

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Nancy Laura Rios Gamarra

Análises de albedo da superfície a partir de sensoriamento remoto: contribuições para estudos sobre ilha de calor urbano

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa
Co-orientador: Prof. Dr. Admir Créso L. Targino

Novembro de 2012

Itajubá – MG

G14a

Gamarra, Nancy Laura Rios

Análise de albedo da superfície a partir de sensoriamento re-
moto: contribuições para estudos sobre ilha de calor urbano /
Nancy Laura Rios Gamarra. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2012.
135 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa.

Coorientador: Prof. Dr. Admir Crésó L. Targino.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Albedo da superfície. 2. Temperatura do ar. 3. Ilha de calor urbano. 4. Cidade de porte médio. I. Corrêa, Marcelo de Paula, orient. II. Targino, Admir Crésó L., coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Nancy Laura Rios Gamarra

Análises de albedo da superfície a partir de sensoriamento remoto: contribuições para estudos sobre ilha de calor urbano

Dissertação aprovada por banca examinadora em 06 de novembro de 2012, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Simone M. S. Costa – CPTEC/INPE

Prof. Dr. Arcilan T. Assireu – IRN/UNIFEI

Prof^a. Dra. Nívea Adriana Dias Pons – IRN/UNIFEI

Prof. Dr. Admir Creso de Lima Targino – UTFPR
(co - Orientador)

Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa – IRN/UNIFEI
(Orientador)

Itajubá, 06 de Novembro de 2012.

Dedico este trabalho a meus pais e irmãos, pelo carinho e compreensão.

Amomandu´a penderehe ko tembiapó che sy ha che rú, há koicha,mbombyry guive amoguahe peeme che aguije.

AGRADECIMENTOS

A todos os que contribuíram para a realização deste trabalho, expresso minha gratidão, especialmente:

Ao Professor Marcelo de Paula Corrêa pela orientação, confiança e apoio nestes dois anos de trajetória acadêmica.

Ao Professor Admir Crésio de Lima Targino pela constante dedicação, apoio e paciência, e aos seus alunos Guilherme Coraiola e Lucas Chernev pelo fornecimento dos dados meteorológicos de Londrina.

Às seguintes instituições: Fundação Araucária (convênio número 470/2010) pelo financiamento dos sensores de temperatura do ar usados neste estudo, EMBRAPA Soja (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) pela cessão de dados meteorológicos.

Aos Professores Simone Costa e Juan Ceballos pela orientação, oportunidade, amizade, dedicação e aprendizado na Divisão de Satélites Ambientais (DSA/INPE).

A meu amigo Diego Enoré da DSA/INPE pelas inúmeras contribuições para este trabalho.

A meus Professores do Paraguai, Genaro Coronel e Julián Baéz pela confiança e oportunidade para a realização do curso de pós-graduação no exterior.

À Organização Meteorológica Mundial pela bolsa de estudo.

Ao André Souza pela constante e incondicional ajuda na utilização dos diferentes *softwares* de geoprocessamento.

A todos meus amigos, professores e colegas do IRN/MEMARH/UNIFEI.

Ao Roger Rodrigues Torres pelo carinho e compreensão.

RESUMO

Nas últimas décadas os produtos das imagens de satélites têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações. No caso específico da identificação de Ilhas de Calor Urbanas (ICU), as avaliações de uso e ocupação do solo, distribuição espacial da área urbana, da temperatura e do albedo da superfície (α_s) são facilitados por essas observações remotas. Dentro deste contexto, o objetivo principal deste trabalho é verificar as possíveis relações existentes entre o α_s e a temperatura do ar próxima à superfície (T_{ar}) com foco na ICU em uma cidade de porte médio (população de aproximadamente 500 mil habitantes). Para tanto, foram utilizados dados estimados de α_s obtidos do sensor MODIS, instalado a bordo dos satélites *Terra* e *Aqua*. Os dados de α_s , com 500 m de resolução espacial e 16 dias de resolução temporal, foram comparados aos dados de T_{ar} , medidos por sensores meteorológicos instalados em 13 diferentes sítios na cidade de Londrina (PR), coletados entre junho e agosto de 2011. Os sítios foram escolhidos por possuir diferentes padrões de uso do solo e determinados por uma classificação de cinco tipos de superfícies principais: asfalto, telhado, cobertura vegetal, água e solo exposto. Os resultados mostram variações sazonais do α_s , especialmente nos sítios rurais, isto é, aqueles com maior proporção de cobertura vegetal, e pouca variação nos sítios urbanos, nos quais a proporção de asfalto e telhados supera mais de 50% da área. A amplitude térmica entre os sítios urbanos e os sítios rurais é de 1,1 °C, enquanto os sítios urbanos e o sítio com água é de 1,3 °C, isto porque os processos de evaporação e evapotranspiração promovem resfriamento ao transformar calor sensível em calor latente. O coeficiente de correlação linear entre as variáveis α_s e T_{ar} resultou em correlação linear negativa ($R = -0,843$) entre os sítios urbanos e correlação linear positiva ($0,739 < R < 0,974$) nos sítios rurais. Tais resultados demonstram sensibilidade da T_{ar} às mudanças do α_s . O principal aporte deste estudo é a quantificação do albedo da superfície de diferentes categorias de uso do solo, utilizando imagens de satélite, podendo estender-se esta metodologia a outras variáveis importantes nas análises de ICU, como temperatura da superfície, emissividade da superfície e umidade do solo.

Palavras chave: Albedo da superfície. Temperatura do ar. Ilha de calor urbano. Cidade de porte médio.

ABSTRACT

In the last decades, satellite imaginary products have been widely used in various applications, such as Urban Heat Islands (UHI) identification, assessments of land use and occupancy, the spatial distribution of the urban area, land surface albedo (α_s) and temperature. The main objective of this study is to assess the possible relationship between α_s and air temperature (T_{ar}) in a mid-size city (population between 100,000 and 500,000). To this end, the MCD43A3 product (α_s) from MODIS sensor on board Terra and Aqua satellites was used. The α_s data with 500-m spatial resolution and 16-day temporal resolution were compared to *in situ* T_{air} data collected between June 2011 and August 2011 at 13 sites in the city of Londrina (Paraná state, Brazil). These sensors were deployed at sites with different land uses and five surfaces categories: asphalt, roof, vegetation, water and soil. The results showed high seasonal variations of α_s especially at sites with greater vegetation cover (> 50%), and little variation at urban sites (asphalt plus roof > 50%). The temperature range between urban and rural sites is 1.1 °C and between urban and water sites the range is 1.3 °C, this is because the evaporation and evapotranspiration process allow evaporative cooling, transforming sensible heat to latent heat. At urban sites, the correlation coefficient between α_s and T_{ar} is negative ($R = -0.843$) and at rural sites the correlation coefficient is positive ($0.739 < R < 0.974$). These results show the sensitivity of air temperature to changes in surface albedo. The main contribution of this study is the application of satellite imaginary to quantify the surface albedo according to land use characteristics. This methodology can be used to estimate surface emissivity, surface temperature, soil moisture and other important variables related to studies of UHI.

KEY WORDS: Land surface albedo, Air temperature, Urban heat island, Mid-size city.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 - Esquema do comportamento de uma ilha de calor.	7
Figura 2 – Fluxos de radiação e energia para área rural e urbana em um dia claro. As espessuras das setas são indicadores qualitativos da intensidade dos fluxos representados.	8
Figura 3 - Esquema ilustrativo da Camada Limite Urbana (CLU), Camada Limite do Dossel Urbano (CLD) e Camada Limite Rural (CLR).....	9
Figura 4 – Componentes da Forçante Radiativa (FR) do clima entre 1750 e 2005.	21
Figura 5 - Localização do limite municipal e área de expansão urbana da cidade de Londrina (PR).....	29
Figura 6 - Climatologia de Londrina (1976 - 2008)	30
Figura 7 - Sítios selecionados para as estações de medição de temperatura do ar na região urbana de Londrina (exceto o ponto “M”, localizado na zona rural).	31
Figura 8 - Sítios Urbanos: A) Biblioteca Municipal e B) Av. Lucia Helena.	33
Figura 9 - Sítios Urbanos: Ruas: A) Servino Freitas; B) Odilon B. Carvalho.	34
Figura 10 - Sítios Urbanos: Ruas: A) Prédio Lessence B) Belo Horizonte.....	35
Figura 11 - Sítios Urbanos: A) Parque de Exposição, B) IATE Clube e C) Aeroporto	36
Figura 12 – Sítio Urbano: Aeropuerto.....	37
Figura 13 - Sítios Rurais: A) Universidade Estadual de Londrina, B) Instituto Agrônômico do Paraná.	38
Figura 14 - Sítios Rurais: A) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, B) Universidade Tecnológica Federal do Paraná.....	39
Figura 15 - Etapa de processamento das imagens para a obtenção do albedo	41
Figura 16 - Representação da matriz 3x3 <i>pixels</i>	43
Figura 17 - Distribuição espacial da intensidade média da ICU em Londrina.....	45

Figura 18 - Série temporal de albedo da superfície (2000 – 2011) para sítios urbanos com cobertura vegetal < 20%.....	46
Figura 19 - Série temporal de albedo da superfície (2000 – 2011) para sítios urbanos e com componente de vegetação entre 20 e 40%.....	47
Figura 20 – Série temporal de albedo da superfície (2000 – 2011) para sítios rurais com cobertura vegetal entre 50 e 83%.	48
Figura 21 - Média (A) e desvio padrão (B) dos valores quinzenais de albedo no período 2000 – 2011 para todos os sítios monitorados.....	50
Figura 22 - Média mensal de temperatura máxima e mínima do ar, albedo da superfície e precipitação para as estações SIMEPAR/IAPAR (2000 - 2011).....	52
Figura 23 - Série temporal e diagrama de dispersão de temperatura do ar (média de 16 dias) e albedo de superfície para o período 2000 - 2011 no sítio SIMEPAR.	53
Figura 24 - Série temporal e diagrama de dispersão de precipitação e albedo de superfície para o período 2000 - 2011 no sítio SIMEPAR.	54
Figura 25 – Diagrama de dispersão entre albedo da superfície e temperatura do ar nos meses de junho, julho e agosto de 2011 em Londrina (PR).....	55
Figura 26 – Diagrama de dispersão entre albedo da superfície e temperatura média do ar de acordo com ou uso do solo nos meses: junho, julho e agosto de 2011 em Londrina (PR).	56

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1 - Valores de α_s (%) de alguns materiais para construção de telhado, em diferentes comprimentos de onda: ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho solar (IV).	18
Tabela 2 - Especificações Técnicas do sensor MODIS.	23
Tabela 3 - Uso principal das bandas espectrais do sensor MODIS.	23
Tabela 4 - Bandas espectrais do sensor MODIS utilizadas pelo produto MCD43A/B.	26
Tabela 5 – <i>Kernels</i> constantes a partir dos modelos Isotrópico (<i>Kiso</i>), Ross-Thick (<i>Kvol</i>) e <i>Li-SparseR</i> (<i>Kgeo</i>) para estimar o <i>BSA</i> e o <i>WSA</i> do produto <i>BRDF</i> /Albedo modelo paramétrico (MCD43A1/MCD43B1) do sensor MODIS.	28
Tabela 6 - Porcentagens de uso do solo para 40.000 m ² ao redor dos pontos monitorados, usando o <i>software</i> SPRING.	40
Tabela 7 - Coeficiente de Variação (CV) da matriz de 3x3 <i>pixels</i>	51
Tabela 8 - Albedo da superfície (%), temperatura do ar (°C) e coeficiente de correlação por período, para os sítios urbanos e rurais. As correlações em negrito são aquelas significantes a 5%.	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AOD	Aerosol Optical Depth
BH	Rua Belo Horizonte
BIB	Biblioteca Municipal de Londrina
BLSA	Blue Sky Albedo
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BSA	Black Sky Albedo
CLD	Camada Limite do Dossel Urbano
CLR	Camada Limite Rural
CLU	Camada Limite Urbana
DPI	Divisão de Processamento de Imagens
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPUEL	Estação Piscicultura Universidade Estadual de Londrina
FD	Fração de luz Difusa
FR	Forçante Radiativa
IAF	Índice de Área Foliar
IAPAR	Instituto Agropecuário do Paraná
IAT	IATE clube
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICALON	Ilha de Calor Urbano na cidade de Londrina
ICU	Ilha de Calor Urbano
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LES	Prédio Lessence
LUC	Avenida Lucia Helena
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MRT	MODIS Reprojection Tool
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCC	Nível de Compreensão Científica
NDWI	Normalized Difference Water Index
ODI	Rua Odilón Carvalho
PQE	Parque de Exposição
SER	Rua Servino Freitas
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SKYL LUT	Sky Light Look Up Table
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciados
SVF	Sky View Factor
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UTPPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WSA	White Sky Albedo

LISTA DE SÍMBOLOS

R_i	Radiação incidente (grau)
R_r	Radiação refletida (grau)
θ_i	Ângulo zenital solar (grau)
θ_r	Ângulo zenital de visão (grau)
Φ_i	Ângulo azimutal solar (grau)
Φ_r	Ângulo azimutal de visão (grau)
OC_i	Radiação de onda curta incidente (W/m^2)
OC_r	Radiação de onda curta refletida pela superfície (W/m^2)
OL_e	Radiação de onda longa emergente (W/m^2)
OL_r	Radiação de onda longa incidente (W/m^2)
Q_A	Transferência advectiva de calor sensível e de calor latente no sistema urbano (W/m^2)
Q_E	Fluxo vertical de calor latente ou evapotranspiração (W/m^2)
Q_H	Calor antropogênico (W/m^2)
Q_S	Fluxo vertical de calor sensível (W/m^2)
Q_U	Energia armazenada pela estrutura urbana (W/m^2)
R_n	Radiação líquida (W/m^2)
T_{ar}	Temperatura do ar ($^{\circ}C$)
T_s	Temperatura da superfície ($^{\circ}C$)
α_s	Albedo da superfície (adimensional)
ΔT_{ar}	Varição da temperatura do ar ($^{\circ}C$)
CV	Coefficiente de variação (adimensional)
FR	Forçante radiativa (W/m^2)

R	Coeficiente de correlação linear (adimensional)
R^2	Coeficiente de determinação (adimensional)
T_{sup}	Temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$)
λ	Comprimento de onda (μm)

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. Ilha de calor urbano.....	7
2.2. Albedo da superfície.....	15
2.2.1. Relação do albedo da superfície com a temperatura do ar e da superfície.....	15
2.2.2. Albedo de elementos urbanos	17
2.2.3. Albedo e elementos rurais.	18
2.2.4. Albedo e mudanças climáticas	20
2.3. O sensor MODIS.....	22
2.3.1. Descrição dos produtos MODIS BRDF e Albedo (MCD43).....	24
3. METODOLOGIA	29
3.1. Área de estudo.....	29
4. RESULTADOS	44
4.1. Resultados do projeto ICALON	44
4.2 Resultados do α_s de cada sítio para o período 2000- 2011.....	45
4.3. Relação do α_s com as variáveis meteorológicas temperatura do ar e precipitação.	51
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	59
REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO AR <i>IN SITU</i> E TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE OBTIDA PELO SATÉLITE <i>TERRA</i>	70

1. INTRODUÇÃO

Entre 1950 e 2010, a proporção da população mundial que vive em conglomerados urbanos passou de 29,1% para 50,6%. No Brasil, essa porcentagem passou de 36,2 % para 86,5% no mesmo período, segundo o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UN-PD, 2007). Além disso, este crescimento populacional urbano foi geralmente acompanhado por uma falta de planejamento, associado ao rápido desenvolvimento da maioria das cidades, gerando diversos problemas ambientais como poluição do ar, da água e desconforto térmico (DUH et al., 2008).

Um rápido crescimento populacional urbano, especialmente nos países em desenvolvimento, gera e/ou intensifica uma degradação ambiental para dar lugar à estrutura das cidades. Uma das modificações causadas pela urbanização é a diminuição de áreas verdes e de superfícies líquidas, que são substituídas por materiais sintéticos nas construções e na pavimentação, principalmente asfalto e concreto, gerando um estresse sobre ecossistemas e modificações das paisagens devido à verticalização das construções (PARTECKE et al., 2006). Além dessas alterações físicas associadas à densidade populacional, somam-se os fatores de consumo para satisfazer a demanda da população, como a produção de eletricidade, o uso de veículos a motor e produtos para refrigeração, que aumentam os níveis de contaminação direta e indiretamente (COMMONER, 1991). Tudo isso ocasiona um forte impacto no clima local e regional, razão pela qual o conhecimento do microclima urbano é vital para que se discuta sobre os avanços e aplicações de técnicas que ajudem a projetar melhor as cidades.

Para compreender melhor a relação entre população, desenvolvimento urbano e as condições ambientais são necessários estudos detalhados com relação ao ambiente urbano focados ao conforto térmico, consumo energético, qualidade da água e do ar, entre outros. Neste contexto, Duh et al.(2008) identificaram cerca de 22.600 estudos na literatura, entre 1960 e 2007, relacionados com qualidade do ar e da água em diversas áreas urbanas ao redor do mundo, divididas em três categorias de urbanização: madura, transiente e de rápida urbanização. Os autores analisaram o crescimento populacional dessas áreas urbanas entre 1975 e 2005, e o crescimento projetado para o ano de 2015. As cidades classificadas como maduras foram aquelas com crescimento populacional estabelecido, possuindo mais de 10 milhões de habitantes, e comumente conhecida como megacidades (SIEMENS-AG, 2007). As cidades transientes foram aquelas que mostraram um acelerado crescimento demográfico

entre 1975 e 2005, e estabilizando-se no período de 2005 a 2015. Por outro lado, as cidades de rápida urbanização foram classificadas como aquelas com acelerado crescimento demográfico entre os dois períodos analisados. Segundo Duh et al.(2008), as cidades maduras têm maior número de estudos referentes à qualidade da água e do ar do que as cidades transientes, e estas por sua vez maior número deste tipo de publicações do que as cidades de rápida urbanização. Os autores encontraram uma diferença importante entre as publicações sobre as cidades maduras e as de rápida urbanização, concluindo que esta diferença pode dever-se a que as cidades maduras apresentem maiores problemas relacionados à poluição do ar e da água, ou pelo simples fato de existir maior investimento para este tipo de estudo.

Os fatores responsáveis pelo clima urbano podem ser classificados em locais e externos. Como fatores locais podem-se destacar o uso do solo, tamanho e estrutura da cidade, presença de corpos d'água, densidade populacional, poluição do ar, topografia e o fator de visão do céu (do inglês, *Sky View Factor– SVF*¹). No grupo dos fatores externos encontram-se aqueles dependentes da situação sinótica, tais como circulação atmosférica, umidade relativa do ar, e incidência da radiação solar (GIRIDHARAN et al., 2007).

O fenômeno conhecido como ilha de calor urbano (ICU) é um dos impactos decorrentes da urbanização mais estudados na literatura, afetando tanto as grandes metrópoles quanto cidades de porte médio (AMORIM et al., 2009). A ICU é caracterizada pelo aumento da temperatura do ar (T_{ar}) nas áreas centrais de uma cidade em relação à temperatura das áreas periféricas. Uma das formas de quantificar a intensidade da ICU é utilizar a diferença T_{ar} entre áreas predominantemente urbanizadas de uma cidade e áreas circunvizinhas com características de cobertura de solo rural. A disposição geométrica dos cânions urbanos é outra variável levada em consideração nas análises de ICU (por exemplo, KRÜGER, 2008). Esta disposição geométrica relaciona-se com o aprisionamento da radiação solar e infravermelha devido a dois efeitos principais: 1) a grande quantidade de calor absorvido pelas superfícies urbanas durante o dia, como consequência das elevadas capacidades caloríficas dos materiais envolvidos (asfalto, telhado e concreto), dos sombreamentos e reflexões internas das paredes dos prédios, e da orientação e redução da velocidade do vento;

¹ O *SVF* é definido como uma razão geométrica que expressa a fração da radiação que é recebida ou emitida por uma superfície plana, e aquela recebida ou emitida por todo o ambiente radiante (GÁL et al., 2007).

e, 2) pelo baixo valor do SVF que aprisiona o calor liberado por tais superfícies em direção à atmosfera, fazendo com que a T_{ar} próxima a elas seja maior, especialmente depois do pôr do sol (KUSAKA e KIMURA, 2004).

Na literatura, encontramos estudos de ICU em diversas metrópoles como São Paulo (LOMBARDO, 1985), Xangai (YANG et al., 2010), Paris (DOUSSET et al., 2011), grandes cidades do Japão (FUJIBE, 2011), Cairo (FREY et al., 2011), entre muitas outras. No entanto, ressalta-se que estes fenômenos também são observados nas cidades de médio porte (com população entre 100 mil e 500 mil habitantes), e que nos últimos anos a ênfase dada a esta categoria de cidades tem sido maior.

No Brasil, alguns estudos sobre ICU foram realizados em cidades de porte pequeno e médio, tais como em Londrina (MENDOÇA, 1994), Presidente Prudente (AMORIM et al., 2009), Várzea Grande (CALLEJAS et al., 2011), Cascavel e Ponta Grossa (SANTOS et al., 2011), Piracicaba (COLTRI et al., 2009), entre outras. Além disso, o rápido crescimento das cidades de porte médio tem sido observado em todas as regiões do Brasil. Segundo dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), as cidades grandes e pequenas encolheram em proporção entre os anos 2000 e 2007, enquanto as cidades médias cresceram. As cidades médias concentravam 23,8% da população em 2000 e passaram para 25,0% em 2007. Ao contrário das cidades médias, no mesmo período mencionado, a população nas grandes cidades caiu de 29,8% para 29,7% e nas pequenas, de 46,4% para 45,2% (ALEIXO et al., 2009).

Ackerman (1985), ao observar a magnitude da ICU durante 20 anos na cidade de Chicago (EUA), constatou que a intensidade da ICU é caracterizada por ciclos diurnos e sazonais, os quais são influenciados, por exemplo, por variáveis meteorológicas tais como nebulosidade e vento. Segundo Lombardo (1985), as condições ideais para a formação da ICU são céu claro e calmaria, favorecendo a ocorrência de movimentos convectivos do ar. Além desses fatores, outras condições que devem ser levadas em consideração nos estudos de ICU são: a topografia, subsidência, inversão térmica, umidade relativa baixa, névoa seca e poluição do ar.

A sensibilidade da T_{ar} à mudança do albedo da superfície (α_s) tem sido um tema de interesse de diversos autores, tais como Taha et al. (1992), Huwald et al. (2009), Washigton e Meehl (1986), Krayenhoff e Voogh (2010), Fishman et al. (1994), Bloeschl (1991),

Tooming (1996) e Giridharan et al. (2007). O albedo é a designação frequentemente aplicada à refletância total de um dado sistema (expresso comumente em porcentagem) considerando-se a razão entre os fluxos de radiação refletida e incidente, ambos integrados sobre parte ou todo o espectro solar. Assim, um aumento do albedo de uma determinada superfície gera um decréscimo na temperatura da mesma, e vice-versa. Além disso, segundo a Lei de Stefan-Boltzman, a energia emitida por um corpo é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (LIOU, 2002). Portanto, uma redução da temperatura conduz a uma redução da radiação de onda longa emitida pela superfície, implicando também em um decréscimo no transporte de calor da superfície para a atmosfera. Tais reduções da T_{ar} podem ter impactos positivos no meio ambiente, como redução do consumo da energia destinado à refrigeração, especialmente em cidades afetadas pela ICU.

Dentre os diversos autores supracitados, alguns trabalhos são especialmente relevantes no contexto deste estudo. Giridharan et al. (2007), por exemplo, analisaram mediante métodos estatísticos a relação da intensidade da ICU e α_s , concluindo que o α_s de materiais tipicamente utilizados na construção de áreas urbanas é uma das variáveis que mais influenciam a ICU. Taha et al. (1992) observaram uma redução da quantidade de radiação solar absorvida pelas construções utilizando materiais de alto α_s nos exteriores de alguns prédios, conseguindo desta maneira que a temperatura das superfícies analisadas fossem mais amenas.

Nos últimos anos, a comunidade científica tem dado ênfase a dois importantes fatores que influenciam o clima regional, por serem considerados de origem antropogênica² (RIZWAN et al., 2008). Um dos fatores se relaciona com a geometria urbana descrita através do SVF (KRÜGER et al., 2011), e o outro a mudanças no α_s (SAILOR, 1995), que se relaciona com os materiais utilizados nas construções de casas, prédios, avenidas, e com a diminuição de áreas verdes. Tais fatores modificam o balanço de energia à superfície e favorecem o surgimento de ICU.

Diante do exposto, a principal contribuição deste estudo é a caracterização das possíveis influências do α_s sobre a temperatura do ar em áreas de diferentes escalas de urbanização em uma cidade de porte médio. A motivação principal para esta análise deve-se

²Ações antropogênicas ou fatores antropogênicos são aqueles causados pela ação do ser humano, contrapondo-se às ações ou variabilidade natural do sistema climático, cuja interferência humana é nula.

ao fato da carência de investigações de ICU que relacionam estas duas variáveis para cidades desse porte. Com isso, espera-se que o presente estudo seja um aporte para a planificação, adaptação e introdução de medidas de mitigação na reconstrução de cidades mais confortáveis e sustentáveis.

De modo a facilitar a leitura, este trabalho encontra-se assim estruturado. No Capítulo 2 é feita uma revisão detalhada sobre ICU e α_s em áreas urbanas e rurais, assim como sobre a relação do α_s com algumas variáveis, tais como temperatura do ar e da superfície (T_s). Adicionalmente, é apresentado neste mesmo capítulo uma descrição do sensor MODIS e seus produtos utilizados neste estudo. No Capítulo 3 apresenta-se uma discussão sobre os dados e métodos empregados nas análises, assim como uma caracterização das áreas analisadas. Os resultados e discussões são analisados no Capítulo 4 e, finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste estudo é verificar as relações existentes entre o albedo de diferentes áreas, com distintas porcentagens de elementos urbanísticos, e a temperatura do ar próxima à superfície, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e medições *in situ* na cidade de Londrina (PR).

Os objetivos específicos são:

- (a) Processar o albedo da superfície usando dados provenientes do sensor MODIS;
- (b) Avaliar o albedo da superfície em áreas pré-classificadas como urbanas e rurais;
- (c) Relacionar os valores de albedo com a temperatura do ar próxima à superfície, assim como avaliar um possível impacto da precipitação (dependendo da disponibilidade de medição nos sítios avaliados) nas variações do albedo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ilha de calor urbana

A Figura 1 representa um esboço do comportamento da T_{ar} em áreas com diferentes coberturas superficiais, mostrando um pico de temperatura nas zonas centrais das cidades, característica da ICU. A presença da vegetação na área rural atenua os valores de T_{ar} devido principalmente à interação da radiação solar com o solo, que utiliza parte da energia incidente no processo de evaporação e evapotranspiração (evaporação do solo e transpiração das plantas).

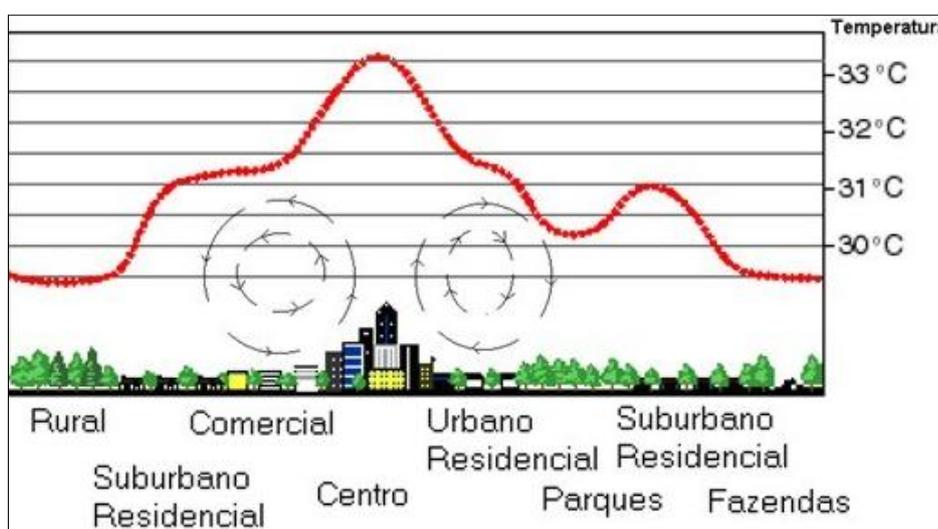


Figura 1 - Esquema do comportamento de uma ilha de calor.

Fonte: IBRAM(2012).

As zonas urbanas são mais quentes que as áreas periféricas devido à diferença de ganho e perda da energia em cada região (FIG. 2). Isto é, apresentam menor taxa de evapotranspiração e a maior parte da radiação de onda curta (solar) e de onda longa (terrestre) ficam aprisionadas entre as construções. Por outro lado, as regiões rurais têm maiores taxas de evapotranspiração e apresentam menor obstrução para a saída destas radiações de volta para o espaço.

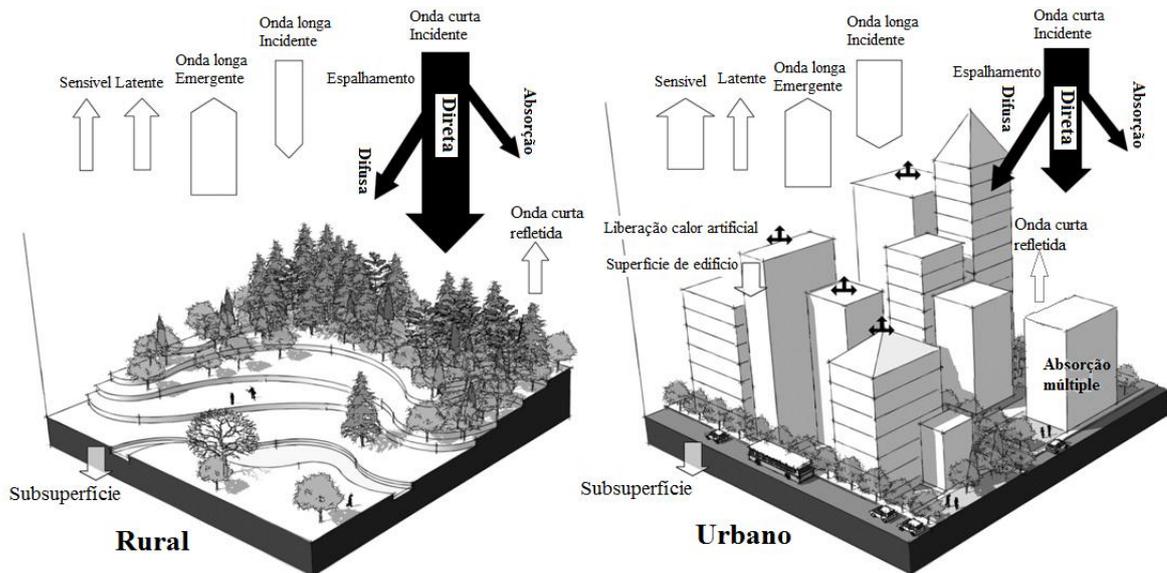


Figura 2 – Fluxos de radiação e energia para área rural e urbana em um dia claro. As espessuras das setas são indicadores qualitativos da intensidade dos fluxos representados.

Fonte: Adaptada de Zhao et al. (2011), p. 1175 e Oke (1988).

A Figura 2 representa um esquema dos fluxos de energia e radiação em áreas rurais e urbanas em um dia claro. O fluxo de calor latente nas áreas urbanas é menor que nas áreas rurais, devido à existência de superfícies impermeáveis nas áreas urbanas, acompanhado geralmente por escassa vegetação que impedem os processos de infiltração e evapotranspiração. A radiação de onda curta refletida pela superfície urbana também é menor, a causa da diminuição do α_s , ocasionando maior absorção de energia pelo tecido urbano e como consequência se produz aumento do fluxo de calor sensível nestas áreas. Outra diferença notável no ambiente urbano é a presença de poluentes, ocasionando maior incidência da radiação de onda longa por uma parte, e por outra impede a saída da radiação de onda longa emitida pelas superfícies, como resultado do efeito estufa, a temperatura do ar na região urbana é maior que na rural.

Para explicar o balanço da energia entre as áreas urbana e rural, definem-se duas camadas principais, onde se produzem as interações da radiação solar entre a superfície e a atmosfera. No ambiente urbano, a primeira camada é denominada Camada Limite Urbana (CLU). Verticalmente, a CLU inicia-se na altura média dos telhados, e sua altura depende das características da rugosidade da superfície e da estabilidade atmosférica. Horizontalmente a CLU é advectada pelo vento e prolonga-se até o limite da cidade (FIG. 3). Os diversos processos físicos provenientes das atividades urbanas (fluxos de calor e poluentes, por exemplo) que ocorrem próximo às superfícies são misturados nesta camada. A segunda

camada, denominada Camada Limite do Dossel Urbano (CLD), estende-se desde o solo até a altura média dos telhados. Esta é a camada da ocupação humana onde ocorrem as trocas de calor entre as paredes dos prédios e ruas, e as emissões antropogênicas. Ambas as camadas urbanas são influenciadas pelas condições sinóticas de tempo (BARBIRATO et al., 2007). No ambiente rural define-se a Camada Limite Rural (CLR), que depende da altura característica do tipo de vegetação presente. A CLR divide-se basicamente em duas camadas principais. Na primeira camada, a velocidade do vento não varia com a altura dentro do dossel (exceto em regiões cuja vegetação é muito baixa, por exemplo, em áreas de pastagens). Na segunda camada mais acima, a velocidade do vento aumenta com a altura. Dessa forma, a CLR é considerada mais estável e menos complexa quando comparada à CLU (FIG.3). Quando a aglomeração de edifícios vai diminuindo até encontrar-se com uma área rural, a CLD desaparece ficando só a CLU que sob a influência do vento pode prolongar-se sobre a CLR. Neste caso a CLU passa a denominar-se pluma urbana, e constitui a camada urbana mais quente acima da camada rural.

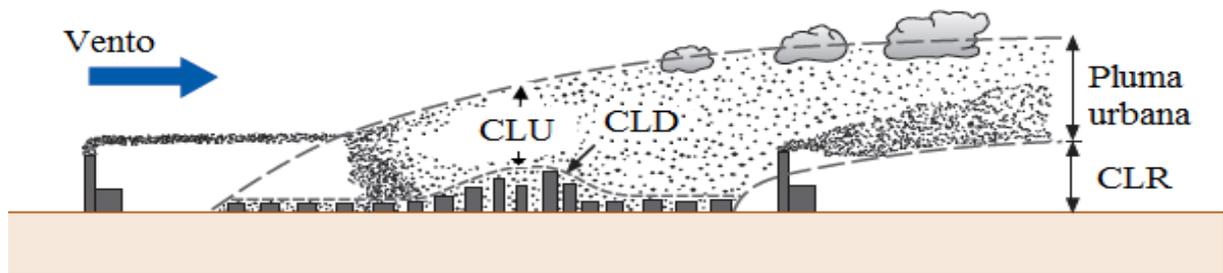


Figura 3 - Esquema ilustrativo da Camada Limite Urbana (CLU), Camada Limite do Dossel Urbano (CLD) e Camada Limite Rural (CLR).

Fonte: Adaptada de Barry e Chorley (2009), p. 416.

Outro elemento importante na definição do balanço de energia é a compreensão acerca da quantidade de radiação que atinge as áreas em questão. A radiação de onda curta que chega à superfície terrestre é constituída da soma de duas componentes principais: direta e difusa. A quantidade de radiação direta e difusa sofre variações espaços-temporais em função das condições atmosféricas, tais como nebulosidade, umidade, concentração de gases de efeito estufa e aerossóis.

Considerando que no topo da atmosfera chega 100 unidades arbitrárias de radiação solar, aproximadamente 28 unidades incidem diretamente na superfície terrestre, 21 são espalhados pela atmosfera como radiação difusa; cerca de 20 unidades são absorvidas pelas nuvens e gases atmosféricos, enquanto outras 31 são refletidas de volta para o espaço.

Em relação à composição desta última, cerca de 20 unidades provém da reflexão pelas nuvens, aproximadamente 8 unidades são refletidas pela superfície terrestre e 3 unidades são devolvidas para o espaço por dispersão atmosférica. A radiação total refletida pela superfície terrestre representa o albedo planetário (31%) (BARRY e CHORLEY, 2009).

A radiação de onda curta absorvida pela superfície terrestre, em torno de 49 unidades arbitrárias, é utilizada para incrementar sua temperatura. Segundo a Lei de Stefan-Boltzman, considerando a superfície terrestre como um corpo negro³, e assumindo uma temperatura média de 288 K, a energia emitida pela superfície terrestre em forma de onda longa é aproximadamente 392 W/m², o que representa 114 unidades, das quais a maior parte (102 unidades) é absorvida pela atmosfera e o restante (12 unidades) escapa para o espaço.

A atmosfera recebe no total, aproximadamente, 152 unidades de energia, sendo 102 unidades na forma de onda longa, 20 unidades na forma de onda curta, 23 unidades como calor latente e 7 unidades como calor sensível. Desta maneira, a atmosfera torna-se também uma importante fonte de emissão de onda longa, emitindo 95 unidades para a superfície terrestre e 57 unidades se perdem para o espaço. É importante ressaltar que esses valores são bastante variáveis de acordo com a composição da atmosfera e das características do solo, representando assim apenas uma média aproximada do que ocorre no planeta.

Para melhor compreensão do exposto anteriormente, o balanço de radiação de onda curta e onda longa em superfície são expressos como:

$$R_n = (OC_i - OC_r) + (OL_i - OL_e) \quad (1)$$

em que:

R_n : Radiação líquida;

OC_i : Radiação de onda curta incidente;

OC_r : Radiação de onda curta refletida pela superfície;

OL_i : Radiação de onda longa incidente;

OL_e : Radiação de onda longa emergente.

³ Um corpo negro é um corpo físico idealizado que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide. Além disso, um corpo negro em equilíbrio térmico (ou seja, com uma temperatura constante) emite radiação eletromagnética de acordo com a Lei de Planck, cujo espectro é determinado apenas por sua temperatura, e não por seu formato ou composição (LIOU, 2002).

Pelo princípio de conservação da energia, a energia que entra na superfície deve ser igual à energia que sai mais a armazenada. Quando se trata de uma superfície urbana, o balanço de energia pode ser expresso como:

$$R_n + Q_H = Q_S + Q_E + Q_U + Q_A \quad (2)$$

em que:

Q_H : Calor antropogênico;

Q_S : Fluxo vertical de calor sensível;

Q_E : Fluxo vertical de calor latente ou evapotranspiração;

Q_U : Energia armazenada pela estrutura urbana;

Q_A : Transferência advectiva de calor sensível e de calor latente no sistema urbano.

O termo Q_H está intimamente ligado aos outros termos na equação 2, sendo portanto de difícil separação. Por exemplo, a magnitude de R_n depende da troca de radiação de onda longa entre a superfície e a atmosfera, sendo que uma porção de Q_H está incluída em R_n . Outro termo que sofre influência antropogênica é o Q_S , devido às modificações das superfícies. Em geral, os principais responsáveis pela formação de ICU são Q_U , Q_A e Q_H , dado que a capacidade calorífica dos elementos urbanos são maiores do que os elementos rurais.

A Equação 1 pode ser expressa também em função do α_s e da (T_s) na forma:

$$R_n = (1 - \alpha_s)OC_i + OL_i - \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (3)$$

Por meio da Equação 3 é possível analisar que o saldo de radiação em superfície pode variar quando o α_s e/ou a T_s são modificadas, podendo haver um maior domínio de uma ou outra em certas condições. Por exemplo, no caso de superfícies cobertas por neve, durante o dia este domínio pertence ao α_s , uma vez que a neve é um bom elemento refletor da radiação solar. À noite, na ausência dos raios solares, o α_s não tem nenhum efeito sobre o saldo de radiação (FEDERER, 1968), predominando neste caso a T_s .

Peng et al. (2011) analisaram a intensidade de ICU diurna e noturna em 419 grandes cidades do mundo. Segundo os autores, 92% das cidades analisadas apresentaram

uma intensidade de ICU média anual diurna maior que a intensidade de ICU média anual noturna ($1,5 \pm 1,2$ °C e $1,1 \pm 0,5$ °C, respectivamente). Além disso, verificou-se que a magnitude da ICU diurna nas cidades está correlacionada negativamente com diferentes proporções de coberturas de vegetação, ou seja, as ICU diurnas mais intensas foram associadas à menor cobertura vegetal. Tais resultados mostraram que a vegetação exerce um papel importante na atenuação da intensidade da ICU em horário diurno, especialmente em dias quentes.

O comportamento da ICU diurna identificado por Peng et al. (2011) pode ser explicado por meio de Q_E e Q_S , onde ambos são modulados pela cobertura vegetal, solo e água disponível para a troca de calor entre a superfície e a atmosfera. Uma redução na área vegetada de uma superfície impacta no balanço de energia, diminuindo o Q_E e aumentando o Q_S , fazendo com que a T_{ar} aumente mais rapidamente. Em geral, a energia solar recebida por unidade de área vegetada é utilizada para a transpiração da vegetação, o que produz um efeito de arrefecimento da T_S . Este impacto da mudança da cobertura vegetal sobre a T_S foi verificado por Hu e Jia (2010), observando que um decréscimo de 16% da área vegetada da cidade de Guangzhou (China), ocorrido em um período de 17 anos (1990 – 2007), ocasionou um aumento na T_S de aproximadamente 2,5 °C.

Adicionalmente, segundo Imhoff et al. (2010), a intensidade da ICU aparentemente é maior em cidades que cresceram em áreas onde anteriormente eram rurais. Os autores utilizaram imagens de satélites tanto para identificar as superfícies urbanas, distribuídas ao longo de diferentes biomas nos EUA, quanto suas T_S ao longo de três anos (2003 – 2005) separados em ciclos sazonais (verão e inverno). A intensidade de ICU, por exemplo, em uma cidade situada em área desértica como Las Vegas (EUA) é de 1,6 °C maior quando comparado com sua vizinhança, enquanto a diferença entre Baltimore (EUA) e seu arredor rural é de 10°C. Além das cidades mencionadas, o estudo também considerou cidades do norte da África e sudoeste da América do Norte, e em geral os resultados mostraram em média uma variação da temperatura de 0,21°C entre as cidades de regiões desérticas, e 3,8 °C para cidades em regiões florestadas. Tal variação pode estar relacionada com a mudança abrupta do fluxo de calor latente nas regiões anteriormente florestadas.

As características geométricas e as propriedades térmicas dos elementos constituintes do ambiente urbano são dois fatores fundamentais no balanço de radiação nestas

áreas. Um termo comum relacionado com a geometria da cidade é o *SVF*. Este fator é adimensional e varia de 0 a 1, sendo a unidade o valor que representa um sítio aberto, sem obstruções e obstáculos às radiações solar e de onda longa, e valores menores do que um, representam as áreas urbanas onde se conjugam edifícios e vegetação. Para uma área completamente obstruída, o valor de *SVF* é zero. Ambos os extremos são casos hipotéticos, uma vez que não existem lugares completamente abertos ou totalmente obstruídos. O *SVF* representa a porção de céu visível que permite a troca de calor entre a superfície e a atmosfera, por tanto, representa a capacidade de saída do fluxo de radiação de onda longa emitidas pelas superfícies. Embora o *SVF* seja uma razão geométrica, é através dele que as superfícies conseguem resfriar-se em condições de céu aberto (sem nuvens).

No entanto, ao contrário do que se espera, considerando que o *SVF* é um dos fatores que influenciam a formação de ICU, Eliasson (1991), encontrou pouca variação de T_g e T_{ar} ao relacioná-las com diferentes valores de *SVF* em Gotemburgo (Suécia). Isto porque a relação da intensidade de ICU e o *SVF* diferem de acordo com a maneira em que as análises são feitas. Por exemplo, alguns estudos limitam-se às análises do centro urbano, partes específicas das cidades e alguns cânions. Além disso, o número de observações geralmente é bastante pequeno, limitando as análises estatísticas.

A correlação entre o *SVF* e a intensidade de ICU pode ser alta dependendo de como são as variáveis agrupadas. Unger (2009) explica que a T_{ar} no centro da cidade geralmente é maior que nas áreas circunvizinhas, porém, o *SVF* nem sempre tende a diminuir no centro da cidade. Isto ocorre porque existem cidades onde as fronteiras estão formadas por grupos habitacionais com grandes edifícios, onde não necessariamente se observam temperaturas mais elevadas. Devido a esta complexa situação, Unger (2009) analisou o *SVF* medido em diferentes alturas verticais (no nível do solo e a 1,4 m do solo), assim como com variações da T_{ar} (ΔT_{ar}) durante duas estações: uma estação denominada “quente” e relacionada com a ausência de folhagem (para diminuir a mistura entre as contribuições de edifícios e vegetação nas análises), e a outra denominada estação “não quente” e relacionada com a presença de folhagem. Os coeficientes de correlação entre o *SVF* e ΔT_{ar} na estação quente no nível do solo e a 1,4 m foram de -0,656 e -0,671, respectivamente, e nas mesmas condições considerando a estação não quente, os coeficientes de correlações foram -0,639 e -0,632, respectivamente. Estes resultados mostraram uma correlação moderada entre as variáveis, indicando que o *SVF* é um fator importante que determina a distribuição da

temperatura dentro de uma cidade. Finalmente, o autor enfatizou que o número de medições e a maneira como são agrupados estas variáveis, são fatores muito importantes a serem levados em consideração para estabelecer algum tipo de relação entre as variáveis analisadas.

2.2. Albedo da superfície

A refletância das superfícies varia de acordo com a constituição das mesmas, da geometria de iluminação e observação. Adicionalmente, a refletância varia de acordo com o comprimento de onda da radiação incidente, uma vez que uma única superfície pode refletir alguns intervalos de comprimento de onda e absorver em outros. Dessa forma uma modificação do α_s pode impactar indiretamente a T_{ar} . Por exemplo, no caso da superfície urbana, os valores típicos de α_s estão entre 5 a 10%. Estes valores são mais baixos do que aqueles observados nas áreas rurais onde variam entre 18 e 25% em latitudes médias (OKE, 1988). Ao transformar uma área rural em urbana, há uma mudança do α_s , o que altera profundamente o balanço de radiação à superfície, e consequentemente a T_{ar} .

2.2.1. Relação do albedo da superfície com a temperatura do ar e a temperatura da superfície.

Krayenhoff e Voogt (2010) estudaram a sensibilidade da T_{ar} à mudança de α_s de algumas superfícies urbanas utilizando um modelo numérico para simular a T_{ar} na cidade de Chicago (EUA), considerando áreas de diferentes tipos de urbanização durante algumas estações do ano. O referido modelo parametriza as duas camadas urbanas, CLD e CLU, e não considera a transferência de calor horizontal por advecção. Os autores usaram como condição inicial o valor de α_s de 6%, e foram modificando este valor para 25,32 e 65%. Estas modificações impactaram a T_{ar} , principalmente em períodos diurnos de verão e em condições de céu claro, onde a radiação solar é mais intensa e se observam maiores ângulos de elevação solar. O aumento do α_s ocasionou reduções de 1,7°C na temperatura mínima e de até 3,7 °C na temperatura máxima.

Tooming (1996) também observou a sensibilidade da T_{ar} à modificação sazonal do α_s em Tartu Estônia. O autor analisou durante um período de 42 anos, as mudanças do α_s na duração da cobertura da neve e seu possível impacto na T_{ar} . Nesse período, o α_s diminuiu, especialmente em março (-21%) e abril (-13%). Tais reduções coincidem com a chegada da primavera boreal, quando a temperatura começa a aumentar e a cobertura de neve diminui. Com isso, as superfícies tornam-se expostas à radiação solar, intensificando a absorção da radiação de onda curta, contribuindo desta maneira para o aumento da T_{ar} próxima à

superfície. Nos 42 anos de análise, o autor observou uma tendência de diminuição de α_s , de 12%, seguido de um aumento de T_{ar} na região de estudo de aproximadamente 1,2 °C,

Taha et al. (1992) encontraram, mediante simulações numéricas, que uma modificação de 1% no α_s , pode modificar de 0,2 a 0,25 °C a T_{ar} . Resultados similares foram encontrados por Fishman et al. (1994) ao analisarem as dunas da base militar *White Sands Missile Range* no Novo México (EUA), onde a superfície está coberta por areia branca, possuindo altos valores de α_s , (cerca de 60%) quando comparado com as áreas desérticas vizinhas, nas quais o α_s varia entre 20 e 25%. Esta diferença tem um impacto significativo na T_{ar} , observando-se no verão, por exemplo, valores de 1 a 2°C menores sobre as superfícies das dunas durante o dia quando comparados às regiões circunvizinhas.

Qualquer modificação nas características da superfície tem impacto sobre o microclima local; um desses impactos está relacionado com a alteração da temperatura da superfície. A queima de biomassa, por exemplo, provoca mudanças desde a visibilidade, incluindo o aumento de gases de efeito estufa, até variáveis relacionadas com o clima, como α_s , balanço de radiação e da energia, T_s , T_{ar} , vento e precipitação. Segundo Pereira et al. (2007), em áreas onde se observaram queimadas há redução do α_s na faixa da refletância visível e infravermelho solar, e aumento de T_s . Naquele estudo, os autores utilizaram imagens do satélite LANDSAT 5 sensor *Thematic Mapper* (TM) para estimar o albedo em regiões queimadas recentemente e com evidências (“cicatrices”) de queimadas. Eles encontraram valores de α_s entre 9 e 13%, possibilitando estimar se a queimada ocorreu recentemente ou em outros períodos, sendo que uma área recentemente queimada apresentou um valor médio de 9% enquanto que em uma área com evidências de queimadas o valor encontrado foi de aproximadamente 13%. A superfície também sofreu aumento em sua temperatura. Em áreas recentemente queimadas a T_s foi de até 42°C, enquanto que nas regiões com cicatrizes entre 30°C e 33°C. Estes valores de T_s apresentam amplitudes maiores quando comparados com áreas vegetadas (intactas), visto que nestas regiões os valores de T_s variam entre 23°C e 28 °C. Portanto, os solos com queimadas ou cicatrizes de queimadas tendem a absorver muito mais radiação no espectro visível e infravermelho, comparado às áreas vegetadas, por serem as áreas queimadas muito mais escuras.

2.2.2. Albedo de elementos urbanos

Pesquisadores do Laboratório Nacional Lawrence de Berkeley, Califórnia, têm estudado as propriedades da refletância de materiais que se encontram em maior porcentagem na estrutura urbana (> 60%), como asfalto e telhado, de maneira a encontrar materiais de construção de alto α_s como um mecanismo de redução do consumo da energia destinado à refrigeração dos edifícios. Neste contexto, Rosenfeld et al. (1995) avaliaram os efeitos positivos que poderiam ocasionar o incremento do α_s nas superfícies urbanas, combinado com a arborização, como mecanismos de conservação da energia, redução de custos e melhoramentos na qualidade do ar. Seus experimentos mostraram que incrementando o α_s sem ocasionar custos adicionais elevados, ou seja, utilizando alguns tipos de revestimentos nas manutenções das casas e edifícios e incorporando vegetação nos parques e avenidas, reduzem o consumo de energia entre 20 a 40%. Segundo os autores, para o governo dos Estados Unidos, essa redução no consumo de energia pode significar uma economia de até 10 bilhões de dólares por ano em equipamentos e demanda energética, e uma redução de 27 milhões de toneladas de CO₂ por ano. Outro resultado interessante deste estudo é que a elevada T_{ar} que se observa nos centros das cidades estudadas (Los Angeles, Washington, Phoenix, Tucson e Colorado Spring) acelera a formação de *smog*⁴, com um incremento de 6% para cada aumento de 1°C na T_{ar} acima de 22°C. A partir desta perspectiva, Bretz et al. (1998) fizeram um levantamento dos materiais que poderiam ser utilizados como revestimento de telhados, paredes e ruas, de modo a aumentar a refletância da radiação solar e reduzir as elevadas temperaturas usuais nos centros urbanos, especialmente nos dias quentes de verão. Alguns exemplos de tais materiais e técnicas são o recobrimento de paredes exteriores com materiais brancos, e o revestimento do telhado dos edifícios e residências com cascalhos, azulejos ou membranas brancas.

Para calcular o albedo de materiais de construção de telhados comumente utilizados no Brasil, Prado e Ferreira (2005) utilizaram um espectrofotômetro com um acessório esférico integrado para medir a refletância desses materiais. Essa técnica permite o cálculo da T_s e a estimativa do calor ganho por elas quando são expostas à radiação solar. Este

⁴*Smog* é um termo derivado da combinação de duas palavras inglesas, *smoke* e *fog*, que significam fumaça e neblina, respectivamente. O termo *smog* é aplicado de maneira extensiva à contaminação por aerossóis. Na atualidade é usado para designar qualquer tipo de contaminação do ar. Adicionalmente, o *smog* fotoquímico é a reação química na atmosfera de emissões primárias (por exemplo, emissão veicular e fumaça industrial) com a luz solar para formar poluentes secundários (SEINFELD e PANDIS, 2006).

espectrofotômetro emite radiação em comprimentos de onda compreendidos entre 0,29 μm e 2,5 μm , representando 96% da radiação solar que atinge a superfície terrestre. Os resultados dos α_s dos materiais submetidos à avaliação são apresentados na Tabela 1. Os autores comprovaram que, em geral, as superfícies com elevado α_s e emitância permanecem mais frias quando são expostas à radiação solar, devido à baixa absorção deste tipo de radiação.

Tabela 1 - Valores de α_s (%) de alguns materiais para construção de telhado, em diferentes comprimentos de onda: ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho solar (IV).

MATERIAL	Comprimento de onda (μm)			
	UV 0,29 – 0,38	VIS 0,38 – 0,78	IV 0,78 – 2,5	TOTAL 0,29 – 2,5
Cerâmica vermelha	9,10	33,10	78,90	67,70
Cerâmica branca	11,50	53,10	74,50	68,00
Fibrocimento	25,00	36,08	40,87	39,35
Alumínio sem revestimento	73,40	72,53	73,74	73,19
Aço inoxidável sem revestimento	78,49	69,67	73,03	72,64
Alumínio + Zinco Natural	74,63	65,17	68,85	68,42
Termo acústico: Alumínio	63,19	65,92	71,91	69,72
Verde	21,38	36,55	71,88	63,39
Branca	8,40	62,61	65,42	62,54
Cerâmica	6,04	17,63	62,75	52,24
Cimento Colorido: Cinza claro	22,78	32,20	33,42	32,76
Cinza escuro	13,63	16,61	12,42	13,23
Vermelho	14,14	22,78	27,91	22,42
Ocre	11,64	27,87	31,54	30,06

Fonte: Adaptado de Prado e Ferreira (2005), p. 297.

2.2.3. Albedo e elementos rurais.

Segundo Blad e Baker (1972 apud SOUZA et al., 2010, p. 67), “[...] a diferença de albedos das culturas pode estar relacionado com diversos fatores, tais como cobertura vegetal, disponibilidade hídrica no solo e consumo das plantas, ângulo de incidência dos raios solares e velocidade do vento”. Além disso, a relação do α_s com a cobertura vegetal depende

muito do estágio fenológico e do tipo de cultura. No começo e durante grande parte da etapa de crescimento, os valores de α_s são altos (da ordem de 25%) devido à mistura entre planta e solo exposto e, portanto, depende das características do solo. Os solos úmidos, por exemplo, geralmente são mais escuros do que os solos secos, resultando em diferentes valores de α_s . Por exemplo, o α_s de solos argilosos úmidos são mais baixos (8%) que as dunas úmidas (24%), mudando para 14 e 37%, respectivamente, quando ambos os tipos de solos estão secos (TEN BERGE, 1986). O mesmo caso pode ser observado nos finais de safras, quando o solo contém grande quantidade de matéria orgânica. Outro fator importante é a variação da magnitude de refletância das culturas durante o dia. No início e no final do dia se observam valores mais elevados de α_s , diminuindo próximo ao meio dia, devido principalmente à inclinação dos raios solares (QUERINO et al., 2006). Finalmente, a direção e velocidade do vento, juntamente com o ângulo de incidência dos raios solares, também modificam o α_s durante o dia, devido ao fato de que o vento pode inclinar as plantas na mesma ou em direção contrária aos raios incidentes.

A relação do índice de área foliar (IAF)⁵ com o α_s depende do tipo de vegetação, especialmente da textura, tamanho e morfologia foliar. No caso de vegetações naturais, o α_s decresce quando o IAF aumenta (BERINGER et al., 2005; BRAGA et al., 2009). Entretanto, quando uma floresta é substituída por culturas agrícolas, e em casos bem específicos, esta relação entre IAF e α_s nem sempre é observada. Este é o caso do avanço do plantio da soja na Amazônia estudado por Souza et al. (2010), onde foi observado uma relação direta entre o IAF e o α_s (maior IAF resultando em um maior α_s). No início do plantio da soja, o IAF e o α_s permanecem baixos. Entre 30 e 70 dias aproximadamente, o α_s e o IAF apresentam valores mais altos (24% e $5,5 - 7 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, respectivamente). Após 70 dias começam a decrescer de novo, chegando o α_s a 14% e o IAF a $1,5 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ aproximadamente (SOUZA et al., 2010). Tais valores provavelmente decorrem do envelhecimento da cultura, a qual perde massa foliar depositando-se no solo como matéria orgânica, tornando a superfície mais escura e, desta forma, diminui o α_s . Resultados semelhantes foram encontrados por Galvani et al. (1999) em

⁵ IAF é uma variável adimensional que foi definida pela primeira vez por Watson (WATSON, 1947 apud JONCKHEERE et al., 2004) como a área unilateral total de tecido fotossintético por unidade de área da superfície do solo que ocupa uma determinada vegetação. Porém, esta definição é restrita a um determinado tipo de folhas (largas e planas) onde ambos os lados têm a mesma área de superfície. Quando se trata de folhas irregulares (enrugada, dobrada ou enrolada) a área “unilateral” não está claramente definida. Portanto, IAF é a metade da área foliar total de tecido fotossintético por unidade de área da superfície do solo.

cultura de pepino (*Cucumis sativus* L.), onde o α_s apresentou uma variação ao longo do ciclo da cultura e os autores relacionaram esta variação com o *IAF*, arquitetura da planta e ataque de pragas e doenças. Na fase inicial o α_s apresentou valor mínimo de 11%, cobrindo uma pequena fração do solo, até seu máximo valor de 20%, quando o *IAF* foi de $6,66 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$.

2.2.4. Albedo e mudanças climáticas

A forçante radiativa (FR) é uma medida para avaliar e comparar o impacto das mudanças climáticas devido a agentes antropogênicos ou naturais. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (da sigla em inglês, IPCC) em seu quarto relatório de avaliação (IPCC, 2007), forçante radiativa é uma perturbação no saldo de irradiância líquida no topo da atmosfera (radiação solar incidente menos radiação de onda longa emergente, em W/m^2), cuja origem pode ser natural (ex: mudanças nos parâmetros orbitais da Terra) ou antropogênica (ex: intensificação do efeito estufa devido a emissões de gases de efeito estufa).

Na Figura 4 são apresentadas as principais componentes da FR detectadas desde o início da era industrial (1750) até a época atual. Os valores em vermelho representam as forçantes positivas (que podem induzir um aumento da temperatura média global) e os valores em azul as forçantes negativas (que podem induzir um arrefecimento da temperatura média global). Além da distribuição espacial em escala local, continental ou global, os fatores também se classificam por seu nível de compreensão científica (NCC) em baixo, médio e alto. A radiação solar é a única componente de origem natural, e o restante está associado com atividades antropogênicas.

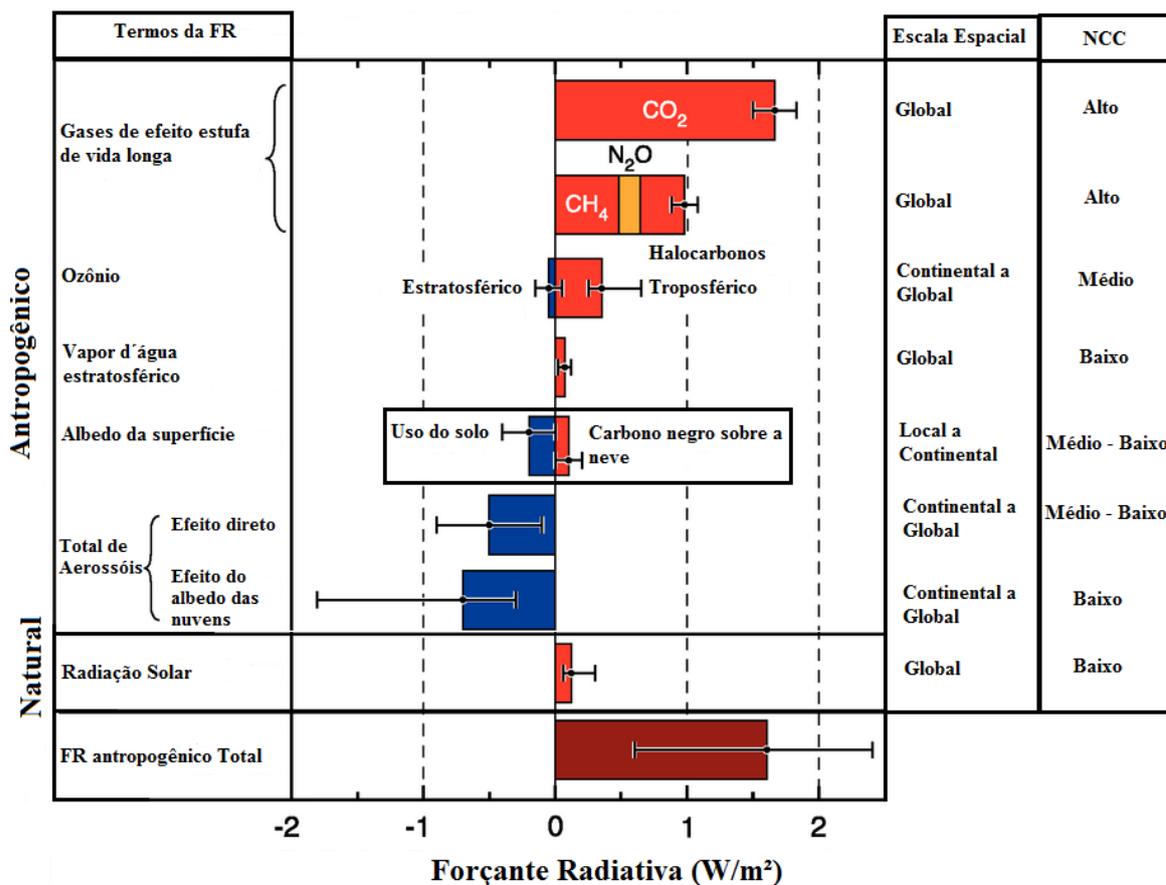


Figura 4 – Componentes da Forçante Radiativa (FR) do clima entre 1750 e 2005.
 Fonte: Adaptado de *The Physical Science Basis*, IPCC, 2007.

As mudanças no α_s é uma das componentes da FR considerada de origem antropogênica. Um exemplo de forçante negativa relacionado às mudanças de α_s refere-se ao uso do solo, devendo-se principalmente à modificação da vegetação natural para dar lugar às atividades agrícolas. Neste caso, o α_s das áreas florestadas apresenta valores menores que uma área aberta ou com uma determinada cultura agrícola, por causa da maior área foliar de um dossel de floresta e das múltiplas reflexões que ocorrem dentro do dossel, resultando em uma maior fração de absorção da radiação incidente. Por outro lado, um fator que contribui para um efeito positivo da modificação do α_s sobre a FR é o carbono negro depositado sobre neve e gelo. Este material é emitido em grandes quantidades pela queima de biomassa, veículos, plantas e processos industriais, e pode ser transportado para grandes distâncias. Ao contrário do uso do solo, o carbono negro depositado sobre a neve diminui o α_s , fazendo com que mais radiação seja absorvida pela superfície. Esse fenômeno produz um *feedback* positivo que acelera a desintegração do gelo. Hansen e Nasarenko (2004) atribuem a este fenômeno um quarto do aquecimento global observado.

2.3. O sensor MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um espectroradiômetro de média resolução, acoplado a bordo dos satélites de órbita polar *Terra* e *Aqua*. Esses satélites são sincronizados com a órbita do planeta Terra de tal forma que a trajetória do satélite *Terra* é de norte a sul (passando sobre o equador pela manhã), enquanto a trajetória do *Aqua* é de sul para o norte (passando sobre o equador à tarde).

Os sensores MODIS *Terra* e MODIS *Aqua* cobrem toda a superfície do planeta Terra de um a dois dias, e a aquisição de dados pode ser feita em 36 bandas espectrais (ou grupos de comprimentos de onda). As bandas de 1 a 7 (abrangendo os comprimentos de onda de 0,62 a 2,16 μm) estão direcionadas para estudos sobre a superfície continental, as bandas 8 a 16 (0,41 a 0,88 μm) para as observações oceânicas, e as bandas 17 a 19 (0,89 a 0,97 μm) para as medições atmosféricas. As bandas de 20 a 36 (3,66 a 14,39 μm), com exceção da banda 26 (1,36 a 1,39 μm), cobrem a porção termal do espectro eletromagnético, e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (ANDERSON et al., 2003).

Ambos os satélites, *Terra* e *Aqua*, apresentam órbita polar heliossíncrona, com inclinação de aproximadamente 98 graus em relação ao equador e 99 minutos de período orbital, passando pelo equador aproximadamente às 10h30min e 13h30min, hora solar local (*Terra* e *Aqua*, respectivamente). A altitude orbital média é de 705 km e sua velocidade em relação ao solo é de 6,7 km s^{-1} . A distância entre órbitas adjacentes é de aproximadamente 172 km no equador, e o ciclo de recorrência é de 16 dias, período em que os dados são pós-processados e disponibilizados aos usuários. Outras especificações técnicas do sensor MODIS estão dispostas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Especificações Técnicas do sensor MODIS.

Tamanho	1,0 x 1,6 x 1,0 m
Peso	228,7 kg
Potência	162,5 W (média para uma órbita), 168,5 W (pico)
Resolução Temporal	Diária, para latitudes >30° e a cada dois dias para latitudes <30°
Transmissão de Dados	6,2 Mbps (média); 10,8 Mbps (dia); 2,5 Mbps (noite)
Resolução Radiométrica	12 bits
Resolução Espacial	250 m (bandas 1 - 2), 500 m (bandas 3 - 7), 1000 m (bandas 8 - 36)
Faixa de Varredura	2.330 Km± 55° (perpendicular à órbita)

Fonte: MODIS Web(2012).

Tabela 3 - Uso principal das bandas espectrais do sensor MODIS

Uso principal	Bandas	Banda espectral (nm)	Radiância espectral (w/m²- μm-sr)
Camadas de solo/nuvens/aerossol	1	620 - 670	21,8
	2	841 - 876	24,7
Propriedades de solo/nuvens/aerossol	3	459 - 479	35,3
	4	545 - 565	29,0
	5	1230 - 1250	5,4
	6	1628 - 1652	7,3
	7	2105 - 2155	1,0
Cor do oceano/fitoplâncton/biogeoquímica	8	405 - 420	44,9
	9	438 - 448	41,9
	10	483 - 493	32,1
	11	526 - 536	27,9
	12	546 - 556	21,0
	13	662 - 672	9,5
	14	673 - 683	8,7
	15	743 - 753	10,2
	16	862 - 877	6,2
Vapor de água atmosférico	17	890 - 920	10,0
	18	931 - 941	3,6
	19	915 - 965	15,0

Tabla 3 - Continuação

Uso principal	Bandas	Banda espectral (μm)	Radiância espectral ($\text{w/m}^2\text{-}\mu\text{m-sr}$)
Temperatura da superfície/nuvens	20	3,660 - 3,840	0,45(300K)
	21	3,929 - 3,989	2,38(335K)
	22	3,929 - 3,989	0,67(300K)
	23	4,020 - 4,080	0,79(300K)
Temperatura atmosférica	24	4,433 - 4,498	0,17(250K)
	25	4,482 - 4,549	0,59(275K)
Vapor de água da nuvens Cirrus	26	1,360 - 1,390	6,00
	27	6,535 - 6,895	1,16(240K)
	28	7,175 - 7,475	2,18(250K)
Propriedades de nuvens	29	8,400 - 8,700	9,58(300K)
Ozônio	30	9,580 - 9,880	3,69(250K)
Temperatura de superfície/nuvens	31	10,780 - 11,280	9,55(300K)
	32	11,770 - 12,270	8,94(300K)
Altitude do topo da nuvem	33	13,185 - 13,485	4,52(260K)
	34	13,485 - 13,785	3,76(250K)
	35	13,785 - 14,085	3,11(240K)
	36	14,085 - 14,385	2,08(220K)

Fonte: MODIS Web (2012).

2.3.1. Descrição dos produtos MODIS, BRDF/Albedo modelo paramétrico (MCD43A1, MCD43B1) e Albedo (MCD43A3)

A geometria de aquisição de dados, os parâmetros relativos ao alvo e os parâmetros atmosféricos afetam diretamente as medidas de distribuição e intensidade da refletância (NOGUEIRA et al., 1996). As refletâncias das superfícies naturais são anisotrópicas, ou seja, dependem do ângulo de visão e do ângulo de iluminação. Para representar a anisotropia das refletâncias das superfícies, tem-se a função de distribuição da refletância bidirecional (*BRDF*, do inglês *Bidirectional Reflectance Distribution Function*). A *BRDF* é uma função de cinco variáveis, sendo que quatro delas definem a direção da radiação incidente e refletida pela superfície-alvo e a quinta variável é o comprimento de onda (λ). Para simplificar a *BRDF*, costuma-se representá-la em função da direção de iluminação e de

visada, omitindo o λ . Porém, deve-se levar em consideração que as propriedades ópticas de uma superfície dependem do λ .

Portanto, define-se a *BRDF* como a razão da radiação refletida por uma superfície na direção de visão, e a radiação incidente na direção de iluminação (Eq. 4):

$$BRDF(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r) = \frac{R_r(\theta_r, \Phi_r)}{R_i(\theta_i, \Phi_i)} \quad (4)$$

em que:

θ_i : Ângulo zenital solar;

Φ_i : Ângulo azimutal solar;

θ_r : Ângulo zenital de visão;

Φ_r : Ângulo azimutal de visão;

R_r : Radiação refletida;

R_i : Radiação incidente.

O MODIS gera os produtos MCD43 para a obtenção de α_s , em formato HDF-EOS, nível 3⁶, versão 5, plataforma combinada (*Terra + Aqua*), com projeção de área sinusoidal⁷ em grânulos de diferentes dimensões, resolução temporal de 16 dias e com diferentes resoluções espaciais. O sensor cobre uma área de aproximadamente 10° de latitude por 10° de longitude, estando os dados disponíveis desde 24 de fevereiro de 2000⁸.

A partir das bandas espectrais observadas pelo MODIS, listadas na Tabela 4, é possível calcular dois tipos de α_s : o *Black Sky Albedo (BSA)*, ou em tradução literal “albedo de céu escuro” e o *White Sky Albedo (WSA)*, ou “albedo de céu claro”. O primeiro é obtido

⁶ Indica o nível de processamento dos produtos do MODIS. No nível 3, se encontram os produtos georreferenciados em grade global.

⁷ A projeção de área sinusoidal é uma classificação do sistema de projeções cartográficas construídas a partir da projeção cilíndrica equidistante através da mudança de escala dos paralelos de latitude.

⁸ O sensor MODIS foi acoplado pela primeira vez ao satélite *Terra*, lançado em dezembro de 1999, e começou a coletar os dados desde fevereiro de 2000.

integrando a *BRDF* na obtenção da refletância de direção hemisférica para uma única direção de irradiância. O segundo, é obtido integrando a *BRDF* para obter a refletância bi-hemisférica para todas as possíveis direções de irradiâncias e ângulos de visadas. Também se define o *BSA* como a componente de iluminação direta em ausência da componente de iluminação difusa, dependendo somente do θ_i . Por outro lado, o *WSA* é definido como a componente de iluminação difusa isotrópica em ausência da componente de iluminação direta. Ou seja, o *WSA* é considerado constante em todas as direções (STRAHLER et al., 1999). A radiação isotrópica tem a mesma intensidade independentemente da direção de medida.

Tabela 4 - Bandas espectrais do sensor MODIS utilizadas pelo produto MCD43A/B.

Número das bandas	Bandas (μm)	Região do espectro
1	0,620 - 0,670	Vermelho
2	0,841 - 0,876	Infravermelho próximo
3	0,459 - 0,479	Azul
4	0,545 - 0,565	Verde
5	1,230 - 1,250	Infravermelho próximo
6	1,628 - 1,652	Infravermelho médio
7	2,105 - 2,155	Infravermelho médio
8	0,400 - 0,700	Visível
9	0,700 - 4,000	Infravermelho
10	0,250 - 4,000	Onda-curta

Fonte: Shaaf (2006).

Os produtos *BRDF*/Albedo modelo paramétrico utilizam algoritmos que se baseiam em refletâncias de superfícies anisotrópicas, tomando amostras durante um período de 16 dias com correção atmosférica e sem nuvens, permitindo a recuperação do modelo na captura de superfícies anisotrópicas da refletância de cada pixel. Faz-se uso de um modelo semi-empírico linear com núcleo dirigido (*kernel – driven*) associado à *BRDF*, conhecido como *Ross-Thick/Li-Sparse-Reciprocal* (RT/LSR), o qual se baseia na soma ponderada de três parâmetros (isotrópico, volumétrico e geométrico), e três funções ou *kernels*, que dependem da direção de visualização e da direção de iluminação, sendo expressas como (ROMAN et al., 2009; CORTS, et al., 2010):

$$BRDF(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \lambda) = f_{iso}(\lambda)K_{iso} + f_{vol}(\lambda)K_{vol}(\theta_i, \Phi_i, \theta_r) + f_{geo}(\lambda)K_{geo}(\theta_i, \Phi_i, \theta_r) \quad (5)$$

em que:

θ_i : Ângulo solar zenital;

Φ_i : Ângulo azimute relativo ao sol;

θ_r : Ângulo zenital do sensor observando cada pixel.

O parâmetro $f_{iso}(\lambda)$ é a componente do espalhamento isotrópico com refletância bidirecional para um ângulo $\theta_r = 0$ e ângulo zenital solar $\theta_i = 0$. O parâmetro $f_{vol}(\lambda)$ é o coeficiente derivado do modelo de transferência radiativa *Ross-Thick* (ROSS, 1981), com *kernel* volumétrico (K_{vol}), associado ao espalhamento simples da radiação, produzidos no interior dos alvos (por exemplo, dentro da estrutura de algum tipo de vegetação). Por último, o parâmetro $f_{geo}(\lambda)$ é o coeficiente derivado do modelo óptico-geométrico *Li-SparseR* (LI e STRAHLER, 1992) com *kernel* geométrico (K_{geo}), associado ao espalhamento simples da radiação a partir dos elementos tridimensionais das superfícies. Segundo Roujean et al. (1992), estes *kernels* estão definidos de maneira que quando a fonte (o sol) e o sensor estejam no zênite ($\theta_i = \theta_r = 0$), $K_{vol}(0,0,\Phi_i) = K_{geo}(0,0,\Phi_i)$, implicando em, $BRDF(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \lambda) = f_{iso}(\lambda)$. O parâmetro $f_{iso}(\lambda)$ se define como a refletividade da superfície, medidas a partir da posição perpendicular à superfície, tanto da iluminação solar como do sensor, ou seja, a captura da refletividade da superfície-alvo é feita quando o sensor e o sol se encontram no zênite, observando à superfície na direção nadir.

Para a simplificação dos cálculos pode-se utilizar alternativamente uma equação polinomial com valores de *kernels* constantes para estimar o *BSA* e o *WSA* como:

$$BSA(\theta_i, \lambda) = f_{iso}(\lambda)(K_{0iso} + K_{1iso}\theta_i^2 + K_{2iso}\theta_i^3) + f_{vol}(\lambda)(K_{0vol} + K_{1vol}\theta_i^2 + K_{2vol}\theta_i^3) + f_{geo}(\lambda)(K_{0geo} + K_{1geo}\theta_i^2 + K_{2geo}\theta_i^3) \quad (6)$$

$$WSA(\lambda) = f_{iso}(\lambda)K_{iso} + f_{vol}(\lambda)K_{vol} + f_{geo}(\lambda)K_{geo} \quad (7)$$

A Tabela 5 mostra os valores dos *kernels* apropriados para a utilização das Equações 6 e 7.

Tabela 5—*Kernels* constantes a partir dos modelos Isotrópico (K_{iso}), Ross-Thick (K_{vol}) e *Li-SparseR* (K_{geo}) para estimar o *BSA* e o *WSA* do produto *BRDF*/Albedo modelo paramétrico (MCD43A1/MCD43B1) do sensor MODIS.

<i>Kernels</i>	Isotropia	<i>RossThick</i>	<i>LiSparseR</i>
K_0	1,0	-0,007574	-1,284909
K_1	0,0	-0,070987	-0,166314
K_2	0,0	0,307588	0,041840
<i>K</i> integrados para <i>WSA</i>	1,0	0,189184	-1,377622

Fonte: Shaaf (2006).

Os produtos MCD43A1 e MCD43B1 contêm três parâmetros para cada uma das bandas listadas na Tabela 4, totalizando 30 variáveis. Esses parâmetros dizem respeito à $f_{iso}(\lambda)$, $f_{vol}(\lambda)$ e $f_{geo}(\lambda)$, podendo utilizar-se com as constantes da Tabela 5 na obtenção do *BSA* e do *WSA*.

A interpolação do *BSA* e o *WSA* em função da fração de luz difusa (*FD*) é denominado *Blue – Sky Albedo (BLSA)*, que pode-se obter por (SCHAAF, 2004):

$$BLSA = (WSA \times FD) + (BSA \times (1 - FD)) \quad (8)$$

Os produtos Albedo MCD43A3 e MCD43B3 com resolução espacial de 500 m e 1000 m, respectivamente, facilitam os cálculos do *BLSA*. Estes produtos encontram-se disponibilizados nas 10 bandas espectrais listadas na Tabela 4, e cada uma destas bandas se dividem em duas variáveis: o *BSA* e o *WSA*, totalizando 20 variáveis.

De agora em diante, neste estudo, o *BLSA* representará α_s . Maiores detalhes do processamento para obter o α_s a partir do produto MCD43A3, adotado neste estudo, são descritas no capítulo seguinte.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo abrange aspectos observacionais e de sensoriamento remoto à superfície. A componente observacional envolve a obtenção de dados *in situ* de T_{ar} e a componente de sensoriamento remoto envolve o processamento de imagens do MODIS para a obtenção do α_s . Em seguida, apresenta-se uma descrição da área de estudo, abrangendo sua localização e climatologia para logo entrar em detalhes do processamento dos dados de satélite.

3.3. Área de estudo

A cidade de Londrina (FIG. 5), situada no norte do estado do Paraná (lat. 23°19' S; lon. 51°08' W e altitude média de 608 m), passou por um rápido processo de desmatamento para proporcionar espaço para a cafeicultura. A modernização da agricultura paranaense causou um êxodo rural sem precedentes nas décadas de 1960 e 1970, impulsionando o desenvolvimento da cidade. Os grandes conjuntos habitacionais surgiram ao norte da cidade, nas proximidades dos estabelecimentos industriais, e os condomínios residenciais de médio e alto padrão foram construídos no centro e sul.

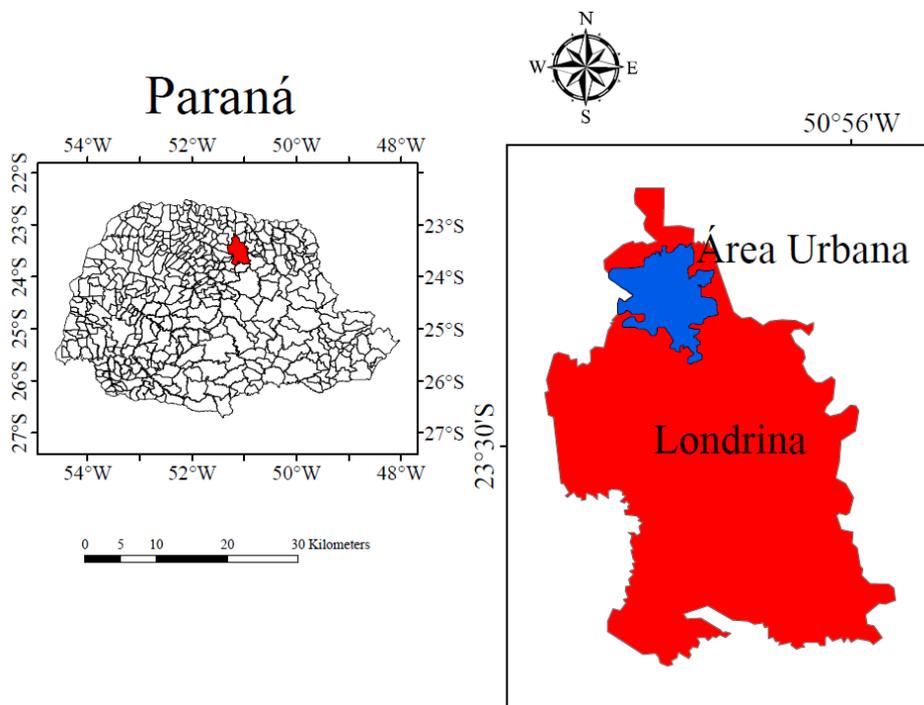


Figura 5 - Localização do limite municipal e área de expansão urbana da cidade de Londrina (PR).

De acordo com o levantamento feito pela *Brain* Consultoria de Curitiba em 2007 (BRASILIS, 2008), Londrina aparece como a sétima cidade brasileira em número absoluto de edifícios acima de 12 pavimentos (412 prédios). Porém, se a classificação for feita entre número de prédios e número de habitantes, Londrina aparece como a terceira do país, atrás apenas de Balneário Camboriú (SC) e Vitória (ES). Londrina é considerada como uma cidade de porte médio, com pouco mais de 500 mil habitantes, de acordo com o censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2010 (IBGE, 2010).

Londrina possui um clima subtropical úmido com temperatura média anual de 21°C. O regime térmico apresenta dois períodos distintos: verão (outubro a março) e inverno (abril a setembro). O verão tem influência de correntes intertropicais e quentes e mostra os maiores índices pluviométricos, sendo Fevereiro o mês mais quente. No inverno predominam correntes do sul, extratropicais, com temperaturas mais baixas e tempo relativamente seco. Julho é o mês mais frio e agosto o mês de menor índice pluviométrico (FIG. 6). O relevo da cidade é suavemente ondulado e apresenta pequena variação altimétrica entre 400 e 600 m. O relevo do sítio urbano inclina-se genericamente de oeste para leste, nordeste e sudeste, decorrência de sua posição sobre o relevo da bacia hidrográfica do Rio Tibagi (MENDONÇA, 1994).

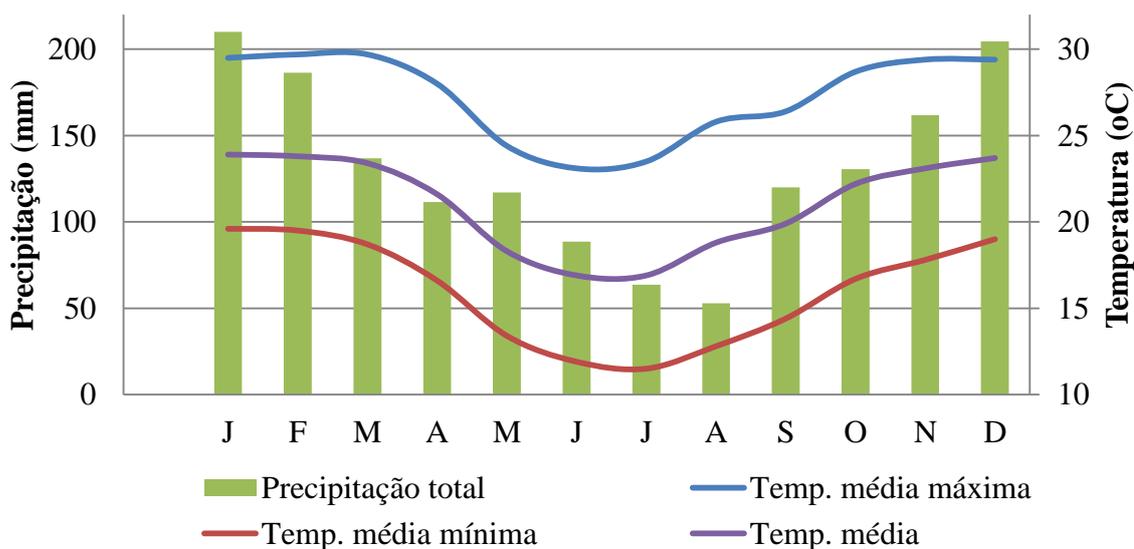


Figura 6 - Climatologia de Londrina (1976 - 2008)

Fonte: IAPAR (2010)

Os dados de T_{ar} utilizados neste estudo foram coletados através do projeto Ilha de Calor na Cidade de Londrina (ICALON) (TARGINO et al., 2012), conduzido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), com apoio da Fundação Araucária. O trabalho de campo do projeto ICALON foi dividido em duas etapas: (1) avaliação da cobertura do solo em áreas pré-selecionadas da cidade, e (2) medições de T_{ar} em 13 locais representativos da estrutura urbana (FIG. 7).

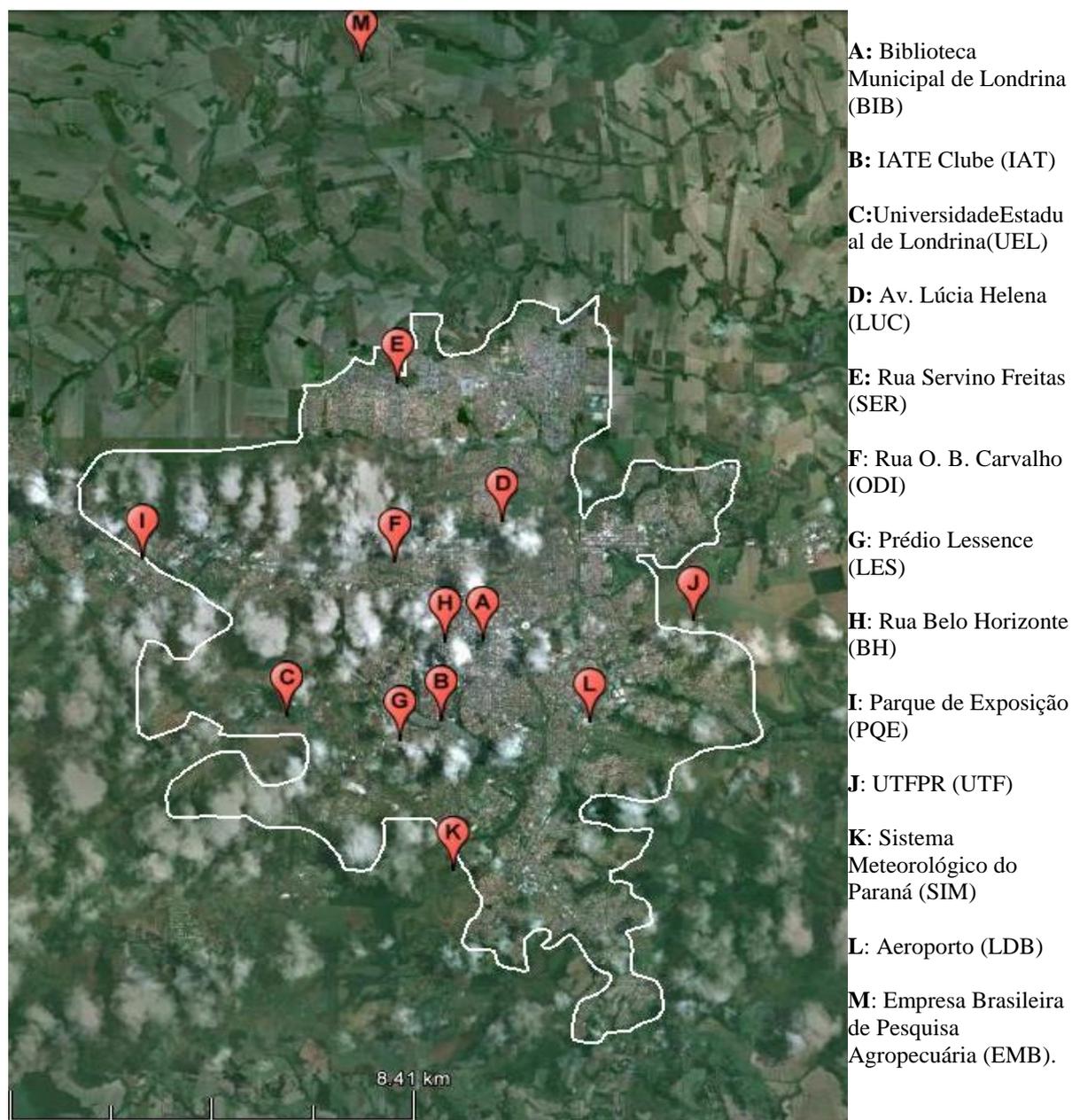
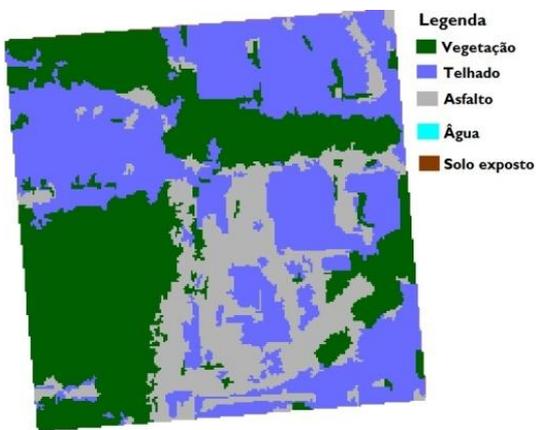
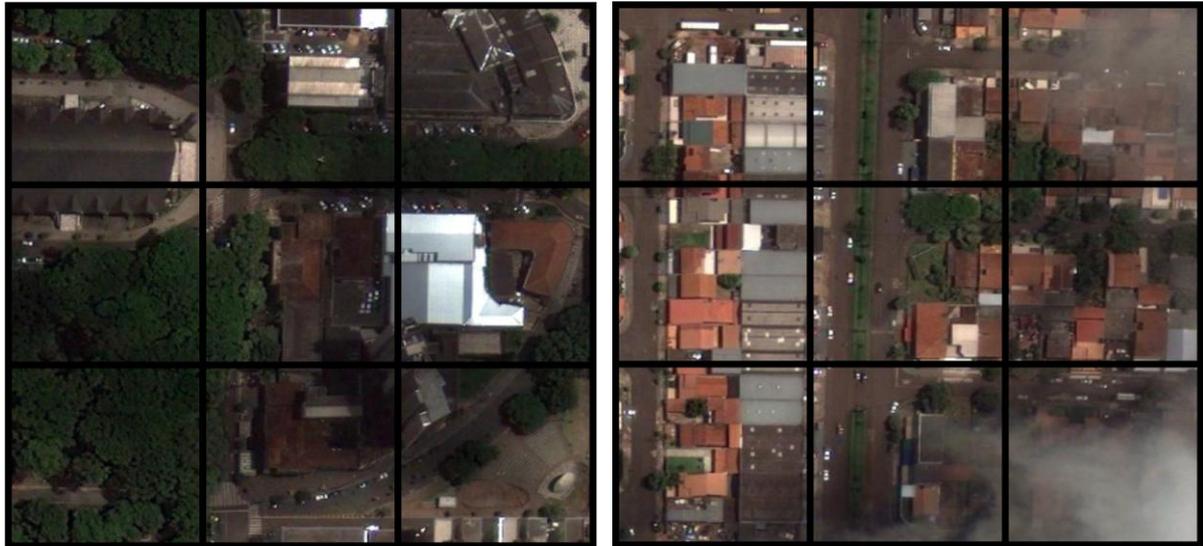


Figura 7 - Sítios selecionados para as estações de medição de temperatura do ar na região urbana de Londrina (exceto o ponto "M", localizado na zona rural).

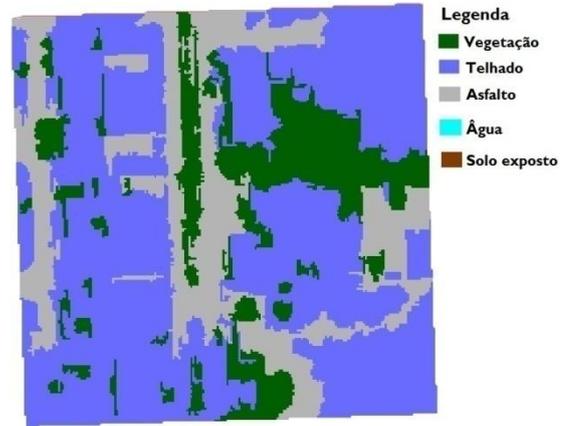
Fonte: *Google Earth*, 2011.

Imagens extraídas do *Google Earth* (FIGS. 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14), abrangendo uma área de 40.000 m² ao redor de cada ponto a ser monitorado, foram utilizadas para avaliar o uso do solo (CORAIOLA et al., 2011). A cobertura da superfície foi classificada em cinco categorias morfológicas (vegetação, asfalto, telhado, água e solo exposto) e as imagens foram analisadas utilizando o *software* SPRING⁹ (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) (FIGS. 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14), realizando as seguintes etapas: obtenção das imagens do *Google Earth*, georreferenciamento, determinação de uma cor para cada categoria morfológica e quantificação das categorias em porcentagem. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6. Adicionalmente, os sítios foram agrupados em duas categorias: urbanos e rurais. A partir da classificação da Tabela 6, os sítios com vegetação acima de 50% são considerados rurais e os sítios com vegetação abaixo de 50%, urbanos.

⁹O SPRING é um software de sistema de informações geográficas com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a banco de dados espaciais. Esta ferramenta de geoprocessamento foi desenvolvida para aplicações em agricultura, floresta, gestão ambiental, geografia, geologia, planejamento urbano e regional pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (CÂMARA et al., 1996).

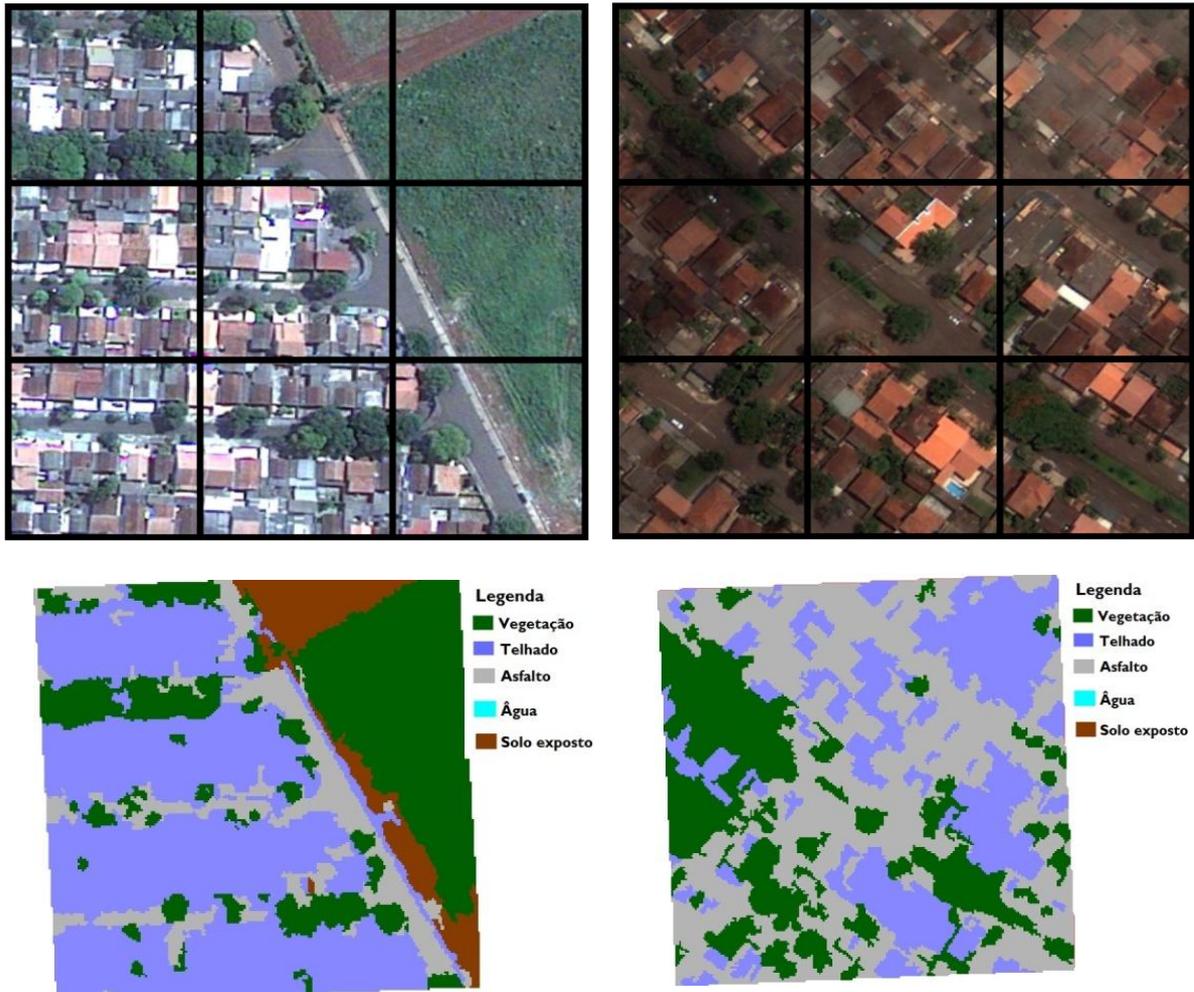


A)



B)

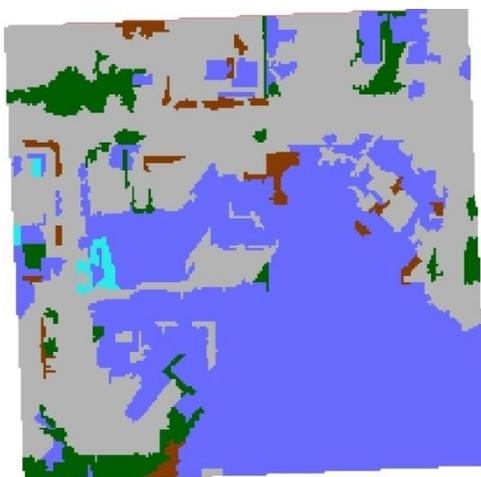
Figura 8 - Sítios Urbanos: A) Biblioteca Municipal e B) Av. Lucia Helena.
 Fonte: *Google Earth*,(2011) e Coraiola et al. (2011).



A)

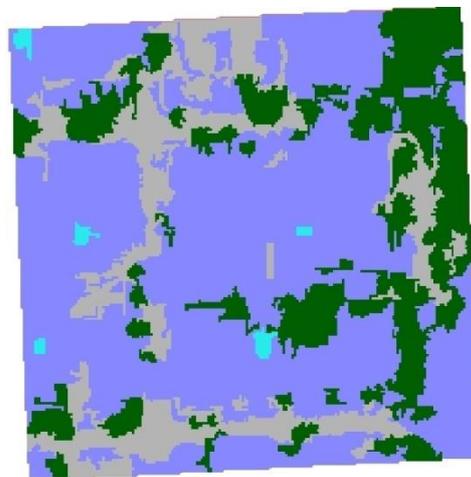
B)

Figura 9 - Sítios Urbanos: Ruas: A) Servino Freitas; B) Odilon B. Carvalho.
 Fonte: *Google Earth*, (2011) e Coraiola et al. (2011).



Legenda

- Vegetação
- Telhado
- Asfalto
- Água
- Solo exposto



Legenda

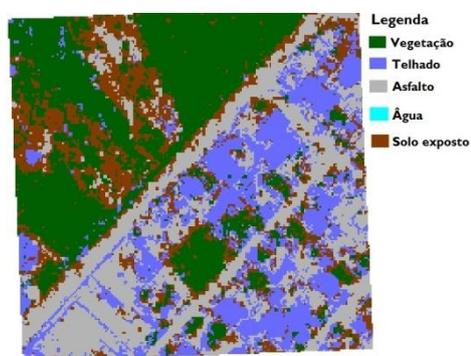
- Vegetação
- Telhado
- Asfalto
- Água
- Solo exposto

A)

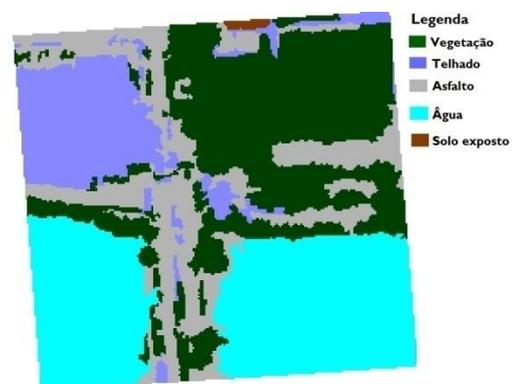
B)

Figura 10 - Sítios Urbanos: Ruas: A) Prédio Lessence B) Belo Horizonte.

Fonte: *Google Earth*, (2011) e Coraiola et al. (2011).



A)



B)

Figura 11 - Sítios Urbanos: A) Parque de Exposição, B) IATE Clube e C) Aeroporto
 Fonte: *Google Earth*, (2011) e Coraiola et al.(2011).

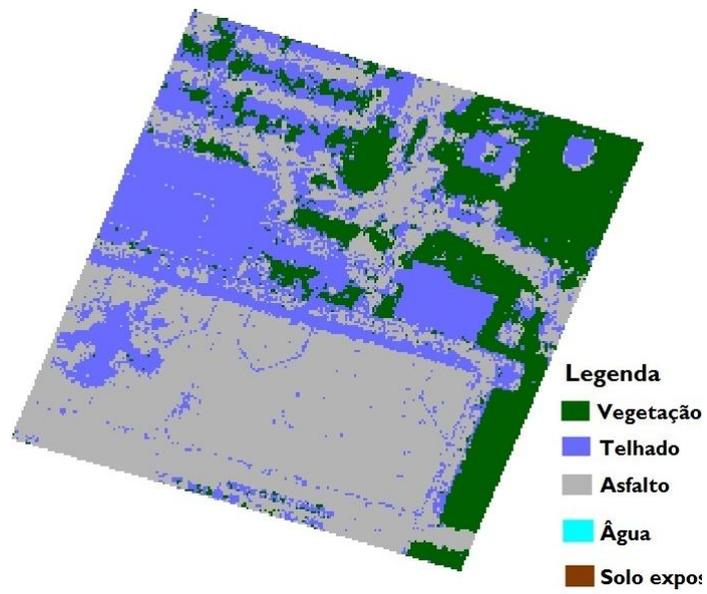
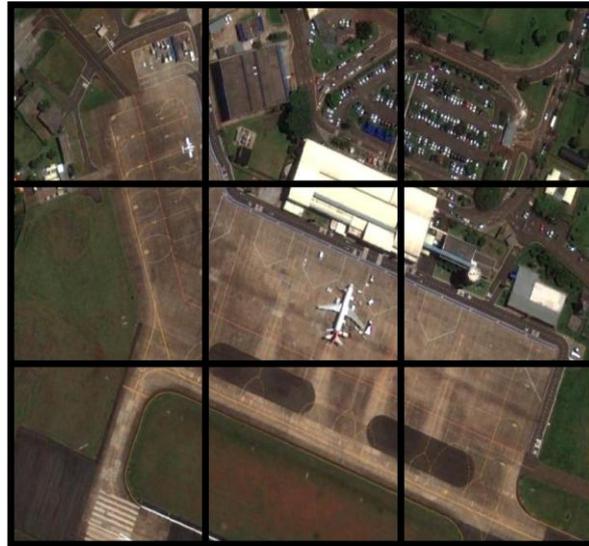
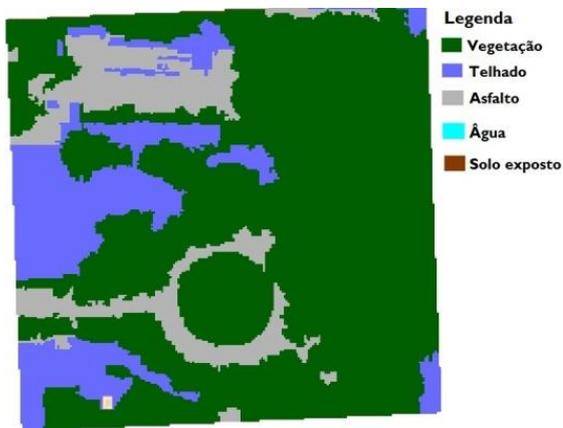
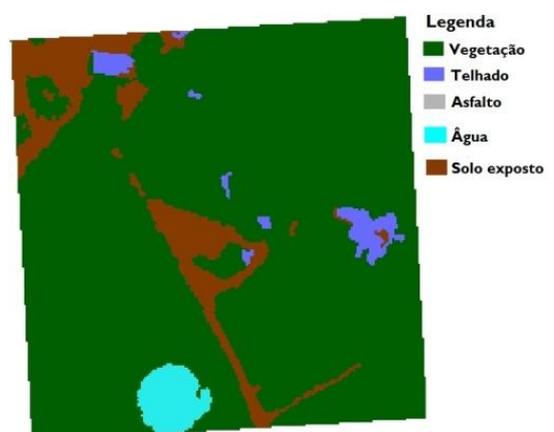


Figura 12 – Sítio Urbano: Aeroporto.
Fonte: *Google Earth*,(2011) e Coraiola et al. (2011).



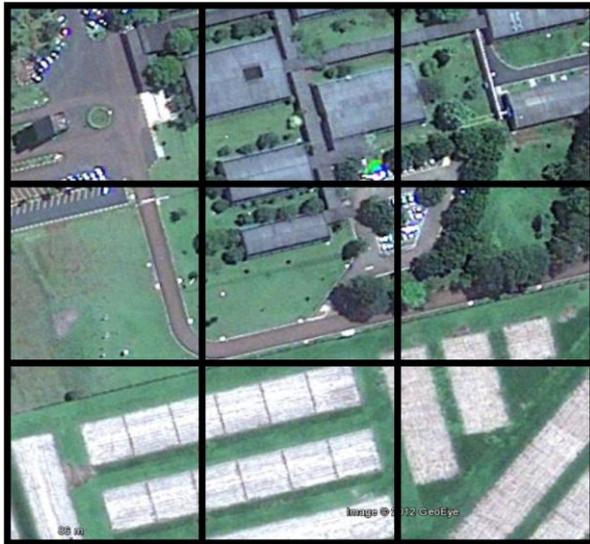
A)



B)

Figura 13 - Sítios Rurais: A) Universidade Estadual de Londrina, B) Instituto Agronômico do Paraná.

Fonte: *Google Earth*,(2011) e Coraiola et al. (2011).



A)

B)

Figura 14 - Sítios Rurais: A) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, B) Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Fonte: *Google Earth*, (2011) e Coraiola et al. (2011).

Tabela 6 - Porcentagens de uso do solo para 40.000 m² ao redor dos pontos monitorados, usando o *software* SPRING.

Uso do solo/Sítios	Vegetação	Telhado	Asfalto	Água	Solo Exposto
Rua Belo Horizonte (BH)	21	61	17	1	0
Biblioteca Municipal (BIB)	38	40	21	0	0
Prédio Lessence (LES)	7	47	43	1	2
IATE Clube (IAT)	33	14	20	32	0
Universidade Tecnológica Federal do Paraná * (UTF)	-	-	-	-	-
Av. Lucia Helena (LUC)	17	60	22	0	0
Rua Odilon Carvalho (ODI)	16	46	38	0	0
Rua Servino Freitas (SER)	31	49	12	0	8
Universidade Estadual de Londrina (UEL)	69	17	13	0	0
Pq. de Exposições (PQE)	31	22	28	0	18
EMBRAPA Soja (EMB)	83	6	11	0	0
Aeroporto (LDB)	19	17	64	0	0
SIMEPAR (SIM)	86	2	0	2	10

* Sem análise com *software* SPRING devido à falta de imagem atualizada.

Fonte: Coraiola et al.(2011).

Posterior à classificação da cobertura da superfície, foram instalados 10 sensores HOBO U23 para medidas de temperatura e umidade do ar a 1,5 m do solo nos sítios especificados na Figura 7. O HOBO U23 opera na faixa compreendida entre -40 a 70 °C, com resolução de 0,02 °C e precisão de 0,2 °C, coletando os dados a cada minuto. A EMBRAPA, Aeroporto de Londrina e IAPAR possuem suas próprias estações meteorológicas e os dados foram fornecidos por essas instituições.

Os dados para calcular o α_s foram extraídos de um conjunto de imagens identificados com o código MCD43A3, onde cada imagem é um mosaico de 2400 x 2400 *pixels*, chamado grânulo. Os grânulos estão disponibilizados no site da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), como parte do Sistema de Dados e Informações do Sistema de Observações Terrestres (EOSDIS) (REVERB ECHO, 2011). Cada grânulo foi escolhido de tal forma que estivesse centrado nas coordenadas de Londrina (latitude 23,31° S

e longitude: 53,13° W). Mediante o *software* MODIS *Reprojection Tool* (MRT), disponível no pacote computacional do produto MCD43A3 (SHAAF, 2006), o grânulo é mudado do formato HDF para TIF, de modo a facilitar o processamento das imagens com outros *softwares*. O seguinte passo foi mudar da projeção sinusoidal para projeção geográfica (latitude/longitude) e construir um mosaico com todos os *pixels* de modo que a região de estudo seja centralizada. Um resumo das etapas do processamento das imagens é ilustrado na Figura 15.

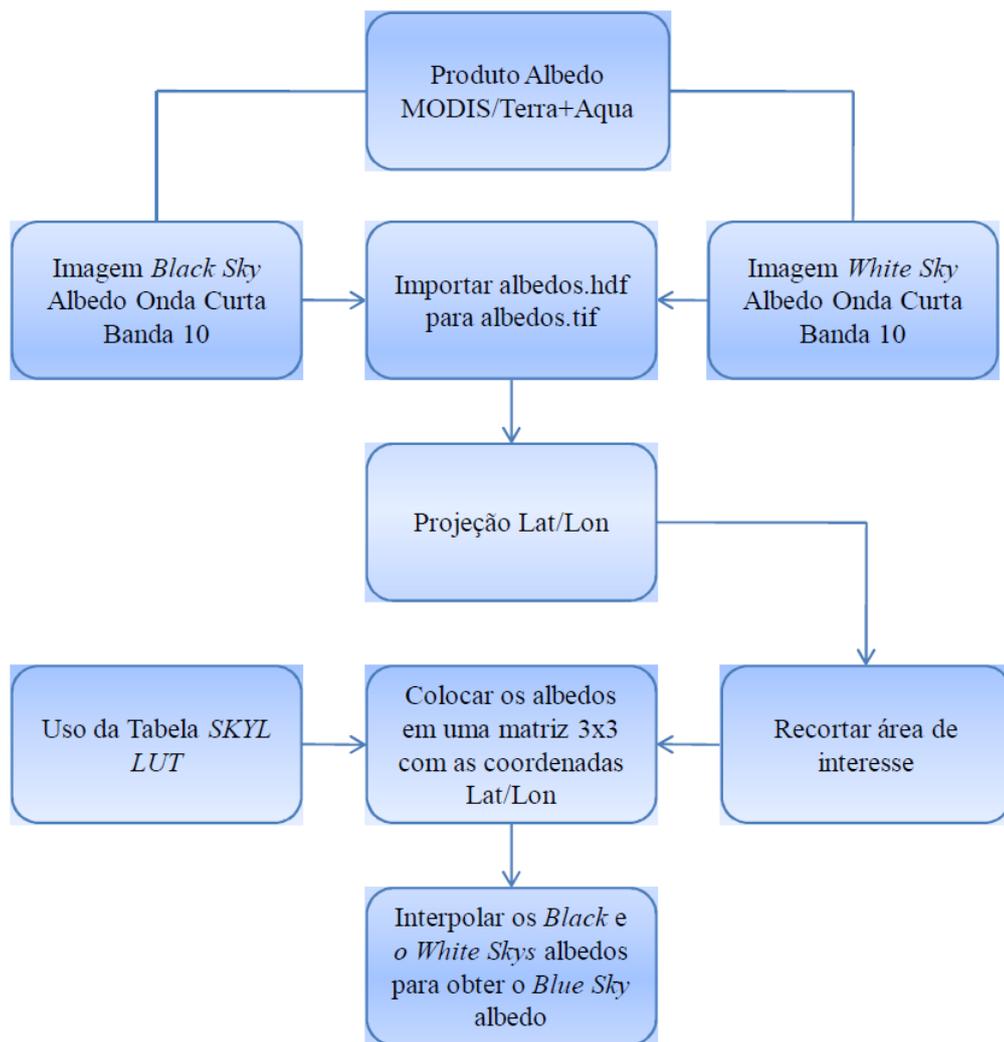


Figura 15 - Etapa de processamento das imagens para a obtenção do albedo

A Equação 8 foi utilizada para obter o α_s mencionado na seção 2.3.1, no intervalo de 0,250 a 4,000 μm (Banda 10 da Tabela 4), que inclui os espectros ultravioleta, visível e infravermelho. Esta Equação utiliza a fração difusa (FD) obtida da tabela *SKYL LUT* (do inglês *Sky Light Look-Up Table*) disponível também no pacote computacional do produto

MCD43A3. A *SKYL LUT* é uma tabela de consulta que contém os valores da *FD* para cada uma das bandas listadas na Tabela 4, em função dos tipos de aerossóis (continentais e marítimos), profundidade óptica (0 a 1, com variação de 0,02) e ângulo zenital solar (0° a 89°, variação em passos de 1°) corrigidos dos efeitos atmosféricos (código 6S, do inglês *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (VERMOTE et al., 1997).

Embora, a tabela *SKYL LUT* contenha os valores das *FDs*, para consultá-la, é necessário conhecer os valores da profundidade óptica do aerossol (*AOD*, do inglês, *Aerosol Optical Depth*), e do θ_i , e assim ter uma maior aproximação do valor da *FD* correspondente à imagem que se está processando. Portanto, os valores da *AOD* foram obtidos da página *web* GIOVANNI (acrônimo do inglês, GES – DISC (*Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*) *Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure*) (ACKER e LEPTOUKH, 2007). GIOVANNI é uma página *web* desenvolvida pelo Centro *Goddard* de Informações e Serviços de Dados referentes às Ciências da Terra (GES – DISC), vinculado à NASA, fornecendo dados de sensoriamento remoto em nível global, de maneira que os usuários possam visualizar analisar e acessar os dados *online*, sem necessidade de baixá-los. Neste estudo em particular, a página *web* GIOVANNI foi utilizada para visualizar os valores da *AOD* na banda espectral de 550 nm, fornecidos pelos produtos MOD08_M3.051 e MYD08_M3.051, obtidos dos sensores MODIS – *Terra* e MODIS – *Aqua*, respectivamente. Ambos os produtos têm resolução temporal mensal e resolução espacial em grade global de 1° x 1°. O produto MOD08_M3.051, está disponível desde março de 2000 e o produto MYD08_M3.051 desde julho de 2002. Uma vez que o período de análises do α_s abrange o período desde 18 de fevereiro de 2000 até 31 de dezembro de 2011, foi utilizado a *AOD* do produto MOD08_M3.051 (GIOVANNI, 2011).

Para consultar o valor do θ_i na tabela *SKYL LUT*, utiliza-se a seguinte equação:

$$\cos(\theta_i) = (\sin(lat) * \sin(d)) + (\cos(lat) * \cos(d) * \cos(h)) \quad (9)$$

em que:

lat: Latitude do sítio selecionado;

d: Declinação solar calculada por $23,45 \sin [(360/365)*(DJ - 80)]$;

DJ: Dia do ano (1 – 365);

h : Ângulo horário, calculado como $(\text{Hora local} - 12) * 15$.

Para aplicar a Equação 9, foram analisadas as passagens dos satélites *Terra* e *Aqua* sobre a América do Sul. Em média, o horário da passagem do satélite *Aqua* sobre a região de estudo ocorre entre as 5 e 17 UTC e do satélite *Terra* entre 02 e 15 UTC, de modo que o ângulo horário foi calculado para o horário de 13 UTC, correspondente ao horário mais próximo ao meio-dia solar local e que está entre as passagens dos satélites *Aqua* e *Terra*.

Como a resolução temporal é de 16 dias, foram utilizados aproximadamente dois grânulos por mês. Por exemplo, o primeiro grânulo de cada ano abrange o período de 01 de janeiro até 16 de janeiro; o segundo grânulo, 17 de janeiro até 01 de fevereiro, e assim por diante, totalizando 23 grânulos por ano. A declinação solar da Equação 9 depende do dia do ano (DJ), para o qual foi adotado o dia médio para cada período de cada grânulo. Por exemplo, $DJ = 8$ para o período de 01 a 16 de janeiro e $DJ = 25$ para o período de 17 de janeiro a 01 de fevereiro.

O α_s foi extraído considerando o *pixel* mais próximo a cada sítio selecionado, centrando esse *pixel* numa matriz de 3×3 *pixels* (FIG.16). A média e o desvio padrão dessas matrizes foram calculados para avaliar a variação do α_s entre um *pixel* e outro, de modo a identificar o albedo característico das superfícies urbanas e rurais.

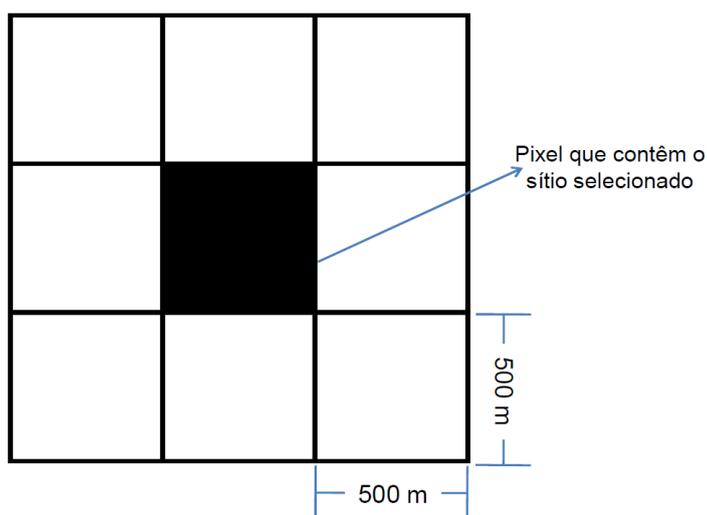


Figura 16 - Representação da matriz 3×3 *pixels*.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados do projeto ICALON

Coraiola et al. (2011) monitoraram a T_{ar} nos diferentes sítios selecionados, no período de 10 de junho a 16 de agosto de 2011. O período de observação foi dominado por três situações sinóticas principais: frente fria, sistemas de alta pressão pós-frontal e alta pressão estacionária. O período de frente fria caracterizou-se pela passagem de massa de ar fria na região provocando queda brusca na T_{ar} , ventos $> 4 \text{ ms}^{-1}$, tempestades e trovoadas. O período de alta pressão pós-frontal compreendeu o dia, ou alguns dias, após a passagem da frente fria e é caracterizado pela diminuição da T_{ar} , penetração de ar seco, ventos $< 4 \text{ ms}^{-1}$, e céu com pouca nebulosidade. O período de alta pressão estacionária foi caracterizado por elevadas T_{ar} , ventos $< 2 \text{ ms}^{-1}$ e pouca ou nenhuma nebulosidade.

A intensidade da ilha de calor foi calculada como:

$$\Delta T = T_i - T_{ref} \quad (10)$$

em que T_i é a T_{ar} da i -ésima estação e T_{ref} é a T_{ar} da estação de referência, tomada aqui como o campus da UEL, localizada na periferia da cidade (FIG. 7).

A UEL foi escolhida para ser a estação de referência por ser uma região afastada do centro da cidade e por apresentar poucas modificações antrópicas. A UEL possui uma área total de $2.226.013 \text{ m}^2$, com $181.675,82 \text{ m}^2$ de área construída, o que corresponde a apenas 8,2% da área total. O restante da área total se distribui entre vegetação nativa, floresta estacional semi-decidual e alguns cultivos agrícolas (SHIBATTA et al., 2009).

Na Figura 17 pode-se observar que a intensidade da ICU é mínima durante períodos de frente fria e se intensifica progressivamente em situações de alta pressão pós – frontal e estacionária. Um estudo de caso mais detalhado para o dia 15 de julho, quando predominou um sistema de alta pressão estacionária, mostrou que as diferenças de temperatura média diária entre os sítios com predominância de asfalto e telhado e o sítio de referência chegou a 7°C , enquanto que nos sítios com maiores áreas vegetadas a diferença observada oscilou entre $0,5^\circ\text{C}$ e 1°C (CORAIOLA et al., 2011). Os autores deste trabalho enfatizaram que em condições de alta pressão estacionária, a incidência da radiação de onda curta foi maior e a velocidade do vento menor. Em tais condições a T_{ar} é mais elevada em

todos os sítios, influenciada pelas propriedades da superfície, principalmente naqueles sítios com predominância de asfalto e telhado. A intensidade da ICU também é maior durante a noite e menor durante o dia. Isto porque nas áreas vegetadas o processo de evapotranspiração é maior e produz um efeito de arrefecimento com maior rapidez que nas áreas urbanas, especialmente durante a noite. Devido à ausência da radiação solar, o calor armazenado durante o dia é liberado durante a noite.

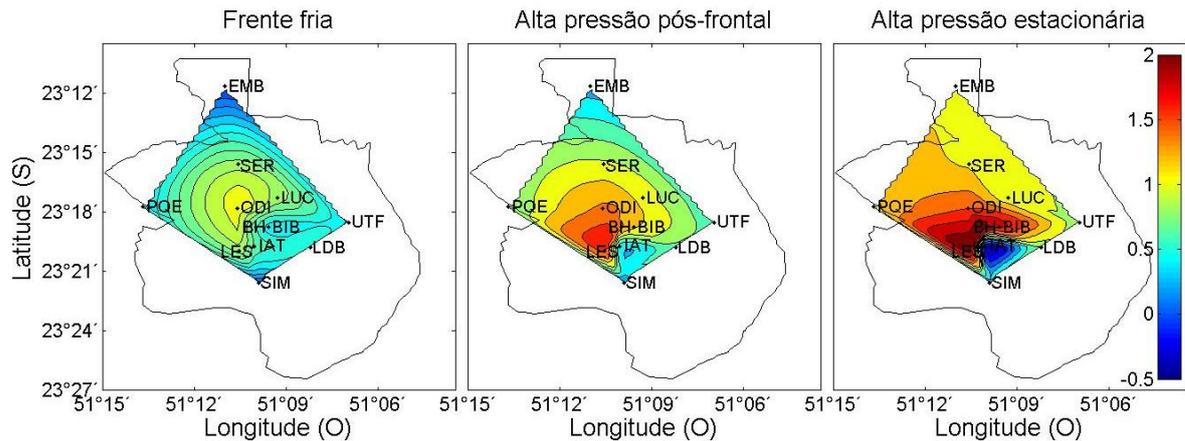


Figura17 - Distribuição espacial da intensidade média da ICU em Londrina.
Fonte: Coraiola et al.(2011).

4.2. Resultados do α_s de cada sítio para o período 2000- 2011.

Para a representação gráfica dos valores de α_s foi escolhido diagramas de caixas ou *boxplots*. A distribuição dos quartis num diagrama *boxplot* depende da configuração do *software* utilizado para representá-los graficamente. No presente trabalho, os dados dos *boxplots* estão distribuídos da seguinte maneira: a borda inferior da caixa é 25º percentil, a linha central é a mediana, a borda superior da caixa é o 75º percentil, os *whiskers* ou bigodes representam o 5º percentil (inferior) e o 95º percentil (superior).

As figuras seguintes representam a variabilidade sazonal e interanual (2000 - 2011) do α_s para cada um dos 13 sítios selecionados, agrupados segundo a ordem crescente da vegetação contida em cada um deles de acordo com a classificação da Tabela 6. Os sítios estão classificados em grupos urbanos (FIG. 18), urbanos com vegetação (FIG. 19) e rurais (FIG. 20). Cada *boxplot* representa os valores de α_s em 23 períodos de 16 dias, exceto para o ano 2000, que tem só 21 períodos devido à disponibilidade das imagens somente a partir do dia 18 de fevereiro. Porém, a partir do ano 2001, cada período de 16 dias inicia-se em 1º de janeiro a 31 de dezembro.

Em geral, a variabilidade interanual do α_s para as áreas urbanas é menor quando comparado com as áreas rurais. Isto se deve ao fato do α_s das áreas vegetadas sofrer maior variação entre estações num mesmo ano, especialmente se a área contém algum tipo de cultura agrícola.

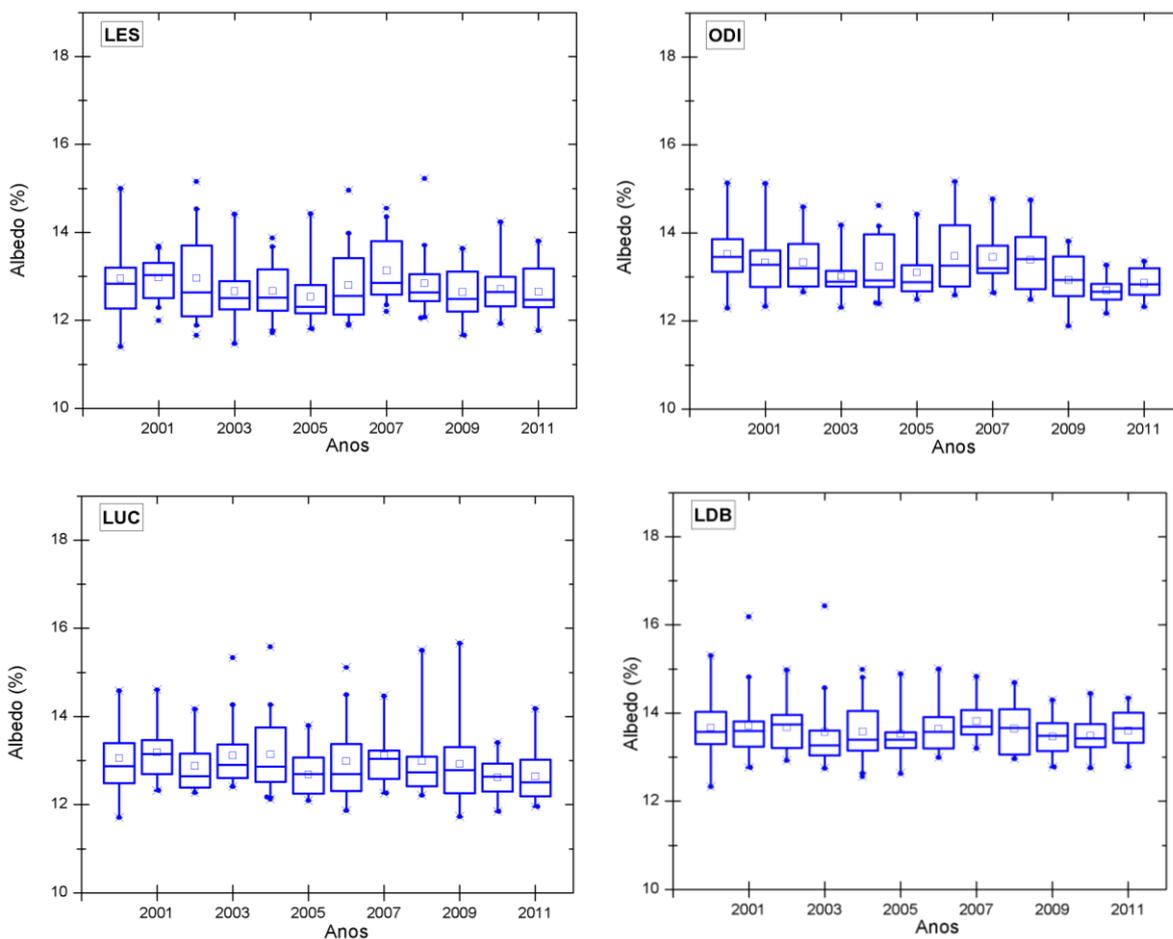


Figura 18 - Série temporal de albedo da superfície (2000 – 2011) para sítios urbanos com cobertura vegetal < 20%.

Os quatro sítios representados na Figura 18 contêm maior quantidade de elementos impermeáveis (asfalto e/ou telhado) com baixo (< 20%) conteúdo de vegetação nas áreas. Os valores de α_s , observados em todos esses sítios no período 2000 – 2011 estão entre 11 e 17%; distribuídos da seguinte maneira: LES entre 11 e 15%, ODI entre 12 e 15%, LUC entre 12 e 16% e LDB entre 12 e 17%. Na maioria dos sítios se observa uma tendência de diminuição do α_s nos últimos quatro anos.

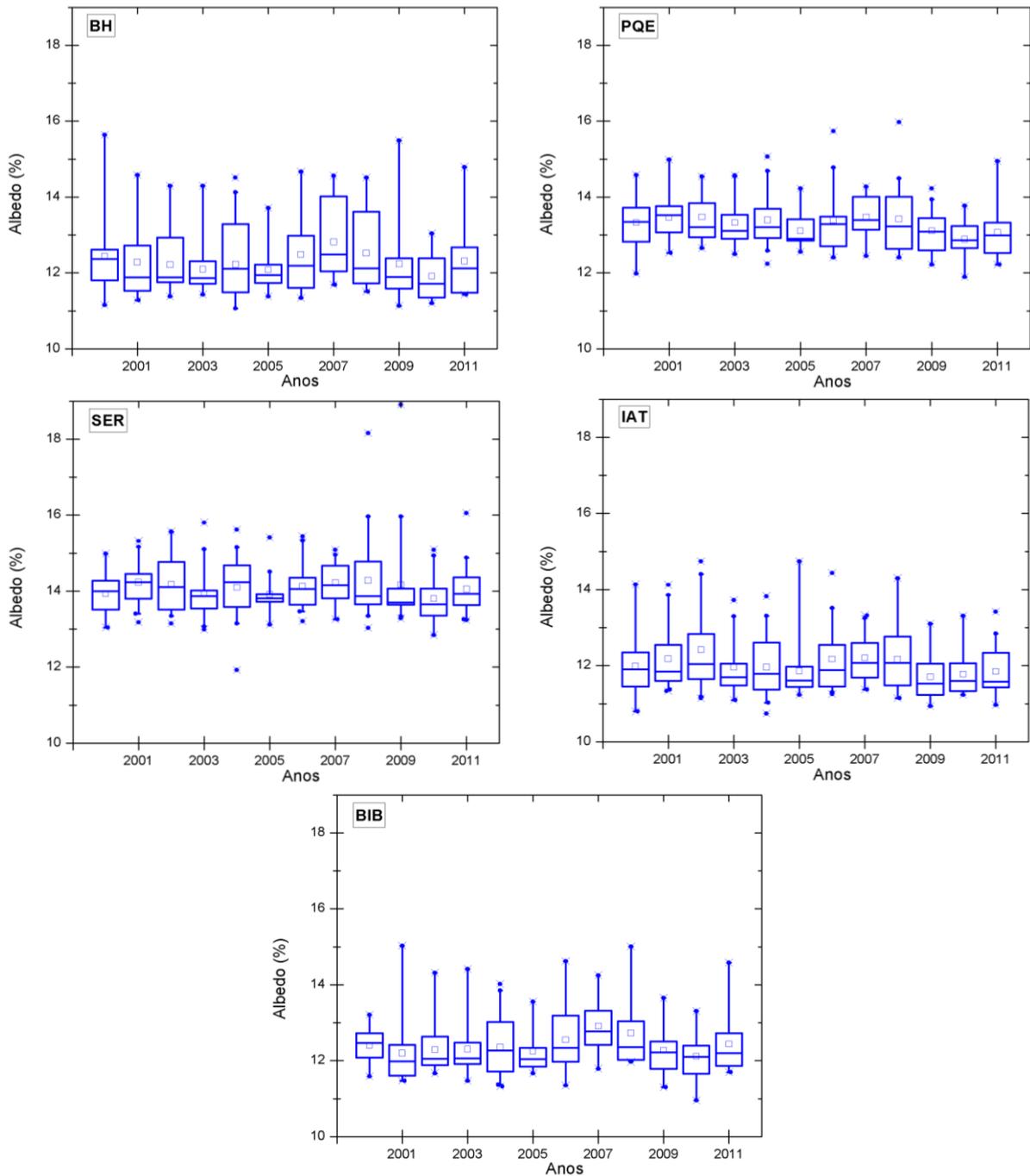


Figura 19 - Série temporal de albedo da superfície (2000 – 2011) para sítios urbanos e com componente de vegetação entre 20 e 40%.

Na Figura 19 se agruparam os sítios urbanos com conteúdo de vegetação entre 20 e 40 %, alguns deles localizados no centro urbano (BH, IAT e BIB) e outros na periferia da mancha urbana (PQE e SER) (FIG. 7). Os valores de α_s observados em cada sítio no período 2000 – 2011 se distribuem da seguinte forma: BH entre 11 e 16%, PQE entre 12 e 16%, SER entre 12 e 19%, IAT entre 11 e 15% e BIB entre 11 e 15%. Os maiores valores de α_s se

manifestam nos sítios localizados na fronteira da cidade. Assim como nos sítios urbanos, também nos sítios urbanos com vegetação, o α_s tende a diminuir nos últimos quatro anos.

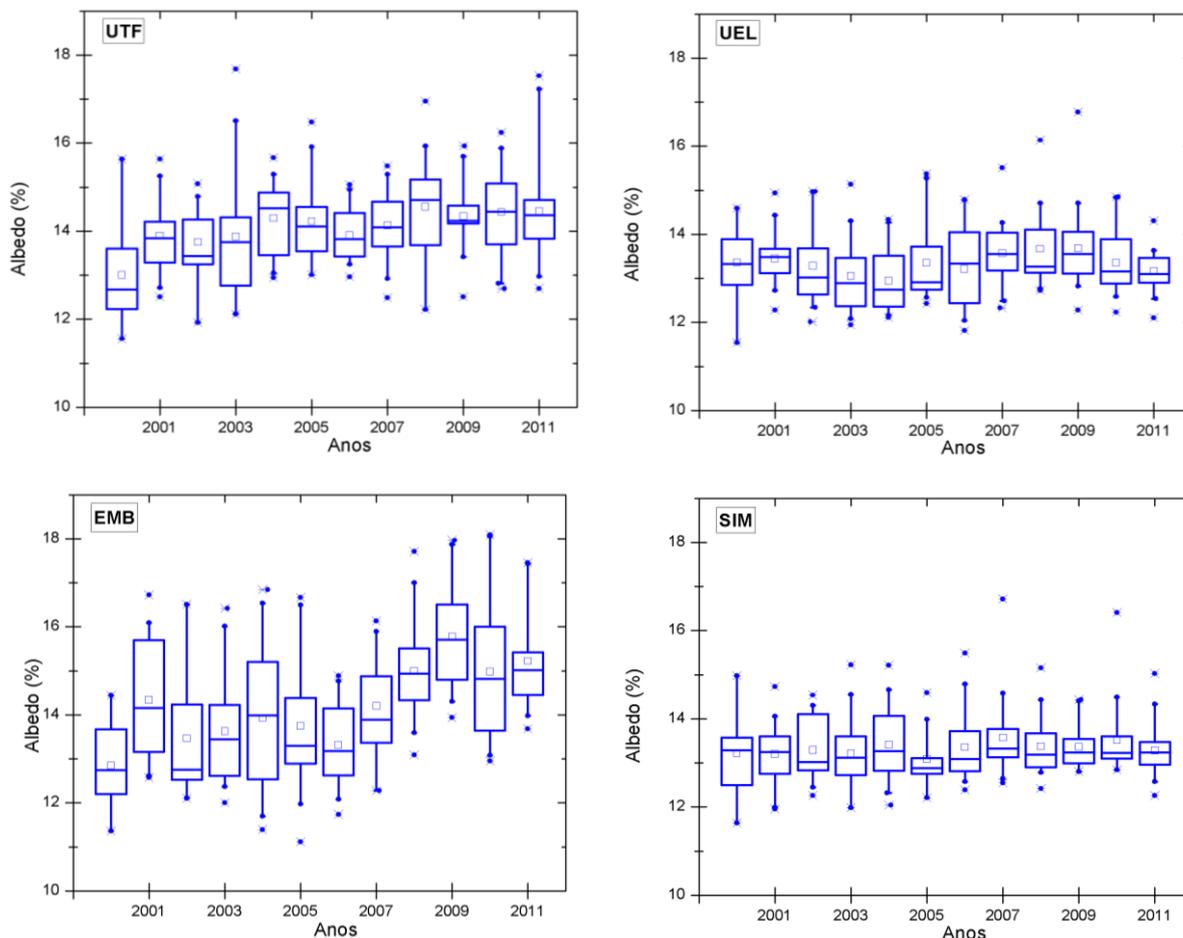


Figura 20– Série temporal de albedo da superfície (2000 – 2011) para sítios rurais com cobertura vegetal entre 50 e 83%.

Na Figura 20 se agrupam os sítios rurais onde é mostrando os valores de α_s para os sítios: SIM entre 11 e 17%, EMB entre 11 e 18%, UEL entre 12 e 17% e UTF, entre 12 e 18%. A variabilidade interanual do α_s é diferente em cada sítio. No caso do sítio UTF se observa um padrão de aumento entre os anos 2000 e 2003, logo se observam quedas entre os anos 2003 e 2006 daí novamente houve aumentos até o ano 2008, quando cai levemente até o ano 2010 onde finalmente se observa outro aumento para o ano 2011.

No sítio UEL se observa um padrão de aumento de α_s entre os anos 2006 e 2009 e uma queda subsequente. A variabilidade sazonal do α_s é mais notável no sítio EMB no qual a tendência de aumento vai do ano 2006 até o ano 2009, observando-se uma leve queda no ano 2010 e logo novamente um aumento no ano 2011. Quanto ao sítio SIM, os valores de α_s têm

um comportamento semelhante ao sítio UTF, onde se observam aumentos e quedas a cada três anos aproximadamente. A variabilidade interanual do α_s nos sítios rurais pode dever-se a períodos de crescimento vegetativo ou algum período de safra. Além disso, a variabilidade interanual da precipitação devido à influência do *El Niño*-Oscilação sul (ENSO) na região pode estar relacionado às variações observadas no α_s , uma vez que o ciclo de ocorrência do fenômeno ENSO é de 2 a 4 anos, em média. (SOUZA, et al., 2004)

Os valores médios do α_s e do desvio padrão para cada um dos 13 sítios estudados estão ilustrados na Figura 21. Neste caso, cada *boxplot* representa 273 períodos de 16 dias, totalizando 12 anos de observações (2000 – 2011) e os sítios também foram dispostos de acordo com a ordem crescente da porcentagem de vegetação contida em suas áreas.

Em geral os sítios com predominância de elementos urbanos parecem apresentar menor variabilidade nos valores de α_s (11 –15%) que os sítios com maior porcentagem de vegetação (11 – 18%) durante todo o período estudado, apresentando um desvio padrão que não supera 3%. Resultados semelhantes foram encontrados por Saunders (1990) nas áreas agrícolas das Ilhas Britânicas, cujos valores de α_s variaram entre 17 e 22%, em contraste com as áreas urbanas cujos α_s (\approx 13%) foram menores e mais constantes durante o período observado (primavera e verão boreal de 1984, 1986 e 1987).

O sítio SER, situado em uma região com predominância de telhado e asfalto, apresenta um valor máximo em torno de 18%. Isto pode ser parcialmente explicado pelo fato que foram introduzidos *pixels* com superfícies de vegetação dentro da matriz 3x3, dado que este sítio se localiza quase na fronteira da mancha urbana (FIG. 7).

Outro sítio que apresentou um valor extremo de α_s , em torno de 8%, é BH, localizado em uma região com grande predomínio de telhado e asfalto e que, junto com o sítio LUC, apresentam a menor porcentagem de vegetação entre os sítios. Um valor próximo a este resultado (6%) foi encontrado por Krayenhoff e Voogt (2010) no centro urbano e área residencial de Chicago, EUA. Por tanto, o baixo valor de α_s encontrado, corrobora o fato da intensidade da ICU ser mais pronunciada na região central da cidade.

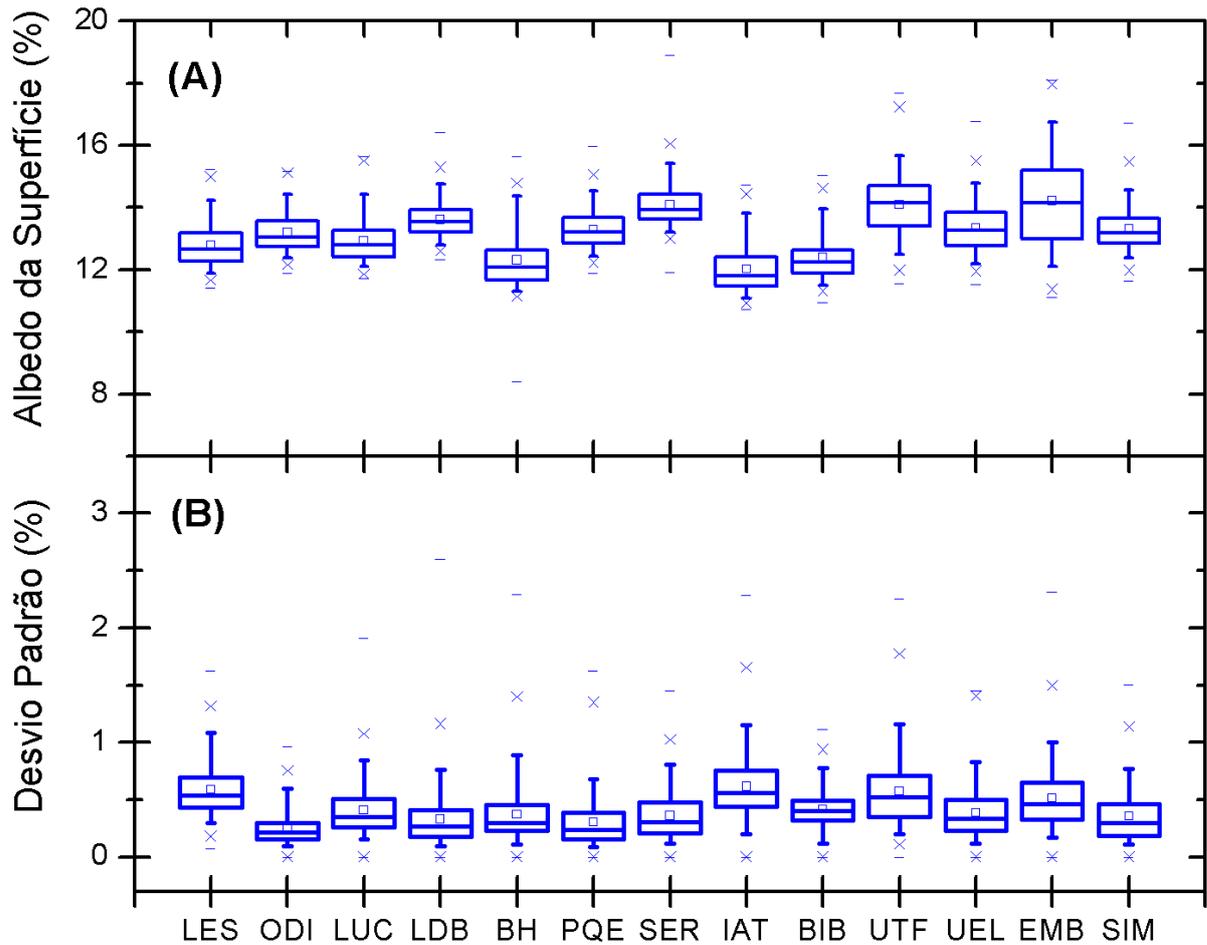


Figura 21 - Média (A) e desvio padrão (B) dos valores quinzenais de albedo no período 2000 – 2011 para todos os sítios monitorados.

Os coeficientes de variação (CV) apresentados na Tabela 7 foram calculados a partir da média e do desvio padrão dos valores obtidos das matrizes 3x3. Observa-se que, para quase todos os sítios e anos analisados, a variação do α_s entre pontos circunvizinhos ao *pixel* analisado é menor do que 5%, exceto para o sítio IAT nos anos 2000 e 2004, onde os CV foram 7 e 6%, respectivamente, e o sítio EMB, cujo CV no ano 2000 foi de 6%. Tais resultados são esperados, visto que na área do IAT predominam superfícies com água e diversos campos gramados, fatores relacionados à variação sazonal do α_s . No caso do sítio EMB, a variação se justifica devido ao desenvolvimento de diversos cultivos (principalmente soja, trigo e girassol), cujo α_s varia de um período para o outro, entre cultivos e períodos fenológicos.

Tabela 7 - Coeficiente de Variação (CV) da matriz de 3x3 *pixels*.

Coeficiente de Variação (%)												
Sítios	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
BIB	4	4	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3
IAT	7	5	5	5	6	4	5	5	5	5	5	4
UEL	4	3	2	3	3	2	4	3	3	3	3	3
LUC	3	3	4	3	4	3	3	3	3	2	3	3
SER	3	2	3	3	3	2	3	2	3	2	2	3
ODI	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
LES	5	4	4	5	5	4	5	4	4	5	5	4
BH	3	4	4	3	4	3	3	2	3	3	3	3
PQE	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	2	2
UTF	5	4	4	4	4	3	4	4	5	5	4	4
SIM	4	3	3	3	4	2	2	2	2	2	2	2
LDB	3	2	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2
EMB	6	4	3	5	4	3	3	4	3	3	2	3

4.3. Relação do α_s com as variáveis meteorológicas: temperatura do ar e precipitação

Na Figura 22 se observa a média mensal da precipitação e das temperaturas máxima e mínima do ar no período de 2000 a 2011, estimados a partir dos dados fornecidos pelo IAPAR (2000-2010) e pelo SIMEPAR (2011). Cabe mencionar que tanto o IAPAR quanto o SIMEPAR possuem suas estações meteorológicas instaladas no mesmo sítio, portanto o *pixel* considerado para os cálculos do α_s contém as duas estações meteorológicas e para padronizar os nomes dos sítios, foi adotado SIM para designar SIMEPAR/IAPAR.

Os valores pouco mais baixos de α_s se observam nos meses de julho a outubro, e valores um pouco mais elevados são observados no período de verão (novembro, dezembro e janeiro). Contrário ao esperado, na Figura 22 observa-se que os menores valores de α_s coincidem com os menores índices pluviométricos, e vice-versa. Durante períodos chuvosos, onde a umidade no solo é maior, espera-se que haja uma diminuição da refletância no espectro infravermelho próximo (0,7 - 1,5 μm) e infravermelho médio (1,5 - 5,6 μm) (OLIVEIRA et al., 2010), uma vez que as moléculas de água absorvem intensamente a radiação nestas faixas do espectro (BOWKER et al., 1985), reduzindo os valores de α_s .

Porém, um elevado índice pluviométrico não implica necessariamente em uma diminuição do α_s . O tipo de solo e a cobertura vegetal são outros dos fatores que modificam o α_s . Este fato foi corroborado por Oliveira et al. (2010) no estudo sobre a bacia hidrográfica do rio Moxotó (PE), em regiões classificadas como áreas de desenvolvimento antropogênica, referindo-se especialmente às áreas cultivadas. Segundo os autores, apesar do elevado índice pluviométrico (200 mm, aproximadamente) observado no primeiro semestre do ano 2008, o α_s foi superior a 40%. As mesmas considerações podem ser aplicadas ao sítio SIM, que é constituído por diversos tipos de cultivos agrícolas. Este sítio está localizado em uma área rural e constitui um campo experimental do IAPAR, pelo que ao longo do ano pode conter diversas culturas agrícolas e o aumento do α_s a partir de outubro até janeiro, assim como também a diminuição de α_s no inverno, pode estar associado às diversas etapas do crescimento vegetativo de algumas culturas que se desenvolvem na área.

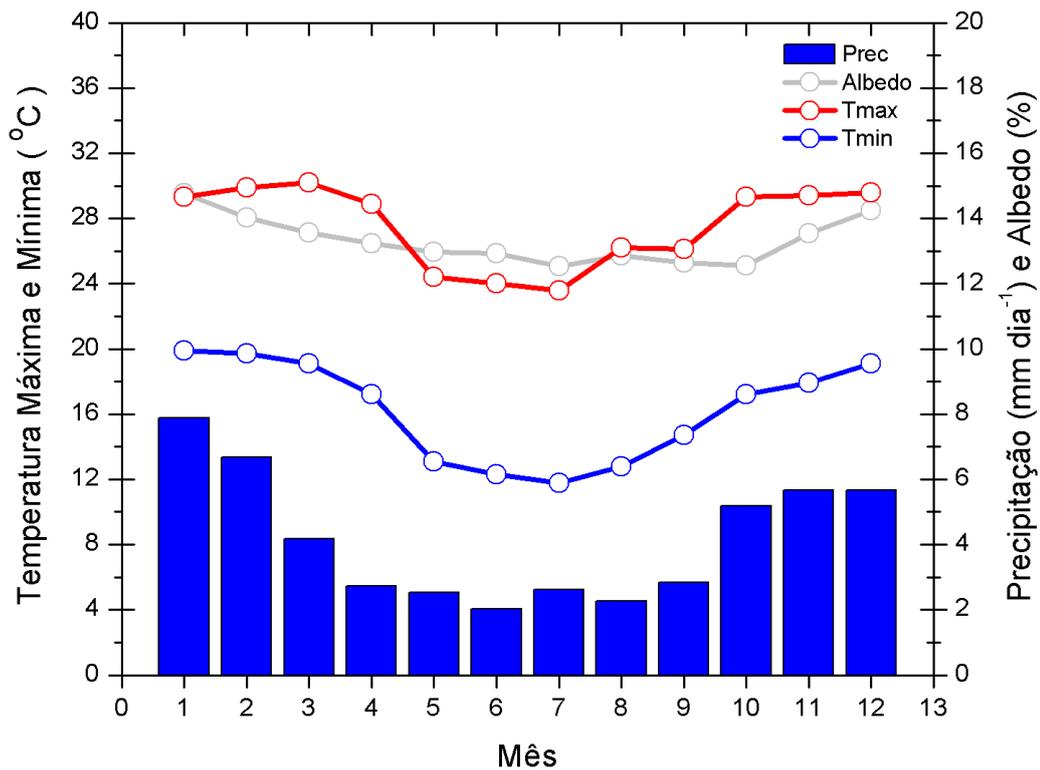


Figura 22 - Média mensal de temperatura máxima e mínima do ar, albedo da superfície e precipitação para as estações SIMEPAR/IAPAR (2000 - 2011).

A relação entre as médias diárias de α_s e T_{ar} , e de α_s e precipitação são apresentadas nas Figuras 23 e 24 respectivamente, para o sítio SIM, entre os anos de 2000 e 2011. Uma vez que α_s possui resolução temporal de 16 dias, os dados de precipitação diária e

T_{ar} média diária foram calculadas em médias de 16 dias para homogeneizar a base temporal das séries.

Na Figura 23, o coeficiente de correlação linear ($R = 0,483$) indica haver uma correlação moderada entre as variáveis α_s e T_{ar} . O α_s varia entre 11 e 17% ao longo do período 2000 – 2011, e os picos mínimos se observam no inverno do ano 2000 e na primavera do ano 2001, apresentando valores de 11%. Os valores mais altos de α_s (16%) se observam ao final e ao princípio de alguns anos. Na segunda quinzena de dezembro de 2003, primeira quinzena de dezembro de 2004, primeira quinzena de janeiro de 2006 e na segunda quinzena de janeiro de 2007 foi observado o valor máximo de 17%; nesses períodos a T_{ar} média variou entre 24 e 25°C.

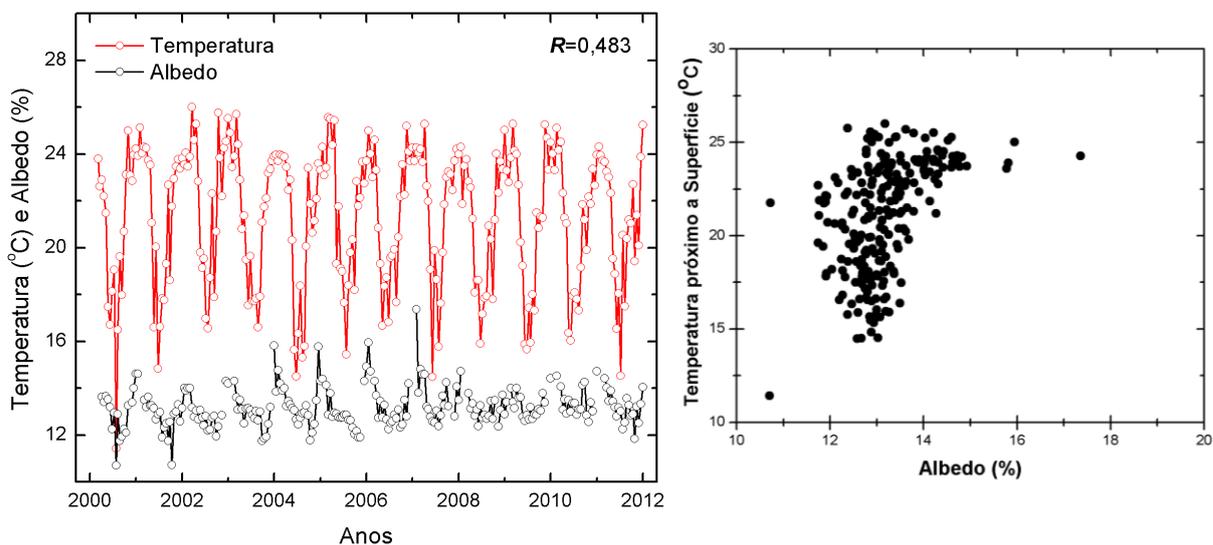


Figura 23 - Série temporal e diagrama de dispersão de temperatura do ar (média de 16 dias) e albedo de superfície para o período 2000 - 2011 no sítio SIMEPAR.

Na Figura 24, o valor de $R = 0,157$ indica uma correlação linear baixa entre o α_s e a precipitação. Os valores máximos de precipitação se observam nos seguintes períodos: segunda quinzena de maio de 2002 (16,1 mm/dia), segunda quinzena de janeiro de 2003 (16,8 mm/dia), segunda quinzena de janeiro de 2005 (18,8 mm/dia), segunda quinzena de outubro de 2009 (18,6 mm/dia) e segunda quinzena de março de 2010 (16,9 mm/dia). Para todos os períodos mencionados anteriormente o α_s apresentou valores aproximadamente constantes (13 – 14%), de tal forma que não se pode concluir que exista algum tipo de relação entre o α_s

e a precipitação, ao menos na faixa do espectro da radiação analisada neste estudo (0, 250 a 4,000 μm).

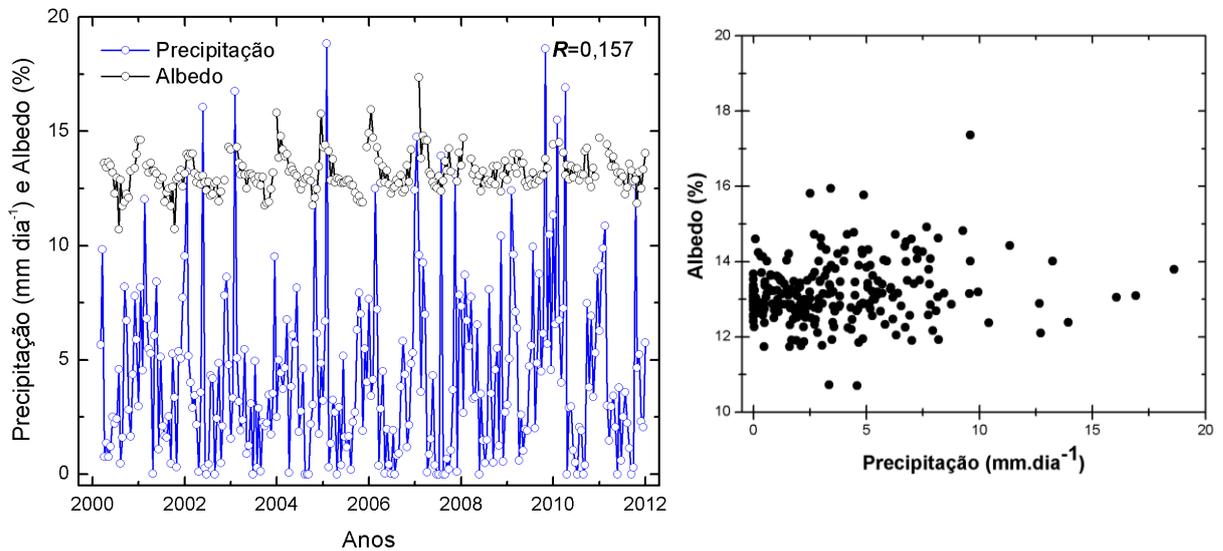


Figura 24 - Série temporal e diagrama de dispersão de precipitação e albedo de superfície para o período 2000 - 2011 no sítio SIMEPAR.

No entanto, estudos conduzidos por Dirmeyer e Shukla (1994) na bacia do rio Amazonas mostram que as modificações no índice pluviométrico estão fortemente ligadas às modificações do α_s devido ao desmatamento. O processo de desmatamento leva a um aumento no α_s com observação da diminuição da evapotranspiração e da precipitação. Segundo o estudo de Dirmeyer e Shukla (1994), a evapotranspiração cai 7% quando a vegetação nativa é substituída por cultivos, e decresce até cerca de 12% quando o desmatamento é acompanhado por aumento acentuado de α_s , como por exemplo, quando o solo torna-se totalmente exposto à radiação solar. Neste cenário, a área desmatada se converte em uma região semiárida, devido à evaporação da umidade do solo, levando a um aumento de α_s e redução da energia absorvida pela superfície, assim como os fluxos de calor latente e sensível. Essas reduções dos fluxos de calor geram uma redução da convecção e conseqüentemente da precipitação. Portanto, a relação precipitação e α_s depende do tipo de vegetação.

A Figura 25 mostra que a correlação entre as variáveis T_{ar} e α_s é muito baixa ($R = -0,198$ e $R^2 = 0,026$). Este resultado pode estar relacionado à sensibilidade da T_{ar} , sendo que as mudanças do α_s é mais perceptível quando a superfície está coberta por algum elemento que sofra uma variação sazonal ou interanual de suas características, evidenciando aumento

ou diminuição do α_s (por exemplo, neve ou cultivos agrícolas). Além disso, a Figura 25 ilustra o comportamento de vários sítios juntos, com diferentes características de uso do solo, razão pela qual não se observa uma correlação mais alta entre as variáveis. Por isso, na Figura 26, analisa-se a relação entre α_s e a T_{ar} separando-se os sítios de acordo com o uso do solo: área urbana, área com vegetação e área com água.

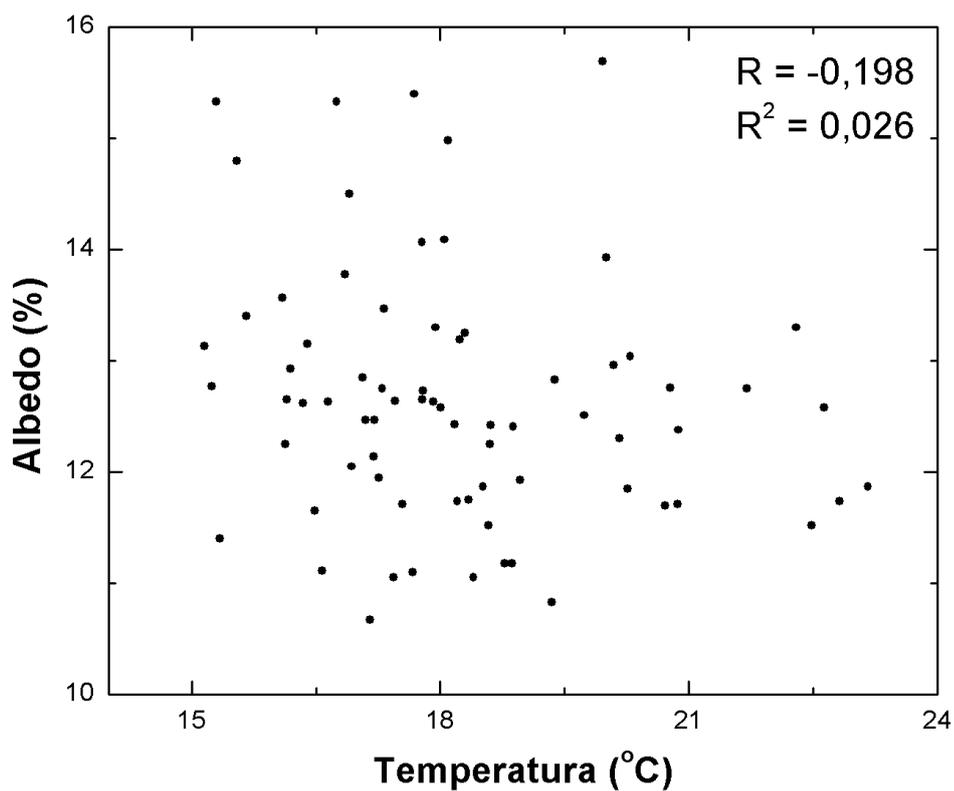


Figura 25—Diagrama de dispersão entre albedo da superfície e temperatura do ar nos meses de junho, julho e agosto de 2011 em Londrina (PR).

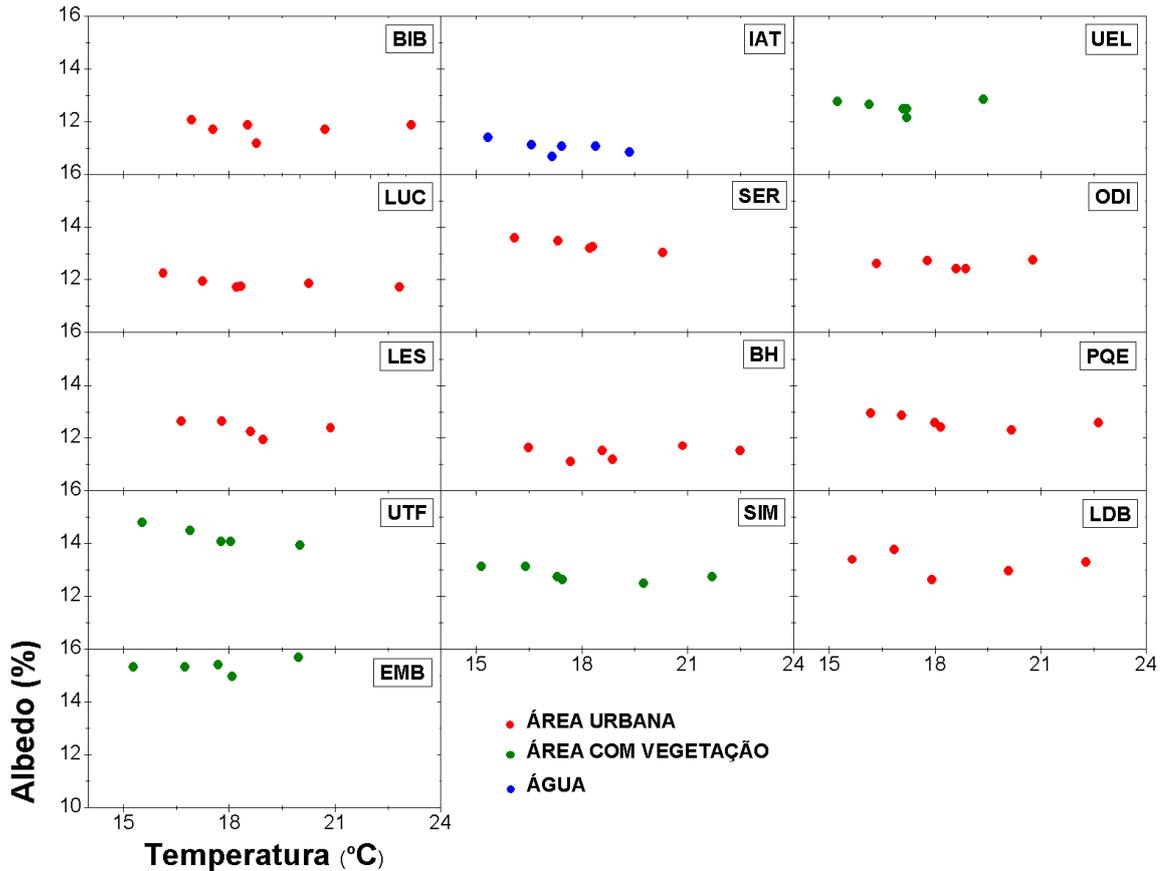


Figura 26–Diagrama de dispersão entre albedo da superfície e temperatura média do ar de acordo com o uso do solo nos meses: junho, julho e agosto de 2011 em Londrina (PR).

Em geral, as áreas com vegetação mostram os valores mais altos de α_s comparados com as áreas de predomínio urbano e água. Os valores de α_s dos sítios urbanos oscilam entre 11 e 14%, e dos sítios rurais entre 12 e 16%. O α_s do sítio com maior porcentagem de água (IAT) é 11%. Um sítio como IAT se diferencia facilmente dos outros sítios devido à presença da água, cuja refletância das porções dos espectros visível (3 – 5%) e infravermelho próximo (5 –13%) são baixas (BOWKER et al., 1985), o que explica o baixo valor do α_s deste sítio quando comparado aos outros.

A T_{ar} média dos seis períodos de 16 dias, para cada uma das três categorias apresentadas na Figura 26, foram: área urbana 18,7 °C, área com vegetação 17,6 °C e a área com maior porcentagem de água, 17,4 °C. Pode-se notar que a amplitude térmica entre os sítios urbanos e o sítio com água é de 1,3 °C, isto porque a água possui a propriedade de resfriamento evaporativo, ou seja, a água tem a capacidade de resfriar o ar quando se evapora. Os processos de evaporação e evapotranspiração promovem resfriamento, pois consomem calor sensível e o transformam em calor latente. Por outro lado, o calor armazenado nas

superfícies urbanas é transferido diretamente para a atmosfera em forma de calor sensível, sem passar pela transformação em calor latente devido à ausência de plantas e a impermeabilização do solo, o que explica o aumento da T_{ar} sobre estas superfícies.

Na Tabela 8 são apresentados os valores do α_s e T_{ar} para todos os sítios. O coeficiente de correlação foi calculado para duas categorias: sítios urbanos e sítios rurais, em cada um dos seis períodos de 16 dias. O sítio IAT aparece na Tabela 8 fora das duas categorias anteriores, uma vez que é o único sítio com maior porcentagem de água (> 30%), não se enquadrando na categoria dos sítios urbanos (asfalto mais telhado > 50%) e sítios rurais (vegetação > 50%). Além disso, como foi dito, a refletância da água na faixa do espectro da radiação solar é muito baixa, de forma que influencia o valor da correlação se fosse considerado em qualquer uma das duas categorias.

Tabela 8 - Albedo da superfície (%), temperatura do ar (°C) e coeficiente de correlação por período, para os sítios urbanos e rurais. As correlações em negrito são aquelas significantes a 5%.

		PERÍODO I		PERÍODO II		PERÍODO III		PERÍODO IV		PERÍODO V		PERÍODO VI	
		α_s	T_{ar}	α_s	T_{ar}	α_s	T_{ar}	α_s	T_{ar}	α_s	T_{ar}	α_s	T_{ar}
SÍTIOS URBANOS	BIB	12	16,9	12	17,5	11	18,8	12	20,7	12	18,5	12	23,2
	LDB	13	15,7	14	16,9	13	17,9	13	20,1	13	17,9	13	22,3
	LUC	12	16,1	12	17,3	12	18,3	12	20,3	12	18,2	12	22,8
	SER	14	16,1	13	17,3	13	18,3	13	20,3	13	18,2	13	-
	ODI	13	16,3	13	17,8	12	18,9	13	20,8	12	18,6	12	-
	LES	13	16,6	13	17,8	12	19,0	12	20,9	12	18,6	12	-
	BH	12	16,5	11	17,7	11	18,9	12	20,9	12	18,6	12	22,5
	PQE	13	16,2	13	17,1	12	18,2	12	20,2	13	18,0	13	22,6
R		-0,441		-0,480		-0,691		-0,311		-0,843		-	
SÍTIOS RURAIS	UTF	15	15,5	15	16,9	14	18,0	14	20,0	14	17,8	14	-
	SIM	13	15,2	13	16,4	13	17,5	13	19,7	13	17,3	13	21,7
	UEL	13	15,2	13	16,1	12	17,2	13	19,4	12	17,2	12	17,1
	EMB	15	15,3	15	16,7	15	18,1	16	20,0	15	17,7	15	-
R		0,817		0,907		0,974		0,739		0,877		-	
IAT	11	15,3	11	16,6	11	17,2	11	19,4	11	17,4	11	18,4	

Os seis períodos da Tabela 8 mostram valores de correlação diferentes tanto para os sítios urbanos como para os sítios rurais. Os valores de R para todos os sítios urbanos são negativos, isto implica que quando o α_s urbano diminui a T_{ar} aumenta sobre tais superfícies.

Os valores de R variam entre um período e outro e só no quinto período observa-se o valor mais alto. Por outro lado, nos sítios rurais, os valores de R são altos em todos os períodos.

O coeficiente de correlação ($R = -0,843$) observado no quinto período abrange as datas entre 27 de julho a 11 de agosto de 2011. Coincidentemente, metade deste período apresentou um sistema de alta pressão estacionária sobre a região de estudo, condição em que os ventos são mais fracos e a contribuição advectiva são menores. Com isso, os efeitos locais entre superfície/atmosfera tornam-se mais evidentes, como observado na Figura 17 onde a intensidade de ICU é maior em tais condições. Assim, a relação entre albedo e temperatura do ar torna-se mais evidente sob este tipo de condições sinóticas. No entanto, é necessário um maior número de observações entre as variáveis α_s , T_{ar} e as condições sinóticas.

No caso dos sítios rurais, os valores de R são positivos, indicando que T_{ar} aumenta quando α_s aumenta, ao contrário do que se observa nos sítios urbanos. A relação α_s e T_{ar} para os sítios rurais requer análises de outros fatores, dado que quase todos os sítios rurais considerados aqui contêm algum tipo de cultura agrícola, e o α_s nesse caso depende de fatores como direção e velocidade do vento, disponibilidade hídrica do solo e consumo das plantas, fases de crescimento da cultura e ângulo de incidência da radiação solar.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste estudo, utilizaram-se dados de albedo da superfície obtidos com o sensor MODIS, e de temperatura do ar medidos *in situ* durante três meses na cidade de Londrina, com o objetivo de estabelecer relações entre o uso do solo e a intensidade da ilha de calor urbano.

As análises foram feitas em 13 sítios e classificadas segundo as características de uso do solo, os quais foram agrupados em sítios urbanos (asfalto mais telhado > 50%), rurais (vegetação > 50%) e com presença de água (>30%). Em geral, os sítios rurais mostram os valores mais altos de α_s quando comparados aos sítios de predomínio urbano e aqueles com presença de água. O α_s do sítio com maior porcentagem de água foi 11% e dos sítios urbanos oscilaram entre 11 e 15%; enquanto que os dos sítios rurais ficaram entre 11 e 19%. A T_{ar} média foi maior nos sítios urbanos (18,7 °C) do que no sítio com água (17,4 °C). Esta diferença deve-se ao fato da água possuir a propriedade de resfriar o ar adjacente durante o processo evaporativo.

Os valores extremos foram observados nas áreas urbanas (FIG. 7) da Rua Servino Freitas ($\alpha_s = 18\%$) (FIG. 21) e da Rua Belo Horizonte ($\alpha_s = 8\%$) (FIG. 21). O valor máximo observado na Rua Servino Freitas pode dever-se à inclusão de *pixels* que contenham vegetação nos cálculos de α_s , sendo que ela está localizada no limite da mancha urbana da cidade de Londrina. No caso do valor mínimo, observado na Rua Belo Horizonte, o sítio se localiza em uma região com predomínio de telhado, cujo α_s é próximo aos valores encontrados na literatura (em torno de 6%).

Este estudo também avaliou as incertezas causadas pelas influências de *pixels* vizinhos às áreas de interesse na avaliação de α_s . Os resultados indicam que o *CV* entre os *pixels* circunvizinhos em todo o período analisado apresentou valores em torno de 5%, demonstrando que as variações estão dentro do erro estimado pelo sensor MODIS. Nos sítios com maiores *CV* predominam culturas agrícolas, gramados e água, cujos valores de α_s podem variar sazonalmente, diferentemente dos sítios urbanos, onde os valores de α_s são menos variáveis.

Em relação à avaliação do α_s e T_{ar} a análise mostrou que a correlação entre tais variáveis foi significativa (nível de significância 5%) apenas para um dos seis períodos

analisados, apresentando um valor de correlação de -0,843. Coincidentemente, metade desse período (16 dias) estava sob a influência de um sistema de alta pressão estacionária. A intensidade de ICU é maior em tal condição e tal vez a correlação mais forte entre α_s e T_{ar} possa estar ligada a este tipo de condição sinótica. No entanto, é necessário um maior número de observações para se estabelecer algum padrão de comportamento das variáveis α_s , T_{ar} e as condições sinóticas. Por outro lado, para os sítios rurais, observou-se correlação linear positiva ($0,739 < R < 0,974$) entre o α_s e a T_{ar} nos seis períodos observados. Dado que os quatro sítios considerados rurais contêm algum tipo de cultura agrícola, além da relação α_s e a T_{ar} recomenda-se a análise de outros fatores, tais como ângulo de incidência dos raios solares, fases de crescimento das culturas agrícolas, conteúdo de umidade no solo, direção e velocidade do vento. Deste modo, seria possível observar a sensibilidade do α_s a estes fatores e depois analisar a possível sensibilidade da T_{ar} às mudanças de α_s .

No caso da influência da precipitação sobre o α_s , analisou-se apenas o sítio SIMEPAR, pois este foi o único sítio dentre os analisados que dispõe de dados dessa natureza. Encontrou-se um valor de $R = 0,157$ entre a precipitação e α_s para este sítio. Esta baixa correlação indica que a relação entre α_s e a precipitação não é evidente e possivelmente tal relação dependa da cobertura vegetal. Por exemplo, um aumento do α_s devido ao desmatamento reduz a absorção da radiação solar pela superfície, o que modifica o fluxo de calor sensível e calor latente, resultando em uma redução da convecção e evapotranspiração e conseqüentemente da precipitação.

O principal aporte deste trabalho é a quantificação do α_s de diferentes categorias de uso do solo, utilizando imagens de satélite. Os resultados evidenciam a relação do albedo da superfície com a temperatura do ar, o que caracteriza os efeitos do uso do solo sobre a temperatura do ar. Assim, as informações contidas neste estudo poderiam ser levadas em consideração em projetos de planejamento urbano e desta forma construir cidades mais confortáveis.

A metodologia deste estudo pode estender-se para extrair, por exemplo, a temperatura da superfície. Visando essa possibilidade, no apêndice A detalham-se os valores da temperatura da superfície extraídos do produto MOD11A2 do sensor MODIS, junto com a temperatura do ar medida nos 13 sítios considerados no presente trabalho. Além disso, foi calculado o coeficiente de correlação, resultando valores sempre maiores a 0,8, na maioria das

análises. Isto indica que em casos de não se dispor de dados de T_{ar} , por exemplo, para estudos de ICU, poder-se-ia utilizar dados de T_{sup} obtidos de satélite.

O valor prático das imagens obtidas dos satélites faz delas uma fonte valiosa de informação para numerosas aplicações, tais como a planificação urbana, a gestão de cultivos agrícolas, a exploração mineral, o desenvolvimento de mercados, a vigilância de áreas protegidas, entre outras. Neste contexto, para trabalhos futuros sugere-se a ampliação das análises de outras variáveis de superfície e/ou meteorológicas, tais como temperatura da superfície, emissividade da superfície e índice de umidade no solo a partir de imagens de satélites e sua relação com a intensidade de ICU, um dos principais problemas urbanos e que traz uma série de consequências ambientais e econômicas a nível local e regional. Além disso, sugere-se estender as análises de ICU ao longo de outras estações do ano.

REFERÊNCIAS

- ACKER, J.G.; LEPTOUKH, G. Online analysis enhances use of NASA Earth Science Data. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**. v.88, n.2, p. 14 – 17. Jan. 2007. Doi:10.1029/2007EO020003.
- ACKERMAN, B. Temporal March of the Chicago Heat Island. **Journal of Applied Meteorology**, v. 24, n.6, p. 547-554, Jun. 1985.
- ALEIXO, A.C.M., FRANÇA, I.S., RICARDO, C.S. Crescimento populacional e participação econômica das cidades médias no Brasil pós década de 1970: reflexões para o estudo da dimensão demográfica da cidade média de Montes Claros/MG – III Fórum de Gestão, Pesquisa, Ensino e Extensão, Montes Claros-MG.
- AMORIN, M. C. de C. T; DUBREUIL, V; QUENOL, H; NETO, J. L. S.A.Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). *Confins* [Online], 7 | 2009, posto online em 31 Outubro 2009, Consultado o 30 Março 2012. URL :<http://confins.revues.org/6070>.DOI : 10.4000/confins.6070.
- ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; JÚNIOR, O. A. de C. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**, 2003. INPE-10131-RPQ/752 São José dos Campos – São Paulo.
- BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L.C. L. de; TORRES, S. C. **Clima e cidade: uma abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. Maceió: EDUFAL, 2007. 164 p.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosphere, weather and climate**.9th ed. New York: Routledge, 2009, 533 p.
- BERINGER, J.; CHAPIN III, F.S.; THOMPSON, C.C.; McGUIRE, A.D. Surface energy exchanges along a tundra-forest transition and feedbacks to climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 143 -161, 2005.
- BLAD, B. L.; BAKER, D.G. Reflected radiation of soybean crop.**Agronomy Journal**, v. 64, n.3, p. 277- 280, 1972.
- BLOESCHL, G.The influence of uncertainty in air temperature and Albedo on Snowmelt.**Nordic Hydrology**, v.22, p. 95 -108, 1991.
- BOWKER, D. E.; DAVIS, R. E.; MYRICK, D. L.; STACY, K.; JONES, W. T. Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies. **NASA reference publication 1139**, 1985. Disponível em: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19850022138_1985022138.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2012.
- BRAGA, C. C.; SOARES, F. da R.; DANTAS, F. R. da C.; BARBIERI, L. F. P. Determinação do albedo e índice de área foliar usando o sensor TM / LANDSAT 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal, **Anais...25-30 abri.**, p. 935-942.

BRASILIS, S. Londrina volta a crescer verticalmente. **Folha de Londrina**: O Jornal do Paraná, Londrina, 8 jan. 2008. Disponível em: <<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=567137>>. Acesso em: 27 maio 2011.

BRETZ, S.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 1, p. 95-101, 1998.

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; OLIVEIRA, A. S.; NOGUEIRA, M. C. de J. A. Uso do solo e temperatura superficial em área urbana. **Mercator**, Fortaleza, v. 10, n. 23, p. 207-223, set./dez. 2011.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U. M. GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object oriented data modeling. **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

CORAIOLA, G. C.; CHERNEV, L.; TARGINO, A. C.; KRECL, P. Identificação da ilha de calor em Londrina. In: XVI Seminário de Iniciação Científica Tecnológica, Ponta Grossa –PR, 2011.

COLOMBI, A.; MICHELE, C., de.; PEPE, M.; RAMPINI, A. Estimation of daily mean air temperature from MODIS LST in alpine areas. In: SYMPOSIUM EUROPEAN ASSOCIATION REMOTE SENSING LABORATORY (EARSel), 26, 2006, Warsaw, Polonia, 29 May – 2 June 2006, p. 38 – 46.

COLTRI, P.P; JUNIOR, M.C; VELASCO, G. de NERO; FERREIRA, N.J; FREITAS, S. Influência do uso e cobertura do solo nas ilhas de calor local e regional no município de Piracicaba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, São Paulo. **Anais ...**, Natal, 25-30 abri.,p. 639-646.

COMMONER, B. Rapid Population Growth and Environmental Stress. **International Journal of Health Services**, v. 21, n. 2, p. 199 – 227, 1991.

CORTS, N.R.; NAVARRO, E. J. M.; PARDO, V. A. J.; BISBAL, B. J.M. Clasificación periódica de coberturas terrestres a escala regional con imágenes MODIS. **International Review of geographical information science and technology**, n. 10, p. 1-17. ISSN: 1578-5157.

DIRMEYER, P. A.; SHUKLA, J. Albedo as a modulator of climate response to tropical deforestation. **Journal of geophysical research**, v. 99, n. D10, p. 20,863 – 20,877. Oct. 1994.

DOUSSET, B.; GOURMELON, F.; LAAIDI, K.; ZEGHNOUN, A.; GIRAUDET, E.; BRETIN, P.; MAURI, E.; VANDENTORREN, S. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. **International Journal of Climatology**31: 313–232. DOI: 10.1002/joc.2222, 2011.

DUH, J.D.; SHANDAS, V.; CHANG, H.; GEORGE, L.A. Rates of urbanization and the resiliency of air and water quality. **Science of the total environment**, v. 400, p. 238-256, 2008.

ELIASSON, I. Urban geometry, surface temperature and air temperature. **Energy and Buildings**, n. 15 – 16, p. 141 -145.1990/91.

FEDERER, C.A. Spatial variation of net radiation, albedo and surface temperature of forests. **Journal of Applied Meteorology**, v. 7, p.789 – 795, Oct.1968.

FISHMAN, B.; TAHA, H.; AKBARI, H. Meso-scale cooling effects of high albedo surfaces: analysis of meteorological data from White Sands National Monument and White Sands Missile Range. **Heat Island Group: Lawrence Berkeley National Laboratory**, 1994. Disponível em: <<http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/10180636-qtCaZE/native/>>. Acesso em: 05 maio. 2012.

FREY, C.M.; PARLOW, E.; VOGT, R.; HARHASH, M.; MOHAMMAD, M.; WAHAB, A. Flux measurements in Cairo. Part 1: *in situ* measurements and their applicability for comparison with satellite data. **International Journal of Climatology** 31: 218–231. DOI: 10.1002/joc.2140, 2011.

FUJIBE, F. Urban warming in Japanese cities and its relations to climate change monitoring. **International Journal of Climatology**. 31:162–173. DOI: 10.1002/joc.2142. 2011.

GÁL, T.; RZEPA, M.; GROMEK, B.; UNGER, J. Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica et Chorologica*. Universitatis Szegediensis. Tomus 40-41, p. 17-26, 2007. Disponível em: <<http://www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/akta07/017-026.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2012.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S.; CUNHA, A. R. da. Balanço de radiação de ondas curtas e albedo em cultura de pepino (*cucumis sativus*.) em meio protegido por polietileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, 1999, Pelotas, RS.

GIOVANNI. MODIS Terra and Aqua Monthly Level-3 Data. Atmosphere Monthly Global 1x1 Degree Products. Aerosol Optical Depth at 550 nm. Disponível em: <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_MONTHLY_L3>. Acesso em: 24 maio 2011.

GIRIDHARAN, R., GANESAN, S., LAU, S.S.Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v.36, p. 525–534, 2007.

GOOGLE Inc. Google Earth. Version 6.1.0.5001.2011. Disponível em: <<http://www.google.com/earth/index.html>>

HANSEN, J.; NAZARENKO, L. Soot climate forcing via snow and ice albedos. **PNAS**, v. 101, n. 2, p. 423 – 428, Jan. 13, 2004. Disponível em: <<http://www.pnas.org/content/101/2/423>>. Acesso em: 10 maio 2012.

HU, Y.; JIA, G. Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 9, p. 1382–1395, 2010.

HUWALD, H.; HIGGINS, C.W.; BOLDI, M.O.; ZEID, E.B.; LEHNING, M.; PARLANGE, M.B. Albedo effect on radiative errors in air temperature measurements. **Water Resources Research**, v. 45, 2009. W08431, Doi:10.1029/2008WR007600.

IBRAM. **Instituto Brasília Ambiental**. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/003/00318003.asp?ttCD_CHAVE=137460>. Acesso em: 30 abr. 2012.

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

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). Agrometeorologia. **Clima em Londrina**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1647> > . Acesso em: 27 jan. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades: Londrina – PR**, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 20 jun. 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. **Net Global Radiative Forcing, Global Warming Potentials and Patterns of Forcing**. Disponível em:<http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-2-5.html>. Acesso em: 10 maio 2012.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **População residente – urbana**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 24 jul. 2012.

JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and forest meteorology**, n. 121, p. 19 -35. 2004.

KRAYENHOFF, E.S.; VOOGT, J.A. Impacts of urban albedo increase on local air temperature at daily–annual time scales: model results and synthesis of previous work. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 49, n.8, p. 1634 – 1648, ago. 2010.

KRÜGER, E. L. Impacto do adensamento e da orientação solar de cânions urbanos na demanda por condicionamento térmico de edificações sob condições de clima desértico. **Ambiente Construído**, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 8, n. 1, p. 65 -87, jan./mar, 2008. ISSN 1678-8621.

KRÜGER, E. L.; MINELLA, F. O.; RASIA, F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Building and Environment**, v. 46, p. 621, 2011.

KUSAKA, H; KIMURA, F. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a meso-scale model coupled with an urban canopy model.

Journal of Applied Meteorology: American Meteorological Society, v. 43, p. 1899 - 1910, Dez. 2004.

LI, X. W., STRAHLER, A. H. Geometric optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy effect of crown shape and mutual shadowing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 276–292, 1992.

LIU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. 2nd. ed. California: Academic Press, 2002, 583 p.

LOMBARDO, M. A. Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo – São Paulo: HUCITEC, 1985.

MENDONÇA, F. de A. **O clima e o planejamento urbano de cidade de porte médio e pequeno:** Proposição metodológica para estudo e sua aplicação à Cidade de Londrina/PR. 1994. 322p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MODIS Website. **Specifications.** Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: 25 jul. 2012.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: Land Processes Distributed Active Archive Center. MODIS, product. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table> . Acesso em: 03 mar.2011.

NOGUEIRA, J. L. M.; MORAES, E. C.; BASTOS, E. J de B.; ESPOSITO, E. S. C.; FREIRE, M. L. de F. Refletância de uma superfície vegetada em função da geometria de aquisição. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 3, 1996, Salvador, Bahia. **Anáís...**, 14-19 abril, p. 941-949.

OKE, T.R. The urban energy balance. **Progress in Physical Geography**, v. 12, p. 471-508, 1988.

OLIVEIRA, T. H.; MACHADO, C. C. C.; SILVA, S. J.; GALVÍNIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M.; SILVA, B. B. Índice de umidade (NDWI) e análise espaço-temporal do albedo da superfície da bacia hidrográfica do Rio Moxotó-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 3, p. 55 – 69. 2010.

PARTECKE, J.; SCHWABL, I.; GWINNER, E. Stress and the city: urbanization and its effects on the stress physiology in European blackbirds. **Ecological Society of America: Ecology**, v. 87, n. 8, p. 1945–1952, 2006.

PENG, S.; PIAO, S.; CIAIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; OTTLE, C.; BRÉON, F.M.; NAN, H.; ZHOU, L.; MYNENI, R.B. Surface urban heat island across 419 global big cities. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p. 696 – 703, 2011.

PETITCOLIN, F.; VERMOTE, E. Land surface reflectance, emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data. **Remote Sensing and Environment**, v. 83, p. 112 – 134, 2002.

PEREIRA, G.; MORAES, E. C.; ARAI, E.; OLIVEIRA, L. G. L. de.; FERREIRA, N. J. Estimativas de alterações do albedo de superfície e da emissão de gases do efeito estufa em áreas queimadas inferidas através de imagens Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anáís...** 21-26 abr., p. 4527-4534.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy and Buildings**, v. 37, p. 295-300, 2005.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LIRA, R. F. da F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 42-49, 2006

REVERB ECHO. **NASA's Earth Observing System Data and Information System(EOSDIS)**. Disponível em: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle>. Acesso em: 15 mar. 2011.

RIZWAN, A.M.; DENNIS, Y. C. L.; LIU, C. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, p. 120 – 128, 2008.

ROMÁN, M. O. et al. The MODIS (Collection V005) BRDF/albedo product: Assessment of spatial. **Remote Sensing of Environment**, n. 113, p. 2476–2498, 18 Julho 2009. ISSN: 0034-4257.

ROSENFELD, A.H.; AKBARI, H.; BRETZ, S.; FISHMAN, B. L.; KURN, D. M.; SAILOR, D.; TAHA, H. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs updates. **Energy and Buildings**, v. 22, p. 255 -265, 1995.

ROSS, J. The radiation regime and architecture of plant stands. Norwell, Mass.: The Hague: Dr. W. Junk Publishers. 1981.

ROUJEAN, J.L.; LEROY, M.; DESCHAMPS, P.Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D18, p. 20455-20468. 1992.

SAILOR, D. J. Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover. **Journal of Applied Meteorology**: American Meteorological Society, v. 34, p. 1694 - 1704, Jul, 1995.

SANTOS, A. da C; GOMES, I. A; RIBEIRO, S. R. A. Análise das mudanças de cobertura vegetal na geração de ilhas de calor. estudo de caso: Cascavel e Ponta Grossa - PR – Brasil, 2011.

SAUNDERS, R. W. The determination of broad band surface albedo from AVHRR visible and near-infrared radiances. **International Journal Remote Sensing**. v. 11. n. 1. p. 49 – 67. 1990.

SCHAAF, C. MODIS Land Subsets. **Oak Ridge National Laboratory DAAC**, abril 2004. Disponível em: <<http://daac.ornl.gov/MODIS/MODIS-menu/MCD43.html>>. Acesso em: 29 mar. 2011.

SCHAAF, C. **Tools for MODIS BRDF/Albedo Products**: General tools for MODIS L3 data. actual (Blue-Sky) albedo computation. last updated 5 July 2006. Disponível em: <<http://www-modis.bu.edu/brdf/userguide/tools.html>>. Acesso em 03 abr. 2011.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 2nd. ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006.

SHIBATTA, O. A.; GALVES, W.; CARMO, do D. P.W.; LIMA, de I. P.; LOPES, E.V.; MACHADO, R. A. **A fauna de vertebrados do campus da Universidade Estadual de Londrina, região norte do estado do Paraná, Brasil**. Semina: Ciências Biológicas e da Saúde, Londrina, v. 30, n. 1, p. 3-26, jan./jun. 2009.

SIEMENS –AG.**Desafios das megacidades**: uma perspectiva dos stakeholders. Relatório, set. 2007. Disponível em: <http://www.siemens.com/pool/en/about_us/megacities/megacity_studie_port_1464489.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2012.

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T.; PULWARTY, R.S.; DIAZ, H. F.; BRADLEY, R. S. The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on south American seasonal rainfall. **Earth and Environmental Science**, v. 21, Section A, p. 203 – 235, 2004. DOI: 978-1-4020-2944-8.

SOUZA, P. J. de O. P. de.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. da.; LAUREIRO, R .S.; BISPO, C. J. C.; SOUZA, A. M. L. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.1, p.65-73, 2010.

SOUZA, D. M.; CARFAN, A. C.; NERI, J. T. Análise da temperatura do ar e de fluxos de calor no município de Ourinhos, utilizando o modelo ENVI-MET. **Revista Geonorte**, Ed. Especial, v.2, n.4, p.723 – 733, 2012.

STRAHLER, A.H.; LUCHT, W.; SCHAAF, T. T.; GAO, F.; LI, X.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. J. **MODIS BRDF/ Albedo Product**: Algoritm theoretical basis document Version 5.0, Abril 1999. p. 9-10.

TAHA, H.; SAILOR, D.; AKBARI, H. High albedo materials for reducing building cooling energy use. Lawrence Berkeley Laboratory Rep. 31721 IJC-350, Berkeley, CA, 1992.

TARGINO, A. C. **Ilha de Calor na cidade de Londrina (ICALON)**. 2012. Relatório Técnico – Científico.Fundação Araucária.

TEN BERGE, H. F. M. **Heat and water transfer at the bare top soil and the lower atmosphere**. 1986. PhD. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.

TOOMING, H. Change in surface albedo and air temperature at Tartu, Estonia. **Tellus**,v. 48A,p. 722 -726, 1996. ISSN 0280-6495.

UNGER, J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. **International Journal Environment and Pollution**, v. 36, n. 1, 2, 3, p. 59 – 79, 2009.

UN-PD. POPULATION DIVISION OF THE DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS OF THE UNITED NATIONS SECRETARIAT. World population prospects: the 2007 revision population database, 2007. Disponível em: <<http://esa.un.org/unup>>. Acesso em: 31 mar. 2012

VERMONTE, E. F.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J. L.; HERMAN, M.; MORCLETTE, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n.4, p. 675 – 686, May 1997.

WAN, Z. ; LI, Z. L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n.3, p. 980 – 995, July 1997.

WASHINGTON, W. M. ; MEEHL, G. A. General circulation model CO2 sensitivity experiments: Snow-sea ice albedo parameterizations and globally averaged surface air temperature. *Climatic Change*, v. 8, n. 3, p. 231-241, 1986. DOI:10.1007/BF00161596.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, n.41, 41–76. Jan. 1947.

YANG, F.; LAU, S. S. Y.; QIAN, F. Summertime heat island intensities in three high-rise housing quarters in inner-city Shanghai China: Building layout, density and greenery. **Building and Environment**, Hong Kong, v. 45, p. 115-134, 2010.

ZHAO, C.; FU, G.; LIU, X.; FU, F. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. **Building and Environment**, v. 46, p. 1174 – 1183, 2011.

APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO AR *IN SITU* E TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE OBTIDA PELO SATÉLITE *TERRA*

Para as seguintes figuras e tabelas foram utilizados dados de temperatura do ar (T_{ar}) medidos *in situ* com sensores instalados em 13 sítios classificados segundo o uso de solo. A T_{ar} foi registrada a cada minuto desde o dia 07 de junho até 17 de agosto de 2011. Os dados de temperatura de superfície (T_{sup}) foram inferidos de observações do sensor MODIS-*Terra*, produto MOD11A2, resolução espacial de 1km e resolução temporal de 8 dias em horários diurno e noturno.

Como a maioria dos produtos do sensor MODIS, o produto MOD11A2 é gerado em condições de céu claro. Para a geração deste produto são utilizados algoritmos baseados nas médias das emissividades das bandas 31 (10,780 - 11,280 μm) e banda 32 (11,770 - 12,270 μm) deste sensor (PETITCOLIN, 2002; WAN, 1997).

Com o objetivo de observar a relação entre a T_{ar} *in situ* e a T_{sup} extraídos de satélite, foram tomados os dados da T_{sup} em horário diurno e noturno para compará-los com os dados de T_{ar} . Foram analisados os horários das passagens diárias do satélite *Terra* próximas à Londrina, dando-se em horário diurno entre 13 e 15 horas UTC e as passagens no horário noturno entre 01 e 03 horas UTC. Tomaram-se as médias de oito dias da T_{ar} correspondentes aos horários mais próximos das passagens do satélite, classificando-os também em horários diurnos e noturnos, para cada um dos sítios selecionados. Os sítios foram agrupados em duas categorias: sítios urbanos e sítios rurais, segundo a porcentagem de elementos contidos na área de cada sítio (Tabela 5 – Capítulo 3). Assim, são considerados sítios urbanos aqueles que contêm maior parte asfalto e telhado (> 50%), e os sítios rurais são aqueles que contêm maior parte vegetação. Ambas as categorias foram separadas em grupos de horário diurno (FIG. A1 e FIG. A2) e noturno (FIG. A3 e FIG. A4). As Figuras A1, A2, A3 e A4, contêm os sítios ordenados de menor a maior porcentagem de vegetação, segundo a classificação da Tabela 5.

A T_{sup} na maioria dos sítios se mostrou um pouco inferior à T_{ar} como pode ser observado nas Tabelas A1 a A6. No entanto, a correlação entre ambas as variáveis é alta ($R > 0,800$) na maioria dos casos e $R^2 > 0,700$. Resultados similares foram encontrados por Colombi et al. (2006) nos Alpes italianos do distrito de Lombardia, ao relacionar T_{ar} , medidas em diferentes estações meteorológicas situadas em altitudes acima dos 2000 m, com as T_{sup}

destas estações obtidos do sensor MODIS. Os autores encontraram uma forte correlação linear para todas as estações selecionadas, com valores de R^2 sempre acima de 0,75 e maiores a 0,90 na maioria das estações. Nos dias de altas temperaturas, a T_{sup} é maior que a T_{ar} e nos dias de temperaturas baixas a diferença se inverte. No caso de Londrina não se pode concluir sobre tais relações sazonais, visto que o período de medições da temperatura do ar abrangeu só o inverno. Portanto, tais análises devem estender-se a outras estações do ano para que o comportamento sazonal das temperaturas possa ser observado. No entanto, pela alta correlação entre as variáveis, os resultados indicam que em casos de não se dispor de dados de T_{ar} , por exemplo, para estudos de ICU, poder-se-ia utilizar dados de T_{sup} obtidos do satélite.

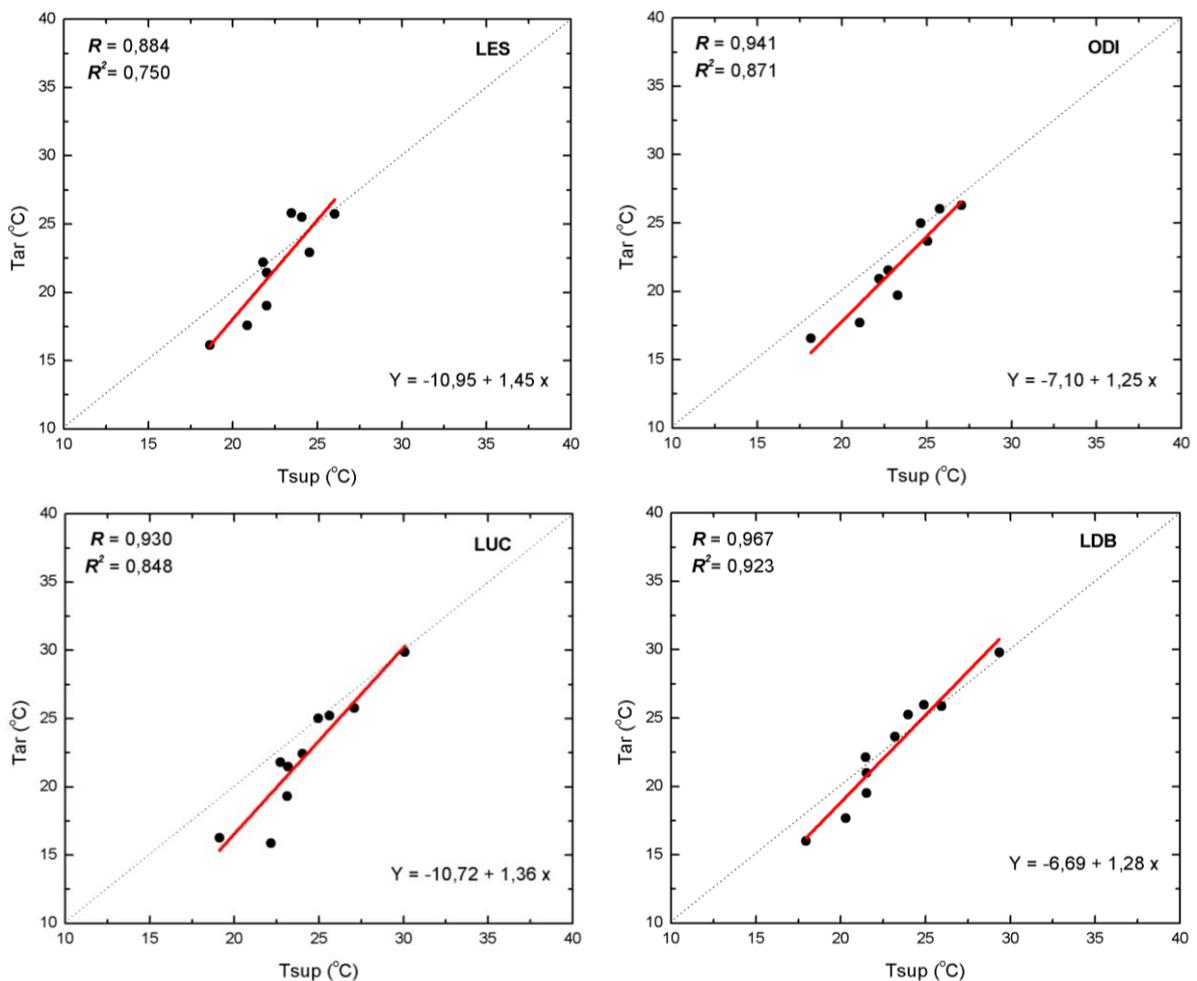


Figura A1- Relação entre temperatura do ar e temperatura da superfície diurna para os sítios urbanos. Continua.

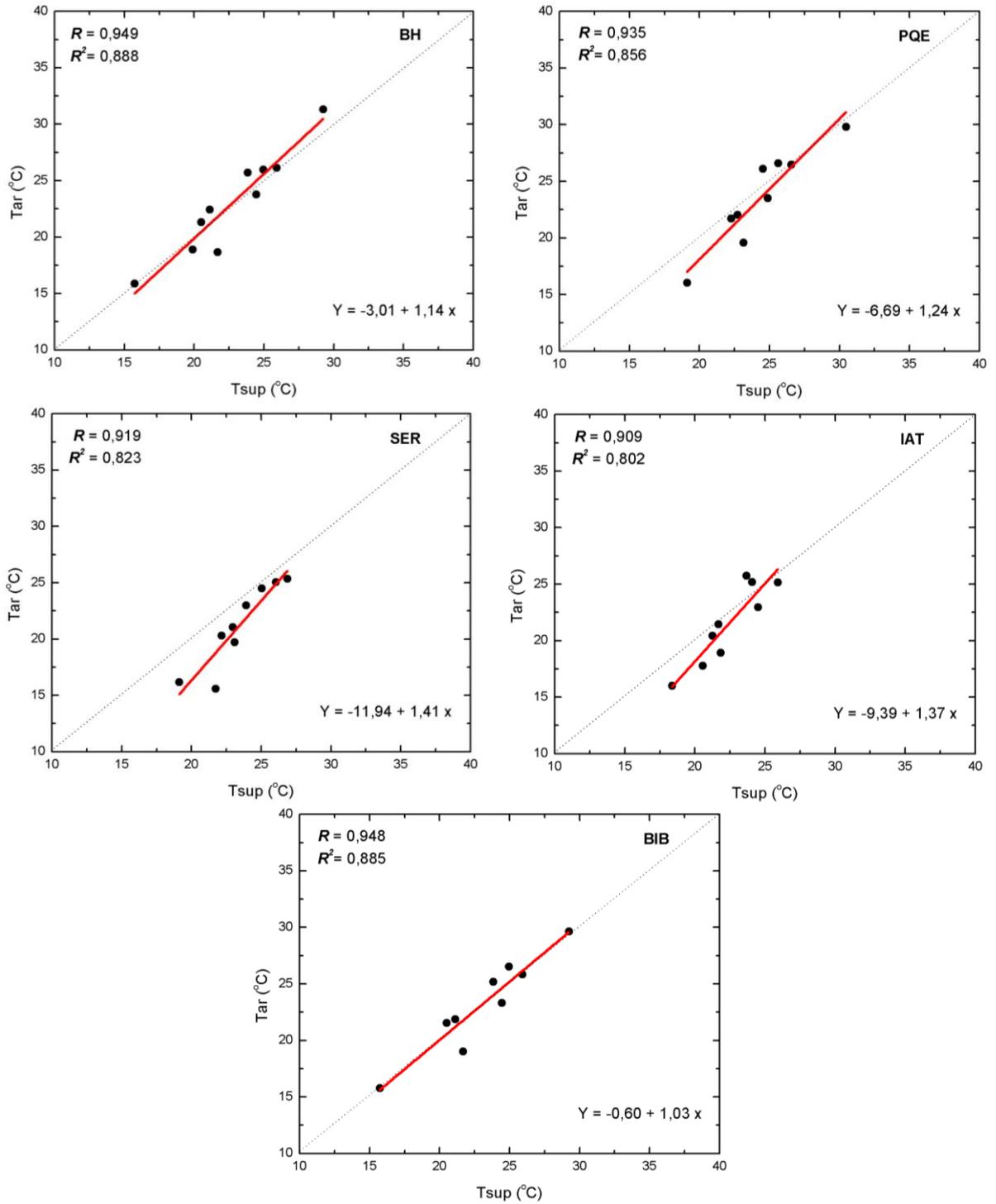


Figura A1 – Conclusão.

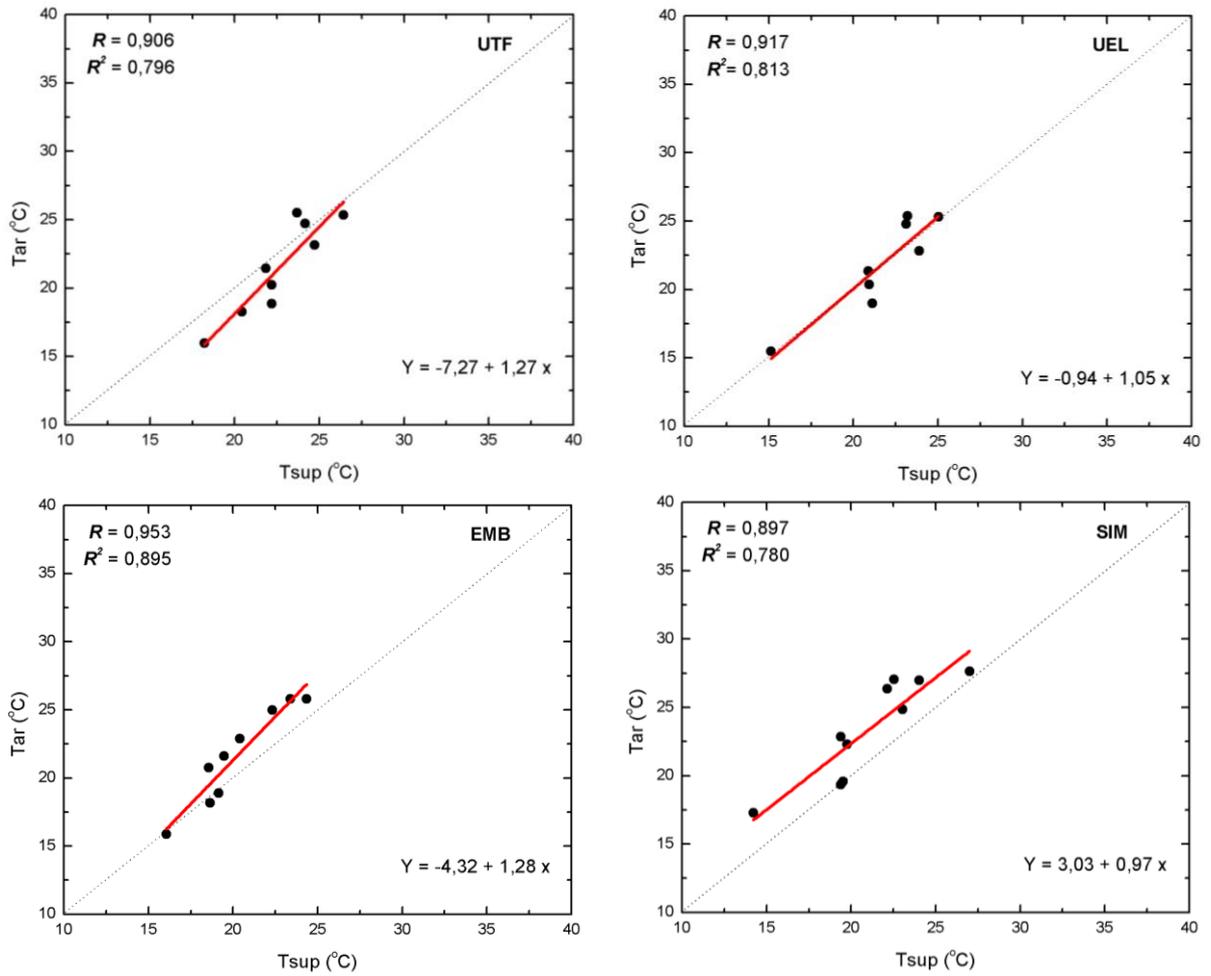


Figura A2 - Relação entre temperatura do ar (°C) e temperatura da superfície (°C) diurna paraos sítios rurais.

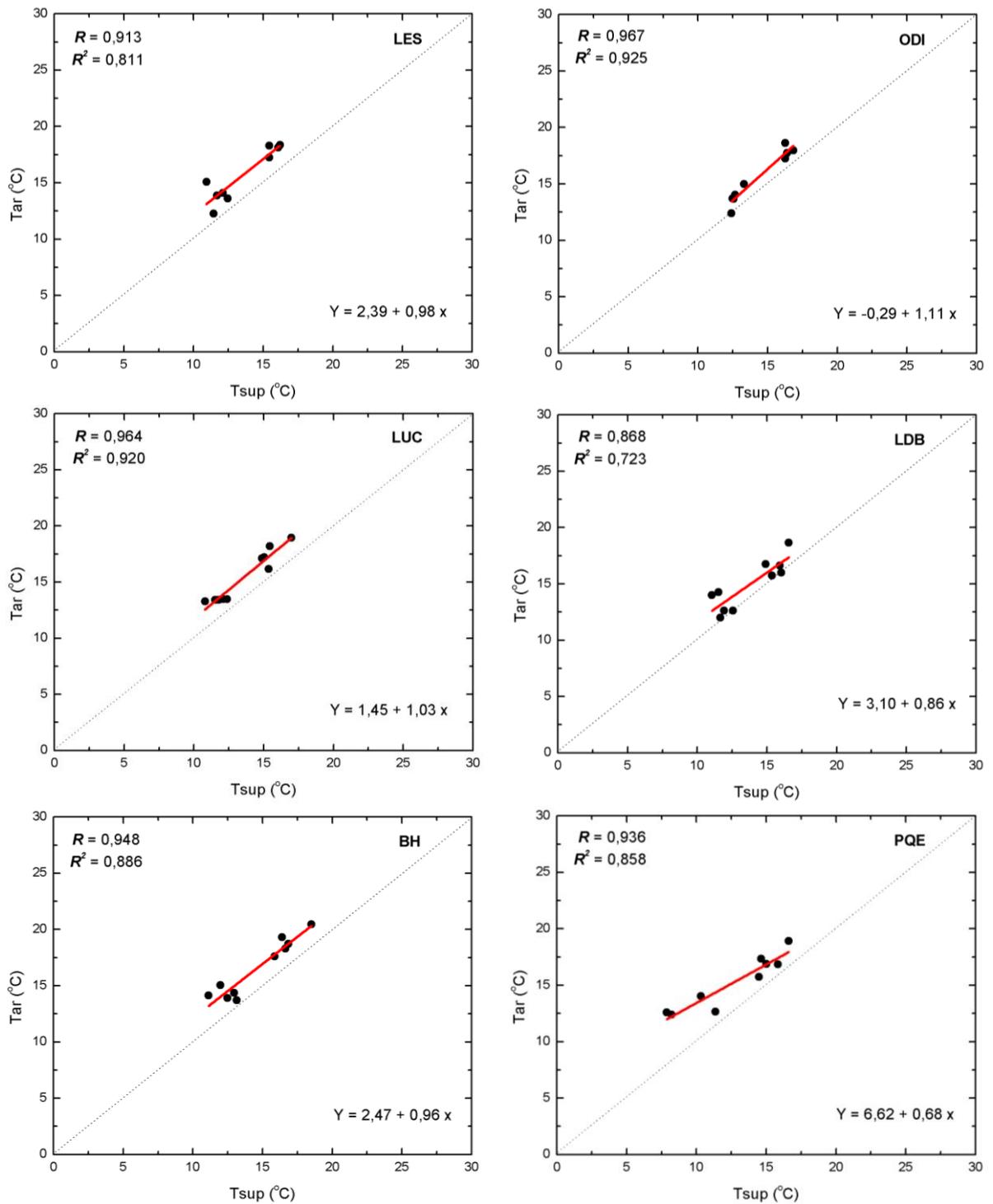


Figura A3 - Relação entre temperatura do ar e temperatura da superfície noturna para os sítios urbanos. Continua.

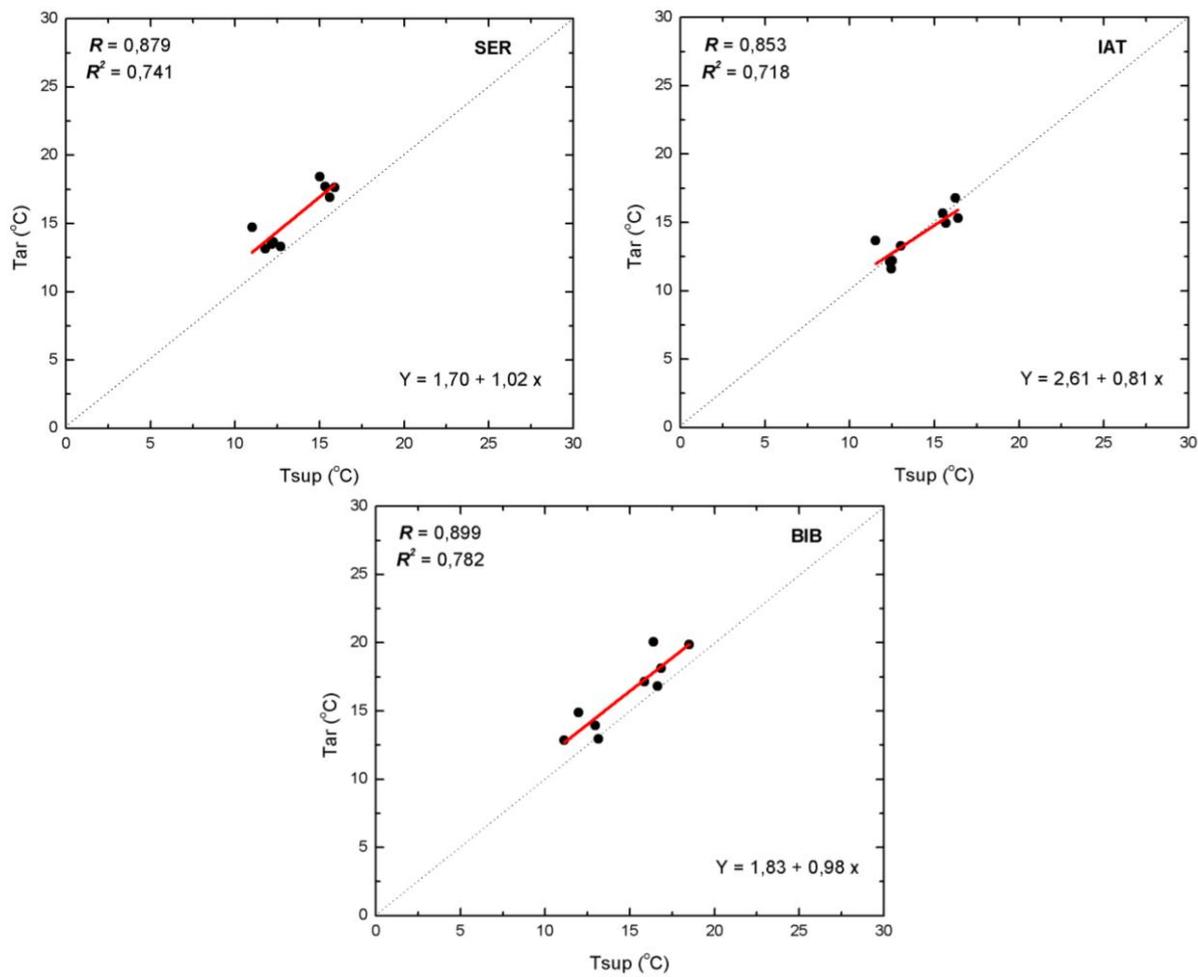


Figura A3 – Conclusão.

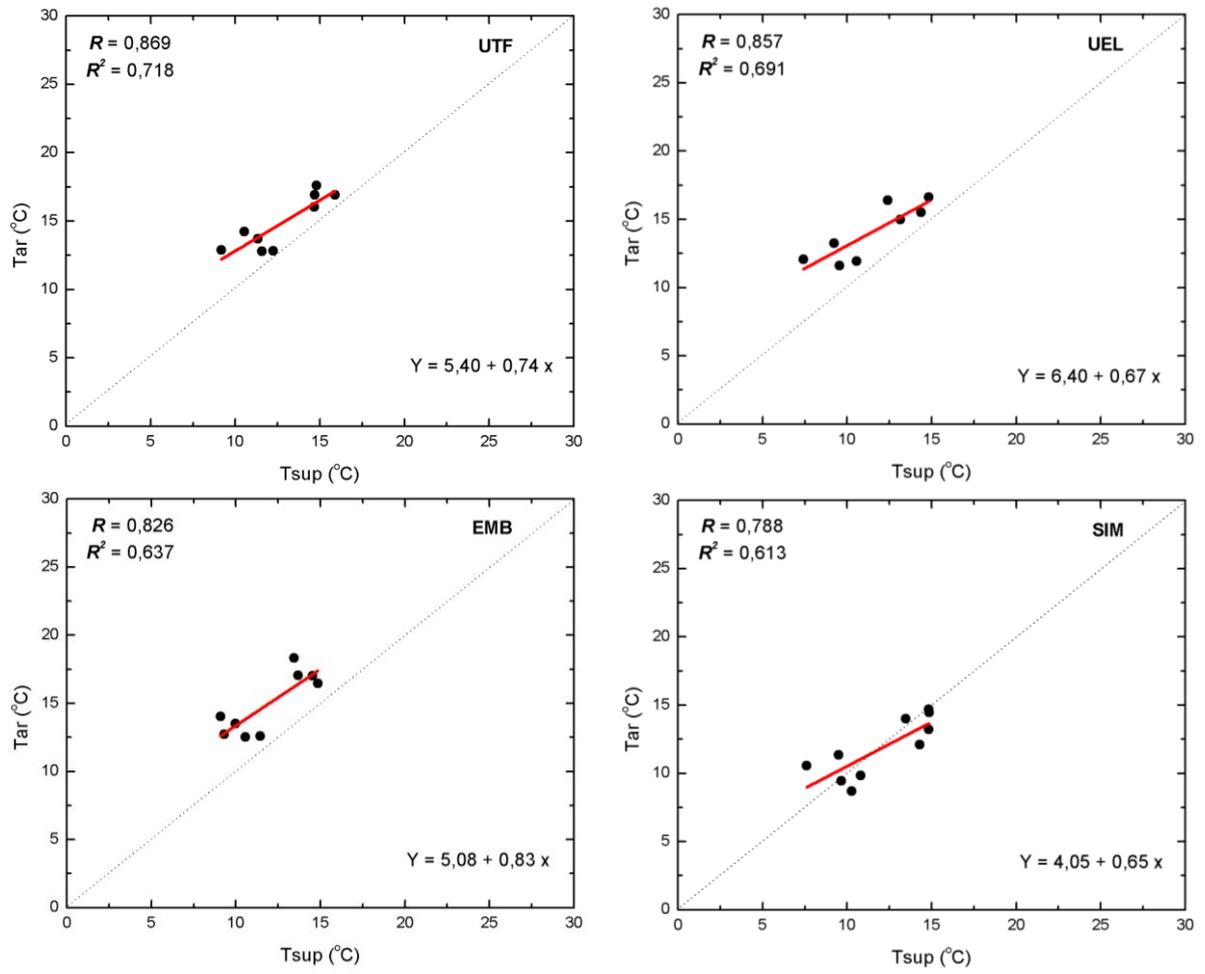


Figura A4 - Relação entre temperatura do ar e temperatura da superfície noturna para os sítios rurais.

Tabela A1 - Temperaturas da superfície (°C) e temperaturas do ar (°C) diurno nos sítios: LES, ODI, LUC, LDB e BH, ano 2011.

Períodos	LES		ODI		LUC		LDB		BH	
	T _{sup}	T _{ar}								
02/06 - 09/06	20,9	17,6	21,0	17,7	22,2	15,9	20,3	17,7	19,9	18,9
10/06 - 17/06	21,8	22,2	22,7	21,5	23,2	21,5	21,5	22,1	21,1	22,4
18/06 - 25/06	24,1	25,5	24,6	25,0	25,0	25,0	24,0	25,3	23,8	25,7
26/06 - 03/07	18,6	16,1	18,2	16,6	19,1	16,3	18,0	16,0	15,7	15,9
04/07 - 11/07	22,0	21,5	22,2	20,9	22,7	21,8	21,5	21,0	20,5	21,3
12/07 - 19/07	23,5	25,8	25,8	26,0	25,6	25,2	24,9	26,0	25,0	26,0
20/07 - 27/07	24,5	22,9	25,0	23,7	24,0	22,4	23,2	23,6	24,5	23,8
28/07 - 04/08	22,0	19,0	23,3	19,7	23,1	19,3	21,5	19,5	21,7	18,7
05/08 - 12/08	26,0	25,7	27,0	26,3	27,1	25,8	26,0	25,9	25,9	26,1
13/08 - 20/08	30,7	-	30,6	-	30,1	29,9	29,4	29,8	29,3	31,3

Tabela A2 - Temperaturas das superfícies (°C) e temperaturas do ar (°C) diurno nos sítios: PQE, SER, IAT e BIB, ano 2011.

Períodos	PQE		SER		IAT		BIB	
	T _{sup}	T _{ar}						
02/06 - 09/06	21,0	-	21,7	15,6	20,6	17,8	19,9	-
10/06 - 17/06	22,7	22,0	23,0	21,0	21,7	21,4	21,1	21,9
18/06 - 25/06	24,5	26,1	25,0	24,5	24,1	25,2	23,8	25,2
26/06 - 03/07	19,1	16,0	19,1	16,2	18,4	16,0	15,7	15,8
04/07 - 11/07	22,3	21,7	22,2	20,3	21,3	20,4	20,5	21,6
12/07 - 19/07	25,6	26,6	26,1	25,0	23,7	25,7	25,0	26,5
20/07 - 27/07	24,9	23,5	23,9	23,0	24,5	23,0	24,5	23,3
28/07 - 04/08	23,2	19,6	23,1	19,7	21,8	18,9	21,7	19,0
05/08 - 12/08	26,6	26,5	26,9	25,3	25,9	25,2	25,9	25,8
13/08 - 20/08	30,5	29,8	30,2	-	30,1	-	29,3	29,6

Tabela A3 - Temperaturas das superfícies (°C) e temperaturas do ar (°C) diurno nos sítios: UTF, UEL, EMB e SIM, ano 2011.

Períodos	UTF		UEL		EMB		SIM	
	T _{sup}	T _{ar}						
02/06 - 09/06	20,4	18,3	20,2	-	18,7	18,2	19,4	19,4
10/06 - 17/06	21,9	21,4	20,9	21,4	19,5	21,6	19,4	22,8
18/06 - 25/06	24,2	24,7	23,1	24,8	22,3	25,0	22,1	26,4
26/06 - 03/07	18,2	16,0	15,1	15,5	16,1	15,9	14,2	17,3
04/07 - 11/07	22,2	20,2	20,9	20,4	18,6	20,8	19,8	22,3
12/07 - 19/07	23,7	25,5	23,2	25,4	24,4	25,8	22,5	27,1
20/07 - 27/07	24,7	23,1	23,9	22,8	20,4	22,9	23,1	24,9
28/07 - 04/08	22,2	18,9	21,1	19,0	19,2	18,9	19,5	19,6
05/08 - 12/08	26,4	25,3	25,0	25,3	23,4	25,8	24,0	27,0
13/08 - 20/08	28,8	-	29,0	-	26,9	-	27,0	27,7

Tabela A4 - Temperaturas das superfícies (°C) e temperaturas do ar (°C) noturno nos sítios: LES, ODI, LUC, LDB e BH, ano 2011.

Períodos	LES		ODI		LUC		LDB		BH	
	T _{sup}	T _{ar}								
02/06 - 09/06	11,4	12,3	12,4	12,4	11,5	13,4	11,5	14,3	12,5	13,9
10/06 - 17/06	12,1	14,1	12,7	14,0	12,1	13,5	11,9	12,6	13,0	14,4
18/06 - 25/06	16,1	18,1	16,9	18,0	14,9	17,1	16,0	16,0	16,9	18,7
26/06 - 03/07	12,5	13,6	12,6	13,7	12,4	13,5	12,6	12,6	13,2	13,7
04/07 - 11/07	11,7	13,9	12,5	13,7	11,8	13,4	11,7	12,0	11,1	14,1
12/07 - 19/07	15,5	18,3	16,3	18,6	15,1	17,2	14,9	16,8	16,4	19,3
20/07 - 27/07	16,2	18,4	16,4	17,7	15,5	18,2	15,9	16,6	16,7	18,3
28/07 - 04/08	10,9	15,1	13,3	15,0	10,8	13,3	11,1	14,0	12,0	15,1
05/08 - 12/08	15,5	17,2	16,3	17,2	15,4	16,2	15,4	15,8	15,9	17,6
13/08 - 20/08	17,5	-	18,3	-	17,0	19,0	16,6	18,7	18,5	20,4

Tabela A5 - Temperaturas das superfícies (°C) e temperaturas do ar (°C) noturno
nossítios:PQE, SER, IAT e BIB, ano 2011.

Períodos	PQE		SER		IAT		BIB	
	T _{sup}	T _{ar}						
02/06 - 09/06	10,9	-	11,8	13,1	12,4	12,1	12,5	-
10/06 - 17/06	11,4	12,7	12,3	13,6	12,5	12,2	13,0	13,9
18/06 - 25/06	15,0	16,9	15,3	17,7	16,4	15,3	16,9	18,1
26/06 - 03/07	7,9	12,6	12,7	13,3	13,0	13,3	13,2	12,9
04/07 - 11/07	8,2	12,4	12,2	13,5	12,5	11,6	11,1	12,9
12/07 - 19/07	14,6	17,3	15,0	18,4	15,5	15,7	16,4	20,1
20/07 - 27/07	15,8	16,9	15,9	17,6	16,3	16,8	16,7	16,8
28/07 - 04/08	10,3	14,0	11,0	14,7	11,5	13,7	12,0	14,9
05/08 - 12/08	14,5	15,7	15,6	16,9	15,7	15,0	15,9	17,2
13/08 - 20/08	16,6	18,9	17,2	-	17,3	-	18,5	19,9

Tabela A6 - Temperaturas das superfícies (°C) e temperaturas do ar (°C) noturno nossítios:
UTF, UEL, EMB e SIM, ano 2011.

Períodos	UTF		UEL		EMB		SIM	
	T _{sup}	T _{ar}						
02/06 - 09/06	11,3	13,7	9,0	-	10,0	13,5	9,7	9,5
10/06 - 17/06	11,6	12,8	10,6	11,9	10,6	12,5	10,8	9,8
18/06 - 25/06	14,7	16,9	14,4	15,5	14,5	17,0	14,8	13,2
26/06 - 03/07	12,3	12,8	7,4	12,1	11,4	12,6	7,6	10,6
04/07 - 11/07	9,2	12,9	9,6	11,6	9,3	12,7	10,3	8,7
12/07 - 19/07	14,8	17,6	12,4	16,4	13,5	18,3	13,5	14,0
20/07 - 27/07	15,9	16,9	14,8	16,6	14,9	16,5	14,9	14,5
28/07 - 04/08	10,5	14,2	9,2	13,3	9,1	14,0	9,5	11,3
05/08 - 12/08	14,7	16,0	13,2	15,0	13,7	17,1	14,3	12,1
13/08 - 20/08	15,9	-	15,3	-	14,8	-	14,8	14,7