 - Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ilhas de calor .....	28
2.3.1 - Índices de vegetação: NDVI, SAVI e IAF .....	29
2.3.2 - Albedo da superfície .....	31
2.3.3 - Estimativa da temperatura da superfície .....	33
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	34
3.1 - Material.....	34
3.1.1 - Características da área de estudo .....	34
3.1.2 - Local das estações meteorológicas.....	36
3.1.3 - Utilização das imagens de satélite.....	37
3.2 - Métodos .....	38
3.2.1 - Etapa 1: Radiância espectral ( $L_{\lambda i}$ ) .....	38
3.2.2 - Etapa 2: Refletância ( $\rho_{\lambda i}$ ) .....	39
3.2.3 - Etapa 3: Albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ).....	40
3.2.4 - Etapa 4: Albedo da superfície ( $\alpha$ ) .....	40
3.2.5 - Etapa 5: Índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF).....	41
3.2.6 - Etapa 6: Emissividade ( $E_{NB}$ ).....	42
3.2.7 - Etapa 7: Temperatura da superfície (TS).....	42
3.3 - Teste de Significância estatística t-Student .....	43

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
4.1 - Temperaturas da superfície .....	46
4.2 - Albedo da superfície.....	58
4.3 - Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) .....	67
4.4 - Análise estatística dos bairros.....	76
5. CONCLUSÕES.....	78
6. REFERÊNCIAS .....	79
APÊNDICE.....	86

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

**DJ** - Dia Juliano

**dr** - Distância relativa Terra-Sol

**E** - Ângulo de elevação do Sol

**IAF** - Índice de Área Foliar

**INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia

**K** - Constante de calibração

**LAMEPE** - Laboratório de Meteorologia de Pernambuco

**LANDSAT** - Land Remote Sensing Satellite

**ND** - Número Digital

**NDVI** - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

**SAVI** - Índice de Vegetação Ajustada ao Solo

**SRTM** - Shuttle Radar Topographic Mission

**SAD 69** - South American Datum

**TM** - Thematic Mapper

**T<sub>s</sub>** - Temperatura da superfície

**UA** - Unidade astronômica

**UTM** - Universal Transversa de Mercator

**Z** - Ângulo zenital

**$\alpha$**  - Albedo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$L_{\lambda i}$  - Radiância espectral

$K_{\lambda i}$  - Irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera

$\rho_{\lambda i}$  - Refletância monocromática

$\rho_{IV}$  - Refletância do infravermelho próximo

$\rho_V$  - Refletância do vermelho

$\alpha_{toa}$  - Albedo planetário

$\alpha$  - Albedo

$\alpha_p$  - Radiação solar refletida pela atmosfera

$\tau_{sw}$  - Transmissividade atmosférica

$\epsilon_{NB}$  - Emissividade termal

**m** - Metros

**mm** - Milímetro

% - Porcentagem

**μm** - Micrômetro

$\pi$  - Pi

° - Grau

' - Minutos

'' - Segundos

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Representação esquemática da atmosfera urbana, ilustrando a classificação de duas camadas de modificação urbana. ....	24
<b>Figura 2:</b> Perfil clássico da ilha de calor de grandes centros urbanos. ....	27
<b>Figura 3:</b> Albedo de materiais urbanos. ....	32
<b>Figura 4:</b> Localização espacial da cidade do Recife. ....	34
<b>Figura 5:</b> Paisagens do meio urbano de Recife. ....	36
<b>Figura 6:</b> Fluxograma com as etapas do processamento das imagens. ....	38
<b>Figura 7:</b> Temperatura do ar das 9h e precipitação diária nas datas 01/08/1998 a 04/08/1998. ....	45
<b>Figura 8:</b> Temperatura do ar das 9h e precipitação diária nas datas de 03/09/2010 a 06/09/2010. ....	45
<b>Figura 9:</b> Temperatura da superfície para a cidade do Recife. ....	47
<b>Figura 10:</b> Perfis da temperatura da superfície para as seguintes datas: 04/08/1998 (A) e 06/09/2010 (B). ....	49
<b>Figura 11:</b> Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Dois Irmãos. ....	51
<b>Figura 12:</b> Temperatura da superfície nas datas 04/06/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Casa Amarela. ....	52
<b>Figura 13:</b> Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Santo Amaro. ....	53
<b>Figura 14:</b> Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Curado. ....	54
<b>Figura 15:</b> Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Pina. ....	55
<b>Figura 16:</b> Distribuição da temperatura da superfície nos bairros: Dois Irmãos (A), Casa Amarela (B), Santo Amaro (C), Curado (D) e Pina (E), para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	57
<b>Figura 17:</b> Albedo da superfície para a cidade do Recife. ....	59
<b>Figura 18:</b> Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Dois Irmãos. ....	60

<b>Figura 19:</b> Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Casa Amarela. ....	61
<b>Figura 20:</b> Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Santo Amaro.....	62
<b>Figura 21:</b> Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Curado.....	63
<b>Figura 22:</b> Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Pina. ....	64
<b>Figura 23:</b> Distribuição do albedo da superfície nos bairros: Dois Irmãos (A), Casa Amarela (B), Santo Amaro (C), Curado (D) e Pina (E), para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	66
<b>Figura 24:</b> Índice de vegetação para a cidade do Recife.....	68
<b>Figura 25:</b> Índice de vegetação para o bairro de Dois Irmãos nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	69
<b>Figura 26:</b> Índice de vegetação para o bairro de Casa Amarela nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	70
<b>Figura 27:</b> Índice de vegetação para o bairro de Santo Amaro nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	71
<b>Figura 28:</b> Índice de vegetação para o bairro do Curado nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	72
<b>Figura 29:</b> Índice de vegetação para o bairro do Pina nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	73
<b>Figura 30:</b> Distribuição do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) nos bairros: Dois Irmãos (A), Casa Amarela (B), Santo Amaro (C), Curado (D) e Pina (E), para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010. ....	75
<b>Figura 31:</b> Bairro de Dois Irmãos: avanço da urbanização na área de floresta.....	86
<b>Figura 32:</b> Bairro de Dois Irmãos. ....	86
<b>Figura 33:</b> Bairro de Casa Amarela: malha urbana e edificada. ....	87
<b>Figura 34:</b> Bairro de Casa Amarela. ....	87
<b>Figura 35:</b> Bairro de Santo Amaro: contraste da urbanização e a vegetação. ....	88
<b>Figura 36:</b> Bairro de Santo Amaro.....	88
<b>Figura 37:</b> Bairro do Curado: expansão da área urbana.....	89

<b>Figura 38:</b> Bairro do Curado.....	89
<b>Figura 39:</b> Bairro do Pina: uso e ocupações do solo.....	90
<b>Figura 40:</b> Bairro do Pina. ....	90

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Descrição das bandas e faixas espectrais do thematic mapper (TM) do satélite Landsat 5 com os correspondentes coeficientes de calibração mínima (a) e máxima (b) e irradiância espectral no topo da atmosfera ( $T_{OA}$ )..... 39
- Tabela 2:** Dados obtidos das imagens e outros parâmetros relativo a área de estudo: horário local, dia juliano (DJ), declinação do Sol ( $\delta$ ), o inverso do quadrado da distância Terra-Sol ( $dr$ ), cosseno do ângulo zenital ( $\cos Z$ ) e a radiação de onda curta incidente ( $R_{SI}$ ) ..... 44
- Tabela 3:** Valores médios obtidos da temperatura da superfície, desvio padrão e o valor do t calculado para cada bairro estudado..... 76
- Tabela 4:** Valores médios obtidos do albedo da superfície, desvio padrão e o valor do t calculado para cada bairro estudado..... 77
- Tabela 5:** Valores médios obtidos do índice de vegetação por diferença normalizada, desvio padrão e o valor do t calculado para cada bairro estudado. .... 77

# **Identificação de ilhas de calor em Recife-PE por meio de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de superfície**

## **RESUMO**

O fenômeno ilhas de calor urbano está diretamente relacionado com as atividades humanas e com o tipo de materiais e equipamentos empregados na expansão da malha urbana (concreto, asfaltos, telhados, etc.), os quais absorvem e conservam o calor proveniente da radiação solar, principalmente por não ser praticamente utilizado no processo evaporativo o que certamente alimenta o aumento da temperatura do ar nas cidades. Assim, este trabalho foi conduzido com objetivo analisar e identificar o fenômeno ilha de calor entre áreas urbanas da cidade do Recife-PE, a partir de imagens TM do satélite Landsat 5. Para a realização do estudo foram obtidas imagens da órbita 214 dos pontos 65 e 66, nas datas de 04/08/1998 e 06/09/2010. A partir do processamento das imagens foram geradas cartas de temperatura da superfície, albedo e NDVI para a cidade do Recife e cinco bairros selecionados (Pina, Santo Amaro, Casa Amarela, Dois Irmão e Curado), para analisar a dinâmica de transformação ocorrida na região de estudo. Por meio do perfil desenvolvido para área de estudo foi perceptível o aumento espacial e temporal das temperaturas da superfície no sentido centro-subúrbio, resultando em uma diferença de 6°C entre essas áreas. Os bairros com adensamento urbano, grande quantidade de construções verticais e horizontais, destacaram-se como os que possuem temperaturas mais elevadas, apresentando-se acima de 27°C, constatado nos bairros de Casa Amarela e Santo Amaro. Nas áreas onde ocorreu redução do índice de vegetação houve um aumento da temperatura da superfície em torno de 3°C. O surgimento das ilhas de calor pode ser atribuído aos seguintes fatores: concentração de edificações, que implica no acréscimo da temperatura; produção de energia antropogênica pela emissão de calor provenientes das indústrias, trânsitos e habitações; substituição da cobertura vegetal pelo asfalto; a radiação, causada pela emissividade de corpos.

**Palavras chave:** clima urbano, albedo, temperatura da superfície, índices de vegetação.

# Identification of heat islands in Recife-PE by means of remote sensing and surface data

## ABSTRACT

The phenomenon of urban heat islands is directly related to human activities and the type of materials and equipment used in the expansion of the urban fabric (concrete, asphalt, roofing, etc..), Which absorb and retain heat from sunlight, mainly because it is not just used to process Evaporative which certainly feeds the increase in air temperature in cities. Thus, this study was to analyze and identify the phenomenon of urban heat island between urban areas of Recife-PE, from TM images Landsat 5. For the study was obtained images from orbit 214 points 65 and 66, the dates of 04/08/1998 and 06/09/2010. From the image processing were generated letters of the surface temperature, albedo and NDVI to the city of Recife and five selected districts (Pina Santo Amaro, Casa Amarela, Dois irmãos and Curado ), to analyze the dynamics of transformation occurring in area study. Through the profile developed for the study area was perceived to increase spatial and temporal surface temperature toward the center-suburbs, resulting in a difference of 6°C between these areas. Neighborhoods with urban concentrations, lots of buildings vertical and horizontal, stood out as those at higher temperatures, performing over 27°C, found in the districts of Casa Amarela and the Santo Amaro. In areas where there was a reduction of the vegetation index was an increase in surface temperatures around 3°C. The emergence heat islands can be attributed to following factors: concentration buildings which implies in increased temperature; energy production anthropogenic issuing heat coming industries, transits and dwellings; replacement vegetation by asphalt; radiation, caused by emissivity bodies.

**Keywords:** climate urban, albedo, surface temperature, vegetation indexes

## 1. INTRODUÇÃO

---

Com o desenvolvimento das atividades antrópicas, o grande número de construções verticais, a impermeabilização do solo e a diminuição das áreas verdes, criam mudanças muito profundas na atmosfera local, modificando também a temperatura e interferindo na distribuição das chuvas na região (XAVIER et al., 2009).

Ayoade (1998) assegura que o maior impacto ocasionado pelo homem sobre o clima acontece nas áreas urbanas. Podem-se analisar as variações do ambiente urbano, nos vários níveis, tais como bairros, ruas, casas, ambientes internos.

Nas últimas décadas a cidade do Recife apresentou elevada expansão nos ambientes construídos. Fato que se observa pela intensificação na substituição das áreas verdes, por uma zona urbana edificada, impermeabilizando o solo e contribuindo para o aumento da entrada de calor proveniente dos elementos que possuem capacidade de absorção térmica e que contribuem para o aumento de temperatura nessas áreas (MOREIRA & GALVÍNCIO, 2009).

Dentre estes problemas ambientais, destaca-se a alteração do clima local – clima urbano – como um importante reflexo do impacto da ocupação e da atividade antrópica sobre o meio ambiente. Nesse novo clima local (clima urbano), é possível constatar diferenças nos elementos climáticos, conforme a influência da cobertura do solo, no que diz respeito à alteração no fluxo de matéria e energia sobre a atmosfera local. Convém salientar que o comportamento espacial simultâneo da temperatura se revela o mais importante elemento nesse complexo sistema, tendo como principal produto o fenômeno das ilhas de calor. Sendo assim, os efeitos resultantes destas transformações no meio ambiente afetarão diretamente a população local causando-lhes sensação de desconforto ambiental, pois conforme observado por Santos (1981) as condições ambientais das cidades quando são ultrajadas, criam uma natureza hostil.

Por meio do sensoriamento remoto, pode-se monitorar diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, possibilitando a tomada de decisão para a preservação ambiental (MOREIRA, 2003). Também tem assumido um importante papel na avaliação das alterações ambientais por meio de índices de vegetação, albedo, emissividade e temperatura da superfície terrestre que são elementos relevantes nos processos físicos à superfície em escala regional e global, estando envolvidos no

balanço de energia, evaporação e transpiração da vegetação, podendo ser utilizada como indicador de degradação terrestre e mudança climática (LOMBARDO, 1985).

A disponibilidade de informações concernentes aos aspectos climáticos de um dado lugar é de suma importância, uma vez que o clima é um fator determinante para o ser humano, e sendo por este modificado, deveria ser levado em consideração nos estudos relacionados ao planejamento urbano (MOREIRA & GALVÍNCIO, 2009).

Desta forma, na tentativa de analisar e identificar o fenômeno ilhas de calor na cidade do Recife-PE, mediante parâmetros derivados de imagens do satélite Landsat 5-TM, foi possível estabelecer correlação entre dados obtidos de NDVI, albedo e temperatura da superfície.

Diante do exposto, a presente pesquisa teve por objetivo principal Analisar e identificar o fenômeno ilhas de calor entre áreas urbanas do Recife-PE, a partir de imagens de satélite (Landsat 5-TM) nos anos de 04/08/1998 e 06/09/2010. Como objetivo específico Determinar a temperatura da superfície, o albedo e o NDVI a partir de imagens Landsat-5 para os anos de 04/08/1998 e 06/09/ 2010; Analisar e interpretar espacialmente e temporalmente a temperatura da superfície, NDVI e albedo da superfície da região em estudo nos dois anos estudados; Identificar e analisar regiões que sofreram as maiores modificações no albedo, temperaturas da superfície e nos índices de vegetação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 – Clima

A compreensão da dinâmica atmosférica para o homem se dá por conta das atividades que ele desenvolve, até mesmo para a sua sobrevivência como a agricultura, agropecuária, instalação de núcleos urbanos, deslocamentos, habitação, entre outros (CASTRO, 2008).

Ayoade (1998) entende clima como um conjunto de condições normais que dominam numa região, referindo-se aos dados atmosféricos obtidos das médias das observações durante certo intervalo de tempo, normalmente de anos.

O clima tem sido considerado como o estado médio das condições atmosféricas, representados pela temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, precipitação e velocidade do vento, dentre outros, sobre um intervalo de tempo superior a duas semanas. Já a tempo meteorológico corresponde ao estado atual ou médio sobre um período de tempo em geral inferior a sete dias. Na atualidade o conceito de clima tem sido ampliado e o mesmo tem sido tratado como um sistema muito mais complexo.

O clima é considerado um importante fator no estudo ambiental urbano e de fundamental importância para o meio ambiente. As alterações induzidas pelo processo de urbanização influenciam o balanço de energia, refletindo-se na maior capacidade de estocagem de calor em função das propriedades dos materiais empregados na construção do espaço urbano (BRANDÃO, 1996), além de alterar os fluxos de umidade e o sistema de circulação do vento (BEZERRA & BRANDÃO, 1997).

Em uma região o clima é determinado pelo padrão das variações dos vários elementos climáticos (radiação solar, comprimento de onda da radiação, temperatura do ar, umidade, ventos e precipitações) que devem ser considerados no desenho dos edifícios e no conforto humano (GIVONI, 1976).

Dessa forma, para melhor compreender o ambiente climático interno das cidades, é indispensável o entendimento das complexas relações existentes entre seu sítio urbano e as diversas funções desenvolvidas no espaço urbano (expresso pelo uso e ocupação do solo urbano), na análise climática local e no planejamento urbano (SAYDELLES, 2005).

As implicações da ação do homem sobre o meio têm se manifestado de forma catastrófica, levando a população mundial a repensar as ações da sociedade no meio ambiente e no futuro do planeta Terra. Dentre as diversas implicações que o homem provoca no meio está o aumento da temperatura, que ganha destaque no cenário mundial, na política econômica e social. As alterações climáticas podem ser sentidas mundialmente, através das mudanças que podem causar, mas há também os problemas locais, principalmente nos centros urbanos como as ilhas de calor (CASTRO, 2008).

### **2.1.1 - Clima Urbano**

O clima urbano é proveniente da modificação substancial do clima local que, em relação às condições climáticas das demais áreas circunvizinhas, apresenta maior quantidade de calor e modificações na composição da atmosfera (TUCCI, 2002).

Segundo Lombardo (1985), 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. É um mesoclima que está incluído no macroclima e que sofre, na proximidade do solo, influências microclimáticas derivadas dos espaços urbanos.

Algumas características físicas dos centros urbanos têm efeito sobre o clima desses locais. Entre elas, Givoni (1994) cita a localização das mesmas em uma determinada região; a densidade da área urbana; a orientação e largura das ruas; a altura relativa das edificações; os parques urbanos e áreas verdes particulares (BUENO, 1998).

As variações do ambiente urbano podem ser analisadas, nos vários níveis, tais como nos bairros, ruas, casas, ambientes internos. A ação ecológica natural, associada aos fenômenos urbanos, constitui o conjunto complexo de inter-relações que produzem o clima urbano (SOUZA, 1990). Desta forma as alterações no clima urbano têm ficado mais evidentes a cada dia (BUENO, 1998).

Esses impactos são decorrentes das mudanças das características térmicas das superfícies, das taxas de evaporação e dos novos padrões de circulação do ar, tendo como consequência denunciadora a formação das chamadas ilhas de calor, que correspondem ao aumento de temperatura de uma determinada área urbana em relação aos seus arredores (BUENO, 1998).

O clima gerado pela cidade, oriundo da interferência de todos os fatores que se processam sobre a camada de limite urbano e que agem alterando o clima em escala local tem seus efeitos mais diretos percebidos pela população por meio de manifestações que desorganizam a vida da cidade e deterioram a qualidade de vida de seus habitantes (MONTEIRO, 2003).

O estudo do clima urbano se baseia numa linha de pesquisa da climatologia responsável pela compreensão do clima da cidade, enfocando inicialmente uma análise espacial local (clima local) que se estende em níveis regional (clima regional) e global (clima zonal), destacando-se, em cada escala, a influência urbana (COLTRI, 2006).

A maioria dos estudos relacionados ao clima urbano desenvolve-se sem considerar as diferentes características do espaço urbano, sendo que na identificação das diferenças termo-higrométricas eram traçadas isolinhas considerando a cidade como um todo. Mendonça (1994) menciona que “poucos estudos se basearam no detalhamento prévio das diferenças do sítio e do uso do solo urbano como suporte para a compreensão da formação do clima derivado dos diferentes arranjos espaciais da cidade”. O mesmo ainda afirma que a formação de condições climáticas intraurbanas, derivadas diretamente da heterogeneidade da estruturação e funcionalidade urbanas, os quais geram paralelamente ao clima da cidade, ilhas de calor, ilhas de frio, mesoclimas, topoclimas e microclimas. Tal formação necessita de mais atenção dos estudiosos do clima das cidades.

### **2.1.2 – Alterações do Ecossistema Urbano**

O clima característico do ecossistema urbano é resultado de uma série de modificações e alterações climáticas originadas no processo de urbanização. García (1999) refere-se a essas modificações ou alterações climáticas:

- a) A substituição da superfície natural quando recoberta por diversos tipos de construções, constitui um conjunto compacto e denso, formando uma rugosidade, que provoca mudanças no movimento do ar na superfície;
- b) A substituição do solo natural por diversificados tipos de revestimentos;
- c) Os materiais de construção urbanos possuem propriedades físicas diversas das do solo natural, menor albedo e uma capacidade calorífica maior, além de uma boa

condutividade térmica o que provoca alterações no gradiente de radiação urbano e, conseqüentemente, promove influências sobre a temperatura do ar;

d) O calor oriundo das atividades humanas na cidade constitui um aspecto relevante, que provoca alterações no nível de energia. Esse calor antropogênico, acrescido dos aspectos comentados nas letras a e c, causa incremento na temperatura do ar, em relação à temperatura dos arredores. Além disso, também ocorre aumento do processo de convecção, o que causa o incremento da nebulosidade e, portanto, possíveis precipitações;

e) A turvação atmosférica é aumentada devido à presença de grande número de partículas oriundas dos processos de combustão urbanos e industriais. Isso provoca uma redução da visibilidade, os raios solares são interceptados, aumentando a possibilidade de formação de névoa.

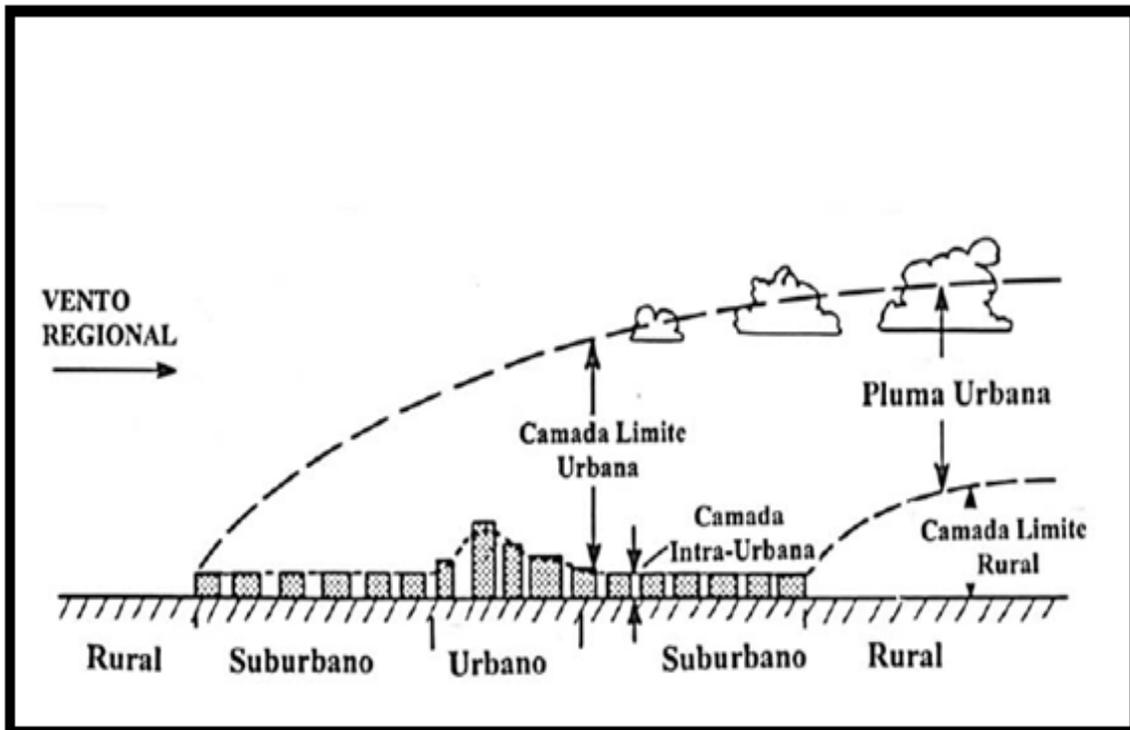
Clima urbano é o resultado da interferência de todos os fatores que se processam sobre a camada de limite urbano e que agem no sentido de alterar o clima em escala local. Seus efeitos mais diretos são percebidos pela população por manifestações capazes de desorganizar a vida da cidade e deteriorar a qualidade de vida de seus habitantes (MONTEIRO, 2003).

O calor antropogênico urbano oriundo da energia desprendida de diversos processos urbanos e industriais provoca alterações nas condições meteorológicas e conseqüentemente, no clima. Essas modificações geram camadas atmosféricas distintas (OKE, 1978 apud CARVALHO, 2001): a camada limite urbana (*Urban Boundary Layer – UBL*) e a camada intra-urbana ou camada de cobertura urbana (*Urban Canopy Layer – UCL*).

A camada limite urbana se estende do nível médio dos telhados até a área de influência da cidade na atmosfera, que varia de acordo com o tipo de tempo. Este fenômeno tem maior intensidade em locais com grande rugosidade (topografia artificial dos prédios, casas), capaz de proporcionar uma aerodinâmica singular. A camada intra-urbana ou camada de cobertura urbana se estende desde o solo até aproximadamente o nível médio das coberturas das edificações, e é produzida por processos em micro escala localizados nas ruas e entre prédios (ALVES, 2011).

Outro componente distinto é a pluma urbana ou penacho urbano. Carvalho (2001) a define como sendo um prolongamento, a sotavento da cidade, da camada limite urbana sobre a área rural e sua respectiva camada limite. A pluma urbana recebe influências das condições meteorológicas existentes, considerando-se que só é percebida

quando ocorre um fluxo de vento dominante sobre a cidade, com força capaz de transladar o efeito da camada-limite urbana sobre a área rural (CARVALHO, 2001). Na Figura 1, observa-se a localização dessas camadas.



**Figura 1:** Representação esquemática da atmosfera urbana, ilustrando a classificação de duas camadas de modificação urbana.

**Fonte:** Ilustração de OKE apresentada por Carvalho, 2001 p. 89.

Os estudos de clima urbano são imprescindíveis, principalmente nas cidades brasileiras ainda pouco estudadas. Mesmo as pequenas e médias cidades muitas vezes apresentam características que modificam o clima local e que estão diretamente ligadas às formas de uso e de ocupação do solo.

## 2.2 – Ilhas de Calor

Dentre as alterações climáticas ocorridas devido ao processo de urbanização, a ilha de calor constitui um dos fenômenos mais estudados e evidentes, constituindo-se numa característica universal do clima urbano, principalmente nas metrópoles.

Os efeitos que surgem a partir das transformações no meio ambiente pelo homem, vêm sofrendo consequências negativas, afetando diretamente a população local causando-lhes sensação de desconforto de diversas formas. Alterações essas, causadas no espaço natural pelas cidades proporcionam a formação de um clima urbano e de

vários microclimas urbanos, derivados, principalmente, de diversas alterações no ambiente das cidades: retirada da cobertura vegetal e substituição por áreas construídas; introdução de novas formas no relevo; concentração de edificações, que em conjunto aumentam a rugosidade urbana; concentração de equipamentos e pessoas ocasionada pelas atividades diárias que liberam calor antropogênico na atmosfera aumentando a temperatura do ar; impermeabilização do solo; canalização do escoamento superficial; lançamento concentrado e acumulado de partículas e gases na atmosfera pela combustão dos veículos e indústrias; e produção de energia artificial (MENDONÇA, 1994; SAYDELLES, 2005).

O intenso e desordenado crescimento urbano na cidade do Recife-PE, traz consigo consequências de ordem ambiental. As características do uso do solo da Região de Recife apresentam um elevado percentual de áreas cobertas por asfalto e concreto, as quais são superfícies capazes de converter e armazenar a radiação solar incidente em maior grau do que as áreas vegetadas. O conjunto dos fatores acima é capaz de determinar o aparecimento de um gradiente horizontal de temperatura conhecido como o fenômeno da ilha de calor urbana (STULL, 1993).

A detecção de ilhas de calor no ambiente urbano pode subsidiar o planejamento urbano, na medida em que a elevação da temperatura provoca o estabelecimento de zonas de menor pressão que, por sua vez, facilita a movimentação do ar em direção aos pontos mais quentes e conseqüentemente, o transporte de poluentes para essas áreas (AMORIM, 2005).

As ilhas de calor podem ser analisadas sob os aspectos das variações espaciais e temporais, fatores que vão determinar a intensidade e frequência do fenômeno. As variações espaciais ocorrem tanto no ambiente intra-urbano como no inter-urbano e podem ser verificadas nos níveis escalares verticais e horizontais.

Na revisão dos trabalhos de clima urbano para o Nordeste do Brasil, realizados por Moura (2008) foi constatada uma tendência das ilhas de calor se configurar no período da manhã e na situação sazonal de verão e outono, seguida da estação de primavera com intensidades variando entre 1,4°C a 8°C, com valor médio de 3°C.

Com relevo pouco acidentado, as temperaturas mais altas são observadas nas áreas mais densamente construídas e com pouca vegetação. Horizontalmente há diminuição da temperatura à medida que há a aproximação da zona rural, caracterizada por um gradiente horizontal mais brando. Este esquema geral é interrompido por locais quentes e frios associados com densidades de prédios altos e baixos (AMORIM, 2000).

Em locais de latitudes médias ou de clima temperado, a ilha de calor urbano pode ter um efeito benéfico, uma vez que reduz a sensação de desconforto térmico gerado pelas baixas temperaturas no inverno, bem como, o consumo de energia utilizada na geração de aquecimento artificial. Mas, segundo Oliveira (1991), constitui-se em ameaça à saúde humana nos climas tropicais, porque a temperatura média do ar pode atingir valores insuportáveis.

### **2.2.1 - Desenvolvimento das Ilhas de Calor**

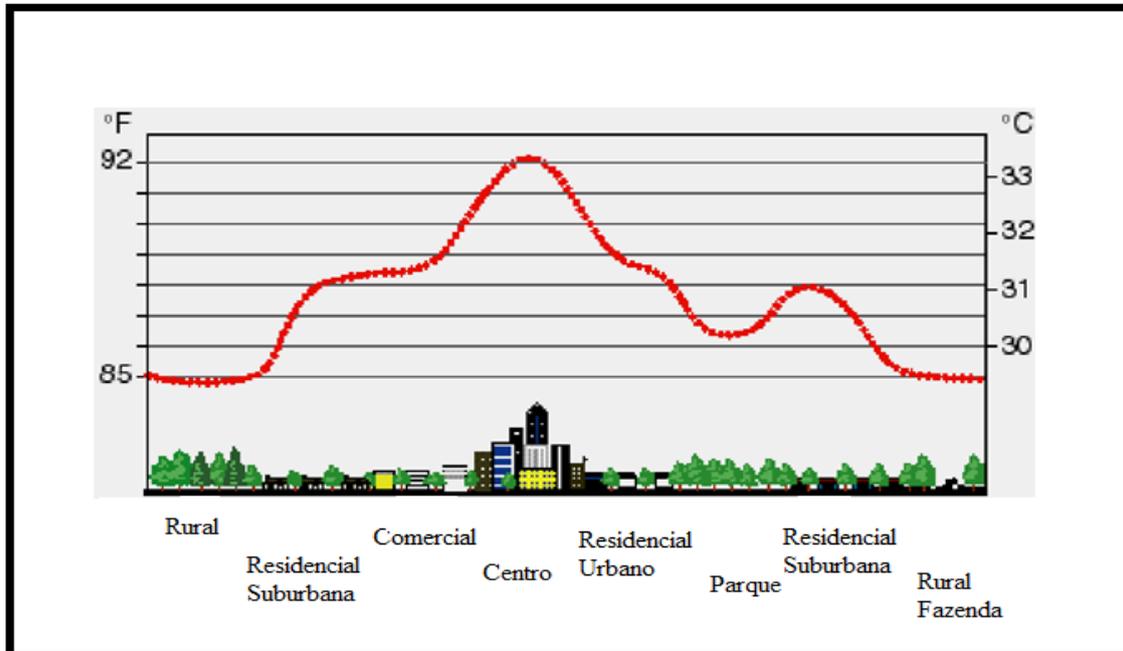
Os processos derivados da urbanização alteram as propriedades térmicas e hidrológicas da superfície terrestre, que, por consequência, modificam também o balanço de radiação na superfície das áreas urbanas.

De acordo com Oke (1987) vários fatores contribuem para o desenvolvimento de uma ilha de calor urbana. Um deles é a concentração relativamente alta de fontes de calor nas cidades. As propriedades térmicas dos materiais das construções urbanas também facilitam a condução de calor mais rapidamente que o solo e a vegetação das áreas rurais, contribuindo para um aumento no contraste de temperatura entre essas regiões. A perda de calor durante a noite, por radiação infravermelha para a atmosfera e para o espaço, é parcialmente compensada nas cidades pela liberação de calor das fontes antropogênicas. Além disso, segundo Freitas & Dias (2005), os altos edifícios entre ruas relativamente estreitas aprisionam energia solar por de múltiplas reflexões dos raios solares.

Uma ilha de calor urbana se desenvolve de acordo com Freitas & Dias (2005), na maior parte das vezes quando ventos de escala sinótica são fracos, pois fortes ventos misturariam o ar da cidade e das áreas rurais e diminuiriam o contraste de temperatura. Nessas condições, em algumas grandes áreas metropolitanas o aquecimento relativo da cidade, comparado com seus arredores, pode promover uma circulação convectiva do ar: ar relativamente quente sobe sobre o centro da cidade e é trocado por ar mais frio e mais denso, convergente das zonas rurais. A coluna de ar ascendente acumula aerossóis sobre a cidade formando uma nuvem de poeira (poluentes), que pode tornar-se muitas vezes mais concentrada sobre uma área urbana que sobre as áreas rurais.

Esse fenômeno ocorre, geralmente, na área central das cidades, na qual se observa um núcleo mais quente (área urbana), rodeado por regiões mais frias (áreas rurais), de modo que as isotermas (linhas de mesma intensidade de temperatura)

representam uma ilha com contornos fechados ao redor deste núcleo (Figura 2). Trata-se de um exemplo bastante conhecido da modificação das condições atmosféricas pela ação humana (GOUVÊA, 2007).



**Figura 2:** Perfil clássico da ilha de calor de grandes centros urbanos.

**Fonte:** Adaptado de Oke (1975).

De acordo com Oke (1981) as principais causas da formação da ilha de calor (IC) nas cidades são:

- 1- O aumento da entrada de radiação de onda longa, devido à absorção da mesma que sai e é reemitida pelos poluentes da atmosfera urbana;
- 2- Menores perdas da radiação de onda longa nas ruas e canyons urbanos, devido à redução do fator de visada do céu pelos prédios e edifícios;
- 3- Maior absorção da radiação de onda curta pela superfície urbana, devido ao efeito do albedo das construções;
- 4- Grande estocagem de calor durante o dia, devido às propriedades térmicas dos materiais urbanos e grande emissão de radiação durante a noite;
- 5- Adição de calor antropogênico na área urbana, devido à utilização de aquecedores e refrigeradores, transportes e operações industriais;
- 6- Menor evaporação, devido à retirada da vegetação e à diminuição de superfícies líquidas, o que diminui o fluxo de calor latente ou evapotranspiração e aumenta o fluxo de calor sensível.

Assim, a formação do fenômeno das ilhas de calor urbano está relacionada com as atividades desempenhadas pelos seres humanos e com a intensidade dos materiais e novos equipamentos empregados na expansão das malhas urbanas (concreto, asfaltos, telhados, etc.), os quais absorvem e conservam o calor proveniente da radiação solar, não sendo utilizado para nenhum outro processo e certamente alimentam positivamente o aumento da temperatura do ar sobre as cidades.

Em posse de tudo isso, pode-se definir a ilha de calor urbana como um fenômeno que acontece em cidades com alto grau de urbanização, caracterizada, de acordo com Stull (1993), pelo surgimento de gradientes horizontais de temperatura. E assim a temperatura do ar em áreas densamente urbanizadas é maior que a temperatura das áreas rurais adjacentes (SANTAMOURIS, 2001).

### **2.3 – Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ilhas de calor.**

As áreas urbanas apresentam características estruturais que tornam complexo o seu estudo, pois não apresentam continuidade ou homogeneidade. São áreas formadas por diversos materiais que refletem ou irradiam a energia eletromagnética de maneiras diversas, apresentando grande amplitude espectral e altas frequências espaciais dificilmente separáveis. A heterogeneidade espectral é devida à composição dos alvos, que são formados por diversos materiais: concreto e asfalto nas vias, construções, telhados de diferentes materiais, solo exposto, áreas verdes, praças, árvores, etc. (IWAI, 2003). Desse modo, é necessária a utilização de instrumentos e metodologias para analisar o quanto cada elemento constituinte das diferentes regiões urbanas contribui na geração das ilhas de calor.

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto aplicado em estudos de clima urbano vem se destacando, pois além de oferecer visões de diferentes escalas, permite a utilização de dados do infravermelho termal. A superfície urbana ao receber radiação eletromagnética do Sol, terá parte dessa energia absorvida e parte refletida. Isso faz com que os sensores que operem na faixa do infravermelho termal dentro da janela atmosférica possam medir no topo da atmosfera a radiação emitida pela superfície terrestre. Esses dados, após sofrerem uma correção dos efeitos atmosféricos, podem ser convertidos em temperatura da superfície a qual é estimada de acordo com a lei de Planck que estabelece que quanto maior a temperatura, maior a quantidade de energia emitida por um corpo negro em um comprimento de onda, (DASH et al., 2002).

Em estudos de grandes centros urbanos diversos autores têm destacado a importância do monitoramento das ilhas de calor por meio do uso de imagem de satélites (VULKOVICH, 1983; LOMBARDO, 1985; CARNAHAM & LARSON, 1990; OKE et al., 1991; GOLDREICH, 1995; PEREZ et al., 2001; WENG, 2001; ARFINELD, 2003; PONGRACZ et al., 2005; MOREIRA & GALVÍNIO, 2007).

O estudo pioneiro das ilhas de calor urbano, por meio de imagens termais, foi realizado, por Rao (1972), o qual combinou os dados de satélite com medições de temperatura junto à superfície urbana.

Voogt & Oke (2003) afirmam que o advento da tecnologia de sensoriamento remoto termal, por satélites e plataformas em aeronaves, permitiu novas possibilidades de observações sobre as ilhas de calor urbano, bem como, a compreensão de suas causas e combinações com os arranjos urbanos.

O emprego de imagens do satélite Landsat no estudo das cidades tem sido considerado satisfatório para a identificação e análise do uso e ocupação do solo, distribuição das construções, biodiversidade, morfologia, funcionalidade, poluição (Mendonça, 2003).

Moreira & Galvínio (2007), analisando a distribuição espacial das temperaturas da superfície da cidade do Recife, através de imagens do satélite Landsat 7, de maio 2002, encontraram temperaturas superiores a 33°C em áreas com elevado adensamento construtivo, evidenciando as ilhas de calor urbano.

### **2.3.1 - Índices de Vegetação: NDVI, SAVI e IAF**

Nos últimos anos, o avanço da tecnologia espacial possibilitou o desenvolvimento de sensores remotos capazes de fazer o monitoramento da variação espectral da vegetação que ocupa uma determinada área. O comportamento espectral dos alvos da superfície, traçados a partir da refletância nas bandas do visível (V) e infravermelho próximo (IV), permite acessar informações sobre a vegetação de uma região, o que possibilita delimitação das áreas com cobertura vegetada em todo o globo (BRAGA et al., 2000).

A distribuição espacial da cobertura vegetal em áreas urbanas revela aspectos da qualidade ambiental, podendo indicar qualidade de vida da população que vive nesses espaços. Atualmente, existem diferentes procedimentos para o levantamento da cobertura vegetal em áreas urbanas por meio de trabalho de campo, pela análise de

cartas topográficas de grande escala, pela interpretação de fotografias aéreas e pela interpretação e tratamento digital de imagens de satélite de base orbital (LOMBARDO, 1985; NUCCI & CARVALHEIRO, 1999).

Várias técnicas já foram estudadas com o objetivo de se determinar quantitativamente e qualitativamente o estado da vegetação a partir de imagens de satélites. Índices de vegetação foram então desenvolvidos a fim de reduzir o número de parâmetros presentes nas medidas multiespectrais (FILHO et al., 2007). Esses índices, gerados a partir de dados de sensoriamento remoto, constituem uma importante estratégia para monitoramento das alterações naturais, ou produzidas pelo homem, nos ecossistemas. Tais índices têm sido usados na estimativa de vários parâmetros da vegetação como, por exemplo, o índice de área foliar (HOLBEN et al., 1980; BARET & GUYOT, 1991).

A análise integrada dos atributos do meio físico urbano, tais como a topografia, o clima e a cobertura vegetal, associados ao uso e à ocupação do solo, possibilita a elaboração de um diagnóstico ambiental mais consistente de uma determinada área. Este tipo de análise é recomendada por autores como Lu & Weng (2006), Mascaró (1996) e Weng et al. (2004), entre outros.

A presença de Ilhas de Calor na maioria das vezes está relacionada a pouca ou nenhuma vegetação, e como parâmetro de medida os índices de vegetação são utilizados como indicadores da presença de cobertura vegetal. Os índices de vegetação, dentre outras coisas, ressaltam o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre (MOREIRA, 2003). Desse modo, para identificar se as áreas apresentam ou não vegetação foi utilizado índice de vegetação (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) que é o índice de vegetação mais conhecido e utilizado para estudos de caracterização e monitoramento da vegetação, dentre outras aplicações (ROUSE et al., 1973).

Weng et al. (2004) observaram ainda que há um campo amplo para os estudos em sensoriamento remoto envolvendo modelos de mistura espectral, com enfoque sobre a fração vegetação, como um indicador da ocorrência de ilhas urbanas de calor. Isto porque, diferentemente do NDVI, a fração vegetação considera o vetor completo da refletância espectral, conforme o número de bandas do sensor e a faixa do espectro selecionada.

### 2.3.2 - Albedo da Superfície

Mudanças locais causadas por edificações e ocupações inadequadas provocaram alterações no conforto urbano ambiental. Notam-se, também, diferentes padrões de refletividade, ou de albedo, que são altamente dependentes dos materiais empregados na construção civil, sendo perceptível que dependendo do albedo, mais radiação será absorvida e mais calor será emitido pela superfície. A partir do sensoriamento remoto via satélite, pode-se avaliar o albedo da superfície, que é um parâmetro relevante nos processos físicos da superfície terrestre em escala regional e global (ARAÚJO, 2007).

A medida do albedo da superfície é facilmente obtida quando se dispõe de medições de radiação de onda curta incidente e refletida pela superfície, o que se torna oneroso para monitoramento de grandes regiões. Assim, o sensoriamento remoto se apresenta com uma forma alternativa para estimativa do albedo.

De acordo com Silva et al. (2009), o albedo é dado pela razão entre a energia refletida e a quantidade de energia eletromagnética incidente. Este é um importante parâmetro utilizado nas ciências atmosféricas, na climatologia, no sensoriamento remoto, na astronomia, na hidrologia, dentre outras.

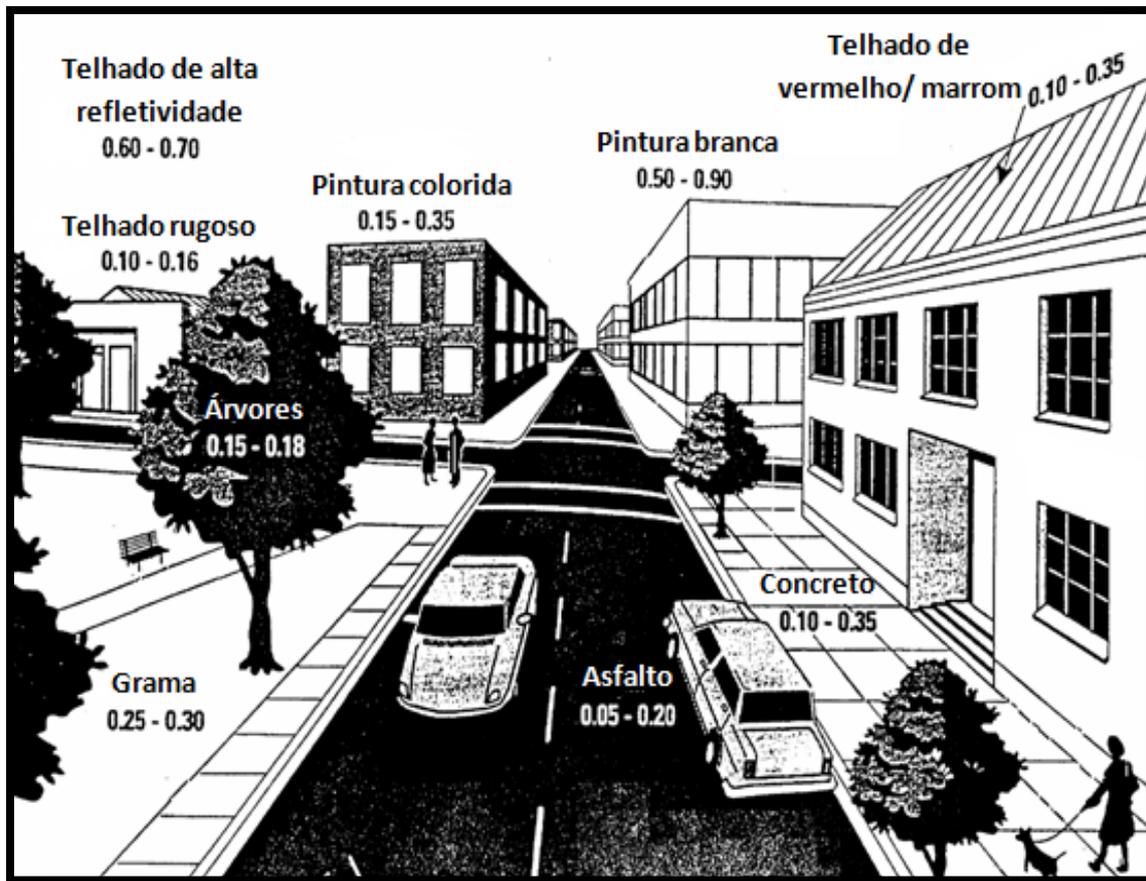
Por ser o albedo um parâmetro biofísico em que a sua variação ocorre de acordo com o tipo de alvo sobre o qual incide a radiação eletromagnética, variações desse parâmetro são excelentes indicadores de mudanças no cenário de uma região (SILVA et al., 2005).

O albedo varia conforme as características físico-químicas das superfícies e com o ângulo zenital. Em superfícies vegetadas parcialmente, o albedo depende da textura do solo e das condições fisiológicas da copa da planta. Já em um solo seco, o albedo é expressivamente maior que o observado em um solo úmido (HARTMANN, 1994).

As áreas urbanas são compostas por diversos materiais que possuem características peculiares, capazes de interferir de forma direta no albedo. Em virtude da elevada heterogeneidade dos materiais e elementos utilizados na expansão das malhas urbanas, expressos pelas diversas formas de uso e ocupação do solo, existe diferentes padrões de refletividade ou de albedos (LOMBARDO et. al., 2003).

O papel dos materiais de construção é decisivo no ganho térmico. Seu desempenho é determinado pelas características óticas e térmicas, sendo o albedo e a emissividade seus mais significantes fatores (COSTA et. al., 2007). Materiais com baixo albedo e emitância, aumentam a transferência de energia para o ar ambiente,

aquecendo-o. Como no ambiente urbano há uma grande heterogeneidade de materiais, como telhado, pintura, asfalto, calçada, concreto, grama e árvores, o albedo apresenta diversos valores (Figura 3).



**Figura 3:** Albedo de materiais urbanos.

**Fonte:** Huang et al., 1990.

As cidades têm sua massa edificada constituída por materiais com diferentes propriedades radiativas, que influenciam – junto com a vegetação e as superfícies pavimentadas ou não – na quantidade de energia térmica acumulada e irradiada para sua atmosfera, expressas principalmente pelo albedo, pela absorbância e pela emitância (MASCARÓ,1996).

A refletância de radiação de onda curta pela edificação depende tanto do albedo das superfícies refletidas como da sua geometria urbana, sendo um dos principais efeitos da morfologia dos conjuntos arquitetônicos a redução do albedo das superfícies verticais em relação as horizontais, produzindo albedos urbanos médios de 15%, menores que os da área rural, exceto os das florestas.

### 2.3.3 - Estimativa da Temperatura da Superfície

Nas grandes capitais do Brasil, observa-se um número crescente de estudos das implicações das variações da temperatura da superfície nas áreas urbanizadas dessas regiões, através de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, tendo a vantagem de proporcionar em tempo sincronizado uma densa rede de dados de temperatura para toda uma cidade e ou para uma área distinta da mesma (NICHOL, 1996).

A utilização de imagens de satélites também vem sendo empregadas para estudar a temperatura intra-urbana e suas variações e relacioná-los com características da superfície. Além disso, auxiliando nos estudos de clima urbano nas análises de qualidade ambiental, considerando que esta refere-se ao padrão estabelecido de satisfação ambiental, considerando os elementos naturais (meio físico e biológico) e os antrópico (economia, cultura, relações sociais).

Assim, os dados de temperatura da superfície quando sobrepostos com as informações de uso e ocupação do solo configuraram-se em um indicador importante para a análise de qualidade ambiental urbana.

Segundo estudo realizado por Lo & Quatrocchi (2003), a análise multitemporal de imagem de satélite visa verificar se houve aumento na temperatura média da superfície ao longo dos anos, o que pode ser um indicador do surgimento ou intensificação do fenômeno ilha de calor. A variação espacial da temperatura, tratado em estudos como o de Weng et al. (2004), teve o objetivo de verificar padrões de variação da temperatura da superfície ou ainda, diferenças de tipos de uso e cobertura da terra.

Para caracterizar as ilhas de calor são utilizados dados de temperatura obtidos a partir de imagens de satélite, corrigidos para os efeitos da atmosfera, chamados de temperatura da superfície. Este fenômeno é mais bem caracterizado ao se medir e comparar as temperaturas do ar de uma estação rural e de uma estação urbana (LO & QUATTROCHI, 2003).

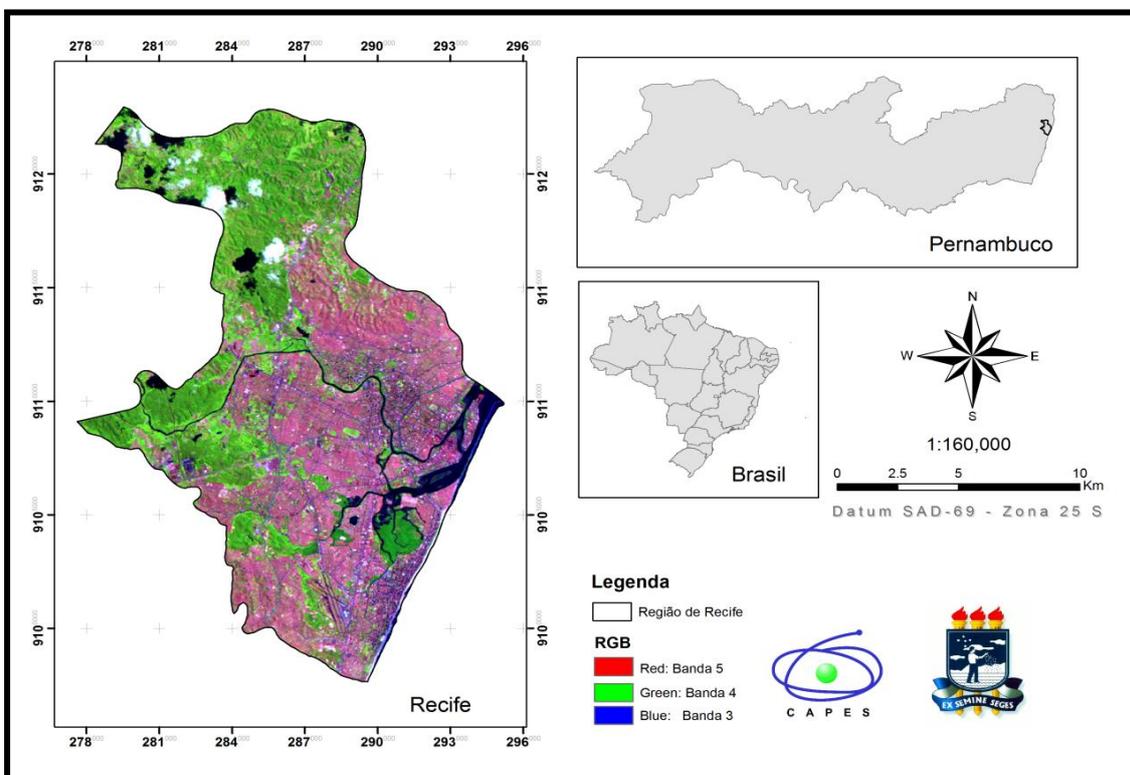
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 – Material

##### 3.1.1 - Características da área de Estudo

A área de estudo é a cidade do Recife, capital de Pernambuco, que está situada entre a latitude  $8^{\circ}04'03''\text{S}$  e longitude  $34^{\circ}55'00''\text{W}$  de Greenwich, com altitude média que varia entre 4 a 10 metros acima do nível do mar, compreendendo uma área de 218  $\text{km}^2$  (Figura 4).

A região possui clima tropical quente e úmido ( $\text{As}'$ ), de acordo com a classificação de Köeppen (2004), e tem temperatura média anual de  $25,4^{\circ}\text{C}$  e amplitude de  $2,8^{\circ}\text{C}$ , com umidade relativa do ar médio anual de 84%. O regime de chuvas caracteriza-se por dois períodos distintos: uma estação seca ou de estiagem, que se prolonga de setembro a fevereiro (primavera-verão) e uma estação chuvosa, de março a agosto (outubro-inverno), com índice pluviométrico anual médio superior a 1.600 mm (ATLAS AMBIENTAL DO RECIFE, 2000).



**Figura 4:** Localização espacial da cidade do Recife.

De acordo com Moreira & Galvêncio (2007) devido à sua baixa latitude a radiação solar é alta, onde a incidência dos raios solares é mais intensa e quase que constante o ano inteiro. A nebulosidade, típica dos trópicos úmidos, contribui para a radiação difusa, ou seja, aquela refletida pelas nuvens (KÖPPEN, 1948).

Aspectos relevantes da paisagem urbana do Recife e características da área de estudo são apresentados na Figura 5. Na primeira fotografia (Figura 5.A) apresenta a avenida Norte, importante elo viário entre as zonas norte e central da cidade, em que a concentração elevada de edifícios de um lado e do outro grandes quantidades de morros com aglomeração de casas. A segunda fotografia (Figura 5.B), destaca um trecho do corredor da Av. Conde da Boa Vista situado no centro da cidade, com o excessivo número de veículos em trânsito.

Em seguida, é apresentada a parte central da cidade (Figura 5.C), em que observa-se a concentração elevada de edifícios nessa região da cidade (a de ocupação mais antiga) onde estão localizados os bairros do Recife, Santo Antonio, São José, Santo Antônio e Cabanga. Estes bairros fazem parte do centro histórico do Recife e apresentam uma população remanescente com moradias edificadas em alagados à margem do rio Capibaribe. Estas áreas apresentam características semelhantes, com edifícios comerciais, comércio, fluxo de pessoas, antigos casarões, ruas estreitas e asfaltadas, calçadas, galpões com cobertura de alumínio e amianto, além de baixa presença de vegetação (MOREIRA & GALVÊNCIO, 2007). A quarta fotografia (Figura 5.D) apresenta um retrato do bairro de Dois Irmãos, uma das áreas verdes da cidade, que consiste parte da Mata Atlântica. Essas áreas de grande cobertura vegetal possivelmente exercem influência nas temperaturas locais, pois grande parte da radiação que é incidente nestas áreas é absorvida pelos corpos d'água e vegetação, sendo o restante da radiação refletida para atmosfera, propiciando temperaturas amenas (MOREIRA & GALVÊNCIO, 2007).

E a última paisagem apresentada é o Bairro de Boa Viagem (Figura 5.E), localizado na zona sul da cidade do Recife, que apresenta os maiores valores de densidade populacional em torno de 13.296 hab./Km<sup>2</sup>. Caracteriza-se por apresentar a maior concentração de edificações, na maioria destinada a uso residencial e empresarial, com uso do solo bastante explorado com elevado adensamento construtivo.



**Figura 5:** Paisagens do meio urbano de Recife.

### 3.1.2 - Local das estações meteorológicas

Para melhor compreensão da distribuição espacial e temporal dos elementos climáticos na área de estudo, principalmente a temperatura, foram utilizados dados de duas estações meteorológicas da região de Recife, através do Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

As estações estão situadas nos bairros da Várzea (INMET) cujas coordenadas geográficas são: 08°30'00" de latitude sul e 34°57'00" de longitude Oeste e altitude de 10m, a outra está localizada no bairro de San Martim (LAMEPE), com altitude de 6,5m, coordenadas de 8°03'52" de latitude sul e 34°55'29" de longitude Oeste.

As análises dos dados diários de temperatura e precipitação foram feitas dias antes e no dia do imageamento, através dos dados coletados nas duas estações climatológicas.

### 3.1.3 – Utilização das imagens de satélite

Para a realização do estudo foram obtidas imagens na órbita 214 (pontos 66 e 65), que é a cena que abrange a área de Recife, referentes aos dias 04 de agosto de 1998 e 06 de setembro de 2010, os quais se referem aos dias Julianos (DJ) 216 e 249, respectivamente.

Os anos foram definidos pela disponibilidade das imagens, e a escolha dos meses citados por apresentar céu claro (pouca cobertura de nuvens).

As imagens foram obtidas através do site de geração de imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em formato geotiff. As imagens TM do satélite Landsat 5, possuem resolução espacial de 30x30 metros exceto a banda 6, com 120x120 metros, cobrindo cada pixel uma área de 900m<sup>2</sup>, resolução temporal de 16 dias e radiométrica de oito bits.

Antes do processo de tratamento digital de imagens propriamente dito, foi realizado um pré-processamento, que consistiu no empilhamento das sete bandas, seguindo de registro das imagens empregando correção geométrica com polinomial de 1ª ordem através da utilização de uma imagem de referência ortorretificada. Estas imagens foram obtidas no site <http://www.landsat.org>. As imagens utilizadas com projeção UTM e referenciadas ao datum WGS84. Como os dados utilizados neste trabalho estão referenciados ao datum SAD-1969, as imagens tiveram que ser reprojetadas para o datum SAD-1969. Em seguida, foi feito o processo de formação do mosaico, que consiste na junção de duas imagens retificadas geometricamente para formar uma imagem. Depois utilizando a base vetorial do município de Recife, fez-se o recorte das imagens. A partir das observações realizadas na área em questão, foram escolhidos cinco bairros de diferentes zonas, para analisar a dinâmica de transformação da região em estudo, são eles: Pina, Santo Amaro, Casa Amarela, Dois Irmãos e Curado.

Para uma melhor visualização dos dados obtidos, elaboraram-se mapas mostrando a distribuição das temperaturas da superfície, Índice de vegetação e o albedo da superfície, para cada área analisada. Para isto, foi utilizado o programa ArcGis versão demonstrativa.

### 3.2 – Métodos

No processamento das imagens foram desenvolvidos modelos matemáticos entre as bandas espectrais através do programa Erdas 9.1 pela ferramenta Model Maker, tendo como resultado as imagens necessárias para a obtenção do albedo, NDVI e temperatura da superfície. No diagrama abaixo (Figura 6) estão representadas todas as etapas e modelos elaborados para desenvolvimento da pesquisa.

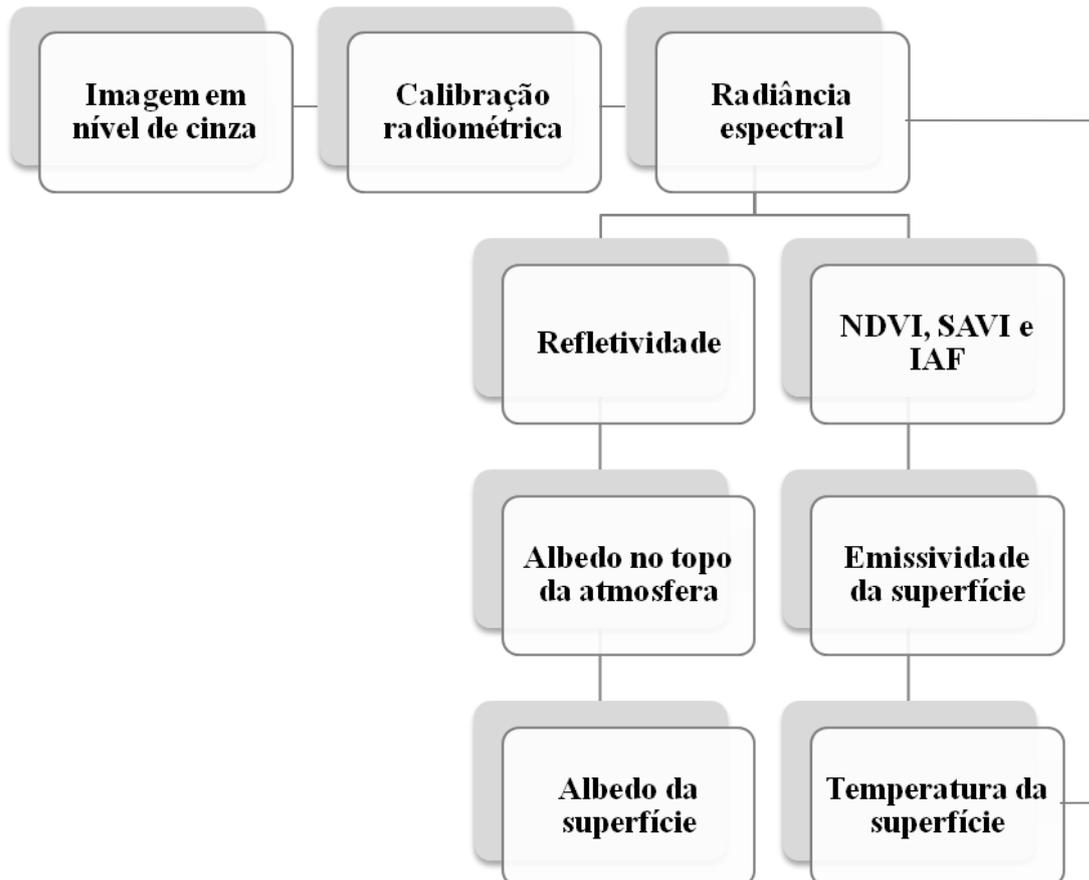


Figura 6: Fluxograma com as etapas do processamento das imagens.

#### 3.2.1 – Etapa 1: Radiância espectral ( $L_{\lambda i}$ )

A primeira variável a ser obtida corresponde a radiância espectral de cada banda ( $L_{\lambda i}$ ), ou seja, a efetivação da calibração radiométrica em que o número digital (ND) de cada pixel da imagem é convertido em radiância espectral monocromática; essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda medida a nível do satélite Landsat (altitude de 705 km), para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, enquanto a banda 6 para referida

radiância representa a energia emitida por cada pixel, segundo a equação proposta por Markham & Barker (1987):

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

em que  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ),  $a_i$  o coeficiente de calibração (radiância mínima) de cada banda ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ );  $b_i$  o coeficiente de calibração (radiância máxima) de cada banda ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ); ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255) e  $i$  corresponde às bandas (1, 2, 3,... e 7) do satélite Landsat 5 – TM. Os coeficientes de calibração utilizados (Tabela 1) são os propostos por Chander et al.(2007).

**Tabela 1:** Descrição das bandas e faixas espectrais do Thematic Mapper (TM) do satélite Landsat 5 com os correspondentes coeficientes de calibração mínima (a) e máxima (b) e irradiância espectral no topo da atmosfera ( $T_{OA}$ ).

Bandas	Faixa Espectral ( $\mu m$ )	Coeficiente de Calibração ( $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )				Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ( $T_{OA}$ ) ( $Wm^{-2} \mu m^{-1}$ )
		De 01/03/1984 até		Após		
		04/05/2003		02/04/2007		
		a	b	a	b	
1. (azul)	0,45 - 0,52	-1,52	152,10	-1,52	169,00	1957
2. (verde)	0,52 - 0,60	-2,84	296,81	-2,84	333,00	1826
3. (vermelho)	0,63 - 0,69	-1,17	204,30	-1,17	264,00	1554
4. (IV- próx.)	0,76 - 0,90	-1,51	206,20	-1,51	221,00	1036
5. (IV- médio)	1,55 - 1,75	-0,37	27,19	-0,37	30,20	215,0
6. (IV- termal)	10,4 - 12,5	1,2378	15,303	1,2378	15,303	-
7. (IV-médio)	2,08 - 2,35	-0,15	14,38	-0,15	16,50	80,67

### 3.2.2 – Etapa 2: Refletância ( $\rho_{\lambda i}$ )

A refletância monocromática de cada banda ( $\rho_{\lambda i}$ ) mede a capacidade de um objeto de refletir a energia radiante e é definido pela razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente que é obtida segundo a equação (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005):

$$\rho_{\lambda i} = \left( \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos z \cdot d_r} \right) \quad (2)$$

onde:  $L_{\lambda_i}$  é a radiância espectral de cada banda ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ),  $k_{\lambda_i}$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ),  $Z$  é o ângulo zenital solar ( $^\circ$ ) e  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol ( $r$ ) em determinado dia do ano (DJ), que de acordo com Iqbal (1983), é dado por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos (DJ \cdot 2\pi / 365) \quad (3)$$

em que DJ é o dia sequencial do ano correspondente ao dia da geração das imagens. O cosseno do zenital do Sol foi obtido com a seguinte fórmula:

$$\cos z = \cos \left( \frac{\pi}{2} - E \right) \quad (4)$$

onde E é o ângulo de elevação do Sol, obtido no cabeçalho de cada imagem.

### 3.2.3 – Etapa 3: Albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ )

O albedo planetário ( $\alpha_{toa}$ ) é aquele não ajustado à transmissividade atmosférica a qual, por sua vez, é obtida pela combinação linear das refletâncias monocromáticas.

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (5)$$

em que:  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho_4$ ,  $\rho_5$  e  $\rho_7$  são as refletâncias das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

### 3.2.4 – Etapa 4: Albedo da superfície ( $\alpha$ )

Após a obtenção do albedo planetário fez-se o cômputo do albedo da superfície. Considerando-se que a atmosfera terrestre produz interferência na radiação solar e na radiação refletida, o albedo calculado no topo da atmosfera carece de correções devidas aos processos de absorção e espalhamento. Essas correções podem ser obtidas pela equação (BASTIANSSEN et al., 1998; SILVA et al., 2005; ALLEN et al., 2002):

$$\alpha = \left( \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw^2}} \right) \quad (6)$$

em que:  $\alpha_{\text{toa}}$  é o albedo planetário,  $\alpha_p$  é a refletividade da atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas para o modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) é recomendado o uso do valor de 0,03,  $\tau_{\text{sw}}$  é a transmissividade atmosférica que foi obtida pela equação (ALLEN et al., 2002):

$$\tau_{\text{sw}} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (7)$$

onde  $z$  representa a altitude de cada pixel da imagem, que foi determinado com base no modelo de elevação digital – DEM gerado pelo SRTM, junto ao site <http://srtm.csi.cgiar.org>., referente ao mosaico SB-25-Y-C e SB-25-Y-A, permitindo uma melhor representação das variações de relevo na região estudada. A resolução espacial do SRTM é de 92m x 92m, e por isso foi reamostrado para 30m x 30m.

### 3.2.5 – Etapa 5: Índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF)

O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do Infravermelho próximo ( $\rho_{\text{iv}}$ ) e do vermelho ( $\rho_v$ ), pela soma das mesmas, de acordo com a Equação 8.

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{iv}} - \rho_v}{\rho_{\text{iv}} + \rho_v} \quad (8)$$

em que correspondem:  $\rho_{\text{iv}}$  e a refletividade da bandas 4 (infravermelho próximo) e  $\rho_v$  e a refletividade da banda 3 (vermelho), do TM Landsat 5. O NDVI atua como um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a +1. Para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1; já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI) que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, é utilizado a expressão (HUETE, 1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{\text{iv}} - \rho_v)}{(L + \rho_{\text{iv}} + \rho_v)} \quad (9)$$

Onde:  $L$  é uma constante que depende do tipo de solo e o valor mais utilizado é 0,5. O Índice de área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador de biomassa de cada pixel da imagem, tendo sido computado pela seguinte equação empírica obtida por Allen et al. (2002):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (10)$$

### 3.2.6 – Etapa 6: Emissividade ( $\epsilon_{NB}$ )

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, é necessário introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal  $\epsilon_{NB}$ , qual seja: 10,4 – 12,5  $\mu\text{m}$ . Segundo Allen et al. (2002), a emissividade  $\epsilon_{NB}$  podem ser obtidas, para  $NDVI > 0$  e  $IAF < 3$ , segundo:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033IAF \quad (11)$$

### 3.2.7 – Etapa 7: Temperatura da Superfície ( $T_s$ )

Para a obtenção da temperatura da superfície ( $T_s$ ) são utilizados a radiância espectral da banda termal  $L_{\lambda,6}$  e a emissividade  $\epsilon_{NB}$  obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela seguinte expressão (SILVA et al., 2005; ALLEN et al., 2002):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB}K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (12)$$

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 radiação relativa à banda termal do Landsat 5 –TM (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005).

### 3.3 - Teste de Significância Estatística t-Student

Foram realizados testes estatísticos do tipo t-Student, com o objetivo de discutir a significância estatística das alterações ocorridas na região em estudo, e como consequência, o surgimento das ilhas de calor entre os anos observados. Nas áreas em questão obtiveram-se a média e desvio padrão do albedo, NDVI e temperatura da superfície, que foram usados no referido teste.

O teste t-Student é um teste que verifica se os valores médios entre os anos estudados diferem estatisticamente, levando-se também em consideração a variabilidade da distribuição de cada ano. Além da diferença entre as médias de cada amostra, o teste t leva em consideração a variância (S) e o número de graus de liberdade (n-1), que dependem do tamanho das amostras (n). A estatística é dada por:

$$\alpha = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{EP(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} \quad (13)$$

onde o numerador é a diferença entre as médias e  $EP(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)$  é o Erro Padrão da diferença entre as médias, que foi calculado pela equação:

$$EP(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \sqrt{\frac{S_p^2}{n_1} + \frac{S_p^2}{n_2}} \quad (14)$$

em que:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (15)$$

Estabeleceu-se, como Hipótese Nula -  $H_0$  que não havia diferença entre as médias da variável biofísica (albedo, temperatura da superfície e NDVI) e como nível de significância -  $\alpha$  o valor  $\alpha = 0,01$ . Para esse nível de significância o t- crítico ( $t_{crit}$ ) foi igual a 3,2905. Portanto, quando o valor de t (Equação 13) for superior ao  $t_{crit}$ , se rejeita  $H_0$ , o que evidencia que houve alteração na média.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os dados instantâneos, referentes às imagens obtidas pelo satélite Landsat 5 para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010, e outros parâmetros utilizados, calculados para estimar a transmissividade, que é utilizado na obtenção do albedo da superfície.

O ângulo zenital, como pode ser visto, apresentou uma variação acentuada quando comparada as duas datas. Essa alteração é decorrente do movimento aparente do Sol ao longo do ano, fazendo com que a declinação do Sol varia-se entre  $5,79^\circ$  a  $17,45^\circ$ .

**Tabela 2:** Dados obtidos das imagens e outros parâmetros relativos à área de estudo: horário local, dia juliano (DJ), declinação do Sol ( $\delta$ ), o inverso do quadrado da distância Terra-Sol (dr), cosseno do ângulo zenital ( $\cos Z$ ) e a radiação de onda curta incidente ( $R_{S\downarrow}$ ).

Data	Hora (GMT)	DJ	$\delta$ (graus)	dr	Cos Z	$R_{S\downarrow}$ ( $Wm^{-2}$ )
04/08/1998	12:07'48''	216	17,45	0,9723	0,732	729,5
06/09/2010	12:19'42''	249	5,79	0,9864	0,835	843,1

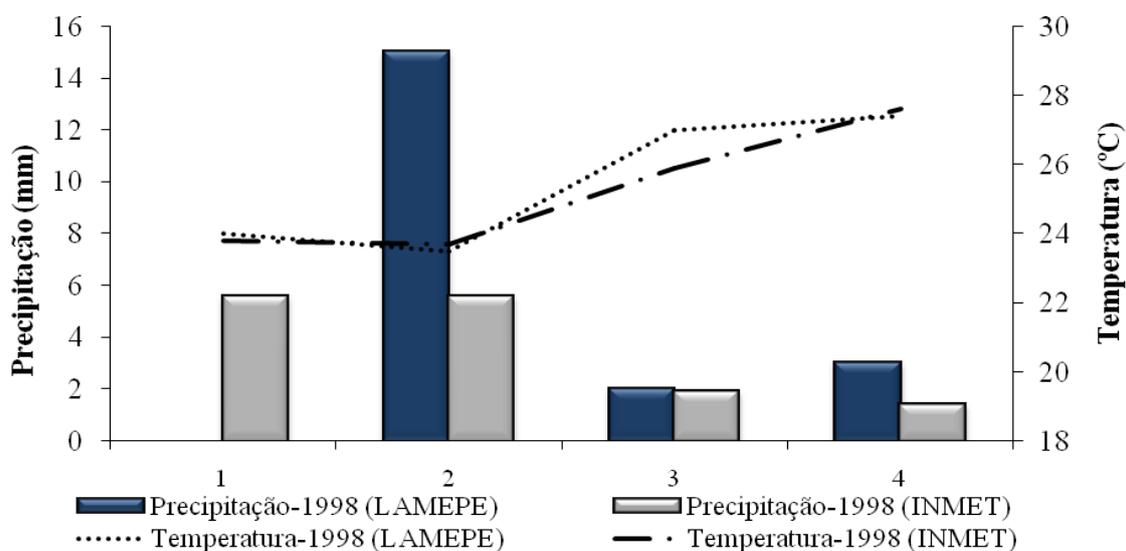
Observa-se ainda que os valores de  $R_{S\downarrow}$  sofreram uma grande variação entre as datas de 04/08/1998. Essas diferenças podem ser atribuídas à maior incidência de irradiação solar (menor ângulo zenital) fazendo com que a mesma atingisse um valor ligeiramente mais elevado.

Nas Figuras 7 e 8, estão representados a temperatura do ar e a precipitação diária registrada nas estações do INMET e LAMEPE, que estão localizadas nos bairros da Várzea e San Martin, respectivamente.

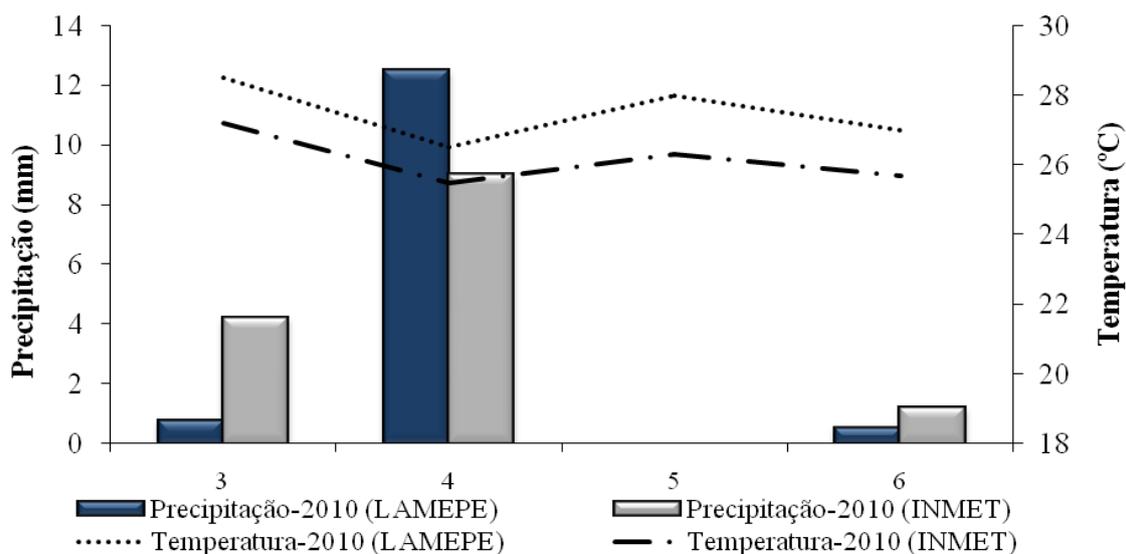
Analisando a temperatura do ar para a data de 04/08/1998 (Figura 7), percebe-se que não houve grande diferença entre os valores obtidos nas duas estações, enquanto que para a data de 06/09/2010 (Figura 8), como pode ser observado ocorreu uma grande variação nos valores de temperatura do ar entre as estações, com uma diferença de  $2,2^\circ C$ , uma vez que, os locais onde se encontram as mesmas apresentam características distintas em seu entorno. As temperaturas mais elevada obtidas na estação do LAMEPE pode estar associada ao fato da mesma encontrar-se próxima a área urbana, onde a vegetação existente em sua maioria foi substituída por áreas com asfalto e concreto, alterando as características térmicas da área. Já a estação do INMET apresentou as

menores temperaturas, por estar localizada em área com maior concentração de vegetação e com menor área impermeabilizada.

Nas mesmas Figuras já mencionada, também está representada a precipitação diária, para os dias que antecederam o imageamento da área de estudo. Constatando que a precipitação ocorrida antes da data 04/08/1998 foi maior quando comparada a data 06/09/2010, devido às datas que foram estudadas encontrarem-se em estações climáticas distintas, tal fato pode ter contribuído para influenciar a precipitação ocorrida nesse período.



**Figura 7:** Temperatura do ar das 9h e precipitação diária nas datas 01/08/1998 a 04/08/1998.



**Figura 8:** Temperatura do ar das 9h e precipitação diária nas datas de 03/09/2010 a 06/09/2010.

#### 4.1 – Temperaturas da superfície

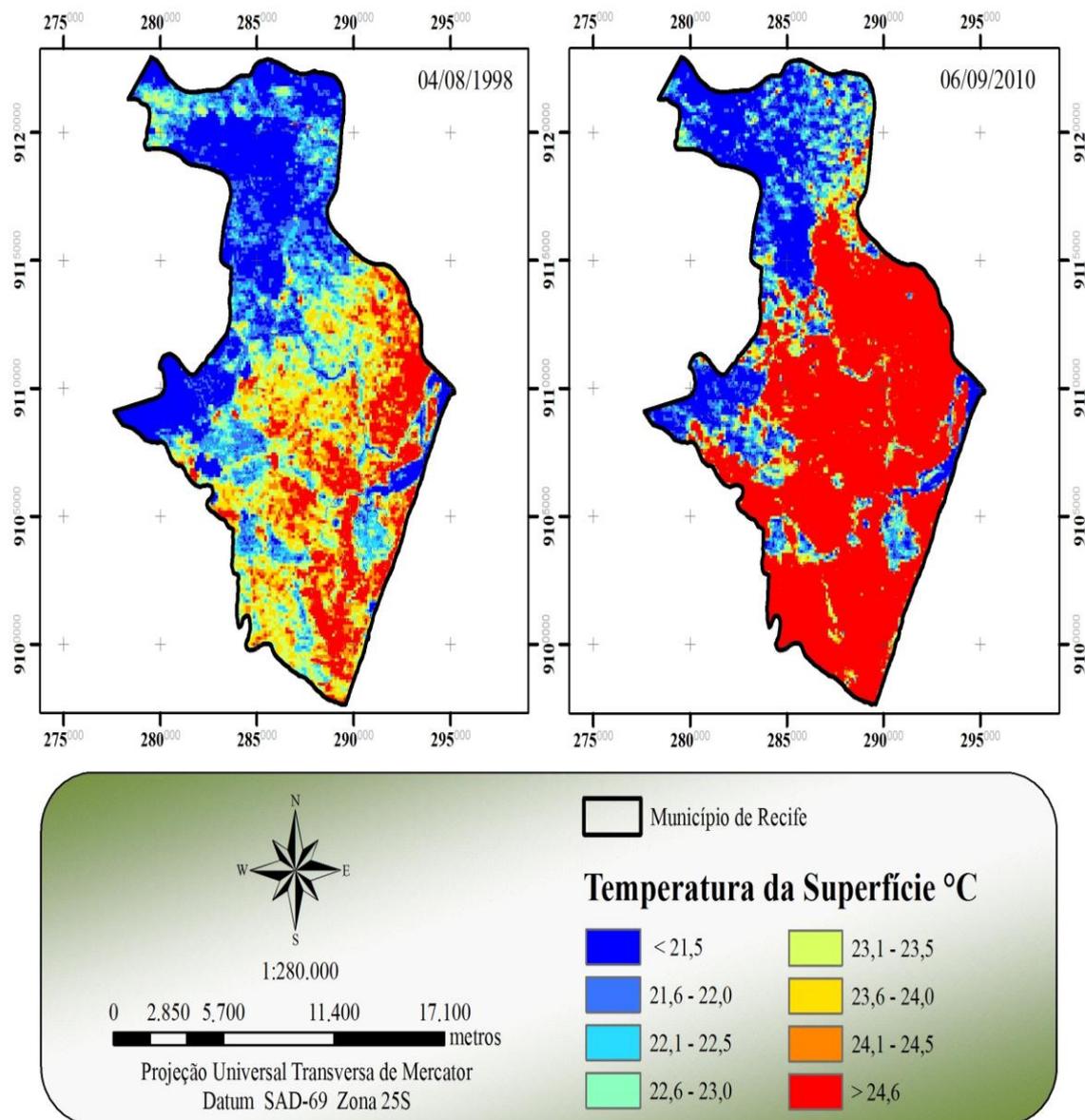
A análise da carta de temperatura da superfície ( $T_s$ ) para a cidade do Recife (Figura 9) possibilita observar que a área urbana da região estudada apresenta uma considerável variação espacial da  $T_s$  para as datas de 04/08/1998 e 06/09/2010, com diferenças que podem ser superiores a  $2^\circ\text{C}$ . Isto pode ser decorrente da expansão das áreas urbanizadas, que apresenta locais com excessiva quantidade de construções e baixa concentração de áreas verdes, tornando a temperatura mais elevada que as áreas vizinhas não urbanizadas.

Em termos gerais, a classe que apresenta valores superiores a  $24,5^\circ\text{C}$  foi detectada na área do perímetro urbano, resultante da substituição de superfícies naturais, como vegetação e solo nu, por materiais, como asfalto e concreto, que reduzem a cobertura vegetal e alteram radicalmente as propriedades de impermeabilidade, radiativas, térmicas e aerodinâmicas da área urbana (OKE & MAXWELL, 1975). Portanto, regiões urbanizadas são tipicamente mais eficiente em armazenar energia solar, como calor, na parte interna de suas infra-estruturas, podendo absorver e armazenar duas vezes mais calor que áreas não urbanizadas (CHRISTEN & VOGT, 2004). Estes mesmos materiais artificiais também possuem geralmente alta condutividade térmica, transferindo o calor de forma mais rápida e eficiente para outras camadas de construção (KATO & YAMAGUCHI, 2005). Essas modificações ocorridas no espaço urbano podem ocasionar efeitos significantes sobre o tempo e o clima local (KALNAY & CAI, 2003).

A classe que apresenta valores inferiores a  $21,5^\circ\text{C}$  corresponde a áreas com maior volume de vegetação, que ajuda a diminuir a temperatura da superfície e do ar através do efeito direto de sombreamento e da evapotranspiração. Áreas com vegetação densa reduzem a quantidade de radiação solar que chega à superfície abaixo da copa, uma vez que parte da radiação solar incidente é absorvida pelas folhas e utilizada para fotossíntese, e outra fração é refletida de volta para a atmosfera. Como consequência, o sombreamento diminui a temperatura da superfície e, por outro lado, superfícies mais frias acabam também por reduzir o calor transmitido para as edificações e a atmosfera. Também foi observado que em áreas que apresentavam corpos hídricos os valores de temperatura eram semelhantes aos encontrados em áreas de vegetação.

Outro fator que deve ser levado em consideração na diminuição da temperatura da superfície é a precipitação ocorrida nos períodos estudados, observa-se que na data

de 04/08/1998 ocorreu uma maior quantidade de chuva quando comparada com a data 06/09/2010, visto que essa data encontra-se no final do período da estação de inverno.



**Figura 9:** Temperatura da superfície para a cidade do Recife.

Para uma análise mais detalhada da temperatura da superfície foi projetado o perfil em transecto da cidade do Recife para as datas já mencionadas (Figura 10), sendo possível perceber que o perfil traçado para a data 04/08/1998 apresentou locais com menores temperaturas da superfície, variando entre 20 a 22°C, correspondente a áreas com presença de vegetação ou corpos d'água, enquanto que os valores mais elevados variaram entre 25 a 27°C, para áreas impermeabilizadas. Em relação à data 06/09/2010 as maiores temperaturas também se apresentaram em áreas urbanizadas, com variação

de 29 a 31°C. Já com relação às menores temperaturas observou-se que não houve alterações quando comparada a outra data, permanecendo entre 20 a 22°C.

Fica evidenciado que áreas com presença de vegetação e corpos d'água favorecem a diminuição da temperatura da superfície, em decorrência da baixa incidência de radiação solar que chega a superfície e ainda pelos altos níveis de fluxo de calor latente, devido à uma maior quantidade de água disponível para os processos de evaporação e evapotranspiração. Enquanto que em áreas urbanas por ser constituída de materiais não evaporativos e impermeáveis, como asfalto e concreto, a radiação líquida à superfície é convertida em fluxo de calor sensível, resultando num aumento considerável da temperatura da superfície. As propriedades radiativas e térmicas dos materiais urbanos, em particular, emissividade e condutividade térmica, também apresentam forte influência no desenvolvimento do fenômeno ilha de calor, visto que elas determinam como a radiação de onda curta e longa é refletida, absorvida, emitida e armazenada.

Ainda pode ser observado que a temperatura da superfície aumenta da periferia em direção a parte central da cidade do Recife, resultando em uma diferença de temperatura entre as zonas periféricas e o centro de 6°C para a data 04/08/1998 e 10°C para a data 06/09/2010. Essas alterações resultam várias interferências antrópicas sofridas na região. No perfil também se observa que a temperatura da superfície para a data de 06/09/2010, em geral, foi mais alta em relação à data 04/08/1998.

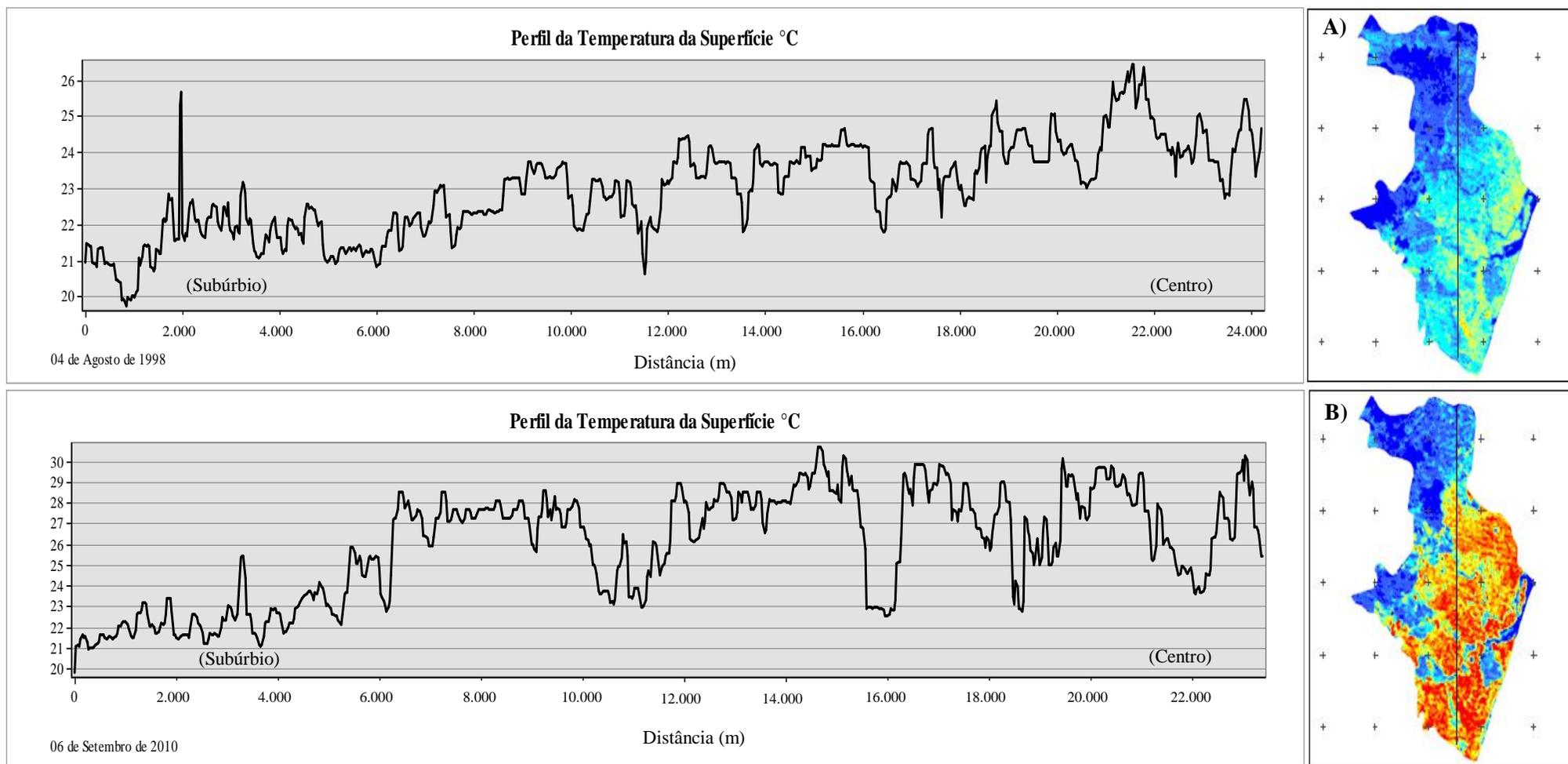
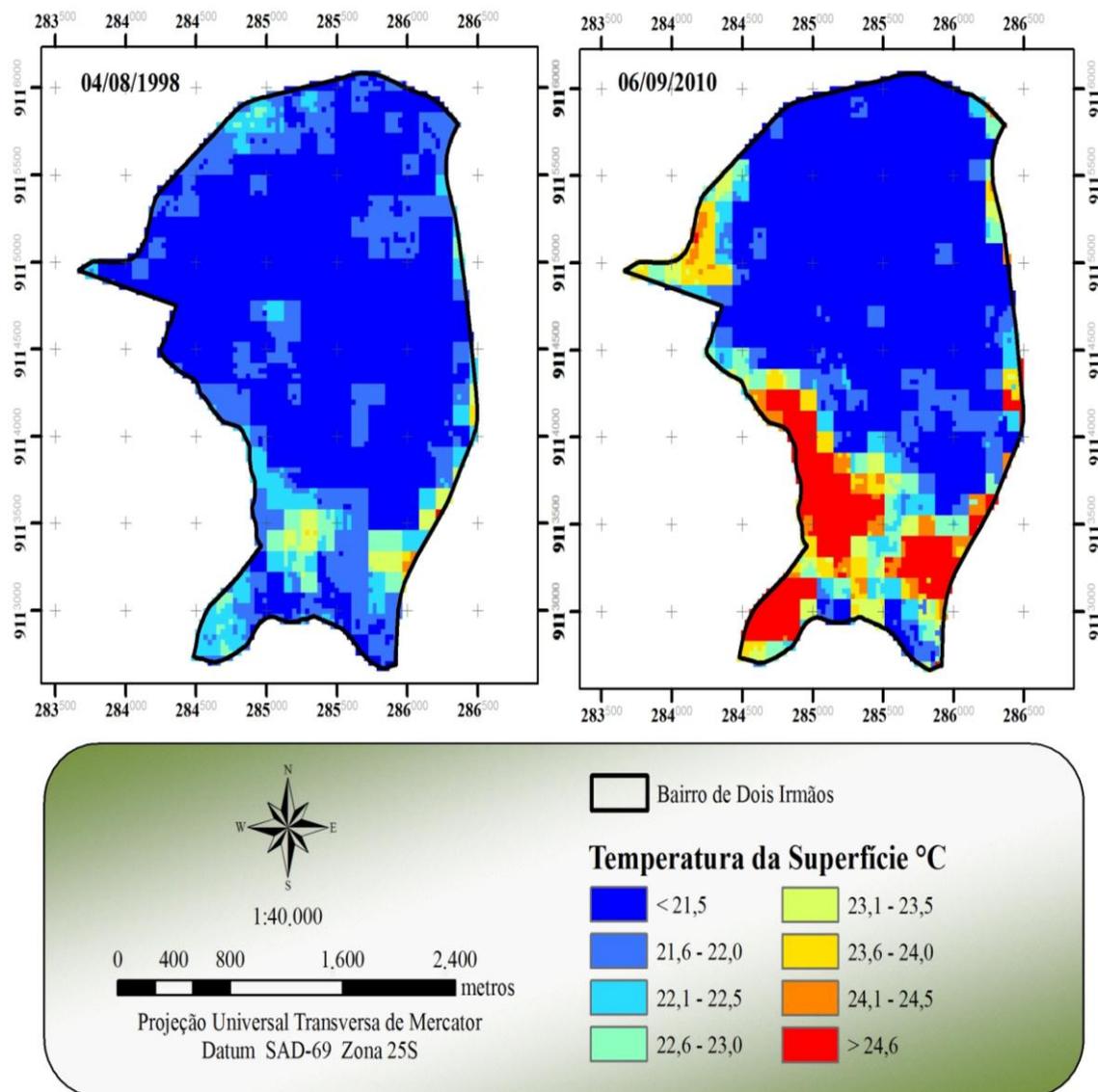


Figura 10: Perfis da temperatura da superfície para as seguintes datas: 04/08/1998 (A) e 06/09/2010 (B).

Buscando observar melhor as variações ocorridas na temperatura da superfície sobre a cidade do Recife, foram selecionados bairros com diferentes características: Dois Irmãos, Casa Amarela, Santo Amaro, Curado e Pina.

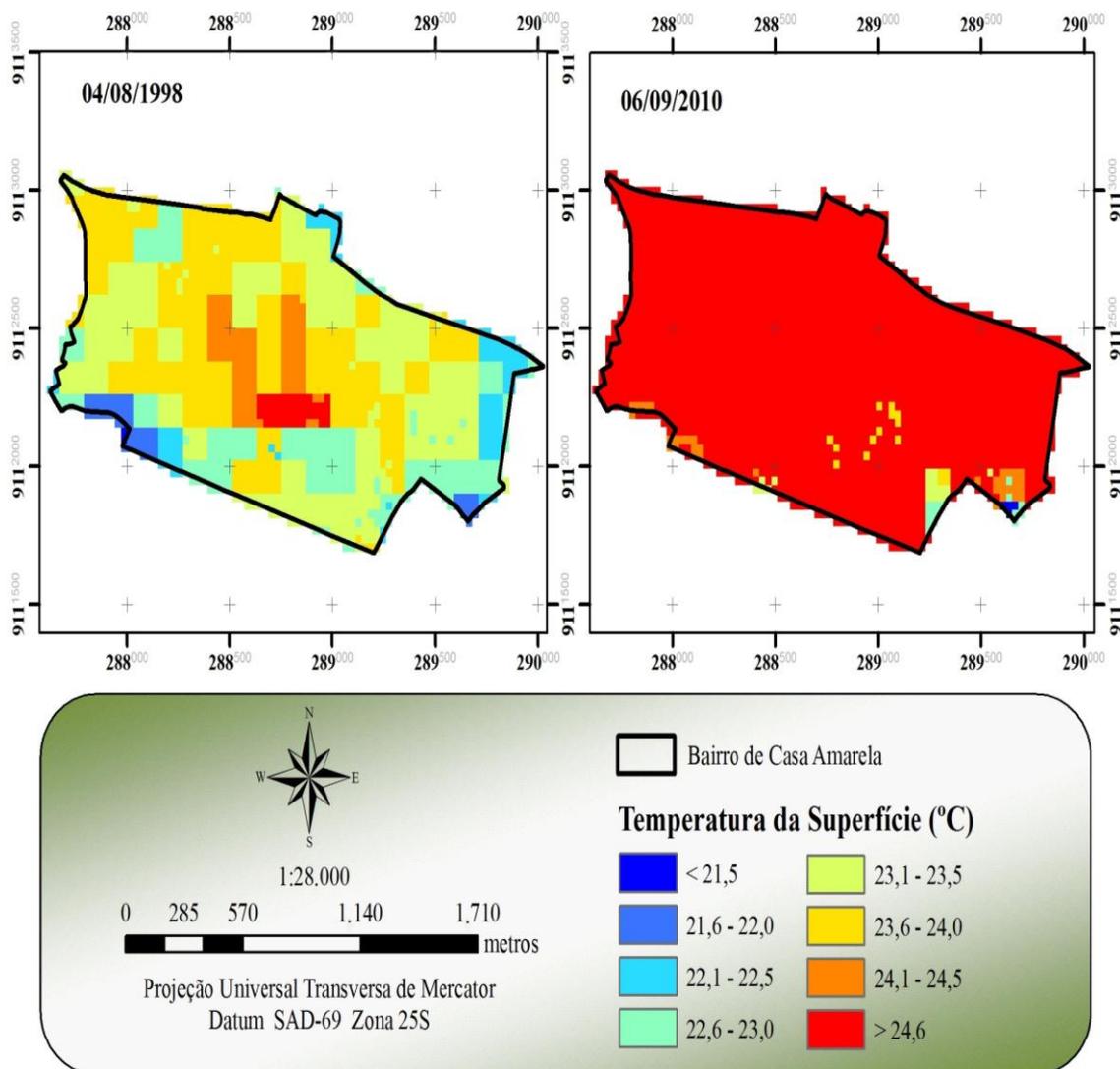
A carta abaixo (Figura 11) referente ao bairro de Dois Irmãos representa a temperatura da superfície para as datas proposta para o delineamento do referido estudo. Observa-se que para a data de 04/08/1998 a  $T_s$  no bairro variou entre 21,5 a 23,5°C, enquanto que para a data de 06/09/2010 a  $T_s$  apresentou valores de 21,5 a maior que 24,5, ocorrendo uma variação na temperatura entre as duas datas em torno de 1°C, podendo está associado ao desmatamento existente na área de floresta, decorrente da expansão urbana.

As temperaturas mais baixas, menores que 21,5°C foram observados na área de floresta, que pode ser explicada pelos seguintes fatores: a vegetação intercepta a radiação incidente e a radiação que sai da floresta, tendo um efeito marcante na temperatura; as folhas verdes não aquecem tanto quanto o solo e a camada de serapilheira e também porque as folhas trocam calor com o ar que está na sua volta. Ademais, de 50 a 60% da radiação solar incidente são empregadas no processo evapotranspirativo e pode ser apontado como o principal fator de redução de  $T_s$  (SILVA et al., 2011).



**Figura 11:** Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Dois Irmãos.

No bairro de Casa Amarela (Figura 12) foi observado uma considerável mudança entre as datas estudadas, com um acréscimo em média de 2 °C entre as datas 04/08/1998 e 06/09/2010. Este contraste da temperatura deve-se ao adensamento da malha urbana, onde a vegetação foi substituída por áreas construídas. A urbanização promoveu significativas modificações na estrutura física da superfície, contribuindo para o aumento da temperatura do ar, que leva à formação do fenômeno de ilha de calor. Segundo Amorim et al. (2009), o aumento da temperatura da superfície é causado por modificações das características físicas, tais como, alta densidade de construções, concentração de materiais de grande potencial energético de emissividade refletância, e por atividades urbanas.



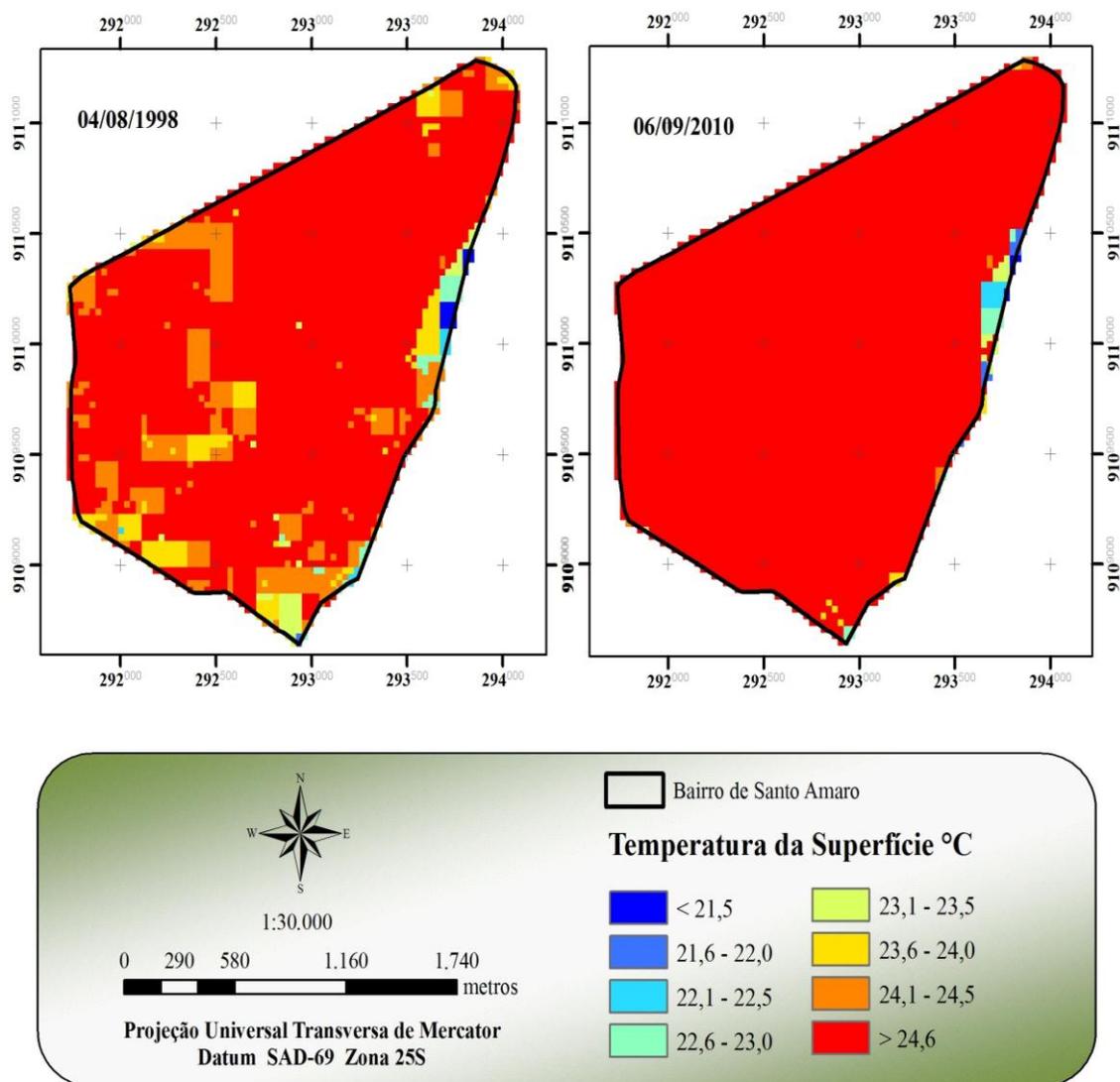
**Figura 12:** Temperatura da superfície nas datas 04/06/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Casa Amarela.

Observando a Figura 13, representando a carta da temperatura da superfície para o bairro de Santo Amaro, verifica-se que a  $T_s$  para o referido bairro mostra um aumento intensivo nos últimos 12 anos, onde áreas que antes apresentava temperatura em torno de  $23^\circ\text{C}$  passaram a valores superiores a  $24,5^\circ\text{C}$ .

Este aquecimento pode estar relacionado principalmente ao contínuo crescimento da urbanização no bairro, concernente aos ambientes construídos e da impermeabilidade do solo, atrelados à reduzida cobertura vegetal, contribuindo para uma maior concentração de calor. Além destes fatores, há que se considerarem os materiais construtivos utilizados, principalmente pela população de baixa renda, que geram maior inércia térmica e desconforto humano.

A resposta térmica da estrutura urbana demonstrou que a urbanização e as características do uso do solo são responsáveis pela distribuição da temperatura do ar gerando ilhas de calor nos bairros densamente construídos, ou com a concentração de

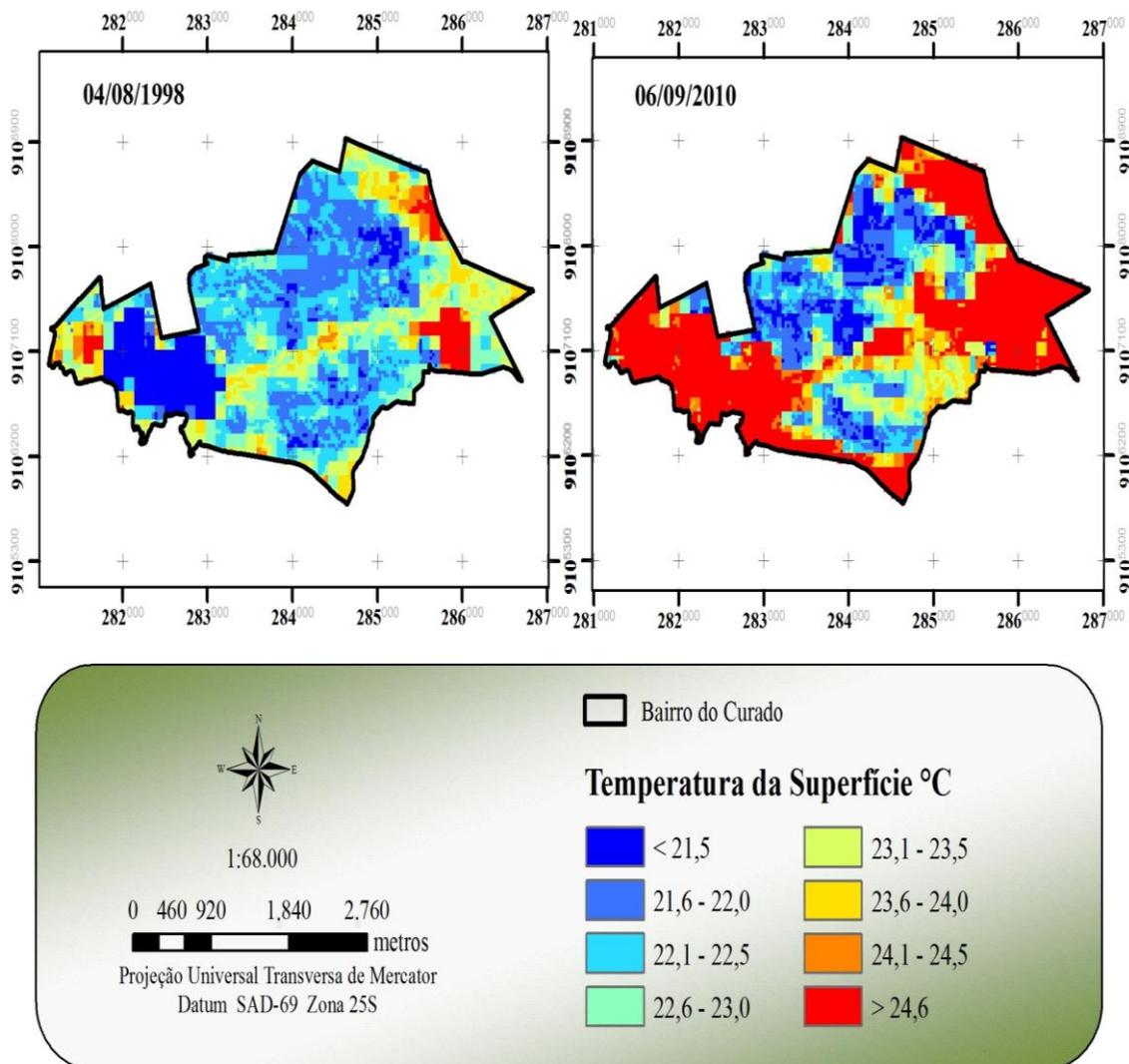
materiais construtivos de grande potencial energético de emissividade e refletância (AMORIM, 2009).



**Figura 13:** Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Santo Amaro.

Na Figura 14 está representada a carta da temperatura da superfície para o bairro do Curado, em que na data de 04/08/1998 apresentou temperatura da superfície na sua maioria com valores abaixo de 23°C, referente às áreas com maior adensamento vegetativo. No entanto para a mesma data já mencionada, houve ocorrência de nuvens na parte oeste do bairro, justificando os valores de temperaturas menores que 21,5°C.

Os maiores valores de temperatura da superfície estão representados da data de 06/09/2010, nas áreas onde a cobertura vegetal é mais escassa, com elevado adensamento construtivo, associado ao predomínio da verticalização, onde se destacam temperaturas maiores que 24,5°C. Fica evidenciado que o bairro sofreu grandes alterações no decorrer dos anos, apresentando diferença de 1,5°C entre as datas em questão, o que irá contribuir para a elevação da temperatura do ar na região.

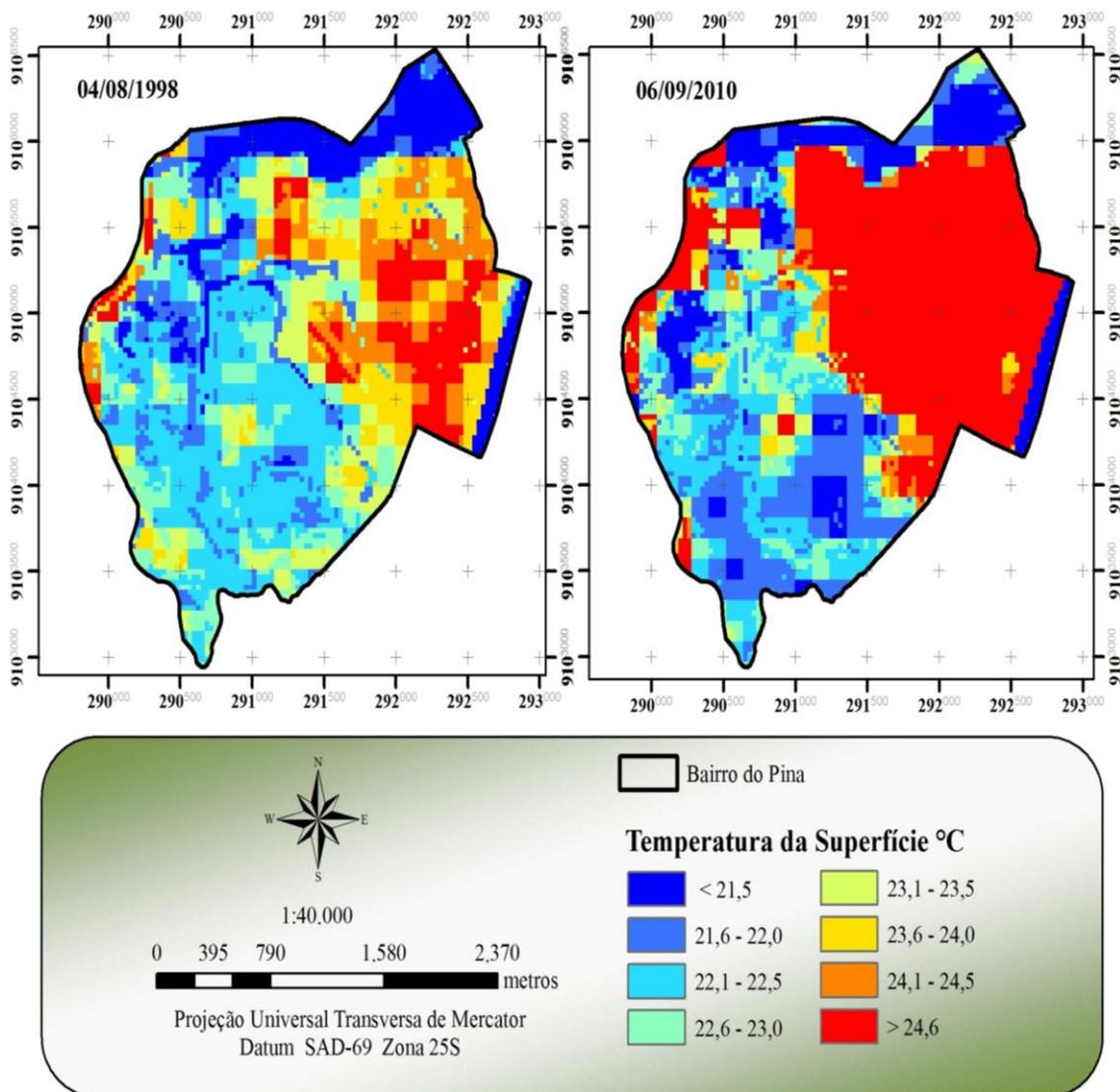


**Figura 14:** Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Curado.

Analisando a carta da temperatura da superfície para o bairro do Pina (Figura 15) observou-se que houve uma variação no comportamento da temperatura da superfície entre as datas estudadas.

Essas alterações podem ser verificadas nas áreas urbanizadas, ocorrendo aumento da temperatura com valores superiores a 24,5°C. Decorrente da expansão da malha urbana, pela substituição da vegetação por grande quantidade de casas, prédios, ruas, avenidas e uma série de outras construções, que é tanto maior quanto mais próximo das áreas centrais urbanizadas, fazendo com que aumente significativamente a irradiação de calor para a atmosfera quando comparado com as áreas de vegetação.

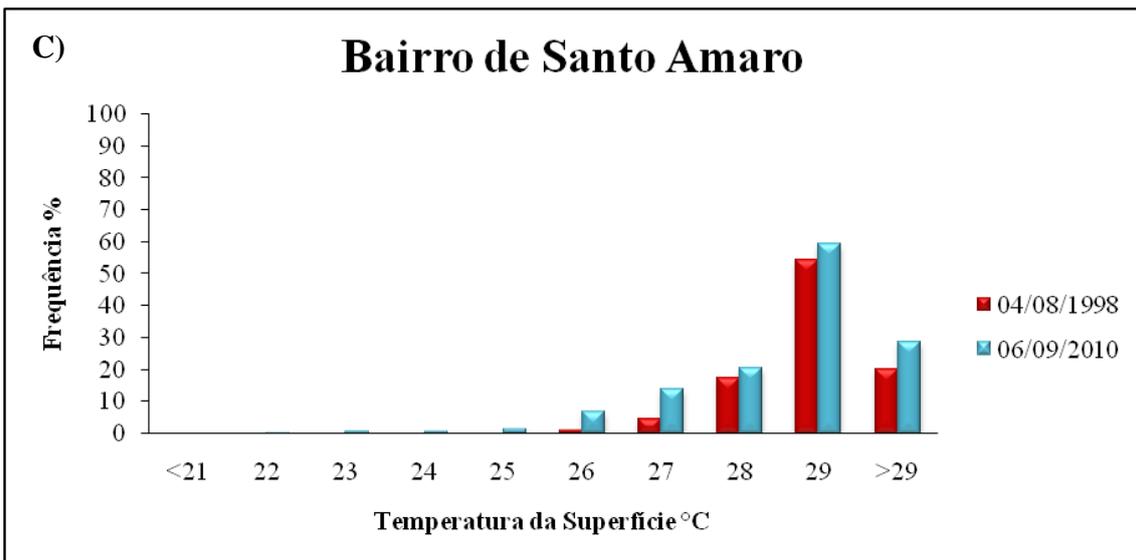
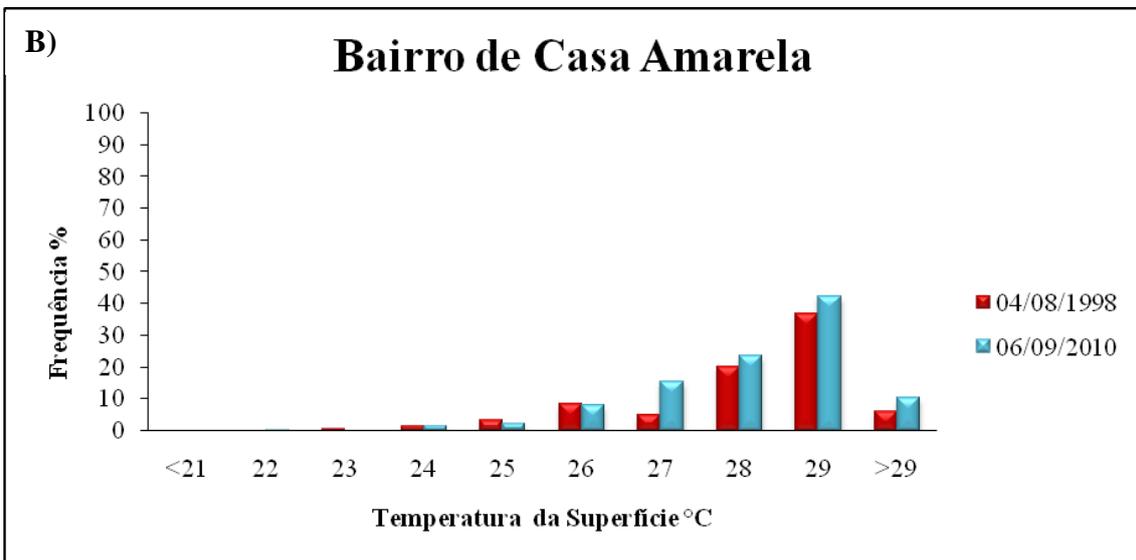
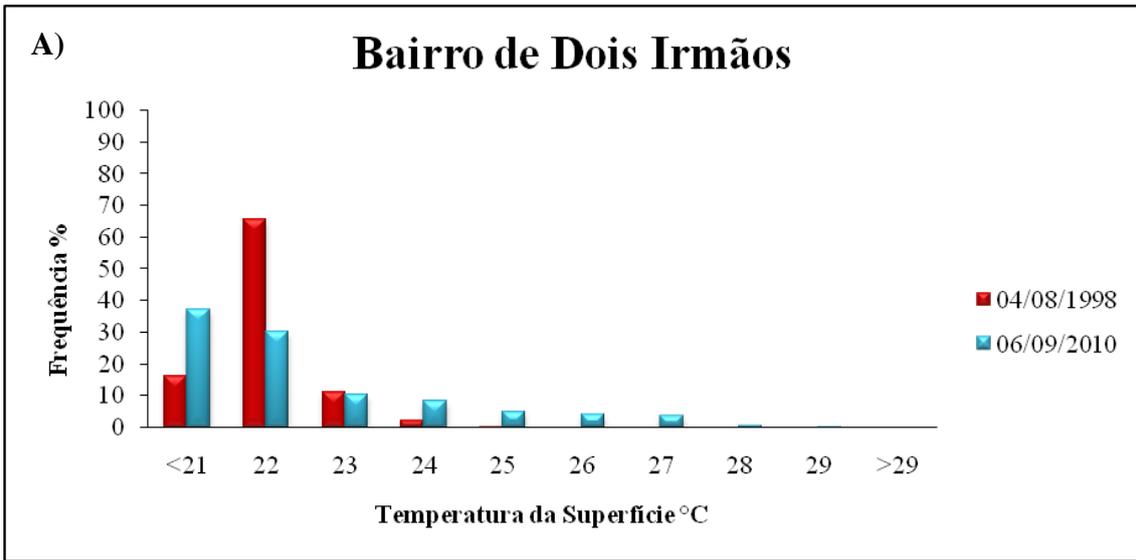
Percebe-se ainda que em ambas as datas os menores valores dessa variável ocorreram nas áreas com cobertura vegetal significativa (parque dos manguezais) e corpos hídricos com valores inferiores a 21,5°C.

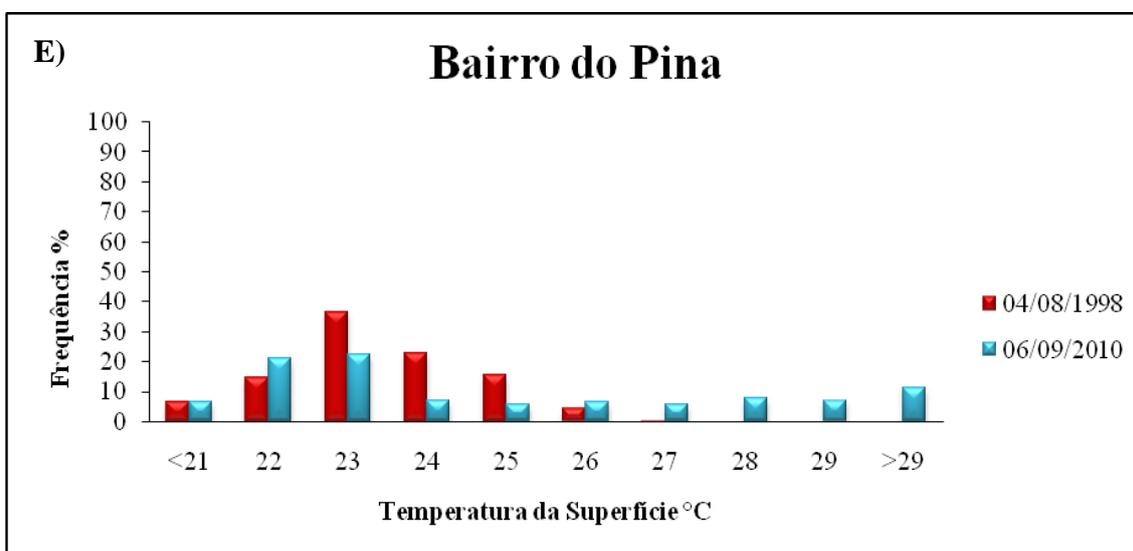
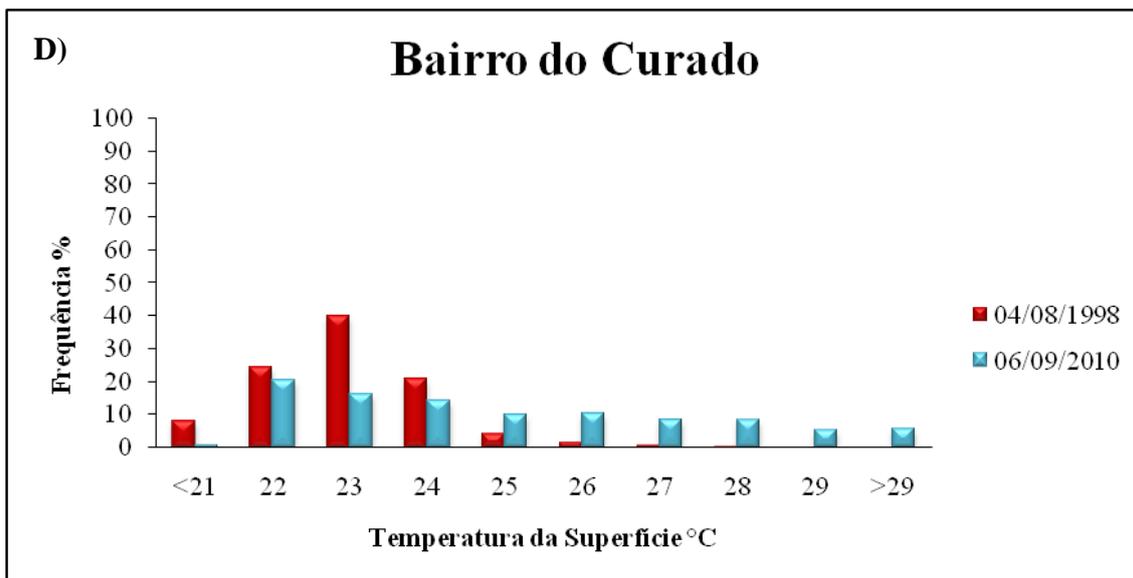


**Figura 15:** Temperatura da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Pina.

A representação da frequência dos valores da temperatura da superfície, assim como a sua distribuição espacial e temporal encontra-se na Figura 16, corresponde aos bairros de Dois Irmãos, Casa Amarela, Santo Amaro, Curado e Pina, respectivamente. Observando-se que houve grandes alterações nas classes analisadas, em relação aos valores obtidos da temperatura da superfície, quando comparado as datas estudadas.

Nos bairros do Curado e Pina percebe-se que em 06/09/2010, houve o surgimento de novas classes de temperatura com valores superior a 28°C, enquanto que no bairro de Dois Irmãos essas novas classes surgiram a partir de 25 °C. Para os bairros de Casa Amarela e Santo Amaro verificou-se um aumento nas classes maiores que 27°C, justificado por se tratar de bairros com grande adensamento construído e com escassa vegetação.





**Figura 16:** Distribuição da temperatura da superfície nos bairros: Dois Irmãos (A), Casa Amarela (B), Santo Amaro (C), Curado (D) e Pina (E), para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010.

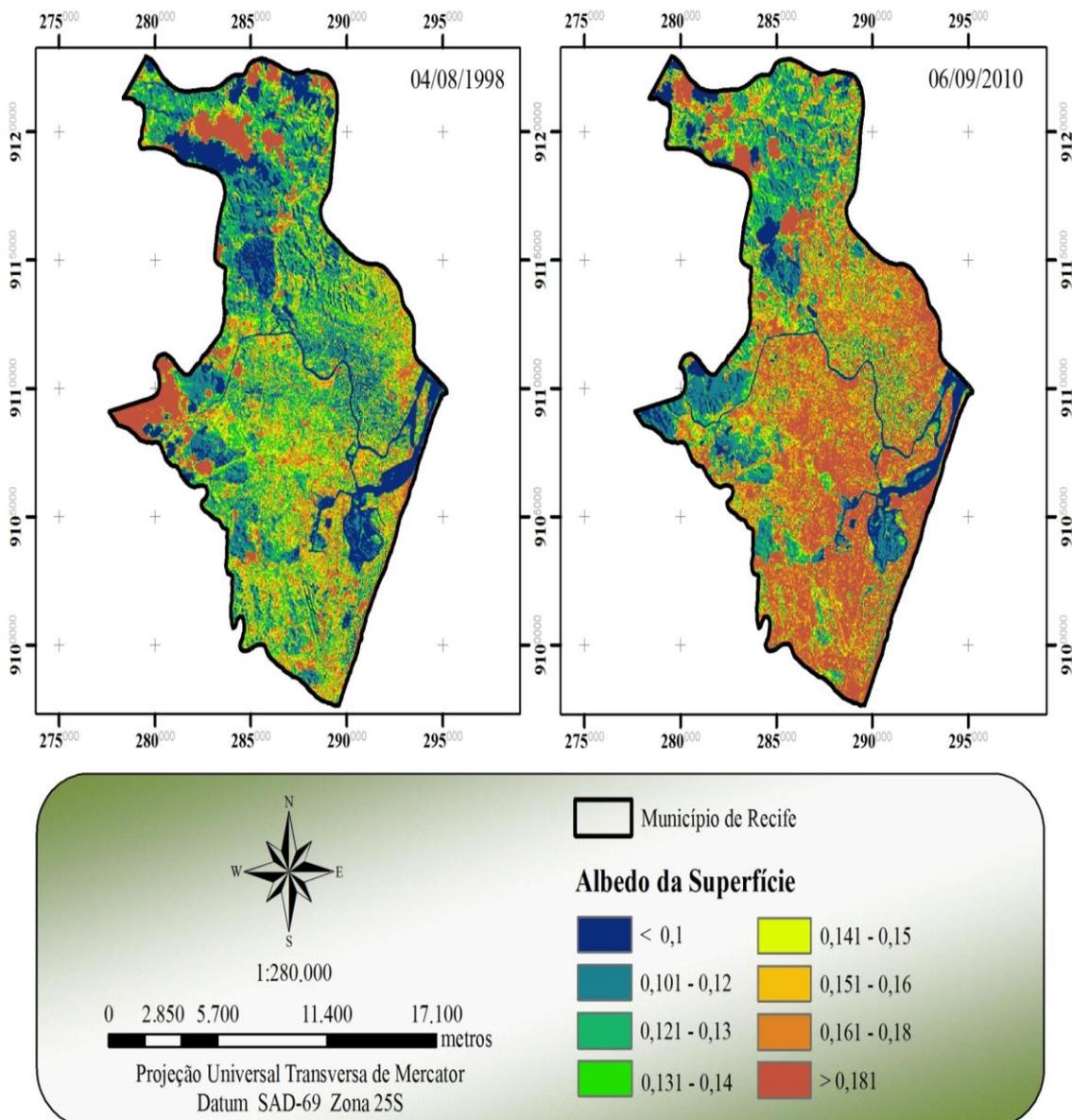
## 4.2 - Albedo da Superfície

Na Figura 17 está representada a carta do albedo da superfície para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010. Pode-se observar que nas duas datas o albedo da superfície apresentou valores muito baixos, estando associado a áreas sombreadas por nuvens, o que evidencia ocorrência de pixels com valores de albedo muito baixos, ou seja, inferior a 0,10, acarretando em uma diminuição na intensidade da radiação solar global; portanto, a radiação solar refletida por tais áreas será menor do que ocorreria na ausência das nuvens (SILVA, 2011). Para a mesma data já mencionada também se observou valores de albedo maiores que 0,18 tal valor encontrado estar relacionado com a presença das nuvens nas imagens.

O valor do albedo encontrado para a área da cidade do Recife apresenta uma grande variabilidade tanto espacial, quanto temporal. A espacial está associada com a cobertura da superfície heterogênea. A temporal tem a ver com as modificações desta superfície devido à influência antrópica.

As estimativas encontradas de albedo em área distintas da cidade do Recife estão dentro da faixa esperada por se tratar de uma região com alto índice de urbanização. É natural que em áreas urbanizada ocorra maior reflexão da radiação incidente do que em solos cobertos com vegetação e sobre superfícies com água.

A imagem referente à data 06/09/2010 apresenta um aumento no albedo da superfície principalmente na área central, com uma predominância de valores maiores que 0,18, justamente por essa área possuir pouca cobertura vegetal com elevado adensamento de áreas construídas, fazendo com que ocorra maior poder de reflexão. Valores elevados de albedo da superfície estão geralmente associados às superfícies suaves, secas e de coloração clara, características estas observadas nos centros urbanos, enquanto que, os menores valores de albedo estão associados a superfícies rugosas, úmidas e de coloração escura, onde geralmente podem ser observado em áreas com vegetação e nos corpos hídricos.



**Figura 17:** Albedo da superfície para a cidade do Recife.

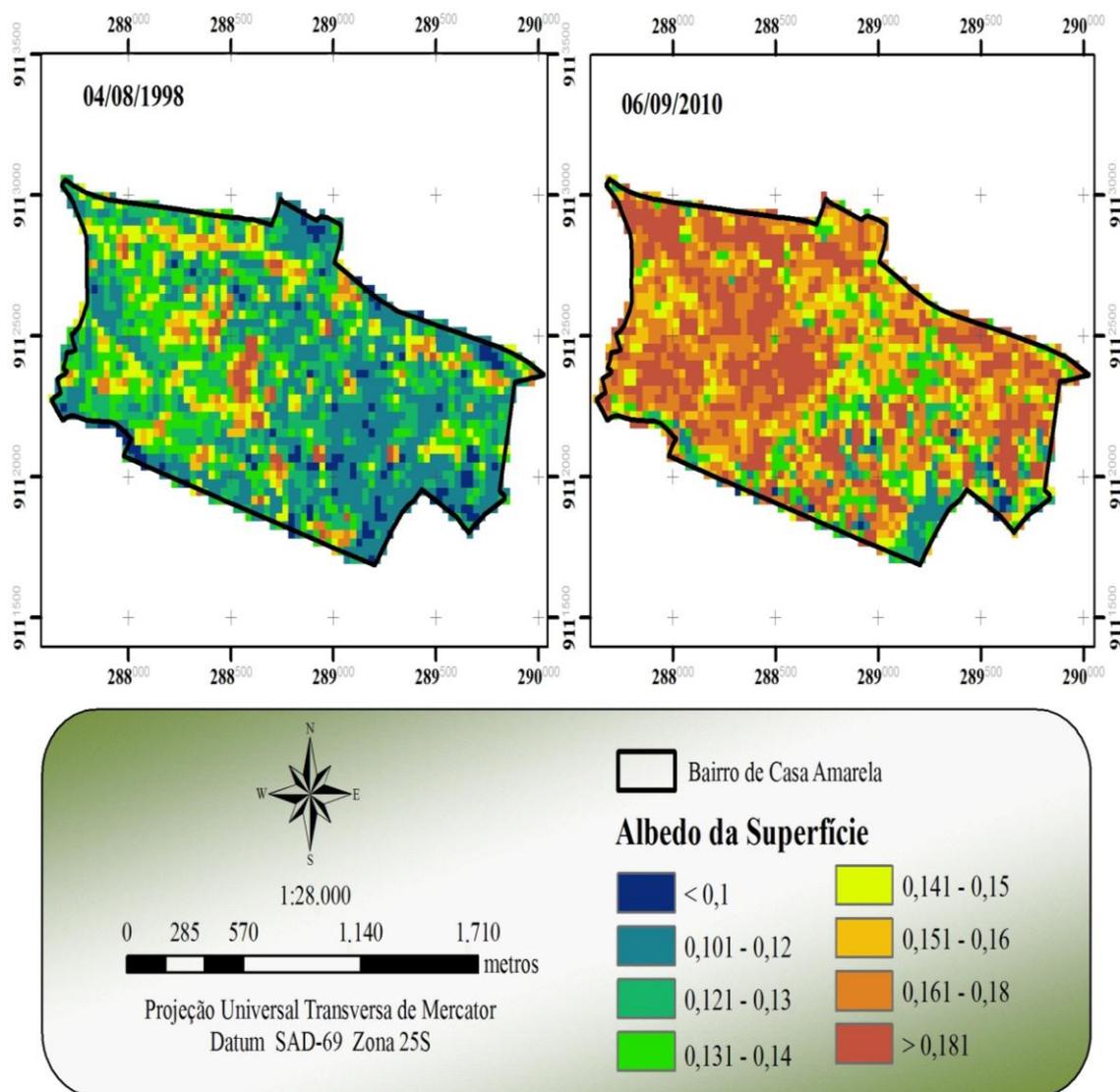
A seguir faz-se uma análise mais detalhada da área de estudo, em que foram escolhidos cinco bairros de diferentes zonas, para analisar a dinâmica de transformação da região em estudo. As cartas foram separadas de acordo com os seguintes bairros: Dois Irmãos, Casa Amarela, Santo Amaro, Curado e Pina

Na Figura 18 está representada a carta de albedo da superfície para o bairro de Dois Irmãos, onde se destaca uma classe com valor menor que 0,10 para as duas datas, uma vez que a região apresenta áreas remanescentes da Mata Atlântica, havendo uma relação clara entre o albedo e a vegetação, onde os valores variaram entre 0,1 a maiores que 0,18. Outro fator resultante dos baixos valores de albedo nessa área é a contribuição proporcionada pela umidade estocada no solo durante a estação chuvosa. Quando a



06/09/2010, em função da intensificação da urbanização. Em decorrência disso têm-se mais áreas pavimentadas ou solo exposto, ocorrendo assim maior refletância nessa área.

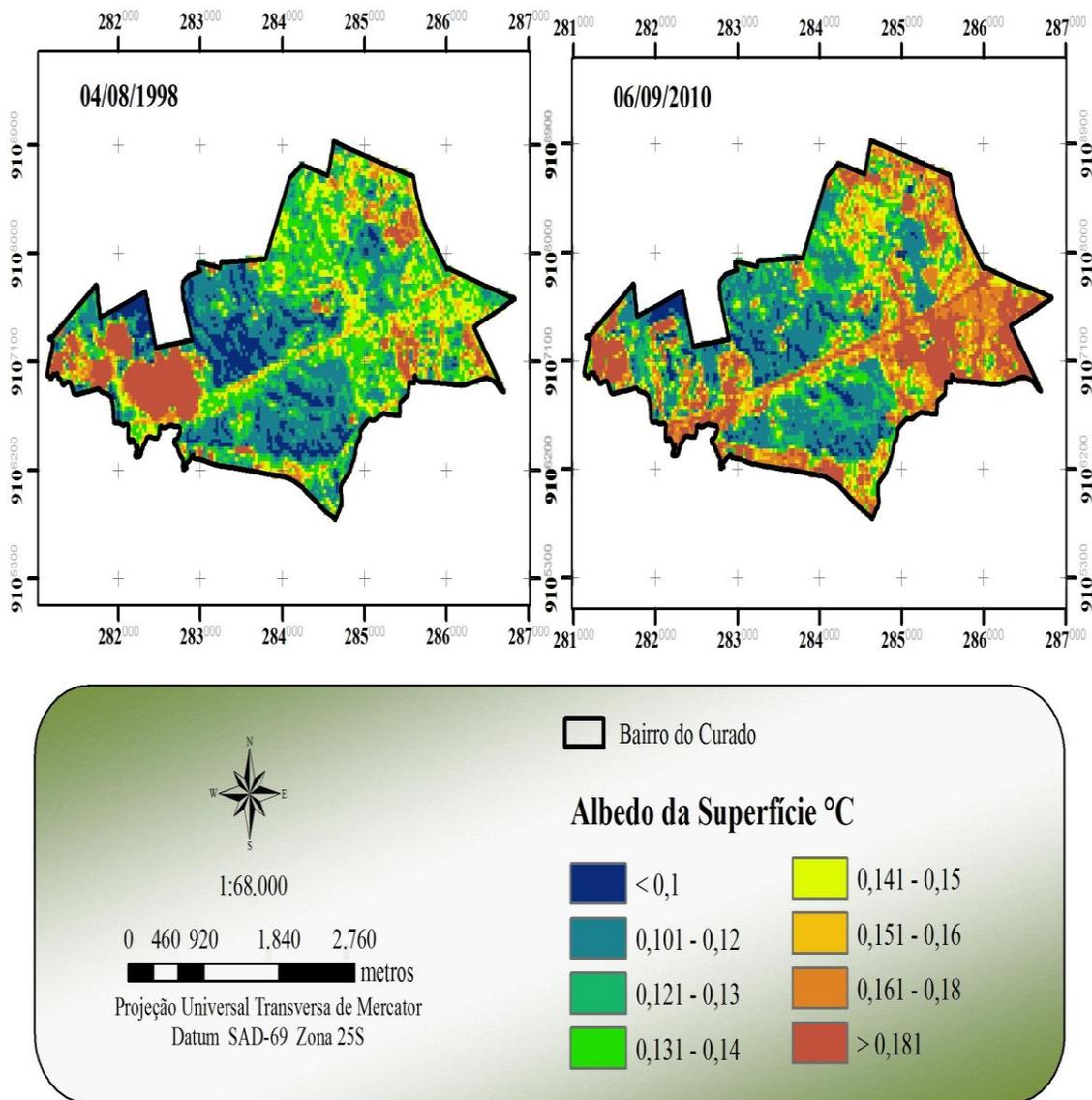
Percebe-se ainda que na data de 04/08/1998, apresenta pequenas áreas com albedo menores que 0,14, em virtude das pequenas áreas de vegetação existente no local, fazendo com que haja menos refletância de energia, por esse motivo, os pixels apresentam valores muito baixos.



**Figura 19:** Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro de Casa Amarela.

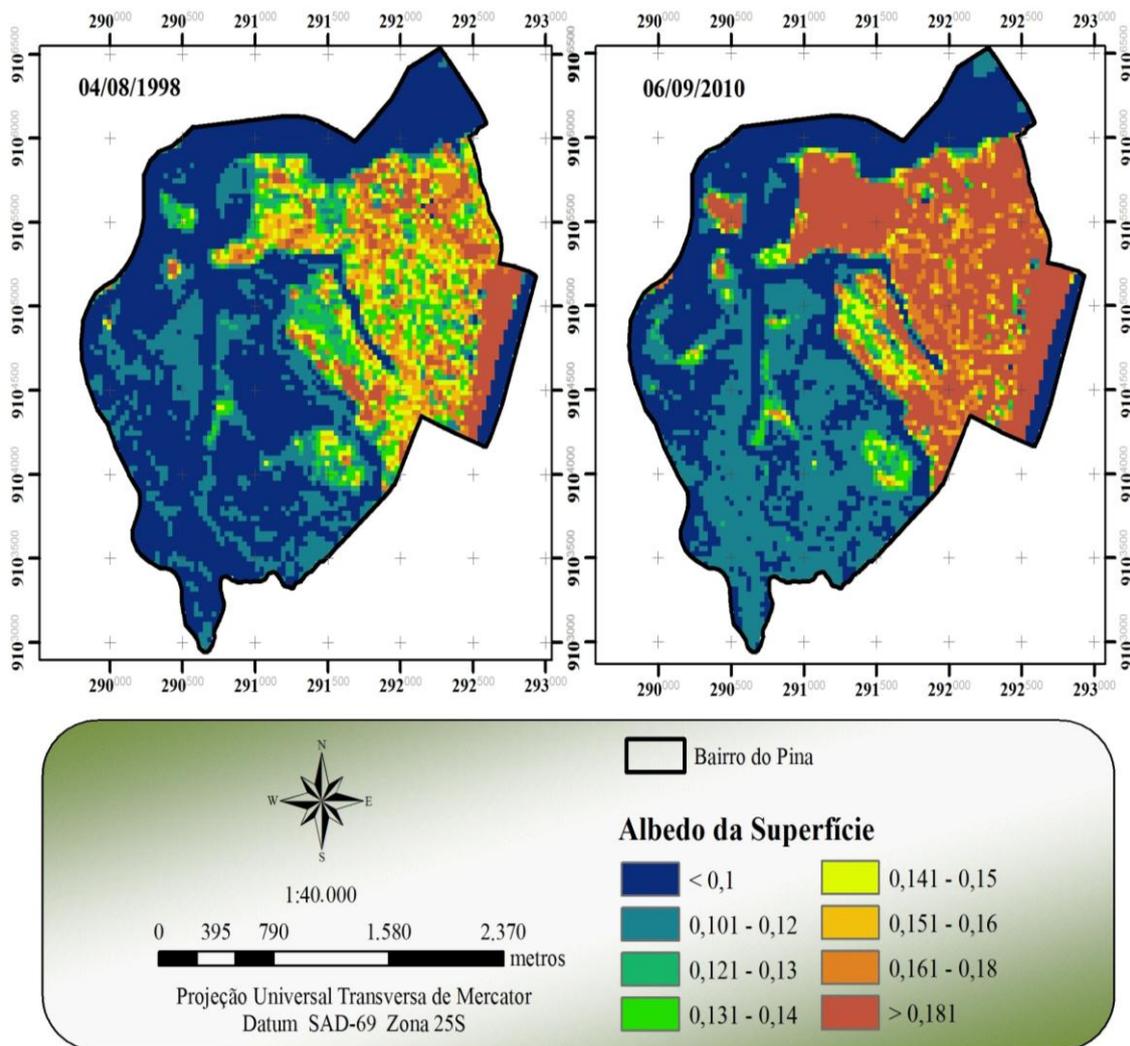
As mesmas alterações ocorridas no bairro de Casa Amarela podem ser observadas no bairro de Santo Amaro (Figura 20), por também apresentar intensas modificações existentes na área, visto que essa área encontra-se mais próxima a parte central da cidade, onde proporciona grande concentração de construções, fazendo com que os valores do albedo da superfície sejam mais elevados (maior que 0,16).





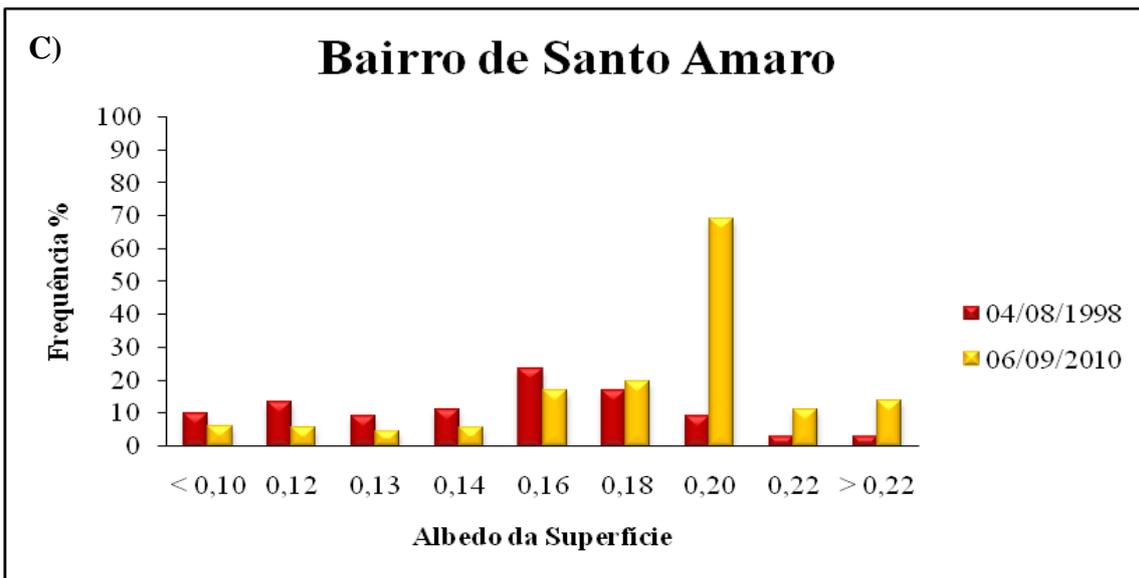
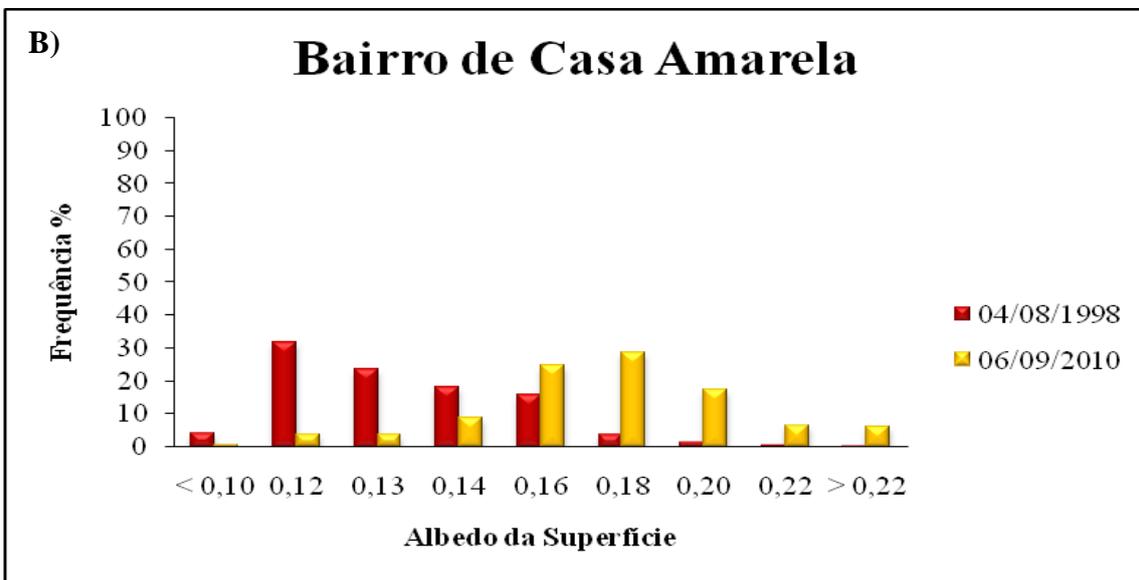
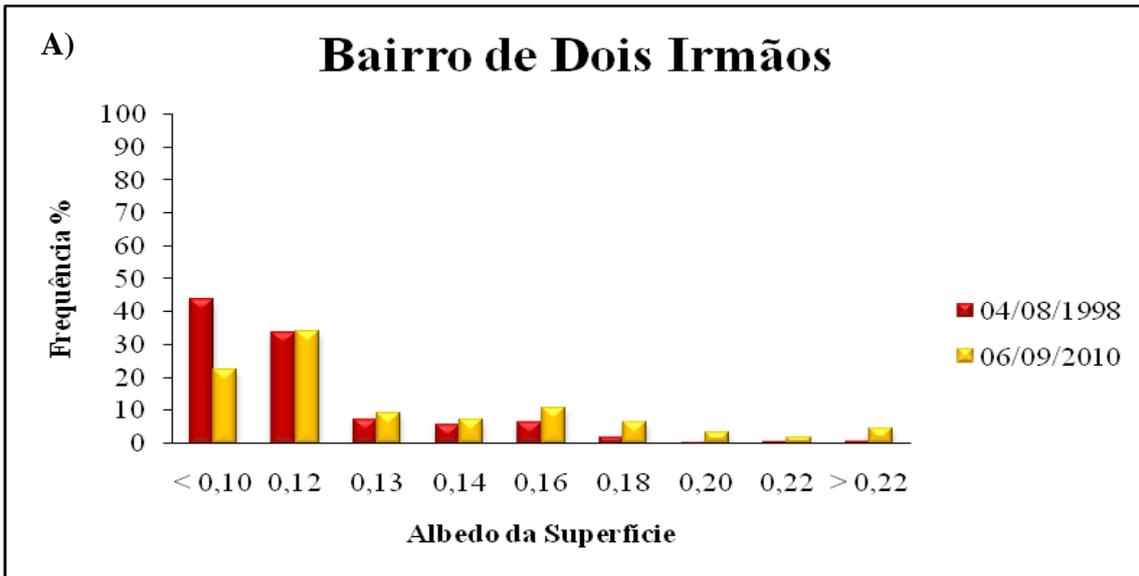
**Figura 21:** Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Curado.

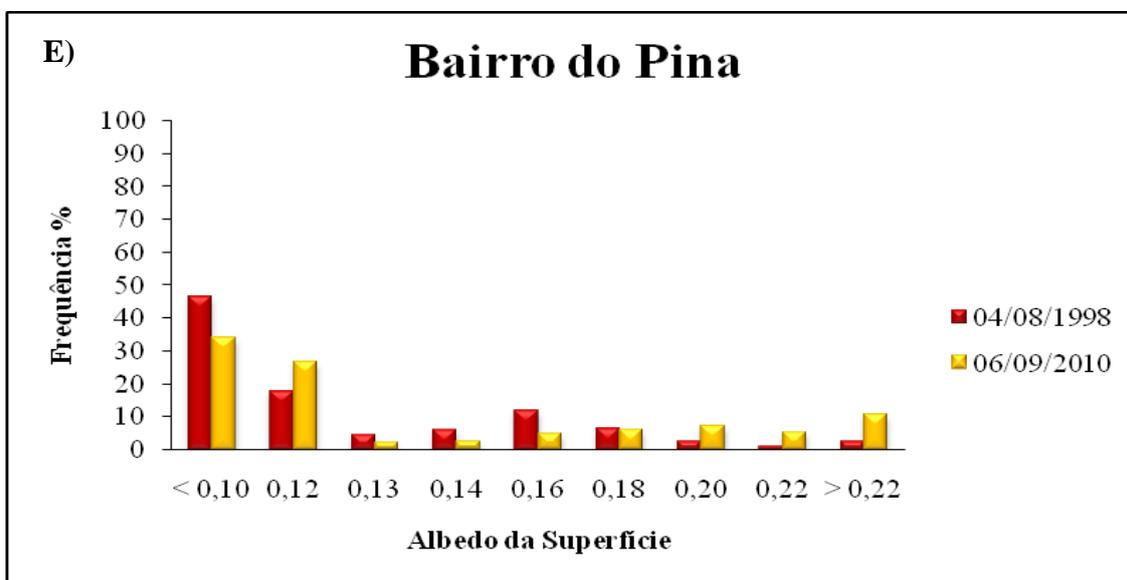
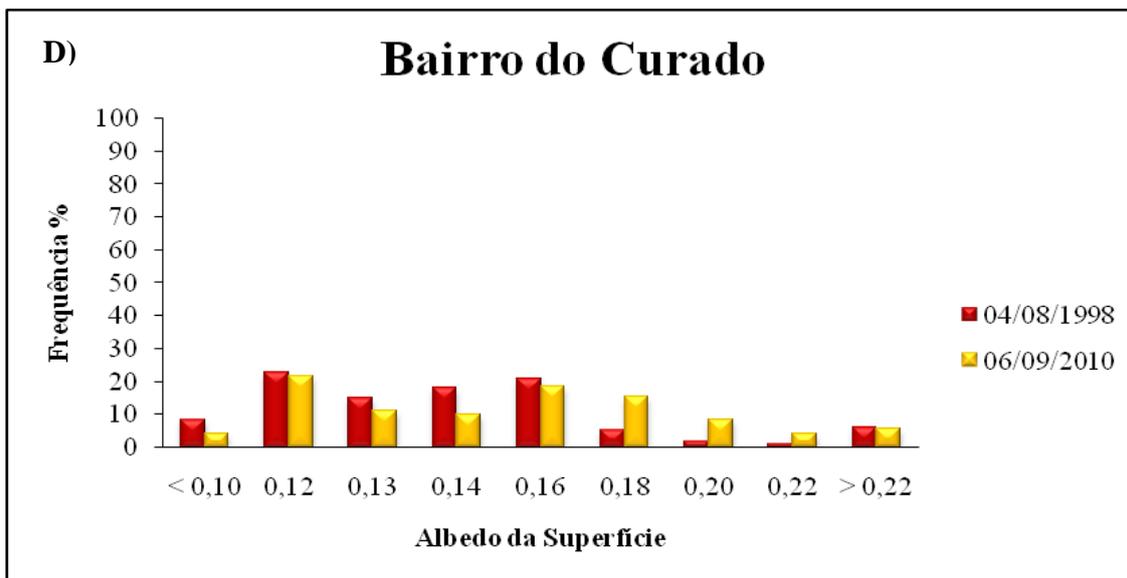
O albedo da superfície para o bairro do Pina pode ser observado a partir da Figura 22, onde há uma predominância de duas classes de albedo: menor que 0,1, tendo em vista que essa área apresenta vegetação de mangue com áreas alagadas, solos que apresenta grande quantidade de umidade, reduzindo o poder refletor da superfície, fazendo com que os valores de albedo sejam mais baixos. A outra classe com albedo maior que 0,16, encontra-se no canto superior direito do mapa, onde localiza-se áreas antrópicas e os bancos de areia. Pode-se ainda observar que houve uma redução do solo exposto, em detrimento à expansão da vegetação de mangue.



**Figura 22:** Albedo da superfície nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010 para o bairro do Pina.

Na Figura 23 está representada a distribuição de frequência do albedo da superfície e sua distribuição espacial e temporal, correspondente aos bairros de Dois Irmãos, Casa Amarela, Santo Amaro, Curado e Pina, podendo-se observar as alterações ocorridas em cada bairro nas datas estudadas. Os bairros que tiveram maior variação do albedo durante o período pesquisado foram Casa Amarela e Curado. Sendo possível verificar que estas áreas sofreram alterações através do processo de urbanização, resultando nas classes de valores mais elevado do albedo da superfície. Ficando evidenciado que as características do uso e ocupação do solo influenciam diretamente no albedo da superfície. Já para os bairros de Dois Irmãos, Curado e Pina não houve grandes alterações ocorridas no albedo da superfície.





**Figura 23:** Distribuição do albedo da superfície nos bairros: Dois Irmãos (A), Casa Amarela (B), Santo Amaro (C), Curado (D) e Pina (E), para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010.

### 4.3 - Índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI)

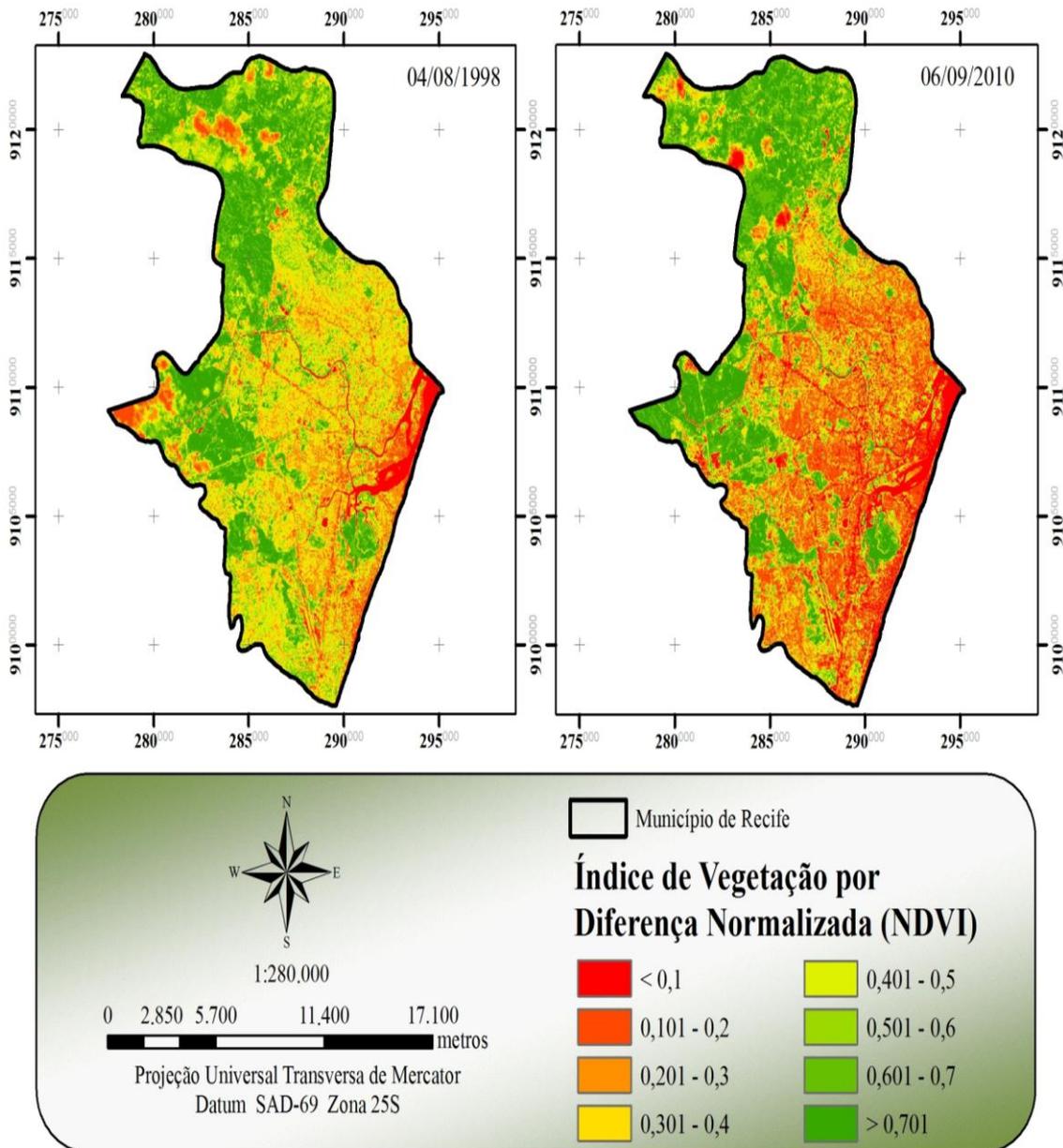
Os efeitos da urbanização manifestam-se através das alterações nas variáveis ambientais locais, dentre as quais está o índice de vegetação (NDVI). Tais alterações podem ser verificadas na Figura 24, através da variabilidade espacial e temporal do NDVI para a cidade do Recife, sendo possível observar que o índice de vegetação apresentou grandes alterações entre as datas de 04/08/1998 e 06/09/2010, em virtude da intensidade do uso do solo, do processo de crescimento e expansão urbana e das características ecológicas e econômicas distintas de cada local da área de estudo. Percebe-se claramente que na data de 04/08/1998, a área central da cidade do Recife apresentava valores de NDVI entre 0,3 a 0,4, em quanto que na data de 06/09/2010 esse índice passou a apresentar valores menores que 0,3. Também demonstra que quando comparada a área central (núcleo urbano) do seu respectivo entorno, observa-se que os valores de NDVI variaram de 0,1 a 0,4 no núcleo urbano e de 0,5 a maior que 0,7 para o entorno, essa variação é decorrente da retirada da vegetação da área central a partir da expansão e aglomeração da urbanização, além disso, no entorno da área em questão, apresenta vegetação remanescente da Mata Atlântica, fazendo com que ocorram maiores valores de NDVI na área.

Segundo Liu & Ming (2000), os valores de NDVI maior que 0,6 está associados à vegetação extremamente pronunciada, e de 0,3 a 0,6 a cobertura vegetal pouco densa e área disposta de forma adjunta às regiões verdes.

A classe de valor do NDVI menor que 0,1 é representada por área de solo exposto, nessa classe também estão inseridos os valores negativos representados pelos corpos hídricos, presença de nuvens e suas sombras, onde absorve a radiação na faixa do infravermelho próximo, justificando o baixo valor de NDVI nessas áreas.

Considerando que o NDVI é determinado pela quantidade de biomassa vegetal aérea, aproximadamente 60% da área estudada mostraram-se com magnitude valores inferior a 0,3 de NDVI para os últimos anos, seu baixo valor para o contexto urbano é justificado pela baixa quantidade de áreas vegetadas na parte central com alta densidade de ocupação vertical e horizontal, centros comerciais, avenidas e ruas, ocasionadas pela expansão urbana. Acrescido a isso, superfícies impermeáveis e altamente reflexivas, estão presentes significativamente nas manchas urbanas implicando em alterações ambientais custosas, comprometendo alguns aspectos da qualidade ambiental. Os resultados de tal interferência são altas temperaturas media, formação ilhas de calor

devido a presença de superfícies altamente reflexivas (Gallo et al., 1993; Weng et al., 2004), baixa quantidade de evapotranspiração e intensificação da poluição do ar em virtude da pequena porção de áreas verdes presentes nas cidades e que são responsáveis pela redução desses efeitos.

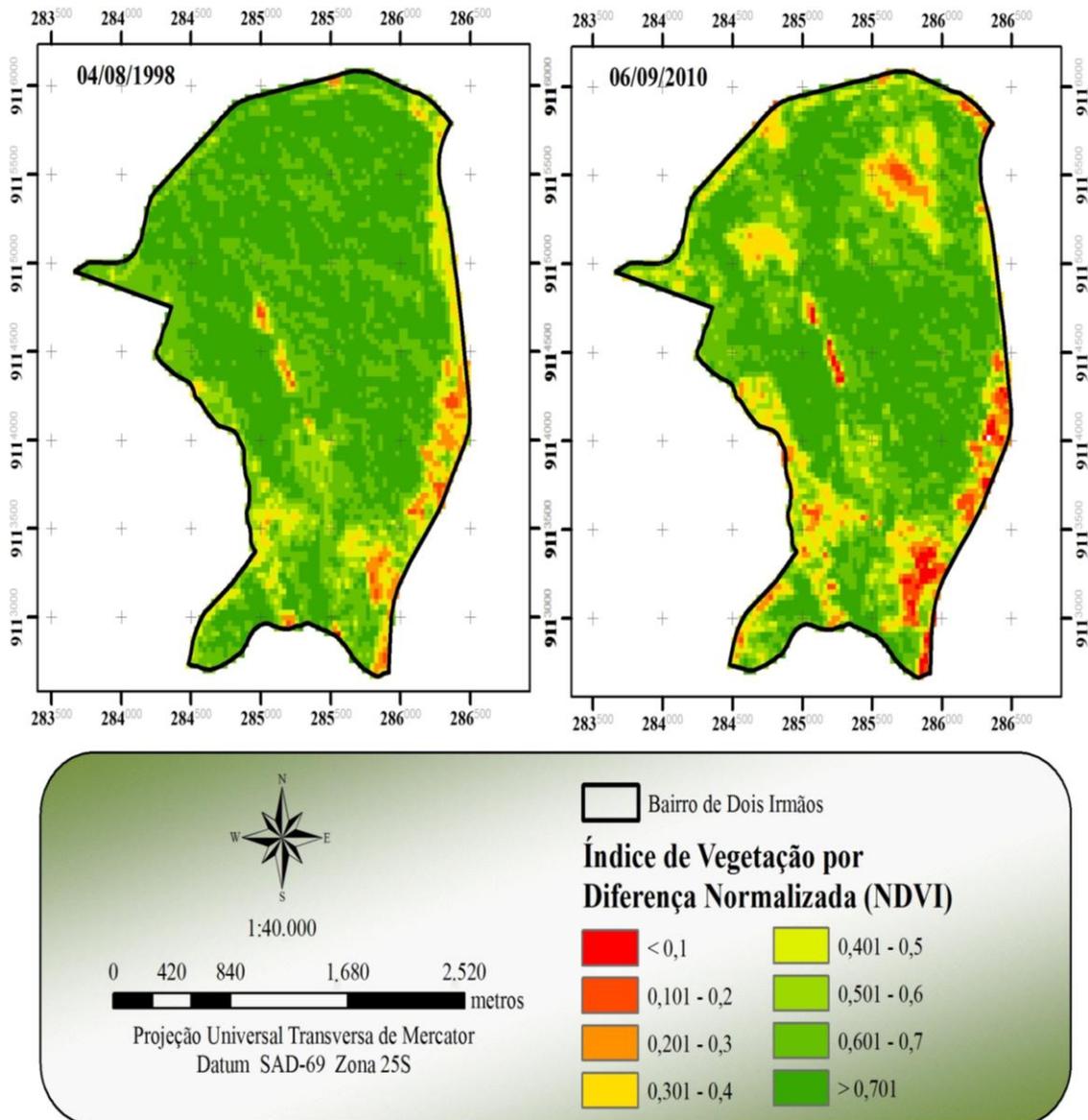


**Figura 24:** Índice de vegetação para a cidade do Recife.

Para avaliar melhor a diferença nas cartas do índice de vegetação, faz-se necessário a compreensão do comportamento ocorrido em determinados bairros.

A Figura 25 mostra o bairro de Dois Irmãos, demonstrando que a classe maior que está 0,6 prevalece em relação às demais. Esses valores elevados de NDVI estão caracterizados por alta densidade de biomassa vegetal existente no local.

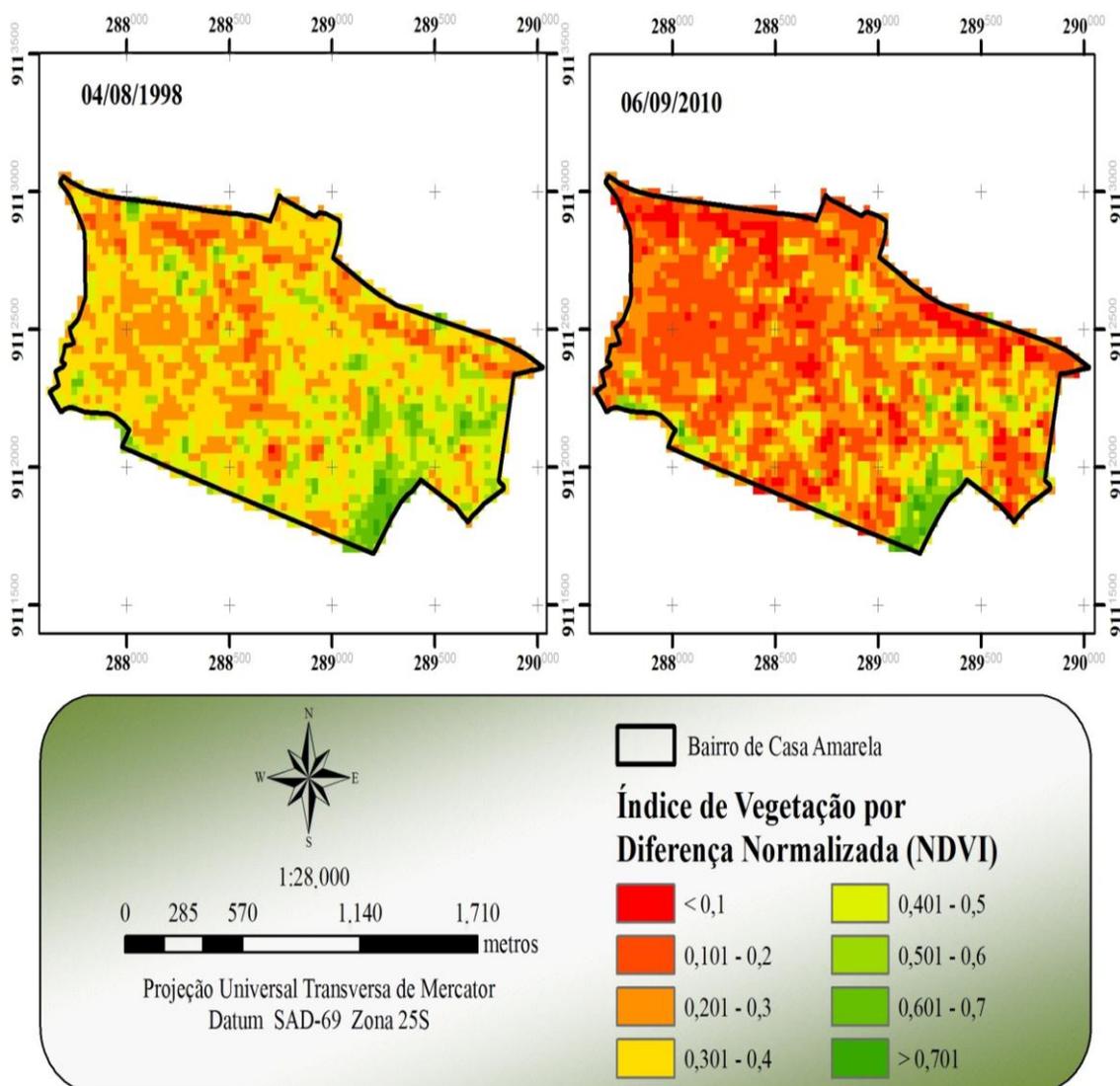
Analisando visualmente as cartas para as datas de 04/08/1998 e 06/09/2010, pode ser observado que no entorno da imagem, apresenta áreas que vem sofrendo algumas alterações decorrentes ao processo de crescimento e expansão urbana, afetando negativamente os valores NDVI nesse local, com valores inferiores a 0,4.



**Figura 25:** Índice de vegetação para o bairro de Dois Irmãos nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010.

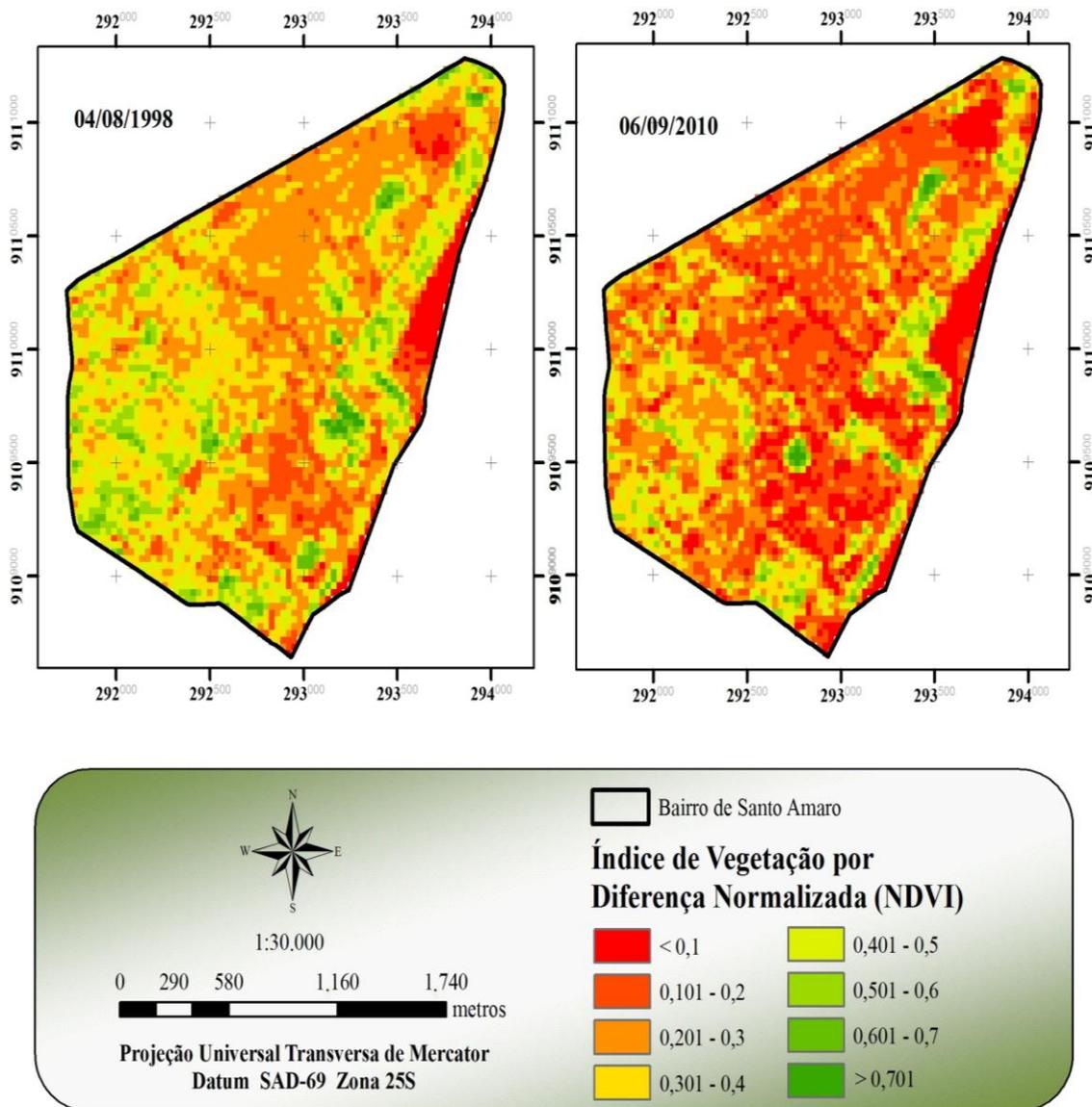
Na carta do NDVI para o bairro de Casa Amarela (Figura 26), verifica-se que os valores obtidos para a data 06/09/2010, houve uma intensificação nos valores menores que 0,25, estando relacionadas à substituição dos elementos naturais (massa vegetal, árvore, etc.) por espaços edificados e por solo exposto, aglomeração de construções horizontais e verticais (LIU & MING, 2000), e como consequência a diminuição acentuada nos valores de NDVI.

Através da análise feita na área de estudo percebe-se a relação entre o NDVI e a temperatura da superfície, pois na data de 04/08/1998 apresentou maior NDVI e a menor temperatura, enquanto que na data de 06/09/2010 apresentou menor NDVI e maior temperatura da superfície, ficando evidente as alterações ocorrida nesse bairro.



**Figura 26:** Índice de vegetação para o bairro de Casa Amarela nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010.

Na Figura 27 representada pelo bairro de Santo Amaro, observa-se que na data de 04/08/1998, o bairro já apresentava pouca extensão de área vegetada com valores de NDVI entre 0,3 a 0,5, e vem se intensificando a redução da vegetação nos últimos anos, com valores de menores que 0,25. O bairro foi constituído em áreas de antigos alagados no norte do centro do Recife, e vem passando por intensas alterações relacionadas à expansão de áreas construídas.

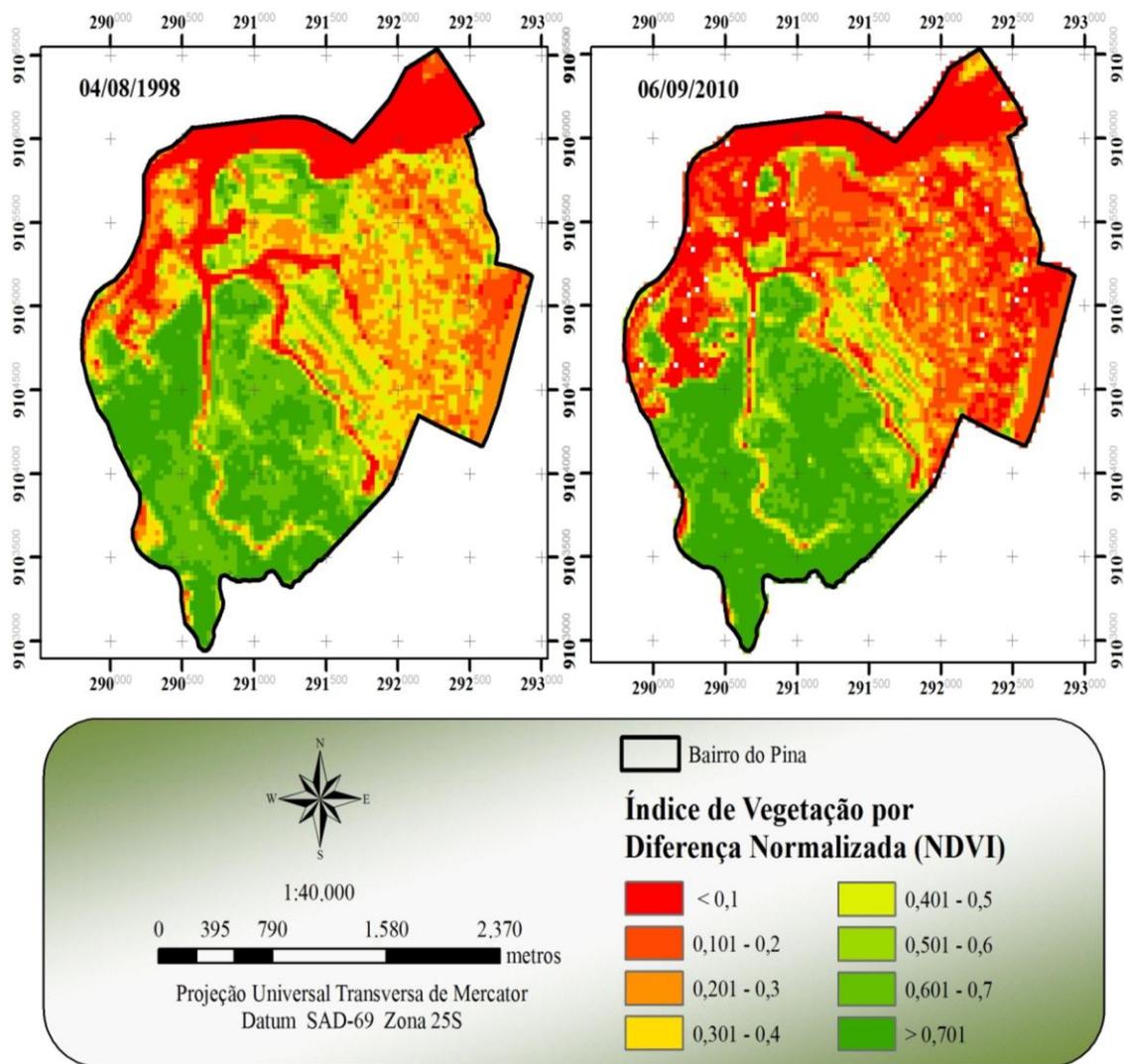


**Figura 27:** Índice de vegetação para o bairro de Santo Amaro nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010.

Na Figura 28, são apresentadas as cartas de NDVI para o bairro do Curado, constatando uma diminuição acentuada dos seus valores de NDVI menores que 0,4 quando comparada as duas datas. Esse bairro sofreu varias modificações durante os anos, devido à duplicação da BR-231, ocasionando em maior área pavimentada e também o surgimento de novos loteamentos no local.

Mesmo passando por diversas alterações esse bairro ainda apresenta grande quantidade de vegetação, correspondente a área de Mata Atlântica remanescente, justificando a concentração da classe maior que 0,7.





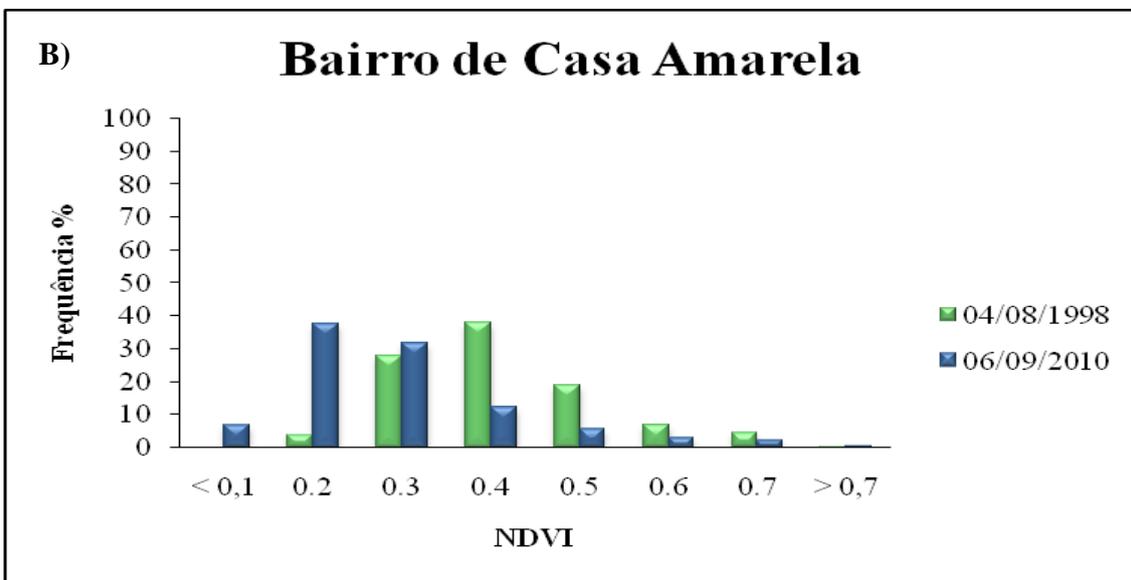
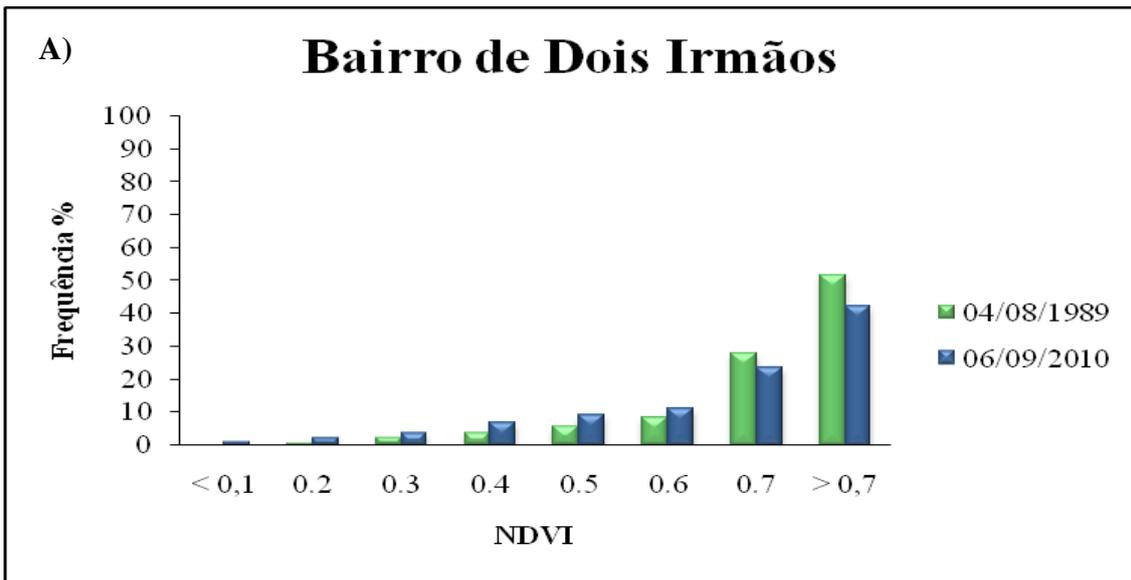
**Figura 29:** Índice de vegetação para o bairro do Pina nas datas 04/08/1998 e 06/09/2010.

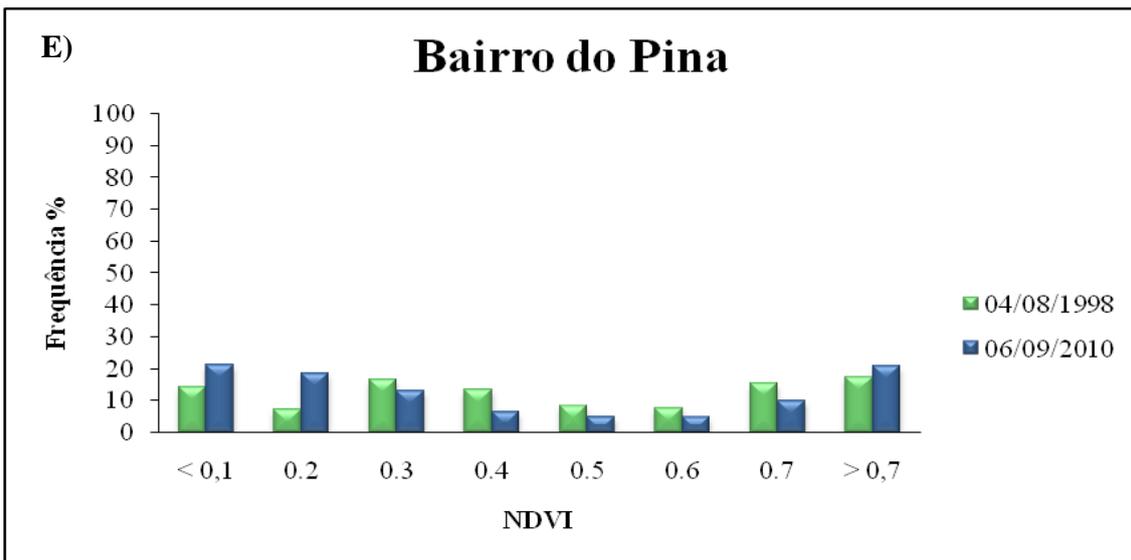
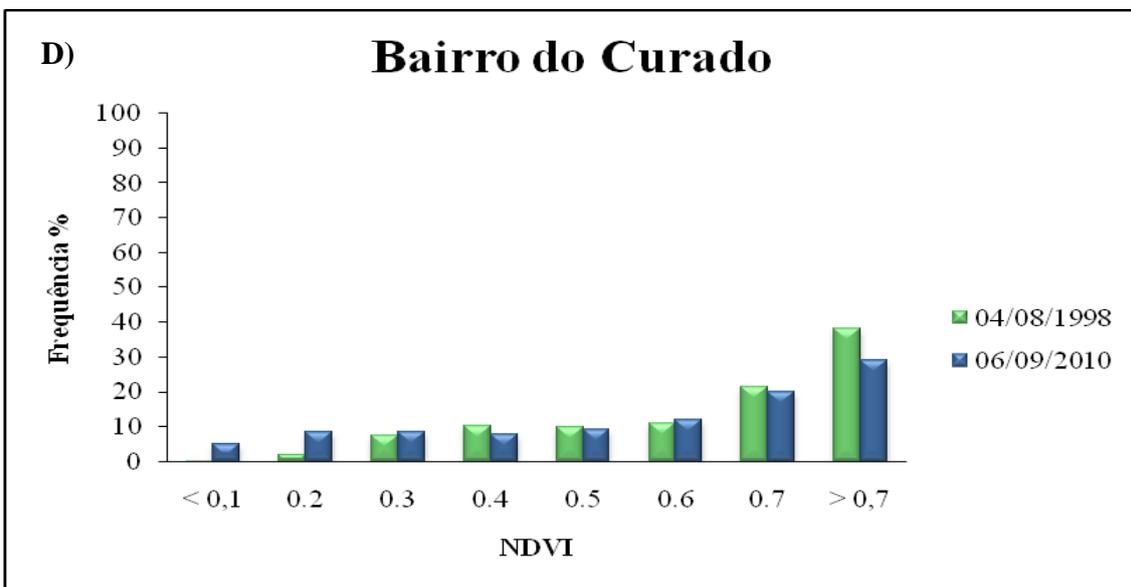
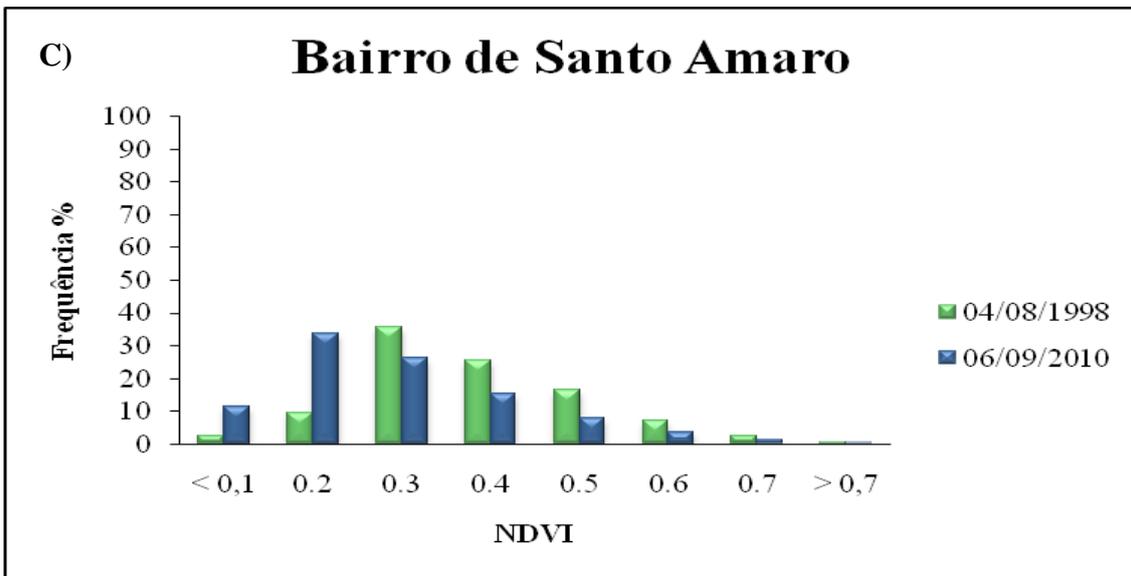
A distribuição de frequência dos valores do NDVI e a sua variabilidade espacial e temporal estão representadas na Figura 30, sendo possível verificar que os bairros de Casa Amarela e Santo Amaro, foram onde ocorreram os menores índices obtidos nos anos em questão, por apresentar elevada quantidade de áreas construídas, com grande escassez de vegetação derivado do processo de urbanização existente no local.

Para o bairro do Pina houve uma grande variação dos valores de NDVI, pelo fato de apresentar uma considerável heterogeneidade em sua área, onde as classes mais acentuadas encontram-se na faixa menor do que 0,1 corresponde aos corpos d'água e áreas urbanas, a outra classe com valores maior que 0,7 referente a área do parque dos manguezal.

Ainda de acordo com a Figura 30, observa-se que os bairros de Dois Irmãos e Curado obtiveram os maiores valores de NDVI, com predominância de valores na faixa maior que 0,7, por apresentar área de vegetação nativa e densa. Também foi observado que no mesmo bairro houve uma diminuição gradual das classes analisadas ao longo

dos anos, devido à dinâmica do crescimento urbano existente na área. Sendo assim os dados estão coerentes com os valores obtido da temperatura superfície e do albedo.





**Figura 30:** Distribuição do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) nos bairros: Dois Irmãos (A), Casa Amarela (B), Santo Amaro (C), Curado (D) e Pina (E), para as datas 04/08/1998 e 06/09/2010.

#### 4.4 - Análise estatística dos bairros

A partir das cartas geradas dos bairros de Dois Irmãos, Casa Amarela, Santo Amaro, Curado e Pina, correspondentes as datas 28/09/1989 e 06/09/2010, foram extraídas as médias e o desvio padrão da temperatura da superfície, albedo e NDVI, cujos valores estão representados nas Tabelas 3, 4 e 5.

De acordo com o teste t-Student, o t calculado para a temperatura da superfície, albedo e NDVI durante as datas estudadas foi superior ao t tabelado (3,2905), significando que houve uma diferença significativa entre as médias obtidas. Sendo assim, rejeita-se  $H_0$  para o nível de significância de 0,01%.

**Tabela 3:** Valores médios, desvio padrão e o valor do t calculado obtidos da temperatura da superfície para cada bairro estudado.

Temperatura da Superfície (°C)				
Bairro de Dois Irmãos				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	21,41	0,584	5,297	3,290
2010	21,52	2,379		
Bairro de Casa Amarela				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	27,42	0,666	22,126	3,290
2010	27,67	1,306		
Bairro de Santo Amaro				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	28,07	0,865	29,489	3,290
2010	28,48	1,583		
Bairro do Curado				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	22,17	2,179	87,624	3,290
2010	24,46	2,598		
Bairro do Pina				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,1%</sub>
1998	22,81	2,520	50,949	3,290
2010	24,38	3,104		

**Tabela 4:** Valores médios, desvio padrão e o valor do t calculado obtidos do albedo da superfície para cada bairro estudado.

Albedo da Superfície				
Bairro de Dois Irmãos				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,107	0,025	42,951	3,290
2010	0,127	0,055		
Bairro de Casa Amarela				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,128	0,020	126,478	3,290
2010	0,169	0,037		
Bairro de Santo Amaro				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,144	0,054	41,807	3,290
2010	0,173	0,072		
Bairro do Curado				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,146	0,045	145,000	3,290
2010	0,151	0,072		
Bairro do Pina				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,112	0,051	28,611	3,290
2010	0,132	0,075		

**Tabela 5:** Valores médios, desvio padrão e o valor do t calculado obtidos do índice de vegetação por diferença normalizada para cada bairro estudado.

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada				
Bairro de Dois Irmãos				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,653	0,122	31,349	3,290
2010	0,604	0,162		
Bairro de Casa Amarela				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,360	0,112	77,078	3,290
2010	0,243	0,162		
Bairro de Santo Amaro				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,354	0,121	80,305	3,290
2010	0,239	0,141		
Bairro do Curado				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,587	0,175	32,678	3,290
2010	0,516	0,221		
Bairro do Pina				
Data	Média	Desvio Padrão	t calculado	t <sub>0,01%</sub>
1998	0,390	0,283	18,723	3,290
2010	0,329	0,314		

## 5. CONCLUSÕES

---

A temperatura da superfície, de um modo geral, aumentou aproximadamente 2°C entre as duas datas estudadas. As maiores temperaturas da superfície encontram-se dentro da malha urbana da cidade, com valores registrados acima de 29°C.

Através do perfil traçado para área de estudo foi perceptível o aumento espacial e temporal das temperaturas da superfície no sentido centro-subúrbio, resultando em uma diferença de 6°C entre essas áreas.

Os bairros com adensamento urbano, grande quantidade de construções verticais e horizontais, destacaram-se como as que possuem temperaturas mais elevadas, apresentando-se acima de 27°C, constatado nos bairros de Casa Amarela e Santo Amaro.

Constatou-se ainda um aumento nos valores do albedo da superfície de uma data a outra. Os maiores valores do albedo foram encontrados dentro da malha urbana de Recife, podendo-se concluir que com o passar dos anos o processo de urbanização na cidade foi intensificando-se, tendo sua superfície modificada pelos materiais construtivos que apresentam maior refletividade e pouca capacidade de reter umidade do que solos vegetados.

Em relação ao índice de vegetação, houve uma diminuição da cobertura vegetal, evidenciado através da análise temporal e espacial das duas datas analisadas. Na área onde ocorreu redução do índice de vegetação houve um aumento da temperatura da superfície em torno de 3°C. Nas áreas que não houve alteração da cobertura vegetal permaneceu com temperaturas em torno de 21°C.

De acordo com o teste t-Student ficou evidenciado que houve aumento da  $T_s$  em todas as áreas selecionadas da cidade do Recife, ao nível de significância  $\alpha = 0,01$ .

O surgimento destas possíveis ilhas de calor pode ser atribuído aos seguintes fatores: concentração de edificações que implica no acréscimo da temperatura; produção de energia antropogênica através da emissão de calor pelas indústrias, trânsitos e habitações; substituição da cobertura vegetal pelos asfaltos; a radiação, causada pela emissividade de corpos.

## 6. REFERÊNCIAS

---

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI M. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and user's manual, version 1.0, p.98, 2002.

ALVES, E. D. L. Caracterização microclimática do campos de Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso. 90p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Cuiabá. Cuiabá-MT, 2011.

AMORIM, M. C. C. T.: O clima Urbano de Presidente Prudente/ SP. São Paulo, 2000. 374p. Tese (Doutorado em Geografia), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

AMORIM, M. C. C. T. Intensidade e forma da ilha de calor urbana em Presidente Prudente/SP: episódios de inverno. Geosul, Florianópolis, v. 20, n. 39, p 65-82, jan./jun. 2005.

AMORIM, M. C. de C. T; DUBREUIL, V; QUENOL, H e J NETO, J. L. S. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França), Confins [Online], 2009. Disponível em: [revues.org/index6070.html](http://revues.org/index6070.html)

ARAUJO, T. L.; DI PACE, F. T. Estimativa Do Albedo Da Superfície Terrestre Em Maceió-Al Utilizando Imagens Do Satélite Tm/Landsat 5. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis-SC, abril 2007.

ARNFIED, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water urban heat island. International Journal of Climatology, v.23, p.1-26, 2003.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO DO RECIFE. Prefeitura do Recife, 2005. <http://www.recife.pe.gov.br/pr/secplanejamento/pnud2006/downloads.htm>; acessado em 25 de janeiro de 2011.

AYOADE, J. O. Introdução à climatologia para os trópicos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 332 p.

BASTIANSSEN, W. G. M.; Meneti, M.; Feddes, R. A.; Holstlag, A. A. M.. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)1, Validation, Journal of Hydrology, n. 212 – 213, p. 213-229, 1998.

BARET, G.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, n.35, p.161-173,1991.

BEZERRA, T. S.; BRANDÃO, A. M. P. M. Análise gerencial do espaço urbano sob a ótica climática: um estudo de caso aplicado ao bairro Maracanã. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Anais. Curitiba: UFPR, 1997. v. 1, p. 283-283.

BRAGA, C. C.; SANSIGOLO, C. A.; RAO, T. V. R. Padrões de variabilidade espaciais e temporais de NDVI na região nordeste do Brasil utilizando análise fatorial. Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), 2000 Edição XI. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BRANDÃO, A. M. P. M. O Clima urbano da cidade do Rio de Janeiro. 1996. 362p. Tese (Doutorado em Geografia Física), Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 1996.

BUENO, C. L. Estudo da atenuação da radiação solar incidente por diferentes espécies arbóreas. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, 1998.

CARNAHAM, W.H.; LARSON, R.C. An analysis of an urban heat sink. *Remote Sensing of Environment*, v.33, n.1, p.65-71, 1990.

CARVALHO, M. M. de. Clima urbano e vegetação: estudo analítico e prospectivo do parque das dunas em Natal. 2001. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFRN, Natal.

CASTRO, A. R. C. Aplicação de sensoriamento remoto na análise espaço-temporal das ilhas de calor e ilhas de frescor urbanas no município de Belém-Pará, nos anos de 1997 e 2008. 69p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará. Belém-PA, 2009.

CHANDER, G., MARKHAM, B. L., & BARSIS, J. A. (2007). Revised Landsat 5 Thematic Mapper radiometric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 490–494.

CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a Central European city. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.24, p.1.395-1.421, 2004.

COLTRI, P. P.. Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo: Análise de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP. 2006. 166 p.

COSTA, F. H. dos S., FILHO, C. R. de S., RISSO, A. Análise temporal de NDVI e mapas potenciais naturais de erosão na região do Vale do Ribeira, São Paulo. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais. Florianópolis, INPE, 2007. CD-ROM.*

DASH P, GOTTSCHKE FS, OLESEM FSH & FISCHER H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*, Bethesda, v.23, n.13, p.2563-2594, 2002.

DICKINSON, R. E.; KENNEY, P. Impacts on regional climate of Amazon deforestation. *Geophysical Research Letters*, 19, p. 1947-1950, 1992.

FEAGLE, R. G.; BUSINGER, J. A. An introduction to atmospheric physics. Orlando: Academic Press, 1980. 432p.

- FILHO, J. F. C.; FRANCISCO, P. R. M.; ANDRADE, M. V.; SILVA, L.; DANTAS, R. L. D. Estimativa do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) na microrregião de Sousa-PB utilizando imagens do CBERS-2. XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Aracaju-SE, 2007.
- FREITAS, E. D.; DIAS, P. L. S. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.3, p. 355-366, 2005.
- FREITAS, M. K.; LOMBARDO, M. A. Índices urbanísticos e qualidade ambiental em áreas centrais de metrópoles: o caso de São Paulo. *Revista de Geografia da UFC*. Ano 06, n.12, 2007.
- GARCIA, Maria Carmen Moreno. *Climatologia urbana*. Barcelona: Universitat de Barcelona, 1999. 71p. (Textos docentes, 160).
- GIVONE, B. *Climate and architecture*. 2<sup>o</sup> ed. London: Applied Science, 1976 (reprinted 1981). Architectural Science Series.
- GIVONE, B - Urban design for hot humid regions. *Renewable Energy*, v. 5, n<sup>o</sup> 5/8, p. 1047-1053, Aug. 1994.
- GOLDREICH, Y. Urban climate studies in Israel – a Review. *Atmospheric Environment*, v.29. n.4, p.467-478, 1995.
- GOUVÊA, M. L. Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo. São Paulo, 2007, 91p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- HARTANN, D. L. *Global physical climatology*. 1 ed. San Diego, California, Academic Press. 1994. 411p.
- HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; CHENG-JENG, F. Spectral assessment of soyabean leaf area and leaf biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.46, n.5, p.651-656, 1980.
- HUANG, J., AKBARI, H., AND TAHA, H. 1990. "The Wind-Shielding and Shading Effects of Trees on Residential Heating and Cooling Requirements", *ASHRAE Transactions*, 1990, Vol. 96, Part 1, pp. 1403-1411.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v.25, p. 295-309, 1988.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br>>, acessado em Novembro de 2010.
- IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. London: Academic Press, 1983. 390p.
- IWAI, O.K. Mapeamento do uso do solo urbano do município de São Bernado do Campo, através de imagens de satélites. 2003. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, London, v.423, n.29, p.528-531, 2003.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.99, p.44-54, 2005.

KÖPPEN, W. 1948. *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Econômica. México. 479p.

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

LANDSAT. Landsat.org, Global Observatory for Ecosystem Services, Michigan State University. Disponível em <http://landsat.org>. Acesso em janeiro de 2011.

LIU, W. T. H.; MING, T. C. Estimativa de albedo, temperatura e NDVI do estado de São Paulo através de dados AVHRR do satélite NOAA. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro-Brasil, 2000. Anais, p. 3843-3849.

LO, C.P.; QUATTROCHI, D.A. 2003: Land- use and land-cover change, urban heat island phenomenon, and health implications: A remote sensing approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69(9), 1053-1063p.

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

LOMBARDO, M. A.; ROSSETTI, L. A. F. G.; ANTONELLO, S. L.; Falcão, M. L.; Olivetti, G. S. Base digital da Planta Cadastral urbana de Rio Claro, SP. In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte, 2003.

LU, D. ; WENG, Q. 2006. Use of impervious surface in urban land use classification. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2): 146-160.

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.

MENDONÇA, F. A. O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para o estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR. (Tese de Doutorado). São Paulo: FFLCH/USP- Programa de Pós-Graduação em Geografia, 1994, 300p.

MENDONÇA, F. A. Clima e planejamento em Londrina. In: Montiro, C. A de F.: MENDONÇA, F. (Org). *Clima Urbano*. São Paulo: Editora Contexto, 2003. p.93-120.

MASCARÓ, L. R. Energia na edificação, estratégia para minimizar seu consumo. Projeto de Editores Associados, São Paulo, n. 81, p. 69, nov. 1991.

- MASCARÓ, L. *Ambiência Urbana*. Porto Alegre: Sagra-D.C. Luzzatto, 1996. 199p.
- MONTEIRO, C. A. de F. *Teoria e Clima Urbano*. São Paulo: IGEOG/USP, 1976. 181p. (Série Teses e Monografias, 25).
- MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 2.ed. Viçosa - MG: UFV, 2003. 307 p.
- MOREIRA, E. B. M.; GALVÍNCIO, J. D. Distribuição Espacial das Temperaturas à Superfície na cidade do Recife, utilizando imagens TM Landsat - 7. *Revista de Geografia UFPE/DCE*, v.20, n 3, p. 77-89, 2007.
- MOREIRA, E. B. M.; GALVÍNCIO, J. D. Análise multitemporal da ilha de calor urbana na cidade do Recife, através de imagens do Landsat TM-5. *Anais. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE*. Natal, 2009, p.1441-1448.
- MONTEIRO, C. A. de F.; MENDONÇA, F. (Org.). *Clima Urbano*. São Paulo: Editora Contexto, 2003. 192p.
- MOURA, M. O. *O Clima Urbano de Fortaleza sob o nível do Campo Térmico*. 2008. Dissertação de Mestrado em Geografia/UFC. Fortaleza, 2008.
- NUCCI, J. C.; CAVALHEIRO, F. Cobertura vegetal em áreas urbanas: conceito e método. *GEOUSP*, n.6, p. 29-36, 1999.
- OKE, T. R., MAXWELL, G.B. Urban heat island dynamics en Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, v.9, p.191-200, 1975.
- OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. London: Ethuen & CO, 1978. 372p.
- OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparasion of Scale Model and Field Observations. *Journal of Climatology*, v.1, p. 237-254, 1981.
- OKE, T. R. *Boundary Layer Climates* -2nd ed. London: Routledge, 1987. 435p.
- OKE, T.R.; JOHNSON, G.T.; STEYN, D.G.; WATSON, I.D. Simulation of surface urban heat islands under "Ideal" Conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorological*, v.56, p.339-358, 1991.
- OLIVEIRA, S. *A Poluição do Ar e as Alterações Climáticas na Cidade de São Paulo*. Pólis, n.3, p. 37-44, 1991.
- PEREZ, J.C.; SANCHEZ, M. De Los. A.V.; BARRADAS, V.L. Clima, urbanización y uso Del suelo em ciudades tripicales de Mexico. *RNIU*, Puebla, México, Ciudades 51, jul-set. 2001.
- PONGRACZ, R.; BARTHOLY, J.; DEZSO Z. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*, June 2005. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/asr](http://www.elsevier.com/locate/asr)>

RAO, P.K. Remote sensing of urban “heat islands” from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.53, p.647-648, 1972.

RECIFE. A situação da ZEPA Parque dos Manguezais. In: Seminário Estratégias para Conservação e Gestão do Manguezal do Pina. 23 abr. 2008. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 3., Washington, D.C., NASA, 1, p.309-317, 1973.

SANTAMOURIS, M. (Ed.), 2001. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. James and James Science Publishers, London.

SANTOS, M. *Manual de Geografia Urbana*. São Paulo: Hucitec, 1981. 203p

SAYDELLES, A. P.; Estudo Do Campo Térmico E Das Ilhas De Calor Urbano Em Santa Maria-RS. Dissertação de Mestrado UFSM Santa Maria, RS, Brasil 2005. 237p.

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

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, 2005.

SILVA, L.; COSTA, J. F. F.; LIMA, E. R. V.; ALMEIDA, H. A. Análise do albedo e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) em uma bacia hidrográfica, usando o SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land. XIII SBGFA, 054, UFV - Viçosa, MG, 2009.

SILVA, B. B. da; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. *Revista Caatinga*, Mossoró, v.24, n.3, p.145-152, 2011.

SOUZA, L. C. L. Desempenho térmico de coberturas leves: Aplicação do modelo NBSLD. São Carlos. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1990.

STULL, R. B.. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 666 p. 1993.

TUCCI, C.E.M. (2002). *Flood Control and Urban Drainage Management in Brasil*. Institute of Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul – Porto Alegre – RS Brazil. *Water Waterlines*, vol. 20 n.4, april, pg. 8.

VOOGT, J.A.; OKE, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.86, p.370-384, 2003.

VULKOVICH, F.M. An analysis of the ground de temperature and reflectivity patter about St.Luis, Missouri, using HCMM satellite data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v.22, p.560-571, jan.1983.

XAVIER, A. L.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; MAITELLI, G. T.; OLIVEIRA, A. G.; OLIVEIRA, A. S.; SANTOS, F. M. M.; NOGUEIRA, J. S. Variação da temperatura e umidade entre áreas urbanas de Cuiabá. *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*, v. 6, n. 1, p. 082-093, jan/abr 2009.

WENG, Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n.10, p. 1999-2014, 2001.

WENG, Q.; DENGSHENG, L.; SCHUBRING, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 89, Elsevier: 467–483.

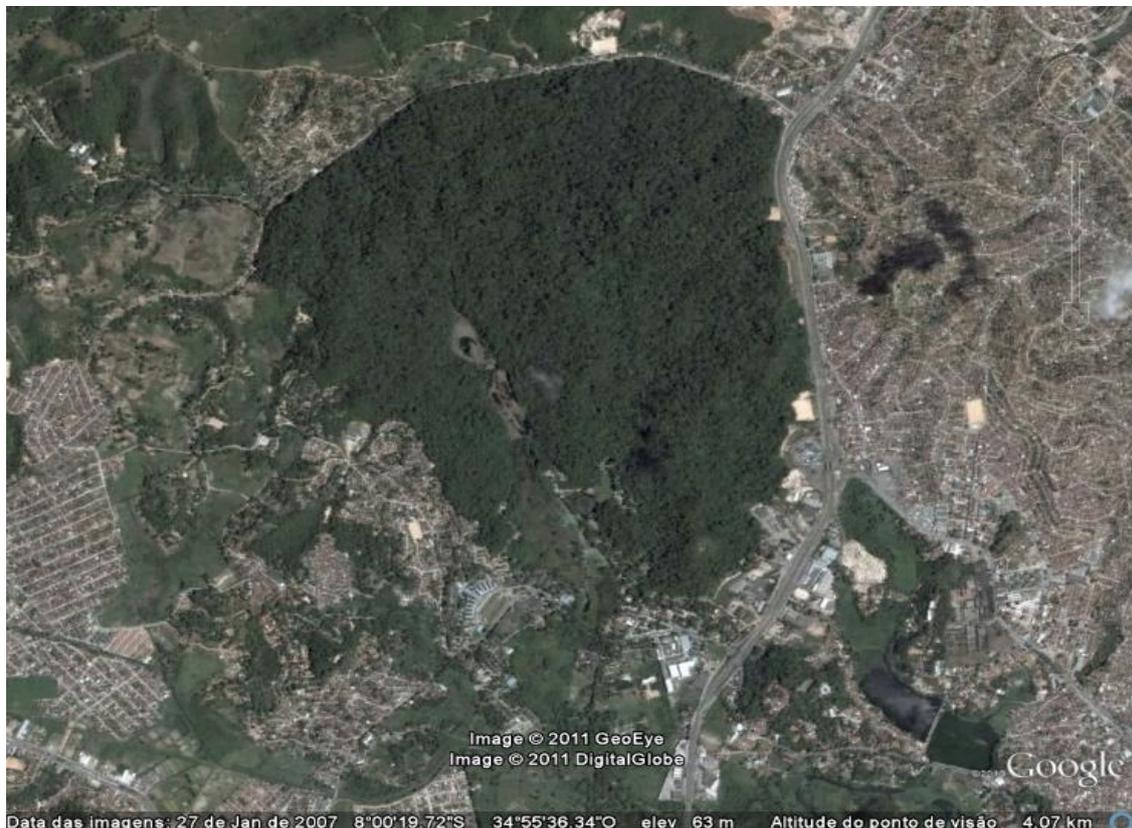
## APÊNDICE

---

### Bairro de Dois Irmãos



**Figura 31:** Bairro de Dois Irmãos: avanço da urbanização na área de floresta.



**Figura 32:** Bairro de Dois Irmãos.

Fonte: [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)

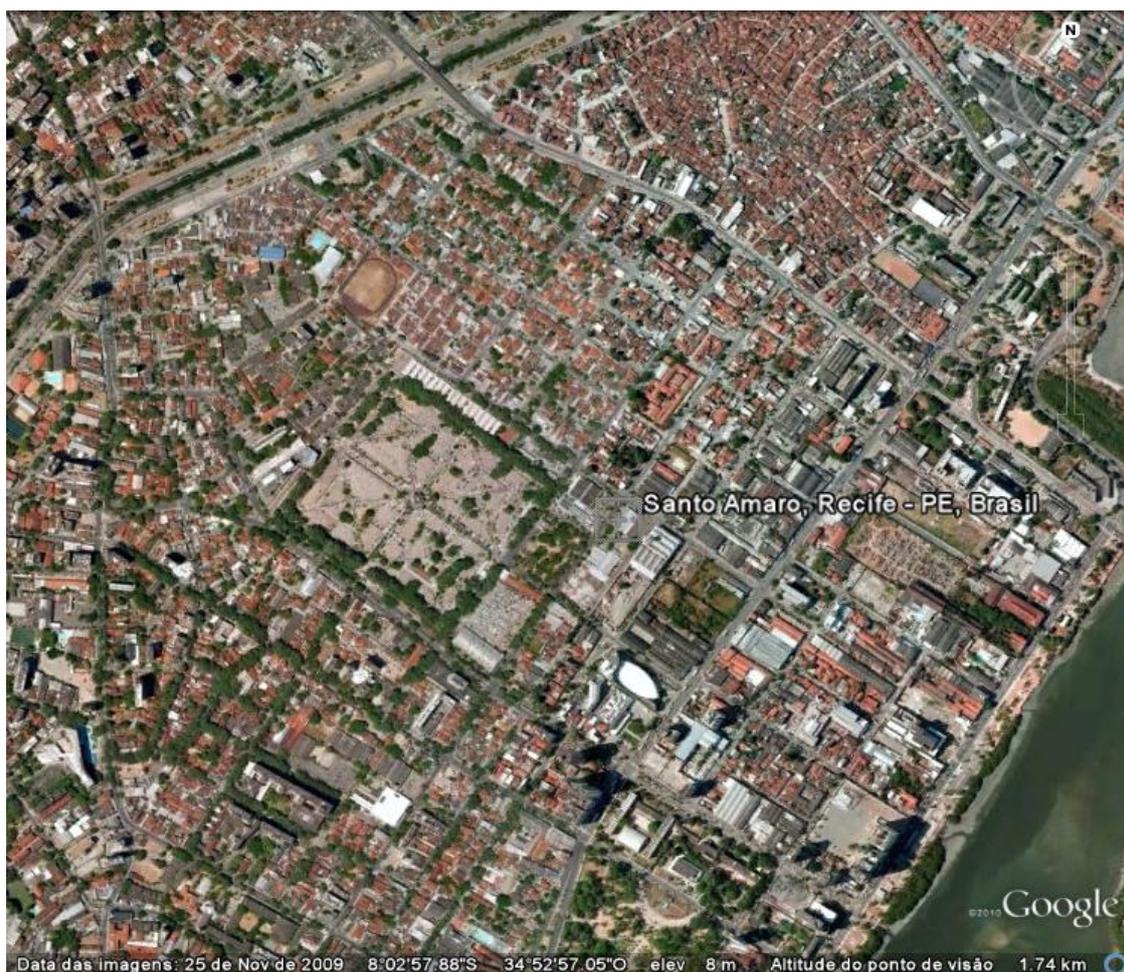


## Bairro de Santo Amaro



**Figura 35:** Bairro de Santo Amaro: contraste da urbanização e a vegetação.

Fonte: [Santo Amaro um novo olhar](#) e <http://www.skyscrapercity.com>.



**Figura 36:** Bairro de Santo Amaro.

Fonte: [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)

**Bairro do Curado**



**Figura 37:** Bairro do Curado: expansão da área urbana.



**Figura 38:** Bairro do Curado.

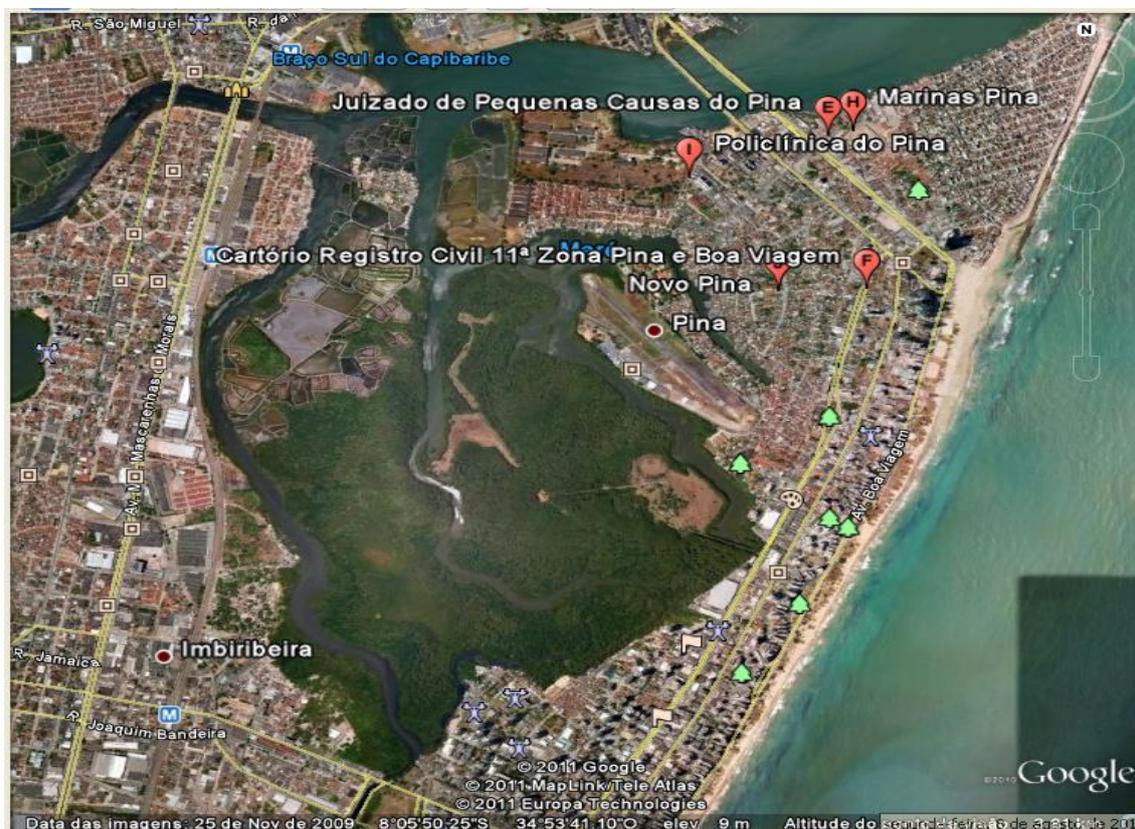
Fonte: [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)

## Bairro do Pina



**Figura 39:** Bairro do Pina: uso e ocupações do solo.

Fonte: Recife (2008) e JC on-line.



**Figura 40:** Bairro do Pina.

Fonte: [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)