

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Ayobami Iwa Zenabu Badiru**

**Análise de variáveis meteorológicas  
influenciadas pelo espaço urbano de João Pessoa.**

**Campina Grande, Agosto de 2014.**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - UACA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**



**ANÁLISE DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS INFLUENCIADAS PELO ESPAÇO  
URBANO DE JOÃO PESSOA**

**AYOBAMI IWA ZENABU BADIRU**

**CAMPINA GRANDE – PB  
2014**

**AYOBAMI IWA ZENABU BADIRU**

**ANÁLISE DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS INFLUENCIADAS PELO ESPAÇO  
URBANO DE JOÃO PESSOA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

**Orientador: Dr. Prof. ENIO PEREIRA DE SOUZA**

**CAMPINA GRANDE – PB  
AGOSTO/ 2014**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B136a	<p>Badiru, Ayobami Iwa Zanabu. Análise de variáveis meteorológicas influenciadas pelo espaço urbano de João Pessoa / Ayobami Iwa Zanabu Badiru. – Campina Grande, 2014. 54 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2014.</p> <p>"Orientação: Prof. Dr. Enio Pereira de Souza". Referências.</p> <p>1. Clima Urbano. 2. Balanço de Energia. 3. Modelagem Numérica. 4. BRAMS. 5. TEB. I. Souza, Enio Pereira de. II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 551.585.5(043)</p>
-------	--

AYOBAMI IWA ZENABU BADIRU

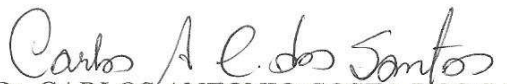
ANÁLISE DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS INFLUENCIADAS PELO  
ESPAÇO URBANO DE JOÃO PESSOA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/08/2014

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. TACIANA LIMA ARAUJO  
Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção  
Universidade Federal de Pernambuco

*Aos meus pais*

*(...) É Ele quem muda as estações, remove reis e estabelece reis, Ele dá sabedoria aos sábios e entendimento aos inteligentes.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me ajuda a superar as dificuldades, me assegura o otimismo proveniente da fé;

Ao meu orientador Enio Pereira de Souza, pela oportunidade e confiança.

Aos meus pais Ajíbola Badiru e Silvana Badiru, pela dedicação incondicional.

Ao meu marido Nuno Moreira, pelo apoio, incentivo e companheirismo.

Aos discentes, funcionários e colaboradores do Programa de Pós graduação em Meteorologia da UFCG por me receber e me apresentar o universo fascinante da Meteorologia.

Aos meus amigos/irmãos Danielson Neves e Anna Raquel D. Ramos pelo apoio fundamental.

À equipe da Aeroespacial Tecnologia em Energias Renováveis, por colaborar diariamente para o meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional; em especial à Caarem Studzinsky, que compartilha com a equipe o seu conhecimento e suas experiências.

Aos colegas de turma que compartilharam momentos de aprendizado e descobertas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).



## RESUMO

O presente trabalho visou contribuir para uma melhor compreensão dos processos de superfície relacionados às variáveis meteorológicas em uma região urbanizada através do uso da modelagem numérica. A área de estudo está inserida na Região Metropolitana de João Pessoa (RMJP), a qual apresenta um ambiente diferenciado para a investigação do clima urbano, sobretudo pela assimetria de seu perfil cotado entre o oceano até seu interior. A representação dos processos radiativos de superfície da RMJP foi possível através do esquema TEB acoplado ao BRAMS. Para isso, a utilização de imagens provenientes de sensores orbitais possibilitaram o recorte geográfico da área de estudo, assim como a elaboração do arquivo de configuração padrão de ocupação do solo que conteve três tipos distintos de ocupação, nomeados “Urbano 1”, “Urbano 2” e o “Não Urbano”. Dois experimentos foram realizados no modelo nomeados TEB (com o TEB ativado) e STEB (com o TEB desativado). Foram analisados os fluxos radiativos incidentes e emitidos na superfície, a temperatura na superfície, valores de umidade relativa, razão de mistura e precipitação e as componentes horizontais do vento. Para todas as variáveis citadas pode-se observar a influência da região de estudo. As regiões mais adensadas da RMJP apresentaram maiores contrastes entre os experimentos enquanto a Mata do Buraquinho contribuiu para reduzir a influência da região urbanizada no modelo.

**Palavras-chave:** clima urbano, balanço de energia, modelagem numérica, BRAMS, TEB.

## **ABSTRACT**

*The present study aimed to contribute to a better understanding of surface process related to ventilation and precipitation in an urbanized region through the use of numerical modeling. The study area is within the Metropolitan Area of João Pessoa (MAJP), which provides a unique environment for research in urban climate due to its asymmetric profile quoted from the ocean to its interior. The representation of radiative processes on the MAJP's surface was possible through the TEB scheme coupled to BRAMS. Therefore, the use of images from satellite sensors allowed the trimming of the geographical area of study, as well as the drafting of the default configuration of the file of occupation which contained three different kinds of surfaces named "Urban 1", "Urban 2" and "Not Urban". Two experiments were performed using the model, namely TEB (with TEB scheme activated) and STEB (without TEB scheme activated). The surface downward and upward radiative fluxes were analyzed as well as surface temperature, relative humidity rates, mix ratio and precipitation. It was observed the influence of the urban surface to all the above-mentioned meteorological variables. The most densely populated regions of RMJP showed greater contrasts between experiments while the "Mata do Buraquinho" urban forest helped to reduce the influence of the urbanized region in the model.*

**Keyword:** *urban climate, energy budget, numerical modeling, BRAMS, TEB.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b>	- Escalas climáticas da área urbana.....	19
<b>Figura 2</b>	- Classificação das Zonas Climáticas Urbanas .....	20
<b>Figura 3</b>	- Mapa de localização da Cidade de João Pessoa e sua Região Metropolitana .....	24
<b>Figura 4</b>	- Perfil da Cidade de João Pessoa: diferença de gabarito das alturas para as edificações na orla marítima até o centro da cidade .....	25
<b>Figura 5</b>	- Macrozoneamento da Cidade de João Pessoa em 2012.....	28
<b>Figura 6</b>	- Imagem Landsat da RMJP.....	30
<b>Figura 7</b>	- Mapas de carga térmica e de volume construído para a RMJP.....	31
<b>Figura 8</b>	- Mapa de ocupação da RMJP.....	32
<b>Figura 9</b>	- Distribuição das variáveis do modelo na grade C de Arakawa. ....	33
<b>Figura 10</b>	- Mapa de tipo de superfície da região de estudo representados pelo BRAMS. ....	36
<b>Figura 11</b>	- Perfil diário da ROLE para o experimento TEB (linha preta) e para o experimento STEB (linha verde). ....	37
<b>Figura 12</b>	- Espacialização do R.OLE (b) para a diferença entre os experimentos (TEB – STEB). ....	37
<b>Figura 13</b>	- Perfil diário do albedo (a) para o experimento TEB (linha preta) e para o experimento STEB (linha verde). ....	37
<b>Figura 14</b>	- Espacialização do albedo para a diferença entre os experimentos (TEB – STEB). ....	39
<b>Figura 15</b>	- Diagramas de Hovmöler para a latitude de -34,885 e expressando os valores horários do fluxo de calor sensível. ....	40
<b>Figura 16</b>	- Diagramas de Hovmöler do fluxo de calor latente ao longo do eixo latitudinal para a diferença TEB - STEB.....	41
<b>Figura 17</b>	- Perfis diários de calor latente para os experimentos com o TEB ativado (linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).....	41
<b>Figura 18</b>	- Perfis diários de calor sensível para os experimentos com o TEB ativado (linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).....	42
<b>Figura 19</b>	- Gráficos de umidade relativa para os experimentos com o TEB ativado (Linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).....	42
<b>Figura 20</b>	- Gráficos de razão de mistura para os experimentos com o TEB ativado (Linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).....	43

<b>Figura 21</b>	- Espacialização da temperatura para a diferença entre os experimentos (TEB – STEB).....	44
<b>Figura 22</b>	- Diagrama de Hovmöler para a latitude de -34,885 e expressando os valores horários de vento zonal ao longo do eixo latitudinal para a diferença TEB - STEB.....	45
<b>Figura 23</b>	- Perfis diários da direção do vento para os experimentos TEB (linha preta) e STEB (linha verde).....	46
<b>Figura 24</b>	- Perfis diários da velocidade do vento para os experimentos TEB (linha preta) e STEB (linha verde).....	47

## ABREVIATURAS E SIGLAS

BRAMS	- Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System
CDU	- Camada do dossel urbano
CLU	- Camada Limite Urbana
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSU	- Colorado State Universty
FVC	- Fator de Visão do Céu
ICU	- Ilha de Calor Urbana
NCEP	- National Center for Environmental Predictions
RAMS	- Regional Atmospheric Modeling System
RMJP	- Região Metropolitana de João Pessoa
SEB	- Surface Energy Budget
SVAT	- Interação Solo -Vegetação-Atmosfera
TEB	- Town Energy Budget
UC	- Urban <i>Canyon</i>
UCZ	- Urban Climate Zone
ZAP	- Zona de Adensamento Prioritário

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	17
2.2 MORFOLOGIA E CLIMA URBANO.....	17
2.3 MODELAGEM NUMÉRICA de SUPERFÍCIES URBANIZADAS .....	21
<b>3. REGIÃO DE ESTUDO</b> .....	24
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
4.1 GERAÇÃO DO MAPA DE COBERTURA.....	27
4.2 CONFIGURAÇÕES DO BRAMS E SEU ACOPLAMENTO AO TEB.....	32
4.3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....	34
4.4 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS .....	34
<b>5. RESULTADOS</b> .....	36
5.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS.....	36
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	49
6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

O *habitat urbano* ainda se destaca como preocupação devido à existência de um gradiente horizontal de temperatura, denominado Ilha de Calor Urbana (ICU), relacionada às regiões urbanas centrais e o seu entorno e vinculado ao Sistema Antrópico (MOTA, 1999).

Diversos fatores contribuem para a formação da ICU, dentre estes, Freitas (2003) destaca a alta concentração de fontes de calor nas cidades e as propriedades térmicas dos materiais das construções urbanas, os quais facilitam a condução de calor mais rapidamente do que as superfícies rurais, o que aumenta o contraste entre a temperatura nestas regiões.

Monteiro (1975) elaborou um enunciado acerca da comparação entre a cidade e o campo circundante, descrito como:

1. a cidade modifica o clima através de alterações em sua superfície;
2. a cidade produz acúmulo de calor, observado em modificações na ventilação, no aumento de temperatura na umidade e até nas precipitações, que tendem a ser mais acentuadas;
3. a maior influência se manifesta através da alteração da própria composição da atmosfera, atingindo condições adversas na maioria dos casos; a poluição atmosférica representa, no presente, o problema básico da climatologia das modernas cidades industrializadas.

Por ser intrinsecamente urbano a ICU desperta o interesse e destaca questões socioambientais dentre outras preocupações vinculadas ao desenvolvimento sustentável. O planejamento, a saúde pública, controle demográfico e, sobretudo, as mudanças climáticas necessitam de conhecimento meteorológico. Assim, a Modelagem Numérica como uma ferramenta da meteorologia, pode oferecer meios para a melhor compreensão deste fenômeno, bem como apoiar análises espaciais.

Embora muitos estudos tenham sido desenvolvidos acerca da correlação entre o meio urbano e a ocorrência de precipitações convectivas e de se conhecer a utilidade da modelagem numérica neste contexto, ainda é relativamente pequena a quantidade de estudos utilizando ambos. Shepherd (2005) em um estudo que apresenta uma revisão de pesquisas observacionais e de modelagem sobre chuvas urbanas de 1990 até 2004 cita diversos fatores que podem justificar esta realidade:

- 1) pouca ou inexistente representação do meio urbano nos modelos;
- 2) “supersimplificação” ou representação inadequada do processo microfísico úmido;
- 3) falta de habilidade em representar o campo de aerossóis em modelos;
- 4) uma relativa crise (de subsídio) nas pesquisas relativas a chuvas urbanas;
- 5) Limitações nas capacidades computacionais para modelos inteiramente acoplados.

Este é o caso da cidade de João Pessoa que apresenta a necessidade de maior embasamento científico para as tomadas de decisões ambientais. Por exemplo, o Artigo 25 da Lei Orgânica<sup>1</sup> desta cidade postulou a adoção de medidas que pressupõe minimizar os impactos das mudanças climáticas ao definir o escalonamento das alturas das edificações na Orla Marítima.

A polêmica relacionada à Lei Orgânica deve-se tanto aos interesses imobiliários e turísticos desta cidade quanto à carência de embasamento teórico para suportar tal medida. Neste sentido, diversas questões podem ser levantadas, relacionadas à intensidade do gradiente térmico nesta cidade, à possibilidade da formação de uma rampa que impeça a permeabilidade do vento e, de forma geral, como a atual configuração urbana pode modificar o clima e a qualidade de vida na cidade de João Pessoa.

Este descontínuo urbano favorece o presente trabalho ao oferecer um campo específico que se destaca espacialmente, sendo atípico de uma Ilha de Calor Urbana. Também apresenta a necessidade de superar a carência de embasamento científico que se soma no intuito de contribuir para o conhecimento meteorológico.

Peregrino (2005) concluiu que o padrão de ocupação do solo vigente na cidade de João Pessoa não alcança o seu objetivo de atender a ventilação adequada nesta cidade. Em seu estudo aerodinâmico foi verificada a inter-relação entre o escoamento dos ventos e três padrões de ocupação do solo nos bairros de Tambaú e Cabo Branco, situados na Orla Marítima de João Pessoa.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Constituição do Estado da Paraíba (Art. 229) (1) e a Lei Orgânica para o Município de João Pessoa (Art. 175) (2), o Plano Diretor de João Pessoa (3), em seu Art. 25, Define o gabarito da altura dos edifícios na Orla Marítima de João Pessoa de 12,90m na primeira linha de lotes e estender-se a 35m na última linha da mesma, configurando um escalonamento no perfil urbano.

<sup>2</sup> O primeiro padrão relativo à legislação vigente e outros dois hipotéticos que simulam outras formas de adensamento vertical.



Assim, baseando-se em conhecimento multidisciplinar que envolve o Urbanismo, o Geoprocessamento e a Meteorologia, pretende-se desenvolver estudos analíticos sobre a possível influência urbana na dinâmica atmosférica, neste sentido, se faz necessária a aplicação de técnicas de sínteses espaciais, bem como o Sensoriamento Remoto e a Cartografia, aliados à Modelagem Numérica. Para tanto, pretende-se utilizar a Modelagem Numérica no presente trabalho devido a sua capacidade em representar os processos físicos espaciais e assim facilitar as interpretações decorrentes das análises.

O Capítulo 2 deste estudo apresenta uma revisão da literatura acerca de estudos relacionados à morfologia e clima urbanos e à modelagem numérica de superfícies urbanizadas. No Capítulo 3 a Região de Estudo e suas principais características são descritas. O Capítulo 4 descreve o procedimento metodológico utilizado para a realização deste estudo; O Capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados obtidos e as considerações finais e, por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Visando contribuir para um melhor entendimento da cidade, tem-se de modo geral, o objetivo de analisar os processos de superfície relacionados à ventilação, precipitação e condições meteorológicas locais, baseando-se na modelagem numérica da atmosfera.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Introduzir, no campo de superfície do modelo BRAMS - *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System*, uma representação realista da Região Metropolitana de João Pessoa.
- Realizar experimentos alternando a presença da parametrização da dinâmica urbana.
- Contribuir com dados numéricos para o entendimento da influência da Região Metropolitana de João Pessoa sobre as variáveis meteorológicas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.2 MORFOLOGIA E CLIMA URBANO

A representação das características de uma região urbana sempre foi um desafio para os pesquisadores do clima, isso se deve pela complexidade de sua morfologia e dos processos físico-químicos indissociáveis.

Uma grande contribuição da representação urbana registrada sobre a modelagem é de T. R. Oke. Esse autor descreveu tanto a superfície quanto a atmosfera urbanas através dos seguintes termos fundamentais:

- i) *Canyon urbano (Urban Canyon - UC)*;
- ii) *Camada do dossel urbano (Urban Canopy Layer - CDU)*;
- iii) *O fator de visão do céu (Sky View Factor)*;
- iv) *A camada limite urbana (Urban Boundary Layer - CLU)* (OKE, 1976).

O *Canyon Urbano* é definido como uma analogia entre a geometria das vias urbanas e os *canyons* naturais. Nele uma via é margeada por duas faces de paredes, o que simula a rugosidade do dossel urbano.

A CDU é limitada pela altura das edificações e está relacionada com os processos urbanos de microescala. O “Fator de Visão do Céu” está inserido na CDU e corresponde ao ângulo formado por duas retas procedentes do centro da rua até o topo das edificações adjacentes, sendo importante na determinação do balanço de energia à superfície.

A CLU envolve os processos de mesoescala e suas características dependem do perfil da malha urbana.

Landsberg (1981), OKE (1984) e Yoshino (1991) apresentam uma cronologia detalhada acerca de estudos relacionados ao clima urbano (ALCOFORADO, 1999).

As investigações sistemáticas iniciais sobre este tipo de clima foram realizadas a partir da segunda metade do século XIX em Londres por Luke Howard e em Paris por Émilien Renou (LANDSBERG, 1981 apud ALCOFORADO, 1999). Outros estudos da mesma época foram citados por OKE apud ALCOFORADO (1999) como os de Wittwer (1960) na Baviera e Kremser (1886) em Berlim. O que estas pesquisas têm em comum é a análise da diferença de temperatura entre as áreas urbanas e rurais.

Posteriormente, devido à falta de representatividade espacial das estações meteorológicas nas áreas urbanas de países europeus, foram introduzidas as técnicas de medições itinerantes a bordo de bicicletas e em seguida por automóveis, aviões, helicópteros e satélites.

Alcoforado (1999) afirma que inicialmente os elementos urbanos principais tidos como o foco dos pesquisadores do clima urbano eram a temperatura e a sua relação com o uso do solo, com a dimensão da cidade, com o tipo de tempo e a sua influência no gradiente térmico horizontal.

O primeiro manual de climatologia urbana foi publicado em 1937 por A. Kratzer intitulado “O Clima da Cidade” que foi reeditado em 1956 devido às transformações de diversas cidades durante a segunda guerra mundial e o incremento da industrialização (OKE, 1984). A partir da década de 70, o balanço energético e hídrico das cidades foi estudado em paralelo com pesquisas relacionadas à Camada Limite. Destas pesquisas, a ilha de calor urbana é o elemento climático mais estudado.

Oke (1978) detalha as principais causas das ilhas de calor:

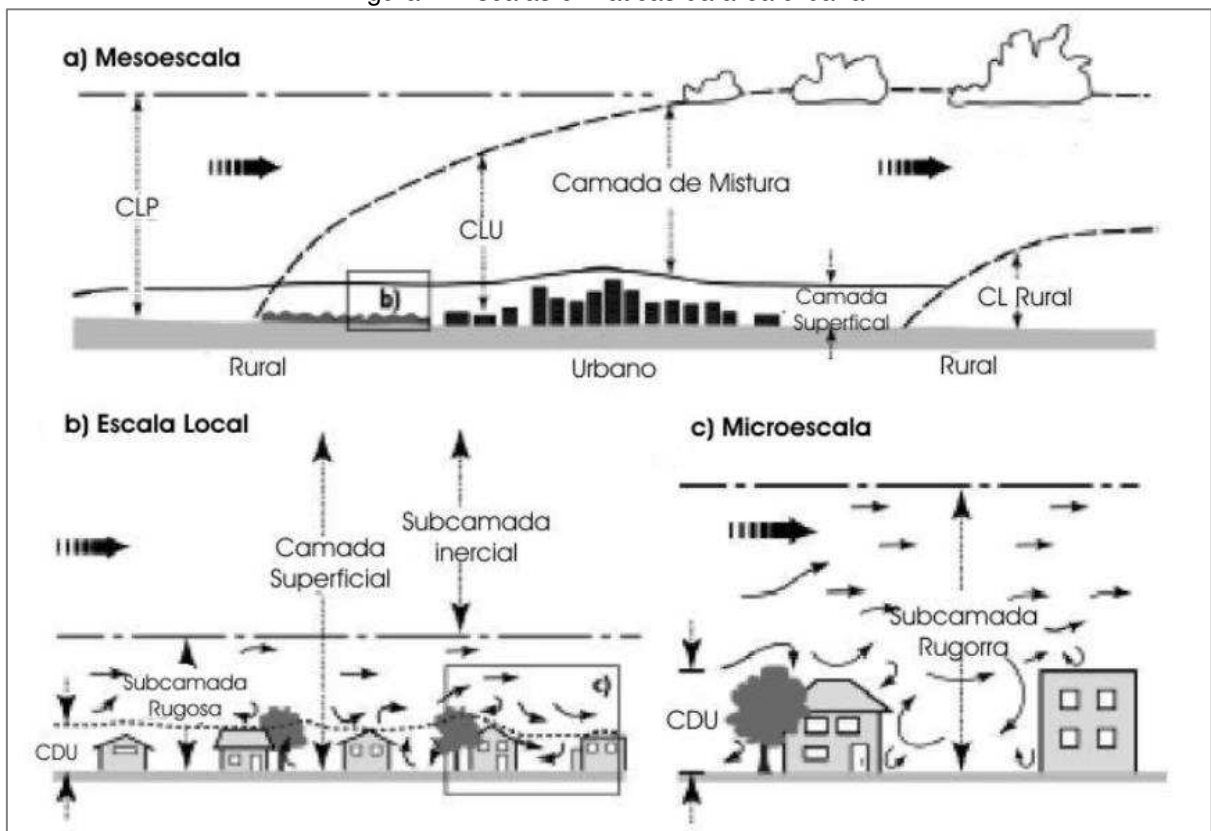
- i. Reemissão de radiação de onda longa pelos poluentes na atmosfera;
- ii. Menor perda da radiação de onda longa nas ruas devido à redução do *Sky View Fator*;
- iii. Maior absorção da radiação de ondas curtas devido à redução do albedo;
- iv. Alta estocagem de calor durante o dia devido às propriedades térmicas dos materiais urbanos e forte emissão de radiação durante a noite;
- v. Adição de calor devido às atividades antropogênicas;
- vi. Diminuição do fluxo de calor latente ou evapotranspiração, e aumento do calor sensível (OKE, 1978).

Nesta mesma década, os estudos de clima urbano foram iniciados no Brasil com o estudo pioneiro de Monteiro (1976) que relacionou o clima urbano com as transformações atmosféricas na cidade de São Paulo. Um estudo posterior foi realizado por Lombardo (1985) que utilizou imagens de satélite, levantamento de campo e análise de tipo de uso do solo para estudar o gradiente horizontal da

temperatura do ar na Região Metropolitana de São Paulo e sua associação com o efeito da Ilha de Calor.

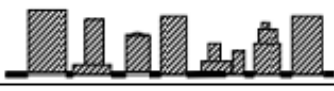


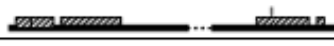
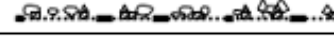
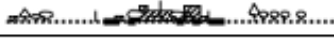
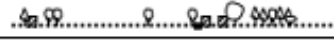
Oke (2004) define as três escalas horizontais de análise do clima urbano, denominados Micro-escala, Escala Local e Mesoescala, apresentadas pela Figura 1. Oke (2006 *apud* RIBEIRO 2013) apresenta o conceito de Zona Climática Urbana (*Urban Climate Zone – UCZ*), apresentada na Figura 2, a qual classifica as áreas urbanas de acordo com suas particularidades e avalia a influência de suas tipologias no clima local.

Figura 1- Escalas climáticas da área urbana.



Fonte: Oke (2004 *apud* SOBREIRA 2010)

Figura 2 - Classificação das Zonas Climáticas Urbanas

ZONA CLIMÁTICA URBANA	IMAGEM	CLASSE DE RUGOSIDADE	COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE	% CONSTRUÍDA (IMPERMEABILIDADE)
Regiões urbanas intensamente desenvolvidas.		8	<2	>90
Regiões urbanas altamente densas com conjuntos de construções de 2 a 5 andares.		7	1.2 - 2.5	>85
Regiões urbanas altamente desenvolvidas com edificações individuais próximas.		7	0.5 - 1.5	70
Regiões urbanas altamente desenvolvidas, com baixa densidade e com edificações extensas e baixas.		5	0.05 - 0.2	75 - 95
Desenvolvimento médio, baixa densidade suburbana e com casas de 1 a 2 andares.		6	0.2 - 0.5 ( > 1 com árvores altas)	35 - 65
Uso misto, com grandes construções e áreas abertas.		5	0.1 - 0.5, depende das árvores	<40
Desenvolvimento semi-rural com casas espaçadas em áreas naturais ou agrícolas.		4	>0.05, depende das árvores.	<10

Fonte: Adaptado de Oke (2004).

Katzschner (1997) propôs um método para estudo do clima urbano, com vistas a sua aplicação ao planejamento. A metodologia inclui a produção de mapas de uso do solo, altura das edificações, áreas verdes e topografia, bem como a indicação de pontos para medição de variáveis ambientais, realizadas simultaneamente, em épocas e períodos predefinidos. Esta metodologia foi aplicada em pesquisa na cidade de Salvador (KATZSCHNER; FREIRE; NERY; CARVALHO, 1999). Os resultados apontam que, para cidades tropicais, como Salvador, é importante considerar a ventilação como o fator dominante para a sensação de conforto térmico humano.

Carvalho (2001) explorou as correlações entre atributos da morfologia urbana (FVC, taxa de ocupação, distancia em relação ao mar e tipo de pavimento) e variáveis climáticas (temperatura, ventilação, umidade relativa e insolação) na

cidade de João Pessoa - PB. Realizou coleta de dados em vários pontos distribuídos pela cidade em três períodos do dia. Este autor concluiu que as correlações entre a cidade e o clima, apesar de baixas nesta cidade, existem e variam ao longo do tempo, seguindo um ritmo dependente da relação dessas variáveis com a superfície da Terra e, no caso específico do clima urbano, com a forma da cidade.

Shepherd (2005) apresenta uma revisão dos principais estudos relacionados a chuvas urbanas de 1990 a 2004. Neste material são discutidos estudos observacionais e de modelagem e, por fim, são dadas recomendações para estudos futuros enquanto que Grimmond (2006) afirma que as inovações tecnológicas são responsáveis pela ressurgência dos interesses dos pesquisadores quanto à umidade e precipitação nos estudos mais recentes.

### 2.3 MODELAGEM NUMÉRICA DE SUPERFÍCIES URBANIZADAS

As representações iniciais em modelos numéricos para superfícies urbanizadas foram feitas através da aproximação das condições urbanas a uma “laje plana de concreto” ou a uma “caixa de areia seca” (BEST, apud KARAM *et al.*, 2010), contudo este processo resulta em uma supersimplificação das características complexas da geometria e dos processos físicos relacionados ao meio urbano.

Esta supersimplificação foi reduzida a partir da elaboração do modelo de *Canyon Urbano* (FREITAS, 2003; OKE, *et al.*, 1970). Este modelo é forçado por dados atmosféricos (radiação, ventos acima do telhado), mas não interage com os mesmos (FREITAS, 2003). O modelo geométrico do *Canyon Urbano* foi utilizado como conceito para a elaboração de modelos subsequentes. (GRIMMOND *et al.*, 1991; JOHNSON *et al.*, 1991; GRIMMOND e OKE, 1990; MILLS, 1993; ARNFIELD *et al.*, 1998.)

Havia a limitação de “adaptar” a vegetação em um esquema de interação *solo-vegetação-atmosfera* (SVAT) para simular a área urbana (MENUT, 1997). Todavia, o avanço das capacidades computacionais e tecnológicas possibilitou o acoplamento da superfície urbana e da atmosfera em modelos atmosféricos de mesoescala investigados por alguns autores (MASSON, 2000); KUSAKA *et al.*, 2001; MARTILLI *et al.*, 2002; MESTAYER *et al.*, 2005).

A *Colorado State University* (CSU) e a (MRC/ASTER) em 1983, desenvolveram o modelo denominado *Regional Atmospheric Modeling System*

(RAMS) a partir do acoplamento de três modelos existentes: um modelo de nuvens/mesoescala, uma versão hidrostática do modelo de nuvens e um modelo de brisa marítima e de nuvens. A disponibilização em massa do RAMS iniciou em 1991 à medida que modificações e melhorias eram realizadas. Sua versão definitiva (versão 4a) foi distribuída em 1995.

A partir do RAMS, surgiu o *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS)*, o modelo adotado no presente trabalho. O BRAMS contém várias opções que possibilitam o seu uso para um grande número de aplicações, desde o hidrostático ao não hidrostático; da resolução menor que um metro ao quilométrico, domínio de poucos quilômetros ao hemisférico; além de uma série de parametrizações físicas que simulam os processos governantes da evolução do estado atmosférico.

Araújo (2010) lista as parametrizações que se destacam neste modelo, como as parametrizações de onda longa e de onda curta propostas por Chen e Cotton (1983), a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo (KUO, 1965; 1974), modificada por Molinari (1985) e Molinari e Corsetti (1985), a parametrização de convecção profunda do tipo Grell (GRELL e DÉVÉNYI, 2002), a parametrização de convecção rasa desenvolvida, implementada por Souza (1999); a turbulência na camada limite planetária, calculada segundo Mellor e Yamada (1982) e a microfísica descrito por Walko et al. (1995).

Segundo Karam *et al.* (2010), as duas parametrizações mais completas para o Saldo de Energia na Superfície - SEB e para outros efeitos urbanos são o *Town Energy Budget - TEB* (MASSON, 2000) e o método de parametrização de trocas de superfície (MARTILLI *et al.* 2002). O primeiro baseia-se na primeira lei física da termodinâmica, nos aspectos geométricos das construções, nas propriedades térmicas e radiativas para calcular os fluxos de superfície, na temperatura do ar e na umidade para representar o SEB com um conjunto de *Canyons* Urbanos sem orientação específica. O segundo modelo calcula múltiplas escalas de camadas de mistura associadas à distribuição do *Canyon* Urbano, o que define os fluxos turbulentos na solução da equação da energia cinética. Destes, o TEB é a parametrização adotada no presente trabalho.

Freitas (2003) estudou os efeitos da Ilha de Calor Urbana da Região Metropolitana de São Paulo através da utilização do modelo RAMS-TEB e de dados observacionais. Através da utilização de imagens do sensor LANDSAT-8, obteve um

---

arquivo com dois padrões distintos de ocupação do solo. O modelo mostrou, dentre outros resultados, que as fontes antropogênicas de calor de origem veicular são expressivas para o ciclo diurno de temperatura e que a interação entre a brisa marítima e a ilha de calor intensifica zonas de convergência na cidade. O coeficiente de correlação entre os dados simulados e os observados foram superiores a 0,9 para a temperatura e a 0,8 para a umidade relativa.

Araújo (2010) analisou a interação entre a cobertura de cúmulos rasos e os processos radiativos de superfície na Região Metropolitana do Recife através do acoplamento entre o esquema TEB e o BRAMS. Para a melhor compreensão da contribuição individual da dinâmica da cidade e da convecção rasa, o método de separação de fatores proposto por STEIN e ALPERT (1993) foi utilizado. Os resultados mostraram que o efeito conjunto da dinâmica da cidade e da cobertura de cúmulos produziu efeitos mais realísticos. A análise dos fatores possibilitou compreender que a predominância da influência da cidade e da convecção rasa sobre certas variáveis são alternadas ao analisar o período seco e o úmido separadamente. Uma análise da distribuição da precipitação também foi realizada neste estudo e os resultados obtidos mostraram que, dependendo do momento do evento chuvoso, a cidade pode contribuir na intensidade da precipitação.

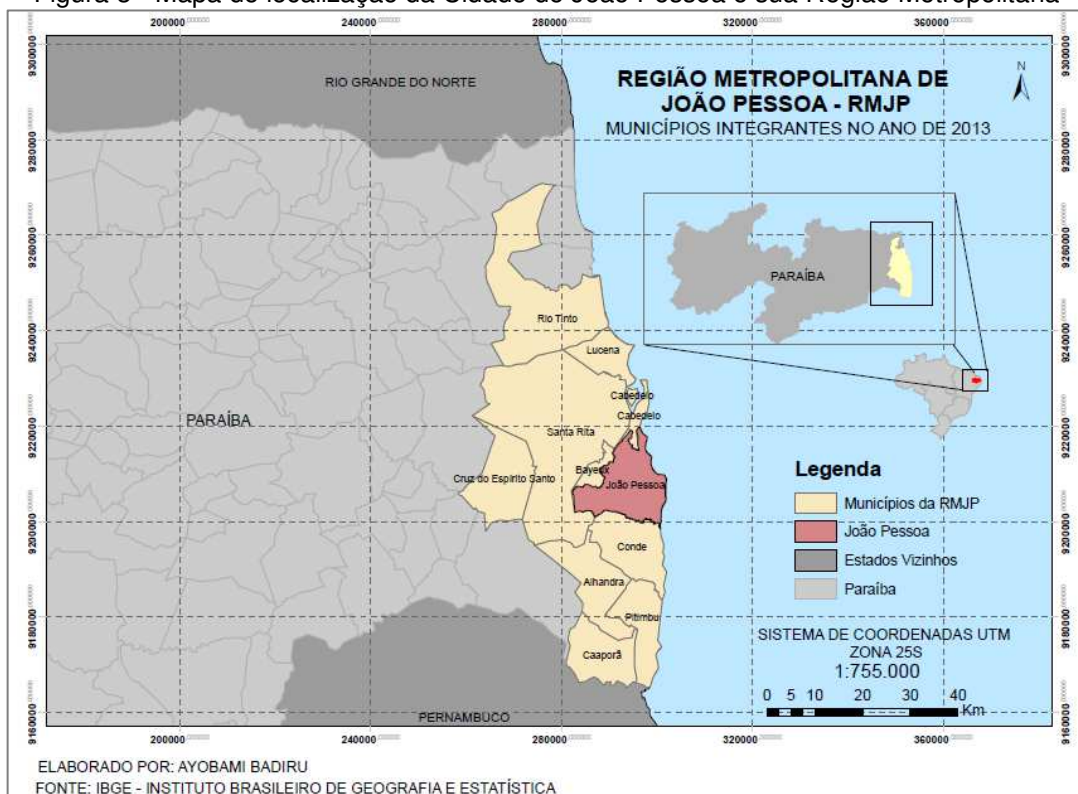
Lemonsu *et al.* (2012) apresentaram um aprimoramento da camada do dossel urbano no esquema TEB a fim aprimorar a representação da vegetação presente no *canyon* urbano. Esta versão do TEB com a vegetação integrada simulou com mais acurácia a umidade presente no *canyon* urbano nos experimentos realizados. A acurácia das variáveis microclimáticas representadas por este modelo também foi aprimorada.



### 3 REGIÃO DE ESTUDO

A Figura 3 apresenta o Mapa de Localização da Região Metropolitana de João Pessoa - RMJP, suas coordenadas adjacentes, e suas fronteiras. No censo de 2010, a população de João Pessoa atingiu os 742.478 habitantes e a sua área total é de 210,551 km<sup>2</sup>, considerando as 11 cidades contidas na RMJP, este valor ultrapassa os 1.100.000 habitantes.

Figura 3 - Mapa de localização da Cidade de João Pessoa e sua Região Metropolitana

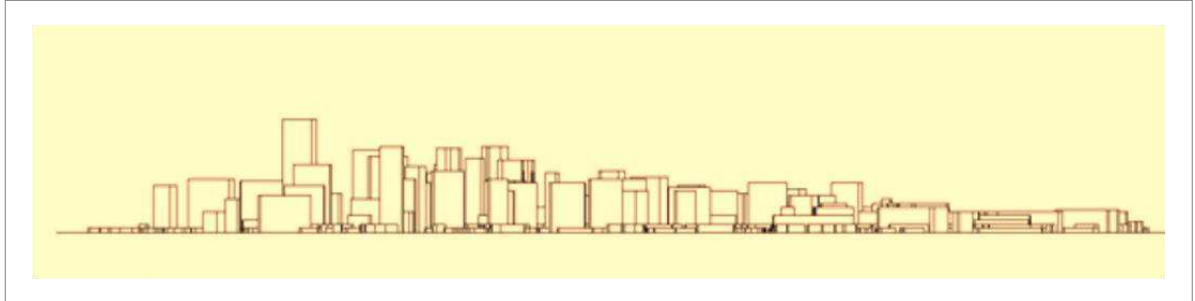


Como o seu processo de evolução urbana ocorreu na direção leste, do rio Sanhauá ao limite litorâneo, a cidade apresenta um relevo urbano diversificado, em sopé de encostas, tabuleiro e planície costeira, apresenta uma altitude média de 10 metros, o clima tipo As' (quente com chuvas de outono-inverno) e uma temperatura média de 28°C com amplitude térmica anual inferior a 5°C. A direção do vento é predominantemente de leste-sul, a umidade relativa é elevada o ano inteiro e sua média varia de 68% a 80% entre os períodos secos e chuvosos respectivamente.

Em sua estrutura, e evidenciado pela Figura 4, pode-se dizer que a paisagem de João Pessoa demonstra assimetria em seu perfil cotado entre o oceano até seu interior. De um lado apresenta a Lagoa do Parque Sólon de Lucena

inserida no centro da cidade e por outro a Mata do Buraquinho centrada no espaço urbanizado.

Figura 4- Perfil da Cidade de João Pessoa: diferença de gabarito das alturas para as edificações na orla marítima até o centro da cidade



Fonte: Peregrino, 2005

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento metodológico deste estudo obedece cinco passos:

- a. Análise do padrão físico-espacial da região de estudo;
- b. Geração do mapa de cobertura a ser processado no BRAMS;
- c. Definição das características do TEB acoplado ao BRAMS;
- d. Realização dos experimentos;
- e. Análise dos dados processados;

A análise do padrão físico-espacial da RMJP permite um maior conhecimento desta região, tal conhecimento é essencial para a elaboração do mapa de ocupação e para a análise meteorológica sobre o espaço urbano. Para isso, foram utilizados dados cartográficos vetoriais e matriciais.

Os mapas de cobertura são importantes por sintetizarem a superfície terrestre da área de estudo. Os dados de cobertura foram modificados para servirem de base como dados de entrada e para o processamento do modelo.

O conhecimento oriundo da análise do padrão físico-espacial da RMJP também serviu de base para a configuração das características do esquema TEB, dado que este esquema é o responsável na representação da RMJP no modelo. Foram realizados dois experimentos, um com o TEB ativado e outro com o TEB desativado

Tanto o mapa de cobertura quanto os recortes temporais serviram de base para a aplicação do modelo BRAMS. As configurações em cada simulação no BRAMS foram feitas através do arquivo chamado RAMSIN, do tipo *namelist*, subdividido em cinco partes: a) *Model\_grids*; b) *Model\_file\_info*; c) *Model\_info*; d) inclusão de sondagens; e) impressão de resultados (FREITAS, 2003).

A primeira parte diz respeito à configuração das grades utilizadas, como o tamanho, localização, número de grades, número de pontos de grade, espaçamento horizontal e vertical, números de níveis verticais e de camadas de solo e o tempo de simulação.

A segunda parte define o tipo de inicialização: homogênea (uso de sondagem) ou heterogênea (análises como as fornecidas pelo CPTEC ou NCEP); os parâmetros relacionados ao *nudging* vertical e horizontal; frequência de geração de arquivos de saída; arquivos de topografia; ocupação do solo; temperatura da superfície do mar.

Na terceira parte as opções físicas e numéricas do modelo são definidas, como o tipo de condição de fronteira lateral; os parâmetros de radiação; convecção; difusão turbulenta; camada superficial, modelo de solo e microfísica.

A quarta e a quinta partes estão destinadas respectivamente à inclusão de sondagens quando a inicialização é homogênea e para impressão dos resultados durante a simulação.

Os dados de entrada do modelo são: temperatura do ar, geopotencial, umidade do ar (temperatura do ponto de orvalho ou razão de mistura ou umidade relativa do ar ou diferença psicrométrica) e vento (componentes zonal (u) e meridional (v)).

Os dados oriundos do processamento, assim como o processo de validação do modelo utilizado, possibilitaram a realização da análise meteorológica, foram analisados os fluxos radiativos incidentes e emitidos na superfície, a temperatura na superfície, valores de umidade relativa, razão de mistura e precipitação e as componentes horizontais do vento.

#### 4.1 GERAÇÃO DO MAPA DE COBERTURA

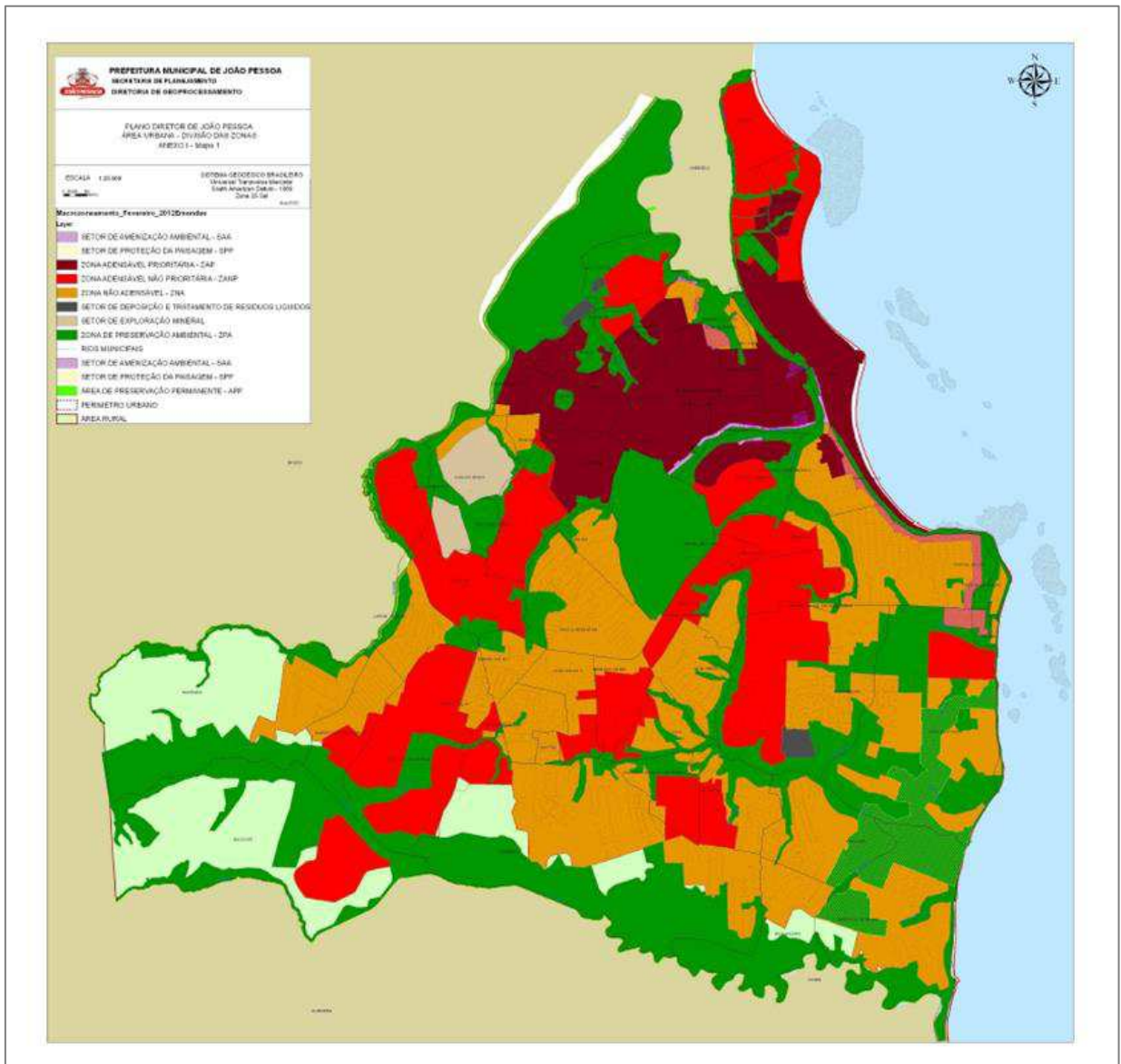
O mapa de cobertura foi elaborado a partir do pressuposto de que uma boa representação do espaço urbanizado é necessária para a compreensão dos fenômenos físicos associados. Para isso, foi necessário embasamento cartográfico simultâneo ao estudo da região de estudo.

Os dados cartográficos necessários nesta etapa compreendem aos mapas de macrozoneamento da RMJP, aos arquivos vetoriais nos formatos *shapefiles*, *kmz* e *dwg* da RMJP e aos dados orbitais dos sensores *Landsat* e *QuickBird*. Os arquivos vetoriais foram disponibilizados pela Prefeitura Municipal de João Pessoa e apresentam tanto as feições geográficas da região de estudo quanto as informações cadastrais a respeito destas feições, deste modo, estes arquivos permitiram o aprofundamento do conhecimento da RMJP.

A Figura 5 mostra o mapa do macrozoneamento da cidade de João Pessoa, o qual é um dos principais instrumentos de política urbana e representa o primeiro nível de definição das diretrizes espaciais, como “um referencial espacial para o uso e ocupação do solo na cidade” (Brasil, 2002)

Neste mapa, foram delimitados dois grupos distintos de macrozonas: as “Regiões Densas” (cores laranja, vinho e vermelho) e as “Regiões Ambientais” (cor verde escuro, verde claro, azul e as áreas hachuradas); as demais zonas são menos frequentes. Este padrão bipolar é atípico e foi considerado ao longo da análise meteorológica, sobretudo porque a grande quantidade de corpos hídricos, de reservas de Mata Atlântica e a proximidade com o litoral podem influenciar no comportamento das variáveis. Além disso, foi fundamental para a construção do mapa de cobertura, por viabilizar o maior conhecimento do uso do solo na região de estudo. Apesar deste mapa não abranger a totalidade da RMJP, ele fornece indicadores quanto as suas características de ocupação do solo.

Figura 5 - Macrozoneamento da Cidade de João Pessoa em 2012.



Dentre as Zonas pertencentes às “Regiões Densas”, a Zona Adensável Prioritária - ZAP, destacada com a cor vinho, representa uma das áreas mais densas da RMJP. Estão inseridas nesta zona, a região de influência da Av. Epitácio Pessoa, a principal da cidade, e os bairros litorâneos mais frequentados: Cabo Branco e Tambaú. Na ZAP também está contida a maioria das áreas que sofrem com o fenômeno de Ilha de Calor Urbana na RMJP (RIBEIRO, 2013).

As imagens do sensor *Landsat* são compostas por sete bandas espectrais, as quais variam a partir do campo espectral do visível (0,45 – 0,69 micrômetros), dentre estas bandas espectrais, a Banda 6 tem a peculiaridade de ser responsável por captar o comprimento de onda do infra-vermelho termal, ou seja, a radiação de onda longa emitida pela superfície ( 10,40 – 12,50 micrômetros), deste modo, a imagem auxilia na caracterização da superfície, assim como fornece dados de radiação da região de estudo. Devido à ausência de imagens referentes à data do experimento, as imagens utilizadas datam de setembro/2011. A imagem do sensor *Quickbird* é fornecida pelo *Google* e também foi utilizada para auxiliar na caracterização da RMJP, visto que os dados matriciais possibilitam a visualização geral das características específicas da cobertura do solo e, assim, facilitam a classificação das feições apresentadas.

A Figura 6 apresenta a distribuição espacial da temperatura na RMJP a partir da imagem Landsat 5. A banda espectral presente nesta imagem é referente ao canal termal, ou seja, à radiação de onda longa emitida pela superfície. A observação desta imagem proporciona a obtenção de informações referentes aos demais municípios da RMJP, os quais carecem de fontes de informações neste contexto.

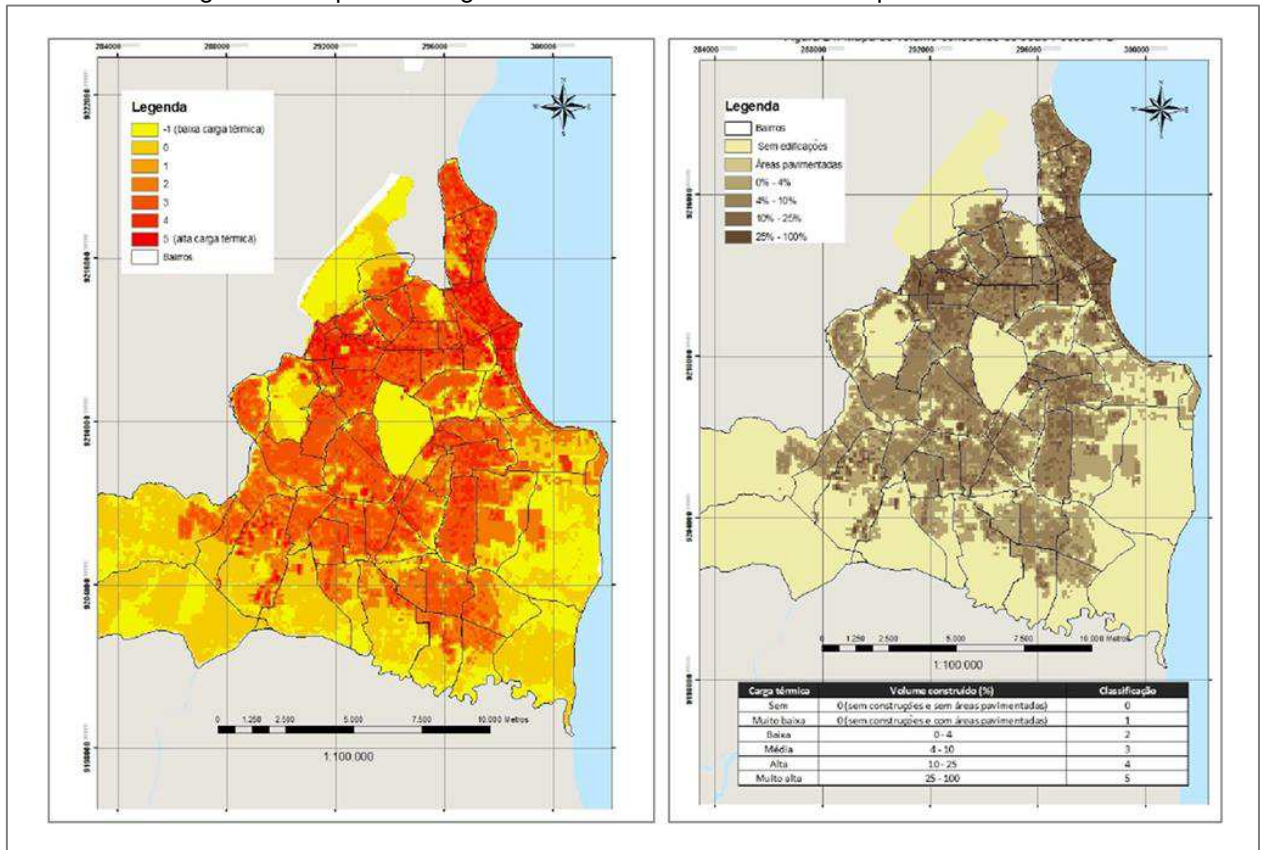
A Figura 7 apresenta os mapas de volume construído e de carga térmica, ambos para a RMJP; O volume construído é relacionado à densidade de ocupação do solo e ao Fator de Visão de Céu (Oke, 1978), que é apontado como um dos elementos do *Canyon Urbano* relacionado ao aprisionamento da radiação de onda longa emitida pela superfície. A carga térmica relaciona a capacidade de armazenamento de calor devido ao espaço construído e a capacidade de mitigação do stress térmico representado pela vegetação. Deste modo, percebe-se a relação direta entre o volume construído e a carga térmica.

Figura 6 - Imagem Landsat da RMJP.



Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, disponível em [www.inpe.br](http://www.inpe.br).

Figura 7 - Mapas de carga térmica e de volume construído para a RMJP.



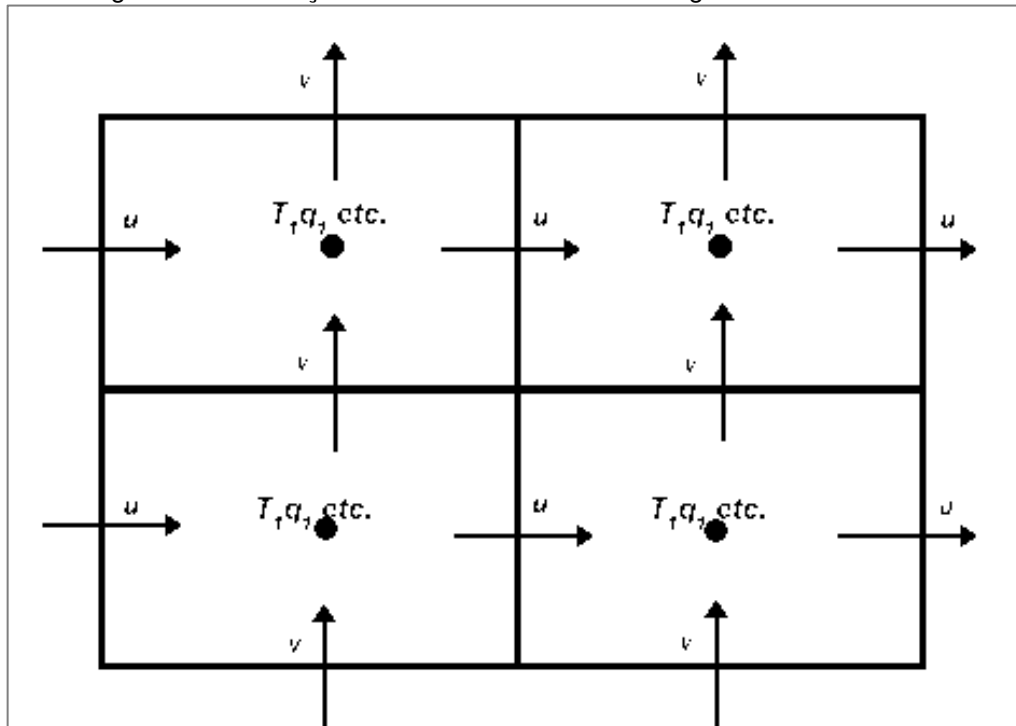
Fonte: Adaptado de RIBEIRO(2013).

O mapa de cobertura serviu de entrada no BRAMS e foi sintetizado em 3 categorias: “Urbano 1”, “Urbano 2”, além dos outros tipos de cobertura não urbana. A resolução espacial do mapa de cobertura foi inicialmente definida para cada ponto com resolução de 1 km, tanto em x quanto em y. O mapa de cobertura que serviu de entrada no BRAMS foi elaborado a partir das observações realizadas nesta análise, a Figura 8 mostra a construção deste mapa em paralelo com a imagem da região de estudo.





Figura 9 - Distribuição das variáveis do modelo na grade C de Arakawa.



Fonte: Adaptado do Programa Educacional da UCAR (MetEd).

O esquema TEB foi proposto por Masson (2000) e implementado no BRAMS por Freitas (2003), o seu objetivo é parametrizar as interações dinâmicas e termodinâmicas entre a cidade e a atmosfera e se difere do LEAF principalmente pelo uso da geometria de *canyon* local ao invés da representação de solo nu ou da modificação de parâmetros para representar áreas urbanizadas. Sua aplicação é restrita a modelos de mesoescala e considera três tipos de temperaturas representativas para a cidade: a do telhado, a da parede e a da rua, o que gera múltiplos balanços de energia.

A aplicação do TEB valida o modelo de *canyon*, as feições individuais de cada construção são desconsideradas e são feitas as seguintes simplificações listadas por Freitas (2003) e Araújo (2010):

- Os edifícios têm a mesma dimensão (largura e altura), determinadas *ad hoc*;
- As edificações estão dispostas em ruas idênticas, sendo que a sua largura é bem menor que o seu comprimento. O espaço contido entre as duas faces das construções é definido como *canyon*;

- A orientação das ruas é possível em qualquer direção e todas existem com a mesma probabilidade. Esta hipótese permite o cálculo do forçamento médio para as superfícies das ruas e paredes.

Foram utilizados dois tipos de configurações de superfície urbana correspondente ao experimento com o TEB ativado: o Urbano 1 e o Urbano 2. Estas configurações segue o proposto por Araújo (2010) e estão detalhadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros do esquema TEB para os tipos de ocupação urbana.

PARÂMETROS	URBANO 1	URBANO 2
Altura das construções	30m	5m
Largura das construções	10m	10m
$z_0$	0,5	0,5
Fonte veicular de calor sensível	50%	70%
Fonte veicular de calor latente	$90\text{Wm}^{-2}$	$60\text{Wm}^{-2}$
Fonte industrial de calor sensível	$10\text{Wm}^{-2}$	$14\text{Wm}^{-2}$
Fonte industrial de calor latente	$30\text{Wm}^{-2}$	$50\text{Wm}^{-2}$

#### 4.3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Foram realizados dois experimentos no BRAMS: o primeiro utilizando o TEB ativado (experimento TEB) e o segundo utilizando o TEB desativado (experimento STEB). A principal diferença em ativar o TEB está na inclusão da termodinâmica da cidade no BRAMS. O período dos dados referentes a estes experimentos é de 31/08/2010 até 03/09/2010.

#### 4.4 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

A análise das variáveis meteorológicas é viabilizada pelo conhecimento da das principais características espaciais da RMJP. A representação dos valores resultantes dos experimentos do modelo foi realizada através de gráficos comparativos entre os experimentos TEB e STEB. O perfil diário e a diferença entre os experimentos (TEB – STEB) foram amplamente explorados nesta etapa por possibilitarem um conhecimento abrangente do comportamento das variáveis. Os

mapas apresentando a espacialização dos valores das variáveis e o Diagrama de Hovmöller possibilitaram a análise das variáveis considerando tanto o tempo quanto a espacialização horizontal da RMJP.

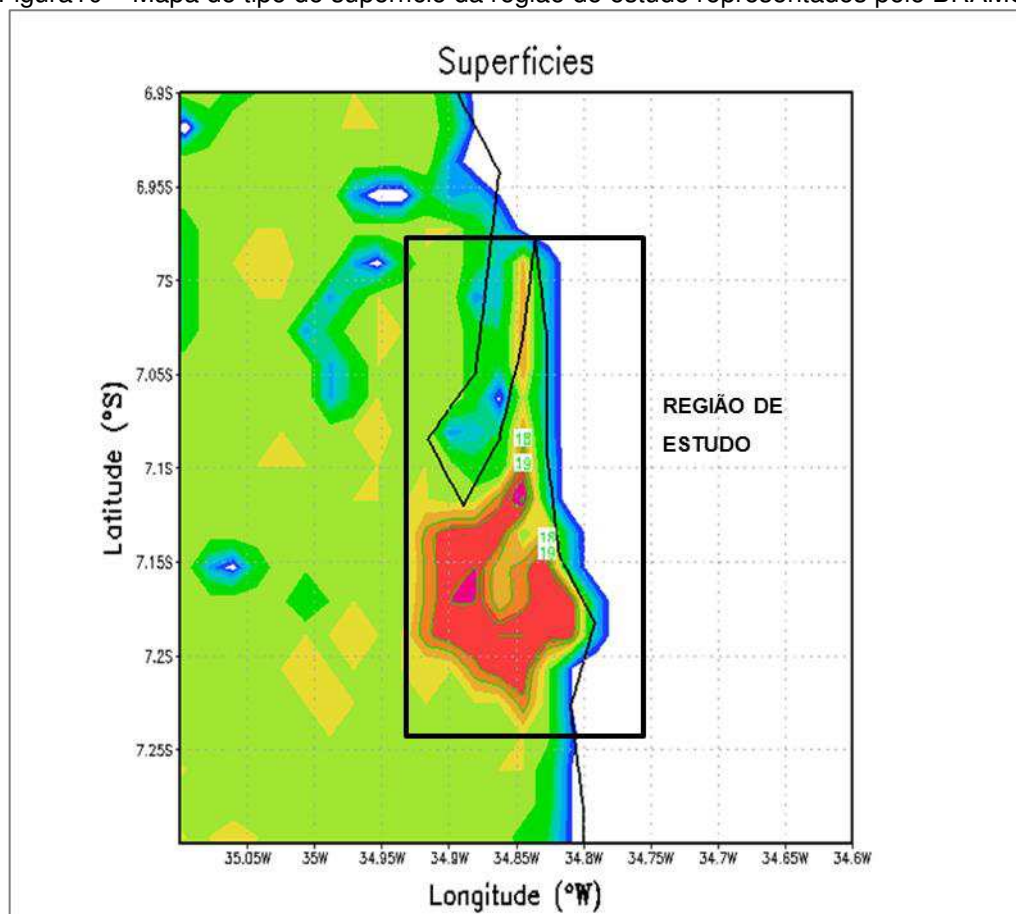
Foram analisados os fluxos radiativos incidentes e emitidos na superfície, a temperatura na superfície, valores de umidade relativa, razão de mistura e precipitação e as componentes horizontais do vento. Os gráficos foram apresentados em horário UTC, a discussão dos resultados está apresentada no Tópico 5.2.

## 5 RESULTADOS

### 5.2 ANÁLISE DAS RESULTANTES DO MODELO

Os dados analisados são resultantes dos experimentos TEB e STEB realizados pelo modelo BRAMS. A Figura 10 mostra os mapas de tipo de superfície da RMJP e o seu entorno, percebe-se claramente a definição da região de estudo neste mapa, o que foi possível devido a inserção do mapa de cobertura no BRAMS.

Figura10 – Mapa de tipo de superfície da região de estudo representados pelo BRAMS.



A Figura 11 mostra o perfil diário da radiação de onda longa emitida – ROLE e a Figura 12 mostra o mapa da diferença entre os experimentos (TEB-STEB) para a ROLE, na qual pode-se observar a delimitação da área urbana. Para a RMJP, as áreas densamente urbanizadas apresentam as maiores diferenças, sobretudo entre as latitudes de 7,25°S e 7,10°S. Os perfis diários plotados correspondem aos valores médios referentes às áreas mais densas da RMJP.

Figura 11 – Perfil diário da ROLE para o experimento TEB (linha preta) e para o experimento STEB (linha verde).

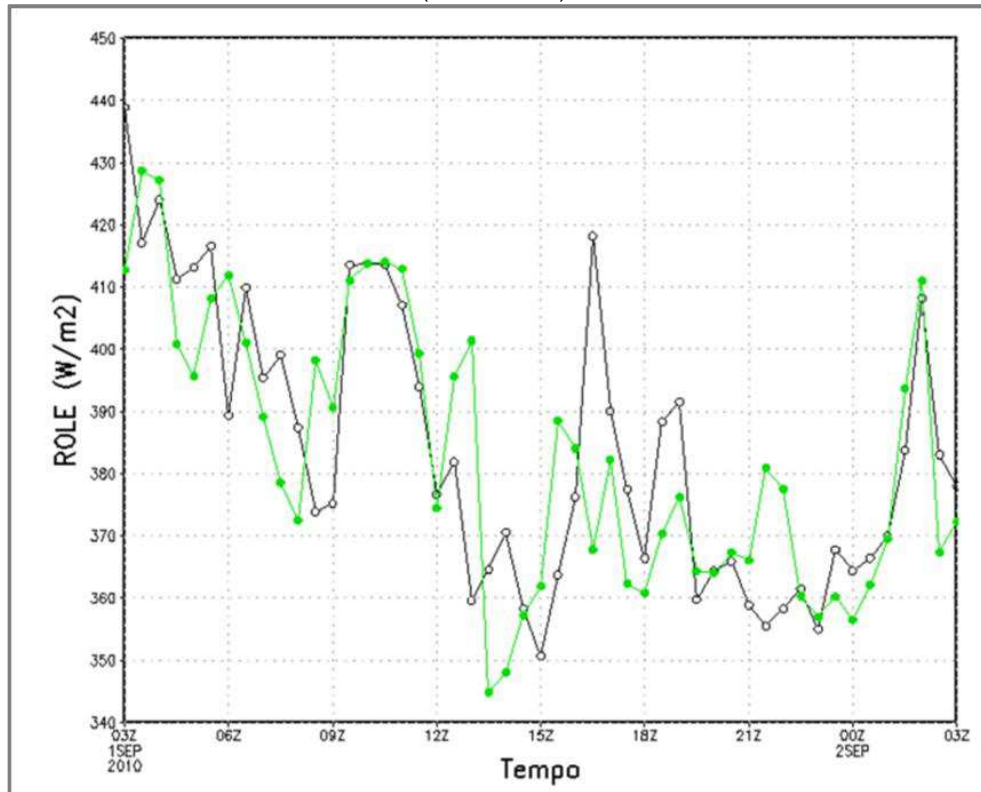
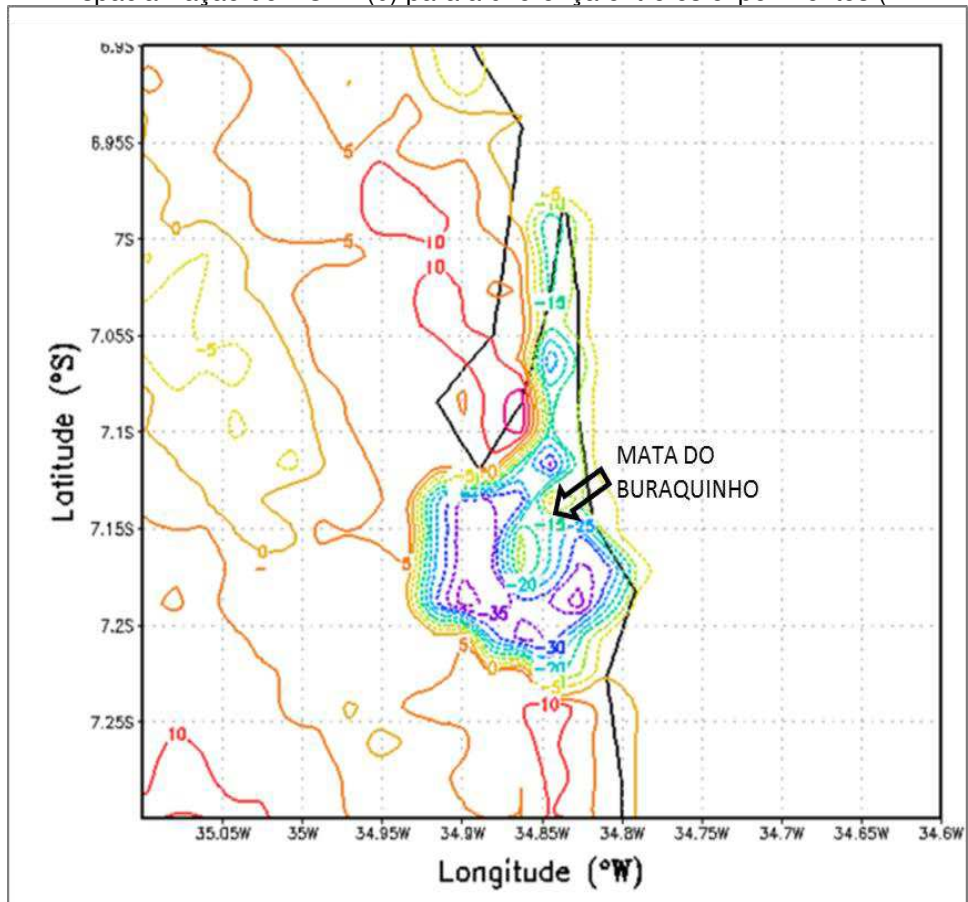


Figura 12 – Espacialização do ROLE (b) para a diferença entre os experimentos (TEB – STEB).



Diferenças significativas entre os valores obtidos podem ser observadas no entorno da reserva de Mata Atlântica (Mata do Buraquinho), onde o efeito do experimento TEB evidencia a influência da urbanização na evolução das variáveis meteorológicas. A variação dos valores de albedo entre os experimentos é relacionada às características térmicas dos materiais que compõem a superfície. As regiões urbanizadas, em geral, refletem menos a radiação incidente e, por consequência, absorvem mais energia. A Figura 13 mostra o perfil diário do albedo para o experimento TEB (linha preta) e para o experimento STEB (linha verde) e a Figura 14 mostra a espacialização do albedo para a diferença entre os experimentos (TEB – STEB). Os valores de albedo para o experimento STEB são maiores do que o experimento TEB, variando de 2% a 7%.

Figura 13 – Perfil diário do albedo para o experimento TEB (linha preta) e para o experimento STEB (linha verde).

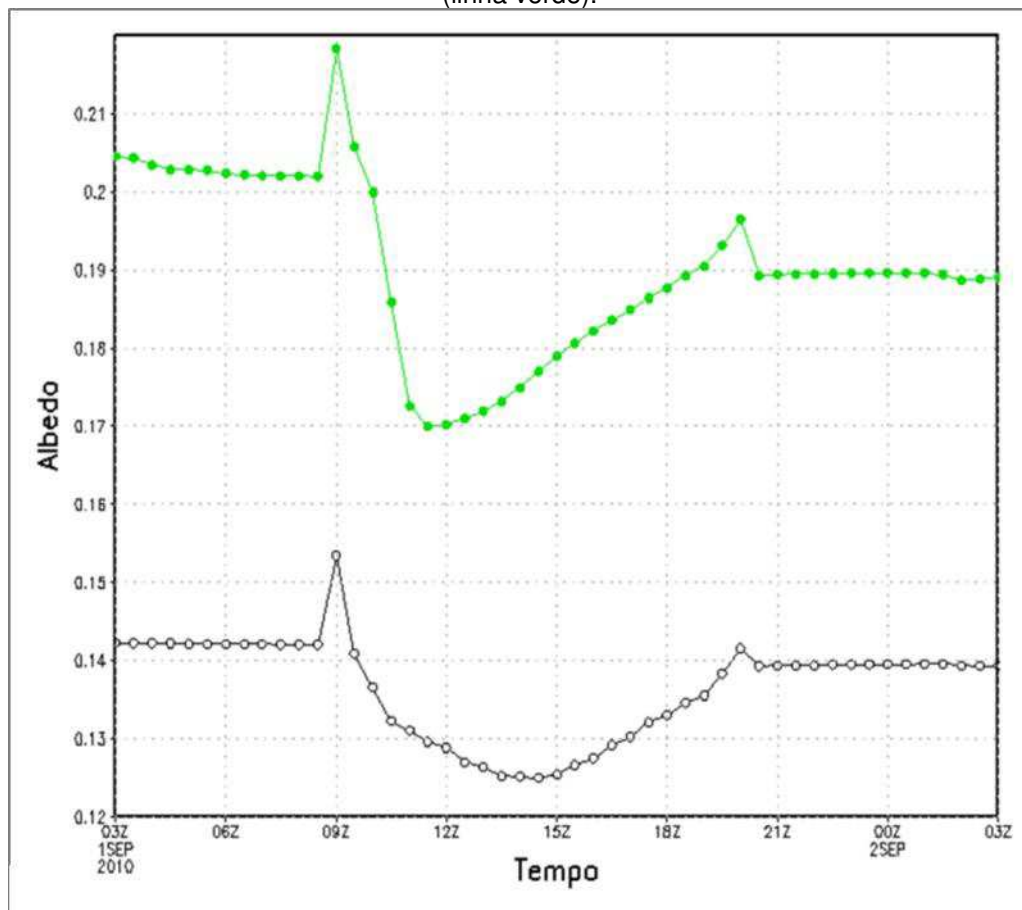
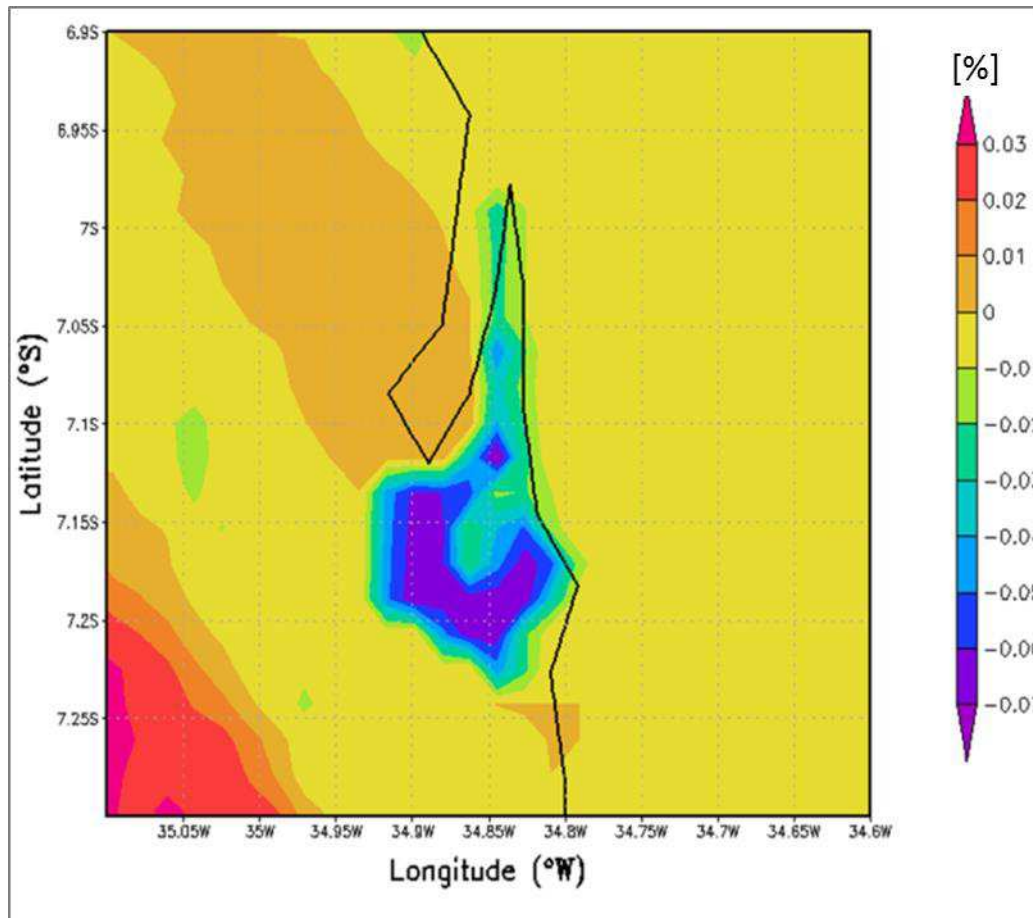


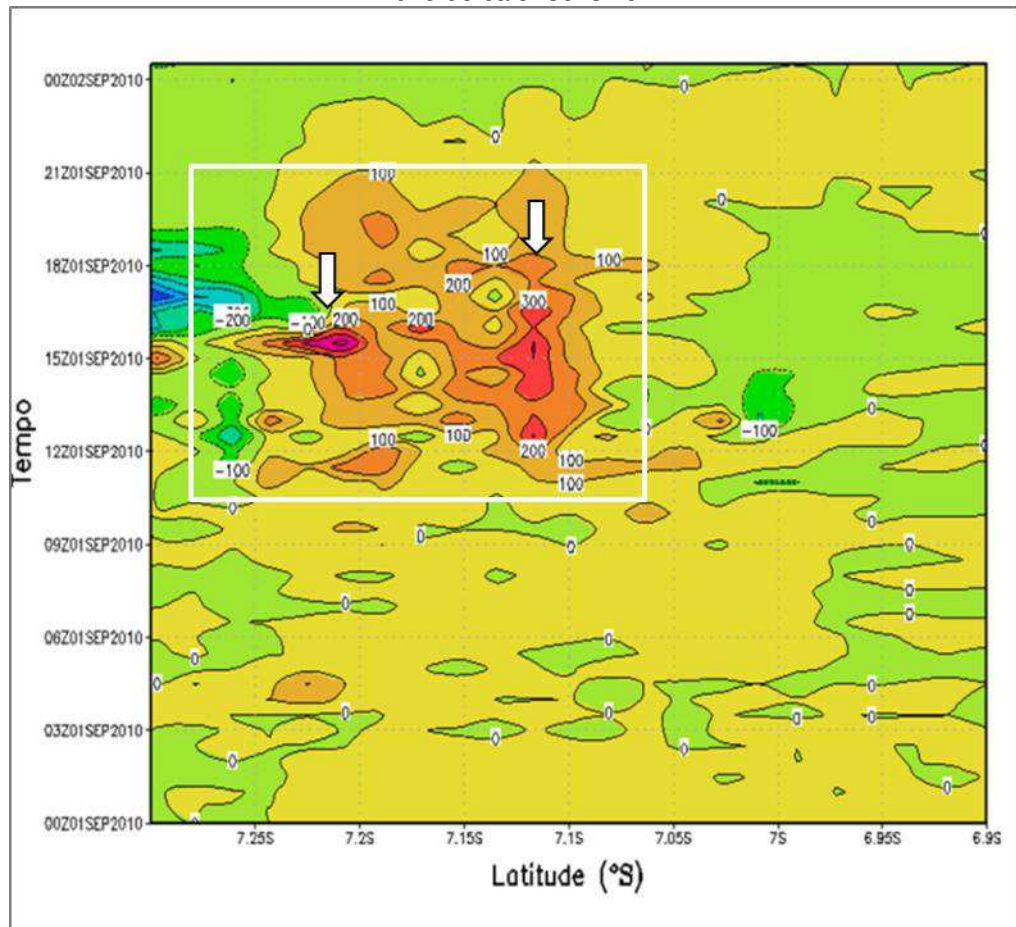
Figura 14 – Espacialização do albedo para a diferença entre os experimentos (TEB – STEB).



As variações de albedo nos experimentos se refletem nos fluxos de calor entre a superfície e a atmosfera. Os fluxos de calor sensível e de calor latente estão representados através de diagramas de Hovmöler, pela Figura 15 e pela Figura 16, e de gráficos de perfil diário, pela Figura 17 e Figura 18 respectivamente. A redução da umidade no solo das regiões urbanas, devido à impermeabilização da superfície e aos sistemas de drenagem, favorecem a diminuição do fluxo de calor latente e aumento do fluxo de calor sensível. As áreas destacadas na Figura e na Figura 16 delimitam o momento de maior contraste destas variáveis entre os experimentos para a RMJP. Nesta área, os maiores contrastes são evidenciados no período da tarde, onde a diferença no fluxo de calor sensível varia entre  $100\text{Wm}^{-2}$  e  $300\text{Wm}^{-2}$  para o experimento TEB. Para o fluxo de calor latente, esta diferença varia de  $100\text{Wm}^{-2}$  a  $500\text{Wm}^{-2}$  no experimento STEB.



Figura 15 - Diagramas de Hovmöler para a latitude de -34,885 e expressando os valores horários do fluxo de calor sensível.



O contraste existente entre a intensidade do fluxo de calor latente pode ser um indicador da concentração de vapor d'água na atmosfera. Além do calor latente, os perfis diários dos valores de umidade relativa e da razão de mistura, apresentado pela Figura 19 e pela Figura 20 respectivamente, podem ilustrar esta concentração. Ao longo do período diurno, os valores destas variáveis foram próximos para ambos os experimentos, as maiores diferenças podem ser percebidas no início do período noturno, no qual a concentração de vapor d'água para o experimento STEB é mais elevada.

Figura 16 - Diagramas de Hovmöler do fluxo de calor latente ao longo do eixo latitudinal para a diferença TEB - STEB.

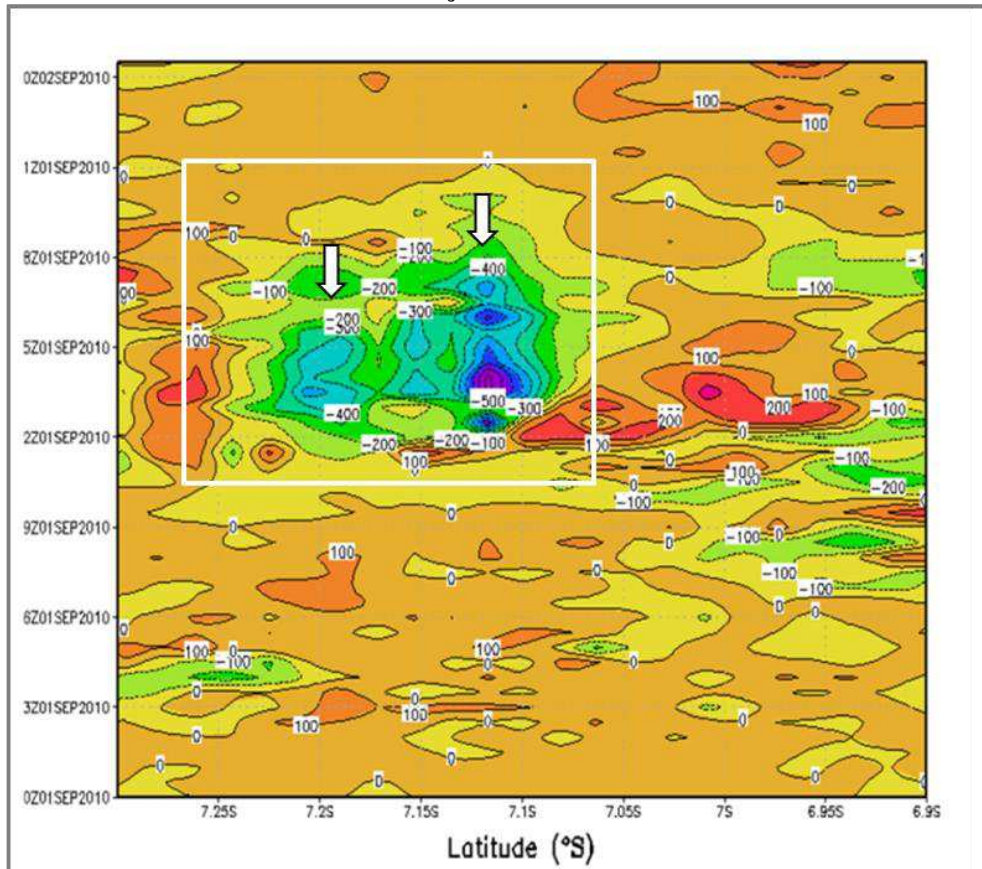


Figura 17 - Perfis diários de calor latente para os experimentos com o TEB ativado (linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).

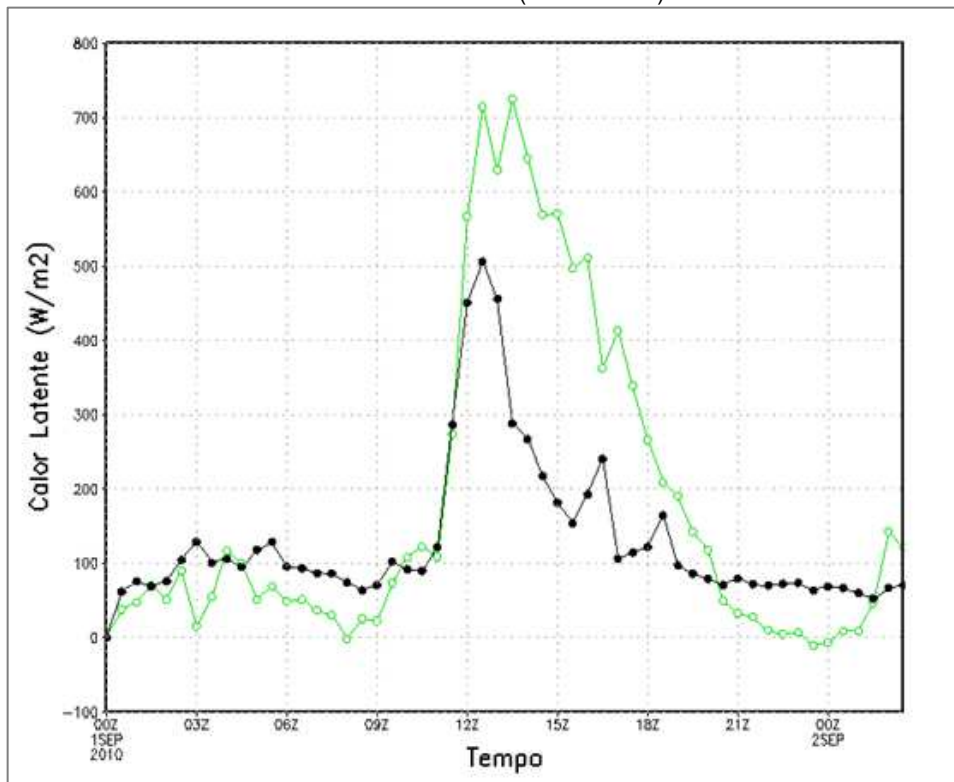


Figura 18 - Perfis diários de calor sensível para os experimentos com o TEB ativado (linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).

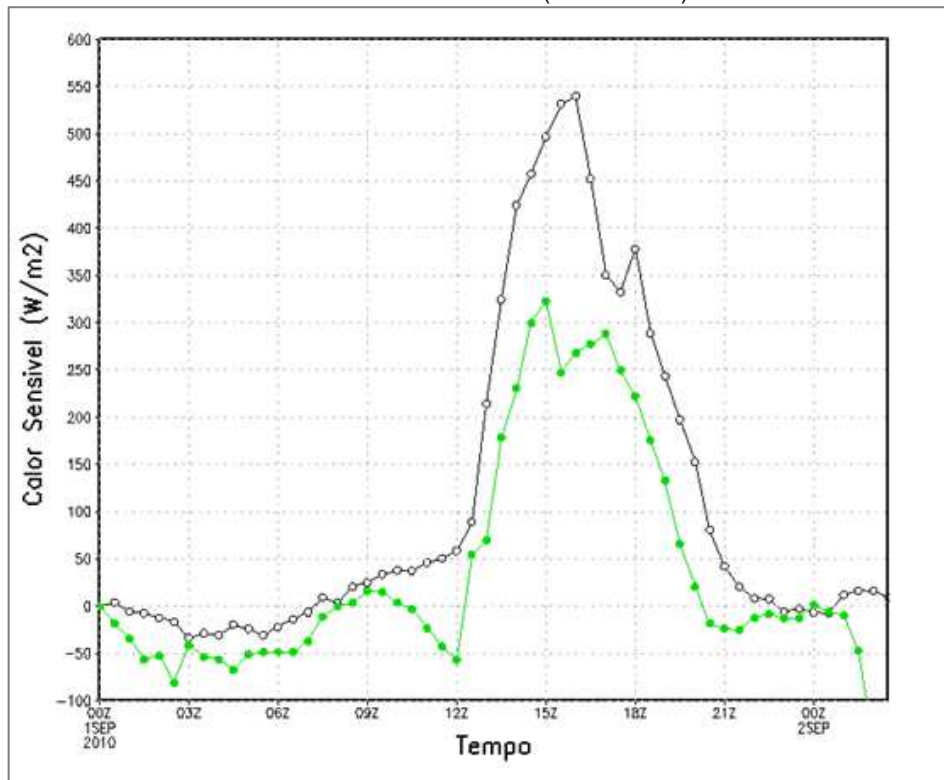


Figura 19 - Gráficos de umidade relativa para os experimentos com o TEB ativado (Linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).

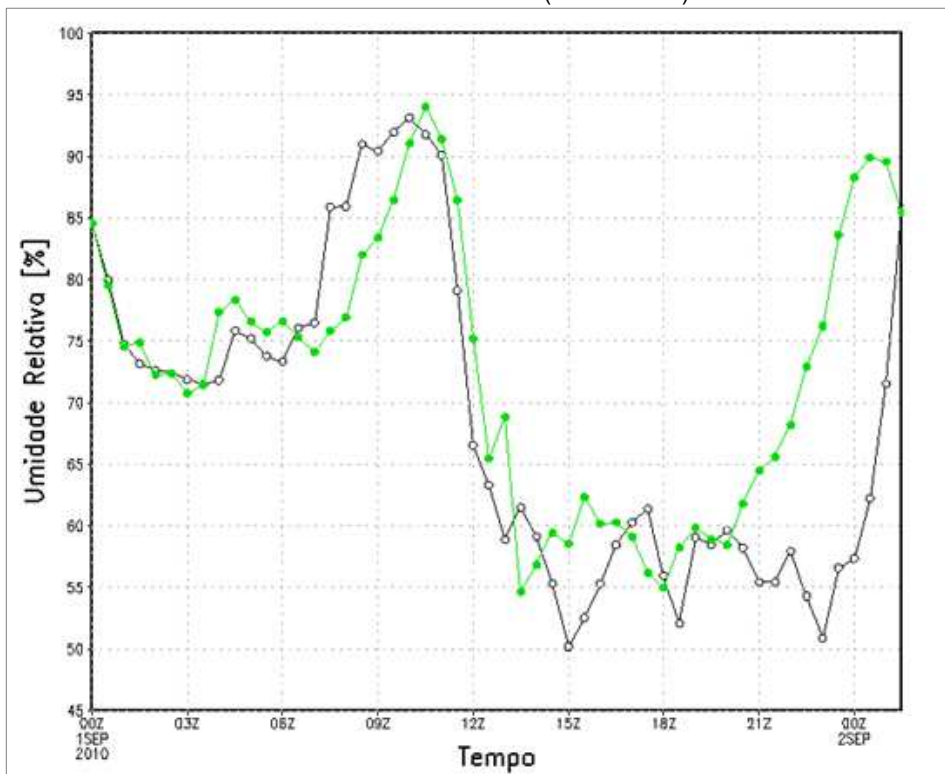
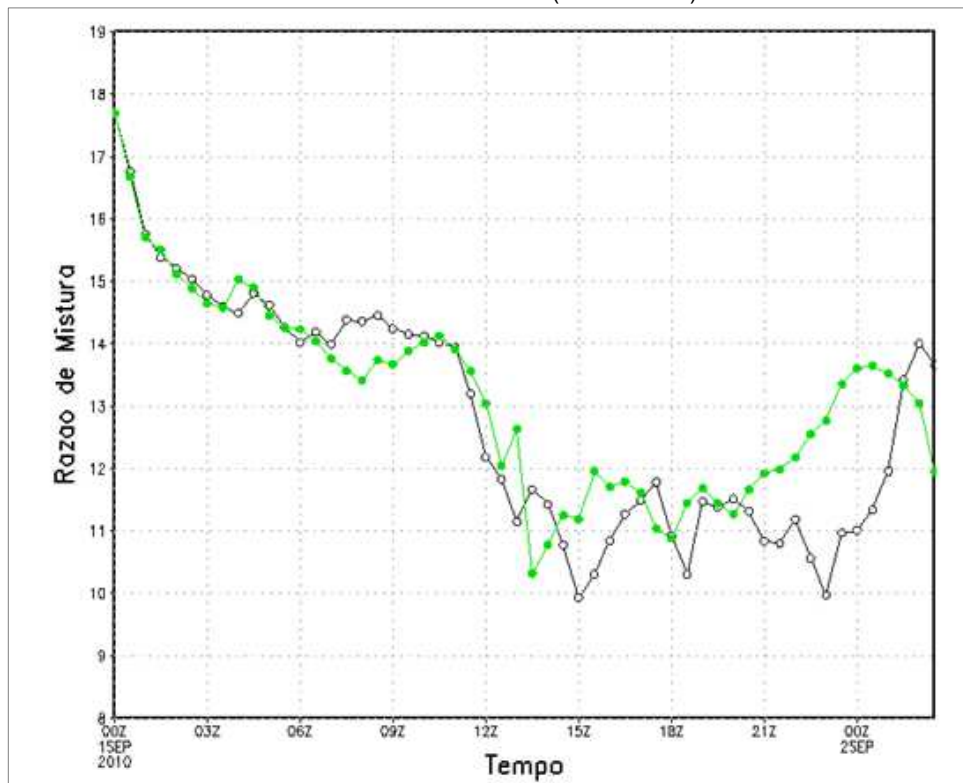


Figura 20 - Gráficos de razão de mistura para os experimentos com o TEB ativado (Linha preta) e com o TEB desativado (linha verde).



O fluxo de calor sensível na RMJP apresentados se reflete na distribuição da temperatura do ar, dado que a atmosfera é fortemente aquecida pelo calor sensível entre a superfície e o ar adjacente. A diferença de temperatura entre os experimentos (TEB – STEB) é apresentada pela Figura 21. Percebe-se neste gráfico o contraste dos valores de temperatura entre a RMJP e o seu entorno, nesta região, os valores de temperatura para o experimento TEB excede o STEB em até 4 graus. As maiores diferenças são evidenciadas nas regiões mais densas da RMJP: a ZAP e a Zona Sul.

O comportamento das componentes do vento varia principalmente devido às mudanças de pressão, densidade, topografia e rugosidade, dentre estas, as variáveis meteorológicas (pressão e densidade) se relacionam com a temperatura através da lei geral dos gases, que mostra a relação inversa entre a variação da temperatura e a pressão. Temperaturas do ar mais elevadas induzem a redução do campo da pressão atmosférica, enquanto o contrário leva a um aumento na pressão. Quanto às demais variáveis citadas (topografia e rugosidade), a topografia

permanece constante para os dois experimentos e a rugosidade é representada pelo  $z$  (comprimento de rugosidade) e varia de acordo com o tipo de superfície demarcada no mapa de ocupação.

A Figura 22 apresenta o diagrama de Hovmöller dos valores horários de vento zonal ao longo do eixo latitudinal para a diferença TEB – STEB, sabe-se que o deslocamento do vento se dá a partir das áreas de alta pressão para as áreas de baixa pressão e isso pode ser inferido pela comparação entre a Figura 21 e a Figura 22, onde nota-se que os maiores valores de temperatura para o experimento TEB coincidem com os maiores valores de velocidade do vento zonal para o mesmo experimento. As maiores variações são percebidas na RMJP entre os horários de 06h às 09h e entre 12h às 15h.

Figura 21 - Espacialização da temperatura para a diferença entre os experimentos (TEB – STEB).

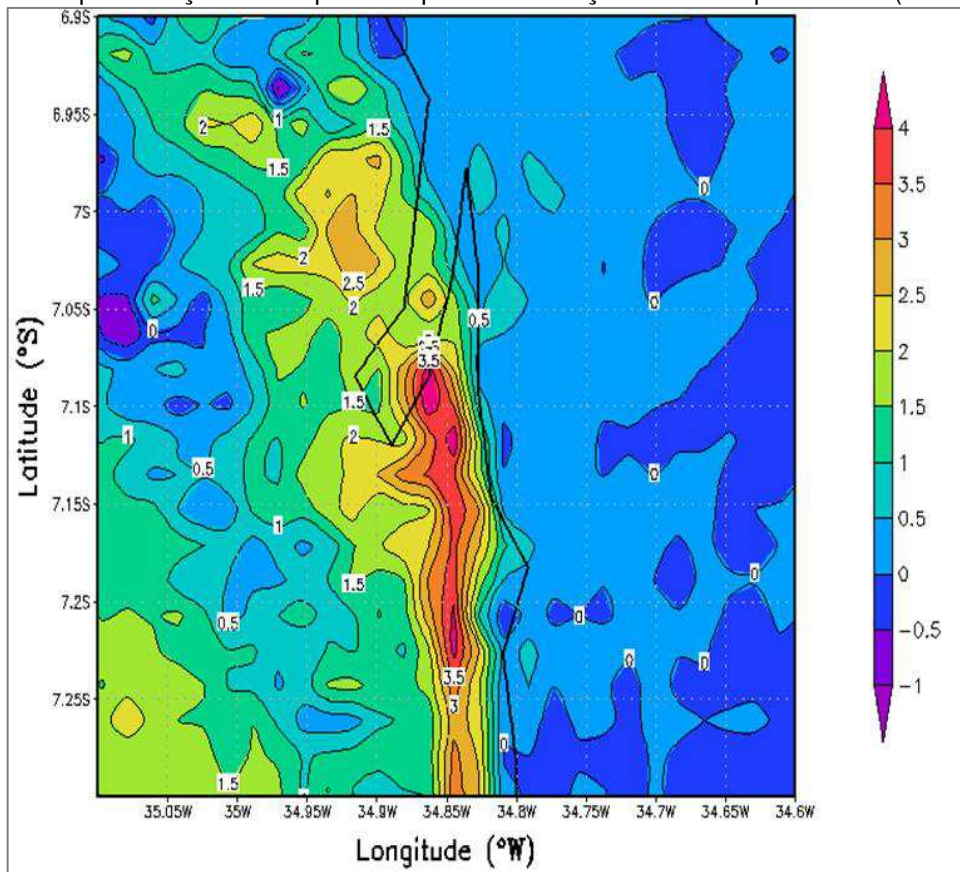
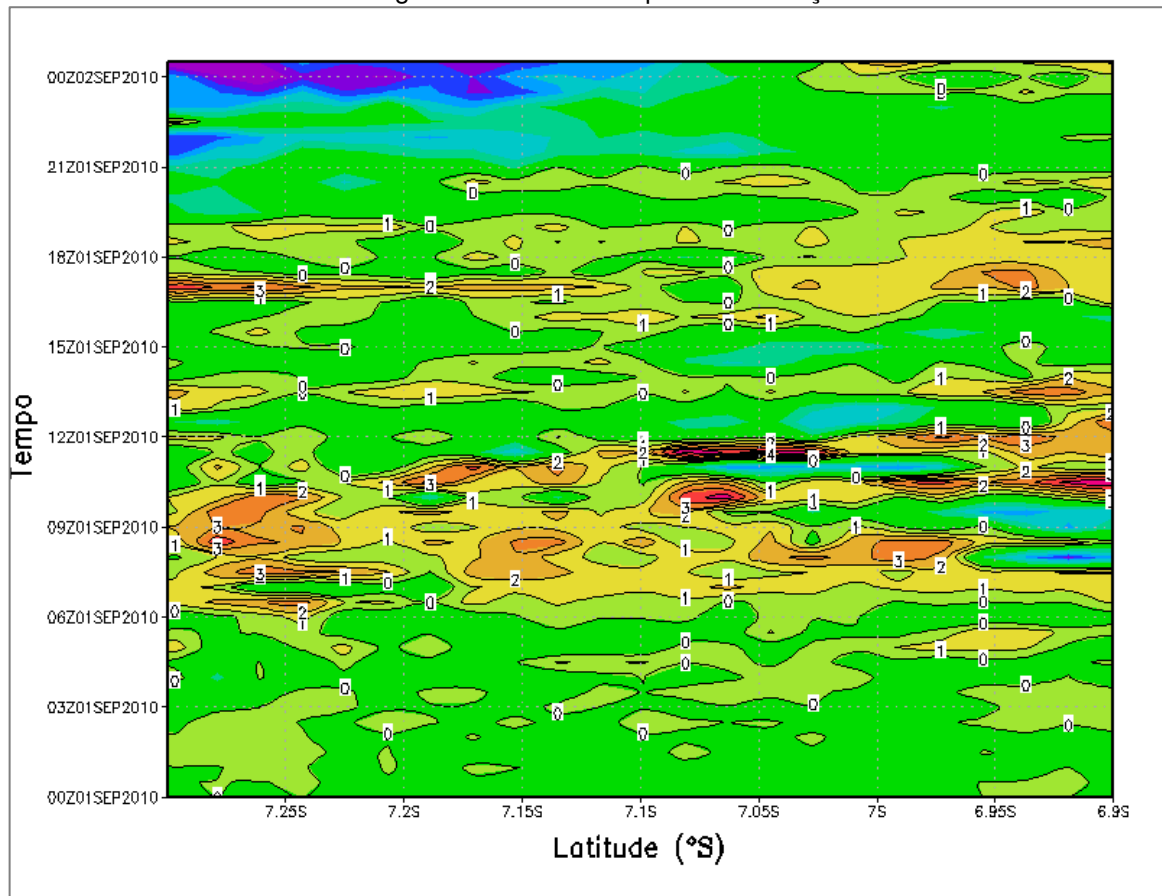


Figura 22 - Diagrama de Hovmöller para a latitude de -34,885 e expressando os valores horários de vento zonal ao longo do eixo latitudinal para a diferença TEB - STEB.



A Figura 23 mostra os perfis diários da direção do vento (a) e da velocidade do vento (b) para os experimentos TEB (linha preta) e STEB (linha verde). Os horários que registraram maiores picos de valores tanto para a velocidade quanto para a direção foram no início da manhã, aproximadamente 08h (11h UTC) e no início da noite, aproximadamente 18h (21h UTC), a variação da velocidade ao longo do perfil diário foi maior, registrando oscilações significativas ao longo do horário diurno. As maiores diferenças entre os experimentos podem ser verificadas a partir das 18h, na qual a direção para o experimento TEB varia de 120 a 200 graus, enquanto para o experimento STEB, esta variação é de 150 a 220 graus, este perfil indica um possível “atraso” temporal (aproximadamente duas horas) do experimento TEB em relação ao STEB. Para este mesmo horário a partir das 18h (horário local) a velocidade do vento também se diferencia entre os experimentos, sendo a intensidade do vento para o experimento TEB mais elevada. O efeito da brisa terrestre pode ser observado nos valores mais elevados em graus da direção do vento para o final do horário noturno, de 03h e 06h. Ao longo deste período, a

velocidade do vento decai de  $7,5\text{ms}^{-1}$  a  $2,5\text{ms}^{-1}$ . A brisa marítima é observada entre os horários de 09h e 18h (horário local), neste período, a intensidade do vento varia de  $8\text{ms}^{-1}$  a  $5\text{ms}^{-1}$  e a direção varia de 120 a 150 graus, que equivale a direção sudeste, a qual para a área de estudo, provém do Oceano Atlântico.

Figura 23 - Perfis diários da direção do vento para os experimentos TEB (linha preta) e STEB (linha verde).

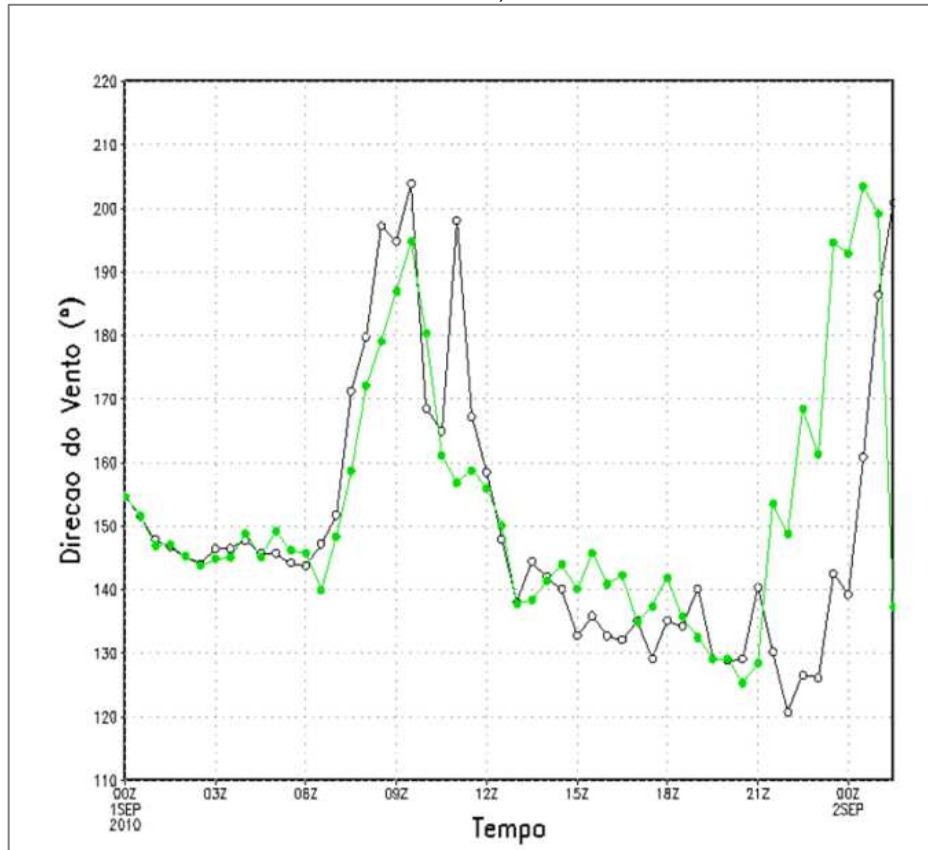
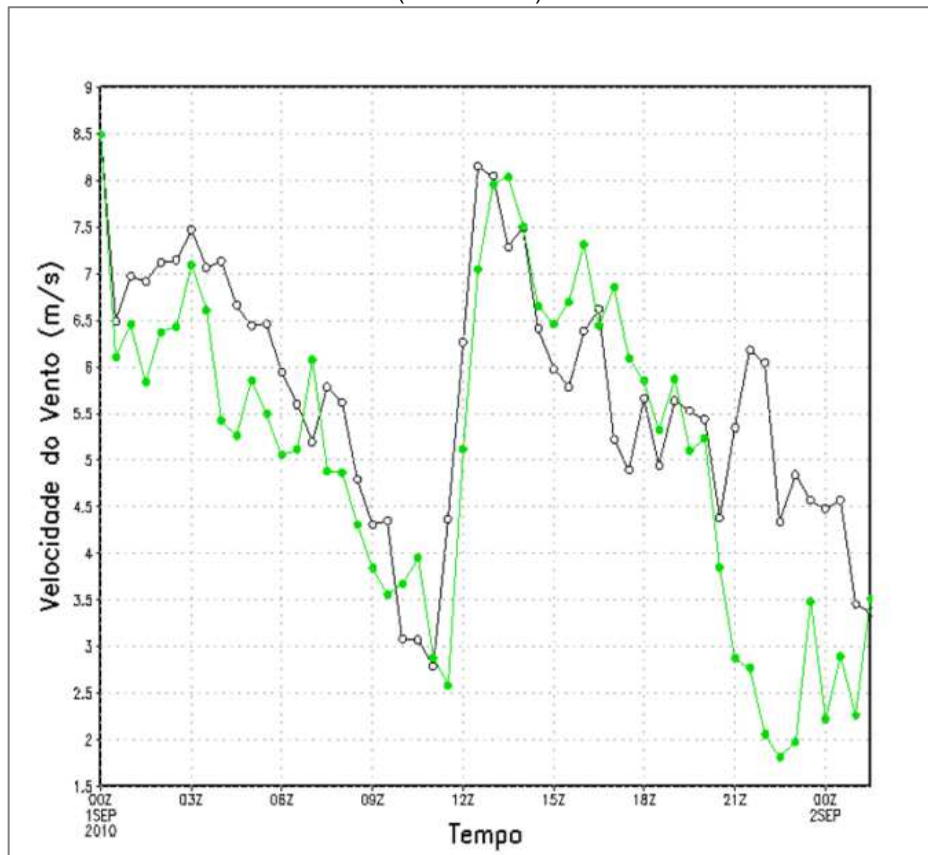


Figura 24 - Perfis diários da velocidade do vento para os experimentos TEB (linha preta) e STEB (linha verde).





### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve a importância de mostrar a influência do espaço construído na RMJP, ainda em uma fase de crescimento urbano “controlável”, sobre o comportamento das variáveis meteorológicas de modo a contribuir com embasamento teórico.

Foram analisados os processos de superfície relacionados às variáveis e condições meteorológicas através da aplicação da modelagem numérica. O modelo numérico utilizado foi o BRAMS, e a representação da cidade se deu a partir do acoplamento do esquema TEB neste modelo. Dois experimentos foram realizados, alternando a ativação do esquema TEB, deste modo, foi possível obter os valores do modelo considerando a influência da RMJP nas variáveis meteorológicas.

Os resultados obtidos sugerem que a influência da RMJP sobre o comportamento das variáveis apresenta o típico perfil da influência de regiões urbanizadas, as quais foram descritas por Oke (1978): i) Reemissão de radiação de onda longa pelos poluentes na atmosfera; ii) Menor perda da radiação de onda longa nas ruas devido à redução do *Sky View Fator*; iii) Maior absorção da radiação de ondas curtas devido à redução do albedo; iv) Alta estocagem de calor durante o dia devido às propriedades térmicas dos materiais urbanos e forte emissão de radiação durante a noite; v) Adição de calor devido às atividades antropogênicas; vi) Diminuição do fluxo de calor latente ou evapotranspiração, e aumento do calor sensível.

## 6 CONCLUSÃO

A partir da geração do mapa de cobertura da RMJP e, por conseguinte, dos experimentos realizados, pode-se concluir que:

- I. A RMJP influencia na variação dos fluxos radiativo: O albedo foi reduzido em cerca de 6%, assim como o albedo, o fluxo de calor latente foi reduzido em cerca de  $100\text{Wm}^{-2}$  a  $500\text{Wm}^{-2}$ , em contraste, o calor sensível apresentou um acréscimo de  $100\text{Wm}^{-2}$  e  $300\text{Wm}^{-2}$ .
- II. A espacialização dos fluxos radiativos na RMJP sugere que a presença da Mata do Buraquinho auxilia para atenuar o efeito da ilha de calor nesta região.
- III. Os valores de temperatura, em consonância com o calor sensível, foram mais elevados para o experimento TEB. As áreas da RMJP que apresentaram os maiores valores de temperatura foram a ZAP e a Zona Sul, as quais se destacam como as regiões mais adensadas da RMJP.
- IV. O fluxo de vento para o experimento TEB ao longo do perfil diário foi maior, sobretudo para as áreas que apresentaram os maiores acréscimos de temperatura para este experimento, o que indica uma possível relação entre o aumento do fluxo de vento, a redução no campo de pressão e o aumento da temperatura nestas áreas. As maiores diferenças entre os experimentos foram verificadas a partir das 18h, no qual a intensidade do vento é mais elevada para o experimento TEB e os valores, em grau, da direção do vento também aumentam neste período noturno, o que sugere uma maior presença da brisa terrestre.

### 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Deste modo, este é apenas um passo inicial para uma infinidade de possíveis pesquisas relacionadas tanto à aplicação de modelagem numérica aplicando o TEB, visto que ainda há carência de estudos neste contexto, quanto ao aprofundamento das pesquisas relacionadas à análise das variáveis meteorológicas na RMJP.

Em relação à modelagem numérica, é sugerido:

- Aplicar a metodologia descrita neste estudo para as demais regiões metropolitanas do nordeste brasileiro a fim de se obter um conhecimento meteorológico mais aprofundado desta região;
- Testar outras parametrizações de balanço de energia na metodologia descrita a fim de comparação de resultados.

Em relação aos estudos relacionados à RMJP, é sugerido:

- Aplicar a metodologia descrita com uma maior resolução espacial e temporal;
- Adicionar a metodologia descrita a de outros estudos aplicados na RMJP, como o de Peregrino (2005), Liése (2010) e Ribeiro (2013) a fim de enriquecer o conhecimento meteorológico desta região.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCOFORADO, M. J. **Aplicação da climatologia ao planeamento urbano. Alguns apontamentos.** Finisterra p. 83–94 , 1999.

ARAUJO, T. L. **Estudo Numérico da Interação Entre uma Região Urbanizada e a Convecção Rasa.** Tese de Doutorado – UFCG, 2010. 128 p.

ARNFIELD, J.; HERBERT, J. M.; JOHNSON, G. T. **A Numerical Simulation Investigation of Urban Canyon Energy Budget Variations,** in Proceedings of 2nd AMS Urban Environment Symposium, 1998.

BEST, M. J. **Representing urban areas within operational numerical weather prediction models.** Boundary-Layer Meteorology v. 114, n. 1, p. 91–109 , 1 jan. 2005. Acesso em: 3 mar. 2014.

BRASIL. Lei no 10.257, de 10 de julho de 2001. **Estatuto da Cidade e Legislação Correlata.** 2. ed., atual. Brasília : Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2002. 80 p.

CHEN, F.; COTTON, W. R. **A one-dimension simulation of the stratocumulus capped mixed layer.** Boundary- Layer Meteorology, vol. 25, p. 289-321, 1983.

DUPONT, S.; MESTAYER, P. G. **Parameterization of the Urban Energy Budget with the Submesoscale Soil Model.** Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 45, p. 1744-1765, 2006.

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes.** Tese de Doutorado – USP, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2003. 176 p.

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. **A new approach to parameterizing convection using ensemble and data assimilation techniques.** Geophysical Research Lettes, vol. 29. Art. Nº 1693, 2002.

GRIMMOND, C. S. B. **Progress in measuring and observing the urban atmosphere.** Theoretical and Applied Climatology v. 84, p. 3–22 , 2006.

GRIMMOND, C. S. B. **Progress in measuring and observing the urban atmosphere.** Theoretical and Applied Climatology, vol. 84, p. 3-22, 2006.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. **Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS)**. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 41, p. 792-810, 2002.

GRIMMOND, C. S. B.; SALMOND, J. A.; OKE, T. R.; et al. **Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum**. *Journal and Geophysical Research*, vol. 109, 2004.

JOHNSON, G. T.; OKE, T. R.; LYONS, T. J.; et al. **Simulation of Surface Urban Heat Islands under 'Ideal' Conditions at Night**. Part I: Theory and Tests Against Field Data, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 56, p. 275–294, 1991.

KARAM, Hugo Abi *et al.* **Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme**. *Theoretical and Applied Climatology* v. 101, n. 1-2, p. 109–120 , 1 jul. 2010. Acesso em: 4 mar. 2014.

KUO, H. L. **Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 31, p. 1232- 1240, 1974.

KUO, H. L. **On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat convection on large-scale flow**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 22, p. 40-63, 1965.

LOMBARDO, Magda Adelaide. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. [S.l.]: Editora Hucitec com apoio de Lalekla S.A. Comércio e Indústria, 1985. 240 p.

MASSON, Valéry. **A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models**. *Boundary-Layer Meteorology* v. 94, n. 3, p. 357–397 , 1 mar. 2000. Acesso em: 4 mar. 2014.

MELLOR, G.; YAMADA, T. **Desenvolvimento of a turbulence closure model for use in geophysical fluid problems**. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 20, p. 851-857, 1982.

MENUT, L. **Etude expérimentale et théorique de la couche limite Atmosphérique en agglomération Parisienne (Experimental and Theoretical Study of the ABL in Paris Area)**, Ph.D. Thesis, University Pierre et Marie Curie, Paris - France, 200p., 1997.

MILLS, G. M. **Simulation of the Energy Budget of an Urban Canyon-I. Model Structure and Sensitivity Test**, *Atmos. Environ.*, vol. 27b, p. 157–170, 1993.

MOLINARI, J.; CORSETTI, T. **Incorporation of cloud-scale and mesoscale downdrafts into a cumulus parameterization: Results of one-and three-dimensional integrations**. *Monthly Weather Review*, vol. 113, p. 485-501, 1985.

MOLINARI, John. A General Form of Kuo's Cumulus Parameterization. **Monthly Weather Review** v. 113, n. 8, p. 1411–1416 , ago. 1985. Acesso em: 4 mar. 2014.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Teoria e Clima Urbano**. [S.l.]: Universidade de S. Paulo, Instituto de Geografia, 1976. 192 p.

MOTA, Suetônio. **Urbanização e meio ambiente: Suetônio Mota**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental: ABES, 1999. 352 p. 9788570221339.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. [S.l.]: Methuen, 1978. 404 p. Offers a concise description of atmospheric layers sensitively pitched for the non-meteorological specialist in a variety of disciplines: in geography, agriculture, forestry, ecology, engineering, environment and planning.9780416705300.

OKE, T. R. **The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands**. *Atmosphere*, vol. 14, p. 268-277, 1976.

OKE, T. R. Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. **Energy and Buildings** n. 7, p. 1–10 , 1984.

OKE, T.R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere** v. 14, n. 4, p. 268–277 , 1976. Acesso em: 3 mar. 2014.

PEREGRINO, P. S. A. **Interrelações existentes entre os escoamentos de ventos e os padrões de ocupação do solo nos bairros do Cabo Branco e Tambaú/ João Pessoa - PB**. Dissertação de Mestrado – UFPB, Centro de Tecnologia, 2005. 169 p.

**Planetary Boundary-Layer Structure under Realistic Synoptic Conditions**, J. *Appl. Meteorology*, vol. 28, p. 760–781, 1989.

RIBEIRO, C. A. M. **Atualização e Aprofundamento do Mapa de Análises Climáticas do Município de João Pessoa - Paraíba**. João Pessoa: UFPB, 2013.

SHEPHERD, J. Marshall. **A Review of Current Investigations of Urban-Induced Rainfall and Recommendations for the Future**. Earth Interactions v. 9, n. 12, p. 1–27 , jul. 2005. Acesso em: 3 mar. 2014.

SOUZA, E. P. **Estudo teórico e numérico da relação entre convecção e superfície heterogêneas na região Amazônica**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade de São Paulo. 121f., 1999.

STEIN, U.; ALPERT, P. Factor Separation in Numerical Simulations. **Journal of the Atmospheric Sciences** v. 50, n. 14, p. 2107–2115 , jul. 1993. Acesso em: 4 mar. 2014.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. **New RAMS cloud microphysics parameterization. 1. The single-moment scheme**. Atmospheric Research, vol. 38 (14), p. 29-62, 1995.