



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ILHAS DE CALOR URBANAS NO NORDESTE BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO  
COM BASE EM IMAGENS DE SATÉLITE**

**Maryana Cavalcante Cordeiro**

**Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**MARÇO – 2016**

**MARYANA CAVALCANTE CORDEIRO**

**ILHAS DE CALOR URBANAS NO NORDESTE BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO  
COM BASE EM IMAGENS DE SATÉLITE**

**Dissertação apresentada como requisito  
para obtenção do grau de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em  
Meteorologia da Universidade Federal de  
Campina Grande.**

**Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas**

**Subárea: Radiação e Sensoriamento Remoto**

**Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**MARÇO – 2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C794i Cordeiro, Maryana Cavalcante.  
Ilhas de calor urbanas no nordeste brasileiro: uma avaliação com base em imagens de satélite / Maryana Cavalcante Cordeiro. – Campina Grande, 2016.  
70f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.  
"Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva".

1. Sensoriamento Remoto. 2. Qualidade Ambiental Urbana. 3. Ilhas de Calor Urbanas - Nordeste Brasileiro. 4. Superfície - Temperatura. I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da. II. Título.


CDU 528.8(043)

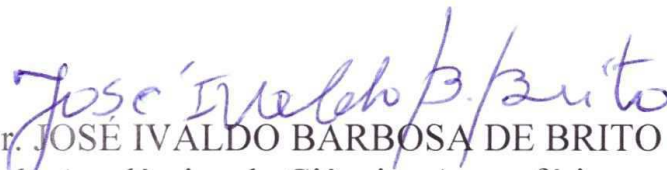
MARYANA CAVALCANTE CORDEIRO


ILHAS DE CALOR URBANAS NO NORDESTE BRASILEIRO: UMA AVALIAÇÃO  
COM BASE EM IMAGENS DE SATÉLITE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/02/2016

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. JOEL SILVA DOS SANTOS  
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente  
Universidade Federal da Paraíba

## AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar.

Aos meus pais Cecília Maria de Souza Cavalcante e Sebastião Iguatemyr Cadena Cordeiro por existirem e me oferecerem tudo o que eu preciso (amor, carinho, ensinamentos e cuidados).

Aos meus irmãos Maria, João Gabriel, Ariana e Luciano pelos momentos vividos.

Aos amigos que eu tenho a meu lado, inclusive a Nayara (por me acompanhar desde a graduação e estar ao meu lado), Dani, Juliete, Kedyna, Gabi, Dri e Irene.

Ao Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva pela orientação, estímulo e paciência no presente trabalho.

Aos professores Ivaldo e Bernardo pelo apoio e a todos os que sempre me ajudaram e contribuíram para o meu crescimento e conhecimento, tanto na UFAL quanto na UFCG.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), através do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) pela oportunidade concedida para a realização desse curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo concedida.

À minha turma de mestrado, pela amizade e pelos momentos de descontração.

E a todos que direta e indiretamente colaboraram na condução e realização do presente trabalho.

## RESUMO

O processo de urbanização crescente tem como consequências alterações no clima local que interferem na qualidade ambiental urbana. O objetivo deste trabalho é estimar e analisar as magnitudes das Ilhas de Calor Urbanas (ICU) em seis cidades do Nordeste Brasileiro, no período de 2006 a 2010. A temperatura da superfície foi estimada através de imagens de satélite meteorológico e comparadas com os dados obtidos nas PCDs (Plataforma de Coleta de Dados). O estudo foi realizado nas cidades de Campina Grande e Patos, na Paraíba, Recife e Petrolina, em Pernambuco, e Maceió e Pão de Açúcar, em Alagoas. Também foram coletados em dez locais na área urbana da cidade de Campina Grande dados de umidade, temperatura do ar e da superfície por meio de um aparelho termo-higrômetro, nos meses de novembro e dezembro de 2015, a fim de comparar os dados de superfície obtidos por satélites com aqueles coletados com PCDs. As imagens de satélite foram manipuladas utilizando o programa ERDAS 2014 e os mapas foram confeccionados usando o programa QuantumGIS 2.8.2. Com as análises entre as temperaturas da superfície por imagens de satélite e PCDs pode-se concluir que a temperatura da superfície pode ser estimada por meio de imagens de satélite com coeficiente de correlação estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados mostram que a tendência da temperatura da superfície é de aumentar, provocando alterações no microclima urbano das cidades analisadas. A intensidade média da ICU foi mais pronunciada na cidade de Maceió, seguida por Recife, Patos, Pão de Açúcar, Petrolina e Campina Grande.

**Palavras-Chave:** Temperatura da superfície. Qualidade ambiental urbana. Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

The growing urbanization process has consequences the local climate and interfere negatively in the urban environmental quality. The main objective of this study was to estimate and to analyze Urban Heat Island magnitude (UHI) in six cities of the Brazilian northeast region, for the period 2006 - 2010. The surface temperatures was obtained by meteorological satellite images and then compared with the data obtained in PDC (Platform Data Collection). The study was carried out to the cities of Campina Grande and Patos, both in state of Paraíba, Recife and Petrolina in state of Pernambuco, as well as in Pão de Açúcar and Maceió, both in state of Alagoas. In addition, it was collected data in relative humidity, air temperature and surface temperature through a thermo-hygrometer device, in the period November/December 2015 in order to compare satellite surface data with that collected in the PDCs. The satellite images were handled by the ERDAS 2014 program and the maps were obtained using QuantumGIS 2.8.2 program. The results show that the trend of the surface temperature is increased, due to changes in the urban microclimate. The UHIM intensity was most striking during the period 2006-2010 in Maceió, followed by the cities of Recife, Patos, Pão de Açúcar, Petrolina and Campina Grande. Based on the analysis of the surface temperatures from satellite and PDCs we can to conclude that surface temperature can be obtained by satellite images with correlation coefficient statistically significant.

**Keywords:** Surface temperature. Urban environmental quality. Remote sensing.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	02
2.1. O clima urbano	02
2.2. Escalas climáticas urbanas	03
2.3. Ilha de Calor Urbana (ICU)	04
2.4. Os fatores urbanísticos e o clima urbano	05
2.5. Sensoriamento Remoto	06
2.5.1. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN)	08
2.5.2. Albedo	09
2.5.3. Temperatura da superfície (Ts)	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Caracterização da área de estudo	14
3.1.1. O Nordeste Brasileiro	14
3.1.2. Paraíba	15
3.1.3. Pernambuco	16
3.1.4. Alagoas	17
3.2. Série LANDSAT	19
3.3. Sensor TM	19
3.4. Algoritmo SEBAL	19
3.5. Dados utilizados	20
3.6. Métodos	22
3.6.1. Radiância espectral – Etapa 1	22
3.6.2. Reflectância monocromática – Etapa 2	23
3.6.3. Albedo no topo da atmosfera – Etapa 3	23
3.6.4. Albedo da superfície – Etapa 4	23
3.6.5. Índices de vegetação: IVDN, IVAS e IAF – Etapa 5	24



3.6.6. Emissividades – Etapa 6	25
3.6.7. Temperatura da superfície – Etapa 7	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Campina Grande – PB	26
4.2. Patos – PB	28
4.3. Recife – PE	31
4.4. Petrolina – PE	35
4.5. Maceió – AL	38
4.6. Pão de Açúcar – AL	42
4.7. Comparações entre temperaturas	48
4.8. Estudo de caso na cidade de Campina Grande – PB	56
5. CONCLUSÕES	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.	Características do sensor TM	21
Quadro 2.	Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Campina Grande na Figura 5	27
Quadro 3.	Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Patos na Figura 6	30
Quadro 4.	Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade do Recife na Figura 7	34
Quadro 5.	Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Petrolina na Figura 8	37
Quadro 6.	Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Maceió na Figura 9	41
Quadro 7.	Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Pão de Açúcar na Figura 10	44
Quadro 8.	Datas das imagens obtidas pelo Landsat-5 das cidades de Campina Grande e Patos no período de 2006 a 2010	45
Quadro 9.	Datas das imagens obtidas pelo Landsat-5 das cidades de Recife e Petrolina no período de 2006 a 2010	46
Quadro 10.	Datas das imagens obtidas pelo Landsat-5 das cidades de Maceió e Pão de Açúcar no período de 2006 a 2010	47
Quadro 11.	Valores encontrados na área urbana e área rural de cada imagem adquirida e as intensidades de ilha de calor entre elas em Campina Grande e em Patos na Paraíba	52
Quadro 12.	Valores encontrados na área urbana e área rural de cada imagem adquirida e as intensidades de ilha de calor entre elas em Recife e em Petrolina em Pernambuco	53
Quadro 13.	Valores encontrados na área urbana e área rural de cada imagem adquirida e as intensidades de ilha de calor entre elas em Maceió e em Pão de Açúcar em Alagoas	54
Quadro 14.	Dados de temperatura do ar encontradas na área urbana da cidade, na PCD e a intensidade de ilha de calor entre elas, para o dia 07/11/2015	59
Quadro 15.	Dados de temperatura do ar encontradas na área urbana, na PCD e a intensidade de ilha de calor entre elas, para o dia 23/11/2015	60
Quadro 16.	Dados de temperatura do ar encontradas na área urbana, na PCD e a intensidade de ilha de calor entre elas, para o dia 09/12/2015	61

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa do Brasil com destaque para a região Nordeste e os estados onde estão localizadas as cidades analisadas no estudo	15
Figura 2.	Estado da Paraíba, indicando as cidades de estudo e a localização das PCDs (Plataforma de Coleta de Dados)	16
Figura 3.	Estado de Pernambuco, indicando as cidades de estudo e a localização das PCDs (Plataforma de Coleta de Dados)	17
Figura 4.	Estado de Alagoas, indicando as cidades de estudo e a localização das PCDs (Plataforma de Coleta de Dados)	18
Figura 5.	Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Campina Grande para os dias 26/08/2006 e 29/08/2007	26
Figura 6.	Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Patos para os dias 14/06/2006, 24/01/2007, 19/06/2008, 13/01/2009 e 28/08/2010	29
Figura 7.	Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Recife para os dias 15/02/2006, 07/04/2007, 05/02/2008 e 06/09/2010	33
Figura 8.	Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Petrolina para os dias 30/07/2006, 06/01/2007, 21/09/2008, 27/11/2009 e 07/06/2010	36
Figura 9.	Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Maceió para os dias 26/08/2006, 30/09/2007, 21/02/2008 e 11/12/2010	40
Figura 10.	Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Pão de Açúcar para os dias 07/12/2006, 24/01/2007, 10/11/2008, 13/11/2009 e 29/09/2010	43
Figura 11.	Análises da correlação linear e do teste t-Student entre a temperatura do ar e do solo nas PCDs para as cidades de a) Patos, b) Petrolina e c) Maceió, no período de 2006 a 2010	49

Figura 12.	Análises da correlação linear e do teste t-Student entre a temperatura da superfície e do solo entre as imagens de satélite e por PCDs para as cidades de a) Patos, b) Petrolina e c) Maceió para o período estudado	51
Figura 13.	Correlação linear entre as intensidades de ICU (°C) pelas imagens de satélite e imagens de satélite / PCD para as cidades de a) Campina Grande, b) Patos, c) Recife, d) Petrolina, e) Maceió e f) Pão de Açúcar no período de 2006 a 2010	55
Figura 14.	Pontos de coleta dos dados de temperatura e umidade em Campina Grande	56
Figura 15.	Fotos dos dez locais em que foram realizadas as coletas pelo aparelho termo-higrômetro na cidade, exibindo sua estrutura e diferentes materiais de recobrimento do solo	57

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AVHRR	-	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIRIS	-	Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer
BLHI	-	Ilha de Calor da Camada Limite
CLHI	-	Ilha de Calor da Camada da Copa
ERTS	-	Earth Resources Technology Satellite
IAF	-	Índice de Área Foliar
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	-	Ilha de Calor Urbana
IVDN	-	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
MSS	-	Multispectral Scanner System
NASA	-	National Aeronautics and Space Administration
ND	-	Número Digital
NEB	-	Nordeste Brasileiro
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
PIB	-	Produto Interno Bruto
PCD	-	Plataforma de Coleta de Dados
IVAS	-	Índice de Vegetação Ajustado para os efeitos do Solo
SEBAL	-	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SUHI	-	Ilha de Calor Urbana da Superfície
TM	-	Thematic Mapper
TOA	-	Irradiância espectral no topo da atmosfera
TST	-	Temperatura da Superfície Terrestre
USGS	-	United States Geological Survey
hab	-	Habitantes
$\alpha_{toa}$	-	Albedo planetário
$\alpha$	-	Albedo da superfície
$\alpha_{path\_radiance}$	-	Porção da radiação solar refletida pela atmosfera

DJ	-	Dia Juliano
$dr$	-	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol
$\epsilon_a$	-	Emissividade atmosférica
$\epsilon_{NB}$	-	Emissividade termal
$\epsilon_o$	-	Emissividade da superfície
G	-	Calor do solo
$G_{sc}$	-	Constante Solar
$K_\lambda$	-	Constante monocromática solar
$L_\lambda$	-	Calibração radiométrica
$\rho_\lambda$	-	Reflectância monocromática
$L_\lambda$	-	Radiância Espectral em sensor de abertura
$T_b$	-	Temperatura de brilho
$T_s$	-	Temperatura de superfície
$\tau_{sw}$	-	Transmissividade atmosférica
$\theta$	-	Ângulo zenital do sol
z	-	Imagem que representa a elevação do terreno
$\lambda$	-	Comprimento de onda
$\mu$	-	Símbolo do prefixo micro

## 1. INTRODUÇÃO

A Ilha de Calor Urbana (ICU) refere-se ao fenômeno de temperaturas mais altas que ocorrem em áreas urbanas que nas áreas rurais circundantes devido à urbanização (Voogt e Oke, 2003). Caracterizam-se por uma grande extensão de materiais impermeáveis que cobrem a maioria de áreas urbanas e, como consequência, ocorre o aumento no fluxo de calor sensível à custa de fluxo de calor latente (Oke, 1982; Owen et al. 1998). Os efeitos da ICU são agravados pelo calor antropogênico gerado pelo tráfego, indústria e edifícios residenciais, impactando o clima local através da massa compacta de prédios da cidade que afetam a troca de energia e níveis de condutividade. As ilhas de calor podem ser caracterizadas por diferentes camadas da atmosfera urbana, para várias superfícies, e divididas em três categorias: ilha de calor da camada da copa (CLHI), ilha de calor da camada limite (BLHI), e da ilha de calor urbana da superfície (SUHI). A camada do dossel urbano se estende para cima a partir da superfície para significar construção em altura, enquanto que a camada limite urbana está localizado acima da camada do dossel (Voogt e Oke, 2003). A CLHI e a BLHI são ilhas de calor na atmosfera, uma vez que significam um aquecimento da atmosfera urbana, enquanto o SUHI refere-se ao calor relativo das superfícies urbanas em relação às áreas rurais circundantes. Sabe-se que as ICU atmosféricas são maiores durante à noite enquanto que as ICU de superfície são maiores durante o dia (Roth et al. 1989).

As temperaturas mais elevadas em ICU aumentam as demandas de energia, elevam os níveis de poluição, e podem modificar os padrões de precipitação. O sensoriamento remoto apresenta a grande vantagem de propiciar estimativas da temperatura da superfície em uma escala regional ou global (Dash et al. 2002).

Portanto, espera-se que as avaliações de temperatura da superfície através de imagens de satélite possam oferecer estimativas confiáveis de ilha de calor urbana na região do Nordeste do Brasil bem como verificar as intensidades das ICU. Nesse sentido, o presente trabalho pretende analisar os dados de albedo, índice de vegetação e temperatura da superfície usando imagens do satélite Landsat-5 e de temperaturas do ar e do solo observadas em Plataforma de Coleta de Dados (PCD) num período de 2006 a 2010, bem como validar a ocorrência e intensidade de ilha de calor de cidades localizadas na região do Nordeste Brasileiro (NEB).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. O clima urbano**

O clima é o resultado dinâmico de fatores globais (radiação solar, altitude, latitude, longitude, massas d'água), fatores locais (retirada da vegetação, topografia, revestimento e impermeabilização do solo, volume edificado, adensamento populacional) e de elementos climáticos como temperatura, umidade, velocidade e direção dos ventos. Segundo Barbirato (2007), o clima é um grande fator responsável pela modificação das paisagens, diversidade biológica em nosso planeta, pelas diferentes tipologias arquitetônicas, assim como pelos diversos hábitos e costumes do homem. As alterações do clima local, causadas por fatores relacionados à urbanização e às atividades humanas, geram uma nova condição climática denominada clima urbano. Lombardo (1985) afirma que o clima urbano é um mesoclima que está incluído no macroclima e que sofre, na proximidade do solo, influências microclimáticas derivadas dos espaços intra-urbanos. As consequências mais perceptíveis dessas influências microclimáticas são os desenvolvimentos de ilhas de calor urbanas e os domos de poeira, que influenciam fortemente na qualidade da vida urbana.

Segundo Morais (2011) os estudos sobre climatologia urbana iniciaram no século XIX, no início da era industrial. Os estudos se intensificaram após a 2ª Guerra Mundial, na Europa, Estados Unidos e Japão, onde o processo de crescimento urbano e a industrialização já estavam muito evidentes. Esses trabalhos procuraram destacar os aspectos meteorológicos e as relações entre o tamanho das cidades e as temperaturas. No entanto, foi a partir de meados do século XX, que as pesquisas sobre a climatologia urbana tiveram um aumento significativo, já demonstrando uma preocupação maior do homem sobre as mudanças no ambiente urbano, sobretudo devido à poluição atmosférica.

Em relação a esse período, Lombardo (1985) e Monteiro e Mendonça (2003) destacam que as obras de Landsberg, dedicadas à análise dos aspectos meteorológicos e sua interação com a urbanização, e a de Chandler, sobre o clima da metrópole londrina, são consideradas clássicas. Assim, vários estudos teóricos foram desenvolvidos no intuito de compreender as transformações no comportamento climático na atmosfera urbana causadas pela urbanização, entre eles, Lombardo (1985), Landsberg (1981) e Oke (1976; 1981; 1982).



## 2.2. Escalas climáticas urbanas

As variações climáticas no ambiente urbano podem ser analisadas em escalas distintas (escalas verticais, horizontais e temporais). Essas escalas abrangem desde o espaço regional até a escala do edifício. Para alguns autores, tais como Mascaró e Mascaró (2009) e Romero (2000), as escalas climáticas são avaliadas em três condições: o macroclimático, o mesoclimático e o microclimático. A escala macroclimática se refere ao clima geral de uma região e é relacionada aos fatores climáticos globais. Os dados macroclimáticos são obtidos nas estações meteorológicas. A escala mesoclimática (escala referente ao estudo) corresponde ao clima local e informa as modificações do macroclima provocadas por elementos locais, tais como a geomorfologia, a cobertura do solo e grandes massas d'água. Mascaró e Mascaró (2009) considera esses dados de difícil obtenção. A escala microclimática corresponde ao clima de pequenos espaços urbanos e é modificado em função das atividades e funções humanas desempenhadas no espaço urbano.

Monteiro (1976) considera o clima local como unidade básica do clima urbano e propõe uma divisão escalar (escala horizontal) relacionando as unidades climáticas com a ordem de grandeza taxonômica das formas e com as unidades (ou graus) de urbanização. Assim, o autor propõe a divisão do clima em: mesoclima, topo-clima e microclima. O mesoclima corresponde ao clima de cidade grande ou parte da área metropolitana. O topo-clima refere-se aos espaços urbanos homogêneos quanto à ocupação ou condições topográficas, podendo ser relativos a uma pequena cidade, ou então, a algumas partes de bairros de cidades maiores. O microclima se refere aos pequenos espaços, onde a temperatura do ar pode variar diversos graus em distâncias muito pequenas.

### 2.3. Ilha de Calor Urbana (ICU)

Dentre as modificações climáticas produzidas pela urbanização, a mais característica e estudada é a ilha de calor. É um fenômeno que registra o crescente aumento da temperatura nas áreas mais adensadas da cidade, em relação às áreas rurais ou menos urbanizadas, do seu entorno. Se resume à diferença entre a temperatura da área urbana em relação à área rural. De acordo com Landsberg (1981), a formação da ilha de calor não depende apenas da urbanização. O autor assegura que sob condições de tempo específicas, tais como ventos intensos, as diferenças de temperatura urbano-rurais tendem a se dissipar.

Assis (2000), através da simulação de modelos reduzidos de áreas urbanas reais, analisou a influência da tipologia e da configuração dos edifícios na perda de calor radiante e comprovou a ocorrência da intensidade máxima da ilha de calor após o pôr-do-sol, em condições de tempo calmo e sem nuvens.

Verifica-se numa área urbana a elevação das temperaturas da periferia para o centro da cidade, havendo um aumento brusco na transição da área rural para a área urbana.

Para Maitelli (1994), a intensidade da ilha de calor está relacionada com o tamanho da cidade, tendo como parâmetro a população, que demanda mais construções, mais veículos, mais indústrias, maior retirada da vegetação para acomodação dessa população, entre outros. A autora afirma que quanto mais populosa é a cidade, maiores serão os efeitos da ilha de calor e que o fluxo de calor estocado pelo tecido urbano juntamente com o fluxo de calor antropogênico produzido pela dinâmica urbana constituem a principal causa da formação de ilhas de calor.

O estudo sobre a intensidade de ilha de calor deve-se levar em consideração os fatores geográficos, o clima, a cobertura do solo e o desenvolvimento da malha urbana em cada cidade.

No Brasil, um dos estudos pioneiros relacionados à ilha de calor urbana é o de Lombardo (1985) que analisou o fenômeno ilha de calor na cidade de São Paulo e observou que os maiores valores de temperatura foram registrados nas áreas com maior concentração de indústrias, no centro da cidade. Isto demonstra que a densidade construtiva e a ocupação do solo possuem uma relação estreita com a intensidade da ilha de calor. Katzschner (2006) destaca que no futuro a qualidade de vida da população das cidades será afetada com mais frequência e intensidade e por períodos mais longos do

que tem sido até agora devido ao aumento da temperatura, intensificado pelos efeitos da ilha de calor urbana.

Diante dessas colocações, constata-se que a urbanização exerce influência direta nos microclimas e propicia a formação da ilha de calor. Nesse contexto, Cox (2008) destaca que o grande desafio atual dos urbanistas é projetar o ambiente urbano de maneira a permitir o crescimento das áreas urbanas, porém sem interferir de forma drástica nas condições microclimáticas.

#### **2.4. Os fatores urbanísticos e o clima urbano**

Ao transformar o ambiente natural em ambiente construído, o ser humano interfere significativamente sobre seu ambiente climático. Segundo Lombardo (1985), as modificações climáticas geradas no ambiente das cidades são causadas pelas fontes adicionais de calor, resultantes das atividades antropogênicas, e pela presença da massa construída (edificações, pavimentação) composta por materiais que são, em geral, bons condutores térmicos e com grande capacidade de retenção de calor.

Givoni (1998) aponta como causadores das mudanças climáticas no ambiente urbano, fatores característicos da morfologia urbana como a localização da cidade dentro da região, o tamanho das cidades, a densidade da área construída, a cobertura do solo, a altura dos edifícios, a orientação e a largura das ruas, a divisão dos lotes, os efeitos dos parques e áreas verdes e detalhes especiais do desenho de edifícios.

As propriedades termodinâmicas dos materiais de revestimento das superfícies urbanas, tanto as horizontais quanto as verticais, já são destacadas por pesquisadores como fatores que exercem grande influência sobre as alterações do microclima (Landsberg, 1981; Oke, 1996). Essas propriedades relacionam-se à capacidade dos materiais em armazenar calor e só devolver ao ambiente no período noturno, gerando o aquecimento conhecido como ilha de calor.

Lombardo (1985) observa, portanto, que as superfícies das edificações atuam como refletoras e radiadoras, pois recebem energia radiante e refletem parte desta energia para a atmosfera. Assim, a parte da radiação que não é refletida de volta para a atmosfera, é absorvida pelas superfícies e armazenada nas estruturas urbanas. Esta energia armazenada é a grande causadora do aquecimento na área urbana. Segundo Assis (1997), a capacidade dos materiais das superfícies urbanas de estocar calor é maior do que os das superfícies rurais e, portanto, é maior o seu potencial de aumentar a

temperatura noturna do ar através do calor líquido acumulado. Sobre a relação do albedo com as cores e texturas dos materiais de revestimento das superfícies urbanas, Gomes (2008) destaca que as cores claras apresentam alto albedo e as cores escuras têm baixo albedo. Nas cidades brasileiras tem-se verificado um aumento preocupante de revestimentos escuros e impermeáveis como, por exemplo, o asfalto (Roriz e Barbugli, 2003).

A presença da vegetação e de massas de água também são elementos fundamentais para a qualidade do ambiente urbano, exercendo grande impacto nas condições de conforto ambiental, especialmente em locais com características climáticas acentuadas. A vegetação urbana, além de contribuir para o microclima das cidades, influi ainda no comportamento social, na redução da poluição do ar e do nível de barulho, e na estética das cidades (Givoni, 1998). Segundo Romero (2000), a vegetação contribui de forma significativa para o estabelecimento de microclimas através da umidificação do ar, resultante do processo de evaporação da água da vegetação no ar, reduzindo a temperatura. A autora coloca, ainda, que os espaços gramados absorvem maior quantidade de radiação solar, contudo irradiam menos calor, devido à utilização de parte da energia na evapotranspiração. Ao contrário, nas superfícies pavimentadas, quase toda a energia absorvida é transformada em calor.

## **2.5. Sensoriamento Remoto**

O sensoriamento remoto é a ciência e arte de obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um instrumento que não entra em contato direto com o objeto, área ou fenômeno em investigação (Lillesand e Kieffer, 1979 e 1995).

A principal fonte de energia primária disponível aos processos naturais que ocorrem na superfície terrestre é o sol. Uma grande quantidade de energia decorrente da fusão de núcleos de hidrogênio para a formação de hélio, que se processam no sol, é emitida para o espaço se propagando em todas as direções, em forma de ondas eletromagnéticas. Segundo Pace (2004), do total de energia radiante emitida pelo Sol, apenas uma pequena parte chega à superfície da Terra. A radiação solar quando penetra na atmosfera terrestre, sofre uma série de processos que a modificam, ou seja, parte da energia incidente é absorvida e parte é espalhada. Da radiação espalhada, denominada de radiação difusa, parte retorna para o espaço e parte chega à superfície da Terra. Por

outro lado, parte da radiação que incide no topo da atmosfera atinge diretamente a superfície terrestre, sendo denominada de radiação direta. Assim, a soma da radiação direta mais a radiação difusa é denominada de radiação solar global (Silva et al. 2007).

De acordo com Huete (1988) a composição espectral do fluxo radiante proveniente da superfície da Terra produz informações sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas de solos, água e vegetações que caracterizam o sistema terrestre. Os sensores hiperespectrais, os quais registram grande quantidade de informações em faixas espectrais muito estreitas, surgem como uma alternativa ao monitoramento e à análise do uso da terra. Os dados hiperespectrais do sensor ótico aerotransportável AVIRIS (*Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer*) integrados com dados de TM - Landsat (orbital) e radiométricos (campo), no visível e no infravermelho, têm sido explorados em estudos da vegetação (Huete e Warrick, 1990).

Conforme Collwel (1983), Jensen (1986) e Novo (1989) a visão sinóptica e os aspectos multiespectrais e multitemporais dos sensores orbitais, aliada ao crescente desenvolvimento de sistemas computacionais (hardware e software) de tratamento de imagens, caracterizam o sensoriamento remoto como uma tecnologia indispensável nas análises e estudos dos fenômenos ambientais terrestres. Segundo Slater (1980) os sistemas sensores multiespectrais são arquitetados para atender a uma multidisciplinaridade de aplicações. Deste modo, exige do usuário e especialista em sensoriamento remoto um mínimo de conhecimento sobre as propriedades físicas e químicas dos diferentes materiais que compõem a superfície do terreno (normalmente vegetação, solo, rocha e água).

Para Curran (1985) e Novo (1989) o sensoriamento remoto expandiu a capacidade do homem em adquirir informações sobre os recursos naturais e o meio ambiente, colocando-se como mais uma ferramenta complementar facilitando desta maneira os trabalhos temáticos e de levantamentos. Os principais benefícios a quais justificam o uso dos programas de sensoriamento remoto são os estímulos às pesquisas multidisciplinares, informações de áreas de difícil acesso, universalização dos dados e das técnicas de tratamento e análise de dados digitais, grande quantidade de dados pontuais, sobre uma mesma área e o aspecto multiespectral, isto é, a capacidade dos sistemas sensores gerarem produtos em faixas espectrais distintas, tornando possível o estudo e análise de diferentes elementos, os quais são identificados em determinadas faixas do espectro.

### 2.5.1. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN)

O índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) permite avaliar o vigor vegetativo dos estágios sucessionais de determinada vegetação ou cultura, bem como identificar e diferenciar áreas com algum tipo de vegetação e áreas sem cobertura vegetal (Lima et al. 2013).

Os valores de IVDN oscilam entre  $-1$  e  $+1$ . Este índice permite identificar a presença de vegetação verde na superfície e caracterizar a sua distribuição espacial, bem como a evolução de seu estado ao longo do tempo, a qual é determinada pelas variações das condições climáticas reinantes. Sua interpretação deve levar em consideração os ciclos fenológicos anuais a fim de se distinguir as oscilações naturais do estado da vegetação, das mudanças na distribuição espacial resultantes de desmatamentos ou demais formas de intervenção sobre a vegetação (Pace, 2004).

O IVDN utiliza-se dos canais 3 (faixa do espectro visível - VIS, correspondente a cor vermelha) e 4 (faixa do espectro correspondente ao infravermelho próximo - NIR) do TM/Landsat-5. A imagem do visível é resultado da reflexão da radiação solar pelas nuvens e pela superfície da Terra. O brilho neste tipo de imagem é uma indicação do albedo (a percentagem da radiação solar incidente que é refletida) dos alvos: tons claros representam área de alto albedo e tons mais escuros representam áreas de baixo albedo. O IVDN é uma importante ferramenta para análise do albedo, pois as duas propriedades estão intimamente relacionadas, ou seja, a região urbana caracteriza-se pelo albedo alto e IVDN baixo; região com vegetação, albedo baixo e IVDN alto; espelhos d'água e solos úmidos, albedos baixos e IVDN negativo.

Valores de IVDN mais altos indicam geralmente uma fração maior de vegetação em um pixel. A quantidade de vegetação determina a TST pelo fluxo de calor latente a partir da superfície para a atmosfera através da evapotranspiração. TST menores geralmente são encontradas em áreas com alto IVDN. Essa correlação negativa entre IVDN e TST é valiosa para estudos climáticos urbanos. No entanto, as medidas de IVDN estão sujeitas a variações sazonais que podem influenciar os resultados de estudos de ilha de calor urbana de superfície. Além disso, a relação entre IVDN e TST é bem conhecida por ser locais não-lineares e predominantemente em locais de solo nu experimentam uma maior variação de temperatura da superfície radiante do que em locais densamente vegetados (Carlson et al. 1994; Gillies e Carlson, 1995; Owen et al. 1998; Price, 1990). A variabilidade e não-linearidade sugerem que o IVDN sozinho

pode não ser uma métrica suficiente para estudar ICU quantitativamente. Para reduzir o problema, Weng et al. (2004) propuseram usar a fração de vegetação dentro de um pixel derivada de um modelo de mistura espectral em vez de IVDN como um novo indicador. Eles descobriram que a fração de vegetação tem uma correlação negativa ligeiramente mais forte com TST. Embora a fração de vegetação difere do IVDN por meio da utilização do vetor de reflectância espectral completa de um sensor, ainda é um tipo de índice de vegetação, e é fortemente relacionada com o IVDN (Carlson e Ripley, 1997; Gutman e Ignatov, 1998).

Huete et al. (1997) empregaram medidas no solo e dados adquiridos por aviões e satélites Spot e Landsat para saber se o sensoriamento remoto caracterizava a umidade do solo e a influência no IVDN. A água do solo foi determinada por gravimetria e as medidas por radiômetros sugeriram que a vegetação com solo exposto escuro e molhado ofereceram IVDN maiores, para a mesma quantidade de vegetação, do que em solos lisos e secos. Os valores mínimos de IVDN foram encontrados em solos arenosos e de um albedo elevado. Uma correlação negativa foi encontrada entre a temperatura da superfície e o IVDN. Os autores concluíram que uma cobertura parcial de vegetação em açude pode ter o mesmo IVDN que em solos secos com cobertura total de vegetação.

Smith e Choudhury (1990) concluíram que as regiões agrícolas exibiram uma correlação inversa entre o IVDN obtido pelo satélite Landsat e a temperatura de superfície ( $T_s$ ), mas as florestas não apresentaram uma relação evidente, devido à ausência de solos expostos. A linha de correlação entre IVDN e  $T_s$  para florestas foi uma linha abaixo daquela obtida para áreas agrícolas, devido à temperatura das florestas ter sido 4°C menor. A relação entre IVDN e  $T_s$  existiu apenas para áreas agrícolas e pastagens. A relação desapareceu quando foi misturada florestas e áreas agrícolas.

### **2.5.2. Albedo**

O albedo pode ser definido pela razão entre a irradiância eletromagnética refletida e a incidente. Quanto maior o albedo, maior a reflexão da energia incidente pela superfície. Levando em consideração o albedo em uma cidade, um aumento no albedo indica uma maior área urbanizada e menos vegetada. Se a superfície for suficientemente lisa, o albedo dependerá também do ângulo de incidência da radiação. O albedo da superfície varia bastante, dependendo do tipo e condições de superfície,

indo desde valores tão baixos como 5% (para oceanos sob condições de vento leve), a tão altos quanto 90% (para neve seca e fresca). O albedo mais comum é o de uma superfície da água, que depende do ângulo zenital, nebulosidade, velocidade do vento e impurezas da água. O albedo de um solo seco é maior que o de um solo úmido, enquanto uma superfície lisa tem albedo maior que uma superfície rugosa (Hartmann, 1994). Esta variabilidade da superfície tem um efeito acentuado na assimilação de radiação solar, além disso afeta bastante a temperatura da superfície do solo.

Muitos satélites medem em faixas espectrais de pouco interesse para os modelos de Circulação Geral e a maioria destes modelos admitem erros de 5 a 15% no albedo, segundo Dickinson et al. (1990).

Segundo Moran et al. (1990) o albedo tem uma dependência forte com a geometria, a estrutura das plantas e os tipos de solo. A quantidade de radiação dispersada em direção ao nadir aumenta com o ângulo de elevação solar, pois a radiação penetra na cobertura vegetal. Logo, devemos considerar que o albedo também varia com o ângulo de visada do satélite e com a capacidade de absorção das plantas, devido à ação dos cloroplastos. Tudo isto deve ser levado em consideração quando forem feitas correlações com diferentes satélites.

Starks et al. (1991) afirmam que a anisotropia das superfícies natural, medida apenas do nadir, não dá informações suficientes para caracterizar o albedo. Deve-se ter o conhecimento da distribuição espectral da radiação solar global para calcular os pesos de cada comprimento de onda no cálculo do albedo pelo qual poderá integrar as reflectâncias em toda faixa espectral. Quando o ângulo dos sensores está em posição de retroespalhamento e são próximos ao Sol, são considerados como “hot spot” para cobertura vegetal. Neste caso as reflectâncias bidirecionais são maiores que para outros na faixa visível, levando a uma super estimação do albedo quando da integração das reflectâncias em cada ângulo medido. Kimes et al. (1993) utilizaram dados remotos corrigidos geometricamente com a espessura óptica associada aos aerossóis medidas simultaneamente à passagem do satélite NOAA-9, com o espalhamento Rayleigh computado, utilizando a pressão do ar à superfície e com o valor da espessura óptica do ozônio retirado dos dados climatológicos. Observou-se neste trabalho que para o solo nu e vegetação esparsa, a reflectância decresce assim que o ângulo de visada se move da posição de retroespalhada (Sol atrás do sensor) para a posição adiante do Sol. O procedimento ideal para determinar o albedo de superfície através de medidas de satélites seria aplicar a correção radiométrica/atmosférica para a radiância de cada canal,



e depois corrigir a anisotropia da superfície integrando-o no intervalo de comprimento de onda desejado (Kassar, 1995).

Silva et al. (2002) determinaram o albedo superficial corrigido e o albedo estimado no Perímetro Irrigado Nilo Coelho, em Petrolina, através da análise multiespectral de imagens do TM/Landsat-5 (nos canais 1, 2, 3, 4 e 7), de acordo com o método proposto por Bastiaanssen (1995). Concluíram que os valores do albedo para os alvos estudados foram semelhantes aos valores do albedo calculados com dados de superfície. No entanto, atestam que embora os valores do albedo para os alvos estudados estejam de acordo com dados de outras pesquisas, a sua determinação depende da obtenção de valores de superfície em pontos georreferenciados e identificação possível na imagem.

### **2.5.3. Temperatura da superfície (Ts)**

A temperatura do ar é uma das variáveis meteorológicas mais medidas e de grande importância no monitoramento de vários fenômenos climatológicos, tais como monitoramento de secas, detecção de queimadas, monitoramento da superfície do mar, detecção e monitoramento do estresse hídrico de culturas e estudos de mudanças climáticas, dentre outras aplicações. A estimativa da temperatura da superfície terrestre (Ts) é uma tarefa complicada, devido à complexidade de separar os efeitos atmosféricos e as emissividades dos efeitos da temperatura de superfície, nas medições de radiância. Quando se utiliza o sensoriamento remoto para obter a temperatura da superfície, deve-se considerar os problemas resultantes dos efeitos de absorção atmosférica e da emissividade da superfície, ao nível de cada pixel da imagem. Para a correção desses efeitos, têm sido propostos diferentes algoritmos para obtenção de valores de Ts mais confiáveis. Imagens do TM/Landsat têm sido ao longo dos anos extensivamente estudadas por vários pesquisadores (Kaneko e Hino, 1996; Lo, 1997; Caselles et al. 1998, entre outros).

Foi desenvolvido por Sobrino et al. (1991) um modelo que permite correlacionar a temperatura medida por sensores infravermelhos com a temperatura de superfície. Segundo os autores as diferenças nas temperaturas de superfície medidas e estimadas por satélite podem chegar a 7°C para uma atmosfera tropical. Para uma atmosfera menos úmida, ou seja, mais seca, essas diferenças são menores. No modelo multiespectral desenvolvido por Sobrino et al. (1991) para o NOAA-11, foram levadas

em consideração à emissividade da superfície e a do infravermelho termal emitido pela atmosfera na direção da superfície. Foram utilizados valores da diferença de emissividade do canal 4 ( $\epsilon_4$ ) e 5 de -0,01 a 0,001, com  $\epsilon_4$  variando de 0,940 a 0,990, bem como também foram feitas simulações do vapor de água através do código LOWTRAN-7.

De acordo com Price (1993) a temperatura de solos nus pode variar em alguns graus em dezenas de metros e entre áreas plantadas e não plantadas a variação é maior. A radiação emitida termicamente por qualquer superfície depende da temperatura da superfície, da emissividade da superfície, sendo que esta última representa a eficiência da superfície em transmitir a energia radiante gerada no solo. Sospedra et al. (1998) propuseram calcular a temperatura a partir do TM/Landsat, usando a lei de Planck com um adequado e efetivo comprimento de onda, da mesma forma que usado por Planet (1988 *apud* SOSPEDRA et al. 1998), para o sensor AVHRR. Os pesquisadores criaram um algoritmo para obter esses parâmetros efetivos para qualquer intervalo de temperatura e qualquer faixa de onda, podendo dessa forma ser aplicado para qualquer instrumento. O método resolve a equação de Planck para comprimento de onda usando a expansão de Taylor. O algoritmo tem sido testado tomando como referência os parâmetros efetivos dados pelo NOAA/NESDIS para o sensor AVHRR, alcançando uma boa relação entre as técnicas. O método tem sido aplicado para a banda 6 do TM/Landsat-5, para obter um parâmetro efetivo para o intervalo de 240 a 325K, permitindo uma avaliação da temperatura com erro menor do que 0,1K. Um termo de correção pode ser adicionado, o que reduz o erro para 0,01K; porém, nesse caso será necessário usar quatro parâmetros. Outra possibilidade é usar dois intervalos diferentes (240 - 280K e 280 - 325K). A temperatura da superfície terrestre é uma importante variável em estudo de trocas de energia entre a superfície e a atmosfera, variabilidade climática (Valor e Caselles, 1996). O sensoriamento remoto apresenta a grande vantagem de propiciar estimativas da temperatura da superfície em uma escala regional ou global (Dash et al. 2002). Neste sentido, vários autores buscam desenvolver métodos que propiciem estimativas confiáveis da  $T_s$  (Qin et al. 2001).

A radiação que o sensor de um satélite registra, emerge da superfície e ao atravessar a atmosfera sofre modificações em diferentes intervalos espectrais. A temperatura de brilho ( $T_b$ ), correspondente à radiação registrada pelo sensor do satélite, é calculada pela inversão da função de Planck. Existem vários algoritmos para avaliar a temperatura da superfície da terra através da  $T_b$ ; no entanto, é necessário conhecer

alguns parâmetros da superfície e do perfil atmosférico. De acordo com Wan (1999), um bom algoritmo para determinar a temperatura de superfície depende, dentre outros fatores, de uma exata avaliação dos efeitos da atmosfera, de uma emissividade média da superfície com boa exatidão, da qualidade do infravermelho termal incluindo a estabilidade da função resposta espectral e boa resolução radiométrica. A radiância espectral  $L_a(\lambda, \mu)$  ( $\lambda$  = comprimento de onda,  $\mu = \cos(\theta)$ ,  $\theta$  = ângulo de incidência) no infravermelho no topo da atmosfera é composta pela emitância térmica da superfície da terra mais a radiância térmica produzida pela atmosfera. Para calcular a radiância térmica é preciso conhecer a temperatura média do ar e a quantidade de vapor de água na atmosfera.

O sensor de um satélite, a uma altura  $z$  (km), observa a superfície da terra de diferentes posições, podendo estimar a temperatura de brilho associada ao ângulo zenital ( $\theta$ ). No entanto, fazendo uma correção atmosférica é possível estimar a temperatura da superfície com independência geométrica (Dash et al. 2002).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Caracterização da área de estudo**

##### **3.1.1. O Nordeste Brasileiro**

A região do Nordeste Brasileiro abrange uma área de aproximadamente um quinto do território nacional, na qual estão inseridos grande parte dos ambientes semiáridos do país, a mesma se caracteriza por baixos níveis pluviais, pelas temperaturas elevadas e altas taxas de evaporação, além de uma alta variabilidade espacial e temporal no regime pluvial. Esta é uma das regiões do país mais afetadas pelas ações devastadoras do homem. Os baixos índices pluviais registrados no Nordeste, particularmente no semiárido, têm prejudicado sensivelmente a economia local (Silva et al. 1998). O Nordeste Brasileiro (NEB) é composto por nove estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, e de Fernando de Noronha (ex-território federal de Fernando de Noronha, agora parte do estado de Pernambuco). O Nordeste possui coordenadas de latitude 12°58' S e de longitude 38°31' W. Estende-se desde a costa atlântica, parte do noroeste e oeste da Bacia Amazônica, até o sul da Bahia. Ele abrange a bacia do Rio São Francisco e drenagem, que foram determinantes para a exploração, povoamento e desenvolvimento econômico da região. O Nordeste foi a primeira região a ser descoberta e colonizada por portugueses, espanhóis e holandeses no século XVI (Martin, 1996). A Região do Nordeste do Brasil representa 18% do território brasileiro, tem uma população de 53,6 milhões de pessoas, 28% da população total do país, e contribui de 13,4% (2011) do PIB do Brasil. Cerca de 15 milhões de pessoas vivem no interior. É uma região empobrecida: 58% da população vive em situação de pobreza. A região encontra-se inteiramente dentro da zona tropical, clima quente e abrange a Caatinga, parte da Mata Atlântica e parte do Cerrado. O Nordeste tem nove aeroportos internacionais, a região tem o segundo maior número de passageiros (cerca de 20%) no Brasil (Martin, 1996).

As áreas de estudo desta pesquisa compreendem três Estados do Nordeste do Brasil: Paraíba, Pernambuco e Alagoas, conforme indicados na Figura 1 a seguir. Consta o mapa do Brasil indicando a Região do Nordeste em azul, com destaque para os estados em que se encontram as cidades analisadas no estudo (à direita).

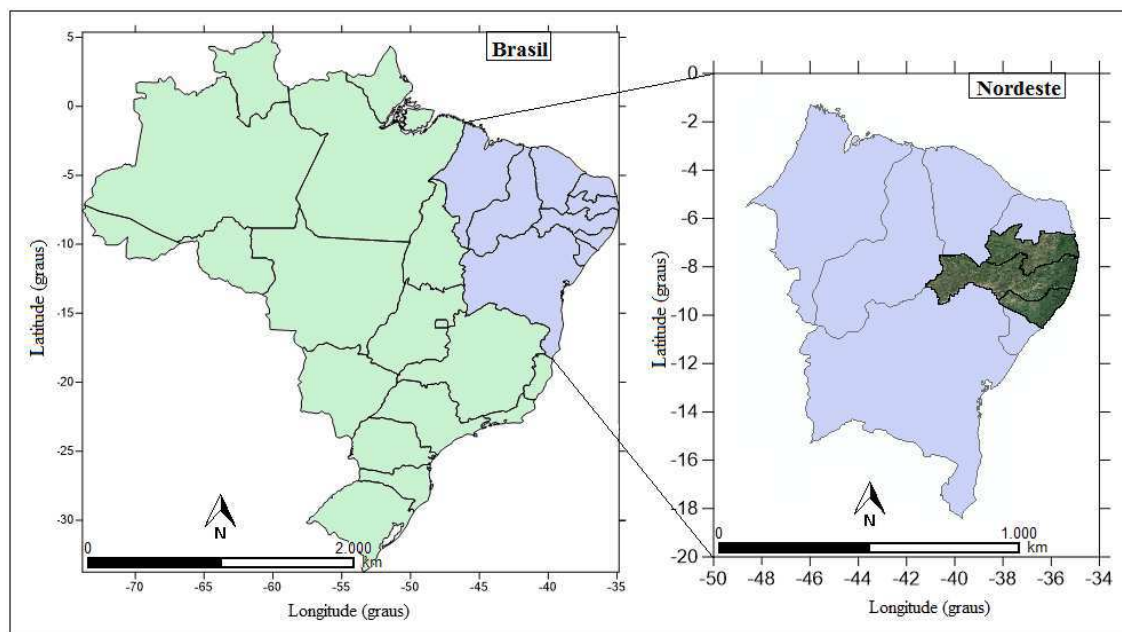


Figura 1. Mapa do Brasil com destaque para a região Nordeste e os estados onde estão localizadas as cidades analisadas no estudo

### 3.1.2. Paraíba

O Estado da Paraíba (Figura 2) encontra-se localizado no Leste da Região do Nordeste Brasileiro, fazendo divisa com os estados do Rio Grande do Norte (ao Norte), de Pernambuco (ao Sul), do Ceará (a Oeste) e o Oceano Atlântico (a Leste). Possui uma área territorial de 56.479,778 km<sup>2</sup>, consistindo de 223 municípios, e é um dos menores estados do Brasil. A distância em linha reta, entre seus pontos extremos leste e oeste é de 443 km, enquanto que seus extremos norte e sul estão separados por 263 km. A Ponta do Seixas, em João Pessoa (capital), é o ponto mais oriental do Brasil e das Américas. Possui um clima tropical e semiárido. O Estado tem como coordenadas geográficas uma latitude de 07°09' S e de longitude 36°49' W. No sertão paraibano o período chuvoso compreende os meses de janeiro a março e no agreste os meses de março a maio. As condições meteorológicas podem ser influenciadas por sistemas atmosféricos como o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Ondas de Leste, Zona de Convergência Intertropical, entre outros, os quais provocam chuva forte no Estado (Nóbrega, 2012).

O estudo tem como enfoque a cidade de Campina Grande, sua população é de 402.912 habitantes, segundo o IBGE em 2014, sendo a segunda cidade mais populosa da Paraíba. Localiza-se na mesorregião do Agreste Paraibano, coordenadas de latitude

07°13'50" S e de longitude 35°52'52" O. Possuindo uma área de 594.182 km<sup>2</sup> e um clima semiárido.

Outro município estudado foi o da cidade de Patos, no Estado Paraibano, localizada na mesorregião do Sertão da Paraíba, com latitude de 07°01'28" S e longitude de 37°16'48" W, a 307 km da capital João Pessoa. De acordo com o IBGE, foi estimada uma população de 105.531 habitantes em 2014 e possui um clima semiárido.

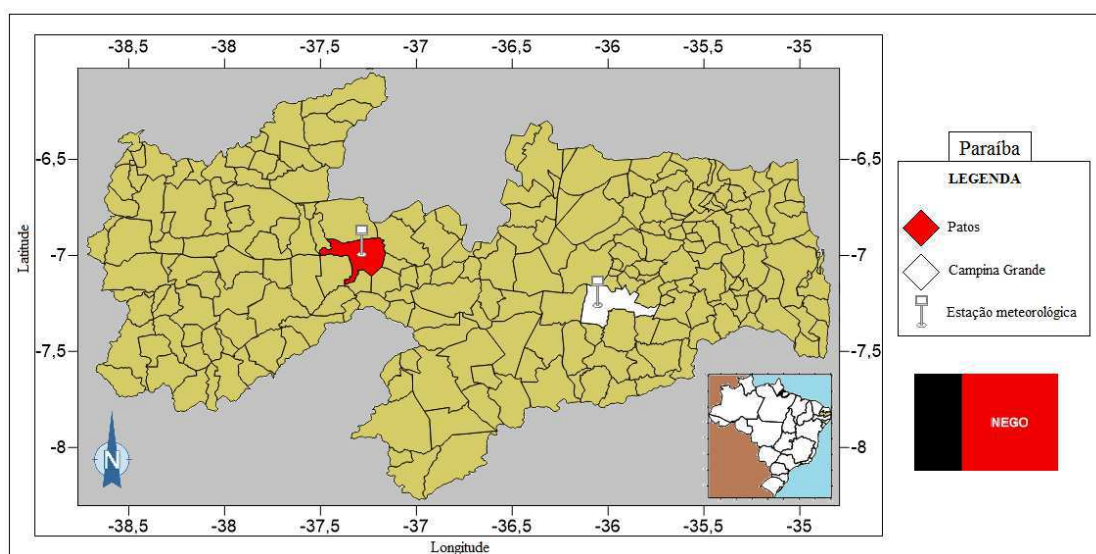


Figura 2. Estado da Paraíba, indicando as cidades de estudo e a localização das PCDs (Plataforma de Coleta de Dados)

### 3.1.3. Pernambuco

O Estado de Pernambuco (Figura 3) está localizado no centro-leste da Região Nordeste do Brasil e tem como limites os Estados da Paraíba e do Ceará (ao Norte), de Alagoas e Bahia (ao Sul) e Piauí (a Oeste), além de ser banhado pelo Oceano Atlântico (a Leste). Ocupa uma área de 98.311,616 km<sup>2</sup>. Também fazem parte do seu território os arquipélagos de Fernando de Noronha e São Pedro e São Paulo. O Estado de Pernambuco possui coordenadas de latitude 8°03'14" S e de longitude 34°52'52" W. Suas paisagens são bem variadas, composta por serras, brejos, planaltos, semiaridez no sertão e por praias na costa litorânea (Martin, 1996). Possui um período chuvoso de abril a julho no litoral. No Estado de Pernambuco existem três tipos de clima: o tropical, o semiárido e o mediterrâneo. Sua capital é a cidade do Recife, que faz parte do estudo,

com coordenadas de latitude  $08^{\circ}03'15''$  S e longitude  $34^{\circ}52'53''$  W, uma altitude de 7m com uma população de 1.608.488 habitantes. Recife possui um clima tropical e é a maior área metropolitana da Região Nordeste.

No Oeste e na região central do Estado, está localizado o Sertão Pernambucano, onde se encontra o município de Petrolina, outra região de estudo, possuindo um clima semiárido, uma população de 326.017 habitantes segundo o IBGE de 2014, com coordenadas geográficas de latitude  $09^{\circ}23'55''$  S e de longitude  $40^{\circ}30'03''$  W.

O clima semiárido está presente no sertão e em parte do agreste. Ele é caracterizado pelas altas temperaturas e pelos baixos índices pluviométricos em boa parte do ano, com temperatura média anual em torno de  $24^{\circ}\text{C}$  e  $26^{\circ}\text{C}$ . No verão observa-se a maior quantidade de chuva, ao contrário do clima tropical, que foi citado anteriormente. No verão a temperatura varia entre  $17^{\circ}\text{C}$  e  $42^{\circ}\text{C}$ , e no inverno entre  $12^{\circ}\text{C}$  e  $34^{\circ}\text{C}$ . As condições meteorológicas também podem ser influenciadas por frentes frias que algumas vezes chegam ao Nordeste, e provocar chuva forte, raios e ventania no Estado.

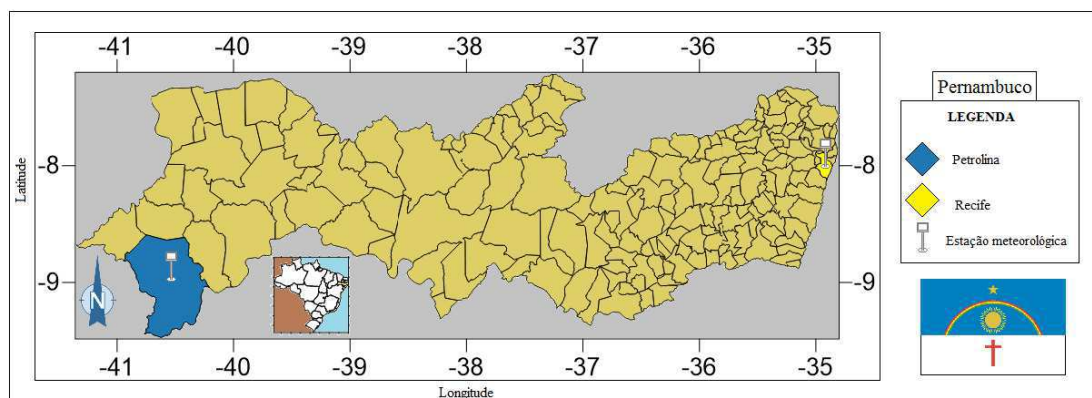


Figura 3. Estado de Pernambuco, indicando as cidades de estudo e a localização das PCDs (Plataforma de Coleta de Dados)

### 3.1.4 Alagoas

O Estado Alagoano (Figura 4) está situado a Leste da Região Nordeste. Tem como limites os Estados de Pernambuco (a Norte e Noroeste), de Sergipe (a Sul), da Bahia (a Sudoeste) e do Oceano Atlântico (a Leste). Possui uma área de  $27.778,506$  km<sup>2</sup> e é formado por 102 municípios. Alagoas é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar e coco-da-baía do país, possui um clima tropical na costa e semiárido no interior

do Estado (Martin, 2006). O Estado está localizado entre as coordenadas de latitude  $09^{\circ}39'57''$  S e de longitude  $35^{\circ}44'07''$  W. Seu relevo possui uma planície litorânea, planalto ao norte do estado e depressão no centro. Seu ponto mais alto se localiza na Serra Santa Cruz, a cerca de 844m de altitude. O Estado está sob influência dos ventos alísios de Sudeste e os ventos de Nordeste nos meses mais quentes (janeiro, fevereiro e março), com o período seco compreendendo os meses de setembro a março e chuvoso de abril a julho. Sua capital é a cidade de Maceió, área de estudo do trabalho, que está entre as cidades mais populosas do Estado, além de Arapiraca, Palmeira dos Índios e o município de Rio Largo. Está localizada na mesorregião do Leste Alagoano entre as coordenadas geográficas de latitude  $09^{\circ}39'57''$  S e de longitude  $35^{\circ}44'06''$  W. Tem uma área de 510,655 km<sup>2</sup> e uma população de 1.005.319 habitantes, segundo o IBGE de 2014, sendo a 5<sup>a</sup> capital do Nordeste a ultrapassar a marca de 1 milhão de habitantes residentes. Possui uma temperatura média anual entre 25°C e 29°C, possuindo um clima quente e úmido, com precipitação concentrada nas estações de outono e inverno. O índice pluviométrico é sempre superior a 1.410 mm/ano.

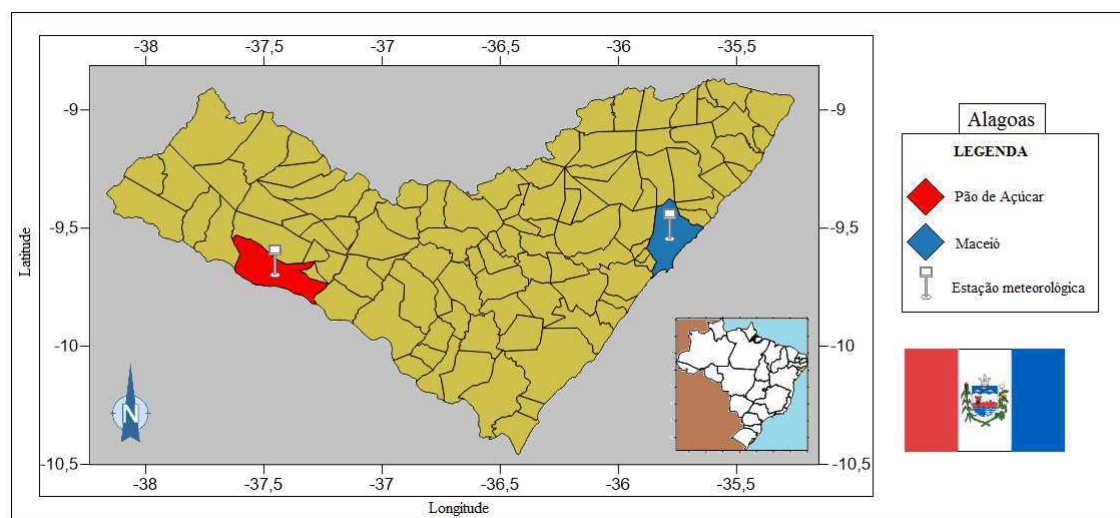


Figura 4. Estado de Alagoas, indicando as cidades de estudo e a localização das PCDs (Plataforma de Coleta de Dados)

Outro município estudado foi a cidade de Pão de Açúcar, com clima semiárido, sua população em 2014 segundo o IBGE era de 24.924 habitantes. Está localizado no Sertão Alagoano, possuindo coordenadas de latitude  $09^{\circ}44'52''$  S e de longitude  $37^{\circ}26'13''$  W, e uma área de 658,955 km<sup>2</sup>.



### 3.2. Série LANDSAT

A série LANDSAT teve início na segunda metade da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela Agência Espacial Americana e dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. Essa missão foi denominada *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS) e em 1975 passou a se denominar Landsat. A missão, em sua maioria, foi gerenciada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pela *United States Geological Survey* (USGS) e envolveu o lançamento de sete satélites. A série Landsat continua em atividade até hoje, o que significa mais de 30 anos contribuindo para a evolução das técnicas de sensoriamento remoto em instituições em todo o mundo, segundo a Embrapa.

O Landsat-4 começou a operar em 1982, com o sensor MSS (*Multispectral Scanner System*) e também uma grande novidade: o sensor TM (*Thematic Mapper*), projetado para dar suporte às pesquisas nas mais diversas áreas temáticas, especializado em recursos naturais. Dois anos mais tarde entraria em órbita o Landsat-5, com os mesmos instrumentos e sensores do L-4. Embora o MSS do satélite L-5 tenha deixado de enviar dados em 1995, o sensor TM encontra-se ativo até hoje, oferecendo continuidade aos trabalhos e metodologias desenvolvidas com os produtos do Landsat.

### 3.3. Sensor TM

O sensor TM (*Thematic Mapper*) foi lançado a bordo dos satélites Landsat-4 e Landsat-5. Ele possui separação espectral adequada ao seu principal propósito, ou seja, oferecer subsídios para mapeamentos temáticos na área de recursos naturais. Continua em atividade no satélite L-5 e opera com 7 bandas nas regiões do visível, infravermelho próximo, médio e termal. Apresenta melhor resolução espacial, acurácia radiométrica e posicionamento geométrico que seu antecessor, o sensor MSS, segundo a Embrapa.

### 3.4. Algoritmo SEBAL

O algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) é um dos algoritmos mais utilizados para estudos de fluxo de calor na superfície que vem sendo utilizado por alguns pesquisadores em várias partes do mundo, tais como: Bastiaanssen

et al. (1998), Bastiaanssen (2000), Granger (2000), Moran (1994) e Silva et al. (2002). Nos últimos anos têm sido propostos alguns algoritmos para o cálculo do balanço de energia à superfície. É um algoritmo desenvolvido por Bastiaanssen (1995) que utiliza imagens de satélites e que possibilita, estimativas do saldo de radiação, do fluxo de calor no solo e, principalmente, do fluxo de calor sensível. O algoritmo é uma ferramenta muito eficaz, que envolve a variabilidade espacial da maioria das variáveis micrometeorológicas, através de funções semi-empíricas, podendo ser aplicado em diversos agrossistemas (Bastiaanssen et al. 1998). O SEBAL foi concebido e desenvolvido de modo que a partição dos componentes da energia disponível possa ser estimada com boa precisão, utilizando para isso, um mínimo de informações de campo. Outro destaque, nesse algoritmo, é devido ao fato que o mesmo também trabalha na escala da resolução espacial e temporal dos satélites da série Landsat e outros, se ajustando aos objetivos do trabalho em questão.

### **3.5. Dados utilizados**

Esta pesquisa propõe estimar a intensidade de Ilhas de Calor Urbanas na Região do Nordeste do Brasil, especificamente nas cidades de Campina Grande e Patos na Paraíba, Recife e Petrolina no Estado de Pernambuco e em Maceió e Pão de Açúcar em Alagoas, comparando as intensidades das ilhas de calor urbanas entre as cidades de cada estado. Foram utilizadas imagens multiespectrais do sensor TM/Landsat-5 e o emprego do algoritmo SEBAL para a obtenção dos resultados. Os dados de temperatura da superfície através das imagens multiespectrais foram comparados com os dados de temperatura do ar e do solo, observados em PCDs (Plataforma de Coleta de Dados) nas cidades mencionadas. Também foram comparadas as temperaturas registradas em dez locais dentro da área urbana de Campina Grande, nas alturas de 2cm, 5cm, 1m e 1,5m, nos dias 07/11/2015, 23/11/2015 e 09/12/2015, nos horários de 07h às 08h, 12h às 13h e 17h às 18h, através de um relógio termo-higrômetro, com os dados da PCD da cidade, com vistas a avaliar a eficiência da determinação e validação das intensidades de ICU.

Os dados do sensor TM do satélite Landsat-5 tiveram importância singular para a evolução das técnicas desenvolvidas e utilizadas no sensoriamento remoto. O sensor TM mede a radiância espectral dos alvos e os armazena na forma de níveis de cinza, ou número digital (ND), em que os valores variam de 0 a 255 (8 bits), tendo uma resolução

espacial de 30m x 30m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e uma resolução espacial de 120m x 120m na banda 6.

As características deste sensor são indicadas no Quadro 1 a seguir.

Neste estudo foram utilizadas sessenta e seis imagens obtidas pelo TM/Landsat-5, num período de 2006 a 2010, abrangendo todas as localidades estudadas. As datas das imagens e seus códigos são mencionados nos quadros 2 a 4 a seguir. Foram obtidas poucas imagens na cidade de Campina Grande devido à maior parte das imagens apresentarem nebulosidade na área urbana. A órbita (path) e ponto (row) escolhidos para a coleta das imagens da cidade de Campina Grande foi 214 e 65 respectivamente, e para a cidade de Patos foram escolhidos a órbita 215 e ponto 65.

Quadro 1. Características do sensor TM. Fonte: Adaptada de Embrapa (2013)

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
TM (Thematic Mapper)	(B1) AZUL	0,45 – 0,52	30 m	16 dias	185 km	8 bits
	(B2) VERDE	0,50 – 0,60				
	(B3) VERMELHO	0,63 – 0,69				
	(B4) INFRAVERMELHO PRÓXIMO	0,76 – 0,90				
	(B5) INFRAVERMELHO MÉDIO	1,55 – 1,75	120 m			
	(B6) INFRAVERMELHO TERMAL	10,4 – 12,5				
	(B7) INFRAVERMELHO MÉDIO	2,08 – 2,35	30 m			

Para a cidade do Recife (com órbita 214 e ponto 66) também não foram adquiridas uma quantidade significativa de imagens por conta da nebulosidade, que está associada à interferência da costa leste do Nordeste. Já para a cidade de Petrolina (órbita 217 e ponto 66) a quantidade de imagens foi muito satisfatória. As cidades de Maceió (com órbita 214 e ponto 67) e Pão de Açúcar (órbita 215 e ponto 67) possuíram quantidades razoáveis de imagens adquiridas.

### 3.6. Métodos

Os dados obtidos pelas PCDs (Plataforma de Coleta de Dados) em cada cidade foram organizadas em planilhas e analisadas em conjunto com os dados de satélite, utilizando a correlação linear de Pearson (r) e o teste t-Student. A correlação linear de Pearson foi utilizada para estabelecer o grau de correlação entre as variáveis e o teste t-Student foi calculado para comparar duas variáveis, adotando um nível de significância de 5%.

Para o processamento das imagens do satélite Landsat-5 foram desenvolvidos modelos através da ferramenta *Model Maker* do programa ERDAS 2014, baseado no algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL. Foram geradas as variáveis: Radiância espectral, reflectância monocromática, albedos planetário e da superfície, índices de vegetação (IVDN, IVAS e IAF), emissividades termal e da superfície e temperatura da superfície. Para as imagens foram adotadas as seguintes etapas utilizando o SEBAL.

#### 3.6.1. Radiância espectral – Etapa 1

A radiância espectral ( $L_\lambda$ ) foi obtida conforme a Equação 1, indicada por Markham e Barker (1987):

$$L_\lambda = \left( \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) ND + L_{MIN} \quad (1)$$

em que  $L_\lambda$  é  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ , ND é a intensidade do pixel, cujos valores variam entre 0 e 255, no caso do satélite Landsat, e i corresponde às bandas (1, 2, ... e 7). A unidade de  $L_{\lambda i}$  é  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ . Os coeficientes de calibração utilizados para o Landsat foram aqueles propostos por Chander e Markham (2003).

### 3.6.2. Reflectância monocromática – Etapa 2

A reflectância de cada banda ( $\rho_\lambda$ ) foi obtida aplicando a Equação 2, de acordo com Allen et al. (2002):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_{\lambda i}}{ESUN_\lambda \cos\theta d_r} \quad (2)$$

em que  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda,  $ESUN_\lambda$  é a constante monocromática solar,  $\theta$  é o ângulo zenital do Sol e  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol. O cálculo de  $d_r$  foi estimado de acordo com a Equação 3:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(DJ \frac{2\pi}{365}\right) \quad (3)$$

onde DJ é o dia de ordem do ano (Dia Juliano) em que foram obtidos os dados radiométricos (imagens de satélite), cujos valores corresponderam ao dia da geração das imagens.

### 3.6.3. Albedo no topo da atmosfera – Etapa 3

O cálculo do albedo no topo da atmosfera foi realizado através de combinação linear das reflectâncias monocromáticas, obtido pela Equação 4:

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (4)$$

onde,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho_4$ ,  $\rho_5$  e  $\rho_7$  são as reflectâncias nas respectivas bandas 1,2, 3, 4, 5 e 7 da imagem.

### 3.6.4. Albedo da superfície – Etapa 4

O albedo da superfície foi calculado através da Equação 5:

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

onde,  $\alpha_{toa}$  é o albedo planetário,  $\alpha_{path\_radiance} = 0,03$  é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera (Bastiaanssen, 2000) e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica (Allen et al. 2002).

A transmissividade atmosférica foi computada em função da altitude local ( $z$ ), em que  $z$  é uma imagem na qual representa a elevação do terreno, conforme a Equação 6:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2(10^{-5}) z \quad (6)$$

### 3.6.5. Índices de Vegetação: IVDN, IVAS e IAF – Etapa 5

Para o cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) foi usada a seguinte equação (Allen et al. 2002):

$$IVDN = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (7)$$

onde  $\rho_3$  é o canal 3 na faixa do espectro visível (VIS) e  $\rho_4$  é a faixa do espectro correspondente ao canal do infravermelho próximo (NIR).

O Índice de Vegetação Ajustado para os efeitos do Solo – IVAS (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI), proposto por Huete (1988) foi obtido pela Equação 8:

$$IVAS = \frac{(1+L)(\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (8)$$

onde  $L = 0,5$  é o fator de ajuste do solo.

O Índice de Área Foliar (IAF) foi medido pela expressão empírica sugerida por Allen et al. (2002) aplicando a Equação 9:

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91} \quad (9)$$

### 3.6.6. Emissividades – Etapa 6

Para o cálculo da temperatura da superfície ( $T_s$ ) foi utilizada a equação de Planck invertida. 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  $\varepsilon_{NB}$ . Segundo Allen et al. (2002), as emissividades  $\varepsilon_{NB}$  (Equação 10) e  $\varepsilon_0$  (Equação 11) são adquiridas, conforme:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 IAF \quad (10)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 IAF \quad (11)$$

onde  $\varepsilon_{NB}$  corresponde à emissividade termal e  $\varepsilon_0$  à emissividade superficial, na qual foi considerada a  $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$  quando  $IAF \geq 3$  e  $IVDN < 0$ . Para corpos d'água a  $\varepsilon_{NB} = 0,99$  e  $\varepsilon_0 = 0,985$  de acordo com Allen et al. (2002).

### 3.6.7. Temperatura da superfície – Etapa 7

A obtenção da Temperatura da superfície ( $T_s$ ) foi determinada em função da radiância espectral da banda 6 (termal) e da emissividade termal (Equação 10) através da seguinte expressão (Allen et al. 2002):

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

em que  $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ,  $K_2 = 1260,56 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ,  $L_{\lambda 6}$  é a radiância espectral da banda 6,  $\varepsilon_{NB}$  é a emissividade de cada pixel na porção da banda termal do TM/Landsat-5.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens do satélite Landsat-5 com temperatura, índice de vegetação (IVDN) e albedo na cidade de Campina Grande são exibidas na Figura 5. Em 2006 a temperatura em Campina Grande se concentrava em toda a área urbana e fora dela, percorrendo os valores de 24,42°C a 28,51°C. Já em 2007 pode-se observar um aumento significativo de temperatura, mas sendo percebido na parte sudoeste, com valores chegando a 35,59°C e na área urbana os valores percorrem os 30,26°C, apesar das cores não indicarem uma temperatura mais alta que o ano anterior. As manchas em azul na imagem do ano de 2009 representam nuvens encontradas sobre a cidade o que não se observa muito no ano de 2007. A população em 2006 era de 379.871 habitantes, segundo o IBGE, passou a se tornar 381.422 em 2008 e 383.764 habitantes no ano de 2009. Não há registros no ano de 2007 e 2010. O aumento na população da cidade acarreta num aumento de áreas impermeáveis tornando uma área sujeita à ilha de calor.

##### 4.1. Campina Grande – PB

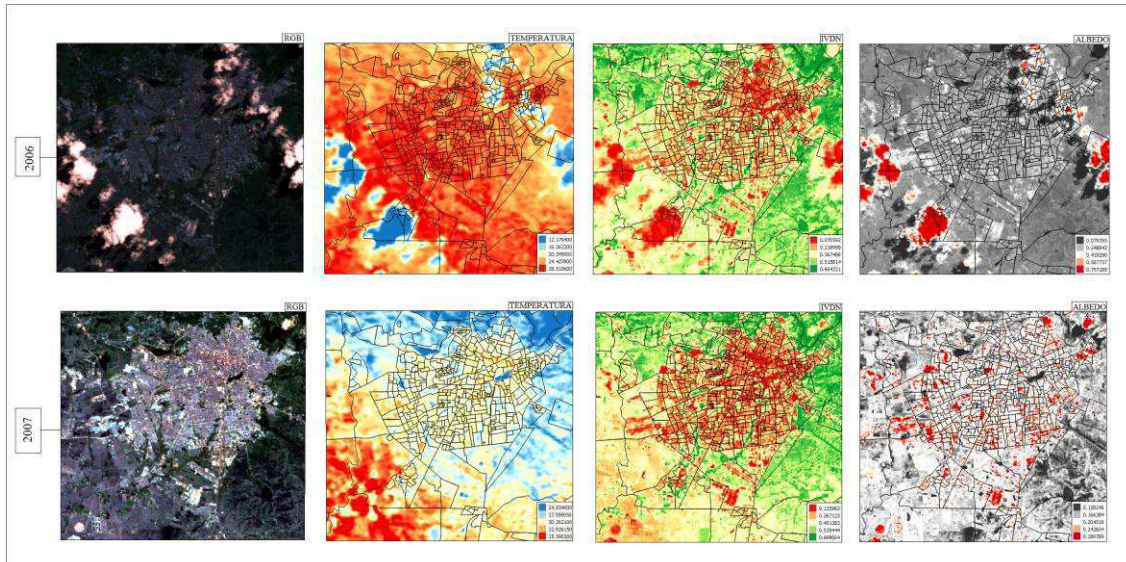


Figura 5. Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Campina Grande para os dias 26/08/2006 e 29/08/2007



Quadro 2. Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Campina Grande na Figura 5

ANO	TEMPERATURA (°C)	IVDN	ALBEDO
2006	12,17	0,07	0,07
	16,26	0,21	0,24
	20,34	0,36	0,41
	24,42	0,51	0,58
	28,51	0,66	0,75
2007	24,93	0,13	0,12
	27,59	0,26	0,16
	30,26	0,40	0,20
	32,92	0,53	0,24
	35,59	0,66	0,28

Em 2006 os valores de IVDN na área urbana chegava a 0,21 e nas áreas circunvizinhas chegava a 0,66. As manchas em vermelho representam a nebulosidade, interferindo na observação. Já em 2007 não é encontrada uma nebulosidade acentuada e os valores mínimos encontrados na área urbana percorrem os 0,13 e os máximos são encontrados em sua maioria nas áreas rurais com 0,66. Nota-se que à sudoeste, o valor do IVDN diminuiu do ano de 2006 a 2007, percebendo-se que na superfície a coloração se tornou mais alaranjada. A precipitação interfere no valor do índice de vegetação e foi percebido que para o ano de 2006 houve precipitação no dia da imagem observada, em que foi registrado 1,8 mm e para o dia da imagem de 2007 não houve precipitação registrada na estação, mas no dia 24/08/2007 (5 dias antes à data da imagem observada) foi registrado 2,1 mm. Por conta disso e de outros fatores, o IVDN da imagem de 2006 superou o de 2007 na área urbana.

Os valores de albedo percorridos em toda a cena de 2006 variaram de 0,07 a 0,24, mostrando que possuía um baixo albedo na região. Já em 2007 são encontrados vários focos de albedo em toda a imagem, chegando a 0,28. As duas datas estão compreendidas no período seco da região, no qual interfere nos valores encontrados.

#### 4.2. Patos - PB

As imagens do satélite Landsat-5 com temperatura, índice de vegetação (IVDN) e albedo na cidade de Patos são exibidas na Figura 6. Em 2006 foi o ano com temperaturas mais baixas, chegando ao valor máximo de 24,15°C. Em 2007 foi registrado o ano com temperaturas mais altas, em torno de 37,64°C, e poucas áreas com temperaturas em torno de 30,07°C. Houve uma queda de temperatura de 2007 para 2008, fazendo com que o valor máximo registrado chegasse a 32,31°C mas a partir de 2009 a temperatura só tendeu a crescer chegando a 36,43°C em 2009 e 36,84°C em 2010. As imagens correspondentes aos anos de 2006 e 2008 estão compreendidas após o período chuvoso na região, no qual pode-se observar a influência desse período nos valores registrados nas imagens.

Nota-se que a partir de 2007 as temperaturas mais altas se concentraram na área urbana e na parte ao sul próxima à cidade. Segundo o IBGE, a taxa da população só tendeu a crescer, em que no ano de 2006 era de 99.494 hab. Em 2008 passou para 99.977 hab e em 2009 era de 100.732 habitantes Isso influencia no valor de temperatura da superfície de áreas urbanas por conta da cobertura do solo e dos demais fatores relacionados à intensificação da área urbana. Como tal cidade está localizada no sertão nordestino e mais afastada do litoral que a cidade de Campina Grande, é de se esperar que apresente valores de temperatura da superfície mais acentuados, apesar de possuírem um clima semiárido.

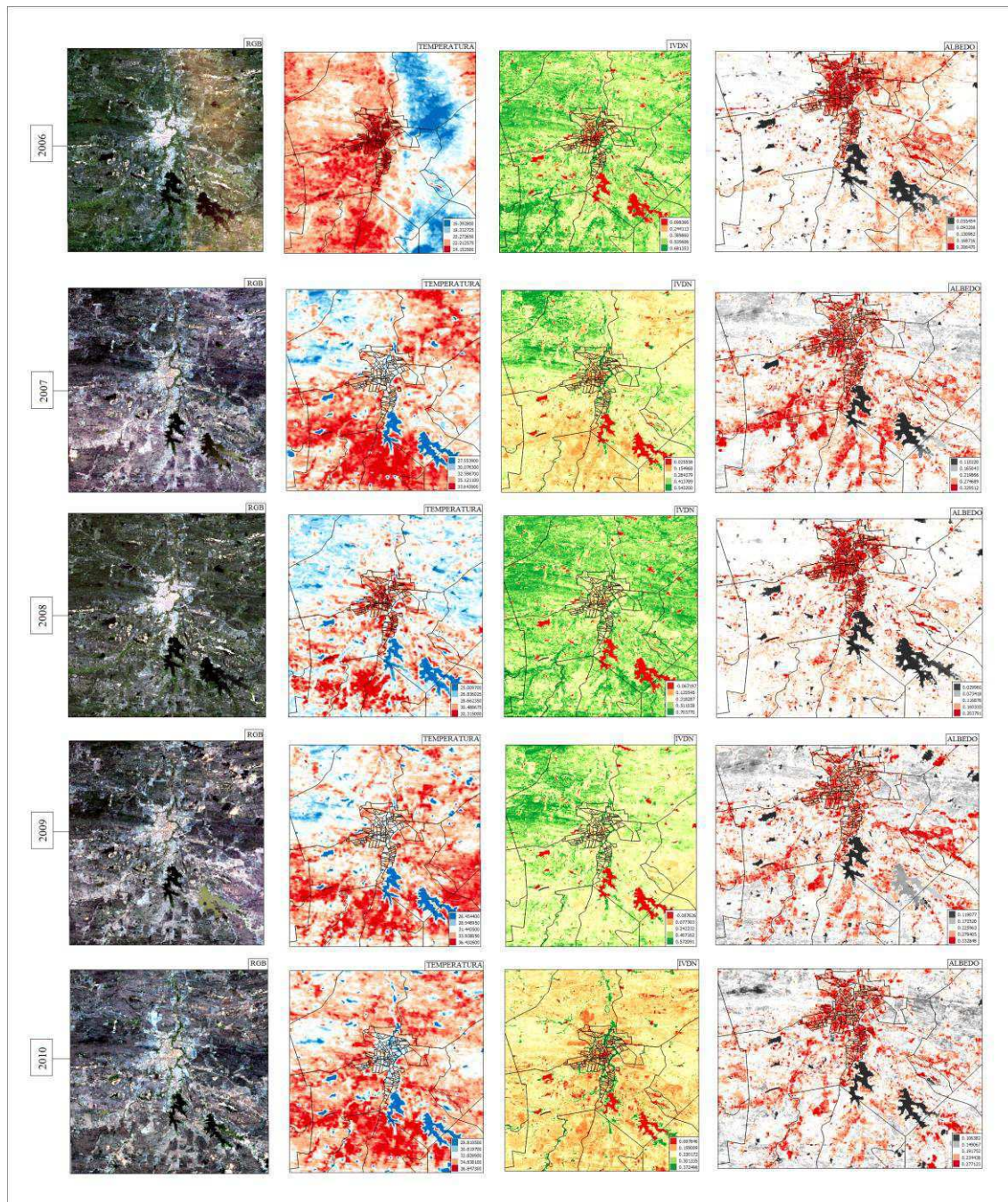


Figura 6. Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Patos para os dias 14/06/2006, 24/01/2007, 19/06/2008, 13/01/2009 e 28/08/2010

Quadro 3. Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Patos na Figura 6

ANO	TEMPERATURA (°C)	IVDN	ALBEDO
2006	16,39	0,09	0,05
	18,33	0,24	0,09
	20,27	0,38	0,13
	22,21	0,53	0,16
	24,15	0,68	0,20
2007	27,55	0,02	0,11
	30,07	0,15	0,16
	32,59	0,28	0,21
	35,12	0,41	0,27
	37,64	0,54	0,32
2008	25,00	-0,06	0,02
	26,83	0,12	0,07
	28,66	0,31	0,11
	30,48	0,51	0,16
	32,31	0,70	0,20
2009	26,45	-0,08	0,11
	28,94	0,07	0,17
	31,44	0,24	0,22
	33,93	0,40	0,27
	36,43	0,57	0,33
2010	28,81	0,08	0,10
	30,81	0,15	0,14
	32,82	0,23	0,19
	34,83	0,30	0,23
	36,84	0,37	0,27

O índice de vegetação em 2006 chegava a valores em torno de 0,09 no centro da cidade de Patos e de 0,68 nas áreas circunvizinhas. Em 2007 o maior valor encontrado era de 0,54 e se concentrava numa área a noroeste, fora da área urbana. Em 2008 a imagem de IVDN apresentada se assemelha à imagem do ano de 2006, mas com valores

máximos e mínimos diferentes, em que na área urbana chegou a 0,12. Em 2009 o IVDN demonstrou um valor de 0,07 no centro da área urbana. Já em 2010 o cenário mudou completamente, prevalecendo áreas com valores de 0,08 a 0,23 em toda a imagem estudada. É de se esperar que nas áreas urbanas o índice de vegetação seja baixo. Na datas das imagens não foram observados valores de precipitação, mas no ano de 2006, no dia anterior a da imagem observada, foi registrada uma precipitação de 25,4 mm e em 2009, no dia 09/01/2009 foi registrado 1,9 mm.

Em 2006 prevalecia na imagem um albedo com valores de 0,13 até 0,20. Já em 2007 foi registrado um valor máximo de 0,32, prevalecendo os valores de 0,21, 0,27 e 0,32 em todo o cenário. Em 2008 os valores de albedo diminuíram, prevalecendo os valores de 0,11 e 0,20. Em 2009 foi registrado o maior valor de albedo para essa região, em torno de 0,33, percorrendo toda a imagem e, em 2010, prevaleceu os valores máximos de albedo, com 0,27, e nota-se que em todas as imagens, a área urbana sempre se encontrava com valores altos, isso ocorre devido à urbanização e ao solo exposto.

#### **4.3. Recife – PE**

As imagens do satélite Landsat-5 com temperatura, índice de vegetação (IVDN) e albedo na cidade do Recife são exibidas na Figura 7. Entre os anos de 2006 a 2010 houve uma oscilação nos valores da temperatura da superfície, o que era 30,97°C em 2006, passou a ser 30,91°C em 2007. O que era 34,79°C em 2008 chegou a 32,45°C no ano de 2010 em grande parte da imagem observada. É importante observar que a imagem do ano de 2007 compreende o período chuvoso e a imagem do ano de 2010 está inserida após o período chuvoso, na qual a precipitação nessas duas imagens influenciaram nos valores observados. Os valores de temperatura negativos não são relevantes para o estudo, uma vez que, representam parte da imagem que não foi imageada pelo satélite (parte superior das imagens) e esses valores se tornaram negativos através do algoritmo empregado. A população continua crescendo, o que era 1.515.052 hab em 2006, passou a ser em 2008 1.549.980 hab e em 2009 uma população de 1.561.659 habitantes na cidade do Recife. Era de se esperar que a temperatura em 2010 fosse maior mas ocasionalmente os valores de temperatura, índice de vegetação e albedo foram menores, isto pode ter ocorrido devido a erros nos valores dos pixels da respectiva imagem de 2010.

Em 2006 a nebulosidade e o oceano interferiram um pouco na análise. O IVDN chegou a -0,19 e -0,002 devido à presença deles. Na cidade do Recife os valores encontrados foram de 0,19. Em 2007 o valor do índice chegou a 0,25 na área urbana, e apresentou um valor máximo de 0,65 em toda a área circunvizinha. Em 2008 o índice de vegetação não mudou muito com relação ao ano anterior. Em 2010 não apresentou tanta nebulosidade e os valores na área urbana diminuíram ainda mais, chegando a 0,18. Não foi registrada nenhuma precipitação nas datas das imagens observadas, mas no ano de 2006 apresentou precipitação no dia anterior, com valor de 3,4 mm. Na imagem do ano de 2007 a precipitação foi a que menos interferiu em seus valores observados, pois houve precipitação no dia 03/04/2007 valendo 1,6 mm. Já para as datas das outras imagens, sempre no dia anterior houve precipitação. Em 2008 houve um registro de 4,8 mm no dia 04/02/2008 e 4,3 mm no dia 05/09/10.

Em 2006 o albedo foi muito influenciado pela nebulosidade, fornecendo valores muito altos. Na área urbana o albedo chegou em torno de 0,06 a 0,28. Em 2007 o valor de 0,19 se concentrava tanto na área urbana quanto na área rural. Em 2008 o albedo chegava a 0,22 nas áreas urbanas e rural mas, em 2010, apresentava uma grande heterogeneidade nos valores do albedo, em que a área urbana apresentava um albedo na faixa de 0,19 a 0,23 e na área rural albedo valendo 0,14. Nos fazendo enxergar uma maior área urbanizada e com solo exposto na área urbana neste ano.

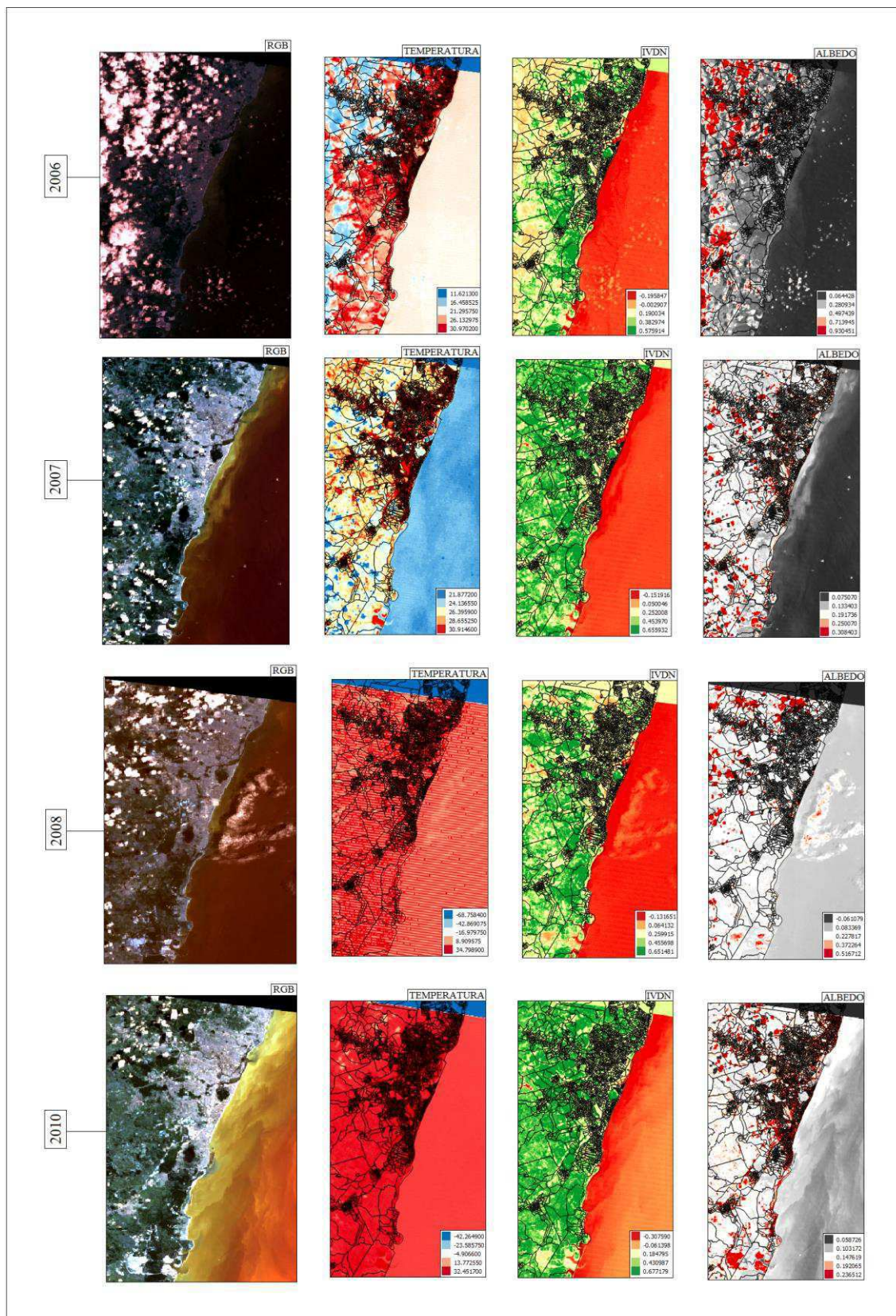


Figura 7. Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Recife para os dias 15/02/2006, 07/04/2007, 05/02/2008 e 06/09/2010

Quadro 4. Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade do Recife na Figura 7

ANO	TEMPERATURA (°C)	IVDN	ALBEDO
2006	11,62	-0,19	0,06
	16,45	-0,002	0,28
	21,29	0,19	0,49
	26,13	0,38	0,71
	30,97	0,57	0,93
2007	21,87	-0,15	0,07
	24,13	0,05	0,13
	26,39	0,25	0,19
	28,65	0,45	0,25
	30,91	0,65	0,30
2008	-68,75	-0,13	-0,06
	-42,86	0,06	0,08
	-16,97	0,25	0,22
	9,80	0,45	0,37
	34,79	0,65	0,51
2010	-42,26	-0,30	0,05
	-23,58	-0,06	0,10
	-4,90	0,18	0,14
	13,77	0,43	0,19
	32,45	0,67	0,23



#### 4.4. Petrolina – PE

As imagens do satélite Landsat-5 com temperatura, índice de vegetação (IVDN) e albedo na cidade de Petrolina são exibidas na Figura 8. Não há a presença de muita nebulosidade nas cenas, o que possibilita numa melhor verificação e avaliação dos dados obtidos.

De 2006 a 2007 a temperatura aumentou, de 33,50°C para 36,60°C. Em 2008 houve uma pequena queda nos valores de temperatura, em que a temperatura máxima chegou a valer 34,72°C. Já no ano de 2009 houve outro aumento, chegando a 36,20°C, e no ano de 2010 outra queda, 30,56°C. Mas a tendência é de ir aumentando cada vez mais. Segundo os dados do IBGE, foi registrada uma população de 260.004 hab no ano de 2006, 276.174 hab em 2008 e 281.851 habitantes em 2009 o que contribui para o aumento do microclima na área urbana. Observando a taxa da população, essa contribuição ainda é inferior às contribuições em que a posição geográfica e os fatores relacionados ao clima incidem sobre a cidade de Petrolina.

Em 2006 o índice de vegetação chegou a 0,52. Na área urbana variou de 0,04 a 0,20. Em 2007 não houve muita variação desse índice, chegando ao valor máximo de 0,55. Em 2008 houve uma diminuída no valor máximo, que chegou a 0,51. Na área urbana e circunvizinha o valor do IVDN variou entre 0,12 e 0,25. Em 2009 o maior valor registrado foi de 0,54. A área urbana e circunvizinha à ela apresentaram IVDN variando entre 0,07 a 0,30. Essa área está apresentando manchas avermelhadas e alaranjadas com mais intensidade. A imagem do ano de 2010 se assemelha ao ano anterior, com IVDN chegando a 0,54 e a área urbana apresentando manchas com IVDN na casa dos 0,14, o que mostra um IVDN muito pequeno. A imagem correspondente ao ano de 2008 compreende o período seco e podemos observar a diminuição no valor do IVDN para esta imagem. As outras imagens correspondem tanto ao período chuvoso quanto após o período chuvoso. Não foram registrados valores de precipitação nos dias observados nas imagens, em 24/07/2006 (sete dias antes da data observada na imagem do respectivo ano) a precipitação foi de 0,7mm e em 2010 no dia 03/06/2010 (5 dias antes da data observada na imagem deste ano) foi registrada uma precipitação de 0,4mm, não interferindo significativamente.

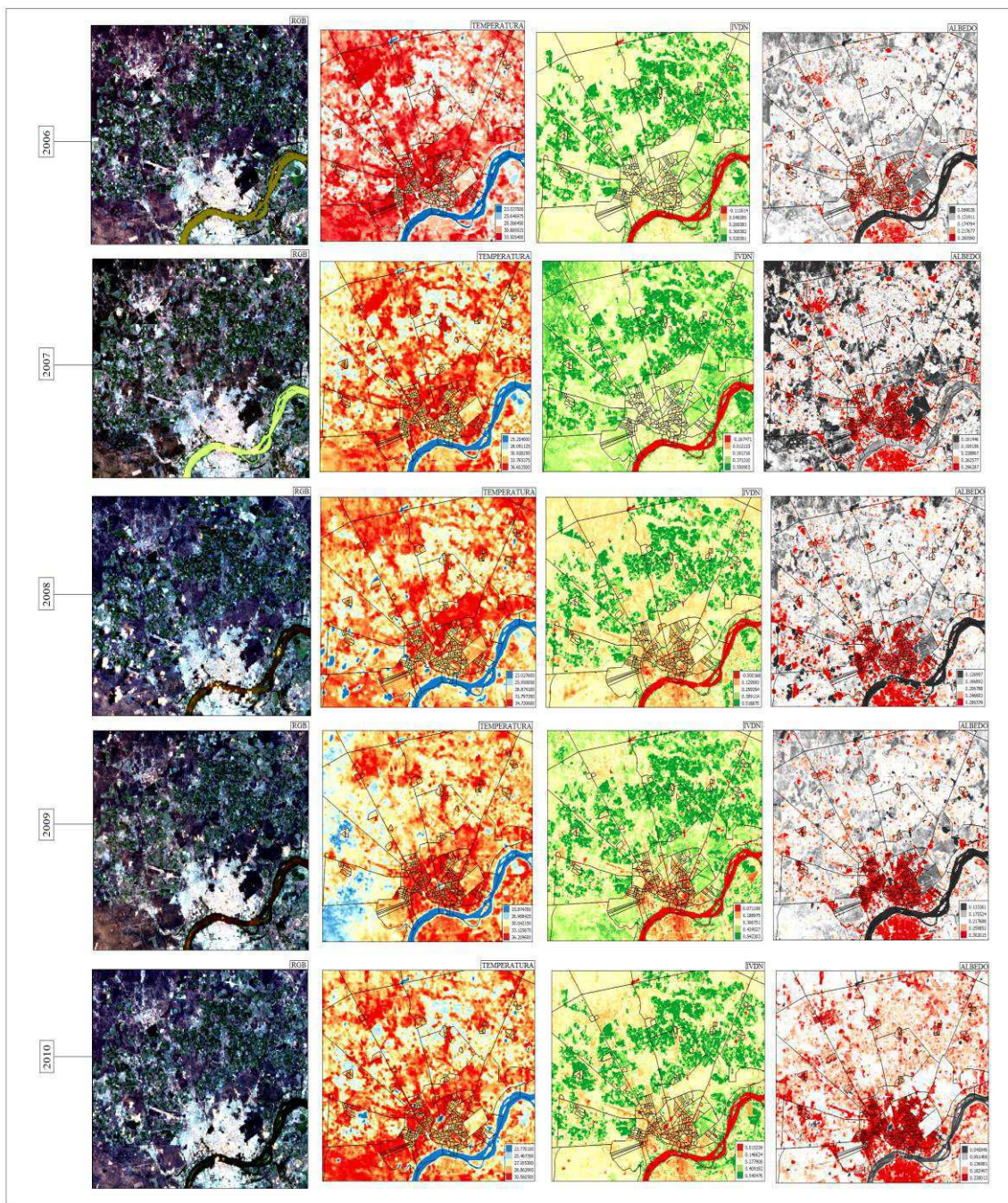


Figura 8. Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Petrolina para os dias 30/07/2006, 06/01/2007, 21/09/2008, 27/11/2009 e 07/06/2010

Quadro 5. Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Petrolina na Figura 8

ANO	TEMPERATURA (°C)	IVDN	ALBEDO
2006	23,02	-0,11	0,08
	25,64	0,04	0,13
	28,26	0,20	0,17
	30,88	0,36	0,21
	33,50	0,52	0,26
2007	25,25	-0,16	0,16
	28,09	0,01	0,19
	30,92	0,19	0,22
	33,76	0,37	0,26
	36,60	0,55	0,29
2008	23,02	-0,0001	0,12
	25,95	0,12	0,16
	28,87	0,25	0,20
	31,79	0,38	0,24
	34,72	0,51	0,28
2009	23,87	0,07	0,13
	26,95	0,18	0,17
	30,04	0,30	0,21
	33,12	0,42	0,25
	36,20	0,54	0,30
2010	23,77	0,01	0,04
	25,46	0,14	0,09
	27,16	0,27	0,13
	28,86	0,40	0,18
	30,56	0,54	0,22

Em 2006 a imagem apresentava quase que em sua totalidade um albedo com o valor de 0,13 a 0,17. Na área urbana chegou a valer 0,26 e podemos observar que há uma mancha avermelhada sobre essa parte da imagem. Em 2007 a imagem apresentou valores variando de 0,16 a 0,22. Na área urbana o valor chega a 0,29. Em 2008 é

possível observar mais núcleos com valor do albedo chegando a 0,28 mas são decorrentes de nuvens, que interferem na visualização da imagem, é possível observar a presença da nebulosidade na imagem do canal RGB deste mesmo ano. Na superfície, o valor encontrado quase que em toda a imagem chega a 0,20 e na área urbana chega em 0,28. Em 2009 a imagem apresentou valores chegando a 0,21 e com manchas alaranjadas chegando a 0,25. Já na área urbana o albedo chegou a 0,30, sendo o maior valor registrado nesta localidade. Em 2010 a maioria da imagem apresentou um albedo variando de 0,13 a 0,18 e na área urbana apresentando 0,22.

#### **4.5. Maceió - AL**

Já as imagens do satélite Landsat-5 com temperatura, índice de vegetação (IVDN) e albedo na cidade de Maceió são exibidas na Figura 9. Em 2006 a temperatura se concentrou bastante na área urbana, valendo 30,88°C. Já em 2007 é possível observar uma maior disposição dessas temperaturas altas tanto na área urbana, quanto na área rural, chegando a valer 32,55°C. Em 2008 e em 2010 já se observava uma expansão da temperatura em toda a área circunvizinha da área urbana, embora o valor de temperatura em 2010 tenha diminuído, a homogeneização de temperaturas altas nessa região está maior, com temperatura no ano de 2008 chegando ao valor máximo registrado de 33,50°C e no ano de 2010 chegou a 31,43°C. A população segundo o IBGE era de 922.458 hab no ano de 2006, 924.143 hab em 2008 e 936.314 habitantes em 2009, o que influencia no microclima da área urbana e aumento da temperatura da superfície, o que não foi registrado pelas imagens de satélite. Isso pode ter acontecido devido ao erro nos valores dos pixels da imagem de 2010 ou por fatores meteorológicos que incidiram sobre a região.

Em 2006 o IVDN chegava a 0,65 quase que em toda a imagem (área continental). A área urbana apresentava valores de 0,17 e neste dia ocorreu uma precipitação de 0,7mm. Em 2007 a nebulosidade interferiu um pouco mas ainda assim é possível observar que houve uma diminuição nos valores do IVDN na área rural. O maior valor de IVDN registrado na imagem chegou a 0,61 e na área urbana chegou a 0,18. Em 2008 a nebulosidade se restringiu à parte norte da imagem e o valor do IVDN diminuiu, chegando ao valor máximo de 0,59. A área urbana apresentou IVDN de 0,18. Em 2010 a nebulosidade também interferiu na visualização da imagem. O valor máximo do IVDN nesse ano chegou a valer 0,57 em algumas áreas da imagem. A área urbana

apresentou IVDN valendo 0,17 e esse valor está abrangendo outras áreas fora dela. As imagens correspondentes aos anos de 2008 e 2010 estão compreendidas no período seco da região, o que leva a considerar os valores baixos de IVDN.

Em 2006 apresentava um albedo na área rural de 0,14 a 0,18 e na área urbana de 0,22. Já em 2007 a imagem apresentou quase que em sua totalidade um albedo variando entre 0,16 a 0,23. Nota-se que os valores de 0,36 correspondem ao albedo da nebulosidade encontrada na imagem. Em 2008 também houve uma homogeneização nos valores do albedo na área rural e urbana, chegando a valer 0,22. Também é possível observar o albedo causado pela nebulosidade, chegando ao valor de 0,75. Em 2010 o albedo apresentou valor de 0,24 tanto na área urbana quanto na área rural. Suas características são parecidas com a imagem anterior.

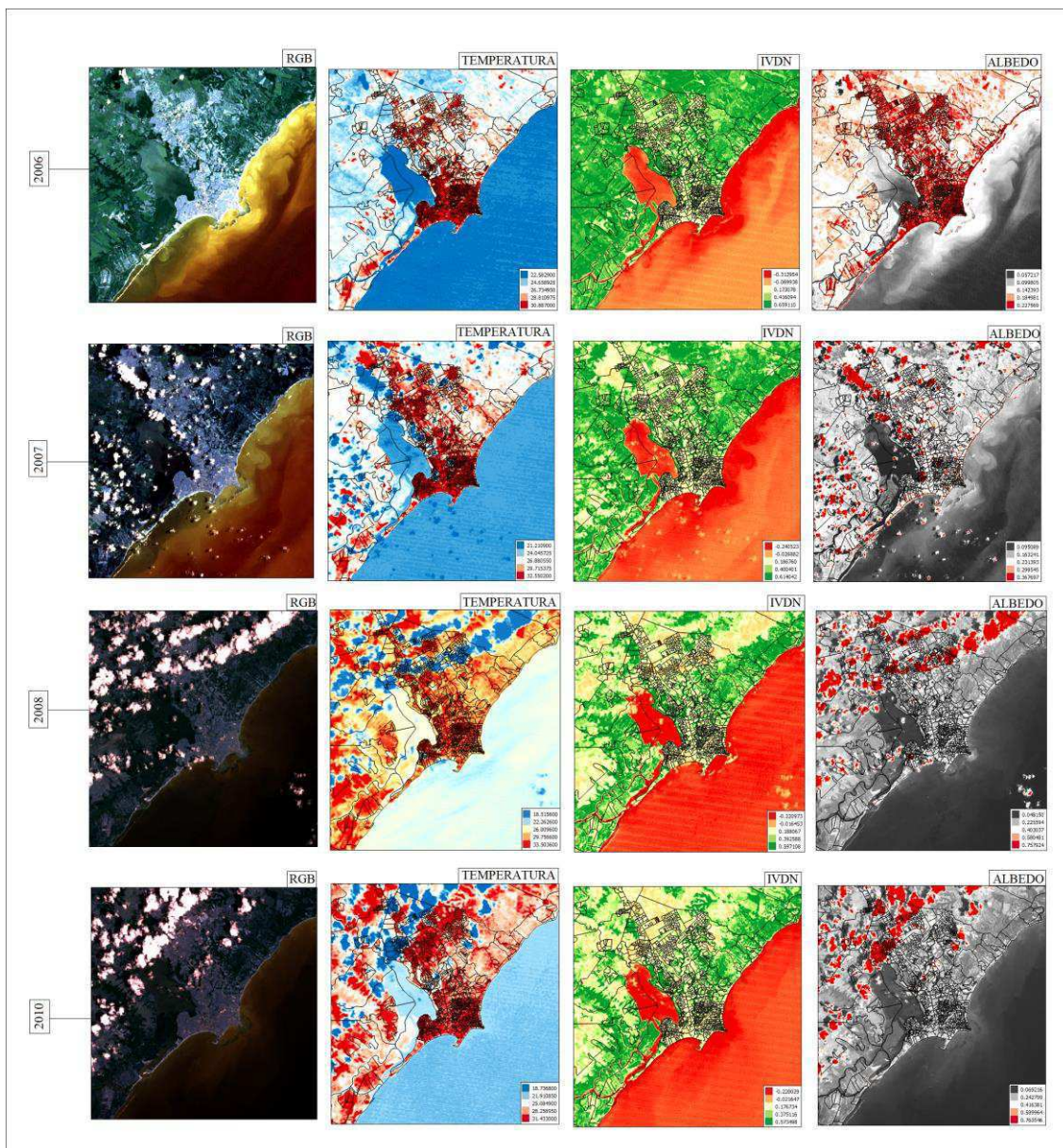


Figura 9. Imagens do satélite Landsat-5 no RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Maceió para os dias 26/08/2006, 30/09/2007, 21/02/2008 e 11/12/2010

Quadro 6. Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Maceió na Figura 9

ANO	TEMPERATURA (°C)	IVDN	ALBEDO
2006	22,58	-0,31	0,05
	24,65	-0,06	0,09
	26,73	0,17	0,14
	28,81	0,41	0,18
	30,88	0,65	0,22
2007	21,21	-0,24	0,09
	24,04	-0,02	0,16
	26,88	0,18	0,23
	29,71	0,40	0,29
	32,55	0,61	0,36
2008	18,51	-0,22	0,04
	22,26	-0,01	0,22
	26,00	0,18	0,40
	29,75	0,39	0,58
	33,50	0,59	0,75
2010	18,73	-0,22	0,06
	21,91	-0,02	0,24
	25,08	0,17	0,41
	28,25	0,37	0,58
	31,43	0,57	0,76

#### 4.6. Pão de Açúcar – AL

As imagens do satélite Landsat-5 com temperatura, índice de vegetação (IVDN) e albedo na cidade de Pão de Açúcar são exibidas na Figura 10. Em 2006 a temperatura máxima atingiu os 40,22°C. Em 2007 houve uma queda na temperatura apresentando a máxima de 37,21°C. No ano de 2008 a temperatura máxima chegou a valer 39,82°C. Já em 2009 apresentou a máxima de 37,05°C e em 2010 houve outro aumento de temperatura, chegando a valer 39,92°C. Essa oscilação pode ter acontecido por conta da presença das nuvens nas imagens, interferindo no cômputo total dos valores dos pixels através do algoritmo utilizado. As imagens observadas em cada ano para a cidade de Pão de Açúcar correspondem ao período seco da região, isto influencia nos valores observados. A população em Pão de Açúcar diminuiu, segundo o IBGE, visto que em 2006 era de 26.454 hab, no ano de 2008 era de 24.537 hab e 24.534 habitantes em 2009. Isto pode ter ocorrido devido a algum erro em coletar as informações populacionais. Como a cidade de Pão de Açúcar é muito pequena, a contribuição maior nos valores de temperatura da superfície se dá devido à sua posição geográfica, localizada no sertão alagoano e seu respectivo clima, no qual podemos observar que influenciam bastante nessa área.

Em 2006 o IVDN apresentou núcleos chegando a valer 0,48 mas na maioria da imagem o valor do índice, inclusive na área urbana, variava entre 0,24 a 0,32. Em 2007 há a presença de nebulosidade no canto inferior direito, não interferindo muito no estudo. As características nessa imagem são semelhantes à imagem anterior, com núcleos valendo 0,37 e IVDN variando entre 0,17 a 0,23 no restante da superfície. Em 2008 o índice de vegetação apresentou valor máximo de 0,29 e na maioria da imagem, inclusive na área urbana, apresentou uma homogeneidade variando entre 0,19 e 0,24. Em 2009 e em 2010 a nebulosidade se encontrava em toda a imagem. É possível observar uma grande heterogeneidade, em que a área rural e urbana obtiveram índice de vegetação variando entre 0,21 a 0,40 em 2009. No ano de 2010 a área rural apresentou IVDN variando entre 0,30 a 0,59 e na área urbana chegou a 0,40, isto porque a imagem de 2010 é do início do período seco e as demais se encontram no período seco. Os focos em vermelho são decorrentes da nebulosidade associada.



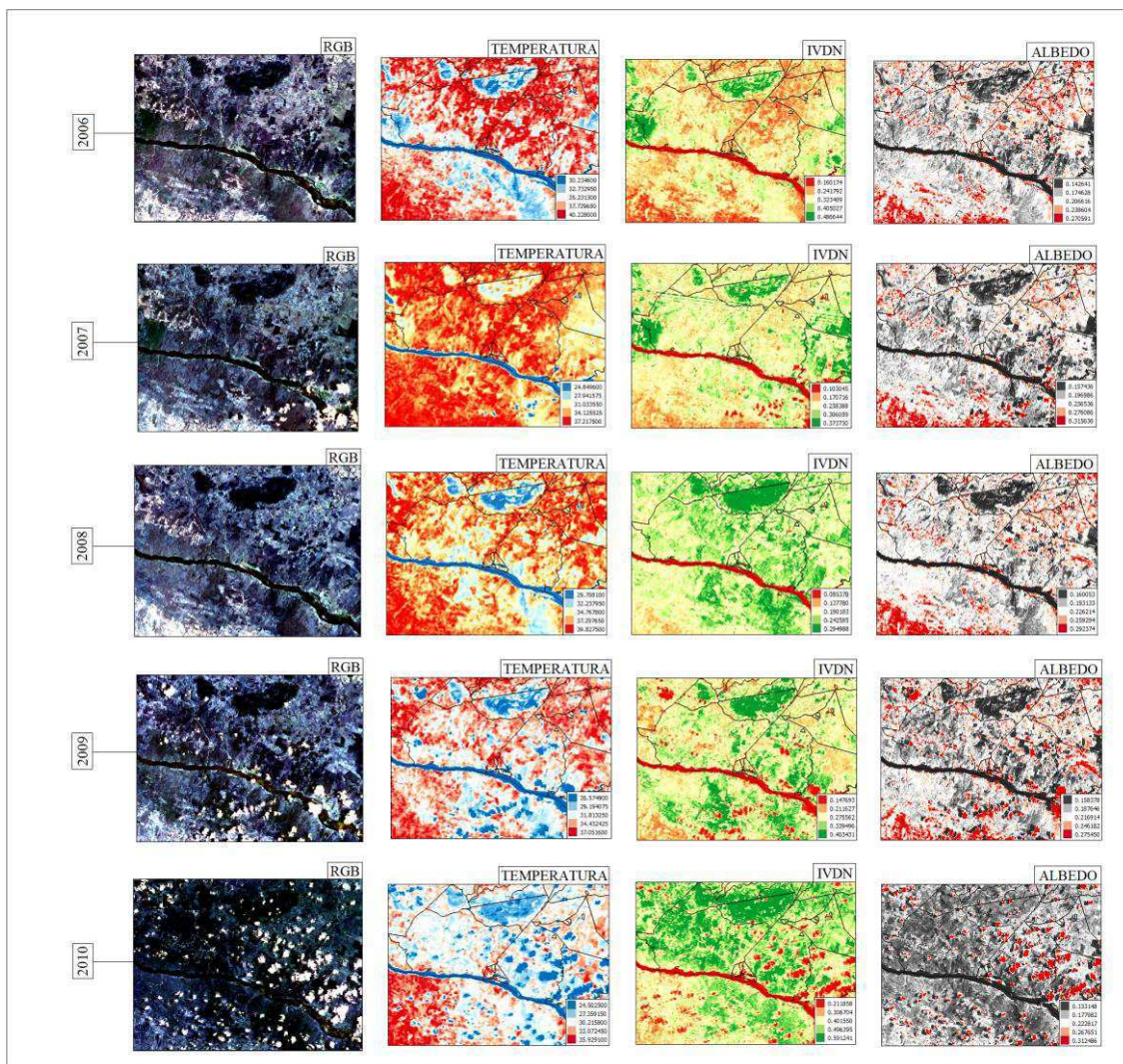


Figura 10. Imagens do satélite Landsat-5 no canal do RGB (Red/Green/Blue), temperatura, índice de vegetação e albedo na cidade de Pão de Açúcar para os dias 07/12/2006, 24/01/2007, 10/11/2008, 13/11/2009 e 29/09/2010

Quadro 7. Valores que estão indicados na escala de cores no canto inferior direito de cada imagem apresentada para a cidade de Pão de Açúcar na Figura 10

ANO	TEMPERATURA (°C)	IVDN	ALBEDO
2006	30,23	0,16	0,14
	32,73	0,24	0,17
	35,23	0,32	0,20
	37,72	0,40	0,23
	40,22	0,48	0,27
2007	24,84	0,10	0,15
	27,94	0,17	0,19
	31,03	0,23	0,23
	34,12	0,30	0,27
	37,21	0,37	0,31
2008	29,70	0,08	0,16
	32,23	0,13	0,19
	34,76	0,19	0,22
	37,29	0,24	0,25
	39,82	0,29	0,29
2009	26,57	0,14	0,15
	29,19	0,21	0,18
	31,81	0,27	0,21
	34,43	0,33	0,24
	37,05	0,40	0,27
2010	24,50	0,21	0,13
	27,35	0,30	0,17
	30,21	0,40	0,22
	33,07	0,49	0,26
	35,92	0,59	0,31

Em 2006 o albedo chegou a valer 0,27 sendo observado tanto na área rural quanto na área urbana. Os valores na área rural variaram muito, desde 0,14 a 0,27 e na área urbana prevaleceu entre 0,20 a 0,27.

Em 2007 foi observado o valor máximo do albedo em Petrolina, que chegou a valer 0,31, também houve uma grande heterogeneidade nas áreas rural e urbana, variando entre 0,15 a 0,31. Em 2008 o albedo chegou a valer 0,29. Suas características são semelhantes aos anos anteriores em que possuiu uma grande heterogeneidade na região. Tanto na área rural quanto na área urbana o albedo variou entre 0,16 a 0,29. Em 2009 e em 2010 a nebulosidade atrapalhou um pouco na observação. O albedo chegou a valer 0,27, tanto nas áreas rural, urbana e pela nebulosidade. A variação na área rural e urbana foi de 0,15 a 0,27. Em 2010 observa-se uma homogeneização no valor do albedo que diminuiu bastante, variando de 0,13 a 0,22. O valor máximo de 0,31 registrado na imagem é representada através da nebulosidade, que interfere na observação.

Quadro 8. Datas das imagens obtidas pelo Landsat-5 das cidades de Campina Grande e Patos no período de 2006 a 2010

Campina Grande – PB		
Ano	Data	ID da imagem
2006	26/08	LT52140652006238CUB01
2007	25/05	LT52140652007145CUB02
	10/06	LT52140652007161CUB03
	29/08	LT52140652007241CUB00
	Patos – PB	
Ano	Data	ID da imagem
2006	14/06	LT52150652006165CUB00
	04/10	LT52150652006277CUB00
2007	24/01	LT52150652007024CUB00
	14/04	LT52150652007104CUB00
	19/07	LT52150652007200CUB00
	21/09	LT52150652007264CUB00
2008	19/06	LT52150652008171CUB00
	06/08	LT52150652008219CUB00
	23/09	LT52150652008267CUB00
	10/11	LT52150652008315CUB00
2009	13/01	LT52150652009013CUB00
	19/04	LT52150652009109CUB00
	28/10	LT52150652009301CUB00
	15/12	LT52150652009349CUB00
2010	22/04	LT52150652010112CUB01
	24/05	LT52150652010144CUB01
	09/06	LT52150652010160CUB01
	28/08	LT52150652010240CUB00
	15/10	LT52150652010288CUB00

Quadro 9. Datas das imagens obtidas pelo Landsat-5 das cidades de Recife e Petrolina no período de 2006 a 2010

Recife – PE		
Ano	Data	ID da imagem
2006	15/02	LT52140662006046CUB00
2007	07/04	LT52140662007097CUB00
	28/07	LT52140662007209CUB00
	29/08	LT52140662007241CUB00
2008	05/02	LT52140662008036CUB00
2010	06/09	LT52140662010249CUB00
Petrolina – PE		
Ano	Data	ID da imagem
2006	28/06	LT52170662006179CUB01
	30/07	LT52170662006211CUB00
	19/11	LT52170662006323CUB00
2007	06/01	LT52170662007006CUB00
	22/01	LT52170662007022CUB00
	01/07	LT52170662007182CUB01
	18/08	LT52170662007230CUB00
	19/09	LT52170662007262CUB00
2008	05/09	LT52170662008249CUB00
	21/09	LT52170662008265CUB00
2009	04/06	LT52170662009155CUB00
	24/09	LT52170662009267CUB00
	27/11	LT52170662009331CUB00
2010	07/06	LT52170662010158CUB00

Quadro 10. Datas das imagens obtidas pelo Landsat-5 das cidades de Maceió e Pão de Açúcar no período de 2006 a 2010

Maceió - AL		
Ano	Data	ID da imagem
2006	15/02	LT52140672006046CUB00
	26/08	LT52140672006238CUB01
	29/10	LT52140672006302CUB00
	30/11	LT52140672006334CUB00
2007	25/05	LANDSAT_5_TM_20070525_214_067_L2
	30/09	LT52140672007273CUB00
2008	05/02	LT52140672008036CUB00
	21/02	LT52140672008052CUB00
2010	08/10	LT52140672010281CUB00
	11/12	LT52140672010345CUB00
Pão de Açúcar - AL		
Ano	Data	ID da imagem
2006	11/04	LT52150672006101CUB01
	13/05	LT52150672006133CUB00
	18/09	LT52150672006261CUB00
	07/12	LT52150672006341CUB00
2007	24/01	LT52150672007024CUB00
	19/07	LT52150672007200CUB00
2008	23/09	LT52150672008267CUB00
	10/11	LT52150672008315CUB00
2009	03/04	LT52150672009093CUB00
	28/10	LT52150672009301CUB00
	13/11	LT52150672009317CUB00
2010	27/07	LT52150672010208CUB01
	29/09	LT52150672010272CUB00

#### 4.7. Comparações entre temperaturas

Neste estudo foram calculadas as correlações lineares entre as temperaturas do ar e do solo obtidas nas PCDs (Figura 11), bem como correlações lineares entre a temperatura da superfície obtida por imagens de satélite e a temperatura do solo obtida por PCD para as cidades de Patos, Petrolina e Maceió durante o período estudado (Figura 12). A correlação linear de Pearson ( $r$ ) foi utilizada para estabelecer o grau de correlação entre as variáveis. Seu valor está localizado no intervalo entre -1 e +1, o que implica dizer que quanto mais próximo de 0 mais fraca é a correlação enquanto que mais próximo de -1 ou +1 possui forte correlação negativa ou positiva, respectivamente. O teste t-Student ( $t$ ) foi calculado para comparar duas variáveis, adotando um nível de significância de 5%, e avaliar se as correlações entre as séries de temperaturas são estatisticamente significativas ou não. As cidades escolhidas para os cálculos das correlações foram Patos, na Paraíba, Petrolina em Pernambuco e Maceió, no Estado de Alagoas, em face dos dados serem mais completos.

Foi constatado na cidade de Petrolina (Figura 11.b) um coeficiente de correlação com valor de 0,9 indicando uma forte correlação entre as temperaturas do ar e do solo obtidas em PCD e é estatisticamente significativa ao nível de 5% pelo teste t-Student. Já para as cidades de Patos (Figura 11.a) e de Maceió (Figura 11.c) essas correlações foram de 0,7 e de 0,6 respectivamente, que são também estatisticamente significativas apesar de apresentarem coeficientes de correlações menores. As retas diagonais 1:1 que cruzam todas as figuras indicam que a maior quantidade de pontos estão sobre o eixo da temperatura do solo (abscissa), indicando que a temperatura do solo superestima os valores da temperatura do ar, todas obtidas em PCDs, em todas as cidades analisadas no estudo.

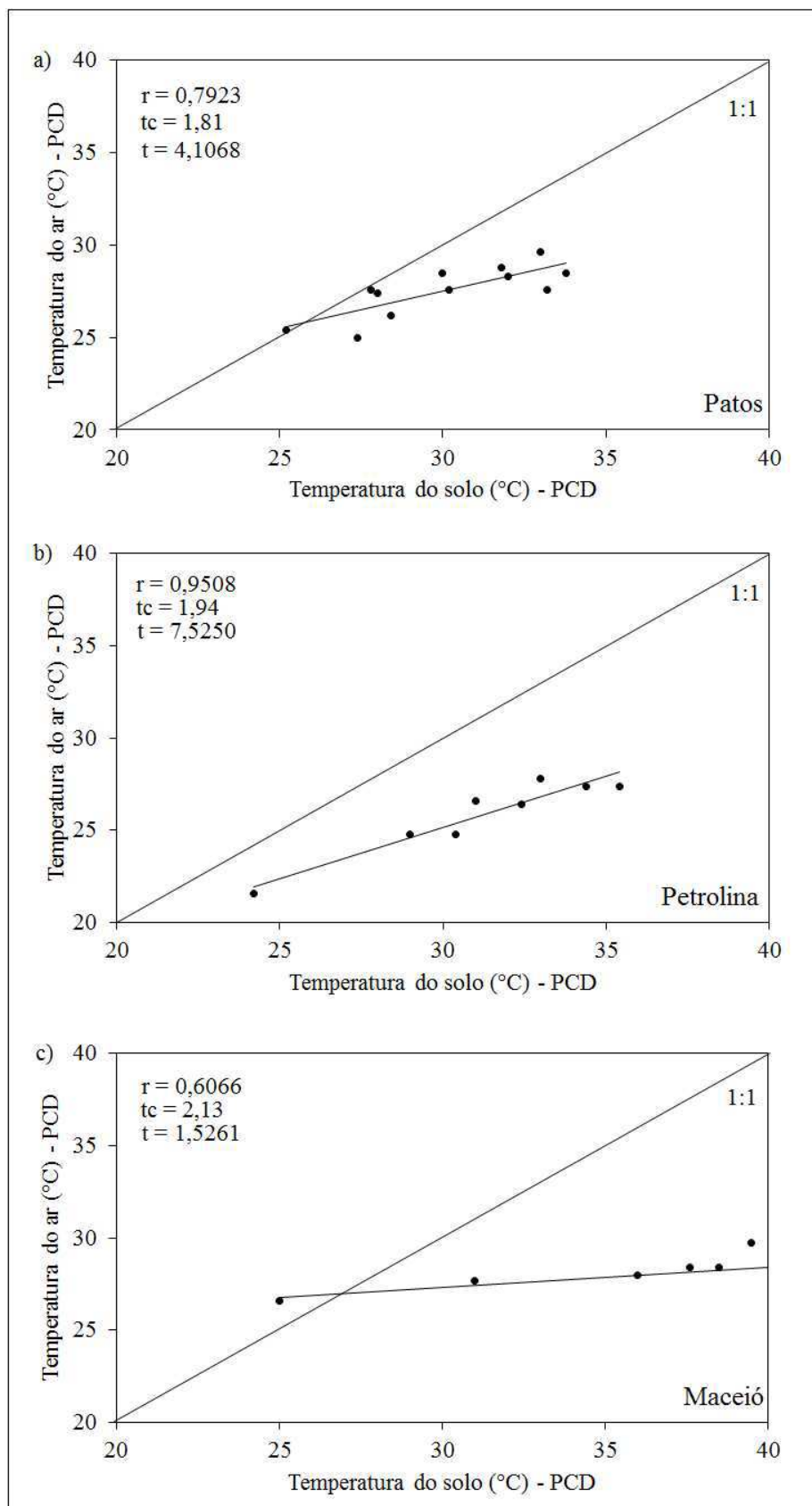


Figura 11. Análises da correlação linear e do teste t-Student entre a temperatura do ar e do solo nas PCDs para as cidades de a) Patos, b) Petrolina e c) Maceió, no período de 2006 a 2010

As correlações lineares entre a temperatura da superfície obtida por imagens de satélite e a temperatura do solo obtida por PCD foram de 0,79 para Patos, 0,70 para Petrolina e de 0,91 para Maceió, todas estatisticamente significativas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student.

Verifica-se que a cidade de Maceió (Figura 12.c) apresenta coeficiente de correlação bastante superior às outras cidades. Contudo, como as correlações são estatisticamente significativas, pode-se inferir que a temperatura do solo pode ser obtida com razoável precisão em função da temperatura da superfície obtida com base em imagem de satélites. Por outro lado, foi comprovado anteriormente que as temperaturas do ar e do solo obtidas com base em PCDs também são estatisticamente significativas. Portanto, conclui-se que a temperatura da superfície obtida com base em imagens de satélite Landsat-5 pode ser utilizada com boa precisão para determinar magnitudes de ilhas de calor urbana.

Assim, os cálculos referentes à intensidade de Ilha de Calor Urbana (ICU) para cada cidade foram obtidos por meio das temperaturas encontradas nas imagens de satélite no período de 2006 a 2010 e aquelas obtidas nas PCDs nesse mesmo período, com base na diferença entre as temperaturas encontradas nas áreas rural e urbana. O maior valor registrado de intensidade de ICU na cidade de Campina Grande (Quadro 11) ocorreu no dia 29/08/07, de 11,13°C, enquanto que para a cidade de Patos a maior intensidade registrada foi de 13,24°C no dia 09/06/10. Por outro lado, de acordo com o Quadro 12 o maior valor encontrado de ICU na cidade do Recife é de 13,09°C e ocorreu no dia 06/09/10 e para a cidade de Petrolina foi de 12,03°C no dia 18/08/07. Já para a cidade de Maceió (Quadro 13) foi encontrado o maior valor na intensidade de ICU no dia 05/02/08 correspondendo a 14,42°C e para a cidade de Pão de Açúcar o valor de 13,04°C no dia 13/11/09.

Através desses quadros pode-se observar que as intensidades máximas de cada cidade atingiu o valor em torno de 13°C e todos os dados das intensidade foram positivas, o que indica uma alta temperatura na área urbana em relação à área rural. Isso, portanto, é um indicativo que a urbanização exerce influência direta nos microclimas das cidades grandes e médias, além de propiciar a formação da ilha de calor com alta intensidade e desconforto térmico. Em estudo sobre clima urbano para a cidade de Campina Grande, Silva et al. (2012) observaram a presença de uma ilha de calor urbana no centro da cidade de Campina Grande com valor bem menor do que aquele encontrado no presente e estudo.



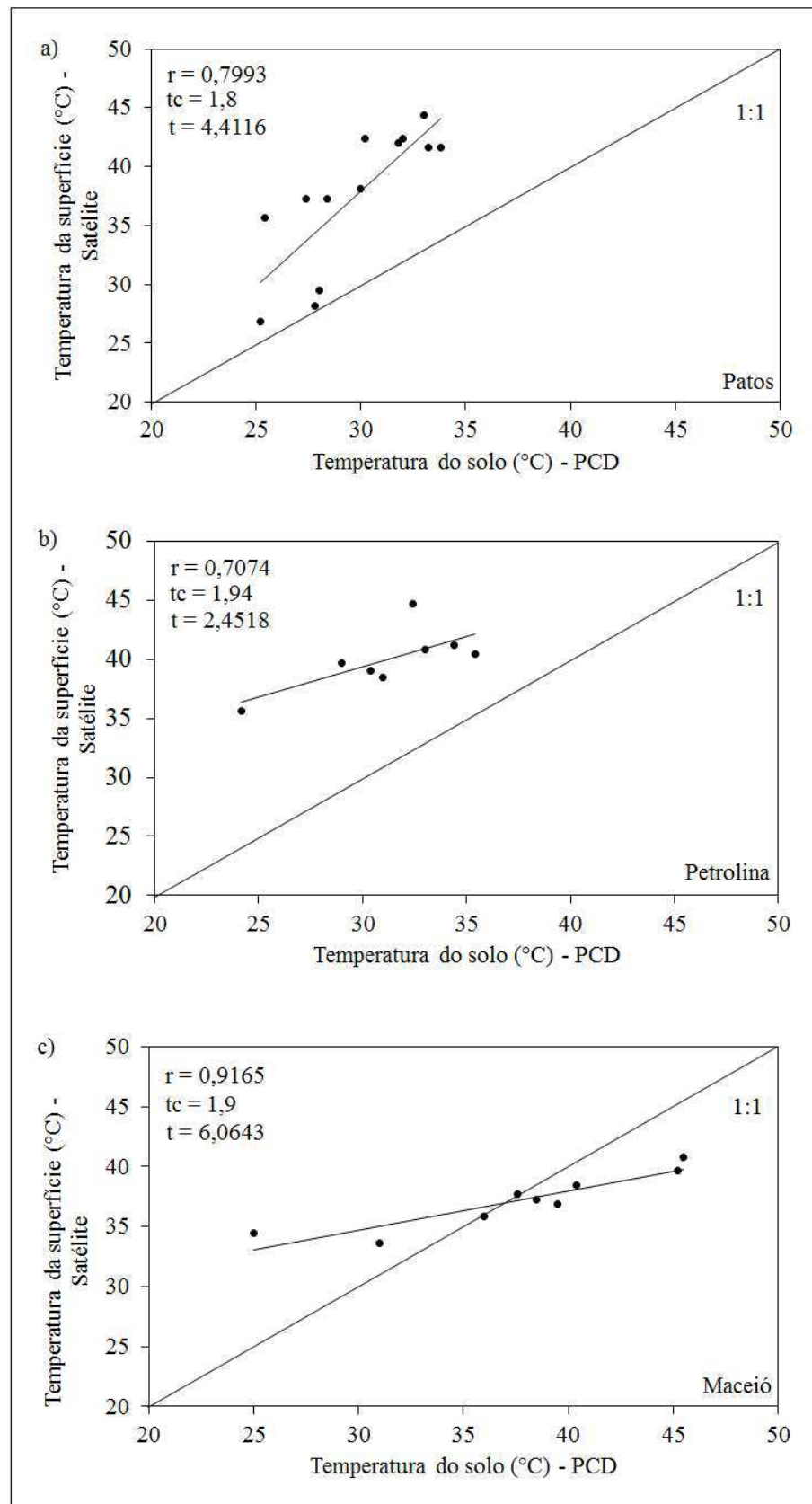


Figura 12. Análises da correlação linear e do teste t-Student entre a temperatura da superfície e do solo entre as imagens de satélite e por PCDs para as cidades de a) Patos, b) Petrolina e c) Maceió para o período estudado

Os cálculos referentes à intensidade de Ilha de Calor Urbana (ICU) para cada cidade foram obtidos por meio das temperaturas encontradas nas imagens de satélite no período de 2006 a 2010, as relacionadas com as PCDs (Plataforma de Coleta de Dados) nesse mesmo período e as coletadas na área urbana de Campina Grande no ano de 2015, através da diferença entre as temperaturas encontradas nas áreas urbana e rural.

O Quadro 11 nos mostra que para a cidade de Campina Grande o maior valor registrado de intensidade de ilha de calor se deu no dia 29/08/07 valendo 11,13°C, enquanto que para a cidade de Patos a maior intensidade registrada foi de 13,24°C no dia 09/06/10.

Quadro 11. Valores encontrados na área urbana e área rural de cada imagem adquirida e as intensidades de ilha de calor entre elas em Campina Grande e em Patos na Paraíba

Campina Grande – PB				
Ano	Data	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
2006	26/08	30,65	23,57	7,08
2007	25/05	31,54	23,9	7,64
	10/06	25,01	20,26	4,75
	29/08	37,65	26,52	11,13
Patos - PB				
Ano	Data	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
2006	14/06	26,88	16,85	10,03
	04/10	42,41	34,86	7,55
2007	24/01	41,63	28,92	12,71
	14/04	29,46	22,92	6,54
	19/07	37,29	28,16	9,13
	21/09	42,4	33,61	8,79
2008	19/06	35,68	26,71	8,97
	06/08	37,27	28,94	8,33
	23/09	40,84	28,12	12,72
	10/11	41,63	33,2	8,43
2009	13/01	38,08	28,01	10,07
	19/04	28,17	22,25	5,92
	28/10	41,99	30,27	11,72
	15/12	44,33	34,43	9,9
2010	22/04	31,96	23,6	8,36
	24/05	34,42	25,44	8,98
	09/06	43,44	30,2	13,24
	28/08	40,08	31,55	8,53
	15/10	43,94	37,26	6,68

De acordo com um estudo realizado por Moreira e Nóbrega (2011), as mudanças nas temperaturas ocorridas no período de 23 anos na cidade do Recife, PE, tem contribuído de forma direta para a intensificação do fenômeno da ilha de calor na área urbana, em especial nas áreas onde os ambientes construídos são mais intensos e a cobertura vegetal é menos presente.

Quadro 12. Valores encontrados na área urbana e área rural de cada imagem adquirida e as intensidades de ilha de calor entre elas em Recife e em Petrolina em Pernambuco

Recife - PE				
Ano	Data	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
2006	15/02	35,07	24,42	11,28
2007	07/04	36,87	24,03	12,84
	28/07	31,16	22,27	8,89
	29/08	32,42	23,14	9,28
2008	05/02	35,86	26,66	9,20
2010	06/09	39,30	26,21	13,09
Petrolina - PE				
Ano	Data	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
2006	28/06	32,81	22,51	10,3
	30/07	36,89	29,83	7,06
	19/11	36,05	29,35	6,7
2007	06/01	41,23	31,09	10,14
	22/01	40,85	31,90	8,95
	01/07	30,3	25,54	4,76
	18/08	35,66	23,36	12,3
	19/09	39,68	34,44	5,24
2008	05/09	39,07	31,93	7,14
	21/09	38,47	31,95	6,52
2009	04/06	30,71	20,08	10,63
	24/09	44,72	34,83	9,89
	27/11	40,46	33,95	6,51
2010	07/06	34,06	28,10	5,96

Para a cidade de Maceió (Quadro 13) foi encontrado o maior valor na intensidade de ICU no dia 05/02/08 correspondendo a 14,42°C e para a cidade de Pão de Açúcar o valor de 13,04°C no dia 13/11/09.

Quadro 13. Valores encontrados na área urbana e área rural de cada imagem adquirida e as intensidades de ilha de calor entre elas em Maceió e em Pão de Açúcar em Alagoas

Maceió - AL				
Ano	Data	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
2006	15/02	36,9	25,73	11,17
	26/08	34,47	24,52	9,95
	29/10	35,87	25	10,84
	30/11	37,28	25,7	11,58
2007	25/05	33,64	23,48	10,16
	30/09	38,47	25,44	13,03
2008	05/02	40,82	26,4	14,42
	21/02	39,66	27,48	12,18
2010	08/10	37,68	26,08	11,6
	11/12	37,27	24,93	12,34
Pão de Açúcar - AL				
Ano	Data	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
2006	11/04	34,85	24,49	10,36
	13/05	33,62	23,57	10,05
	18/09	33,56	24,07	9,49
	07/12	37,39	32,72	4,67
2007	24/01	41,22	31,9	9,32
	19/07	42,65	33,63	9,02
2008	23/09	40,68	30,58	10,1
	10/11	42,72	33,17	9,55
2009	03/04	39,67	30	9,67
	28/10	39,63	29,8	9,83
	13/11	42,41	29,37	13,04
2010	27/07	27,3	23,63	3,67
	29/09	40,81	31,7	9,11

Verifica-se que o maior valor de intensidade por meio das imagens de satélite se deu na cidade de Maceió com o valor chegando em torno de 14°C em 05/02/2008.

Constata-se que a intensidade de ICU entre as imagens de satélite e PCD na cidade de Pão de Açúcar chegou a ultrapassar os 20°C no dia 19/07/07, seguida da cidade de Petrolina pairando os 18°C.

A maior intensidade média de ICU por meio das imagens de satélite no período analisado foi encontrada na cidade de Maceió com um valor de 11,72°C, seguidas das cidades de Recife (10,76°C), Patos (9,29°C), Pão de Açúcar (9,06°C), Petrolina (8°C) e por último, a cidade de Campina Grande, com o valor médio de 7,65°C. Esses resultados colaboram com aqueles obtidos por Barbirato et al. (2000) que constataram

que na cidade de Maceió áreas urbanas estão sujeitas ao desenvolvimento de ilha de calor urbana.

As relações do coeficiente de correlação de Pearson e do teste t-Student para as intensidades de Ilha de Calor Urbanas (ICU) entre as imagens de satélite (área urbana) e as PCDs (área rural) para as cidade de Campina Grande, Patos, Recife, Petrolina, Maceió e Pão de Açúcar são indicadas na Figura 13. Nota-se que a maior correlação encontrada se deu na cidade de Campina Grande (Figura 13.a), com  $r = 0,9$ , seguida da cidade de Maceió (Figura 13.e) com 0,7, que são estatisticamente significativos ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student.

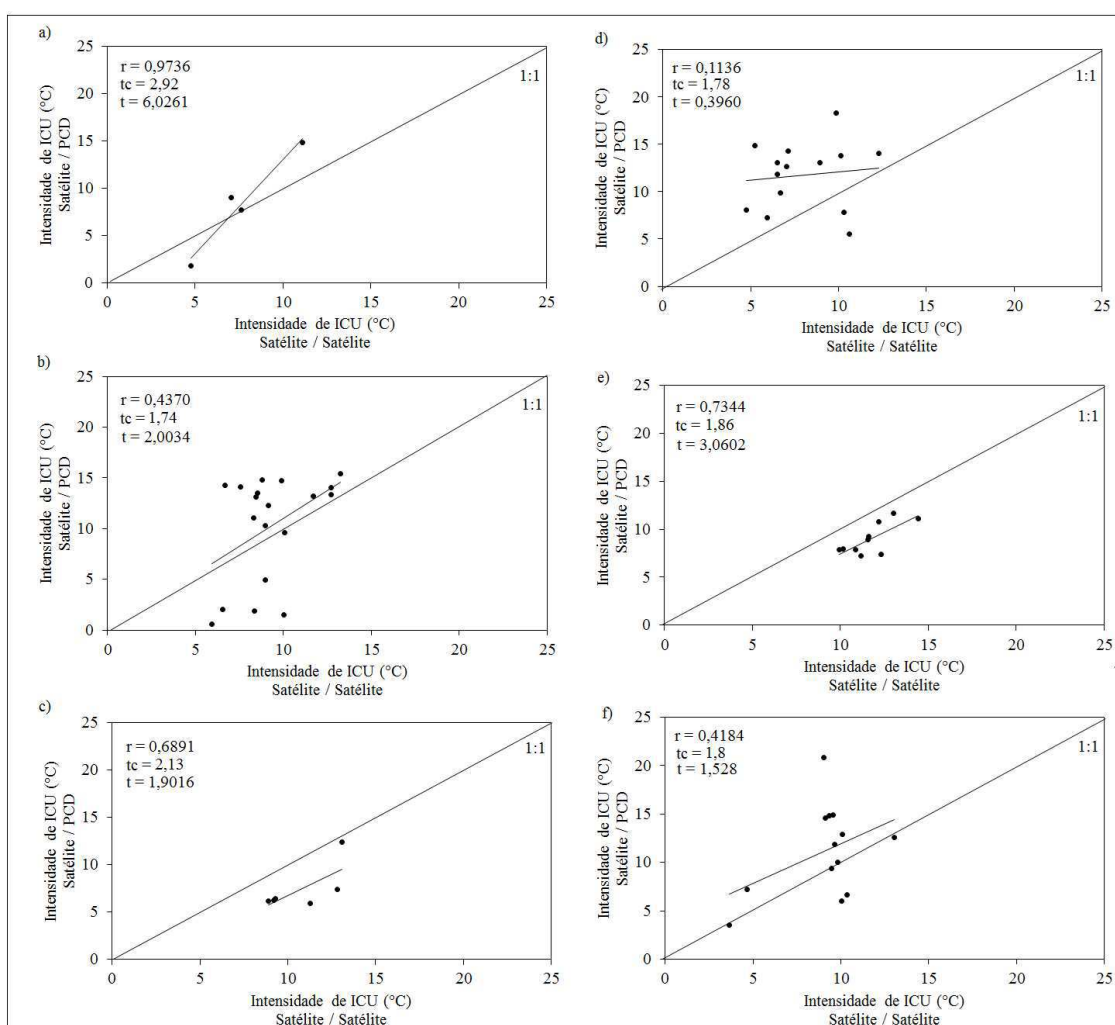


Figura 13. Correlação linear entre as intensidades de ICU ( $^{\circ}\text{C}$ ) pelas imagens de satélite e imagens de satélite / PCD para as cidades de a) Campina Grande, b) Patos, c) Recife, d) Petrolina, e) Maceió e f) Pão de Açúcar no período de 2006 a 2010

#### 4.8. Estudo de caso na cidade de Campina Grande - PB

Foi realizado um estudo de caso na cidade de Campina Grande em que se teve por finalidade observar a variação nas temperaturas do ar e da superfície em dez pontos na área urbana da cidade (Figura 14). As medições foram realizadas nos dias 07/11/2015, 23/11/2015 e 09/12/2015, nos horários de 07h às 08h, 12h às 13h e 17h às 18h, nos níveis de 2cm, 5cm, 1m e 1,5m através de um relógio termo-higrômetro e, em seguida, calculada a intensidade de Ilha de Calor Urbana. A seguir é exibida a figura que nos mostra os locais das coletas na referida cidade. Nos Quadros de 14 a 16 são exibidas as temperaturas coletadas nas áreas urbanas em Campina Grande no nível de 1,5m utilizando o aparelho termo-higrômetro, bem como as temperaturas registradas na PCD da cidade e suas respectivas intensidades de Ilha de Calor Urbana.

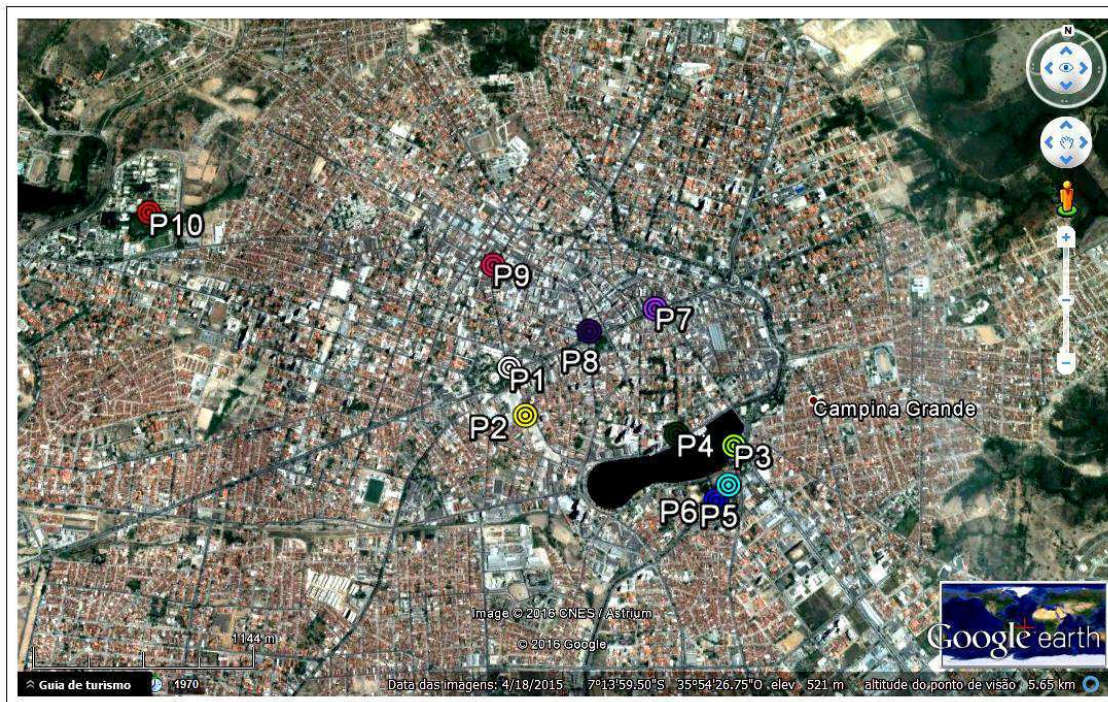


Figura 14. Pontos de coleta dos dados de temperatura e umidade em Campina Grande.

Fonte: Google Earth

#### LEGENDA

P1. Parque Evaldo Cruz	P6. Parque da Criança 2
P2. Pirâmide do Parque do Povo	P7. Catedral N.S. da Conceição
P3. Monumento os Pioneiros da Borborema	P8. Praça da Bandeira/Shopping Popular
P4. Monumento Farra de Bodega	P9. Rua Presidente João Pessoa
P5. Parque da Criança 1 (entrada principal)	P10. PCD Agrometeorológica da UACA



Figura 15. Fotos dos dez locais em que foram realizadas as coletas pelo aparelho termo-higrômetro na cidade, exibindo sua estrutura e diferentes materiais de recobrimento do solo

O maior valor de temperatura do ar registrado com o aparelho termo-higrômetro no dia 07/11/2015 no horário das 07h às 08h, foi de 31,2°C, localizada no local P9 (Rua Presidente João Pessoa), enquanto que na PCD (representativa da zona rural) da cidade foi registrada uma temperatura do ar de 20,9°C. Já no horário de 12h às 13h a maior temperatura do ar registrada pelo instrumento, localizada no local P7 (Catedral N. S. da Conceição), foi de 38,8°C e na PCD foi registrado 28,3°C. Por outro lado, no horário de 17h às 18h foi registrado 32°C no local P2 (Pirâmide do Parque do Povo) ao passo que na PCD foi 31,6°C. No dia 23/11/2015, no horário de 07h às 08h, foi registrado a temperatura de 32,5°C no local P9 (Rua Presidente João Pessoa) e na PCD 20,9°C. No horário de 12h às 13h foi de 38,7°C no local P4 (Monumento Farra de Bodega) e na

PCD era de 28,1°C. Das 17h às 18h foi de 31,8°C no local P2 (Pirâmide do Parque do Povo) e na PCD foi de 31,6°C.

Na coleta de dados realizada no dia 09/12/2015, no horário das 07h às 08h, o maior valor de temperatura encontrado com o aparelho termo-higrômetro foi de 33,9°C no local P9 (Rua Presidente João Pessoa) enquanto que na PCD foi de 21,9°C. No horário de 12h às 13h o maior valor encontrado foi de 37,5°C no local P7 (Catedral N. S. da Conceição) e na PCD era 27,6°C. No horário de 17h às 18h foi de 29,9°C no local P10 (Estação Agrometeorológica) e na PCD marcava 30,5°C. Foi observado que no período de 07h às 08h o local P9 (Rua Presidente João Pessoa) foi o que mais se destacou nesse horário. No período de 12h às 13h o local P7 (Catedral N. S. da Conceição) e no período de 17h às 18h o local P2 (Pirâmide do Parque do Povo), nos três dias de coleta, no qual foi constatado que o material de recobrimento do solo interferiu bastante no registro da temperatura do ar ao nível de 1,5m como pode ser visto na Figura 15.

Dessa forma, constata-se mais uma vez que a intensidade de ICU na cidade de Campina Grande é de fato elevada, atingindo valores de até 12°C e 11,6°C, utilizando dados observados. Por outro lado, utilizando dados de satélite foi obtida intensidade máxima de ICU para Campina Grande de 11,2°C, no dia 29 de agosto de 2007. Portanto, constata-se mais uma vez a eficiência da metodologia ora apresentada de imagens de satélite para determinar intensidade de ICU.



Quadro 14. Dados de temperatura do ar encontradas na área urbana da cidade, na PCD e a intensidade de ilha de calor entre elas, para o dia 07/11/2015

07/11/2015				
Locais	Horário	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL: PCD</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
P1	07 - 08h	26,6	20,4	6,2
	12 - 13h	34,2	28,1	6,1
	17 - 18h	24,3	31,6	-7,3
	Média	28,3	26,7	1,6
P2	07 - 08h	28,1	20,4	7,7
	12 - 13h	36,9	28,1	8,8
	17 - 18h	32	31,6	0,4
	Média	32,3	26,7	5,6
P3	07 - 08h	28,3	20,9	7,4
	12 - 13h	37,5	28,1	9,4
	17 - 18h	30,5	31,6	-1,1
	Média	32,1	26,8	5,2
P4	07 - 08h	31	20,9	10,1
	12 - 13h	37,2	28,1	9,1
	17 - 18h	28,9	31,6	-2,7
	Média	32,3	26,8	5,5
P5	07 - 08h	28,5	20,9	7,6
	12 - 13h	36,6	28,1	8,5
	17 - 18h	28,5	31,6	-3,1
	Média	31,2	26,8	4,3
P6	07 - 08h	28,5	20,9	7,6
	12 - 13h	37,7	28,1	9,6
	17 - 18h	29,1	31,6	-2,5
	Média	31,7	26,8	4,9
P7	07 - 08h	29,2	20,9	8,3
	12 - 13h	38,8	28,3	10,5
	17 - 18h	26,9	31,6	-4,7
	Média	31,6	26,9	4,7
P8	07 - 08h	28,4	20,9	7,5
	12 - 13h	38,2	28,3	9,9
	17 - 18h	28,9	30,3	-1,4
	Média	31,8	26,5	5,3
P9	07 - 08h	31,2	20,9	10,3
	12 - 13h	37,3	28,3	9
	17 - 18h	30,3	30,3	0
	Média	32,9	26,5	6,4
P10	07 - 08h	31,1	20,9	10,2
	12 - 13h	37,5	28,3	9,2
	17 - 18h	27,8	30,3	-2,5
	Média	32,1	26,5	5,6

Quadro 15. Dados de temperatura do ar encontradas na área urbana, na PCD e a intensidade de ilha de calor entre elas, para o dia 23/11/2015

23/11/2015				
Locais	Horário	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL: PCD</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
P1	07 - 08h	27,8	20,9	6,9
	12 - 13h	37,9	28,1	9,8
	17 - 18h	29,5	31,6	-2,1
	Média	31,7	26,8	4,8
P2	07 - 08h	28,3	20,9	7,4
	12 - 13h	37,5	28,1	9,4
	17 - 18h	31,8	31,6	0,2
	Média	32,5	26,8	5,6
P3	07 - 08h	31	20,9	10,1
	12 - 13h	34,9	28,1	6,8
	17 - 18h	29,5	31,6	-2,1
	Média	31,8	26,8	4,9
P4	07 - 08h	31,2	20,9	10,3
	12 - 13h	38,7	28,1	10,6
	17 - 18h	26,9	31,6	-4,7
	Média	32,2	26,8	5,4
P5	07 - 08h	28,5	20,9	7,6
	12 - 13h	37	28,1	8,9
	17 - 18h	28,3	31,6	-3,3
	Média	31,2	26,8	4,4
P6	07 - 08h	29,2	20,9	8,3
	12 - 13h	38,1	28,3	9,8
	17 - 18h	28,7	31,6	-2,9
	Média	32	26,9	5
P7	07 - 08h	30,4	20,9	9,5
	12 - 13h	38,2	28,3	9,9
	17 - 18h	27,4	30,3	-2,9
	Média	32	26,5	5,5
P8	07 - 08h	31,4	20,9	10,5
	12 - 13h	38,2	28,3	9,9
	17 - 18h	26,8	30,3	-3,5
	Média	32,1	26,5	5,6
P9	07 - 08h	32,5	20,9	11,6
	12 - 13h	37,6	28,3	9,3
	17 - 18h	30	30,3	-0,3
	Média	33,3	26,5	6,8
P10	07 - 08h	27,6	20,9	6,7
	12 - 13h	34,2	28,1	6,1
	17 - 18h	24,3	31,6	-7,3
	Média	28,7	26,8	1,8

Quadro 16. Dados de temperatura do ar encontradas na área urbana, na PCD e a intensidade de ilha de calor entre elas, para o dia 09/12/2015

09/12/2015				
Locais	Horário	T <sub>URBANA</sub> (°C)	T <sub>RURAL: PCD</sub> (°C)	Intensidade de ICU (°C)
P1	07 - 08h	27	22	5
	12 - 13h	37	27,6	9,4
	17 - 18h	26,7	30,5	-3,8
	Média	30,2	26,7	3,5
P2	07 - 08h	27	22	5
	12 - 13h	33,3	27,6	5,7
	17 - 18h	26,5	30,5	-4
	Média	28,9	26,7	2,2
P3	07 - 08h	30,5	22	8,5
	12 - 13h	32,8	29,5	3,3
	17 - 18h	24,5	28,9	-4,4
	Média	29,2	26,8	2,4
P4	07 - 08h	30,3	21,9	8,4
	12 - 13h	35,5	27,6	7,9
	17 - 18h	25	28,9	-3,9
	Média	30,2	26,1	4,1
P5	07 - 08h	28,7	22	6,7
	12 - 13h	37,1	29,5	7,6
	17 - 18h	25,8	30	-4,2
	Média	30,5	27,1	3,3
P6	07 - 08h	29,4	21,9	7,5
	12 - 13h	36,1	29,5	6,6
	17 - 18h	24,5	30	-5,5
	Média	30	27,1	2,8
P7	07 - 08h	29,4	22	7,4
	12 - 13h	37,5	27,6	9,9
	17 - 18h	26,2	30	-3,8
	Média	31	26,5	4,5
P8	07 - 08h	31,4	21,9	9,5
	12 - 13h	34,7	27,6	7,1
	17 - 18h	26,3	30,5	-4,2
	Média	30,8	26,6	4,1
P9	07 - 08h	33,9	21,9	12
	12 - 13h	32,3	31,6	0,7
	17 - 18h	29	30	-1
	Média	31,7	27,8	3,9
P10	07 - 08h	31,6	22	9,6
	12 - 13h	35,7	25,4	10,3
	17 - 18h	29,9	30,5	-0,6
	Média	32,4	25,9	6,4

Em Alagoas a cidade de Pão de Açúcar apresentou em média uma temperatura máxima de 38,84°C bem maior que a capital Maceió com 32,09°C. No Estado de Pernambuco, a temperatura máxima foi encontrada em Petrolina, com 34,32°C, enquanto que na cidade do Recife foi encontrado o valor de 32,28°C. Por último, no Estado da Paraíba, a maior temperatura média encontrada foi na cidade de Patos, com 33,47°C e em Campina Grande com 32,05°C, para o período de 2006 a 2010 através de imagens de satélite. Isso evidencia que as temperaturas médias das cidades localizadas no sertão nordestino superam as temperaturas das cidades localizadas no agreste e no litoral por conta do clima da região, sua posição geográfica, influência marítima, entre outros fatores. Os resultados desta pesquisa oferecem possibilidades de serem utilizadas na elaboração de políticas públicas que visem o planejamento e a gestão ambiental de áreas urbanas.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa permitem concluir o seguinte:

1. As maiores temperaturas médias encontradas por meio das imagens de satélite estão localizadas nas cidades no sertão nordestino do que naquelas localizadas no agreste e no litoral;
2. A maior intensidade de ICU no período de 2006 a 2010 foi encontrada na cidade de Maceió com um valor de  $11,72^{\circ}\text{C}$ , seguida da cidade do Recife ( $10,76^{\circ}\text{C}$ ), indicando que as áreas urbanas exercem uma interferência significativa no microclima das cidades, Patos ( $9,29^{\circ}\text{C}$ ), Pão de Açúcar ( $9,06^{\circ}\text{C}$ ), Petrolina ( $8^{\circ}\text{C}$ ) e, por último, a cidade de Campina Grande, com o valor médio de  $7,65^{\circ}\text{C}$ ;
3. A temperatura do solo obtida por PCDs pode ser representada pela temperatura da superfície obtida por imagens de satélite pois apresentam forte correlação que é estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student;
4. A temperatura da superfície obtida com base em imagens de satélite Landsat-5 pode ser utilizada com boa precisão para determinar magnitude de ilhas de calor urbana.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) Advanced Training and User's Manual. Idaho Implementation, version 1.0, 97 p., 2002.
- Assis, E. S. Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 4. Anais, Salvador: Editora ANTAC, CDROM, 1997.
- \_\_\_\_\_. Impactos da forma urbana na mudança climática: método para a previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. (Tese de Doutorado)
- Barbirato, G. M. Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos. Maceió: EDUFAL, 2007.
- Barbirato, G. M., Lyra, R. F. F., Fernandes, E. F., Barbosa, R. V. R., Oliveira, T. C. F. S., Teles, V. R. Análise do Clima Urbano de Maceió-AL: Comparações Entre Diversas Escalas. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.
- Bastiaanssen, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 237 p., 1995.
- \_\_\_\_\_. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. Turkey. Journal of Hydrology, v. 229, p. 87 - 100, 2000.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., Holtslag, A. A. M. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. Journal of Hydrology, v. 212-213, p. 198 - 212, 1998.
- Carlson, T. N., Gillies, R. R., Perry, E. M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. Remote Sensing Reviews, 9, p. 161 - 173, 1994.
- Carlson, T. N., Ripley, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. Remote Sensing of Environment, 62, p. 241 - 252, 1997.
- Caselles, V., Artigao, M. M., Hurtado, E., Coll, C., Brasa, A. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA AVHRR images: Application to the barrax area, Albacete, Spain. Remote Sensing of Environment, 63, p. 1 - 10, 1998.

- Chander, G., Markham, B. Revised Landsat - 5 TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), p. 2674 - 2677, 2003.
- Collwel, R. N. *Manual of Remote Sensing*. Falls Church: American Society of Photogrammetry. 1359 p., 1983.
- Cox, E. P. *Interação entre clima e superfície urbanizada: o caso da cidade de Várzea Grande/MT*. Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso Cuiabá, 141 p., 2008. (Dissertação de Mestrado)
- Curran, P. J. *Principles of remote sensing*. London: Longman, 282 p., 1985.
- Dash, P., Gottsche, F. S., Olesen, F. S., H. Fischer, H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice - current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23, p. 2563 - 2594, 2002.
- Dickinson, R. E., Pinty, B., Verstaete, M. M. Relating surface albedos in GCM to remotely sensed data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52, p. 109 - 131, 1990.
- EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE.  
Satélites de Monitoramento.  
Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013.  
Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 12 abr. 2015.
- Gillies, R. R., Carlson, T. N. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal of Applied Meteorology*, 34, p. 745 - 756, 1995.
- Givoni, B. *Climate considerations in building and urban design*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- Gomes, P. S. *Ocupação do solo e microclimas urbanos: O caso de Montes Claros - MG*. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. (Dissertação de Mestrado)
- Granger, R. J. Satellite - derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin. *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 70 - 76, 2000.
- Gutman, G., Ignatov, A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8), p. 1533 - 1543, 1998.
- Hartmann, D. L. *Global Physical Climatology*. USA, Academic Press, 411 p., 1994.

- Huete, A. R., Liv, H. Q., Batchily, K., Van Leeuwen. A comparison of vegetation indices over global set TM images for ESOD\_MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 59, p. 440 - 451, 1997.
- Huete, A. R. Adjusting Vegetation Indices for Soil Influences. *International Agrophysics*. 4 (4), p. 367 - 376, 1988.
- Huete, A. R., Warrick, A. W. Assessment of Vegetation and Soil Water Regimes in Partial Canopies with Optical Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*. 32, p. 155 - 167, 1990.
- Jensen, J. R. *Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. 486 p., 1986.
- Kaneko, D., Hino, M. Proposal and investigation of a method for estimating surface energy balance in regional forests using TM derived vegetation index and observatory routine data. *International Journal of Remote Sensing*, 17, p. 1129 - 1148, 1996.
- Kassar, E. *Monitoramento bioclimático utilizando o Satélite NOAA*. USP, São Paulo - SP, 1995. (Tese de Doutorado)
- Katzschner, L. *Microclimatic thermal comfort analysis in cities for urban planning and open space design*. Network for Comfort and Energy use in Buildings (NCUB), Comfort and Energy Use in Buildings, London, 2006.
- Kimes, D. S., Kerber, A. G., Sellers, P. J. Spatial averaging errors in creating Hemispherical Reflectance (Albedo) Maps from Directional Reflectance Data. *Remote Sensing of Environment*, 45, p. 85 - 94, 1993.
- Landsberg, H. E. *The Urban Climate*. 1ª edição, 275 p. Academic Press, 1981.
- Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1979/ 1995.
- Lima, G. C., Silva, M. L. N., Curi, N., Silva, M. A., Oliveira, A. H., Avanzi, J. C., Ummus, M. F. Evaluation of vegetation cover using the normalized difference vegetation index (NDVI). *Revista Ambiente & Água*, vol. 8, n.2, p. 204-214, 2013.
- Lo, C. P. Application of Landsat TM data for quality of life assessment in an urban environment. *Computers Environment and Urban Systems*, 21, p. 259 - 276, 1997.
- \_\_\_\_\_. Application of Landsat TM data for quality of life assessment in an urban environment. *Computers Environment and Urban Systems*, 21, p. 259 - 276, 1997.
- Lombardo, M. A. *Ilhas de Calor nas Metrôpoles - O exemplo de São Paulo*. São Paulo: Hucitec, 1985.



- Martin, G. Pré-História do Nordeste do Brasil. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1996.
- Maitelli, G. T. Uma abordagem tridimensional de clima urbano em área tropical continental: o exemplo de Cuiabá – MT. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. (Tese de Doutorado)
- Markham, B. L., Barker, L. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *Int. Journal of Remote Sensing*, v. 8, nº. 3, p. 517 - 523, 1987.
- Mascaró, L., Mascaró, J. *Ambiência Urbana*. 3. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2009.
- Monteiro, C. A. F. *Teoria e Clima Urbano*. São Paulo: IGEOGUSP, 1976.
- Monteiro, C. A. F., Mendonça, F. *O estudo do clima urbano no Brasil: evolução, tendências e alguns desafios*. São Paulo: Contexto, 2003.
- Morais, J. D. M. *Análise exploratória de diferenças de conforto térmico entre dois padrões de ocupação urbana representados por ocupação espontânea e por ocupação planejada*. 184f. Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011. (Dissertação de Mestrado)
- Moran, M. S. Irrigation in Arizona using satellites and airplanes. *Irrigation Science*, 15, p. 34 - 44, 1994.
- Moran, M. S., Jackson, R. D., Hart, G. F., Slater, P. N., Bartell, R. J., Biggar, S. F., Gellman, D. I., Santer, R. P. Obtaining surface reflectance factors from atmospheric and view angle corrected SPOT-1 HRV data. *Remote Sensing of Environment*, 32, p. 103 - 214, 1990.
- Moreira, E. B. M., Nóbrega, R. S. Identificação do fenômeno ilhas de calor urbano na área urbana do Recife, através do canal infravermelho termal do satélite LANDSAT. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba/PR, CD ROM, 2011.
- Nóbrega, J. N. *Eventos Extremos de precipitação nas mesorregiões do Estado da Paraíba e suas relações com a TSM dos Oceanos Atlântico e Pacífico*. UFCG, 2012. (Dissertação de Mestrado)
- Novo, E. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. São Paulo. Edgard Blucher. 307 p., 1989.
- Oke, T. R. *Boundary Layer Climates*. 2. ed. New York: Routledge, n.3-76, p. 272 - 303, 1996.
- \_\_\_\_\_. Canyon geometry and the nocturnal heat island: comparisons of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, n. 1, p. 237 - 254, 1981.

- \_\_\_\_\_. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere*, v.14, n.4, p. 269 - 277, 1976.
- \_\_\_\_\_. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, p. 1 - 24, 1982.
- Owen, T. W., Carlson, T. N., Gillies, R. R. An assessment of satellite remotely - sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing*, 19, p. 1663 – 1681, 1998.
- Pace, F. T. D. Estimativa do balanço de radiação à superfície terrestre utilizando imagens TM - Landsat 5 e Modelo de Elevação Digital. Campina Grande: DCA/CCT/UFCG, 2004. (Tese de Doutorado)
- Price, J. C. Estimating Leaf Area Index from Satellite Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(3), p. 727 - 734, 1993.
- \_\_\_\_\_. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, p. 940 - 948, 1990.
- Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P. A mono - window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel - Egypt border region. *Int. Journal of Remote Sensing*, v. 22, nº. 18, p. 3719 - 3746, 2001.
- Romero, M. A. B. Princípios bioclimáticos para o desenho urbano. 2. ed. Brasília: Editora UnB, 2000.
- Roriz, M., Barbugli, R. A. Mapeamento e análise de microclimas urbanos. VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Curitiba - PR. Anais. VII ENCAC, 2003.
- Roth, M., Oke, T. R., Emery, W. J. Satellite - derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, 10, p. 1699 - 1720, 1989.
- Silva, B. B., Feitosa, J. R., Moura, M. S. B., Galvíncio, J. D., Costa, F. J. F. Determinação do Albedo do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho com Técnicas de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat 5 - TM. Congresso Brasileiro de Meteorologia, XII, Foz do Iguaçu. Anais, Paraná: Sociedade Brasileira de Meteorologia, CD-ROM, 2002.
- Silva, V. P. R., Azevedo, P. V., e Silva, B. B. Surface Energy Fluxes and Evapotranspiration of a Mango Orchard Grown in a Semiarid Environment. *American Society of Agronomy*, doi: 10.2134, 2007.

- Silva, V. P. R., Dantas, R. T., Correia, A. A., Coelho, M. S., Guedes, M. J. F. Semidesertificação no Nordeste do Brasil. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1998, Brasília - DF. X Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. CD, 1998.
- Silva, V. P. R., Almeida, R. S. R. Estudo do clima urbano na cidade de Campina Grande, PB. Revista de Ciências da Vida, v. 32, n.1, 2012.
- Slater, P. N. Optics and Optical Systems. Addison - Wesley: reading, 275 p., 1980.
- Smith, R. C. G., Choudhury, B. J. Analysis of Normalized Difference and Surfaces Temperature observations over South - Eastern Australia. International Journal of Remote Sensing, 11 (11), p. 2021 - 2044, 1990.
- \_\_\_\_\_. On the correlations of Indices of Vegetation and Surface Temperature over South - Eastern Australia. International Journal of Remote Sensing, 11 (11), p. 2113 - 2120, 1990.
- Sobrino, J. A., Caselles, V. A Methodology for obtaining the Crop Temperature from NOAA-9 AVHRR. International Journal of Remote Sensing, 12 (12), p. 2461 - 2475, 1991.
- Sobrino, J. A., Coll, C., Caselles, V. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5. Remote Sensing of Environment, 38, p. 19 - 34, 1991.
- Sospedra, F., Caselles, V., Valor, E. Effective wavenumber for thermal infrared bands-application to Landsat - TM. International Journal of Remote Sensing, v. 19, nº. 11, p. 2105 - 2117, 1998.
- Starks, P. J., Norman, J. M., Blad, B. L., Walter-Shea, E. A., Walthall, C. L. Estimation of shortwave hemispherical reflectance (Albedo) from bidirectionally reflected data. Remote Sensing of Environment, 38, p. 123 - 134, 1991.
- Valor, E., Caselles V. Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas. Remote Sensing of Environment. 57, p. 167 - 184, 1996.
- Voogt, J. A., Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban areas. Remote Sensing of Environment, 86, p. 370 - 384, 2003.
- Wan, Z. MODIS Land – Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document. Ins. Computational Earth System Science, University of California, Santa Barbara, 1999.

Weng, Q., Lu1990, D., Schubring, J. Estimation of land surface temperature - vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89, p. 467 - 483, 2004.