UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS- FFLCH
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

HUGO ROGÉRIO DE BARROS

A relação entre a Ilha de Calor Urbana, o uso e cobertura do solo e o balanço de energia no município de São Paulo: avaliação do campo térmico nos parques públicos de lazer.

(Versão Corrigida)

São Paulo

2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS- FFLCH
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

A relação entre a Ilha de Calor Urbana, o uso e cobertura do solo e o balanço de energia no município de São Paulo: avaliação do campo térmico nos parques públicos de lazer.

HUGO ROGÉRIO DE BARROS

**Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Filosofia,
Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Doutor em Ciências.**

Orientadora Prof^a Dr^a. Magda Adelaide Lombardo

Co-orientador Prof Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Linha de Pesquisa: Paisagem e Planejamento Ambiental

Versão Corrigida

De acordo

Prfa Dra. Magda Adelaide Lombardo

São Paulo

2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

dB277r de Barros, Hugo Rogério
A relação entre a Ilha de Calor Urbana, o uso e cobertura do solo e o balanço de energia no município de São Paulo: avaliação do campo térmico nos parques públicos de lazer. / Hugo Rogério de Barros ; orientadora Magda Adelaide Lombardo. - São Paulo, 2016.
167 f.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.

1. Ilha de Calor Urbana. 2. Uso do Solo. 3. Balanço de Energia. 4. Sensoriamento Remoto. 5. São Paulo. I. Lombardo, Magda Adelaide, orient. II. Título.

ATA DE DEFESA

Aluno: 8135 - 8184928 - 1 / Página 1 de 1

ata de defesa pública de Tese do(a) Senhor(a) Hugo Rogério de Barros no Programa: Geografia (Geografia Física), do(a) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.

Aos 03 dias do mês de junho de 2016, no(a) Sala de Defesas realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Hugo Rogério de Barros, apresentada para a obtenção do título de Doutor intitulada:

"A relação entre Ilha de Calor Urbana, o uso e cobertura do solo e o balanço de energia no município de São Paulo: avaliação do campo térmico nos parques públicos de lazer"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Magda Adelaide Lombardo	Presidente	FFLCH - USP	Aprovado
Jose Bueno Conti	Titular	FFLCH - USP	Aprovado
Marcello Martinelli	Titular	FFLCH - USP	Aprovado
Jefferson Lordello Polizel	Titular	Docente Externo	Aprovado
Demóstenes Ferreira da Silva Filho	Titular	ESALQ - USP	Aprovado

Resultado Final: Aprovado

Parecer da Comissão Julgadora *

O trabalho é uma contribuição valiosa para o estudo da ilha de calor urbana em ambiente tropical, realizado com adequação metodológica e rigor conceitual, apresentando conclusões inéditas para o tema estudado. Recomenda-se a publicação, incorporando as sugestões da banca examinadora. Os profs. Jefferson Lordello Polizel e Demóstenes Ferreira da Silva Filho participaram por videoconferência.

Eu, Daiane Neres da Silva Daiane Neres da Silva, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as) examinadores. São Paulo, aos 03 dias do mês de junho de 2016.

Jose Bueno Conti
Jose Bueno Conti

Marcello Martinelli
Marcello Martinelli

Jefferson Lordello Polizel
Jefferson Lordello Polizel

Demóstenes Ferreira da Silva Filho
Demóstenes Ferreira da Silva Filho

Magda Adelaide Lombardo
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em 03/06/2016 e, portanto, o(a) aluno(a) faz jus ao título de Doutor em Ciências obtido no Programa Geografia (Geografia Física) - Área de concentração: Geografia Física.

Prof. Dr. Marcelo Cândido da Silva
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Prof. Dr. Marcelo Cândido da Silva
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha mãe
Celi Barbosa e a minha mestra
Magda Lombardo, pois sem elas
não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço do fundo do coração a minha orientadora Magda Adelaide Lombardo pelas grandes oportunidades profissionais e amizade que me acompanharam ao longo de todo trabalho, mas acima de tudo por ter acreditado, muito obrigado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto temático processo FAPESP 08/58161-1, “Assessment of Impacts and Vulnerability to Climate Change in Brazil and Strategies for Adaptation Options”, component 5: “Vulnerability of the Metropolitan Region of São Paulo to Climate Change” cujo principal pesquisador e coordenador é o Dr. José Antonio Marengo Orsini, CCST-INPE. Aos funcionários da secretaria da Pós-graduação em Geografia Física, em especial a Cida.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CEPTEC/INPE) pela disponibilização dos dados climáticos e das imagens de satélite. A Secretária Municipal de Habitação da Prefeitura de São Paulo e seu sistema de informações geográficas Habisp, pelas bases cartográficas e ortofocartas.

Ao meu Co-orientador Bernardo Barbosa da Silva da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por está sempre à disposição e pela imensurável ajuda na execução da pesquisa.

Ao professor José Bueno Conti do Departamento de Geografia da USP, pela especial avaliação e orientação acadêmica, por fazer parte da viabilidade desse sonho e especialmente por compartilhar o sentimento de cidadão e pensador do mundo tropical.

Os demais integrantes da banca examinadora: Marcelo Martinelli do Departamento de Geografia da USP, Demóstenes Ferreira da Silva Filho e Jefferson Lordello Polizel da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ).

A todos os professores que durante minha trajetória no doutorado através das disciplinas e vivências contribuíram para o amadurecimento do trabalho, são eles: Helena Ribeiro (FSP), Luís Venturi (FFLCH), Ailton Luchiari (FFLCH), Rita Ynoue (IAG), Fábio Gonçalves (IAG), Amauri Oliveira (IAG), Reinaldo Machado (FFLCH) e Maria Elisa (FFLCH). Em especial a Emerson Galvani (FFLCH) pelo embasamento em bioclimatologia e por ter me apresentado o universo da docência acadêmica. No mesmo caráter, a Lígia Barrozo (FFLCH) e Francisco Chiaravalloti (FSP) por terem me apresentado e aberto às portas do mundo da epidemiologia e saúde coletiva.

Ao Rogério Alves, técnico do Laboratório de Climatologia e Biogeografia do Departamento de Geografia da USP, por toda ajuda na obtenção dos dados. Ao Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP, Campus de Rio Claro SP, pelo suporte burocrático e estrutural.

Aos amigos da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, os do IAG e da Faculdade de Saúde Pública da USP, pelas agradáveis convivências que tornaram mais leve todo o percurso. Em especial a Aline Franco, Leila Limberger, Júlio Chiquetto, Willian Cabral e Priscila Ikefuti.

Aos professores da Universidade Federal de Pernambuco, Josiclêda Domiciano Galvêncio pelas primeiras oportunidades de atuação acadêmica que possibilitaram meu amadurecimento e Ranyére Nobrega da Silva meu orientador do trabalho de graduação.

A todos os amigos que fiz em São Paulo, por terem tornado minha vida mais leve, bela e rica, pelos grandes momentos de diversão e crescimento conjunto, muito obrigado. Em especial a Maira Mesquita, Giovana Moraes, Ana Russo, Ana Moraes Coelho, André Braga, toda família Garden Groove, Cahê Archer, Daniel Branco, Thiago Amarante e Amauri Filho.

A família Rogério, a minha mãe Celi Barbosa por todo apoio emocional essencial nessa jornada, ao meu pai José Carlos de Barros, aos meus tios em especial Paulo Borella, Marcelino Barbosa, Helson Cruz e meu padrasto Alexandre. Aos meus primos irmãos Helson, Gabriela, Marina, Natália, Rafa, Leonardo,

Marcelino, Mariana, Luciana, Laís, Manoella a minha irmã Isadora. As tias Suely, Célia, Simone, Cristina e minha avó Josefa. Em memória a Arlindo e Celino Barbosa.

Aos amigos que me deram as mais diversas ajudas profissionais: Sophia Branco, Rafaela Cruz, Paula Antunes, Célia Machado, Elvis Moreira, Bruna Jesus, Henrique Ferreira, Thiago Oliveira, Bethânia Queiroz e Amanda Fruehauf. Assim como minha médica Gilva da Silva por todo cuidado e atenção.

Aos antigos amigos por todo amor e companheirismo ao longo do processo Camila Teixeira e Pedro, Marília Correia, Pedro Santoro, Rose Amora, Lis Veras, Diogo Inojosa, Laura de Oliveira, Laelia Felix, Laura Dornelles, Dayvid Roberto, Bruno Cabus, Victor Giovanni, Bruno Mesquita, Nina Wikcs de Almeida, Ayla Alencar, Natasha Falcão, Natália Lacerda, Máira Brússi, Frederico Ferreira, Evio Lima, Renata Azambuja, Inah Ribeiro, Luiza Ramos e Chico Ludermi.

BARROS, H. R. **A Relação entre a Ilha de Calor Urbana, uso e cobertura do solo e o balanço de energia no município de São Paulo: avaliação do campo térmico nos parques públicos de lazer.** 2016. 167 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2016.

Resumo

A Ilha de Calor Urbana no município e Região Metropolitana de São Paulo foi estudada por uma série de autores da Geografia e Meteorologia através da aplicação de metodologias de estudos empíricos na avaliação do fenômeno. A vigente pesquisa apresenta uma nova metodologia na avaliação do campo térmico urbano e o conjunto de variáveis climáticas e antrópicas que o condicionam. Para tal foi realizado o seguinte teste de hipótese: a dinâmica territorial da Ilha de Calor Urbana corresponde às interações entre as condições sinóticas, uso e cobertura do solo e balanço de energia. Além desta, dentre os diversos objetivos específicos, o estudo contou com a avaliação do campo térmico dos parques públicos de lazer. Para tal foram utilizados os métodos descritivo, seguido do comparativo e análise integrada descritiva, aliados a uma simbiose entre aplicações de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Um total de nove imagens do satélite *Landsat-5* sensor TM no período de 2007 a 2011 foram utilizadas na geração de imagens termais, posteriormente estas foram vetorizadas e sobrepostas a padrões oficiais de uso do solo, também foram adotados índice de vegetação, fotografias aéreas, cartas e boletins sinóticos e dados de campo referentes à temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, direção e velocidade do vento, evaporação e radiação solar global. O modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) foi aplicado a três imagens do mapeador temático *Landsat-5* de diferentes datas, através do mesmo foram gerados mapas de albedo da superfície, saldo de radiação à superfície, fluxo de calor sensível e latente. Os resultados demonstraram a veracidade da hipótese, a conformação e dinâmica territorial da Ilha de Calor Urbana corresponderam a diferentes condições de tempos sinóticos, os quais determinaram o transporte de umidade do oceano para atmosfera continental e por seguinte transformaram o balanço de energia local. Foram verificados três diferentes padrões territoriais, em todos eles os padrões de uso do solo ligados a comércio e serviços, armazéns e indústrias que apresentaram índice de biomassa vegetal igual zero, obtiveram a melhor correlação espacial com o fenômeno. O cenário chamou atenção para a preservação e expansão do arboreto urbano, parques e unidades de conservação, visto que estes demonstraram ser a fonte para redução da temperatura da superfície urbana.

Palavras Chave: Ilha de Calor Urbana, Uso do solo, Balanço de Energia, Sensoriamento Remoto, São Paulo.

BARROS, H. R. **The Relationship between the Urban Heat Island, use and land cover and energy balance in São Paulo: evaluation of thermal field of public leisure parks.** 2016. 167 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2016.

Abstract

The Urban heat island in the city and metropolitan region of São Paulo has been studied by several authors in the areas of geography and Meteorology through the application of methodologies of empirical studies on the evaluation of the phenomenon. Our research presents a new methodology in the evaluation of the urban thermal field and the set of climatic and anthropogenic variables that influence it. To this end, the following hypothesis testing was conducted: the territorial dynamics of the urban heat island corresponds to the interactions between synoptic conditions, use and coverage of the soil and energy balance. Additionally, among several other specific objectives, the study was also preoccupied with the evaluation of the thermal field of public parks. For such purpose we applied the descriptive method, followed by the comparative method and descriptive integrated analysis, combined with a symbiosis between applications of remote sensing and GIS techniques. A total of nine satellite images Landsat-5 TM sensor in the period from 2007 to 2011 were used on thermal imaging, these were later vectorized and superimposed on official standards of land use. Other than that, vegetation index, air photographs, letters and synoptic bulletins and field data related to air temperature, relative humidity, precipitation, wind direction and speed, global solar radiation and evaporation were also adopted. The model SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) was applied to three thematic mapper images Landsat-5 from different dates; through these images were generated albedo maps from the surface, the surface radiation balance, sensible and latent heat flux. The results proved the hypothesis true, the conformation and territorial dynamics of the urban heat island corresponded to different conditions of synoptic climates, which determined the humidity transportation from the ocean into continental atmosphere and, consequently, transformed the balance of local energy. Three different territorial patterns were investigated; in all of them the land use patterns linked to trade and services, warehouses and industries that showed the index of plant biomass equal zero obtained the best spatial correlation with the phenomenon. The scenario drew attention to the preservation and expansion of the urban arboretum, parks and protected areas since these proved to be the source for the development of thermal environmental urban quality.

Keywords: Urban heat island, land use, Energy balance, Remote Sensing, São Paulo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Localização do Município de São Paulo.....	58
Figura 2. Fluxograma do processamento do saldo de radiação à superfície – R_n	68
Figura 3. Histograma do H para primeira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.....	84
Figura 4. Histograma do LE para a primeira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	84
Figura 5. Carta sinótica da superfície da Marinha do Brasil para a primeira data.	86
Figura 6. Mapa do Uso do solo e ICU dinâmica para a primeira data.	87
Figura 7. Mapa do Fluxo de Calor Sensível e ICU Dinâmica para a primeira data.	88
Figura 8. Mapa do Fluxo de Calor Latente e ICU dinâmica para a primeira data.	89
Figura 9. Histograma da segunda data para o H, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	91
Figura 10. Histograma do LE correspondente a segunda data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	91
Figura 11. Carta da Marinha à superfície para a segunda data.	93
Figura 12. Mapa da ICU dinâmica e o uso do solo para a segunda data.	94
Figura 13. Mapa do Fluxo de calor sensível e ICU dinâmica para a segunda data.....	95
Figura 14. Mapa do Fluxo de calor latente e ICU dinâmica para a segunda data.	96
Figura 15. Histograma do fluxo de H para a terceira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.....	98
Figura 16. Histograma do fluxo de LE para a terceira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	98
Figura 17. Carta sinótica da Marinha à superfície para a terceira data.	100
Figura 18. Mapa da ICU dinâmica e Uso do solo para a terceira data.	101
Figura 19. Mapa do fluxo de H e ICU dinâmica para a terceira data.	102
Figura 20. Mapa do fluxo de calor latente e ICU dinâmica para a terceira data.....	103
Figura 21. Carta sinótica da Marinha do Brasil à superfície para a quarta data.....	105

Figura 22. Mapa de ICU dinâmica e uso do solo do município de São Paulo para a quarta data.....	106
Figura 23. Carta sinótica da Marinha do Brasil à superfície para a passagem do sistema frontal.	108
Figura 24. Mapa da ICU dinâmica e uso do solo para quinta data.	109
Figura 25. Carta sinótica da Marinha do Brasil para a sexta data, registro da passagem de frente fria dias antes.....	111
Figura 26. Mapa de uso do solo e ICU dinâmica para a sexta data.....	112
Figura 27. Carta sinótica à superfície da Marinha do Brasil para sétima data.	114
Figura 28. Mapa de ICU dinâmica e uso do solo do município de São Paulo para a sétima data.....	115
Figura 29. Carta sinótica à superfície da Marinha do Brasil para a oitava data.	117
Figura 30. Mapa de ICU dinâmica e uso do solo no município de São Paulo para a oitava data.....	118
Figura 31. Mapa da ilha de calor forte e frescor para primeira situação sinótica.	121
Figura 32. Mapa da ICU forte e Ilha de Frescor para a segunda situação sinótica.	122
Figura 33. Mapa da Ilha de Frescor e Calor moderada para a terceira situação sinótica.....	123
Figura 34. Mapa para a data de passagem 24/10/2009 o qual demonstra o efeito do ar frio sobre os padrões de temperatura da superfície.....	124
Figura 35. Mapa da Temperatura da Superfície para o Município de São Paulo - SP.....	126
Figura 36. Mapa do Índice de Área Foliar do Município de São Paulo – SP.....	129
Figura 37. Mapa do índice de área foliar e a classificação termal do município de São Paulo – SP.....	133
Figura 38. Mapa do Uso do Solo e Classificação Termal do Município de São Paulo-SP ...	135
Figura 39. Histograma do albedo da superfície para o Parque Ibirapuera , eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	141
Figura 40 Histograma do albedo da superfície para o Parque Villa Lobos, , eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	141
Figura 41. Mapa do albedo da superfície para o parque Ibirapuera e Villa Lobos.....	142
Figura 42. Histograma dos valores de Rn para o Parque Villa Lobos, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	143

Figura 43. Histogram dos valores de R_n para o Ibirapuera, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	144
Figura 44. Mapa da relação entre cobertura do solo e R_n para os parques públicos Villa Lobos e Ibirapuera.	145
Figura 45. Histograma do H para o parque Villa Lobos, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.....	146
Figura 46. Histograma do H para o parque Ibirapuera, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	146
Figura 47. Mapa do H para o Parque Villa Lobos e Ibirapuera.	147
Figura 48. Histograma do Fluxo de calor latente para o parque Villa Lobos, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	148
Figura 49. Histograma do LE para parque Ibirapuera, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.	148
Figura 50. Mapa do fluxo de LE para o parque Ibirapuera e o Villa Lobos.	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Causas da Ilha de Calor Urbana (OKE ,1978. p.259)	26
Tabela 2 - Datas de passagem do <i>Landsat-5</i> adotadas no estudo	61
Tabela 3 - Padrões de classificação termal.	63
Tabela 4 - Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b maio/2003 abril/2007) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).	66
Tabela 5. Tabulação da Correlação entre a ICU forte, IAF e o uso do solo:	136
Tabela 6. Tabulação da Correlação entre a Ilha de Calor Moderada, IAF e uso do solo:	137
Tabela 7. Tabulação da Correlação entre a Ilha de Calor Urbana, IAF e o uso do solo.	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
hPA	Hecto Pascal
HMG	Hora Média de Greenwich
ICU	Ilha de Calor Urbana
IAF	Índice de Área Foliar
SAVI	Índice de Vegetação Ajustada ao Efeito do Solo
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.
TOA	Irradiâncias espectrais do topo da atmosfera
TM	Mapeador Temático
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MM5	Nonhydrostatic Pennsylvania State University-NCAR Mesoscale Model
GMAs	Poisson Generalized Additive Models
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PET	Temperatura Fisiologicamente Equivalente
UR	Umidade Relativa

LISTA SE SÍMBOLOS

$W.m^{-2}$	Watts por metro quadrado
ΔT	o cômputo da diferença de temperatura
$L_{\lambda i}$	radiância espectral
ND	número digital
a	radiância mínima
b	radiância máxima
$\rho_{\lambda i}$	reflectância monocromática
$k_{\lambda i}$	radiância espectral
d_r	o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol
$I_{sol,b}$	irradiância solar monocromática
$\Sigma I_{sol,b}$	somatória das irradiâncias
α	albedo corrigido para os efeitos atmosféricos
α_{toa}	albedo planetário
α_p	reflectância da atmosfera
τ_{sw}	transmissividade atmosférica
z	altitude de cada pixel
ρ_{IV}	banda do infravermelho próximo
ρ_v	banda do vermelho
ε_0	emissividade da banda larga
ε_{NB}	emissividade espectral da banda termal
T_s	temperatura da superfície
K_1, K_2	constantes de calibração da banda termal do <i>Landsat 5 – TM</i>

$R_{ol,emi}$	radiação de onda longa emitida pela superfície
σ	constante de Stefan-Boltzman
$R_{sol,inc}$	radiação de onda curta incidente
ε_a	emissividade atmosférica
R_n	saldo de radiação
$R_{s\downarrow}$	radiação de onda curta incidente
$R_{L\downarrow}$	radiação de onda longa incidente
$R_{L\uparrow}$	radiação de onda longa emitida
G	fluxo de calor no solo
H	fluxo de calor sensível
ρ	massa específica do ar
c_p	calor específico do ar a pressão constante
r_{ah}	resistência aerodinâmica
u_*	velocidade de fricção
k	constante de von Karman
u	velocidade do vento
z_{0m}	coeficiente de rugosidade local
LE	fluxo de calor latente
(m)	comprimento de Monin-Obukhov L
(ψ_m)	valor da correção da estabilidade para o transporte de momentum
(ψ_h)	valor da correção da estabilidade para o transporte de calor

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	19
Objetivo Geral.....	25
Objetivos Específicos	25
Hipótese.....	25
A ILHA DE CALOR URBANA E O UNIVERSO EM ANÁLISE	26
Revisão Bibliográfica.....	35
Principais Contribuições metodológicas.....	35
A Relação entre a Ilha de Calor Urbana e a Mortalidade	38
Mitigação da Ilha de Calor Urbana.....	42
Estudos de Caso de São Paulo.....	45
Apresentação e Discussão da Hipótese	52
MATERIAL E MÉTODOS	57
Caracterização da Área de Estudo.....	57
Etapas Técnicas do Modelo SEBAL	66
Balanço de Radiação	67
A DINÂMICA TERRITORIAL DA ILHA DE CALOR URBANA.....	82
Análise dos componentes da primeira data.....	82
Análise dos componentes da segunda data	90
Análise dos componentes da terceira data	97
Análise dos componentes da quarta data	104
Análise dos componentes da quinta data	107
Análise dos componentes da sexta data	110
Análise dos componentes da sétima data	113
Análise dos componentes da oitava data	116

A ILHA DE CALOR URBANA, O USO DO SOLO E A DISTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO	125
Temperatura da superfície.....	125
Índice de Área Foliar	127
Classificação Térmica.....	130
A Classificação Térmica e a Cobertura do Solo	132
A classificação térmica e o uso do solo.....	134
AVALIAÇÃO DO CAMPO TÉRMICO DOS PARQUES PÚBLICOS DE LAZER	139
Albedo da Superfície.....	141
Saldo de Radiação (Rn)	143
Fluxo de Calor Sensível (H).....	146
Fluxo de calor latente (LE).....	148
CONCLUSÕES.....	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

Introdução

A urbanização global é fruto do cenário do crescimento das populações urbanas, intensificado na segunda metade do século XX: no período de 1950 a 2011 houve uma quintuplicação da mesma, a qual representa na atualidade metade do total global (UN-HABITAT, 2011). O padrão organizacional e estrutural das sociedades urbanas tornou-as grandes fontes emissoras dos chamados Gases do Efeito Estufa. Como responsável principal está o elevado consumo de combustíveis fósseis na geração de energia elétrica para iluminação de edifícios, resfriamento e aquecimento de ambientes, produção industrial e transporte.

Alarmantes são as estimativas de rápida urbanização, pois se estima que entre 2010 e 2020, do total crescente da população mundial (766 milhões), 95% (690 milhões) residirá em áreas urbanas. E deste último número, 632 milhões correspondem ao acréscimo das populações urbanas de países em desenvolvimento. Além disso, também reponta preocupante a previsão de que entre os anos 2000 e 2030 a população dessas cidades duplicará e o tamanho das áreas edificadas será triplicado (UN-HABITAT, 2011).

As cidades pertencem a dois grupos dominantes que se distinguem por diferenças exorbitantes no impacto e na vulnerabilidade de suas populações, são esses grupos pertencentes a países desenvolvidos e em desenvolvimento. Aqueles possuem a menor concentração populacional e, no entanto, consomem a maior parte dos recursos extraídos e produzidos; ou seja: emitem taxas de gases muito superiores às de países em desenvolvimento. Estes, por seu turno, possuem a maior parte do contingente populacional sobre forte vulnerabilidade socioeconômica, o que torna suas áreas mais vulneráveis; além do mais, possuem profundos déficits de governança e infraestrutura social e apresentam tendências ao aumento dos assentamentos de risco, basta ver que entre os anos 2000 e 2010 ocorreu crescimento no número de moradores de favelas de 767 para 828 milhões, podendo esse número chegar a 889 milhões até 2020 (UN-HABITAT, 2011).

Existe uma discussão em andamento no âmbito das áreas urbanas que gira em torno da dicotomia entre o impacto das variabilidades climáticas nas cidades e o impacto das cidades nas variabilidades climáticas. De um lado, as cidades são consideradas as maiores fontes de calor e carbono antropogênico; do outro, a algumas áreas é atribuída maior vulnerabilidade devido à grande concentração populacional e os diversos problemas ambientais frutos de desarmônicas relações com o meio ambiente (GRIMMOND *et al*, 2010).

As cidades e suas configurações heterogêneas apresentam distintos padrões de edificações, habitações e espaços públicos; a formação e expansão dos mesmos com o contínuo processo de substituição das superfícies naturais por materiais artificiais e lançamento de gases e material particulado na atmosfera contribuem para sua degradação ambiental e mudança dos padrões climáticos locais (FERREIRA *et al*, 2010). As mesmas criam seus próprios climas devido ao impacto do desenvolvimento urbano no balanço de calor à superfície (OKE *et al*, 1999) e tal processo condiciona a formação do fenômeno da Ilha de Calor Urbana.

A Ilha de Calor Urbana (ICU), evento reconhecido há mais de um século, é o mais claro e o mais bem documentado exemplo de alteração de padrões climáticos provocado pela ação antrópica (OKE, 1978, pg. 254). Sua natureza complexa se relaciona com outros importantes problemas como poluição atmosférica, fortes precipitações com risco de inundações, alteração nas amplitudes térmicas, além da dinâmica de uso e cobertura do solo e outros conjuntos de variáveis como habitação e saúde pública.

O fenômeno manifesta-se em todas as latitudes, pois está presente em todas as grandes e megacidades. Se não a principal, é umas das problemáticas mais abordadas pelos climatologistas na atualidade. A sua intensidade varia de acordo com o tamanho e o adensamento populacional (OKE, 1973), mas o fator chave é a latitude, visto que esta determina diferenças na contribuição do calor antropogênico no balanço de energia. A avaliação de 150 cidades de diferentes países constatou a influência da posição geográfica em sua ampla variação, que vai desde 2°C, como em Lund-Suécia, até 12°C, como em Lipeck- Rússia (WINERT, 2001). Porém alguns

casos apresentam registros maiores, como na cidade de Atenas, na qual no período quente do verão a Ilha de Calor Urbana atingiu 18°C (MATZARASKI, 2001).

Os impactos para organização social e qualidade de vida são diversos e estão inter-relacionados com uma série de fenômenos, contudo alguns possuem relação direta com o aumento da temperatura de ambientes urbanos, como aponta Oke (1978), alteração do tempo biológico da flora e fauna presentes nos mesmos e o desconforto térmico ao transitar em vias públicas e espaços abertos das cidades, além das habitações e edificações em geral. O citado desconforto térmico proporciona um aumento no consumo energético com o uso de refrigeradores e sistemas de ventilação, o que por sua vez causa um impacto ambiental negativo devido à maior demanda por energia elétrica e a elevação dos custos econômicos na geração de bens e prestação de serviços.

Ao discutir os impactos negativos do fenômeno em seu lócus é de suma importância abordar diferenciadamente sua interferência na saúde pública, visto que a relação entre a temperatura ambiente e o bom funcionamento do corpo humano agrega multivariáveis e diversas hierarquias de abordagens sistêmicas.

Os extremos de temperatura, como as ondas de calor e de frio, são grandes desafios para a adaptação humana, tendo em vista que a espécie é homeoterma e necessita do bom funcionamento do seu sistema termorregulatório para sobreviver às trocas de energia com o meio. Esses eventos sobrecarregam os organismos humanos prejudicando o sistema cardiovascular e respiratório, principalmente naqueles mais frágeis, como os que apresentam quadros clínicos ligados aos mesmos, além dos idosos e crianças até quatro anos de idade, o que constitui um grupo de risco (WORLD HEALTH ORGANIZATION EUROPE, 2004).

Existe um potencial risco do aumento da taxa de mortalidade e também da mesma juntamente com a morbidade sobre um evento extremo de calor durante os meses de verão (DOLNEY *et al*, 2006; GOLDEN *et al*, 2008; MASTRANGELO *et al*, 2007; PENG *et al*, 2011). A Ilha de Calor Urbana amplia o estresse térmico e seu efeito adverso sobre a saúde humana, de forma que as populações urbanas são mais vulneráveis aos efeitos do calor (SMOYER *et al*, 2000). Estudos

epidemiológicos demonstram que o aumento exacerbado da temperatura provoca aumento da mortalidade nesses ambientes (BRAGA *et al*, 2001; STAFOGGIA *et al*, 2006).

Diante desse constante perigo ambiental é que algumas nações europeias e norte americanas desenvolveram sistemas de alerta ao calor, utilizando-se de índices termofisiológicos segundo diferentes critérios de escolha, onde o conhecimento científico sobre o clima urbano e seus impactos sociais foi incrementado às ações dos órgãos de defesa civil a fim de promover uma prevenção da morbidade e mortalidade relacionadas ao calor.

No tocante à produção do conhecimento sobre clima urbano existem dois grupos predominantes de cidades: o primeiro corresponde às de clima tropical com predominância no hemisfério Sul; o segundo as de latitudes médias e altas de clima temperado com predominância no hemisfério Norte. Existe uma grande desigualdade quantitativa e qualitativa do conhecimento produzido do segundo grupo em relação ao primeiro, de forma que o primeiro possui um conjunto reduzido de conhecimentos e com diversas limitações técnicas (ROTH, 2007), no entanto é o que possui grande parte de sua população sobre forte vulnerabilidade socioeconômica e apresenta sérios déficits de infraestruturas e governança.

Os diferentes processos de reprodução dos espaços urbanos nos países desenvolvidos que passaram por industrializações mais antigas, e os dos países em desenvolvimento cuja industrialização se deu, no geral, mais tardiamente ou ainda aqueles cuja economia não possui um segundo setor expressivo, reproduzem distintos mosaicos urbanos de uso e cobertura do solo, segundo as diferentes origens históricas, cultural e econômico nos processos de formação das cidades.

Acompanha a reprodução de regiões globais determinadas pelo desenvolvimento industrial, as zonas climáticas globais, segundo Conti (2004) a economia industrial, em larga escala, chegou aos trópicos tardiamente, em relação aos países da média latitude do hemisfério norte e com isso o surto de urbanização também veio depois. A explosão urbana da região tropical só ocorreu após a

Segunda Guerra Mundial, o que trouxe profundas transformações aos países das baixas latitudes.

A diferenciação do risco a problemas climáticos pautada em tais padrões é caracterizada de forma diferenciada nas metrópoles de países desenvolvidos e subdesenvolvidos, visto que nos últimos o déficit de habitação e saneamento básico aliado a problemas como o escoamento superficial de águas pluviais, ocupação de áreas com risco de deslizamento de barreiras e inundações além da baixa qualidade dos materiais construtivos, muito comum em habitações de baixo padrão, favorecem uma diferente e mais agressiva vulnerabilidade socioambiental de suas populações.

São novos os esforços na tentativa de aproximar tais leituras socioespaciais urbanas da perspectiva climática, a fim de contribuir com as ações e projetos do poder executivo. Stewart & Oke (2009) desenvolveram uma série de padrões de morfologias com expressivo impacto no campo térmico local, chamados de “zonas termais urbanas”, estas apresentam grande potencial de auxílio a pesquisadores em abordagens intraurbanas nos estudos do conforto térmico e possuem grande aplicação nas cidades do hemisfério norte dos países desenvolvidos. Por outro lado, Barros & Lombardo (2013) apresentaram a metodologia do “zoneamento climático urbano”, na tentativa de integrar os diversos canais de percepção do clima urbano, “Sistema Clima Urbano” – S.C.U (MONTEIRO, 1976), a principal ferramenta do planejamento urbano (zoneamento urbano), com foco na criação de um mecanismo de gestão a baixo custo para o poder executivo e a sociedade civil, com foco nas cidades dos países em desenvolvimento de clima tropical.

O quadro se intensifica nos estudos que relacionam temperatura e mortalidade, pois os mesmos estão concentrados nos países industrializados de clima temperado e pouco se sabe sobre esta relação em países em desenvolvimento de clima tropical (HASHIZUME *et al*, 2007; MCMICHAEL *et al*, 2008).

As relações tensas e desarmônicas entre a reprodução dos espaços urbanos e o equilíbrio ambiental com suas negativas consequências refletidas nas questões climáticas, as quais possuem grande potencial de exacerbar problemas de várias

ordens como os discutidos nesse texto, chamam atenção para a necessidade do desenvolvimento do conhecimento científico sobre uma perspectiva multidisciplinar e integrada. O tratamento do fenômeno da Ilha de Calor Urbana apresenta grande potencial, enquanto temática central da questão ambiental urbana, de produzir um amplo conjunto de conhecimentos com grande capacidade de contribuir para uma efetiva melhoria socioambiental dos espaços urbanos, principalmente nas zonas tropicais e subtropicais onde o mesmo é escasso.

A necessidade de uma abordagem bem aprimorada e eficiente, que atenda a demanda de um melhor entendimento do fenômeno de forma a possibilitar detalhadas leituras de seus possíveis impactos e o desenvolvimento de adaptações e mitigações tanto a nível governamental quanto por diferentes camadas sociais, é cada dia mais urgente, principalmente no mundo subdesenvolvido. Tal quadro apresenta-se como um novo desafio ao planejamento urbano, pois apesar do clima ser um importante elemento do ambiente urbano sua qualidade não é habitualmente levado em consideração neste e não existe qualquer legislação sobre o assunto (ALCOFORADO *et al*, 2006).

O município de São Paulo com 11.253.503 habitantes e uma área de 1.521 km², possui densidade demográfica de 7.898,2 hab/km² e uma frota de veículos equivalente a 6.390.092 (IBGE, 2010). Trata-se do maior aglomerado urbano e parque industrial da América do Sul e que enquanto megacidade caracteriza-se como um macrossistema industrial de um país em desenvolvimento.

O município vive cotidianos problemas atrelados a eventos de alta concentração de poluentes atmosféricos, inundações, ondas de frio e Ilhas de Calor Urbanas, aliados a um grande contingente populacional sobre alta vulnerabilidade socioeconômica e ambiental. Tal quadro é refletido na relação entre temperatura e mortalidade para o mesmo, onde o acréscimo de 1°C na temperatura média corresponde ao aumento de 3,46% para mortalidade geral e 3,26% para as cardiovasculares e respiratórias (MCMICHAEL *et al*, 2008).

Objetivo Geral

Avaliar a interação entre a Ilha de Calor Urbana, uso e cobertura do solo e balanço de energia no município de São Paulo-SP.

Objetivos Específicos

Avaliar a dinâmica territorial de Ilha de Calor Urbana no município de São Paulo, computada a partir de imagens termais do Landsat-5.

Avaliar a interação entre o balanço de energia e a dinâmica da Ilha de Calor Urbana no município de São Paulo-SP..

Avaliar a interação entre o uso e cobertura do solo e a conformação territorial da Ilha de Calor Urbana no município de São Paulo-SP.

Avaliar o campo térmico dos espaços públicos de lazer através da relação entre o balanço de energia e a cobertura do solo.

Hipótese

A dinâmica territorial da Ilha de Calor Urbana corresponde às interações entre as condições sinóticas, uso e cobertura do solo e os componentes do balanço de energia.

A Ilha de Calor Urbana e o Universo em Análise

A Ilha de Calor Urbana é caracterizada pela diferença no gradiente de temperatura entre as áreas rurais e urbanas; o tamanho deste fenômeno varia no tempo e no espaço como resultado das características meteorológicas e urbanas locais (OKE, 1978). A mesma existe devido à maior retenção de calor por materiais como concreto e asfalto, onipresente nas cidades, em comparação com a menor retenção das vegetações, cobertura abundante nos arredores urbanos (ROSENTHAL *et al*, 2008). O fenômeno possui um conjunto amplo de causas. Ver tabela 1.

Tabela 1 ■ Causas da Ilha de Calor Urbana (OKE ,1978. p.259)

1. Aumento da re-radiação devido à absorção e re-emissão das ondas longas de reflexão pela atmosfera urbana poluída.2. Diminuição da perda de radiação, em ondas longas, dos corredores entre edifícios, por causa da redução do fator de visão do céu.3. Maior absorção da radiação de ondas curtas por causa dos efeitos da geometria urbana no albedo.4. Maior armazenamento de calor durante o dia devido às propriedades térmicas dos materiais urbanos e sua reflexão noturna.5. Calor Antropogênico.6. Diminuição da evaporação devido à remoção da vegetação e impermeabilização das superfícies na cidade, ausência de corpos de água.7. Diminuição da perda de calor sensível devido à redução da velocidade do vento na camada de ar compreendida até o dossel urbano.

Os avanços tecnológicos que a ciência vivenciou na segunda metade do século XX proporcionaram o aprimoramento técnico e o emprego deste no desenvolvimento metodológico como as estações móveis e os sensores termais do sensoriamento remoto. No entanto, o desenvolvimento de metodologias que abranjam tanto a detecção da Ilha de Calor com um elevado grau de análise empírica quanto à compreensão da mesma com a identificação de possíveis variáveis, as quais possam determinar sua dimensão espacial, permanece um vigente desafio.

A abordagem da problemática não apresentou mudanças estruturais significativas nas ultimas décadas, de modo que as proposições e considerações que Oke (1982) levantou há mais de três décadas sobre as dificuldades para o estado insatisfatório deste campo ainda persistem, são elas:

1. A complexidade inerente do sistema cidade-atmosfera. O estado da atmosfera é uma resposta às trocas de energia, massa e movimento que cobre um grande intervalo de escalas espaciais e temporais. Em áreas urbanas, fontes e sorvedouros dessas trocas são distribuídos heterogeneamente e envolvem fatores antrópicos e naturais;

2. A falta de clareza conceitual e teórica para a pesquisa.

3. O custo e as dificuldades de observações urbanas, visto que é intrínseco ao fenômeno da variabilidade espacial e temporal, o que por sua vez causa um problema de amostragem. Além das restrições referentes aos sistemas de observações como torres, balões, aviões e radiossondagens.

A complexidade das interações cidade-atmosfera seguida da falta de esquemas conceituais e teóricos, fazem parte de uma única conjuntura onde a primeira proposição feita pelo autor justifica a segunda.

Os elementos atmosféricos, principalmente aqueles que caracterizam a dinâmica temporal do clima regional, possuem natureza dinâmica e sujeita a constantes variabilidades. Os elementos físicos antrópicos, materiais que compõe o mosaico das estruturas espaciais urbanas, a depender da característica de formação

histórica-social e conjuntura territorial, apresentam grande potencial de diversidade espacial expressa nas densidades de construção, organização espacial das mesmas, materiais construtivos, morfologia e diferentes percentuais de áreas verdes por habitantes com distintos arranjos espaciais.

Todas as variáveis meteorológicas e suas interações com as diversas estruturas urbanas derivam em diferentes processos de troca de energia entre a superfície e a baixa atmosfera, o que possibilita a criação de um mosaico de microclimas locais, os quais só são amenizados com a entrada de muita energia provinda da atmosfera, como a passagem de uma frente fria. Dessa maneira, quanto mais heterogêneos forem os processos energéticos urbanos, maior será a expressão da Ilha de Calor Urbana.

A formulação de estruturas conceituais e teóricas pode auxiliar na diminuição das análises separatistas, onde a espacialidade e variabilidade dos elementos atmosféricos são analisadas sem especificar a interferência das variáveis antrópicas em suas oscilações. Por outro lado, o fenômeno, de natureza complexa, estabelece relações e correlações com um conjunto diverso de fatores, pois está inserido na discussão mais ampla do clima urbano.

A abordagem conceitual sistêmica do clima local, ou uma teórica com base nesta, tende a estabelecer um conjunto lógico de relações lineares e de dependência entre as variáveis, obedecendo ao princípio físico de causa e efeito. A entrada costuma ser a radiação eletromagnética, que aliada a processos atmosféricos e intervenções antrópicas de uso do solo, apresenta saídas em problemáticas climáticas como extremos de precipitação, poluição atmosférica e o desconforto térmico, essas compõem o quadro das relações ecológicas de epidemiologia e caracterizam grandes desafios para as organizações estruturais urbanas.

A formulação dessas bases conceituais possui grande relevância pedagógica na formação de pesquisadores devido aos artifícios de análise simplificarem o entendimento dos fenômenos de forma individualizada. Contudo a utilização de tais artifícios como base teórica para pesquisa científica reforça a super especialização e

fragmentação de um conhecimento de natureza extremamente dinâmica e complexa, o que diminui as possibilidades na eficiência da resolução dos mesmos, através da aplicação de um conhecimento pouco integrado.

O grau de urbanização presente nas grandes e megacidades no século XXI e as atividades cotidianas da sociedade do automóvel possibilitam uma grande variedade de trocas e transporte de energia com a atmosfera urbana e regional. Estas possibilitam a atuação conjunta de diversas problemáticas em um dado espaço-tempo, o que permite uma interação entre as mesmas, resultando em intensificações ou amenização de algumas delas.

A produção do calor antropogênico, a emissão de gases e Material Particulado, as dinâmicas de transformação de uso e cobertura do solo, os sistemas de alerta de saúde e a defesas civis que aos poucos incrementam as questões ambientais climáticas, compõem o diverso leque de elementos antrópicos do clima urbano. O atual cenário antrópico leva à reflexão de que em um sistema ambiental urbano os esquemas de bases quantitativas e físicas não abrangem a totalidade das relações, pois as relações políticas, econômicas e culturais locais, regionais e/ou globais, são elementos fundamentais cujo direcionamento do conjunto de variáveis apresentadas acima está condicionado.

O clima urbano não aparenta ter uma estrutura com começo, meio e fim, ou entrada e saída bem delimitadas. Os estudos de caso de São Paulo podem exemplificar tal afirmação.

Azevedo (2001) verificou que a produção de calor antropogênico gerado na Região Metropolitana de São Paulo é significativa diante da radiação solar global ao nível do solo acumulada durante um ano.

Ferreira *et al* (2010) estimaram as variações diurnas, sazonais e anuais do fluxo de energia antropogênica da cidade de São Paulo. Foi utilizado o método de inventário de energia com base nas contribuições de fontes veiculares, estacionárias e da produção de energia pelo metabolismo da população humana da cidade no período de 2004 a 2007. As fontes veiculares corresponderam a aproximadamente 50%, as estacionárias e metabolismo humano representaram cerca de 41% e 9% do

fluxo de energia antropogênica, respectivamente. A variação diurna do calor veicular correspondeu às horas de tráfego intenso e as mesmas estão fortemente delimitadas pelo sistema de rodízio vigente no município. Os valores anuais do fluxo de calor antropogênico correspondem aproximadamente 11% do valor anual do saldo de radiação à superfície, variando em 9% em dezembro a 15% em junho. O seu valor máximo atinge a ordem de 20 W.m^{-2} .

Nobre *et al* (2011) avaliaram a temperatura do ar e precipitação da Região Metropolitana de São Paulo para o século XX, verificaram o aumento de 2°C na temperatura média, seguido do aumento da precipitação acumulada em 395mm acompanhada de tempestades típicas de verão, extremos de chuvas acima de 50mm/dia e precipitação convectiva (tempestades associadas a nuvens tipo Cumulo nimbo), sobre a área urbana ou a sota-vento desta, além da diminuição da umidade relativa em 7%. Os motivos das alterações foram às mudanças de uso da terra e o processo de urbanização que apresentaram acréscimos de áreas com muito concreto e pouco verde, de forma a proporcionar a forte atuação do fenômeno da Ilha de Calor Urbana.

Araújo *et al* (2015) avaliaram a associação entre as características da Ilha de Calor Urbana e a ocorrência da febre de dengue no município de São Paulo, sobre um período de dois anos (2010-2011), a fim de identificar fatores que podem favorecer a transmissão de dengue. Os resultados revelaram que a temperatura da superfície teve um gigantesco impacto na incidência de dengue em São Paulo, o que confirma a hipótese de que altas temperaturas provindas da Ilha de Calor Urbana favorece a proliferação do *Aedes Aegypti*, além de aumentar a alimentação de sangue o que leva ao agravamento da incidência.

Ribeiro (2005) avaliou a relação entre a poluição termal urbana e a mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias no município de São Paulo. A autora verificou que há relação entre o alto risco de morte por doenças cardiovasculares e respiratórias em áreas onde a intensidade da Ilha de Calor Urbana é forte.

Son *et al* (2015) investigaram o efeito do calor, frio e ondas de calor na mortalidade geral, respiratória e cardiovascular no município de São Paulo dentro de um período de 14.5 anos (1996 – 2010), para diferentes grupos sociais divididos por sexo, idade, nível de educação, estado civil e local de morte. Foi revelado que o calor afeta mais a mortalidade respiratória do que a cardiovascular, o crescimento de temperaturas quentes elevou a mortalidade em 6.1%. O frio gerou aumento na mortalidade entre 8.8% e 12.2%, o efeito do frio foi maior para a mortalidade cardiovascular do que as demais. As ondas de calor apresentaram aumento de 5.8% na mortalidade quando comparada aos períodos de normalidade térmica, estas afetaram mais a mortalidade por problemas respiratórios do que as demais. Tanto as temperaturas altas quanto as baixas são associadas ao aumento da mortalidade, embora o frio tenha um efeito mais forte do que calor.

A emissão de poluentes atmosféricos, dentre as diversas interferências antrópicas, é o principal fator que modifica diretamente o equilíbrio de outros sistemas, como o da superfície-atmosfera e o do corpo humano (respiratório). Há evidências de que a poluição atmosférica em São Paulo altera as condições do clima local.

Codato *et al* (2008) comparou os valores diários e horários da radiação solar global e difusa na superfície para as cidades de São Paulo e Botucatu. Ao avaliar situações de céu claro chegou-se à conclusão de que nessas condições São Paulo (área de predomínio urbano) recebeu 7,8% menos irradiância global em agosto e 5,1% a menos em junho em relação a Botucatu (área de predomínio rural). No que se refere à irradiância difusa, São Paulo recebeu em dias de céu claro 3,6% a mais em agosto e 15,6% em junho do que Botucatu. As diferenças estão relacionadas com a distância do Oceano Atlântico, a penetração sistemática da brisa do mar durante o dia e principalmente evolução dos níveis do Material Particulado, visto que o poluente em suspensão na atmosfera urbana atenua a radiação urbana espalhando-a de volta para o espaço.

Barbaro *et al* (2010), ao estimar os padrões de emissão de onda longa atmosférica na cidade de São Paulo, avaliou o impacto da poluição atmosférica nos mesmos, especialmente o Aerosol. O efeito do material particulado na atmosfera

demonstrou estar relacionado à diminuição da radiação de onda longa atmosférica. A análise dos Aerosóis, em condições de céu claro, indica que durante o inverno estes absorvem a radiação, o que permite concluir que os mesmos interferem nas trocas energéticas da atmosfera urbana do município.

As implicações da poluição atmosférica para a população exposta a padrões de alta concentração são muito danosas e estão associadas ao aumento da morbidade e mortalidade, principalmente no grupo de risco.

Saldiva *et al* (1995) avaliaram a relação entre a poluição atmosférica e a mortalidade diária para a população de idosos (+65 anos) para a Região Metropolitana de São Paulo. As relações entre um conjunto diversas partículas respiráveis em suspensão, como o material particulado (PM_{10}), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e monóxido de carbono (CO) e suas altas concentrações com a mortalidade de idosos revelaram-se relevantes. Os autores reportaram que a cada $100\mu g/m^3$, em 24h de concentração, de Material Particulado (MP10) houve o acréscimo de 8,17 mortes por dia, que representa 13% da mortalidade diária.

Martins *et al* (2002) verificaram o efeito da poluição atmosférica nos atendimentos de idosos por pneumonia ou gripe, foi desenvolvido estudo ecológico de séries temporais para o período de 1996 a 1998, utilizando dados de um hospital-escola de referência em São Paulo. Foi verificado que o aumento no nível de SO_2 em $15,05\mu g/m^3$ provocaria um acréscimo de 14,51% no atendimento por pneumonia ou gripe em idosos; já para o O_3 , a diferença de $38,80\mu g/m^3$, provocaria um acréscimo de 8,07% nos atendimentos por pneumonia ou gripe em idosos.

O rápido e desordenado crescimento da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP – a partir da Segunda Guerra Mundial levou à instalação de indústrias de grande porte e o contínuo crescimento do número de veículos. Na década de 1960 e 70 há registros de episódios agudos de poluição do ar que levaram a população ao pânico e os serviços médicos de emergência ficaram lotados. A partir da metade da década de 70 foi iniciado o monitoramento da qualidade do ar. Desde então, alguns projetos, os quais se destinam ao controle de emissão de poluentes derivados das

indústrias e veículos, como “Operação Inverno”, foram implementados no intuito de regular as emissões (CETESB, 2014).

Os resultados demonstram que a produção do fluxo de calor antropogênico é um importante componente do balanço de energia à superfície; o mesmo varia sazonalmente e diariamente de acordo com o ritmo das atividades culturais ligadas à organização da sociedade em questão.

As diferentes composições espaciais urbanas de acordo com as necessidades dos modos de produção e de diversas atividades culturais é a base primária que permite a formação de uma Ilha de Calor Urbana, esta por sua vez altera os padrões de precipitação, pois aumenta as chuvas torrenciais e tempestades típicas de verão o que pode acarretar em inundações e alagamentos. Por outro lado as precipitações aumentam o fluxo de calor latente e diminuem o fluxo de calor sensível o que ameniza o efeito da Ilha de Calor Urbana. No entanto, a intensidade da Ilha de Calor demonstrou ser um fator significativo para o aumento da incidência de dengue, além de favorecer o aumento da mortalidade por problemas respiratórios e cardiovasculares.

A principal componente de um sistema climático é à entrada da radiação eletromagnética; a mesma, segundo o estudo, é alterada em diferentes parâmetros nas áreas urbanas em relação às rurais devido a uma confluência de variáveis – dentre elas a concentração de poluentes atmosféricos. Essa concentração é ofensiva à saúde humana e causa aumento dos casos de mortalidade e morbidade, o que leva o governo a implantação de programas a fim de reduzir as emissões.

A redução da emissão dos poluentes atmosféricos indiretamente vai alterar a entrada de energia na superfície, o fluxo de calor antropogênico visto que as fontes veiculares correspondem a um grande montante destes, o saldo de radiação à superfície e as respostas na morbidade e mortalidade as quais estão relacionadas a efeitos climáticos, além de influenciar na intensificação da Ilha de Calor Urbana.

A identificação das relações afirma a importância da agregação dos componentes culturais, sociais e econômicos dos espaços urbanos nas estruturas conceituais e teóricas, as quais são utilizadas e desenvolvidas com o intuito de

proporcionar clareza e uma subsequente eficiência no desenvolvimento metodológico das abordagens empíricas referentes às problemáticas do clima urbano.

Outro importante ponto é o custo e dificuldade na elaboração de metodologias com alta eficiência de medição e identificação dos componentes, os quais determinam sua variabilidade espacial e temporal, estas continuam vigentes como os principais entraves para difusão e aprimoramento das pesquisas sobre o campo térmico urbano. Os sistemas de observação requerem altos investimentos financeiros, o que restringe suas possibilidades de uso quantitativo e qualitativo, além de desprivilegiar as economias emergentes e subdesenvolvidas cuja necessidade de entendimento local de tais relações é demasiada.

O sensoriamento remoto e os satélites AVHRR - NOAA e a série TM- *Landsat* possibilitaram uma maior difusão dos estudos espaço - temporais do fenômeno, pois os mesmos possuem abrangência de cobertura global e através dos acordos de cooperação entre diversos institutos de pesquisa ao redor do mundo puderam disponibilizar seus produtos gratuitamente. No entanto, possuem restrições referentes à cobertura de nuvens, resolução espacial e intervalo temporal do imageamento, o que não possibilita uma avaliação precisa da variabilidade tanto diurna quanto sazonal.

Um importante avanço foi o desenvolvimento de algumas metodologias e modelos que incorporam o uso de sensores remotos para estimativas de importantes variáveis meteorológicas como o *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL), o qual foi desenvolvido por Bastiassen (1995) no intuito de estimar em escalas regionais o balanço de energia à superfície e a evapotranspiração real diária, o que permitiu uma detalhada análise espacial de diversos componentes meteorológicos. O mesmo foi aplicado ao estudo de caso do município de São Paulo na determinação do balanço de energia da superfície (BARROS & LOMBARDO, 2013). Outra metodologia com características semelhantes foi aplicada a Região Metropolitana de São Paulo por Machado & Azevedo (2007).

Seus resultados, combinados aos procedimentos dos sistemas de informações geográficas (SIG), os quais possuem versões de *software* livres em diferentes idiomas, oferecem grande potencial de proporcionar uma efetiva avaliação do impacto dos diversos padrões de reproduções espaciais humanas e suas consequências nas trocas de energia entre a superfície e a atmosfera urbana, além de suas características e dinâmicas espaciais, todas realizadas a baixo custo.

Revisão Bibliográfica

Principais Contribuições metodológicas

Uma das mais completas investigações da ICU no nível do dossel para uma cidade de clima equatorial foi o realizado por Chow & Roth (2006). Os autores avaliaram a dinâmica temporal da Ilha de Calor Urbana na cidade-estado de Singapura. Foram documentadas as variações diurnas e sazonais da intensidade dessas no período de um ano em diferentes domínios de morfologias urbanas a fim de identificar possíveis formações de microclimas ligados às diferenças de uso do solo. Para tal foram selecionados quatro diferentes unidades, uma representativa do ambiente comercial do centro urbano e outras três de domínio residencial diferenciadas pela altura das construções: maior do que 150 m, entre 35 e 40 m e habitações baixas de 2 a 3 andares do ambiente urbano e um quinta estação localizada no ambiente rural. Para cada unidade foram analisados dados horários de temperatura, velocidade e direção do vento, precipitação, cobertura de nuvens e o saldo de radiação.

Chow & Roth (op.cit.) a intensidade máxima da ICU foi localizada no centro comercial e seu maior registro foi de 7,07 °C durante o mês de maio. As demais unidades não apresentaram intensidades significativas e os resultados apresentaram comportamento semelhante para todas as condições meteorológicas. A máxima intensidade correspondeu ao intervalo de maio a agosto associados à estação de monção sudeste, enquanto que as mínimas corresponderam ao período de dezembro a janeiro, estação das monções úmidas de nordeste.

Chow & Roth (op.cit.) a relação entre a geometria de canyon urbano e intensidade ICU não expressou grande relevância; a combinação de fatores ligados ao uso do solo como o calor antropogênico, quantidade de espaços verdes e distância de corpos d'água explicam as diferenças de intensidade entre os padrões de uso. A velocidade do vento aparentou pouca relação com a intensidade da ICU para condições de céu claro. Os elementos da constituição local do uso e cobertura do solo demonstraram maior impacto na diferença da intensidade intraurbana do fenômeno em relação às condições meteorológicas.

Gaffin *et al* (2008) analisaram a evolução, variação e distribuição espacial das Ilhas de Calor Urbanas na área metropolitana de Nova Iorque. Para tal foram comparadas, anualmente, as médias de temperaturas entre as zonas urbanas e não urbanas como um parâmetro computacional simples para a ICU. Registros históricos dos dados da estação do Central Park foram comparados a outras 23 distribuídas entre ambientes suburbanos e rurais, com distâncias variando entre 50 a 150 km do centro e intervalo temporal entre 1900 a 2000. A análise da velocidade do vento foi executada para o Central Park, no intervalo de 1929 a 2006, para os meses de março e setembro, pois esses dois são o de maior e menor velocidade ao longo do ano, respectivamente. Valores horários no intervalo de 1988 a 2004 do Central Park e outras oito estações também foram avaliados para estipular sua variação intraurbana e sazonal.

Gaffin *et al* (op.cit.) a análise temporal dos dados demonstraram um aumento na temperatura média da Ilha de Calor Urbana. A mesma aumentou sua intensidade em 0,5°C. A temperatura média do Central Park acompanhou a tendência de aumento ao registrar acréscimo de 1,5°C, o qual foi menor do que o registrado para o restante das áreas urbanas cujo aumento foi de 3,5°C. O aumento da ICU foi associado à diminuição do fator de visão do céu ao redor do Central Park, devido a construções de edifícios com demasiada altura no seu entorno. A mesma não estabeleceu relação com o crescimento populacional – o qual registrou queda durante o período na Ilha de Manhattan. Diagnosticou-se que a ICU foi responsável por 33% do aquecimento da cidade enquanto que 66% foram atribuídos à variação regional do aquecimento global. As curvas horárias mostram que a mesma é mais

forte nas estações do verão e outono e mais fraca na primavera, o que estabelece relação com as velocidades médias dos ventos medidos pelas estações.

Ganeshan *et al* (2013) investigaram o impacto da Ilha de Calor Urbana sobre a formação de anomalias de precipitação nas cidades estadunidenses. Para execução de tal estudo foram utilizadas as bases nacionais de uso do solo e classificação supervisionada de imagem, a fim de identificar as relevantes manchas urbanas do território nacional. Modelos de mesoescala foram adotados com grade de resolução média de 5 km. Neles foram acopladas as variáveis climáticas de temperatura do ar e do ponto de orvalho, e a cobertura de nuvens, a fim de identificar anomalias de temperatura correspondentes às ICU. Aliado a esses foram sobrepostos os padrões de precipitação. Cartas sinóticas de pressão atmosférica e ventos, próximas da superfície, foram avaliadas no intuito de identificar influências meteorológicas.

Ganeshan *et al* (op.cit.) A partir da conjuntura dos dados foi estabelecido um coeficiente de correlação para anomalias de temperaturas noturnas com os demais parâmetros. Com base nesse, dentre de 28 áreas urbanas identificadas foram selecionados 23 municípios para o estudo de estabelecimento da relação proposta. O período de análise para o mesmo correspondeu aos meses de verão dos anos de 2006 e 2007. O estudo identificou o aumento da precipitação induzida pela atuação da Ilha de Calor Urbana para as chuvas estacionárias no sul do país. Para as outras regiões a mesma estabeleceu relação com as tempestades associadas com frentes, sistemas de baixa pressão, calhas de escoamento, limites e linhas de instabilidade.

Ganeshan *et al* (op.cit.) a análise de tendência diurna revelou que para as cidades interioranas a ICU é o mecanismo predominante do aumento da precipitação na direção do vento, enquanto que para as cidades litorâneas a interação do fenômeno com as brisas marítimas pode produzir aumento significativo da precipitação. As anomalias noturnas de temperatura para as cidades do interior são tão importantes quanto às diurnas, visto que estas estão associadas às tempestades de propagação, com consequente aumento na precipitação. As tempestades de propagação apresentaram avanço para as áreas urbanas devido ao

efeito da ICU. A mesma interação com a circulação em mesoescala, o que leva a anomalias de precipitação positivas com extremos de precipitação mais frequentes sobre as áreas urbanas.

A Relação entre a Ilha de Calor Urbana e a Mortalidade

A complexidade do fenômeno da Ilha de Calor Urbana e inquietações subsequentes perante a necessidade de avaliação de seus reais impactos na qualidade de vida humana levou a uma abordagem na dimensão das relações ecológicas da epidemiologia, as quais se lançaram no desafio de entender seus impactos para a saúde coletiva. O principal enfoque foi dado ao estabelecimento da relação da mesma com a mortalidade, a qual é uma variável de extrema complexidade para todas as dimensões do entendimento humano.

Buechley *et al* (1972) apresentaram um trabalho inovador ao levantar o seguinte questionamento: “ilhas de calor = ilhas de morte?”. Os autores estabeleceram a primeira relação entre a Ilha de Calor Urbana e a taxa de mortalidade para a Região Metropolitana de Nova Iorque. O intervalo temporal foi de 1962 a 1966 e ênfase especial foi dada ao período de 1 a 7 de julho de 1966, pois houve a ocorrência de uma forte onda de calor. Durante a mesma, foram diagnosticado excesso de mortalidade correspondente a 6% acima do limiar, ou 200 mortes, quando comparada a mortalidade da área da ICU com seus arredores rurais e suburbanos. Tanto as maiores temperaturas quanto o maior número de mortes convergiram para as áreas de maior adensamento populacional, o que segundo os mesmos foi considerado uma simples mensuração urbana.

Smargiassi *et al* (2009) avaliaram os efeitos do microclima de Ilha de Calor Urbana na mortalidade para o município de Montreal durante os meses de verão. Para atingir tal objetivo foram combinados os métodos de caso controle, funções de bases cúbicas e regressão logística condicional. A relação climática foi avaliada através da combinação de dados médios da temperatura do ar máxima e média de uma estação localizada no aeroporto com imagens térmicas dos satélites Landsat-5 e 7 sensor TM. Aliada a estes, a poluição atmosférica representada pela máxima e média concentração diária de ozônio foi analisada como fator de confusão.

Smargiassi *et al* (op.cit.) A variável socioeconômica foi analisada utilizando os valores financeiros dos códigos postais das habitações. A mortalidade, segundo o critério de causas não acidentais, foi dividida em cardiovascular, respiratória e as demais, de acordo com local de morte e idade. As seguintes relações foram estabelecidas: pessoas que vivem em áreas com formação de ICU possuem maior risco de morte durante os dias quentes de verão. Foi verificada uma relação não linear entre a temperatura média e a mortalidade. Tal relação é evidenciada quando analisadas as mortes ocorridas em residências, o que revela uma rápida resposta da mortalidade relacionada à temperatura.

Tan J *et al* (2010) realizaram um estudo do clima urbano onde foi avaliada a relação da ICU com a variação das ondas de calor, atrelado a resposta destas na mortalidade para a área metropolitana de Xangai, na China. Para a análise climática foram utilizados dados de temperatura máxima e média para os meses de verão das onze estações meteorológicas espalhadas entre áreas urbanas, suburbanas e rurais, em um intervalo temporal de 30 anos. A classificação da onda de calor foi estabelecida segundo o seguinte critério: um dia quente corresponde à temperatura máxima acima de 35°C, de forma que a onda de calor correspondeu ao conjunto de três dias quentes consecutivos ou mais. Atrelado a esses dados de mortalidade por todas as causas foram usados em regressão linear simples a fim de atingir o objetivo proposto.

Tan J *et al* (op.cit.) foi verificado que a atuação da ICU aumenta a quantidade de dias quentes, mas não a duração das ondas de calor. Estas ocorrem com maior duração e intensidade nas áreas urbanas em relação às demais. Consequentemente o excesso de mortalidade ligado ao calor é maior nas mesmas em relação às suburbanas e rurais, o que denota o efeito negativo da ilha de calor urbana para a saúde pública.

Gabriel & Endlicher (2011) avaliaram a relação entre ICU e mortalidade para a área urbana da região metropolitana de Berlim e as compararam com as de seus arredores rurais. Foram selecionados períodos e dias quentes através do conjunto de aplicação de diversos métodos estatísticos, regressão linear e do Índice de

Temperatura Percebida. A mortalidade analisada foi correspondente a todas as causas, e organizadas por critérios de idade e sexo.

Gabriel & Endlicher (op.cit.) a pesquisa revelou uma relação positiva entre o estresse térmico e a mortalidade para a área de estudo. Os meses quentes apresentam elevação na mortalidade em 10% em relação aos meses frios. Durante a atuação da Ilha de Calor Urbana a mortalidade pode crescer em até 151% em dias quentes e 41% para os demais períodos. Durante a onda de calor de 2006 as áreas urbanas apresentaram variação positiva de 34.2%, enquanto que os arredores rurais apresentou variação negativa de -26,3%, o que apresenta relação com a Ilha de Calor Urbana. Segundo os autores, seu efeito na mortalidade só pode ser devidamente detectado durante a atuação de uma onda de calor.

Burkart *et al* (2011) avaliaram o impacto das condições termais na mortalidade da área metropolitana de Bangladesch, na Índia. Para tanto, foram utilizadas a aplicação de análise de regressão e modelagem para avaliar a resposta de três diferentes índices de termofisiológicos nas taxas de mortalidade tanto para áreas urbanas quanto rurais. Dados diários de temperatura, umidade, velocidade do vento e cobertura de nuvens de 26 estações meteorológicas bem distribuídas foram utilizados em conjunto com os de mortalidade por todas as causas e cardiovascular no intervalo temporal de 2003 a 2007.

Burkart *et al* (op.cit.) o efeito do calor na mortalidade mostrou-se positivo nas áreas urbanas, tanto para todas as causas quanto para as cardiovasculares, enquanto que nas áreas rurais não foi verificada relação para ambos os casos. O estilo e qualidade de vida da população urbana local, aliada a seu baixo status socioeconômico, o que traduz uma baixa capacidade adaptativa, pode justificar a maior mortalidade por efeito do calor para estes ambientes.

Laaidi *et al* (2012) avaliaram o impacto da Ilha de Calor Urbana na mortalidade da cidade de Paris durante a ocorrência da onda de calor de 2003. Para avaliar o impacto da mesma em diferentes condições urbanas foi utilizado o método de caso controle. A abordagem climática contou com dados de temperatura mínima e máxima de duas estações meteorológicas. A primeira correspondente a uma área

urbana fortemente condensada e a segunda a um subúrbio com densidade e uso do solo misto, em conjunto com 61 imagens do satélite NOAA sensor AVHRR, para o período de atuação do fenômeno. O total das amostras correspondeu a 241 pessoas com mais de 65 anos, as quais morreram durante a atuação da onda de calor. Foi adotado o critério de todas as causas de morte, com exceção das acidentais, suicídio ou provenientes de complicações cirúrgicas. A isso foram acopladas as informações de idade, sexo e zona residencial. Foi estabelecida a seguinte relação: para indivíduos idosos a exposição à alta temperatura noturna, sobre vários dias, aumenta a probabilidade de mortalidade dos mesmos nos ambientes urbanos correspondentes a ICU.

Goggins *et al* (2012) examinaram a associação entre o calor e a mortalidade na área metropolitana de Hong Kong, na China, em áreas com diferentes graus de índice da Ilha de Calor Urbana, para os meses de verão no intervalo temporal de 2001 a 2009. O modelo Poisson Generalized Additive Models (GMAs) foi utilizado para modelar a associação entre variáveis meteorológicas e mortalidade. Variáveis como o índice de Temperatura Fisiologicamente Equivalente (PET), Índice de Ilha de Calor, morfologia e uso do solo, fator de visão do céu, índice de vegetação, mapa bioclimático e poluentes atmosféricos foram inter-relacionados na análise da relação com mortalidade por todas as causas e de mortes naturais, com exceção das cancerígenas.

Goggins *et al* (op.cit.) constatou-se um efeito forte das diferenças de velocidade do vento na intensidade da ICU e foi verificado o aumento do efeito da mesma na mortalidade natural nos ambientes de alta intensidade do fenômeno. Tal relação não foi identificada para os ambientes rurais.

Mitigação da Ilha de Calor Urbana

A Ilha de Calor Urbana, enquanto uma das expressões físicas do conjunto das relações desarmônicas entre o social e o meio físico, caracteriza-se como um indicador da degradação ambiental urbana. As consequências da mesma para a qualidade de vida e organização social chamam a atenção para a necessidade de uma transformação dos padrões de reprodução espaciais urbanos.

A cada dia torna-se mais relevante os esforços sociais e governamentais na tentativa de resolução desta. Um passo importante para que esse comportamento possa se disseminar é a produção de pesquisas na área de mitigação. Os trabalhos comentados em seguida revelam esforços que em seu conjunto integram um alto grau de criatividade e nível de conhecimento dos processos físicos na tentativa de desenvolver eficientes medidas de resolução.

A substituição de materiais construtivos com maior capacidade de absorção energética e posterior emissão de calor por materiais com alta capacidade de reflectância é uma possível mitigação quando abordada em mesoescala.

Synnefa *et al* (2008) investigaram os impactos da utilização de materiais que possuem a capacidade de ampliar o albedo de superfície e seus efeitos sobre a Ilha de Calor Urbana da cidade de Atenas, na Grécia. Simulações numéricas foram realizadas combinando uma versão para ambientes urbanos do *Nonhydrostatic Pennsylvania State University-NCAR Mesoscale Model* (MM5, versão 3-6-1) com informações de uso do solo, obtidas através da classificação supervisionada de uma imagem do mapeador temático satélite Landsat-5. Um primeiro cenário de aumento do albedo para 0,63 obteve redução da temperatura média em 1,5°C e um segundo com valor de 0,83 obteve redução da temperatura em 2,2°C, o que confirma a eficiência da substituição de materiais construtivos na mitigação dos fluxos de calor.

Lynn *et al* (2009) realizaram um estudo com semelhante metodologia para a área metropolitana de Nova Iorque. Foi utilizando um modelo de mesoescala a fim de avaliar o potencial de mitigação do efeito da ICU sobre o estresse de calor por radiação percebida pelo indivíduo, ao nível da rua, sobre o tempo de aquecimento

solar máximo (meio dia solar). Foram simulados dois tipos de mitigação: o primeiro foi o aumento do albedo das superfícies impermeáveis, o que causou maior estresse térmico ao nível da rua para o horário em questão, enquanto que a segunda proposta, que visou o aumento dos plantios de árvores, reduziu os efeitos adversos da ICU e amenizou as altas temperaturas ao meio-dia, o que possibilitou a redução do estresse térmico sobre os moradores da cidade e a diminuição do consumo energético. A mesma caracterizou-se como melhor estratégia mitigatória

Um integrador e inovador programa de redução da mortalidade relacionada ao calor foi proposto para a cidade da Filadélfia nos EUA. Objetiva-se aumentar o arboreto urbano e instalar telhados verdes como medida de mitigação a eventos extremos de calor, no intervalo temporal entre 2010 a 2049. Wiils *et al* (2009) avaliaram a possível eficiência do mesmo e constataram que sua implementação possui grande potencial de redução da mortalidade, a qual pode, em números representar entre 135 a 315 mortes a menos no intervalo entre 2020 e 2049, o que, além de uma grande melhoria da qualidade ambiental e de vida urbana, pouparia aos cofres públicos entre 0,74 e 1.690 bilhões de dólares americanos.

Sarkovich (2009) avaliou outro programa mitigatório do governo municipal da cidade de Sacramento, Califórnia – USA, o qual utilizou telhados com alto potencial reflectivo e o sombreamento de árvores como estratégia para mitigar a ICU no período do verão, com vista na redução do consumo energético e no enriquecimento ambiental urbano. As duas medidas propostas apresentaram resultados positivos na redução de produção de calor com impacto direto na redução do consumo energético, porém o sombreamento por arborização apresenta um impacto quantitativo mais relevante. Os dois fatores e seu real potencial dependem de uma série de questões das condições internas e estruturais das edificações e da localização e dimensão das medidas em relação aos ambientes construídos.

Os telhados verdes marcam uma nova postura de reprodução das edificações ao repensar a utilidade espaços em uma perspectiva sustentável, com ganhos para qualidade ambiental urbana. A experiência da rede de monitoramento da área metropolitana de Nova York, que é composta por quatro diferentes estações, duas

com telhados verdes extensivos e altura da vegetação de 10 cm e outras duas no regime semi-intensivo com altura da vegetação acima de 15 cm, demonstra que os mesmos possuem grande capacidade de redução de temperatura, pois há o aumento o valor do albedo em 20% aliado ao aumento da produção de calor latente no processo de evapotranspiração (GAFFIN *et al*, 2009).

Uma reestruturação das edificações, principalmente em áreas densamente construídas e ambientes de canyons urbanos, está sendo repensada muito além da implementação de espaços verdes, visto que esses não são os únicos elementos determinantes para a formação e intensificação da Ilha de Calor Urbana.

Um sistema de ventilação para pedestres é proposto por Mirzai (2009). Trata-se de um conceito básico para melhorar a saúde e conforto térmico dos pedestres incidentes sobre os efeitos da ICU. Um modelo no qual o ar do topo das construções é canalizado para o nível do solo gera turbulência entre os diferentes níveis da camada limite urbana foi simulado. O mesmo partiu do pressuposto de que o movimento do ar, a temperatura e a concentração de poluentes podem ser controlados alterando-se a taxa de fluxo do ar entre a base e o topo dos edifícios. Os resultados das simulações mostraram uma elevada capacidade de transporte de ar em condições de estabilidade e instabilidade atmosférica, com redução da temperatura ao nível do pedestre.

Uma proposta que se utiliza do princípio de alteração do balanço de energia, com aumento da produção do calor latente e umidade relativa do ar, no intuito de reduzir o fluxo de calor e seu consequente aumento de consumo energético, foi desenvolvida por Narumi (2009).

A mesma compõe um conjunto de três técnicas diferentes de resfriamento evaporativo e pulverização de telhado, pulverização da varanda e pulverização da unidade exterior do ar condicionado do quarto. Os testes foram realizados em um prédio de apartamentos residenciais na cidade de Osaka-Japão. Por meio de simulações numéricas, verificou-se que a introdução dessas tecnologias de nebulização obteve efeito positivo no aumento da economia de consumo energético para refrigeração em mais de 80% em relação à taxa de consumo anterior. No

tocante ao fluxo de calor urbano, o mesmo foi reduzido em 60%, com especial atenção para a temperatura da superfície do telhado, a qual foi reduzida em 16,4°C em sua média diária.

Catuzzo (2013) avaliou a eficiência do telhado verde para a minimização das alterações no microclima urbano no centro da cidade de São Paulo, Brasil. Foi realizada uma análise comparativa a fim de relacionar as medições de temperatura e umidade relativa do ar para um telhado verde intensivo e outro de concreto, localizados na mesma quadra urbana, além de uma terceira estação referente a uma área vegetada (Mirante do Santana), no intervalo temporal de um ano (03/2012 a 03/2013). Verificou-se que o telhado verde reduz a temperatura e eleva a umidade do ar no microclima, enquanto que o telhado de concreto eleva a temperatura e reduz a umidade do ar significativamente. As medições demonstraram que o telhado verde intensivo é uma possível fonte mitigatória para a Ilha de Calor Urbana em São Paulo.

Estudos de Caso de São Paulo

Lombardo (1985) estudou a Ilha de Calor Urbana na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) através da integração dos dados de medidas fixas e móveis a imagens de satélite. O desenvolvimento da análise envolveu várias escalas da organização climática, desde a regional até microclimas, como também a organização socioeconômica do espaço metropolitano. Foram utilizadas um total de nove imagens da banda termal do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) dos satélites TIROS-N e NOAA 6 e 7 (*National Oceanic and Atmosphere Administration*), com resolução espacial de 1km², em um intervalo temporal de 1980 a 1982. Foi realizado um trabalho de campo para a compreensão da dinâmica do fenômeno ilha de calor (diurna e sazonal) e suas relações com os diferentes usos do solo e topografia. Foram instalados 45 postos de medições fixas em diferentes locais, sendo que através deles tornou-se possível avaliar, para o ano de 1982, sua dinâmica na estação do inverno e verão. Aliados às medições foram utilizados mapas de uso do solo, fotografias aéreas e classificação automática de uso do solo através de uma imagem do satélite Landsat-3.

Lombardo (op.cit) os resultados das medições de campo demonstraram que a conformação espacial da Ilha de Calor Urbana tem pouca alteração na RMSP, pois a variação de sua intensidade está sobre julgada às condições sinóticas. Em condições de céu claro e calmaria a mesma atinge sua maior expressão de área e gradiente de temperatura, enquanto que em dias chuvosos com instabilidade atmosférica ocorre a redução de sua intensidade e uma concentração de área. O inverno apresentou maior intensidade diurna da mesma durante 15h e 21h, enquanto que na estação do verão, devido a fortes precipitações, essa sofreu um forte declínio e diminuiu sua intensidade. Conclui-se que a ICU segue o contorno da cidade em todas as condições sinóticas onde foram obtidas as medidas, tanto no verão como no inverno. No entanto, sua configuração e sua evolução parecem ser alteradas conforme a orientação do vento, com intensidade máxima de 10°C entre o centro e a área rural.

Ribeiro (1996) investigou o comportamento da Ilha de Calor Urbana e seus efeitos na saúde pública, a partir de dados de temperatura máxima e mínima de três estações meteorológicas localizadas em diferentes perfis de urbanização: Parque D. Pedro, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo e Mirante do Santana, além de uma imagem termal do satélite *Landsat-5*, além destes foram analisadas as taxas de mortalidade respiratórias e circulatórias organizadas por subprefeituras. Foi analisada a intensidade da mesma ao longo dos anos de 1993 e 1994. A primeira, cuja representatividade é de um entorno extremamente urbanizado, apresentou constantes temperaturas máximas em torno de 2 a 4°C. As mesmas chegaram a atingir entre 6 a 10°C em relação às demais, as quais apresentam características de subúrbio e áreas de preservação ambiental, respectivamente. Na análise sazonal diagnosticou-se que o período de Agosto a Dezembro apresenta os maiores gradientes térmico da ICU no município de São Paulo, e que estas são melhores expressas nas temperaturas mínimas do que nas máximas. Com relação à saúde pública, algumas unidades administrativas apresentaram relação espacial positiva entre alta mortalidade e altas temperaturas, com maior expressão na mortalidade por doenças circulatórias da população acima de 55 anos.

Tafira & Armani (2001) na tentativa de explicar os espaços climáticos urbanos da Cidade de São Paulo e defini-los em unidades, trouxeram uma importante contribuição dos estudos de Ilha de Calor Urbana ao avaliar as questões intra urbanas ligadas à morfologia e o uso e cobertura do solo com suas respectivas temperaturas da superfície obtidas através de sensores remotos. Foram realizadas análises descritivas das unidades e em seguida as características identificadas nas mesmas foram associadas aos valores de temperatura da superfície para duas imagens do Landsat-7 dos meses de abril e setembro, foram diagnosticadas maiores temperaturas para as unidades com características industriais, habitações de baixo padrão e centros comerciais e/ou de serviços e as menores temperaturas corresponderam a áreas verdes e aquelas residenciais de alto padrão a qual formam verdadeiras ilhas de frio dentro das adensadas áreas urbanas.

Ferreira *et al* (2012), ao estudar as variações diurnas e sazonais do balanço de radiação da superfície da cidade de São Paulo, avaliaram a relação do mesmo com a intensidade da ICU. O coeficiente de gradiente térmico foi calculado utilizando um total de quinze estações de medição, entre as quais nove em ambientes urbanos e cinco nos ambientes rurais do município. Com isso, sua evolução diurna e intensidade foi estabelecida para todos os meses do ano de 2004.

Ferreira *et al* (op.cit.), o estudo revelou que a variação diurna mostra que há uma maior expressão do fenômeno durante o dia, com intensidade máxima no período da tarde entre 14 e 16h e mínima no horário da manhã das 7 às 8h. A variação sazonal mostrou que a máxima variou entre 2,6°C em julho (16h) a 5,5°C em Setembro (15h), enquanto que a mínima variou de -0,26°C (09h) em junho para 0,94°C em Novembro (03h). A evolução diurna da sua intensidade estabeleceu a relação entre os valores do saldo de radiação à superfície (R_n) para todos os meses do ano. A máxima intensidade ocorreu três horas após o máximo de intensidade de R_n .

Ferreira *et al* (2013) descreveram a variação diurna do armazenamento do fluxo de energia no município de São Paulo e sua relação com a Ilha de Calor Urbana. Para tanto foi estimado o método de balanço de residual com observações

in situ de saldo de radiação e fluxos turbulentos de calor sensível e latente, seguido do método de parametrização. Foi realizada modelagem com base nas informações de uso do solo, inferida a partir de uma área de raio de 1 km centrada no ponto de observação principal.

Ferreira *et al* (op.cit.), a avaliação da intensidade ICU em São Paulo foi estipulada como base na diferença entre valores horários médios mensais de temperatura do ar, observados simultaneamente de seis estações urbanas e outras seis localizadas em ambientes rurais, no período de 18 de maio a 17 de junho do ano de 2009. As observações utilizadas para estimar o fluxo de energia armazenada foram realizadas a partir da estação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. A partir de tais etapas a relação entre o fluxo de energia armazenada e intensidade ICU foi avaliada.

Ferreira *et al* (op.cit.), o estudo revelou que os valores integrados do armazenamento do fluxo de energia corresponderam à cerca 51% de toda radiação líquida para o período diurno. A evolução diurna na intensidade de ilha de calor urbana, com base em valores médios mensais, atingiu uma intensidade máxima de 3,3°C, e a mesma não apresentou correlação com o fluxo de energia armazenada durante o período de tempo considerado nesse trabalho. A temperatura máxima do dia ocorreu na área urbana aproximadamente duas horas mais tarde do que na área rural. A temperatura mínima do ar à noite na área urbana ocorreu aproximadamente três horas mais tarde do que em áreas rurais. A entrada de maior energia na área urbana, a qual gera a intensidade máxima da ICU durante o dia para o município, não foi associada com a radiação líquida.

No Brasil, os estudos do campo térmico urbano e aqueles voltados para a qualidade ambiental com uma perspectiva climática ganharam força a partir da década de 1970, para a Região Metropolitana de São Paulo excelentes e desafiadoras metodologias do trabalho empírico foram aplicadas por Tarifa & Mello (1972), Tarifa (1976, 1977), Moraes, Costa & Tarifa (1977), Conti (1978, 1979), Monteiro (1980) e Lombardo *et al* (1983). Através do trabalho de Monteiro (1976), que apresentou o “Sistema Clima Urbano” (S.C.U) como base teórica para o

desenvolvimento dos estudos dos climas urbanos brasileiros, foi desenvolvida a “escola brasileira de climatologia” com adeptos em todas as regiões do país (LIMA, PINHEIRO & MENDONÇA, 2012).

Algumas produções mais recentes sobre a temática da Ilha de Calor Urbana apresentam importantes avanços metodológicos nos estudos das cidades brasileiras:

Lucena *et al* (2012) realizaram análise espaço-temporal da ICU para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro-RJ, utilizando-se de imagens do mapeador temático dos satélites Landsat-5 e 7 em conjunto com classificação supervisionada do uso do solo.

Barros & Lombardo (2012) avaliaram a relação existente entre a ICU a morfologia urbana e o uso e cobertura do solo para o município do Recife-PE ao combinar análise da paisagem, imagens termais e sistema de informações geográficas, em uma abordagem intraurbana.

Barbosa & Amorim (2012) avaliaram as diferenças térmicas e higrométricas no período do outono na cidade de Presidente Prudente/ SP combinando condicionantes geoecológicas e geourbanos.

Oliveira *et al* (2013) avaliaram a relação entre a temperatura da superfície utilizando imagens termais do Landsat-5, com resolução reamostrada para 30m, com sobreposição a imagens de satélite de alta resolução. Avaliaram o impacto do uso do solo na temperatura em uma abordagem intraurbana, em escalas topo e microclimática para o município do Recife-PE.

Amorim (2005) estudou a Ilha de Calor Urbana noturna em uma cidade de porte médio (Birigui-SP) através da aplicação de um transepto de medidas móveis, foram utilizados termômetros digitais com sensores acoplados a lateral de um veículo. Um total de 56 pontos de coleta da temperatura do ar foram estabelecidos, a metodologia proporcionou verificar a influência do uso do solo e do relevo.

A Ilha de Calor Urbana é um grande desafio para as sociedades urbanas ao redor do mundo, visto que é um fenômeno que associa os condicionantes derivados das ações antrópicas sobre o meio ambiente urbano, em termos de uso do solo e os condicionantes do meio físico com seus atributos geoecológicos (LOMBARDO, 1985, pg.77). Dessa forma, agrega multidimensões de análises e perspectivas de abordagens empíricas, porém a mesma não é apenas um tema de discussão científica. No contexto de uma forte estruturação política a nível global para a resolução da crise ambiental, o fenômeno constitui um dos elos principais no entendimento da dimensão negativa que as ações antrópicas possuem sobre o meio ambiente e especificamente na transformação dos padrões climáticos.

Para além de um fenômeno predominantemente físico, a mesma revela a necessidade de uma mudança da transformação da cultura de reprodução dos espaços urbanos e dessa forma acompanha o movimento maior das lutas sociais pela melhoria da qualidade de vida e bem estar social. O desenvolvimento do conhecimento científico e as pautas político-sociais afirmam a necessidade da construção de uma cultura urbana onde a cidade seja para os cidadãos e não mais para a livre circulação de veículos automotores e desenfreados projetos imobiliários.

Chama ainda a atenção para o seguinte ponto: há a necessidade do desenvolvimento do campo empírico da esfera geográfica frente ao contexto da crise ambiental global e sua dimensão nos espaços urbanos, pois a natureza multidisciplinar e integrada da ciência geográfica através dos seus conceitos base como espaço, território e paisagem possui grande potencial de apresentar um panorama de relações e soluções que estão muito além das perspectivas puramente físicas ou sociais.

Um primeiro passo pode ser a reestruturação das definições científicas das problemáticas, as quais só permitem leituras simplistas ou unilaterais das suas relações e impactos, como por exemplo, a Ilha de Calor Urbana. Esta é predominantemente avaliada como a resultante matemática das diferenças de temperatura entre ambientes predominantemente vegetados com relação aos

urbanos. Porém a mesma possui multirelações que não são abarcadas por tal concepção.

O vigente trabalho propõe a seguinte definição para o desenvolvimento de uma abordagem empírica: a Ilha de Calor Urbana é um fenômeno termo sensível de natureza dinâmica e multiescalar, o qual representa através do gradiente de temperatura entre diferentes espaços o grau de transformação e degradação do meio ambiente resultante das desarmônicas relações socioambientais urbanas.

Apresentação e Discussão da Hipótese

O presente trabalho visa inter-relacionar fatores físicos e antrópicos na abordagem da Ilha de Calor Urbana em um estudo de caso do município de São Paulo-SP. Utiliza como guia o desafio de verificação de uma hipótese segundo a definição do fenômeno proposta na discussão teórica. Os métodos que serão utilizados para cumprir os objetivos proposto serão o descritivo seguido do comparativo e, por fim, a análise integrada descritiva.

A hipótese tem como base dois conceitos, o desafio é uni-los em uma abordagem empírica a fim de que estes possibilitem as respostas desejadas para entender o fenômeno.

São eles a “dinâmica” e o “território”; o primeiro justifica-se como a condição fundamental do estado da atmosfera, tanto na abordagem meteorológica do tempo, quanto na climatológica do ritmo climático. O segundo, para além das complexificações do seu leque de definições propostos por inúmeros autores, principalmente da área de geopolítica, justifica-se pela abordagem metodológica onde o recorte espacial é limitado pelos limites territoriais oficiais do município de São Paulo.

Foi utilizado um banco de dados oficial do governo com devidas aprovações de todas as instâncias dos poderes legislativo, judiciário e executivo. Além das subdivisões administrativas como os distritos, os quais servem como parâmetro para avaliar as condições intraurbana da Ilha de Calor Urbana. Desta forma, o fenômeno não é abordado em sua totalidade espacial, e sim apenas por recortes arbitrários e leituras territoriais com a finalidade política da produção do conhecimento científico, com vista na melhoria da qualidade de vida em um determinado território.

A hipótese se estruturou na seguinte expressão: A dinâmica territorial da Ilha de Calor Urbana é fruto da relação entre as condições sinóticas, uso e cobertura do solo e o balanço de energia.

Na interação entre as condições sinóticas e o balanço de energia é encontrada uma relação de dependência da segunda em função da primeira, conforme a estrutura do estado da atmosfera e a dinâmica dos seus componentes haverá uma maior ou menor predisposição de radiação solar e vapor de água, o que por sua vez irá alterar a quantidade de energia dissipada em calor sensível e calor latente.

O balanço de energia possui relação de dependência com uso e cobertura do solo. Na escala topo e microclimática o tipo de material à superfície correspondente ao uso e cobertura do solo irá estruturar a distribuição espacial da quantidade de calor sensível e latente, ou seja, se um ambiente possui corpos d'água e vegetação terá maior quantidade de calor latente em relação a ambientes predominantemente asfaltados e concretados. Desta forma, na escala de observação espacial mesoclimática, o mosaico da distribuição espacial do balanço de energia será fruto de finitas relações entre o uso e cobertura do solo e a baixa atmosfera urbana.

Algumas condições sinóticas podem anular a predominância do mosaico de microclimas, e desta forma anular os efeitos do uso e cobertura do solo no balanço de energia ao dissipar no espaço – tempo o fenômeno da Ilha de Calor Urbana.

As proposições levam a seguinte reflexão: a ICU é fruto das interações entre as condições sinóticas e o uso e cobertura do solo; por conseguinte, sua dinâmica espacial será resultante das interações do balanço de energia sobre a interferência do conjunto de variáveis discutido.

O relatório de clima e cidades sustentáveis, escrito e publicado por mais de dezoito pesquisadores de várias partes do mundo, algumas das maiores autoridades do assunto no século XX, faz a seguinte afirmativa: “não existe relação universal para a Ilha de Calor Urbana” (GRIMMOND *et al.* 2010 p.251). A hipótese aqui discutida possui uma essência de carácter universal, o que vai de encontro à afirmação sugerida anteriormente; o mesmo material ainda afirma que as proposições que condicionam o fenômeno estão ligadas as formas de geometria urbana e suas respostas térmicas. Contudo, as afirmações seguem estudos que se utilizam de estações de medições pontuais (fixas e/ou móveis) na análise da

dinâmica temporal. A avaliação da dinâmica espacial e territorial é algo inovador e requer respostas que ultrapassem as barreiras do conhecimento até hoje construído.

Outra importante característica do estudo em questão é a combinação das variáveis em análise. Uma afirmativa feita pelo Oke (1982) remete a seguinte questão: a ICU deve surgir da diferença do balanço de energia entre as áreas rurais e urbanas, embora ainda não haja provas observacionais. Mais de 30 anos depois, tais medições são possíveis através de pontos fixos de medidas; no entanto a modelagem de sensoriamento remoto e sua geração de dados espaciais permitem análises das relações entre o uso e cobertura do solo e o balanço de energia que vão muito além dos limites e formas abordadas pela maioria dos estudos realizados até a atualidade. Será visto como tais interações se dão nos estudos de caso do município de São Paulo.

O primeiro e principal estudo sobre a Ilha de Calor Urbana para o município de São Paulo e sua região metropolitana foi realizado por Lombardo (1985), neste foi verificada a variação diurna, sazonal e espacial da mesma através da combinação de medições de temperatura e umidade relativa de 45 pontos de coleta aliado a utilização de imagens termais com cálculo da temperatura da superfície na resolução espacial de 1 km x 1 km. Em seguida Ribeiro (1996) estudou a variação diurna e sazonal, em uma abordagem intraurbana no município de São Paulo, ao avaliar as diferenças das respostas térmicas em diferentes padrões de uso do solo urbano, assim como Tafira & Armani (2001) também trouxeram uma abordagem intraurbana agrupando questões ligadas à morfologia e uso do solo a imagens termais.

Estudos recentes como os de Ferreira *et al.* (2013) e Ferreira *et al.* (2012), apresentam um importante avanço no desenvolvimento metodológico na abordagem da problemática. Estes foram além das tradicionais medições de temperatura e umidade com estações fixas em diferentes usos do solo. Variáveis como fluxo de calor sensível e latente, saldo de radiação e o armazenamento do fluxo de energia para um ponto localizado no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, foram adicionados a fim de entender a interferência dos processos físicos na variação diurna e sazonal da ICU.

Diante das amplas e importantes contribuições dos autores aqui comentados, o presente trabalho em sua abordagem empírica traz contribuições no que se refere:

- 1- A relação intraurbana entre o uso e cobertura do solo com as Ilhas de Calor e Frescor Urbanas, provindas de uma classificação da banda termal do Landsat-5.
- 2- A avaliação espacial em escala mesoclimática dos componentes do balanço de energia: fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível, em diferentes condições meteorológicas para toda área do município, sua relação com o uso e cobertura do solo e a dinâmica territorial da Ilha de Calor Urbana.
- 3- A avaliação do campo térmico dos espaços públicos de lazer através da relação entre a cobertura do solo e os componentes do balanço de energia, estimados através de imagens do satélite Landsat-5.

A realização do teste da hipótese sugerida como guia da vigente pesquisa teve como principal alicerce o Sistema de Informações Geográficas (SIG). Nele dados vetoriais e matriciais foram editados, sobrepostos e criados a fim de gerar *layouts* de mapa onde a expressão espacial gráfica dos resultados possibilitou a aplicação das metodologias na avaliação da hipótese. A apresentação dos resultados contemplou as seguintes escalas de análise climática: meso, topo e micro.

Outro fruto gerado a partir deste foi à análise estatística básica dos dados vetoriais, onde foi disponibilizado o valor do total de pixels para cada recorte da imagem, valores máximos, mínimos, médios e o padrão de variância para cada uma das variáveis matriciais analisadas. A produção dos dados matriciais foi realizada em um software específico para esse tipo de dado; aliado a este foi utilizado um modelo de balanço de energia da superfície aplicado a dados de sensores remotos chamado de SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*).

A vigente pesquisa contemplou a utilização de uma metodologia ligada à cartografia temática, desta forma proporcionou a sobreposição de dados de origem vetoriais com matriciais, além da elaboração de várias camadas de vetores a partir do segundo. Deste modo foi possível realizar a abordagem dinâmica da temperatura da superfície, dentro do recorte territorial do município de São Paulo-SP, os dados

de temperatura medidos por sensores remotos foram transformados em linhas vetoriais que sobrepostas aos dados da classificação aos padrões de uso do solo definidos pela Prefeitura do Município de São Paulo possibilitaram abarcar a uma parte muito importante para a verificação da hipótese aqui testada e discutida.

Os padrões de uso do solo representam a expressão da interferência antrópica na transformação do espaço e com isso na possível configuração de microclimas urbanos derivados das diferentes interações energéticas na interface superfície – atmosfera.

Os padrões identificados variam em sua natureza, pois abrangem desde atividades culturais ligadas ao setor financeiro como comércio/serviços e indústria que abarca um grande número de edificações do tipo armazéns a ambientes cuja organização corresponde a quatro principais subgrupos, estes são distintos pela morfologia (vertical e horizontal) e os padrões socioeconômicos classificados em alto e médio e em seguida baixo padrão.

Nos extremos dos limites territoriais é encontrado padrão de parques e unidades de conservação cuja representação corresponde ao montante de áreas verdes não urbanas destinadas a diferentes atividades sociais e de preservação. Além do mais, duas outras unidades compõem a legenda como o campus da Universidade de São Paulo no bairro do Butantã e os equipamentos públicos (aeroportos).

A sobreposição cartográfica das linhas correspondentes ao delta de temperatura da superfície e o uso do solo, possibilitou a avaliação da capacidade que as diferentes reproduções espaciais urbanas possuem na configuração de Ilhas de Calor e Frescor Urbanas. Em seguida, a sobreposição das unidades territoriais administrativas mínimas (distritos) sobre os dados de temperatura e índice de Área Foliar permitiu identificar o conjunto das relações estudadas com as devidas localizações espaciais.

Material e Métodos

Caracterização da Área de Estudo

A Metrópole Paulistana está localizada numa latitude aproximada de 23°21' e longitude de 46°44' junto ao Trópico de Capricórnio (Figura 1), está inserida num contexto de terras altas (predominantemente entre 720 e 850 metros), chamado de Planalto Atlântico, o que implica uma realidade climática de transição, entre os Climas Tropicais úmidos de Altitude, com período seco definido, e aqueles subtropicais, permanentemente úmidos, do Brasil meridional (TARIFA & ARMANI, 2001).

Tarifa & Armani (op.cit) ao avaliarem as normais climatológicas do período 1961 – 1990 da Estação meteorológica do Mirante de Santana (latitude 23°30', longitude 46°37' e altitude 792), identificaram que existe duas estações bem definidas, para o município em questão, uma quente e chuvosa de outubro a março (grosso modo primavera-verão) e outra fria e relativamente seca, de Abril a Setembro (outono-inverno). O comportamento térmico mostra variação sazonal muito semelhante, com período de maio a outubro registrando os menores valores médios de temperatura, com uma variação entre 15,8°C (Julho, mês mais frio) a 19,0°C (Outubro). Na estação quente, os valores oscilam entre 22,4°C (fevereiro mês mais quente) e 20,3°C (novembro), a média anual dos valores foi de 25,9°C.

São Paulo está situado na região Sudeste do Brasil, na latitude do trópico de Capricórnio, na região de confronto entre sistemas tropicais e extratropicais. A dinâmica aí é basicamente controlada pela célula de Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul, onde se configura a massa Tropical Marítima, sendo também afetada ocasionalmente pela massa Tropical Continental, originária da Baixa Pressão do Chaco/Pantanal, além dos efeitos estabilizadores desencadeados pelos avanços da Frente Polar e oscilações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ação dos anticiclones móveis, associada à dinâmica da Frente Polar, é particularmente intensa de maio a setembro, especialmente quando reforçada pelo ar polar Pacífico, de trajetória predominantemente continental, portanto menos úmido e mais estável. A

dinâmica da frente polar está frequentemente relacionada ao aprofundamento da Baixa do Chaco/Pantanal (CONTI, 2004).

Figura 1. Mapa de Localização do Município de São Paulo

No inverno do hemisfério sul, o Anticiclone Tropical do Atlântico Sul tende a deslocar-se para o continente, concorrendo para reduzir a nebulosidade e as precipitações. De outubro a março (verão no hemisfério sul), a ativa evaporação sobre os oceanos transfere enorme volume de vapor d'água para a atmosfera, instabilizando-a e estimulando a precipitação em todo Sudeste. Ocasionalmente, a umidade de origem marítima pode ser bloqueada pelo relevo, ocasionando acréscimo excepcional na queda de chuvas nas áreas serranas e graves problemas ambientais, com deslocamento de encostas, enchentes, assoreamentos, além de elevado número de vítimas e prejuízos materiais (CONTI, op.cit).

De acordo com Monteiro (1969), os sistemas atmosféricos resultantes dependem, direta ou indiretamente, da coordenação que exerce sobre eles o Anticiclone Polar Atlântico. Os fluxos são controlados pelos centros de ação, enquanto o ritmo determina sequências de pluviosidade de maior ou menor intensidade.

A natureza do ritmo da evolução dos estados de tempo no Brasil de sudeste, no qual São Paulo se localiza, é função de uma rica série de combinações. As diferenças de canalização de massa fria pelas rotas do interior e do litoral têm a ver com as ondulações que se produzem ao longo do eixo da Frente Polar em deslocamento e são essas ondulações ou ciclogêneses que explicam os contrastes térmicos gerados pela participação conflitante dos sistemas intertropicais e extratropicais (LOMBARDO, 1985).

Os tipos de tempo possuem relação direta com a intensidade da Ilha de Calor Urbana. Segundo Lombardo (op.cit), os tipos de tempo que favoreceriam a maior gradiente de temperatura entre o centro e a periferia da metrópole e também a concentração de poluentes, estariam relacionados aos anticiclones estacionários e aqueles que provocam inversões de subsidência (Tropical Atlântica e Polar Atlântica). Os tipos de tempo associados às frentes, caracterizados pela instabilidade atmosférica, influem num menor gradiente de temperatura entre o centro e a periferia da área urbanizada como também favorecem a dispersão de poluentes.

As condições de tempo mutáveis, relacionadas às invasões polares e à dinamização frontal, resultante dos seus encontros com os sistemas intertropicais interferem na diminuição intensiva da Ilha de Calor Urbana em São Paulo. Em contrapartida, os tipos de tempo que estão associados ao domínio do Anticiclone Tropical Marítimo, com maior ocorrência de inversão térmica, ventos fracos e baixo teor pluviométrico, propiciam condições favoráveis para maior definição e caracterização da Ilha de Calor Urbana de São Paulo e concentração de poluentes (LOMBARDO, op.cit).

Na análise do clima local, deve-se ressaltar a posição geográfica da Bacia Sedimentar de São Paulo, deprimida topograficamente em relação ao entorno, o que contribui para a formação de ventos locais, catabáticos, com movimentos convergentes, possibilitando um aumento de temperatura. Associando-se ao fato de São Paulo ser rodeada de anfiteatro montanhoso, a rugosidade urbana tende a modificar o fluxo de vento nos baixos níveis (LOMBARDO, op.cit).

A brisa marítima, com ventos úmidos, ocorre frequentemente sobre São Paulo. Os ventos são conduzidos pelo Vale do Tamanduateí e Pinheiros, principalmente durante o final da tarde e à noite, contribuindo para o aumento do teor de umidade do ar na parte meridional da mancha urbana. Desse modo, a brisa marítima parece contribuir para amenizar o efeito da Ilha de Calor Urbana na parte sul e sudeste da área urbana. O vento do quadrante norte-noroeste predomina à tarde, com uma velocidade bastante intensa e com pouca persistência, enquanto vento dos quadrantes sudoeste a sudeste predomina entre o anoitecer e o amanhecer, com velocidade fraca, porém, com maior persistência. Esse fluxo de vento de origem marítima sopra diariamente ao anoitecer e, dependendo das condições sinóticas predominantes, sua intensidade é variável (LOMBARDO, op.cit).

Com o resfriamento noturno, a circulação local tende a estabilizar-se. Parece haver, também, uma relação entre a velocidade e orientação dos ventos e a intensidade da ICU, principalmente nos períodos da tarde e noite. Os ventos de superfície sofrem os efeitos da rugosidade da cidade interferindo na diminuição de sua intensidade, bem como na sua direção. A concentração de edifícios provoca uma desaceleração do vento, devido à perda por atrito, e favorece, também, sua canalização. Essas características citadas contribuem para a maior gradiente horizontal de temperatura, como também dificultam o transporte e dispersão dos poluentes na região da Grande São Paulo (LOMBARDO, op.cit).

A geomorfologia da mesma reflete a existência de um relevo colinoso com planícies aluviais e terraços dos rios Tietê e Pinheiros e afluentes, onde se encontra assentado seu núcleo urbano mais consolidado, circundado por formas de relevo mais salientes sustentadas por corpos graníticos (Serra da Cantareira) e lentes de metassedimentos mais resistentes. A vegetação predominante é floresta ombrófila,

densa “mata”, classificada em alto Montana (mata nebulosa), sobre turfeira, campos naturais (campos alto montanos), seguida de reflorestamento “bosque de pinus” e formação de Várzea - campos (brejo). O município encontra-se dentro da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e está dividida em seis sub-bacias, as quais drenam os principais rios na Região Metropolitana de São Paulo, dentre elas abrange a sub-bacia Billings-Tamanduateí, sub-bacia Jusante Pinheiros-Pirapora e sub-bacia Penha-Pinheiros (PMSP, 2000).

Foram utilizadas nove imagens do Mapeador Temático do *Landsat 5* da órbita 219, pontos 66 e 67, com horário médio de passagem as 10h da manhã, adquiridas através de *download* gratuito do catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Em seguida, as mesmas passaram por uma etapa de tratamento que incluiu composição das bandas, realce em falsa cor, correção geométrica, mosaico e recorte da área de estudo, tais procedimentos foram realizados com o *software* ERDAS 9.1.

As datas de passagem são as seguintes:

Tabela 2 - Datas de passagem do *Landsat-5* adotadas no estudo

1° 28/09/2011	2° 28/11/2010	3° 16/08/2007
4° 24/08/2010	5° 05/08/2009	6° 19/09/2008
7° 18/08/2008	8° 01/09/2007	9° 24/10/2009

A base de dados cartográficos com limites territoriais, hidrografia e alguns padrões de cobertura e restrições do solo, foram extraídos do Atlas Ambiental do Município de São Paulo. Dados dos padrões de uso do solo foram adaptados do Mapa da Prefeitura do Município de São Paulo para o ano de 2010. Recortes espaciais de ortofotografias para o ano de 2007, na escala de 1:1500 foram adquiridas por *download* gratuito no site da Secretaria de Habitação do Município de São Paulo.

Foram adquiridos boletins sinóticos para as datas de passagem no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e cartas sinóticas para as mesmas da Marinha do Brasil disponíveis em seu *site*. Os procedimentos ligados à elaboração, edição de bases cartográfica e montagem de layouts de mapas, foram realizados no aplicativo Arcgis 9.3.

Os dados de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação acumulada, direção e velocidade dos ventos, pressão atmosférica e evaporação para o horário da passagem dos satélites, foram obtidos da estação meteorológica do Instituto de Geofísica, Astronomia e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo.

Os métodos adotados para análise dos respectivos resultados são a análise descritiva e comparativa seguida da análise integrada descritiva. Como o volume de dados necessários para a avaliação da hipótese foi muito grande, visto que além de multivariáveis a análise contempla diversas escalas geográficas, não necessariamente em todos os casos os métodos foram empregados em tal sequência.

A primeira etapa da análise consistiu em avaliar a relação entre as cartas e boletins sinóticos e os dados de campo, e, por seguinte, sua relação com as detecções da Ilha de Calor Urbana realizada através de sensores remotos.

Para cada data de análise, foram utilizados os boletins sinóticos do INPE os quais estão subdivididos na análise de atuação dos fatores em 250hPa, 500hPa, 850hPa à superfície; estes possuem imagens de ilustração dos fatores e a previsão 24horas para a data em questão a 00HMG. Em seguida, cartas sinóticas da marinha a 12HMG, para cada data e aquelas as quais segundo as condições termais e os boletins que indicaram uma situação pós-frontal, foram identificados os dias da passagem das frentes frias e adicionadas as respectivas cartas às análises. Dados de campo de temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento, radiação solar global e evaporação foram utilizadas para o momento e o dia da passagem do satélite, estes foram adquiridos da plataforma da estação meteorológica do IAG-USP.

A segunda etapa da análise consistiu na avaliação da relação entre a Ilha de Calor Urbana e os padrões de uso e cobertura do solo. Para tal foram estimadas as temperaturas da superfície por meio de imagens do satélite Landsat-5 sensor TM, para o intervalo de análise de 2007 a 2011 respectivas aos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, os quais apresentam condições atmosféricas mais propícias a formação da Ilha de Calor Urbana para o município (Ribeiro, 1996). Em seguida, no intuito de compará-las com os padrões de uso e cobertura do solo, as mesmas foram digitalizadas, editadas, classificadas e sobrepostas a outras informações geográficas em *layout* de mapa.

Foi elaborado um sistema de classificação termal para as temperaturas da superfície calculadas através da banda termal do *Landsat 5*; os resultados desta foram sobrepostos em *layout* de mapa aos padrões de uso e cobertura do solo. As classificações seguem quatro diferentes padrões:

Tabela 3 - Padrões de classificação termal.

Ilha de Calor Forte, $\Delta T > 8,1^{\circ} \text{C}$.
Ilha de Calor Moderada, $\Delta T > 4,1^{\circ} \text{C} < 8^{\circ} \text{C}$.
Ilha de Frescor, $\Delta T < 4^{\circ} \text{C}$.
Ilha de Frescor Forte, $\Delta T = 0^{\circ} \text{C}$.

A terceira etapa analítica consistiu em avaliar a relação entre os valores da classificação termal da ICU e o balanço de energia, estimativas do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor latente (L).

Foram selecionadas três datas representativas de diferentes configurações territoriais da Ilha de Calor Urbana para o município, conforme a classificação termal. Por seguinte estes padrões foram sobrepostos aos dados do balanço de energia.

Para o cálculo do balanço de energia foi utilizado o modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) com o qual é possível estima-lo com o uso de imagens orbitais.

O algoritmo SEBAL desenvolvido na Holanda por Bastiaanssen (1995) é um modelo de processamento de imagem, composto de vinte e cinco passos computacionais, que visa fazer estimativas dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração, baseado em combinações de relações empíricas e parametrizações físicas. O mesmo é computado pixel por pixel sobre uma base de tempo instantâneo. O modelo faz uso apenas das radiâncias espectrais registradas em sensores de satélites e de um conjunto mínimo de dados meteorológicos de superfície que incluem a velocidade do vento e a temperatura do ar para resolver o balanço de energia à superfície do continente (COURAULT *et al.*, 2003).

Segundo site oficial do SEBAL, o mesmo é o resultado de 15 anos de pesquisa e validação completa e hoje tem aplicações muito úteis em diversos estudos ambientais, como na gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas, na avaliação e administração de lâminas de irrigação e na modelagem hidrológica (PAIVA, 2005). Segundo Hafeez *et al.* (2002), a utilização da técnica de sensoriamento remoto para estimativas da evapotranspiração com larga cobertura espacial é utilizada desde 1990.

O mesmo possibilita não só a evapotranspiração, a obtenção do fluxo vertical de calor latente (LE) com imagens orbitais, e consequentemente da evapotranspiração, através da diferença dos fluxos, também verticais, de calor no solo (G), calor sensível (H) e o saldo de radiação (Rn), os índices de vegetação, o albedo da superfície, emissividades e temperatura da superfície. Dessa forma, alguns algoritmos que utilizam dados gerados a partir de imagens de satélites são imprescindíveis para determinação desses fluxos de energia e aplicações meteorológicas.

O modelo é capaz de quantificar as perdas reais de água de uma bacia ou região com alta distribuição espacial e temporal, o que é extremamente necessário em modelagem hidrológica (GIONGO, 2008). Além disto, possibilita uma gestão

mais racional do consumo hídrico e o diagnóstico das interferências antrópicas na alteração dos fluxos energéticos em superfície.

Segundo Paiva (2005), o algoritmo é uma opção promissora para a obtenção dos fluxos em superfície, para fins operacionais de assimilação de dados por modelos de previsão de tempo e clima. O SEBAL foi extensivamente testado em aplicações relativas ao manejo de irrigação, onde o foco de interesse é a evapotranspiração real diária (24 horas). A autora aponta exemplos de validações do mesmo para fins agrícolas, em estudos de bacias hidrográficas, como Bastiaanssen (2000), na Turquia; Mohamed *et al.* (2004), no Egito; Ayenew (2003), na Etiópia; Bastiaanssen & Ali (2003) no Paquistão; Mendonça *et al.* (2004) na região Norte Fluminense, RJ.

Mais recentemente, o modelo SEBAL tem sido aplicado aos estudos dos ambientes urbanos por pesquisadores da área de clima urbano, visto que os resultados gerados a partir deste permitem avaliar a dimensão espacial das trocas de energia na interface superfície-atmosfera e com isto o real potencial das interferências antrópicas no microclima urbano.

No Brasil alguns autores o utilizaram em estudos dos centros urbanos como Moreira *et al* (2013) os quais estimaram o balanço de energia (BE) através da utilização de imagens *Landsat* para o município do Recife-PE. Gomes *et al* (2013) aplicaram o mesmo para computo do BE na cidade de porte médio de Patos-PB e Barros & Lombardo (2013) os quais o aplicaram na avaliação do BE para diferentes coberturas do solo no município de São Paulo-SP.

A quinta etapa analítica consistiu em avaliar a relação entre os padrões de cobertura do solo existentes no município e os componentes do balanço de energia. A análise comparativa foi realizada através da análise espacial com auxílio de estimativas estatísticas e histogramas das medições do BE. Atenção especial foi dada a avaliação do campo térmico dos parques públicos de lazer através da análise comparativa entre os indicadores meteorológicos correspondentes ao albedo da superfície, saldo de radiação, fluxo de calor latente e sensível e os padrões de cobertura do solo encontrados nos parques.

Etapas Técnicas do Modelo SEBAL

O sensor TM (Mapeador Temático) mede a radiância espectral dos alvos e os armazena na forma de níveis de cinza, ou intensidade do pixel, ou ainda número digital (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits), tendo uma resolução espacial de 30m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e de 120m na banda 6 (banda termal que possibilita obter a temperatura da superfície).

Tabela 4 - Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b maio/2003 abril/2007) e radiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	365,0	1826
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	264,0	1554
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,51	221,0	1036
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	215,0
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	80,67

Os valores dos coeficientes de calibração radiométrica apresentados nos diversos trabalhos que utilizam o Landsat 5 – TM são os sugeridos por Markham & Barker (1984), mas os apresentados acima são os determinados por Chander *et al.* (2009), válidos para imagens dos anos mais recentes.

Balanço de Radiação

Calibração radiométrica – Etapa 1

O Balanço Radiativo é sintetizado pelo saldo de radiação à superfície (R_n), que é obtido por meio de uma série de etapas efetuadas com o emprego da ferramenta *Model Maker*. A Etapa 1 constitui o cômputo da radiância espectral de cada banda (L_{λ_i}), ou seja, efetivação da Calibração Radiométrica, em que o número digital (ND) de cada pixel da imagem é convertido em radiância espectral. Essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite Landsat (705 Km), para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7; para a banda 6, essa radiância representa a energia emitida por cada pixel, e a calibração é efetivada segundo a equação (Markham & Baker, 1987):

$$L_{\lambda_i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) ND$$

Onde a e b são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$, Tabela 1); ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); e i corresponde às bandas (1, 2,... e 7) do satélite Landsat 5 - TM.

Figura 2. Fluxograma do processamento do saldo de radiação à superfície – Rn .

Reflectância – Etapa 2

A Etapa 2 representa o cômputo da reflectância monocromática de cada banda (ρ_{λ_i}), definida como sendo a razão entre o fluxo da radiação solar refletida e o fluxo da radiação solar incidente, que é obtida segundo equação:

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r}$$

Onde L_{λ_i} é a radiância espectral de cada banda, k_{λ_i} é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, Tabela 1), Z é o ângulo zenital solar (que pode ser obtido no próprio catálogo de imagens do INPE) e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r) em dado dia do ano (DSA), que de acordo com Iqbal (1983), é dado por:

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

onde DSA representa o dia sequencial do ano e o argumento da função $\cos$ está em radianos. O valor médio anual de d_r é igual a 1,00 e o mesmo varia entre 0,97 e 1,03, aproximadamente. Quando a área de estudo tem pequena, ou mesmo, declividade nula, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido a partir do ângulo de elevação do Sol – E , que se encontra no cabeçalho da imagem, ou seja:

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

Albedo Planetário - Etapa 3

A Etapa 3 representa o cômputo do albedo planetário (α_{toa}), isto é, o albedo não ajustado a transmissividade atmosférica, que é obtida pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas:

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

onde $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são os albedos planetários das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Note-se que os pesos da equação acima, correspondem ao valor da irradiância solar monocromática – $I_{sol,b}$ de dada banda (Tabela 4) pela somatória das irradiâncias de todas as bandas - $\sum I_{sol,b}$, ou seja: peso da banda $b = I_{sol,b} / \sum I_{sol,b}$.

Albedo da Superfície – Etapa 4

Na Etapa 4 obtém-se o cômputo do albedo da superfície ou albedo corrigido para os efeitos atmosféricos α , pela equação:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2}$$

onde α_{toa} é o albedo planetário, α_p é a reflectância da própria atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas que tem sido recomendado o valor de 0,03, com base em Bastiaanssen (2000) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica que para condições de céu claro, pode ser obtida por (Allen *et al.*, 2002):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z$$

onde z é a altitude de cada pixel (m). Se o usuário já dispuser de um DEM da sua área de interesse, o mesmo poderá calcular a transmissividade de cada pixel, o que é recomendado para áreas com topografia muito acentuada. Para efeito de simplificação, utilizemos $z = 200$ m que representa a altitude de algum ponto da imagem, sendo admitido que na área da Figura 2 a mesma era constante para todos os pixels, obtendo-se $\tau_{sw} = 0,754$.

Pode-se, ainda, utilizar um procedimento mais consistente de obtenção da transmissividade atmosférica, conforme proposto por Allen *et al.* (2007):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_t \cos \theta_{hor}} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0,4} \right]$$

Em que θ_{hor} é o ângulo zenital solar, obtido; P é a pressão atmosférica média em kPa ; k_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera, sendo $k_t = 1$ para céu claro e $k_t = 0,5$ para turbidez extrema (Allen, 1996); W é a água precipitável em mm , calculada de acordo com a equação proposta por Garrison e Adler (1990):

$$W = 0,14e_a P_{air} + 2.1$$

A pressão atmosférica pode ser obtida conforme (ASCE-EWRI, 2005):

$$P = 101,3 \left(\frac{T_a - 0,0065z}{T_a} \right)^{5,26}$$

onde T_a é a temperatura do ar, em Kelvin e z é a altitude, representada pelo DEM.

Índices de Vegetação: NDVI, SAVI e IAF – Etapa 5

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do IV-próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V), pela soma das mesmas:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V}$$

onde ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, as bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM.

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a $+1$ e para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1, já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, tem sido utilizada a expressão (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)}$$

Onde o fator L é uma função do tipo de solo. Em estudo recente, utilizamos $L = 0,1$, embora o seu valor mais frequente seja $L = 0,5$ (Huete & Warrick, 1990; Accioly *et al.*, 2002; Boegh *et al.*, 2002).

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo foi computado pela seguinte equação empírica obtida por Allen *et al.* (2002):

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

Emissividades – Etapa 6

Para a obtenção da temperatura da superfície, é utilizada a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ε_{NB} , qual seja: 10,4 – 12,5 μm . Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga ε_0 (5 – 100 μm). Segundo Allen *et al.* (2002), as emissividades ε_{NB} e ε_0 podem ser obtidas, para NDVI > 0 e IAF < 3, segundo:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033.IAF$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01.IAF$$

Para pixels com $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$ e para corpos de água ($NDVI < 0$) $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$, conforme recomendações de Allen *et al.* (2002).

Temperatura da Superfície – Etapa 7

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

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

onde $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ K}$ são constantes de calibração da banda termal do Landsat 5 –TM (Allen *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2005). Para o Landsat 7, $K_1 = 666,09 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1282,71 \text{ K}$.

Radiação de Onda Longa Emitida – Etapa 8

A radiação de onda longa emitida pela superfície $R_{ol, emi}$ (Wm^{-2}) é obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{ol, emi} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_{sup}^4$$

Onde ε_0 é a emissividade de cada pixel, σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) e T_{sup} é a temperatura da superfície (K).

Radiação de onda curta incidente – Etapa 9

A radiação de onda curta incidente $R_{sol, inc} (Wm^{-2})$ corresponde ao fluxo de radiação solar direta mais difusa que atinge a superfície terrestre, que para condição de céu claro é dada pela seguinte expressão (Allen *et al.*, 2002):

$$R_{sol, inc} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw}$$

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

Radiação de onda longa incidente – Etapa 10

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície $R_{ol, atm} (Wm^{-2})$, pode ser computada pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{ol, atm} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4$$

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

Saldo de radiação – Etapa 11

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

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

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

Fluxo de calor no solo – Etapa 12

O fluxo de calor no solo G (Wm^{-2}) pode ser obtido segundo equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia:

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

onde T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$), α o albedo da superfície e NDVI o índice de vegetação da diferença normalizada, todos computados pixel a pixel. Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos de água ($\text{NDVI} < 0$), pode ser utilizada a seguinte expressão: $G = 0,3R_n$, usada por Silva & Cândido (2004) ou $G = 0,5R_n$, segundo Allen *et al.* (2002).

Fluxo de calor sensível – Etapa 13

O fluxo de calor sensível H (Wm^{-2}), o cerne do SEBAL, é estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura do ar entre dois níveis ($z_1 = 0,1$ m e $z_2 = 2$ m), acima do pixel, segundo Bastiaanssen *et al.* (1998):

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

onde ρ é a massa específica do ar (kg m^{-3}), c_p é o calor específico do ar a pressão constante ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), a e b são constantes (obtidas com o auxílio dos pixels âncoras) que representam a diferença da temperatura entre dois níveis Z_1 e Z_2 , T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (sm^{-1}). O cômputo de H , que é iniciado com dados de uma estação meteorológica no interior da cena estudada, quais sejam: a velocidade do vento (ms^{-1}) no nível de 2 m (ou outro nível conhecido) e a altura média da vegetação (m) circundante no local da medição da velocidade do vento. Para a obtenção de H com o modelo SEBAL, faz-se necessário o conhecimento de dois pixels, denominados pixels âncoras, para se determinar a variação de temperatura (dT) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) em todos os pixels da área de estudo.

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

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

onde z_1 e z_2 são as alturas (em metros) acima da superfície (em alguns estudos mais recentes têm sido utilizados $z_1 = 0,1 \text{ m}$ e $z_2 = 2,0 \text{ m}$), u_* velocidade de fricção (ms^{-1}) e k é a constante de von Karman (0,41).

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

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

Ao considerar, por exemplo, uma $h = 0,20 \text{ m}$, obtém-se $z_{0m} = 0,024 \text{ m}$. No entanto, é importante que seja identificado em cada estação meteorológica o valor

de h . Com um mapa de ocupação do solo, poder-se-ia determinar Z_{0m} mais consistentemente. No entanto, o que é mais usual é que se calcule Z_{0m} em função do SAVI ou NDVI.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$dT = a + bT_s$$

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

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

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

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

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

onde T_s , Rn , G e r_{ah} são obtidos exatamente no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obtém-se, no pixel quente: $a + bT_s = r_{\text{ah}} (Rn - G) / \rho c_p$. Como no pixel frio $dT = 0$, ou seja, $a + bT_s = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo de a e b . Logo, pode-se obter H , segundo a equação de H .

No entanto, os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem, tão somente, como valores iniciais de um processo iterativo, e que nas etapas seguintes é considerada, efetivamente, a condição de estabilidade de cada pixel. Em virtude dos efeitos turbulentos afetarem as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov. Portanto, com o processo iterativo, se processa a correção da estabilidade atmosférica em todos os pixels da área de estudo, inclusive no pixel “quente”.

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

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

onde ρ é a densidade do ar, c_p é o calor específico do ar, u_* é a da velocidade de fricção de cada pixel (ms^{-1}), T_s é a temperatura da superfície (K), g é o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81\text{ms}^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível (Wm^{-2}), obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade. Os valores de L definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h) deverão ser considerados. Para isto, utilizam-se das formulações de Paulson (1970) e Webb (1970):

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

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

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

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

onde;

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

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

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

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

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

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

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

Se $L = 0$ (condição de neutralidade): $\psi_m = 0$ e $\psi_h = 0$.

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

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

onde u_{100} é a velocidade do vento a 100 m (ms^{-1}), k é a constante de von Karman (0,41), z_{0m} é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e $\psi_{m(100m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 100m.

Tendo obtido u_* corrigido, se processa a determinação da resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (sm^{-1}) através da seguinte equação:

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

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

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

Fluxo de Calor Latente – Etapa 14

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

$$LE = R_n - G - H$$

onde os fluxos correspondem ao instante da passagem do satélite.

A Dinâmica Territorial da Ilha de Calor Urbana

Os primeiros resultados são referentes à análise da dinâmica territorial da Ilha de Calor Urbana para as nove datas medidas através do uso de imagens termais. Foram analisados dados de campo a partir de um ponto fixo, cartas e boletins sinóticos, classificação termal da ICU sobreposta aos padrões de uso do solo, calor sensível e latente, estes últimos derivados do cômputo do balanço de energia através do SEBAL.

Análise dos componentes da primeira data

A primeira data corresponde a 28/09/2011 às 10 horas da manhã e a carta sinótica da marinha para as 9h no horário de Brasília, indica uma forte predominância da Alta Subtropical do Atlântico Sul, com forte atuação em todo o litoral Sudeste e Nordeste do Brasil. Os dados de superfície apontam que este é o único sistema atuante sobre a área do município de São Paulo (Figura 05).

Os dados de campo instântaneos e acumulados revelam o real estado da atmosfera para a data em análise; a temperatura do ar no momento da passagem do satélite correspondeu a 20,4°C, o mesmo valor da máxima diária enquanto que a mínima foi de 14,3°C. Os valores de temperatura mensais foram os respectivos, a média ficou em torno de 17,1°C com máxima de 32,7°C e mínima de 7,5°C. A umidade relativa do ar para a passagem do imageador apresentou o valor de 54%, o mesmo valor da mínima a máxima foi de 95%.

A radiação solar global para o dia em questão foi de 21,42 MJ.m⁻² e a evapotranspiração diária para área com cobertura foi de 2,15mm e para ao ar livre foi de 4,55mm. A precipitação acumulada diária foi de 0,0 mm, o que está de acordo com as condições de céu limpo, o acúmulo mensal foi de 4,3 mm muito abaixo do esperado que era de 77,1 mm, o desvio em relação ao valor da normal foi de -72,8 mm com apenas seis dias de precipitação em todo o mês.

A direção e velocidade do vento para o momento da passagem foi de Vento= 1,6 m/s⁻¹ na direção ENE; durante o intervalo entre 1h e 5h da manhã houve predomínio da direção sudeste com velocidade média de 1,1 m/s⁻¹ ; a mesma velocidade perdurou durante o intervalo entre 5h e 8h na direção leste; no intervalo

entre 8h e 11h houve predomínio da direção nordeste e a velocidade aumentou para $1,94 \text{ m/s}^{-1}$.

Ao analisar a configuração da Ilha de Calor Urbana e suas diferentes intensidades, forte, moderada e as ilhas de frescor foi observado a seguinte distribuição no território municipal (Figura 06).

No que se refere à ilha de calor de intensidade forte, o mapa apresenta um conjunto de arquipélogos localizados na parte central, leste e sul do município os quais apresentam temperaturas maiores que 8°C em relação à área rural.

O primeiro eixo da ICU de intensidade forte corresponde ao centro norte com predomínio de uso do solo de armazéns/indústria/comércio e serviços. Ao extremo sul da área urbana, localizado entre as duas represas, encontra-se outra grande ICU sobre o mesmo tipo de padrão de uso do solo. A oeste desta, no sudoeste do território, encontra-se outra de intensidade forte, quase sobre total predomínio espacial do tipo de uso residencial horizontal de baixo padrão. Sob efeito deste último tipo de cobertura está a ICU forte da zona leste do município, o que indica que as residências de baixo padrão, ou seja, construídas com materiais de má qualidade estão relacionadas com a distribuição territorial da ICU.

A ilha de calor de intensidade moderada, ou seja, com ΔT entre 4°C e 8°C em relação aos arredores rurais do município, apresentou uma distribuição espacial bastante heterogênea com pouca contiguidade. O predomínio de uso do solo atrelado a esta, para data em questão, foi o residencial horizontal de alto e médio padrão com uma pequena exceção no norte do extremo leste do território.

Algumas das ilhas de frescor urbanas correspondem às unidades de conservação, parques estaduais, municipais e áreas verdes. Tal configuração de convergência espacial é diagnosticada no extremo leste, norte e alguns pontos da zona sul do município. No entanto, na região oeste e central há uma extensa zona de frescor térmica em meio a um arquipélago de ICU forte, os padrões espaciais os quais correspondem são: residencial/ comércio e serviços, além do residencial vertical / horizontal de alto e médio padrão.

Os valores medidos no balanço de energia, principalmente para as variáveis H (calor sensível) e LE (calor latente) apresentaram os seguintes padrões:

O H mínimo atingiu valores negativos referentes aos corpos d'água das represas ao sul do território. O máximo foi de 569 W.m^{-2} e a média ficou em torno de 149 W.m^{-2} ; a soma de todo o calor sensível entre 1m e 2m de altura computado para toda área do território chegou a 252 MJ.m^{-2} com padrão de variação de 127,31 (Figura 03).

Figura 3. Histograma do H para primeira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

Para o calor latente (LE) o valor mínimo identificado foi de 13 W.m^{-2} , com máxima de $539,68 \text{ W.m}^{-2}$ e média de $384,49 \text{ W.m}^{-2}$, o total da soma do valor instantâneo para toda área do município foi de $580,9 \text{ MJ.m}^{-2}$ com padrão de variação de 88,21 (Figura 04).

Figura 4. Histograma do LE para a primeira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

A avaliação comparativa entre a distribuição espacial das ilhas de calor segundo a classificação térmica e os valores de LE e H, demonstraram a seguinte relação:

Para as de intensidade forte, os valores de H variaram entre 300 e 570 W.m^{-2} , ou seja, o valor mínimo é 50% maior do que a média estabelecida pela análise estatística, enquanto que os valores do LE para as mesmas foram os menores com variação média entre 101 e 300 W.m^{-2} (Figura 07).

Para as ICU de intensidade moderada os valores de calor sensível variaram entre 200 e 300 W.m^{-2} , enquanto que o LE variou entre 101 e 350 W.m^{-2} . As Ilhas de Frescor apresentaram valores de H entre 50 e 200 W.m^{-2} e valores de LE mais altos do que 351 W.m^{-2} (Figura 08).

Figura 5. Carta sinótica da superfície da Marinha do Brasil para a primeira data.

Figura 6. Mapa do Uso do solo e ICU dinâmica para a primeira data.

Figura 7. Mapa do Fluxo de Calor Sensível e ICU Dinâmica para a primeira data.

Figura 8. Mapa do Fluxo de Calor Latente e ICU dinâmica para a primeira data.

Análise dos componentes da segunda data

Na análise dos dados para a segunda data referente ao dia 28/11/2010, o estado de São Paulo, assim como quase todo território nacional, está sob a influência de uma família de sistemas ciclônicos de baixa pressão atmosférica; porém no extremo leste paulista há a presença de um anticiclone com seu centro muito próximo ao município em questão. No extremo norte e sul do centro de alta pressão encontram-se duas cristas, o que proporciona uma situação de bloqueio atmosférico com tempo quente e seco (Figura 11). A 250hPa o ramo sul do jato polar indica que o ar frio está todo restrito ao extremo sul do continente americano.

Os dados de campo indicam que o total de radiação solar global foi de 29,16 MJ.m⁻², a temperatura do ar para o horário da passagem do satélite é de 25,5°C com a máxima diária de 29,1°C e a mínima de 17,4°C ; a umidade relativa girou entorno de 55%, com máxima de 93% e mínima de 29%. A precipitação acumulada para a semana anterior do imageamento foi de 3,8 mm, enquanto total mensal atingiu 159,3 mm e o seu desvio com relação ao esperado foi de 35,9 mm, o número de dias com chuva foi igual a 22.

A velocidade do vento durante o período diurno se manteve constante; houve pouca variação, girando entre 1,94 m/s⁻¹ e 2,5 m/s⁻¹ com predomínio da direção nordeste e norte nordeste. A evapotranspiração diária para condições ao ar livre foi de 6,8mm, enquanto que a sombreada foi de 3,5mm.

O balanço de energia para a data em questão apresentou a seguinte configuração:

O fluxo de calor sensível (H) apresentou valores próximos a zero referentes aos corpos de água, enquanto que o máximo atingiu 543 W.m⁻² e o valor médio foi de 149 W.m⁻², o padrão de variação girou em torno de 127 W.m⁻². Para o total de pixels computado sobre o território estudo, o montante total foi de 251,8 MJ.m⁻² (Figuras 09 e 13).

Figura 9. Histograma da segunda data para o H, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

O fluxo de calor latente (LE) apresentou o seguinte padrão, o valor mínimo foi próximo de zero para alguns pontos urbanos, enquanto que o máximo atingiu 255 W.m^{-2} a média girou em torno de $240,93 \text{ W.m}^{-2}$, o total de energia latente instantânea insidente sobre o território foi de 494 Mj.m^{-2} (Figuras 10 e 14).

Figura 10. Histograma do LE correspondente a segunda data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

A configuração territorial da ilha de calor urbana, segundo a classificação termal, seguiu a seguinte organização territorial para a segunda data:

A Ilha de calor urbana forte recobre toda extensão da área urbana, abrangendo uma variedade de uso do solo muito grande como a de Armazéns/ indústrias,

comércio e serviços e quase todas as variações urbanas do uso do solo apresentadas no mapa. Os valores de H para estas variaram entre 328 W.m^{-2} até maior do que 458 W.m^{-2} , os de LE apresentam-se maiores do que 209 W.m^{-2} .

A Ilha de calor moderada apresentou-se com pouca contiguidade no território; um arquipélago expressivo da mesma localiza-se no centro oeste do município sobre o predomínio do uso residencial/comércio e serviços e residencial vertical e horizontal de alto e médio padrão. No extremo leste, norte e sul há pequenas formações principalmente sobre os padrões residenciais horizontais de baixo e alto/médio padrão. Os valores de H estão entre 146 W.m^{-2} e 327 W.m^{-2} , enquanto que o LE está maior do que 249 W.m^{-2} .

As Ilhas de Frescor Urbanas estão concentradas no extremo leste e norte e algumas intersecções urbanas com sobreposição as áreas verdes, parques e unidades de conservação, fogem a essa regra algumas das ilhas de porte médio concentrdaas no eixo central, em gereal, com sobreposição espacial com o uso residencial vertical e horizontal de alto e médio padrão. Os valores de H corresponderam aos mais baixos, variaram entre 145 e $35,5 \text{ W.m}^{-2}$. Os valores de LE não distoaram da intensidade moderada, ou seja, maiores do que 249 W.m^{-2} (Figura 12).

Figura 11. Carta da Marinha à superfície para a segunda data.

Figura 12. Mapa da ICU dinâmica e o uso do solo para a segunda data.

Figura 13. Mapa do Fluxo de calor sensível e ICU dinâmica para a segunda data.

Figura 14. Mapa do Fluxo de calor latente e ICU dinâmica para a segunda data.

Análise dos componentes da terceira data

A carta sinótica de superfície da Marinha do Brasil para a terceira data, 16/08/2007 demonstra que há uma forte atuação ciclônica perante um centro de baixa pressão que atua na parte continental do estado, o mesmo está em contato com a ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), o que por sua vez gera a formação de um sistema frontal no litoral sul do país. Ver figura 17.

Os dados de campo endicam a seguinte situação para o dia do imageamento:

A radiação solar global apresentou valor diário de 18.21 MJ.m^{-2} , desta forma a temperatura do ar para o horário da passagem foi de $21,4^{\circ}\text{C}$, a mínima atingiu $10,7^{\circ}\text{C}$ com máxima de $27,9^{\circ}\text{C}$ e média diária de $18,1^{\circ}\text{C}$. A umidade relativa do ar para o momento do imageamento foi de 47%, a máxima diária atingiu 88% e a mínima 30%.

A precipitação diária foi 0,0 mm condizente com as condições de céu claro apresentadas na imagem; o total mensal foi de 0,7 mm, enquanto o esperado era 39,1 mm e assim houve um déficit de -38,4 mm. A evapotranspiração diária para condições de ar livre foi de 3,2 mm e para abrigo foi de 1,8 mm. As condições de vento apresentaram baixa velocidade na direção sudeste para as primeiras horas do dia, próximo ao horário do imageamento houve o aumento da velocidade para $2,22 \text{ m/s}^{-1}$ na direção norte nordeste.

O balanço de energia para a terceira data apresentou valores de fluxo de calor sensível mínimo próximos a zero, referente aos grandes corpos de água ao sul do território, enquanto que o máximo atingiu 416 W.m^{-2} e a média girou em torno de 145 W.m^{-2} , com padrão de variação de 123,51. A soma total do H instantâneo pra todo o território foi de 252 MJ.m^{-2} (Figura 15).

Figura 15. Histograma do fluxo de H para a terceira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

O fluxo de calor latente apresentou valor mínimo próximo a zero para ambientes extremamente urbanizados, enquanto que o máximo atingiu 580 W.m^{-2} , a média operou em torno de 349 W.m^{-2} , com padrão de variação de 90,8. A soma total do LE instantâneo para todo o território foi de 591 MJ.m^{-2} (Figura 16).

Figura 16. Histograma do fluxo de LE para a terceira data, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

A conjuntura territorial da Ilha de Calor Urbana dentro do município apresentou uma configuração bastante variada da classificação termal. A ICU forte reduziu ao seu tamanho mínimo, apresentou dois eixos de maior concentração: a primeira é o eixo central sobre o principal domínio do uso de Armazéns/Indústria, comércio e serviços. Arquipelógos formados por pequenas ilhas estão localizados no leste, norte e pequenas partes do sul e sudeste do município. Os valores de H correspondentes foram maiores do que 300 W.m^{-2} , enquanto que o LE ficou entre 164 W.m^{-2} e 452 W.m^{-2} .

A Ilha de Calor com intensidade moderada (entre 4°C e 8°C) apresentou uma maior contiguidade de área, de forma que esta se torna dominante em quase toda a área urbana do município. O H ficou entre 201 e 300 W.m^{-2} , enquanto que os valores de LE atingiram um patamar entre 352 e 622 W.m^{-2} .

As ilhas de frescor urbanas presentes fora do limite urbano como aquelas do extremo leste e norte e aquelas presentes no centro oeste do território se expandiram e ganharam maior contiguidade. O valores de H ficaram em torno de menor que 50 W.m^{-2} e entre 50 e 100 W.m^{-2} , enquanto que o LE ficou entre 536 e maiores do que 636 (Figura18).

Figura 17. Carta sinótica da Marinha à superfície para a terceira data.

Figura 18. Mapa da ICU dinâmica e Uso do solo para a terceira data.

Figura 19. Mapa dp fluxo de H e ICU dinâmica para a terceira data.

Figura 20. Mapa do fluxo de calor latente e ICU dinâmica para a terceira data.

Análise dos componentes da quarta data

A quarta data respectiva a 24/08/2010 apresenta segundo a carta sinótica de superfície da Marinha do Brasil, a atuação da ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), a mesma atua a leste com seu escoamento para o continente, confluindo com dois centros de baixa pressão continentais, no litoral sul há formação de um sistema frontal (Figura 21).

A temperatura do ar para o horário do imageamento foi de 24,8°C, com média diária de 19,9°C, máxima de 30,7°C e mínima de 10,6°C o que gerou uma amplitude térmica de 20,1°C. A precipitação diária foi de 0,0mm o que condiz com as condições de céu claro, o acúmulo mensal foi de 3,7mm, ou seja, um déficit de -35,4 visto que o esperado era de 39,1mm. Umidade relativa para a passagem foi de 49%, a média diária foi de 55,5%, com máxima de 88% e mínima de 22%, o que indica pouca quantidade de vapor de água presente na atmosfera. Do início da manhã até as 8h, predominaram ventos de sudeste com velocidade em torno de $1,30\text{m/s}^{-1}$, no intervalo próximo a passagem que foi entre 8h e 10h os ventos predominantes foram de leste nordeste com velocidade de $1,38\text{ms}^{-1}$.

A configuração territorial das ilhas de calor urbana conforme a classificação termal, para data em questão se caracterizou da seguinte maneira:

A ICU forte se concentrou em dois principais arquipelógos, um no centro/sudeste do município referente ao uso do solo armazéns/indústria, comércio e serviços além do comércio e serviços, o segundo localiza-se ao norte do município referente ao padrão de uso residencial horizontal de alto e médio padrão.

A ICU moderada apresenta uma grande distribuição territorial, ocupando grandes áreas do município, com maior predominância na zona leste e sul, em conjuntura espacial com o tipo do uso de predomínio residencial horizontal de baixo e alto padrão. As Ilhas de frescor apresetaram o mesmo padrão de localização, extremo leste, norte, sul e zona centro oeste do território, contudo mostraram maior contiguidade de área e maior expressão territorial, as mesmas corresponderam aos padrões de áreas verdes, residenciais horizontais e verticais de alto/médio padrão e residencial/comércio e serviços. Ver figura 22.

Figura 21. Carta sinótica da Marinha do Brasil à superfície para a quarta data.

Figura 22. Mapa de ICU dinâmica e uso do solo do município de São Paulo para a quarta data

Análise dos componentes da quinta data

Na carta sinótica de superfície da Marinha para a quarta data, 05/08/2009 foi observado a presença de um sistema frontal estacionário sobre o Atlântico posicionado na altura do estado do Espírito Santo. Um anticiclone migratório pós-frontal está com seu núcleo de 1022hPa centrado sobre o Atlântico a leste, da região sul do Estado de São Paulo.

A situação pós-frontal levou a investigação da exata data de passagem do sistema frontal, visto que o mesmo possui extrema influência de anulação dos processos de troca energética na interface superfície-atmosfera em meso e micro escala.

No dia 03/08/2009 houve a formação de um sistema frontal sobre a porção leste do estado de São Paulo, diante da compressão entre um sistema de baixa atuante no continente a 1006hPa e a ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul) a leste.

A análise das cartas sinóticas indicou que no dia 4/08/2009 houve um sistema frontal atuando sobre o Atlântico com seu ramo frio chegando até o litoral de São Paulo e Rio de Janeiro e um canal de umidade atuando na mesma área.

Os dados de campo apresentaram o seguinte comportamento: para o dia da passagem do sistema frontal (03) a temperatura do ar média foi de 18,6°C, com máxima de 24°C e mínima de 13,2°C. No dia seguinte (04), a média foi de 15°C, com máxima diária de 21°C e mínima de 11,6°C. No dia da imagem (05), no horário referente à passagem do satélite a T_a foi de 19,6°C com UR de 69%, a média diária foi de 19,4°C com máxima de 27,6°C e mínima de 14,2°C.

O dia 29/07 apresentou precipitação de 35,6mm, o dia seguinte (30) apresentou uma rápida pancada de chuva de 0,2mm. Desde então, até o dia do imageamento não houve registros de chuvas segundo a captação das estações do IAG. A velocidade e direção do vento para o período da manhã referente à data da passagem do satélite, apresentou predomínio de sudoeste entre 0h e 4h com velocidade média de $1,2\text{m/s}^{-1}$, após tal período a direção mudou e se manteve na direção norte nordeste com velocidade média $2,55\text{m/s}^{-1}$.

A Ilha de Calor Urbana forte para a essa data de análise se mostrou ausente, enquanto que pequenas ilhas de calor moderadas, as quais formaram alguns arquipélagos de calor, correspondem espacialmente aos núcleos de tipo de uso do solo referente à Armazéns/Indústria, comércio e serviços. As demais áreas urbanas do território ficaram sobre a influência de uma Ilha de frescor, alguns eixos urbanos não apresentaram diferença de temperatura com relação aos ambientes rurais, principalmente no centro oeste do município ligados ao tipo de uso residencial horizontal e vertical de alto e médio padrão.

Figura 23. Carta sinótica da Marinha do Brasil à superfície para a passagem do sistema frontal.

Figura 24. Mapa da icu dinâmica e uso do solo para quinta data.

Análise dos componentes da sexta data

A carta sinótica de superfície da Marinha mostra que a sexta data, 19/09/2008, apresenta uma zona de confluência entre um sistema de baixa e outro de alta pressão sobre o continente na região do estado de São Paulo. Um sistema frontal encontra-se estacionário entre o extremo norte do Espírito Santo e o sul da Bahia, o que indica para área de estudo uma situação pós-frontal.

Na investigação para a área de trabalho, foi indentificado que no dia 15/09/2008 ocorreu a passagem de uma frente fria. Neste dia ocorreu a formação de um sistema frontal no sudeste Brasileiro, o qual estava sob a influência de dois centros de baixa pressão atmosférica. A frente estacionária segundo a carta de superfície para a data estava entre o leste de São Paulo e o litoral sul do Rio de Janeiro (Figura 25).

A temperatura do ar para o horário do imageamento girou em torno de 18°C com UR de 52%; já média diária foi de 14,8°C com máxima de 20,7°C e mínima de 8,9°C, portanto com amplitude de 11,8°C. Nos dias anteriores a média diária ficou em torno de 13°C e as mínimas foram próximo a 11°C para os dias após a passagem da frente fria. Um dia antes da passagem do sistema frontal a precipitação registrada foi de 13 mm, enquanto que nos seguintes até a data da imagem não foram registradas pacandas de chuva. A velocidade e direção do vento de 0h às 8 horas apresentou predominância de 1,94m/s⁻¹ na direção leste e entre 8h e 10h apresentou valor de 4,55m/s⁻¹ na direção nordeste.

A configuração territorial das ilhas de calor urbana do município de São Paulo para a data em questão apresentou a mesma distribuição entre a classificação termal e os padrões de uso do solo que a da data anterior. Além do mais, as duas registraram formação de um sistema frontal como fator determinante da configuração da ICU (Figura 26).

Figura 25. Carta sinótica da Marinha do Brasil para a sexta data, registro da passagem de frente fria dias antes.

Figura 26. Mapa de uso do solo e ICU dinâmica para a sexta data

Análise dos componentes da sétima data

A carta sinótica de superfície da Marinha para a sétima data, 18/08/2008 indica um centro de baixa pressão que atua a leste de São Paulo em confluência com a ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul). Ao leste e sul do oceano Atlântico ocorre a formação de uma família de frente frias. No dia 15/08/2008, diante de condições sinóticas muito parecidas, houve a formação de um sistema frontal no litoral e porção centro-leste do continente paulistano, o que registra a passagem de uma frente para a área de estudo (Figura 27).

Os dados de campo indicam que um dia antes da passagem do sistema frontal houve registro de precipitação de 3,1 mm, nos dias seguinte até a data do imageamento não houve registro de pancadas de chuva. A temperatura do ar para a passagem do satélite foi de 24,8°C, a média diária foi de 20°C com mínima de 12,7°C e máxima de 29°C. A umidade relativa para as 10h foi 48%, enquanto que a média foi de 60,35 com máxima de 90% e mínima de 29%.

A velocidade e direção do vento para as primeiras quatro horas do dia foram de 0,27 m/s⁻¹ na direção leste, em seguida houve um longo período de calmaria e durante o intervalo entre 5h e 8h a velocidade média foi de 0,5 m/s⁻¹ na direção sul e entre 8h e 10h houve vento na direção leste e nordeste com velocidade média 1,5 m/s⁻¹.

A configuração territorial dos valores de temperatura da ICU, segundo a classificação termal para a data em questão não apresentou formação de uma ICU forte; a ICU moderada predominou em quase metade de toda extensão da área urbana e abrangeu diversos padrões de uso do solo. A Ilha de frescor formou uma simbiose com a moderada e apresentou maior proporção no extremo leste e na região centro oeste do território com predominância de uso do solo ligado aos diversos padrões residenciais, próximas aos limites urbanos. Estas apresentaram a formação da Ilha de frescor forte, ou seja, sem significativa diferença de temperatura quando comparadas aos ambientes rurais, o uso referente a estas foram as áreas verdes e parques (Figura 28).

Figura 27. Carta sinótica à superfície da Marinha do Brasil para sétima data.

Figura 28. Mapa de ICU dinâmica e uso do solo do município de São Paulo para a setima data

Análise dos componentes da oitava data

A carta sinótica de superfície da Marinha para a sétima data, 01/09/2007 registrou a atuação de um centro de baixa pressão sobre o continente em confluência com o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), no litoral sudeste do Brasil (Figura 29).

Os dados de campo revelam que para o horário do imageamento do satélite a temperatura do ar estava em 23,2°C, a média diária foi de 20,4°C com máxima de 29,4°C e mínima de 13,4°C. A umidade relativa do ar registrou 57% para o mesmo horário, enquanto a velocidade e direção do vento seguiram dois padrões, o primeiro no período foi de 0 a 8 h com velocidade média de 0,55m/s⁻¹ na direção leste, no intervalo das 8 às 10h o vento atingiu 2,22m/s⁻¹ e 3,05ms/⁻¹ , o que caracteriza ventos fortes para o momento do imageamento.

A Ilha de Calor Urbana forte ficou concentrada no centro e alguns eixos do sul e sudeste do território, conforme a presença do tipo de uso do solo ligado a Armazéns/Indústria, comércio e serviços.

A Ilha de Calor moderada apresentou uma diversa ocupação do território, pois abrange diversos tipos de padrões de uso do solo em várias áreas da mancha urbana municipal. Enquanto isso, as Ilhas de Frescor apresentaram pouca expressão territorial, ficam restritas às áreas verdes referentes a unidades de conservação e parques e aos padrões residenciais de alto padrão tanto vertical quanto horizontal. (Figura 30).

Figura 30. Mapa de ICU dinâmica e uso do solo no município de São Paulo para a oitava data.

A limitação da análise se encontra no fato de apenas ser investigado a influência do tempo atmosférico correspondente ao momento do imageamento do satélite Landsat - 5, sensor TM. Este ocorreu para as nove datas medidas aproximadamente às 10h da manhã; desta forma, nesse estudo apenas são analisadas as configurações espaciais da Ilha de Calor do período diurno e em condições de céu limpo.

A seleção das imagens no catálogo do INPE seguiu os critérios de melhor fator de visibilidade do céu (ausência de nuvens) e segundo a literatura os meses do ano em que a Ilha de Calor Urbana é mais expressiva na Região Metropolitana de São Paulo, ou seja, os do segundo semestre.

A análise das condições sinóticas referentes aos tipos de tempo relacionados às imagens, não permite conclusões comparativas com muitas especificidades, visto que as mesmas abrangem duas estações do ano (inverno e primavera) com diferentes quantidades de radiação solar global a influenciar os valores de temperatura, já que quase todas as imagens são dos meses de agosto e setembro.

As análises das datas apresentadas e descritas levaram a identificação de três diferentes grupos segundo as condições de tempo. Foram identificados a influência de anticiclones estacionários, depressões frontais e atuação de sistemas de baixa pressão continentais, além de atuação de cristas.

O primeiro grupo apresenta duas datas 28/09/2011 e 28/11/2010; a primeira data apresentou um intenso domínio da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS); o núcleo desta está abastante a leste no oceano, a mesma apresenta forte influência sobre todo o litoral sudeste e nordeste do Brasil.

A segunda data do mês de novembro apresenta a influência de um centro de alta pressão (anticiclone) muito próximo ao litoral do sudeste do Brasil. A norte e sul destes, duas cristas se formam no continente na altura dos estados da Bahia e do Rio Grande do Sul.

Os anticiclones impedem o transporte de umidade do oceano para a atmosfera continental o que garante o predomínio de tempo seco. Os mesmos atuam como sistemas de bloqueio atmosférico, pois impedem o avanço dos sistemas frontais. Seu movimento impede a formação de nuvens e desta forma eles garantem um céu limpo com pouca umidade e altas temperaturas devido ao

aquecimento livre da radiação solar. A presença de cristas proporciona em um prazo mais curto condições de tempo bastante parecidas.

A conformação territorial da Ilha de Calor Urbana apresentou expressão máxima diante das condições anticiclônicas; o primeiro caso refere-se a setembro de 2011 onde o centro da alta pressão estava mais distante do que o da segunda data, com isso as temperaturas foram um pouco mais amenas e o gradiente da classificação termal mostrou-se extremamente heterogêneo, o que possibilitou o estabelecimento dos fatores intraurbanos que influenciam a formação da Ilha de Calor Urbana.

A segunda data referente a novembro de 2010 mostrou-se superaquecida devido a maior proximidade com o núcleo de baixa pressão combinado com as duas cristas, a mesma também recebeu maior quantidade de radiação global $29,10 \text{ MJ.m}^{-2}$ com relação a primeira data que foi de $21,42 \text{ MJ.m}^{-2}$, justifica-se pela diferença do ângulo de inclinação da terra em relação ao sol aliado às condições do tempo atmosférico. O conjunto desses fatores justifica a maior expressão territorial da ICU forte na segunda data.

Para esta houve um total domínio da Ilha de Calor forte sobre toda área urbana; o gradiente da classificação termal apresentou pouca heterogeneidade espacial e, devido ao superaquecimento ficou mais evidente a relação entre as condições térmicas das áreas verdes e urbanas, o que ocultou os fatores intraurbanos do uso do solo (Figura 31).

Figura 31. Mapa da ilha de calor forte e frescor para primeira situação sinótica.

A segunda situação sinótica identificada é caracterizada pela convergência entre ciclones e anticiclones, com a isóbara pertencente à área de estudo com o valor de pressão mais próximo ao centro da baixa do que da alta.

Para a data 16/08/2007, dois centros de baixa pressão, um atuante no continente e outro no oceano a leste, estão em confluência com a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e outro anticiclone presente na Argentina. A isóbara que passa pelo território municipal indica um gradiente de pressão de 1020 hPa, ou seja, mais próximo ao centro de baixa que é de 1014 hPa do que ao centro da alta que é de 1044 hPa; contudo as condições anticiclônicas são predominantes no tempo meteorológico.

Para a data 01/09/2007 a carta sinótica indica que sobre o Estado de São Paulo há um centro de baixa pressão a leste no oceano em confluência com dois anticiclones, o que proporciona a formação de uma crista. Esta indica condição de tempo sem nuvens, seco e com temperaturas mais elevadas.

A carta do tempo sinótica indica que a área de estudo está em um ponto de confluência entre um centro de baixa pressão continental e a Alta Subtropical do Atlântico Sul, que se expande pelo litoral nordeste e sudeste do Brasil. Contudo, as condições de tempo anticiclônicas predominam possibilitando o céu limpo.

Para as três situações de tempo atmosférico o comportamento da distribuição territorial da classificação térmica foi idêntico. As condições sinóticas das datas mostraram que as isóbaras se aproximavam dos valores dos centros de baixa, mas como estavam em confluência com as altas as quais os centros estavam distantes, possibilitaram condições de céu claro com um menor aquecimento quando comparadas às primeiras datas, como se pode observar na Figura 33.

Figura 32. Mapa da ICU forte e Ilha de Frescor para a segunda situação sinótica.

As três datas referentes aos anos de 2008 e 2009 marcam a terceira situação sinótica. Elas são referentes o período do inverno e demonstraram, segundo as cartas e o boletim sinótico, condições de tempo pós-frontal. Foi identificada para as datas a formação de uma depressão frontal, com passagem de uma frente fria pelo território municipal e todas seguiram na direção leste para o oceano Atlântico.

Um dia antes da passagem das frentes, ou alguns poucos dias, ocorreu registro de pancadas de chuva para as três datas e em uma delas houve registro de forte precipitação diária com valores maior do que 35mm, o que indica a alta velocidade do jato.

As cartas para os dias exatos aos do imageamento mostram diferentes influências de fatores sinóticos atuantes para cada data. Contudo a situação pós-frontal trouxe queda de temperatura e aumento da umidade e com isso uma aniquilação da formação de microclimas locais. Os valores de temperatura quando comparados a área rural, variaram no máximo 5°C em temperaturas da superfície, ou seja, uma expressão de calor mínima em relação aos ambientes verdes. A data que apresentou maior expressão da Ilha de Calor Moderada foi a que teve menor registro no valor de precipitação, o qual ficou em torno de 3mm, enquanto que as demais apresentaram 35 e 13 mm, conforme se depreende da Figura 34.

Figura 33. Mapa da Ilha de Frescor e Calor moderada para a terceira situação sinótica.

Para a nona data de análise selecionada foi indentificado o efeito de um ar frio que se deslocou de uma depressão frontal formada na região Sul do Brasil e passou pela RMSP. No momento extato de sua passagem o satélite Landsat 5 imageou a superfície. Através da medição da temperatura da superfície e da sobreposição dos dados realizada em SIG, foi possível criar uma apresentação cartográfica do efeito

que o ar frio promoveu na amenização das altas temperaturas e consequentemente na redução da Ilha de Calor Urbana, conforme se percebe na figura 35.

Figura 34. Mapa para a data de passagem 24/10/2009 o qual demonstra o efeito do ar frio sobre os padrões de temperatura da superfície.

O que intermedia a relação entre as condições sinóticas do clima regional favoráveis a formação da Ilha de Calor Urbana e sua contígua distribuição heterogenea da classificação termal é o balanço de energia, ou seja, o montante de diferença entre os fluxos de calor latente e o sensível para cada tipo de cobertura presente no solo urbano.

A Ilha de Calor Urbana, o Uso do Solo e a Distribuição da Vegetação

A primeira data em análise a qual está sobre influência da ASAS, demonstrou maior heterogeneidade territorial das temperaturas, o que proporciona uma melhor leitura da relação que as condições do uso e cobertura do solo possuem na alteração do campo térmico urbano. As análises realizadas relacionaram a classificação térmica com os padrões de uso do solo, no entanto é necessário avaliar as condições de cobertura do mesmo, ou seja, verificar como a quantidade de vegetação e sua distribuição espacial contribuem para determinar a conformação territorial do fenômeno da Ilha de Calor Urbana no município de São Paulo e, por fim, interrelacioná-la com os padrões de uso do solo, para tal foi selecionada a primeira data referente ao dia 28/09/2011.

Temperatura da superfície

O gradiente de temperatura da superfície medido através da banda termal do satélite Landsat-5 sensor TM apresentou os menores valores espaciais em torno de 17°C, estes estão concentrados nos limites do extremo norte (Serra da Cantareira), extremo leste (Parque do Carmo) e ao extremo Sul (Área de Preservação Permanente Capivari - monos e Bororé – Colônia). Os distritos mais representativos são Parque do Carmo (31), José Bonifácio (50), Marcilac (51), Parelheiros (52) e Ipiranga (89). Ver Figura 35.

Os valores intermediários, ou seja, aqueles que estão entre as máximas e as mínimas apresentaram variação entre 20 e 25°C, estão predominantemente concentrados no centro oeste e em algumas porções do sul do território municipal. Os distritos mais representativos são Butantã (9), Consolação (16), Jardim Paulista (21), Moema (26), Morumbi (28) e Vila Andrade (44). Ver Figura 35.

Os maiores valores de temperatura da superfície medidos se apresentaram maiores do que 27°C. Estes formaram um anel em torno da área centro oeste do território do município com uma grande ramificação para a área sudeste. Os distritos mais representativos são Aricanduva (3), Brás (7), Cambuci (15), São Mateus (85), Sapopemba (86) e São Lucas (87). Ver Figura 35.

Figura 35. Mapa da Temperatura da Superfície para o Município de São Paulo - SP.

Índice de Área Foliar

A distribuição espacial do índice de vegetação indica três tipos de variação na quantidade de biomassa presente no território municipal. A primeira foi denominada de cinturão verde, a segunda corresponde às áreas urbanas vegetadas e a terceira às áreas urbanas com ausência de vegetação.

O município apresenta uma forte escassez de ambientes com presença espacialmente representativa de vegetação em sua área urbana, de forma que a mancha urbana é predominantemente dominada por valores de zero ou muito próximos a zero de biomassa vegetal, o que os distingue dos limites extraurbanos, os quais apresentam elevadas concentrações de vegetação (Figura 36).

Cinturão Verde: os valores variam entre 0,39 e 0,83, apresenta a caracterização de ambientes periféricos fora dos limites da área urbana, possui extensas áreas verdes com vegetação que varia entre pomares, mata atlântica terciária e campos abertos interceptados por vegetação arbórea e arbustiva.

Ao extremo sul o cinturão verde abrange os distritos de Grajaú (95), Parelheiros (52) e Marilac (51), outro eixo no extremo leste abrange Iguatemi (83), Cidade Tiradentes (82), Guaianazes (81), José Bonifácio (50) e Parque do Carmo (31). O último trecho corresponde ao extremo norte respectivo a Anhaguera (63), Perus (64), Jaraguará (66), Brasilândia (67), Cachoeirinha (65), Mandaqui (68) e Tremembé (69), com sua maior área pertencente a Serra da Cantareira (Figura 36).

Áreas Urbanas Vegetadas: alguns poucos espaços dentro da extensa mancha urbana da cidade de São Paulo apresentam um intermediário e elevado padrão de quantidade de biomassa. Os valores predominam entre 0,01 e 0,24 com alguns trechos com variação entre 0,39 e 0,51 de biomassa vegetal, a localização predomina na zona oeste e trechos da zona sul. A configuração predomina sobre os seguintes distritos: Alto de Pinheiros (1), Perdizes (33), Consolação (16), Pinheiros (29), Butantã (8), Jardim Paulista (21), Morumbi (28), Itaimbibí (19), Moema (26), Santo Amaro (36), Vila Andrade (44) e Raposo Tavares (57). Ver Figura 36.

Áreas com Ausência de Vegetação: área urbana do município de São Paulo mostrou-se muito pobre em relação à presença de grandes valores da quantidade de biomassa vegetal por pixel medido, houve predomínio do valor zero com algumas interseções espaciais que variam entre 0,01 e 0,24. O seu foco é na região central da cidade que abrange os distritos da Sé (39), Santa Cecília (38), Liberdade (24), Mooca (27) e Bom Retiro (6). No eixo nordeste encontra-se Vila Medeiros (27), Vila Maria (72) e Vila Guilherme (47), a sudeste Sacomã (90) e Ipiranga (89) e a leste Água Rasa (2), Vila Prudente (88), São Lucas (87) e Sapopemba (86). Ver Figura 36.

Figura 36. Mapa do Índice de Área Foliar do Município de São Paulo – SP.

Classificação Térmica

A análise da temperatura da superfície do município de São Paulo, medida através de sensores remotos, nos permitiu estabelecer três diferentes padrões de classificação, são elas: a Ilha de Calor Forte, Ilha de calor Moderada e Ilha de Frescor. Estas representam a variação da intensidade do gradiente de variação da temperatura da superfície, entre os ambientes rurais e as áreas urbanas do município de São Paulo – SP. A localização de cada eixo das Ilhas de Calor e Frescor Urbanas está devidamente numerada nos próximos mapas.

A Ilha de Calor Forte apresenta o coeficiente da diferença de temperaturas da superfície superior a 8°C em relação aos ambientes rurais. Essas bolhas de calor apresentaram valores, em geral, maiores do que 27°C. Há formação de um extenso arquipélago de calor, o qual é composto por um conjunto de seis Ilhas de Calor Urbanas Fortes, distribuídas em eixos que são compostos por conjuntos de distritos. Ver figura 37.

Eixo 1: localizado a sul do Rio Tietê, abrange o norte do distrito da Lapa além de Vila Leopoldina, Jaguaré, Barra Funda e Pari.

Eixo 2: localizado no centro urbano do município corresponde aos distritos de Santa Cecília, Sé, Brás, Cambuci, Mooca e Belém.

Eixo 3: localizado no sudeste é composto por Ipiranga, Sacomã e Cursino.

Eixo 4: localizado na zona leste é formado por Vila Prudente, São Lucas, Sapopemba, Arincanduva, São Mateus e São Rafael.

Eixo 5: localizado no extremo sul da área urbana, a norte dos grandes corpos de água (reservatórios) abrange as proximidades do Rio Pinheiros Santo Amaro e em seguida Jardim São Luís, Capão Redondo, Campo Limpo, Socorro, Campo Grande, Cidade Ademar e Jabaquara.

Eixo 6: localizado na zona norte compreende o leste da Vila Medeiros, o sul da Vila Maria e a Vila Guilherme.

As Ilhas de Calor Moderadas correspondem ao delta de temperatura com valores intermediários que variam entre 5°C e 7°C de temperatura da superfície, em relação aos ambientes rurais, as temperaturas da superfície para estas variaram entre 23°C e 25°C e apresentaram quantiguidade espacial em três diferentes eixos (Figura 38).

Eixo 7: Localizado na zona norte abrange os distritos de Tucuruvi, Perus, Jaraguá e Anhaguera.

Eixo 8: Localizado na zona leste do município, no trecho mais a nordeste próximo ao Rio Tietê, é composto polos distritos da Penha, Ponte Rasa, Vila Matilde, Lajedo e Itaquera.

Eixo 9: Localizado no extremo sul e extremo oeste da área urbana municipal, próximo aos reservatórios de água, compõe os distritos de Jardim Ângela e Cidade Dutra no sul e Raposo Tavares e Rio Pequeno ao oeste.

A Ilha de Frescor Urbana corresponde à formação de uma extensa área, a qual forma um oásis térmico em meio a quentes e condensadas áreas urbanas, e está localizada no centro oeste e sul do território municipal. As temperaturas da superfície para esta variaram entre 0°C e 4°C, em relação aos ambientes rurais. Tais números revelam uma variação mínima se comparada ao total do gradiente medido. Os valores de temperatura da superfície variaram, no geral, em torno de 20°C a 23°C (Figura 38).

Eixo 10: Localizado no centro oeste e sul do município, os principais distritos que formam esse núcleo são: Jardim Paulista, Pinheiros, Consolação, Perdizes, Alto de Pinheiros, Butantã, Morumbi, Vila Mariana e Vila Andrade.

A Classificação Térmica e a Cobertura do Solo

Para análise da cobertura do solo, foi utilizado o Índice de Área Foliar que possibilitou a avaliação espacial da distribuição da biomassa vegetal pelo território do município de São Paulo – SP. A sobreposição da classificação térmica sobre o IAF possibilitou as seguintes avaliações:

As Ilhas de Frescor Urbanas apresentaram relação espacial com as áreas urbanas vegetadas, citadas anteriormente. Tais espaços apresentaram variação numérica do valor de biomassa vegetal entre 0,24 e 0,66.

A análise comparativa detalhada entre os valores de biomassa vegetal para as Ilhas de Calor Moderadas e as Fortes revelou que a maior concentração da vegetação diminui a intensidade do fenômeno para o município estudado. Os padrões espaciais da cobertura vegetal demonstraram ser uma das variáveis responsáveis pela conformação espacial das Ilhas de Frescor e Calor Urbanas. Ver Figura 37.

Figura 37. Mapa do índice de área foliar e a classificação termal do município de São Paulo – SP.

A classificação térmica e o uso do solo

A relação espacial entre a classificação termal das temperaturas da superfície e os padrões de uso do solo é muito complexa para ser estabelecida apenas pela análise gráfica do *layout* de mapa. Estimamos que a relação entre ambas as variáveis exista, porém não se apresenta de forma linear, visto que dentro de um padrão de classificação definido para uma escala de 1:246.000 há bastante heterogeneidade dos tipos de coberturas de superfície. Ver Figura 38.

Figura 38. Mapa do Uso do Solo e Classificação Termal do Município de São Paulo-SP

Para melhor compreender a correlação entre a classificação térmica, a cobertura do solo e o tipo de uso realizado sobre o mesmo, os dados medidos e coletados foram tabulados segundo a classificação das Ilhas de Calor e Frescor Urbanas

Os valores do IAF para as Ilha de Calor Forte variaram entre 0,0 e 0,01, ou seja, com quase ou total ausência de biomassa vegetal, algumas poucas exceções espaciais apresentaram valores de 0,38. Os usos predominantes foram os de armazéns/indústria, comércio e serviços; Comércio e serviços além dos Habitacionais de alto, médio e baixo padrão com ausência de vegetação. Ver Tabela 5.

Tabela 5. Tabulação da Correlação entre a ICU forte, IAF e o uso do solo:

Ilha de Calor Forte			
Eixos	Uso do Solo	IAF	Distritos
1, 2, 3, 5 e 6	Armazéns/Indústria, comércio e serviços	0,0 - 0,01	Jaguará, Vila Leopoldina, Lapa, Barra Funda, Brás, Belém, Cambuci, Mooca, Ipiranga, Santo Amaro, Campo Grande e Socorro.
1 e 2	Comércio e serviços	0,0 - 0,01	A totalidade da Sé e alguns trechos do Brás, Vila Guilherme e Barra Funda.
4 e 5	Residencial horizontal de baixo padrão	0,0 - 0,01	Capão Redondo, Jardim São Luís, São Rafael, São Mateus, Sapobempa
3, 4, 5 e 6	Residencial horizontal de médio e alto padrão	0,0 - 0,38	Socorro, Jabaquara, Cursino, Sacomã, Água Rasa, Vila Prudente, São Lucas e Vila Medeiros

Em meio às condensadas áreas urbanas, a Ilha de Calor moderada justifica-se por apresentar valores de biomassa vegetal mais elevados em relação à forte, sua variação predominou entre 0,38 e 0,51. O tipo de uso do solo predominante para tal padrão de classificação foram os Residenciais horizontais de alto, médio e baixo padrão. Ver Tabela 6.

Tabela 6. Tabulação da Correlação entre a Ilha de Calor Moderada, IAF e uso do solo:

Ilha de Calor Moderada			
Eixos	Uso do Solo	IAF	Distritos
8 e 9	Residencial horizontal de médio e alto padrão	0,01 - 0,38	Ponte Rasa, Penha, Cangaíba, Ermelino Matarazzo, Fraguesia do Ó, Limão, Casa Verde e Pirituba
9	Residencial horizontal de baixo padrão	0,0-0,51	Itaim Paulista, Itaquera, Lajedo, Vila João, Jardim Helena, Cidade Dutra, Rio Pequeno e Raposo Tavares.

A Ilha de Frescor Urbana apresentou elevada concentração de vegetação. Os padrões de uso do solo mais representativos para a tal classificação foram os Residencial vertical de alto/médio padrão e Residencial / comércio e serviços. Para as áreas residenciais os valores de IAF variaram entre 0,01 e 0,66, enquanto que para os ambientes vegetados o índice ficou entre 0,39 e 0,83. Ver tabela 7.

Tabela 7. Tabulação da Correlação entre a Ilha de Calor Urbana, IAF e o uso do solo.

Ilha de Frescor Urbana			
Eixos	Uso do Solo	IAF	Distritos
10	Residencial vertical de alto/médio padrão	0,0 - 0,66	Vila Andrade, Itaim Bibi, Moema, Saúde, Vila Mariana, Liberdade, Perdizes, Tatuapé, Consolação e Santana.
10	Residencial comércio e serviços	0,01– 0,38	Pinheiros, Liberdade, Pirituba, Jardim Paulista e Itaim Bibi

A pouca presença ou total ausência de vegetação apresentou-se como a principal causa da distribuição espacial e intensidade da Ilha de Calor Urbana. O uso do solo que estabeleceu melhor relação espacial com o fenômeno foi o de armazéns/Indústria, comércio e serviços, ou seja, a grande presença de asfalto, concreto e telhados de Zinco, Amianto e Alumínio de tais ambientes permitem uma maior propagação e armazenamento de calor, o que eleva a diferença de temperatura da superfície em mais de 8°C com relação aos ambientes rurais.

A principal limitação metodológica da presente análise está na variedade dos tipos de cobertura analisados, são contemplados apenas análises das áreas com diferentes valores de biomassa vegetal e aquelas com ausência desta. De forma que outros dados de cobertura como porcentagem de concreto, asfalto e os tipos dos telhados não foram contemplados nas análises. O motivo de tal restrição foi a inexistência dos dados nas escalas dos mapeamentos, aqui adotados, desta forma a análise comparativa entre os tipos de cobertura do solo e a temperatura da superfície não foi contemplada totalmente, o que dificultou o estabelecimento de relações lineares dentro da análise espacial.

Avaliação do Campo Térmico dos Parques Públicos de Lazer

Os parques públicos de lazer possuem uma função de extrema importância nos ambientes urbanos, pois caracterizam-se como um veículo de utilização pública destinado a promover uma melhor qualidade de vida aos cidadãos. Em meio a condensadas áreas urbanizadas esses recortes territoriais quase sempre são destinados a uma maior concentração de áreas verdes com veículos de lazer, cultura e equipamentos esportivos.

A maior concentração de vegetação proporciona a formação de microclimas com temperaturas mais próximas de atingir os padrões de conforto térmico ambiental, portanto durante dias quentes e eventos extremos de calor os mesmos podem se tornar oásis térmicos em meio as Ilhas de Calor Urbanas. Para que tal característica seja agregada aos ambientes dos parques, é necessário que a predisposição de diferentes tipos de cobertura do solo esteja planejada de forma a proporcionar a criação de microclimas com temperaturas mais amenas em relação aos arredores urbanos.

A avaliação da relação entre a paisagem vertical do território dos parques, com seus fragmentos espaciais e os indicadores do campo térmico, foi possível através da combinação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Foram combinadas ortofotocartas de alta resolução com uma imagem do satélite landsat-5 sensor TM, processada pelo modelo SEBAL e a partir deste foram calculados quatro índices, são eles: albedo da superfície, saldo de radiação à superfície, fluxo vertical de calor sensível e fluxo de calor latente.

Através da ortofotocarta os padrões de cobertura do solo indentificados foram vetorizados e organizados em layout de mapa de forma a possibilitar a análise comparativa dos dados. Cinco diferentes padrões foram indentificados, são eles: corpos de água, concreto, asfalto, gramíneas e vegetação arbórea.

O primeiro indicador analisado é o albedo da superfície o qual corresponde à quantidade de energia solar refletida para atmosfera pela superfície em porcentagem. Este está condicionado as características físicas da cor do material e seu brilho, de forma que quanto mais escuro for o corpo menor será o albedo, ou seja, máxima absorção de energia eletromagnética; e quanto mais claro for o corpo,

maior será o albedo, com relação inversa em relação à absorção de energia. Para a análise comparativa foram utilizados os recortes da ortofotocarta que apresentam as características de cor para cada tipo de cobertura.

O segundo indicador avaliado é o saldo de radiação, este indica a quantidade de energia que sobra à superfície, resultante dos processos de troca na interface superfície – atmosfera. Em seguida, o terceiro indicador que correspondeu ao calor sensível, ou seja, a quantidade de energia disponível para o aquecimento do ar entre 1m e 2m de altitude em relação ao solo. O ultimo indicador avaliado é o fluxo de calor latente que corresponde à quantidade de energia dissipada nos processos de troca de estado físico da água, o que dá uma ideia da distribuição da umidade do ar. Todas as últimas três variáveis foram comparadas com o mapa de cobertura do solo para cada parque analisado.

Foram avaliados o Parque Villa Lobos localizado no distrito de Alto de Pinheiros, na zona oeste do município e o Parque Ibirapuera localizado no distrito de Vila Mariana, na zona sul. Ambos correspondem ao padrão de uso do solo de residenciais horizontais e verticais de alto e médio padrão. O fato de os dois parques apresentarem características semelhantes no que se refere ao padrão de uso do solo e terem as mesmas características em relação ao oferecimento dos serviços de lazer, cultura e esporte no município os tornou representativos para avaliar de forma comparativa a disponibilidade espacial das diferentes coberturas do solo e suas respostas no campo térmico ambiental.

Tal perspectiva de análise comparativa permite não apenas responder qual o grau e o limite da relação estudada, mas também contribui para o aprimoramento do planejamento ambiental urbano com vista na melhoria da qualidade térmica dos ambientes. A construção desse conjunto de conhecimentos específicos apresenta grande capacidade de impulsionar políticas públicas de meio ambiente, principalmente nos espaços urbanos. A data de análise selecionada para essa etapa da investigação foi 28/09/2011, esta obteve os melhores valores referentes à heterogeneidade territorial do gradiente térmico.

Albedo da Superfície

Para o parque Ibirapuera o valor mínimo foi menor que zero, o máximo atingiu 0,27, enquanto que a média foi de 0,028 com padrão de variação de 0,021. Ver figura 39.

Figura 39. Histograma do albedo da superfície para o Parque Ibirapuera , eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

Para o parque Vila Lobos o valor mínimo 0,018 e o máximo foi de 0,1, a média foi de cerca de 0,05 com padrão de variação de 0,016. Ver figura 40.

Figura 40 Histograma do albedo da superfície para o Parque Villa Lobos, , eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

O parque Villa Lobos apresentou valores de albedo bastante elevados entre 0,03 e 0,09, para o tipo de cobertura referente a gramíneas intermediadas por concreto e asfalto. A porção do parque a qual apresentou maior concentração de vegetação de porte arbóreo apresentou menores padrões de albedo entre zero e 0,052.

O parque Ibirapuera apresentou menores valores de albedo da superfície, o mesmo tem 70% do seu território coberto por corpos de água e vegetação de porte arbórea. Os corpos de água presentes neste apresentaram valores menores entre 0,001 e 0,0234, ou seja, valores muito baixos, enquanto que a vegetação de porte arbórea apresentou valores indênticos aos do parque Villa Lobos (0,024 e 0,039), da mesma forma que a combinação entre concreto e asfalto (0,039 e 0,16) (Figura 41).

Figura 41. Mapa do albedo da superfície para o parque Ibirapuera e Villa Lobos.

Saldo de Radiação (Rn)

A análise estatística para o parque urbano Villa Lobos, que apresenta um total de 832 pixels, revelou valor mínimo de 687 W.m^{-2} , o máximo de 807 W.m^{-2} e média de 746 W.m^{-2} , o padrão de variação 24,7. Ver na Figura 42 o histograma do saldo de radiação.

Figura 42. Histograma dos valores de Rn para o Parque Villa Lobos, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

A análise estatística dos valores para o parque Ibirapuera, com um total de 1.597 pixels, apresentou o valor mínimo de 709 W.m^{-2} , máximo de 867 W.m^{-2} e média de 799 W.m^{-2} , com variação de 24,5 (Figura 43).

Figura 43. Histogram dos valores de Rn para o Ibirapuera, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

A análise comparativa entre os valores de Rn para os parques do Ibirapuera e o Villa Lobos e suas coberturas do solo demonstra que há uma resposta direta entre a distribuição dos diferentes padrões e a porcentagem de cobertura dos mesmos.

Para o Ibirapuera, há uma forte predominância de cobertura vegetal do tipo arborea equivalente a 60% da área total do parque, a qual apresentou valores mais altos do que 780 W.m^{-2} . O uso misto, com gramíneas, concreto e asfalto, corresponde a 25% da área, este apresentou valores menores do que 771 W.m^{-2} com pontos ainda menores de 735 W.m^{-2} equivalentes a concentrações de concreto. Os dois corpos de água equivalentes a lagos correspondem a 15% da área com os valores mais altos do que 811 W.m^{-2} .

O Villa Lobos possui 75% de sua área coberta por cobertura mista e predominante de gramíneas com asfalto e poucos pontos de concreto, o que corresponde aos baixos valores, menores do que 757 W.m^{-2} com alguns pontos onde os mesmos variam entre 580 e 735 W.m^{-2} , localizado no eixo central do parque. As áreas com vegetação de porte arboreo correspondem apenas a 25% da área do mesmo; no entanto, encontram-se demasiadamente fragmentadas e os valores são mais baixos do que os do Ibirapuera; apresentam-se menores que 752 W.m^{-2} com algumas manchas de valores mais altos acima de 780 W.m^{-2} , conforme Figura 44.

Figura 44. Mapa da relação entre cobertura do solo e R_n para os parques públicos Villa Lobos e Ibirapuera.

No tocante a análise comparativa das coberturas do solo das duas áreas de lazer públicas, a relação entre os dois tipos de cobertura vegetal, gramínea e arbórea com os valores de R_n , demonstram que uma grande área recoberta com grama e alguns resquícios de uso misto não altera positivamente o saldo de radiação em relação as áreas fortemente urbanizadas e áreas industriais. Por outro lado, a cobertura do solo por vegetação de porte arbóreo altera positivamente os valores de R_n , ou seja, as diferencia das áreas propícias a má qualidade térmica como as citadas anteriormente. Devido a maior presença de árvores e também de corpos de água o Ibirapuera apresentou $53 W \cdot m^{-2}$ ou 6% a mais no seu valor médio de R_n em relação ao Villa Lobos.

Fluxo de Calor Sensível (H)

Para o parque Villa Lobos, o valor mínimo foi negativo enquanto que o máximo foi de 594 W.m^{-2} , com média de 149 W.m^{-2} e padrão de variação de 127, conforme de observa na figura 45.

Figura 45. Histograma do H para o parque Villa Lobos, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

O parque Ibirapuera apresentou valor mínimo menor do que zero, com máximo de 635 W.m^{-2} , média de 149 W.m^{-2} e padrão de variação de 127 (Figura 46).

Figura 46. Histograma do H para o parque Ibirapuera, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

O parque Villa Lobos apresentou valores de H idênticos aos da Ilha de Calor Urbana de intensidade forte. A cobertura de gramíneas com concreto e asfalto apresentou valores maiores do que 300 W.m^{-2} , enquanto que a vegetação arbórea demonstrou ter entre 201 e 300 W.m^{-2} .

Para o parque Ibirapuera os corpos de água apresentaram valores entre 50 e 100 W.m^{-2} , enquanto que na vegetação arbórea os valores atingiram uma variação entre 50 e 250 W.m^{-2} . O padrão de cobertura que variou entre gramíneas, concreto e asfalto apresentou valores maiores do que 300 W.m^{-2} (Figura 47).

Figura 47. Mapa do H para o Parque Villa Lobos e Ibirapuera.

Fluxo de calor latente (LE)

O parque Villa Lobos apresentou valor mínimo de LE correspondente a $13,2\text{W.m}^{-2}$, enquanto que o máximo atingiu 569W.m^{-2} e a média foi de 349W.m^{-2} , o padrão de variação foi de 88,8 (Figura 48).

Figura 48. Histograma do Fluxo de calor latente para o parque Villa Lobos, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

O Parque Ibirapuera apresentou valor mínimo de 60 W.m^{-2} , enquanto que o máximo foi de 773 W.m^{-2} o valor médio atingiu 348W.m^{-2} e o padrão de variação ficou em 89. Ver figura 49.

Figura 49. Histograma do LE para parque Ibirapuera, eixo x= quantidade de pixels e eixo y= valores dos pixels.

O parque Villa Lobos possui 70% de seu território coberto por vegetação do tipo gramínea, intermediados por porções menores de asfalto e concreto, os valores de LE correspondentes foram entre 50 e 250 W.m⁻². Enquanto que a área com predomínio de vegetação arborea apresentou valores entre 301 a 350 W.m⁻² com alguns trechos de valores maiores que 351 W.m⁻².

O parque Ibirapuera apresenta relação inversa na proporção de cobertura, ou seja, tem 30% entre gramíneas, concreto e asfalto e os outros 70% com vegetação arborea com presença de corpos de água. Apresentou para o primeiro tipo de cobertura (gramínea) valores maiores do que 201 a 250 W.m⁻² e para o segundo grupo (vegetação arborea) valores maiores do que 351 W.m⁻². Ver Figura 50.

Figura 50. Mapa do fluxo de LE para o parque Ibirapuera e o Villa Lobos.

O parque Villa Lobos, apesar de ter quase todo o seu território coberto por vegetação, apresentou o balanço de energia indêntico ao de uma área de Ilha de Calor Urbana de intensidade forte, para a maior parte do seu território. Ao contrário deste o parque Ibirapuera, apresentou uma variação numérica dos seus componentes de radiação iguais aos de uma Ilha de Frescor Urbana.

A vegetação de gramínea apresentou altos valores de albedo e baixos valores do saldo de radiação, o que indica que esse tipo de vegetação tem pouca capacidade de reter energia eletromagnética. O montante de energia retida que foi em torno de 736 W.m^{-2} , 350 W.m^{-2} foi transformada em calor sensível e 250 W.m^{-2} em calor latente.

O parque Villa Lobos possui 70% de sua área coberta por gramíneas e se caracterizou como uma Ilha de Calor Urbana de intensidade forte, o que demonstra que tal tipo de cobertura, principalmente quando intermediada por trechos de concreto e asfalto, são ineficientes na mitigação da Ilha de Calor Urbana, ou seja, tem pouca capacidade de melhorar o conforto térmico ambiental.

A vegetação arbórea apresentou baixos valores de albedo, acompanhado de altos valores de saldo de radiação, ou seja, as mesmas armazenaram muita energia eletromagnética, com valores bem mais altos do que as gramíneas. Seu balanço de energia demonstrou que dos 830 W.m^{-2} armazenados, 450 W.m^{-2} foram convertidos em calor latente e 250 W.m^{-2} em calor sensível, o que demonstra seu forte potencial enquanto agente mitigador da Ilha de Calor Urbana.

O parque Ibirapuera apresentou cerca de 70% da sua área coberta por vegetação do tipo arbórea, acompanhadas de dois grandes corpos de água. Apesar da energia eletromagnética retida pelo mesmo ser bem superior em relação ao Villa Lobos, a maior parte da mesma é convertida em calor latente o que aumenta a capacidade de se obter um conforto térmico ambiental.

Conclusões

Os quadros descritos no estudo apontam para a importância da preservação das áreas de parque e unidades de conservação, visto que estas contribuem de forma significativa para a melhoria da qualidade ambiental térmica urbana. Além desta, a expansão do arboreto urbano e áreas verdes no geral é de demasiada necessidade, visto que os bairros com altos índices de biomassa vegetal, mesmo quando em meio a condessadas áreas urbanas apresentam características de uma Ilha de Frescor.

A direção e a velocidade do vento não mostraram efeito na distribuição da Ilha de Calor Urbana medida pelos sensores remotos. A maior condicionante da distribuição territorial da ICU foi a distância entre o centro do sistema de alta pressão e o continente, ou seja, quanto mais o centro estiver próximo ao continente maior será a intensidade e distribuição territorial da Ilha de Calor Urbana de intensidade forte e aliado a este está a quantidade de radiação solar global.

A confluência de um ciclone e um anticiclone gera certo transporte de umidade do oceano para a atmosfera continental, o que diminui a intensidade e distribuição territorial da ilha de calor urbana forte; porém a mesma ainda se mostra expressiva devido às condições de céu limpo impostas pelo anticiclone.

O uso e cobertura do solo urbano demonstraram uma relação espacial com a classificação termal aplicada nesse estudo. Contudo, a mesma só pode ser identificada para as influências sinóticas com forte atuação dos anticiclones, enquanto que durante a formação e passagem de uma depressão frontal a influência da superfície artificial urbana na criação de microclimas não muita expressiva.

O padrão de uso do solo ligado a Armazéns/Indústria, comércio e serviços localizados nas áreas de vales e centro do território municipal apresentou uma enorme quantidade de Ilhas de Calor Forte diante das condições de tempo anticiclônicas e da confluência de ciclone com um anticiclone. Nas condições de tempo pós-frontal o predomínio apresentou a formação de Ilha de Calor Moderada, ou seja, dentre todos os padrões foi a que mostrou melhor relação espacial com o

fenômeno. Para tal uso mesmo em condições adversas ainda é possível indentificar minúsculas e moderadas conformações espaciais do fenômeno.

Ao contrário da relação estabelecida pelo uso ligado a forte presença de Armazéns e Indústrias, o padrão Residencial vertical de alto e médio padrão e o Residencial, comércio e serviços, apresentaram para todas as datas os menores valores de temperatura com formação de Ilhas de Frescor com grande contiguidade espacial no centro oeste do município, e para a situação de maior aquecimento do solo a mesma ficou dividida entre áreas de frescor e ICU moderadas, ou seja, apresentou em todos os casos as melhores condições térmicas.

O padrão de cobertura ligado a parques e unidades de conservação apresentou predomínio de coberturas vegetacionais, o que as aproxima muito de ambientes extraurbanos. Independente dos fatores sinóticos condicionantes, tal tipo de uso apresenta excelentes condições térmicas, ou seja, podem ser chamadas de Ilhas de Frescor Fixas, em relação ao uso anterior o qual sofre forte variação espacial.

Os resultados analisados demonstram que o balanço de energia e sua interação com o uso do solo são variáveis secundárias que determinam a distribuição espacial da classificação térmica referente às Ilhas de calor e Frescor urbanas. A dinâmica do clima regional é o principal fator da interação das forças energéticas com a superfície, o transporte ou não de umidade do oceano para a atmosfera continental é um fator determinante na variação da Ilha de Calor Urbana.

Os valores calculados pelo modelo SEBAL para as três datas representativas da dinâmica territorial das Ilhas de Calor e Frescor Urbanas, indicaram que as datas que apresentaram menor ou nenhum transporte de umidade do oceano para a atmosfera continental apresentaram menor fluxo de calor latente e maior fluxo de calor sensível. O que por sua vez acarreta na intensificação da quantidade de calor disponível para o aquecimento do ar e aumenta a contiguidade de expressão territorial da Ilha de Calor Urbana de intensidade forte.

Para as condições de tempo onde o centro do sistema de alta pressão atmosférica estava mais distante do continente e que houve confluência com centros de baixa nos quais possibilitam maior transporte de umidade em condições de céu limpo. O balanço de energia apresentou maiores valores de fluxo de calor latente em

relação ao sensível, o que acarretou em proporções territoriais maiores para as Ilhas de Frescor Urbanas e Ilhas de Calor com intensidade moderada mais expressiva; e desta forma suprimiu a maior expressão da Forte, visto que nestas condições ficaram reduzidas a tipos de uso do solo específicos.

A dinâmica territorial da Ilha de Calor Urbana no município de São Paulo corresponde a interações entre as condições sinóticas, o uso e cobertura do solo e o balanço de energia. A condição sinótica é a variável que determina a possibilidade de ocorrência do fenômeno, uma vez que ela possibilita a interação entre o balanço de energia com o uso e cobertura do solo, o que confirma a veracidade da hipótese testada no presente estudo para o caso do município de São Paulo – SP.

O modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) foi desenvolvido inicialmente no intuito de possibilitar a gestão de recursos hídricos em escala regional em áreas agrícolas e baciais hidrográficas. As aplicações recentes do modelo para outras finalidades, inclusive o estudo de áreas urbanas, demonstrou que as variáveis geradas por este através do uso de imagens orbitais de diversos satélites, possuem uma ótima eficiência na distinção dos valores computados para diferentes padrões de uso e cobertura do solo.

O Índice de Área Foliar, temperatura da superfície, albedo da superfície, Saldo de Radiação, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente foram computados e utilizados no presente estudo como variáveis para explicar a conformação territorial da Ilha de Calor Urbana. Os resultados e análises comparativas com os padrões de uso do solo já determinados pela PMSP e dados de cobertura das ortofocartas, demonstraram que o modelo tem eficiente aplicação nos estudos das áreas urbanas, visto que apresenta distinção com resolução detalhada diante das variações de cobertura do solo e padrões de uso.

O vigente estudo apresentou uma nova possibilidade de aplicação do modelo, na avaliação do campo térmico dos parques públicos de lazer do município de São Paulo-SP. O balanço de radiação e de energia computados para tais ambientes demonstrou que o mesmo pode ser aplicado na avaliação do conforto térmico ambiental de espaços diversos, não só aqueles vegetados, mas também aqueles com predominância de uso antrópico.

O conhecimento discutido na revisão de literatura e abordagem teórica da tese, aliado ao conjunto de dados e relações estabelecidas ao longo do teste de hipótese chama a atenção para o desenvolvimento de estudos futuros sobre o fenômeno da Ilha de Calor Urbana, principalmente no município e Região Metropolitana de São Paulo.

É de extrema relevância o desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares que busquem entender a relação que a Ilha de Calor Urbana possui com outros fenômenos como a concentração de poluentes e gases atmosféricos, precipitação e o escoamento desta, alteração das amplitudes térmicas em escala de detalhe e possíveis consequências negativas na morbidade e mortalidade por doenças do aparelho circulatório.

Referências Bibliográficas

ALCOFORADO, M.J.; LOPES, A.; ANDRADE, H.; VASCONCELOS, J. Orientações climáticas para o Ordenamento em Lisboa. Relatório 4. Lisboa; Ed. Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa, 2006.

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

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.133, n.395, p.380-394, 2007.

ALVES, H P. F. Vulnerabilidade sócio-ambiental na metrópole paulistana: uma análise das situações de sobreposição espacial de problemas e riscos sociais e ambientais. Anais do XI Encontro da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional (ANPUR), Salvador-BA, maio de 2005.

AMORIM, M.C.C.T. Ilhas de calor em Birigui/SP. Revista Brasileira de Climatologia. Presidente Prudente. Ano 1. p 121-130, 2005.

AYENEW, T. Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands. Journal of Hidrology. Amsterdam. 279, p. 83-93, 2003.

ARAUJO R,V.; ALBERTINI M,R.; COSTA-DA-SILVA, A,I.; Suesdek, L.; Franceschi, N,C.; BASTOS, N,M.; KATZ, G.; CARDOSO, V,A.; CASTRO, B.C.; CAPURRO, M,L.; ALLEGRO, V,L. São Paulo urban heat islands have a higher incidence of dengue than other urban areas. Braz J Infect Dis 19(2):146–155. 2015.

AZEVEDO, T. R. O fluxo de calor gerado pelas atividades humanas no estudo climático da Região Metropolitana de São Paulo. TARIFA, J.R. e AZEVEDO, T. R.

(org.) Os climas da cidade de São Paulo: teoria e prática, Departamento de Geografia, FFLCH, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BARBARO, E.; Oliveira, A.P.; Soares, J.; Codato, G.; Ferreira, M.J.; Mlakar, P.; Bonar, M.Z.; Escobedo, J, F. Observational Characterization of The Downward Atmospheric Longwave Radiation at The Surface in The City of São Paulo. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 49, p. 2574-2590, 2010.

BARBOSA, H,P.; AMORIM, M,C,C,T. Clima Urbano em Presidente Prudente/SP: Diferenças Térmicas e Higrométricas Urbano/Rural em Episódios de Outono. *REVISTA GEONORTE*, Edição Especial 2, V.2, N.5, p. 220 – 232, 2012.

BARROS, H.R.; LOMBARDO, M.A. Calculation of the energy balance in the São Paulo City through the application of SEBAL using a satellite image Landsat-5/TM. In: São Paulo Spring School on Urban Climate at Tropical Regions, 2013, São Paulo. *Urban Climate at Tropical Regions: Observational and Modeling Features*. São Paulo: IAG.v. 1. p. 26-26, 2013.

BARROS, H. R. ; LOMBARDO, M. A. . Zoneamento Climático Urbano da Cidade do Recife: uma Contribuição ao Planejamento Urbano. *Geosp*, v. 33, p. 187-197, 2013.

BARROS, H. R. ; LOMBARDO, M. A. ; JESUS, B. L. P. A Relação entre Ilhas de Calor Urbana, Ocupação do Solo e Morfologia Urbana na Cidade do Recife. *Revista GeoNorte*, v. 2, p. 65-76, 2012.

BASTIAANSSEN, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. 272p. PhD. Tesis, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands, 1995.

BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M.A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part. 1: Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212-213, p.198-212, 1998.

BASTIAANSSEN, W.G.M.; PELGUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J.F.; ROENRINK, G.J.; VAN DER WAL, T.A. A remote sensing surface energy balance

algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p.213-229, 1998.

BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL – based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v.229, p.87-100, 2000.

BASTIANNSEEN, W.G.M.; S. ALI. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture Ecosystems & Environment*, vol. 94, 321-340, 2003.

BUECHLEY, R.W.; VAN BRUGGEN, J.; TRUPPI, L.E. Heat island = death island?. *Environmental Research*. V. 5.p. 85-92, 1972.

BRAGA, A.L.; ZANOBBETTI, A.; SCHWARTZ, J. The time course of weather-related deaths. *Epidemiology* .12:662–7, 2001.

BURKART, K.; SCHNEIDER, A.; BREITNER, S.; KHAN M.H.; KRAMER, A. The effect of atmospheric thermal conditions and urban thermal pollution on all cause and cardiovascular mortality in Bangladesh. *Environ Pollut*.v. 159.p. 2035–2043, 2011.

CATUZZO, H. Telhado Verde: Impacto positivo na temperatura e umidade do ar. O caso da Cidade de São Paulo. Tese defendida na Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. São Paulo, 2013.

CETESB. < <http://veicular.cetesb.sp.gov.br/operacao-inverno/> >. Acessado em 16/03/2014.

CHOW, W.L., ROTH, M. Temporal Dynamics of The Urban Heat Island of Singapore. *International Journal of Climatology*. Int. J. Climatol. 26. 2243–2260. DOI: 10.1002/joc.1364, 2006.

CODATO, G.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J.; ESCOBEDO, J.F.; GOMES, E.N.; PAI, A. D. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93.p. 57-73, 2008.

CONTI, J. B. São Paulo, a metrópole do trópico úmido. Cap.1. Geografias de São Paulo: representação e crise da metrópole/ Ana Fani Alessandri Carlos, Arivaldo Umbelino de Oliveira (Org)- São Paulo: Contexto, 2004.

CONTI, J.B. Crescimento urbano e mudanças climáticas. O Estado de São Paulo, "Suplemento Cultural" do jornal O Estado de São Paulo, 149, anoIII, P.3, 9/9/1979.

CONTI, J.B. Poluição e Urbanização. O caso de São Paulo, "Suplemento Cultural" do jornal O Estado de São Paulo, 107, ano 03, 19/11/1978.

CHOW, W.L., ROTH, M. Temporal Dynamics of The Urban Heat Island of Singapore. International Journal of Climatology. Int. J. Climatol. 26. 2243–2260. DOI: 10.1002/joc.1364, 2006.

COURALT, D.; SEGUIM, B.; OLIOSO, A. Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use mesoscale atmospheric models, In: ICID WORKSHOP ON REMOTE SENSING OF ET FOR LARGE REGIONS, 17 Sept, 2003.

DOLNEY, T.J.; SHERIDAN, S.C. The relationship between extreme heat and ambulance response calls for the city of Toronto, Ontario, Canada. Environmental Research, v. 101.p.94-103, 2006.

FERREIRA, M. J.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Diurnal variation in stored energy flux in São Paulo city, brazil. Urban Climate, v. 5.p. 36-51, 2013.

FERREIRA , M. J; OLIVEIRA, A. P. ; SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. Theoretical and Applied Climatology, v. 101. p. 9-19, 2010.

FERREIRA, M. J. ; OLIVEIRA, A. P. ; SOARES, J. ; CODATO, G. ; BARBARO, E.W. ; ESCOBEDO, J.F. Radiation balance at the surface in the city of São Paulo, Brazil: diurnal and seasonal variations. Theoretical and Applied Climatology, v. 107.p. 229-246, 2012.

FERREIRA, M. J.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. Theoretical and Applied Climatology, v. 101.p. 9-19. 2010.

GABRIEL, K.M.A.; ENDLICHER, W.R. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environ Pollut.*159: 2044-50, 2011.

GAFFIN, S.R.; ROSENZWEIG, C.; KHANBIL, V.R.; PARSHALL, L.; MAHANI, S.; GLICKMANI, H.; GOLDBERG, R.; BLAKE, R.; SLOSBERG, R.B.; HILLEL, D. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theor. Appl. Climatol.* 94: 1–11. DOI 10.1007/s00704-007-0368-3, 2008.

GAFFIN, S.R.; KHANBIL, V.R.; ROSENZWEIG, C. Development of a Green Roof Environmental Monitoring and Meteorological Network in New York City. Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, 2009.

GANESHA, M.; MURTUGUDDE, R.; IMHOFFM, M. A multi-city analysis of the UHI-influence on warm season rainfall. *Urban Climate.* V.6 .p1-23, 2013.

GIONGO, P.R. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2008.

GOGGIN, W.B.; CHAN E.Y.Y.; EDWARD, N.G.; REN, C.; Chen, L. Effect Modification of the Association between Short-term Meteorological Factors and Mortality by Urban Heat Islands in Hong Kong. *PLoS ONE* 7(6): e38551. doi:10.1371/journal.pone.0038551, 2012.

GOLDEN, J.S.; HARTZ, D.; BRAZEL, A.; LUBER, G.; PHELAN, P. A biometeorology study of climate and heat-related morbidity in Phoenix from 2001 to 2006. *International Journal of Biometeorology.* v. 52. p. 471-480, 2008.

GOMES, L,C,F.; SANTOS,C,A,C.; ALMEIDA, H, A. Balanço de Energia à Superfície para a Cidade de Patos-PB Usando Técnicas de Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física* V. 06, N. 01.015-028, 2013.

GRIMMOND, C.S.B.; ROTH, M.; OKE,T.R.; AU, Y.C.; BEST, M.; BETTS, R.; G. CARMICHAEL, G.; CLEUGH, H.; DABBERDT, W.; EMMANUEL, R.; FREITAS, E.; FORTUNIAK, K.; HANNA, S.; KLEIN , P.; KALKSTEIN, L.S.; LIU, C.H.; NICKSON, A.; PEARLMUTTER, D.; SAILOR, D.; and VOOGT, J. Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, V.1. p. 247-274, 2010.

HAJAT, S.; ARMSTRONG, B.; GOUVEIA, N.; WILKINSON, P. Mortality displacement of heat-related deaths: a comparison of Delhi, São Paulo, and London. *Epidemiology*.v. 16.p. 613-620, 2005.

HAFEEZ M. M. et al. Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: SIMPOSIUM ON GEOSPATIAL THEORY, PROCESSING AND APPLICATIONS,Ottawa, Anais... [s.n.], 2002.

HASHIZUME, M.; ARMSTRONG, B.; HAJAT, S.; WAGATSUMA, Y.; FARUQUE, A.S.G.; HAYASHI, T.; SACK , D.A. Association between climate variability and hospital visits for non-cholera diarrhoea in Bangladesh: effects and vulnerable groups. *International Journal of Epidemiology* .v.36. p.1030-1037, 2007.

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

IBGE. Disponível em: <
<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=355030&search=||infogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>>, acessado em 3 jun, 2014

LAAIDI, k.; ZEGHNOUN, A.; DOUSSET, B.; BRETIN, P.; VANDENTORREN, S.; EMMANUEL, G.; BEAUDEAU, P. The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environmental Health Perspectives* . v.120 . n. 2, 2012.

LIMA, M. R.; PINHEIRO, G. M.; MENDONÇA, F. Clima Urbano no Brasil : Análise e Contribuição da Metodologia de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. REVISTA GEONORTE, Edição Especial 2, V.2, N.5, p.626 – 638, 2012.

LYNN, B.H.; CARLSON, T.N.; ROSENZWEIG, C.; GOLDBERG, R.; DRUYAN, L.; COX, J.; GAFFIN, S.; PARSHALL, L.; CIVEROLO, K. A modification to the NOAA LSM to simulate heat mitigation strategies in the New York City metropolitan area. J. Appl. Meteorol. Climatol.v. 48.p.199-216, doi:10.1175/2008JAMC1774.1, 2009.

LUCENA, A. J.; FILHO, O.C.R.; PERES, L. F.; FRANÇA, J.R.A. A evolução da Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. REVISTA GEONORTE, Edição Especial 2, V.2, N.5, p.8 – 21, 2012.

LOMBARDO, M.A. Ilha de Calor nas Metrôpoles: O exemplo de São Paulo. São Paulo, 1985.

LOMBARDO, M. A.; CÂMARA, G.; PEREIRA, E.; TARIFA, J.R. Use of Infrared Images in the Delimitation of São Paulo's Heat Island, Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, May 9-13, Ann Arbor, Michigan, EUA, 1983.

MACHADO, A.J.; AZEVEDO, T.R. de. The spatial distribution of the surface energy balance from the orbital imagery and field observation. Revista do Departamento de Geografia, n. 19. p 81-91, 2007.

MARTINS, L. C.; LATORRE, O. M. R.; CARDOSO, M. R. A.; GONÇALVES, F. L.; SALDIVA, P. H. N.; BRAGA, A. L. F. Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil. Rev. Saúde Pública vol.36 no.1 São Paulo Feb. 2002.

MASTRANGELO, G.; FEDELI, U.; VISENTIN, C.; MILAN, G.; FADDA, E.; SPOLARE, P. Pattern and determinants of hospitalization during heat waves: an ecological study. BMC Public Health 7 (200), 8, 2007.

MCMICHAEL, A.J.; WILKINSON, P.; KOVATS, R.S.; PATTENDEN, S.; HAJAT, S.; ARMSTRONG, B.; VAJANAPOOM, N.; NICIU, E.M.; MAHOMED, H.; KINGKEOW, C.; KOSNICK, M.; O'NEILL, M.S.; ROMIEU, I.; RAMIREZ-AGUILAR, M.; Barreto, M.L., Gouveia, N., Nikiforov, B. International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHURM' project. *International Journal of Epidemiology* 37, 1121e1131, 2008.

MATZARASKI, A. Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*. 6:286 S. 2001.

MENDONÇA, J. C. et al. Estimacão da evapotranspiracão regional utilizando dados digitais orbitais do sensor Landsat 7 ETM+ no município de Campos dos Goytacazes, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 14. Porto Alegre, Anais... Porto Alegre, ABID. v.1.2004.

MILLS, D, M.; KALSTEIN, L. Estimating Reduced Heat-Attributable Mortality for an Urban Revegetation Project. *Second International Conference on Counter measures to Urban Heat Islands*, 2009.

MIZAREI, P.A; HAGHIGHAT, P. Pedestrian Ventilacion a System: A novel Approach to Mitigation Urban Heat Island. *Second International Conference on Counter measures to Urban Heat Islands*, 2009

MOHAMED, Y.A., W.G.M. BASTIAANSEN e H.H.G. SAVENIJE: Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. *Journal of Hydrology*, vol. 289, 145-164, 2004.

MONTEIRO, C.A.F. A Frente Polar Atlântica e as Chuvas de Inverno na Fachada Sul-oriental do Brasil. *Série Teses e Monografias*, n.1. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, 1969.

MONTEIRO, C.A.F. Teoria e Clima Urbano. (Tese de Livre Docência apresentada ao Depto. De Geografia/FFLCH-USP), São Paulo, 1976.

MONTEIRO, C.A.F. "Fluvial hazards and the desorganization of urban life in greater São Paulo", Brasil, in AFOLABI, E. S. (editor) Environmental Problems of resources desenvolvimento in developing countries, Ile-Ife, Nigéria, University of Ife, July, pp.44-46, 1978.

MONTEIRO, C.A.F. Environmental Problems in São Paulo Metropolitan Area: the Role of Urban Climate with Special Focus on Flooding, 24th. International Geographical Congress, Japan, September, 1980.

MORAES, A, C, R.; COSTA, W.M.; TARIFA, J.R. "Tipos de tempo e balanço de energia na Cidade de São Paulo". Instituto de Geografia da USP, in Climatologia 8. 48p. São Paulo, 1977.

MOREIRA, E,B,M.; NOBREGA, R,S.; SILVA B,B. Influência da Expansão Urbana em Recife (PE) no Fluxo de Calor Sensível Através de Imagens Digitais do TM Landsat-5. Revista de Geografia (UFPE) V. 30, No. 2, 2013.

NARUMI, D.; SHIGEMATSU, K.; SHIMODA, Y. Effect of the Evaporative Cooling Techniques by Spraying Mist Water on Reducing Urban Heat Flux and Saving Energy in Apartment House. Second International Conference on Counter measures to Urban Heat Islands, 2009.

NOBRE, C,A. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo: relatório final/ Carlos A. Nobre, coordenador. – São José dos Campos, SP: INPE, 2011.

OLIVEIRA, T. H. ; GALVINCIO, J. D. ; PIMENTEL, R. M. M. ; SILVA. B. B. . Uso e Cobertura do Solo e Seus Efeitos na Distribuição da Temperatura de Superfície em Área Urbana. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 06, p. 1598-1616, 2013.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, 7:769–779, 1973.

OKE, T, R. Boundary Layer Climates. Methuen e Co. Çtd. London, 1978.

OKE, T. R. –The Energetic Basis of the Urban Heat Island. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society, 108, 1982.

OKE, T.R., SPRONKEN-SMITH, R., JÁUREGUI, E. and C.S.B. GRIMMOND: “The energy balance of central Mexico City during the dry season”, Atmospheric Environment. v .33. p. 3919-3930,1999.

PAIVA C. M. Estimativa do balanço de energia e temperatura de superfície via satélite NOAA/AVHRR. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PENG, R.D.; BOBB, J.F.; TEBALDI, C.; MCDANIEL, L.; BELL, M.L.; DOMINICI, F. Toward a quantitative estimate of future heat wave mortality under global climate change. Environ Health Perspect .v.119.701–706, 2011.

PMSP – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Atlas ambiental Disponível em <www.atlasambiental.sp.gov.br>, acesso em 01/06/2014.

RIBEIRO, S.H. Ilha de Calor na Cidade de São Paulo: sua dinâmica e efeitos na saúde da população. Tese de livre-docência. Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo na área de gerenciamento ambiental, São Paulo, 1996.

RIBEIRO, S.H. Heat Island in São Paulo, Brazil: Effects on health, Critical Public Health, 15:2, 147-156, DOI: 10.1080/09581590500151756. 2005.

ROSENTHAL, J.K.; CRAUDERFF, R.; CARTER, M. Urban Heat Island Mitigation Can Improve New York City’s Environment: research on the impacts of mitigation strategies on the urban environment. Sustainable South Brox. New York. v.1. p.1-55, 2008.

ROTH, M: Review of urban climate research in (sub) tropical regions. International Journal of Climatology. v. 27. p. 1859-1873, 2007.

SALDIVA, P.H.N; POPE,C.A; SCHWARTZ,J; DOCKERY,D.W; LICHTENFELS,A.J; SALGE, J.M. BARONE,I; BOH,G.M .Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in São Paulo, Brazil. Archives of Enviromental Health, vol.50,159-163, 1995.

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de Radiação em Áreas Irrigadas Utilizando Imagens Landsat 5-TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.2, p.243-252, 2005.

SMARGIASS, A.; GOLDBERG, M.S.; PLANTE, C.; FOURNIER, M.; BAUDOUIN, Y. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *J Epidemiol Community Health*. 63: 659–664, 2009.

SMOYER, K.; RAINHAM, D.; HEWKO, J. Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980e1996. *International Journal of Biometeorology*.v.44.p.190-197, 2000.

SARKOVICH, M. Smud Shade Tree and Coll Roof Programs: Case Study in Mitigation the Urban Island Effects. Second International Conference on Counter measuares to Urban Heat Islands, 2009.

STAFOGGIA, M. FORASTIERE, F. AGOSTINI, D. Vulnerability to heat-related mortality: a multicity, population-based, case-crossover analysis. *Epidemiology*.v.17.p.315–23, 2006.

STEWART, I.; OKE, T. Classifying Urban Climate Field Sites by “Local Climate Zones”: the case of Nagano, Japan. The seventh International Conference on Urban Climate. 29 June - 3 July, Yokohama, Japan, 2009.

SYNNEFA, A.; DANDOU, A.; SANTAMOURIS, M.; TOMBROU, M. On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* . v. 47.p 2846-20856, 2008.

SON, J, Y; GOLVEIA, N; BRAVO, M, A.; FREITAS, C,U.; BELLI, M, B. The impact of temperature on mortality in a subtropical city: effects of cold, heat, and heat waves in São Paulo, Brazil. *Int J Biometeorol*. 60:113–121. 2016.

TAN, J.; ZENG, Y.; TANG, X.; GUO, C.; LI, L.; SONG, G.; ZHEN, X., YUAN, D.; KALKSTEIN, A.J.; LI, F.; CHEN, H. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*.v. 54.p.75-84, 2010.

TARIFA, J. R.; ARMANI, G. "Unidades Climáticas Urbanas" in Tarifa, J. R. & Azevedo, T. R. de, orgs, Os climas da cidade de São Paulo: teoria e prática. GEOUSP - Novos Caminhos, n.4. Departamento de Geografia, FFLCH, USP, São Paulo, 2001.

TARIFA, J.R. Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana e rural de São José dos Campos (SP) , Brasil. Geografia, 2(4), 59-60, Rio Claro, 1977.

TAFIRA, J.R.; MELLO, M.H. de A. Análise Climatológica para fins de implantação do Parque Metropolitano Sul (SP) GEGRA – Montreal Engenharia, 1972.

TAFIRA, J.R. Sobre um programa de "Climatologia Experimental" na Região Metropolitana de São Paulo. Boletim Paulista de Geografia nº52.p101- 119. Associação de Geógrafos Brasileiros, São Paulo, 1976.

TEJEDA-MARTÍNEZ, A.; JÁUREGUI-OSTOS, E. 2005: Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review, Atmosfera, **18**, 1-23.

UN-HABITAT. Disponível em:
http://www.unhabitat.org/index.php?option=com_content&view=article&id=94&Itemid=124. Acesso 17 nov.2014.

WIENERT, U. Untersuchungen zur Breiten- und Klimazonenabhängigkeit der urbanen Wärmeinsel: Eine städtische Analyse. Essen, Fachbereichs Bio- und Geowissenschaften, Landschaftsarchitektur an der Universität Essen (dissertation), 2001.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) EUROPE. Health an Global Environmental Chance. Heat-waves. Heat-Waves: Risks and Responses.v.2. 2004.Available:<http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/96965/E82629.pdf >. Acessado em 17 jul 2014.