

ALLISON REYNALDO DA COSTA CASTRO

**APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE ESPAÇO-
TEMPORAL DAS ILHAS DE CALOR E ILHAS DE FRESCOR URBANAS NO
MUNICÍPIO DE BELÉM – PARÁ, NOS ANOS DE 1997 E 2008.**

BELÉM

2009

ALLISON REYNALDO DA COSTA CASTRO

**APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE ESPAÇO-
TEMPORAL DAS ILHAS DE CALOR E ILHAS DE FRESCOR URBANAS NO
MUNICÍPIO DE BELÉM – PARÁ, NOS ANOS DE 1997 E 2008.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Gestão de Recursos Naturais e Meio Ambiente.
Orientadora: Prof^a Dra. Odete Cardoso de Oliveira Santos – UFPA.

BELÉM

2009

ALLISON REYNALDO DA COSTA CASTRO

**APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE ESPAÇO-
TEMPORAL DAS ILHAS DE CALOR E ILHAS DE FRESCOR URBANAS NO
MUNICÍPIO DE BELÉM – PARÁ, NOS ANOS DE 1997 E 2008.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Gestão e Organização do Território.

APRESENTADO EM: 30/06/2009

CONCEITO: APROVADO

BANCA EXAMINADORA

PROF.^a Dr.^a ODETE CARDOSO DE OLIVEIRA SANTOS.
Orientadora

PROF.^a Dr.^a JANETE MARÍLIA GENTIL COIMBRA.
Examinadora interna

PROF.^a Dr.^a MARIA DE NAZARÉ MARTINS MACIEL.
Examinadora externa

BELÉM

2009

*A todos que sempre acreditaram em
mim. Muito obrigado.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas bênçãos em minha vida.

Aos meus familiares, amigos, colegas e os que se dizem inimigos pela contribuição ao meu crescimento enquanto pessoa e profissional.

A todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para a realização desta.

À Vice – Direção de Pesquisa do Instituto de Controle do Espaço Aéreo, do Comando da Aeronáutica, do Ministério da Defesa, pelos dados climatológicos do aeródromo de Belém.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, pelos dados climatológicos da estação climatológica principal de Belém e da estação automática de Belém.

À Leila pela compreensão nas liberações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPa.

À minha orientadora Prof^a Dr^a Odete Cardoso de Oliveira Santos, pela paciência durante as orientações.

*“Amar o próximo como a ti
mesmo.”*

(Cristo)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO.....	01
2. OBJETIVOS.....	04
2.1. Geral.....	04
2.2. Específicos.....	04
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
3.1. O clima.....	05
3.2. O clima urbano.....	06
3.3. Ilha de calor urbana.....	07
3.4. Ilha de frescor urbana.....	09
3.5. Técnicas aplicadas à detecção das ilhas de calor urbanas.....	10
3.5.1. Técnicas convencionais.....	10
3.5.2. Técnicas de sensoriamento remoto.....	11
4. MATERIAL E METODOLOGIA.....	13
4.1. Área de estudo.....	13
4.1.1. Características.....	13
4.1.2. Belém e a expansão urbana.....	15
4.2. Material.....	16
4.2.1. Dados das estações de superfície.....	16
4.2.2. Dados de sensores remotos.....	19
4.2.3. Dados cartográficos.....	23
4.3. Metodologias.....	23
4.3.1. Tratamento de imagens.....	23
4.3.2. Modelo Linear de Mistura Espectral.....	25
4.3.3. Mapeamento da cobertura vegetal.....	26
4.3.4. Cálculo das temperaturas.....	27

4.3.5. Delimitação das ilhas de calor e ilhas de frescor urbanas.....	29
4.3.6. Elaboração dos mapas.....	30
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	31
5.1. Comparação dos valores de temperaturas das estações e das imagens de satélite.....	31
5.2. Análise da cobertura vegetal.....	37
5.3. Análise da ilhas de calor e ilhas de frescor.....	45
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	51
6.1. Conclusões.....	51
6.2. Sugestões.....	52
REFERÊNCIAS.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização da área de estudo.....	14
Figura 02 – Localização das estações.....	18
Figura 03 – Banda Termal do município de Belém do dia 15 de julho de 1997.....	21
Figura 04 – Banda Termal do município de Belém do dia 13 de julho de 2008.....	22
Figura 05 – Distribuição dos valores de temperatura em julho de 1997.	35
Figura 06 – Distribuição dos valores de temperatura em julho de 2008.....	36
Figura 07 – Cobertura vegetal na área de estudo em julho de 1997.....	39
Figura 08 – Cobertura vegetal na área de estudo em julho de 2008.....	40
Figura 09 – Imagens de 1997 e 2008 evidenciando a retirada da vegetação na área da Primeira Légua Patrimonial.....	41
Figura 10 – Imagens de 1997 e 2008 evidenciando a retirada da vegetação nos bairros do Tapanã, Parque Verde, Parque Guajará e parte do Coqueiro e Mangueirão.....	42
Figura 11 – Imagens de 1997 e 2008 evidenciando a retirada da vegetação na Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém.....	43
Figura 12 – Imagens de 1997 e 2008 evidenciando a retirada da vegetação nas margens dos canais São Joaquim e Água Cristal.....	43
Figura 13 – Imagens de 1997 e 2008 mostrando a retirada da vegetação em Icaoaraci.....	44
Figura 14 – Imagens de 1997 e 2008 evidenciando a recomposição da vegetação, próximo ao Aeroporto Internacional de Val-de-Cans.....	44
Figura 15 – Imagens de 1997 e 2008 evidenciando a recomposição da vegetação na Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém.....	45
Figura 16 – Imagens de 1997 e 2008 evidenciando a recomposição da vegetação nos bairros do Paracuri e Tapanã, próximo ao igarapé Paracuri.....	45
Figura 17 – Ilhas de calor e ilhas de frescor em julho de 1997.....	46
Figura 18 – Ilhas de calor e ilhas de frescor em julho de 2008.....	47
Figura 19 – Diminuição da cobertura vegetal no bairro da Maracacuera.....	50
Figura 20 – Diminuição da cobertura vegetal na área do igarapé Paracuri, provocando redução da ilha de frescor.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações.....	19
Tabela 2 – Valores de nível de cinza utilizados para correção atmosférica.....	24
Tabela 3 – Menor e maior temperaturas por bairro para o ano de 1997 e 2008.....	32
Tabela 4 – Variação da área de cobertura vegetal por bairro para a porção continental do município de Belém, para os anos de 1997 e 2008.....	37

LISTA DE SIGLAS

2º DISME – 2º DISTRITO DE METEOROLOGIA

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.

SCU – SISTEMA CLIMA URBANO.

ERS – EARTH RESOURCE SATELLITE.

ETM+ – ENHANCED THEMATIC MAPPER PLUS.

TM – THEMATIC MAPPER.

CODEM – COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO METROPOLITANO DE BELÉM.

µm – MICRÔMETROS

NC – NÍVEL DE CINZA

DN – DIGITAL NUMBER (NÍVEL DE CINZA)

RESUMO

A urbanização tem provocado variações locais em diversos elementos climáticos, dentre eles o aumento da temperatura do ar, provocando o aparecimento de porções do espaço com temperaturas maiores do que as áreas ao seu entorno, o que se chama de ilhas de calor urbanas. Dentre as causas do surgimento das ilhas de calor, a retirada da cobertura vegetal é o mais relevante. A finalidade deste trabalho foi identificar, através da técnica de sensoriamento remoto, as ilhas de calor urbanas e as ilhas de frescor urbanas na área continental do Município de Belém, assim como a variação da cobertura vegetal, comparando os resultados dos anos de 1997 e 2008, a fim de revelar uma possível relação entre a variação da cobertura vegetal e as ilhas de calor e ilhas de frescor urbanas. Para desenvolver esta pesquisa, recorreu-se a imagens termais do sensor TM para determinação dos valores de temperatura, assim como dados de temperatura do ar observados nas estações: climatológica convencional de Belém (2o. DISME/INMET), meteorológica sinótica de Val-de-Cans e meteorológica sinótica automática de Belém (2o. DISME/INMET). A cobertura vegetal foi determinada também com uso das imagens do sensor TM, com as bandas 3,4 e 5. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que em 2008 houve um aumento das ilhas de calor urbanas, principalmente nos bairros localizados nas áreas da Avenida Augusto Montenegro e Rodovia Arthur Bernardes, e redução das ilhas de frescor em diversas partes da área continental de Belém, em decorrência da ausência da cobertura vegetal, em relação ao ano de 1997. Também foi possível identificar que na área de estudo, houve uma redução da cobertura vegetal existente em 2008 em comparação a 1997, redução essa que ocorreu principalmente na área que está além da 1ª Léguas Patrimonial do município de Belém, no eixo compreendido entre a Avenida Augusto Montenegro e a Rodovia Arthur Bernardes, ampliando a área urbana e o aumento da temperatura, que favoreceu a expansão de ilhas de calor.

ABSTRACT

The urbanization has been provoking local variations in several climatic elements, among them it a increase of the temperature of the air, provoking the emergence of portions of the space with larger temperatures than the areas to yours spill, that calls her of urban islands of heat. Among the causes of the appearance of the islands of heat, the retreat of the vegetable covering is the most relevant. The purpose of this work was to identify, through the technique of remote sensing, the urban islands of heat and the urban islands of coolness in the continental area of the Municipal district of Belem, as well as the variation of the vegetable covering, comparing the results of the years of 1997 and 2008, in order to reveal a possible relationship between the variation of the vegetable covering and the islands of heat and urban islands of coolness. To develop this research, it was fallen back upon thermal images of sensor TM for determination of the temperature values, as well as data of temperature of the air observed in the stations: climatological conventional of Belem (2o. DISME / INMET), meteorological sinotic of Val-of-Cans and meteorological automatic sinotic of Belem (2o. DISME / INMET). The vegetable covering was also determined with use of the images of sensor TM, with the bands 3,4 and 5. In agreement with the obtained results, it was ended that there was an increase of the urban islands of heat in 2008, mainly in the located neighborhoods in the areas of the Avenue Augusto Montenegro and Highway Arthur Bernardes, and reduction of the islands of coolness in several parts of the continental area of Belem, due to the absence of the vegetable covering, in relation to the year of 1997. It was also possible to identify that in the study area, there was a reduction of the existent vegetable covering in 2008 in comparison with 1997, reduction that that happened mainly in the area that is besides to 1st Patrimonial League of the municipal district of Belem, in the axis understood between the Avenue Augusto Montenegro and the Highway Arthur Bernardes, enlarging the urban area and the increase of the temperature, that it favored the expansion of islands of heat.

1. INTRODUÇÃO

A partir do século XVIII, com os processos de industrialização e urbanização, as populações que habitavam as cidades passaram a sentir uma alteração no clima local, percebendo que as temperaturas urbanas eram maiores que as do campo (MONTEIRO, 1976). Essas alterações climáticas sentidas nos centros urbanos são causadas, dentre outras, pela ação do homem no espaço de forma não planejada e concentrada, causando inúmeras transformações no ambiente que trazem conseqüências como aumento da precipitação, da temperatura e poluição do ar e dos cursos d'água, além da alteração na cobertura vegetal. Essas conseqüências refletem de diferentes maneiras no dia-a-dia da população.

As cidades, como resultado do processo de urbanização, tendem a apresentar temperaturas mais elevadas do que outras áreas do seu entorno. Quando se diminui a escala de análise, percebemos que dentro da cidade também existem áreas com temperatura maior do que outras. Isto caracteriza o que se chama de ilha de calor urbana (LOMBARDO, 1985). Geralmente esse fenômeno ocorre em grandes centros urbanos que apresentam extensas áreas e grande quantidade de habitantes. No entanto, alguns estudos revelam a existência desse fenômeno em cidades de menor porte (BIAS *et al*, 2003; COLTRI, 2006).

Na Amazônia, as temperaturas são elevadas por conta da sua posição próxima à linha do Equador, que recebe uma quantidade de radiação solar diferenciada das demais áreas do globo terrestre. Essa radiação, somada à atividade urbana em cidades de grande porte gera um cenário favorável ao surgimento da ilha de calor urbana.

As cidades de Belém e Manaus têm destaque na Amazônia, desempenhando o papel de centros urbanos regionais.

De acordo com o IBGE (2008) no censo realizado em 1996, a população de Belém era de 1.144.312 habitantes, enquanto que em 2007 a população foi estimada em 1.408.407 de habitantes, portanto um crescimento de 23,05%. Esse crescimento provoca no sítio urbano de Belém diversas formas de pressão, dentre elas a demanda por moradias, que provoca o desmatamento das áreas arborizadas com ocupações ilegais. Esse aumento populacional requer um maior número de veículos circulando para transportar a população, gerando maior quantidade de poluentes emitidos por veículos, ocasionando um aumento da

poluição do ar atmosférico. Esses fatores contribuíram para que Belém apresente uma elevada temperatura em áreas fora do centro da cidade, uma vez que esta expansão não foi planejada, mas sim, ocorreu por processos espontâneos. Desse modo, a cidade tende a apresentar uma quantidade maior de áreas com elevadas temperaturas, que vai influenciar na vivência diária das pessoas.

Várias técnicas tem sido utilizadas para o estudo das ilhas de calor, entre elas o emprego das imagens de satélite pelo fato de que para estudos de grandes áreas é uma ferramenta adequada, uma vez que possibilita ao pesquisador obter informações dos alvos da superfície terrestre a partir do registro da interação entre a energia eletromagnética e estes alvos. As imagens dos sensores orbitais permitem ao pesquisador obter dados diretos e indiretos da sua área de estudo, por conta da melhoria nas resoluções espacial e espectral. O nível de detalhe que estas imagens fornecem é bem maior e possibilita estudos climáticos intra-urbanos, uma vez que sensores com média resolução registram em cada pixel uma área de 30 m x 30 m a 10 m x 10 m. Assim, é possível obter dados de temperatura de uma área menor possibilitando um estudo do micro-clima.

Este trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo é a introdução do trabalho. O segundo capítulo são os objetivos do trabalho. O terceiro capítulo é a revisão bibliográfica, onde foram apresentados conceitos sobre clima, calor, ilhas de calor e ilhas de frescor, técnicas para detecção de ilhas de calor urbanas, além de revisão de diversos trabalhos já realizados, que estudaram ilhas de calor, tanto com métodos tradicionais, quanto métodos com uso de sensoriamento remoto.

No quarto capítulo, são apresentados os materiais e os métodos utilizados para na pesquisa. Inicialmente, Discorre brevemente sobre a área de estudo e o processo de expansão urbana ocorrido na mesma. Depois descreve os dados utilizados na pesquisa (de sensores remotos, de estações climatológica convencional e meteorológicas sinóticas. Por último, é detalhado o procedimento utilizado para determinação das temperaturas e da cobertura vegetal, assim como a geração dos mapas.

No quinto capítulo, é feita a análise e a discussão dos resultados, procurando, primeiramente, confrontar os valores de temperatura encontrados através das imagens e os registrados pelas estações climatológica convencional e meteorológicas sinóticas. Em

seguida, analisar a da retirada da cobertura vegetal ocorrida e, por último, evidenciar a possível relação entre a retirada da cobertura vegetal e as ilhas de calor.

O último capítulo são as conclusões sobre o trabalho e algumas sugestões possíveis para os resultados obtidos.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Fazer uma análise espaço-temporal das ilhas de calor e das ilhas de frescor existentes na porção continental de Belém entre os anos de 1997 e 2008, mostrando a relação entre a retirada da cobertura vegetal e a ampliação das ilhas de calor e/ou surgimento de novas ilhas de calor na área estudada, através do emprego de técnicas de sensoriamento remoto.

2.2. ESPECÍFICOS

- a) Determinar as temperaturas de superfície com o auxílio de imagens de sensores orbitais, para mapeamento das ilhas de calor e ilhas de frescor urbanas.
- b) Gerar mapas de ocorrência da cobertura vegetal na área de estudo, nos anos de 1997 e 2008.
- c) Traçar um paralelo espacial entre o surgimento das ilhas de calor urbanas e a supressão da cobertura vegetal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O CLIMA

Clima é a síntese do tempo num dado lugar durante um período de aproximadamente 30 a 35 anos e refere-se às características da atmosfera inferidas de observações contínuas durante logo período. (AYOADE, 1983, p. 2). A atmosfera que envolve a Terra é constituída basicamente de gases e está presa à Terra por força da gravidade, estando em constante movimento, devido aos tipos de circulação que nela existem. Essa circulação se baseia no desequilíbrio da radiação líquida, na umidade e no *momentum* entre as baixas e altas latitudes e entre a superfície da Terra e a atmosfera. O sistema de ventos tem papel fundamental para essa circulação (AYOADE, 2006, p. 2).

O estudo do clima feito pelo homem remonta à Grécia antiga, onde os filósofos já tentavam, em seus estudos, compreender a dinâmica atmosférica. Obras como *Áreas, Águas e Lugares* de Hipócrates escrita em 400 a.C. e *Meteorológicas* de Aristóteles de 350 a.C., marcam o início destes estudos (MENDONÇA, 2001)

A importância do estudo do clima e da compreensão da dinâmica atmosférica para o homem se dá por conta das atividades que ele desenvolve, até mesmo para a sua sobrevivência como a agricultura, agropecuária, instalação de núcleos urbanos, deslocamentos, habitação, entre outros.

O clima pode ser alterado por ciclos naturais ou intervenção externa. As alterações climáticas mundiais e locais são uma preocupação no meio científico. O buraco da camada de ozônio na Antártica talvez tenha sido o problema mais discutido antes do aquecimento global. Entre vários fatos e notícias, descobriu-se que “a formação do buraco de ozônio era natural” (DOBSON *apud* MOLION, 1992).

As implicações da ação do homem sobre o meio têm se manifestado de formas catastróficas, levando a população mundial a repensar sobre as ações da sociedade no meio-ambiente e o futuro do planeta Terra. Dentre as diversas implicações que o homem provoca

no meio está o aumento da temperatura, que ganha destaque cenário mundial política, econômica e socialmente, tentando mudar a mentalidade da humanidade, diante de um possível aquecimento global. As alterações climáticas podem ser sentidas mundialmente, através das mudanças que podem causar, mas há também os problemas locais, principalmente nos centros urbanos como as ilhas de calor.

3.2. O CLIMA URBANO

De acordo com a escala de análise adotada, pode-se falar em clima mundial, regional ou local e microclima. Se tomarmos como recorte espacial a cidade, pode-se falar em clima urbano que pode ser definido como um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização (MONTEIRO, 1976).

Estudos acerca do clima urbano são demasiadamente complexos por envolverem diversas variáveis que não respondem da mesma maneira a diferentes situações (COLTRI, 2006).

Monteiro (1976) propõe a Teoria do Sistema Clima Urbano, numa tentativa de entender e explicar as relações entre essas variáveis com a meteorologia local e regional, além de abranger aspectos de urbanização como crescimento e cultura da população, economia e expansão das cidades, materiais empregados nas construções, verticalização do solo, conforto e bem estar do cidadão, morfologia urbana, entre outros.

Dentro do sistema clima urbano (SCU) de Monteiro, são propostos três subsistemas: o termodinâmico, o físico-químico e o hidrometeorológico. No primeiro sistema enfatiza estudo de ilhas de calor, ilhas de frescor, conforto e desconforto térmico da população e a inversão térmica. No segundo sistema, o subsistema físico-químico, é voltado à análise dinâmica do ar e suas interações com a cidade, destacando a poluição do ar, as chuvas ácidas, a relação entre as estruturas urbanas e os ventos. Por fim, o sistema hidrometeorológico é relacionado ao estudo das precipitações urbanas e seus impactos, tais como os processos de inundação nas cidades (COLTRI, 2006).

3.3. ILHA DE CALOR URBANA

De acordo com Costa (1998), a termo "ilha de calor" foi empregado pela primeira vez em um trabalho de Gordon Manley, em 1958. As ilhas de calor são características das cidades e das grandes metrópoles. Entretanto, as características, a intensidade e extensão das mesmas vão depender das características da cidade e da população que nela reside. Entre as diversas causas da formação de uma ilha de calor, o processo de urbanização é considerado o mais relevante, por conter em sua natureza elementos que fazem com que a temperatura de uma área sofra aumento.

Temperatura é a medida da agitação das moléculas de uma substância (GOLDEMBERG, 1968). Quando um corpo transfere energia de um para o outro pela diferença de temperatura, temos o calor. Calor é “a energia mecânica do movimento caótico dos átomos e moléculas do objeto” (GOLDEMBERG, 1968). O calor tem duas formas: o calor sensível e o calor latente. Calor latente é o calor absorvido sem realizar nenhuma mudança de temperatura no objeto. Calor sensível é a quantidade de calor recebida ou cedida por um objeto ao sofrer mudanças de temperatura (GOLDEMBERG, 1968). Existem três formas de se transmitir o calor: por convecção, por condução ou por radiação.

A transmissão de calor por convecção “é um processo mecânico envolvendo a transferência material de substâncias aquecidas”, enquanto que a transmissão por condução, “é um processo molecular de transferência de calor através de camadas adjacentes de qualquer meio natural por difusão das moléculas de movimento caótico de alta energia cinética das regiões aquecidas para regiões sucessivamente mais frias”. Por fim, na transmissão por radiação “o calor é transferido como uma radiação eletromagnética” (GOLDEMBERG, 1968).

A urbanização é caracterizada pelas construções para diversos fins das atividades humanas. Estas construções, normalmente, utilizam materiais cujas propriedades térmicas contribuem para o aumento da temperatura, a partir da absorção da energia eletromagnética

emitida pelo Sol (calor latente) e a emissão desse calor latente na forma de calor sensível para a atmosfera. Essa transformação de calor latente para calor sensível se dá por radiação, através da absorção da energia eletromagnética emitida pelo Sol e a re-emissão dessa energia para o meio. A característica da atmosfera de atuar como vidro de uma estufa e impedir a total emissão para o espaço da radiação infravermelha refletida pelo solo, contribui no sentido de haver uma grande quantidade de calor sensível e esse mesmo ser impedido de ser dissipado para o espaço, retornando para o ambiente e sendo uma nova fonte de energia através da retroalimentação no sistema.

Além das construções, um processo anterior a elas também contribui para o aumento da temperatura de uma área. Quando a expansão urbana de uma cidade avança sobre áreas onde ainda há cobertura vegetal em grande proporção, uma das primeiras ações é a retirada desta cobertura vegetal para que esta dê lugar à construção que servirá a diversos fins. A simples retirada da vegetação já causa um desequilíbrio no microclima local, porque deixa de existir um elemento atenuador da temperatura ambiente, uma vez que não haverá absorção da radiação solar por parte da vegetação, que utiliza esta radiação no processo de fotossíntese. Além disso, as plantas, pelo processo de evapotranspiração, absorvem o calor latente e emitem vapor d'água para a atmosfera, fazendo um efeito de umidificação do ambiente, que gera uma sensação de frescor. No mais, as plantas são responsáveis por captar boa parte das partículas de poeira existentes no ar.

Ainda no processo de expansão urbana, é possível que haja aterramento de cursos d'água e a retirada da mata ciliar. A água tem a propriedade de absorver a energia eletromagnética emitida pelo sol e liberá-la de forma mais lenta, inclusive quando está presente no solo. Quando a drenagem é aterrada ou o solo é impermeabilizado, não ocorre mais essa absorção. A morfologia urbana influencia no sentido de controlar os ventos, impedindo sua livre circulação, evitando que ele possa diminuir a temperatura de grandes áreas, além de servir de atrito e diminuir a sua velocidade (NASCIMENTO, 1995).

Além desses fatores, a presença de partículas de poluição (poeira) também contribui para o aumento da temperatura nos grandes centros urbanos, através da formação de uma barreira que impede o ar quente de ir para a atmosfera, fazendo-o retornar para o ambiente. Outro elemento importante é o aerossol, que faz com que o calor seja absorvido por eles e reemitido para baixo, de volta à superfície (LOMBARDO, 1985).

Verifica-se, assim, que o processo de expansão urbana é um dos fatores principais para o surgimento ou aumento das ilhas de calor. O aumento da população de uma cidade se deve ao crescimento natural de sua população e à migração rural, aonde a maioria das pessoas que chegam à cidade é de baixa renda, normalmente sem emprego ou moradia garantidos. Assim, gera-se uma necessidade por moradias que podem ser construídas de maneira espontânea (TRINDADE JR, 1998) ou planejada, normalmente em áreas que mantinham a cobertura vegetal conservada. Com a retirada da cobertura vegetal e a inserção de elementos como o concreto, o asfalto, o vidro e o aço, há um aumento da temperatura nessas áreas.

3.4. ILHA DE FRESCOR URBANA

Quando existem áreas que apresentam temperaturas menores do que as áreas ao seu entorno, diz-se que existe uma ilha de frescor. Estas atuam como contraponto às ilhas de calor urbano, fazendo com que haja locais com temperaturas mais amenas. Normalmente estas ilhas de frescor são caracterizadas por abundância de cobertura vegetal ou presença de corpos d'água, como igarapés, lagos ou espelhos d'água (LOMBARDO, 1985). Estas áreas, por apresentarem temperaturas menores, são importantes para a cidade porque influenciam no conforto térmico das pessoas que habitam as cidades, principalmente nas áreas ao seu entorno. Neste sentido, as áreas que preservam a cobertura vegetal são:

...áreas de qualidade paisagística por serem elementos de valor estético e cultural, incorporados ao patrimônio da cidade, e de qualidade ambiental, por serem um fator determinante de conforto térmico ao atuarem como ilhas de frescor nas imediações dos bairros em que se localizam, por apresentarem potencial para alternativas democráticas de lazer, bem como de garantir a continuidade do mesmo na paisagem e a conservação da sua biodiversidade local. (SILVA e COLASANTE *apud* GOMES & SOARES, 2003, p. 27).

3.5. TÉCNICAS APLICADAS À DETECÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS

3.5.1. TÉCNICAS CONVENCIONAIS

No estudo para detecção das ilhas de calor urbanas, vários métodos tem sido utilizados, dentre os quais Katsoulis e Theoharatos (1984) utilizaram dados de estações distribuídas por toda a Grécia, a fim de realizar estudos sobre indicação de existência de ilhas de calor em Atenas. Detectaram, através de análise dos valores de máxima e mínima temperatura, que os efeitos da ilha de calor existente tendiam a desaparecer, por conta da ação do mar.

Ackerman (1984) utilizou dados de 20 anos (1950 – 1970) para caracterizar a ilha de calor em Chicago, obtidos no Midway Airport e no Argonne National Laboratory, distante cerca de 40 km do centro de Chicago. Utilizando os dados de temperatura, gerando isotermas, puderam concluir que os dados obtidos apontaram uma significativa elevação de temperatura na área urbana de Chicago.

Nascimento (1985) realizou uma análise da morfologia urbana na primeira léguas patrimonial de Belém para verificar, através de instrumentos de medição de temperatura espalhados por diversos pontos da cidade, como esta influencia a geração de ilhas de calor,

Costa (1998) também analisou a influência da estrutura urbana sobre o comportamento termo-higrométrico na cidade de Belém, utilizando estações meteorológicas espalhadas pela cidade.

Hinkel et al (2003) realizaram um estudo sobre a ilha de calor no Alaska, na aldeia de Barrow, onde demonstram os resultados de programa projetado para monitorar a magnitude e os padrões espaços-temporais da ilha de calor urbana em Barrow. Um aumento médio da temperatura foi identificado próximo ao centro da aldeia. Foram utilizados dados de um observatório de clima próximo ao centro de Barrow e dados de uma estação distante cerca de 150 km. Eles monitoraram a temperatura a partir de 54 instrumentos instalados em meados de junho de 2001, distribuídos em diversos espaços. Usando o mapeamento das temperaturas, foi utilizado a krigeagem, que é um método para estimar, num contexto espacial, o valor de

uma variável de interesse em um local onde não foi determinado, usando, para isso, dados obtidos em pontos adjacentes (WACKERNAGEL *apud* SOUZA, 2005), para gerar a interpolação entre os dados e gerar os mapas. Descobriram através deste método que a ilha de calor urbana é mais intensa durante o inverno.

Em estudos de caso, temos os trabalhos de Oliveira et al (2006) que fazem simulações numéricas sobre a formação das ilhas de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, para os modelos de interpolação linear e krigagem (algoritmo de inferência ou interpolação geoestatístico baseado na análise e modelagem da variabilidade espacial do atributo a partir de um conjunto amostral pontual desse atributo – BRANDÃO, acessado em 11/06/2008). Utilizaram dados de temperatura obtidos para diferentes dias com distintas condições meteorológicas. Concluíram que o método de interpolação da krigagem apresentou resultados mais satisfatórios por atribuir pesos diferenciados às amostras.

Méndez et al (2008) coletaram dados meteorológicos de temperatura, precipitação, umidade relativa, e ventos de vários anos de registro, assim como pressão atmosférica, direção e velocidade do vento e umidade relativa do ar nos dias em que se realizou a análise, com vistas a verificar a distribuição espacial da ilha de calor em Toluca, no México. Para isso, compararam dados de todas as estações ao mesmo tempo para identificar espacialmente a ilha de calor. Concluíram que os problemas ambientais sofridos pela cidade de Toluca são os maiores responsáveis pelo aumento de temperatura.

3.5.2. TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Os estudos ambientais ganharam uma grande ajuda a partir da década de 1970 quando foi instituído o programa ERS, posteriormente batizado de LANDSAT, com vistas a obter informações da superfície terrestre a partir de sensor instalado a bordo de satélites orbitais. Esse sensor registrava a energia eletromagnética refletida pelos diversos elementos constituintes da superfície terrestre nas faixas do visível (0,4 μm a 0,7 μm), infravermelho próximo (0,7 μm - 1,3 μm) e médio (1,3 μm – 2,6 μm). Com o uso desta nova tecnologia neste momento, ficou mais fácil obter dados, realizar pesquisas, barateou o custo e diminuiu o

tempo, pois incursões em campo se fizeram menos necessárias. A utilização de imagens de satélite, no início do programa LANDSAT, era somente com vistas a obter informações para monitoramento ambiental, para estudo de vegetação e desmatamento, mas com o tempo, novas aplicações foram descobertas, inclusive para estudo do clima.

A utilização de imagens de satélite que registram informações da faixa do infravermelho termal do espectro eletromagnético (8 – 12 μ) dmos alvos estudados tem sido fonte de pesquisa e aplicação de estudos térmicos (PACHÊCO, 2001).

Existem métodos que favorecem o uso da banda termal para determinação da temperatura da superfície, através de algoritmos que utilizam a intensidade do brilho para determinação da temperatura da área imageada no momento da captura da imagem (SOUZA & SILVA, 2005). Isso estimula o uso de sensoriamento remoto para aplicações que envolvam medidas de temperaturas em escalas regionais e globais, pois os métodos tradicionais de climatologia requerem materiais e pessoal para levantamentos de dados atmosféricos em grandes espaços ao mesmo tempo.

No Brasil, Lombardo (1985) estudou a ilha de calor na cidade de São Paulo, utilizando o sensoriamento remoto para realizar análise de padrões de ocupação do solo e medição de temperatura, respectivamente.

Costa & Rosa (2000) utilizaram imagens termais para comprovar a existência de ilhas de calor na cidade de Uberlândia – MG. A partir de imagens da banda termal do satélite LANDSAT – 5(banda 6), foi possível observar a variação da temperatura e associá-la com o uso e ocupação do solo. A partir de técnicas cartográficas e processamento digital de imagens, observou-se que o centro da cidade quase não possui arborização e que a variação de temperatura aumenta da periferia para o centro, sendo este o ponto culminante.

Baumann (2001) utilizou imagens de satélite LANDSAT-5, através da sua banda termal, para realização de identificação de ilhas de calor a partir da composição colorida RGB 6-4-4, onde a partir de contrastes aplicados à imagem, pôde-se notar a espacialização das ilhas de calor na cidade de Washington D.C. Além disso, utilizou fotografias aéreas para identificar elementos intra-urbanos que poderiam estar contribuindo para a ilha de calor existente.

4. MATERIAL E METODOLOGIA

4.1. ÁREA DE ESTUDO

4.1.1. CARACTERÍSTICAS

A cidade de Belém, capital do estado do Pará, localiza-se entre 1° e 1° 32' de latitude sul e 48° 16' e 48° 37' de longitude oeste, na confluência do Rio Guamá com a Baía do Guajará (Figura 1). De característica peninsular, Belém foi fundada em 12 de janeiro de 1616, quando da chegada de Francisco Caldeira Castelo Branco para garantir a soberania portuguesa na região contra as invasões. O município de Belém é formado por uma porção continental e outra insular, onde as ilhas de Caratateua e de Mosqueiro são as maiores e mais ocupadas pela população.

A área de estudo escolhida foi a porção continental de Belém, porque nessa área estão localizadas uma estação climatológica e duas estações meteorológicas sinóticas, das quais foram coletados dados de temperatura do ar, necessários para comparação com os dados de temperatura calculada na imagem do satélite LANDSAT.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Belém se enquadra na categoria climática "equatorial úmido", do tipo Af, apresentando altas temperaturas, ventos de pouca velocidade, intercalados com momentos de calmaria, altos índices de umidade relativa do ar e precipitações entre 1.500 e 3.000 mm por ano. As temperaturas variam entre 22°C e 31°C. (NASCIMENTO, 1995).

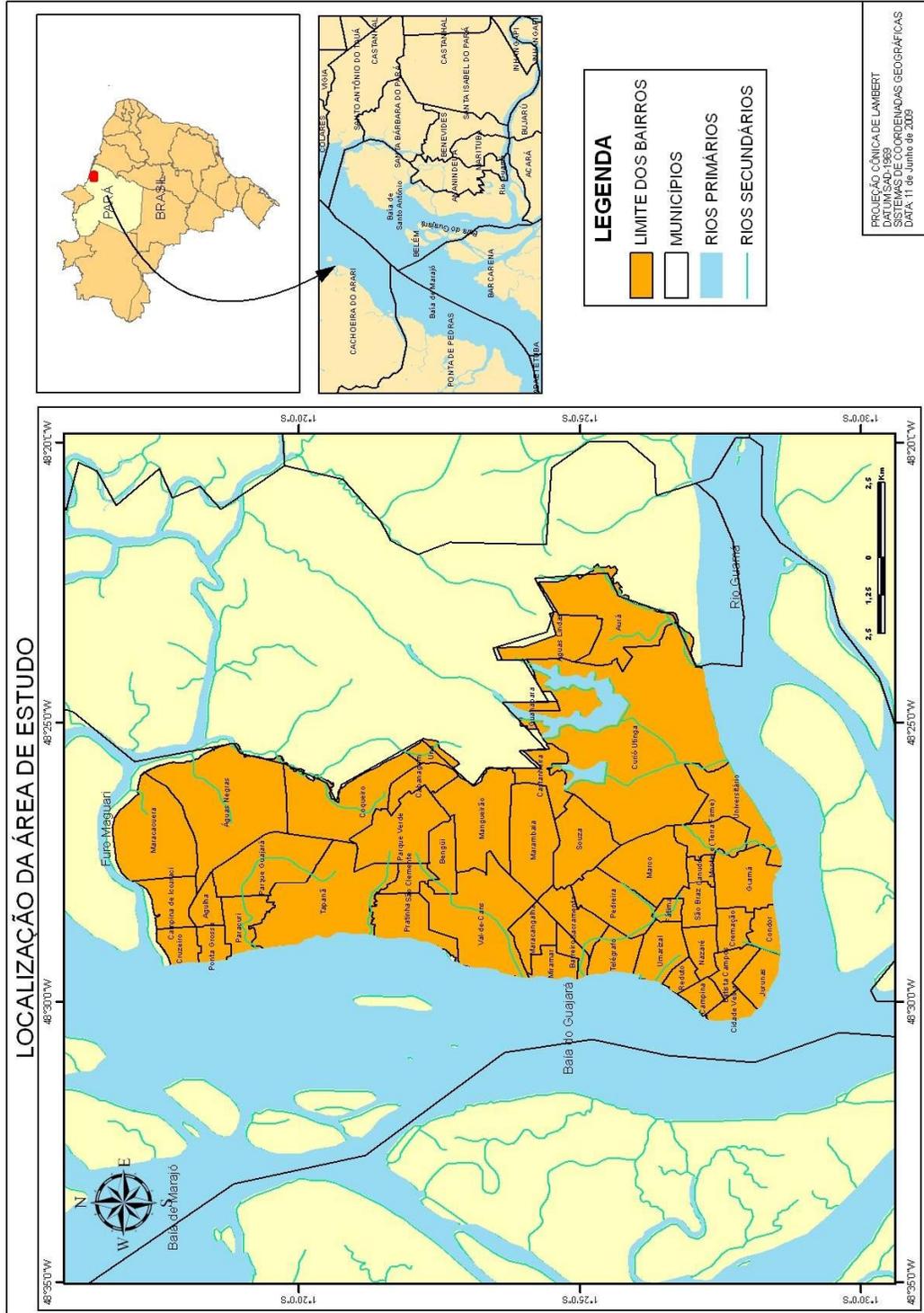


Figura 1 – Localização da área de estudo. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

4.1.2. BELÉM E A EXPANSÃO URBANA

Belém foi fundada às margens da Baía do Guajará em uma área peninsular. Assim sendo, possui direções de expansão limitadas. Cortada por vários igarapés, sua consolidação se limitou às margens do igarapé Piri, formando o bairro da Cidade Velha. Quando ultrapassou o igarapé do Piri, Belém começou a se expandir para as partes mais altas, chegando às áreas de terra firme. Sua expansão chegou até a primeira légua patrimonial, onde se instalaram diversas instituições a partir da década de 1940, principalmente de ordem militar, que serviram de barreira para a expansão da cidade (TRINDADE JR, 1998). Em virtude disto, houve um adensamento da cidade dentro desta primeira légua patrimonial. Isto acarretou, inclusive, em aterramento de áreas inundáveis, o que favoreceu a ocupação destas áreas, principalmente pelas pessoas de menor poder aquisitivo. Estas áreas alagáveis foram ocupadas também pelo fato de se localizarem próximo ao centro da cidade.

Quando houve a expansão da cidade para além do "cinturão institucional", as novas áreas ocupadas se localizavam em direção ao município de Ananindeua e ao distrito de Icoaraci, estimulada pelos diversos conjuntos habitacionais localizados ao longo da Avenida Augusto Montenegro e BR-316, que se destinavam a populações remanejadas ou de baixa renda, já que a população mais abastarda preferia habitar próximo ao centro da cidade.

A partir da década de 1990, o processo de ocupação ilegal chamado por Trindade Jr (1998) de "assentamentos espontâneos", começa a se intensificar, localizando-se, preferencialmente, em grandes lotes que não possuíam uso direto. Em geral, estes lotes apresentavam cobertura vegetal preservada, que foi retirada e deu lugar às construções e ruas asfaltadas.

Em Belém, o aumento da população e o déficit de moradia fizeram com que acontecesse um inchaço urbano, movendo a população a morar cada vez mais distante do centro, preferencialmente em direção a áreas onde não havia construções e que tinham como característica principal a presença da cobertura vegetal. Mas não só nas áreas de expansão como Avenida Augusto Montenegro e BR-316 é que houve o processo de expansão urbana. Dentro da área da primeira légua patrimonial, o processo de expansão vertical propiciará um adensamento da população (BORDALO, 1999). O surgimento destes empreendimentos faz

com que a morfologia urbana, principalmente às margens da Baía do Guajará, interfira na circulação dos ventos provenientes desta, favorecendo o aumento da temperatura nestas áreas.

Nota-se que estes empreendimentos verticais também se fazem presentes fora da área da primeira légua patrimonial, onde havia, predominantemente, uma expansão horizontal. Desta forma, tem-se maior quantidade de elementos utilizados em construção civil que absorvem o calor latente e liberam-no em forma de calor sensível.

4.2. MATERIAL

Os dados utilizados foram: dados de estações meteorológicas e estação climatológica localizadas na área de estudo, dados de sensores orbitais e dados cartográficos vetoriais da área de estudo.

4.2.1. DADOS DAS ESTAÇÕES DE SUPERFÍCIE

Foram utilizados dados obtidos de estações meteorológicas sinóticas e climatológica principal, existentes na área de estudo que são:

a) Estação climatológica principal de Belém n° 82191, localizada no bairro Curió-Utinga, nas coordenadas 01° 26' S e 48° 26' W, a 10 metros de altura acima do nível do mar, que forneceu os dados de temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média compensada, umidade relativa do ar, insolação total, por dia, no mês de julho dos anos de 1997 e 2008.

b) Estação meteorológica automática de Belém n° A201, localizada no bairro do Souza e está nas coordenadas 01° 24' S e 48° 26' W, a 24 metros de altura acima do nível do mar, que forneceu os dados de temperatura do ar instantâneo, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar, por hora, no mês de julho do ano de 2008.

c) Estação Meteorológica Sinótica de Superfície de Val-de-Cans, localizada no aérodromo de Belém, no bairro de Val-de-Cans, nas coordenadas 01° 23' 18"S e 48° 28' 47" W, que forneceu os dados de temperatura, umidade relativa, cobertura de nuvens (oitavos), no mês de julho de 1997, das 8:00h às 11:00h, com intervalo de uma hora; e também os dados de temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média, umidade relativa máxima, umidade relativa mínima, umidade relativa média, teto de nuvens e total de nuvens (média), no mês de julho de 2008, por dia.

Como não foi possível obter dados de insolação de todas as estações, os únicos dados utilizados foram os de temperatura, que serviram para confirmar os resultados de temperatura da superfície obtidos nas imagens. Além disso, o fato de os dados obtidos nas estações não serem em sua totalidade horários, impediu que se pudesse comparar com aqueles de temperatura obtidos pela imagem do sensor TM na mesma hora do imageamento. Mesmo assim, serviram de parâmetro importante para a análise. A localização das estações é mostrada na Figura 2.

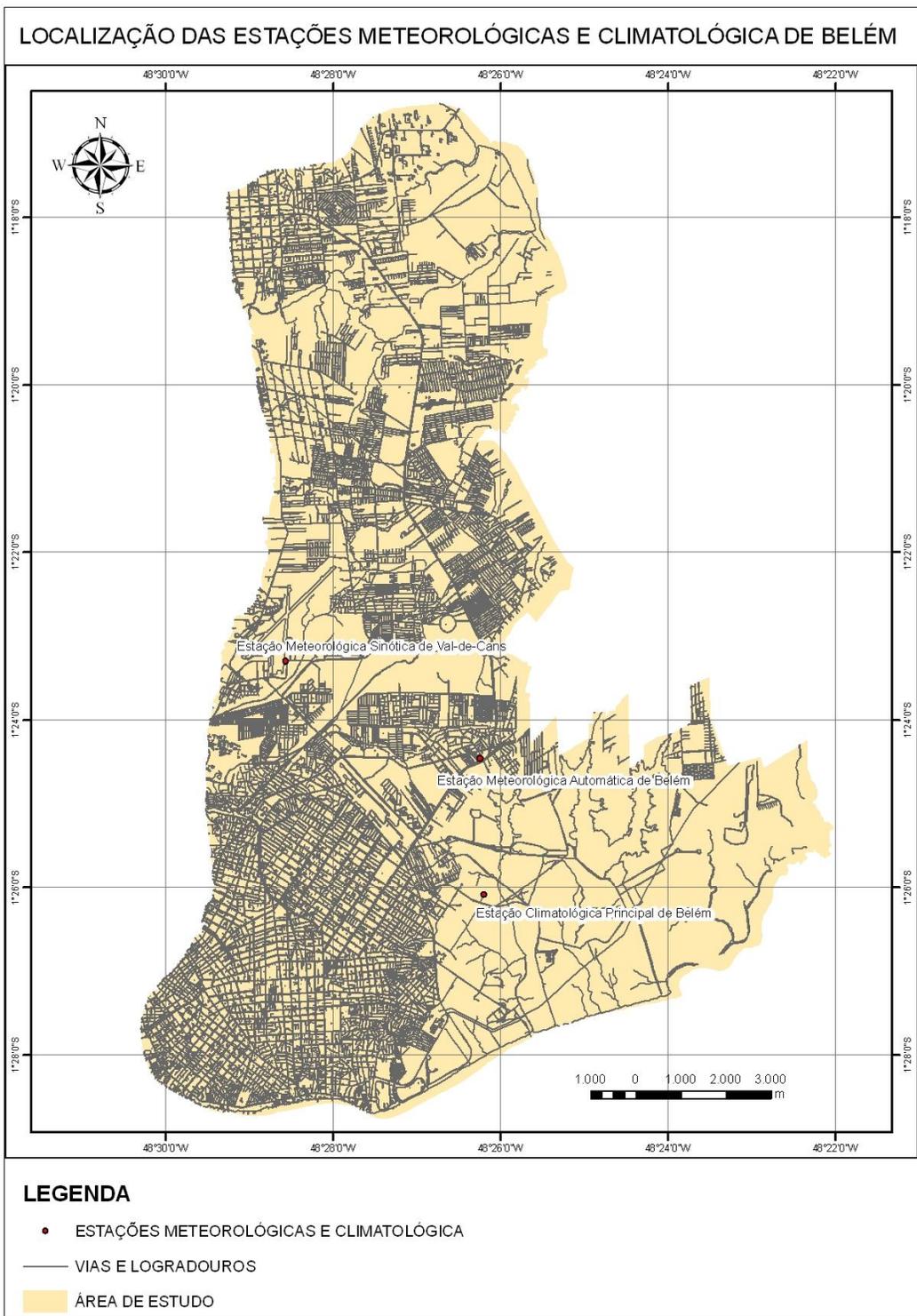


Figura 2 – Localização das estações meteorológicas e climatológica de Belém. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

4.2.2. DADOS DE SENSORES REMOTOS

Para este trabalho, foram utilizadas imagens do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5 na órbita-ponto 223/061, que é a cena que abrange a área do município de Belém, dos dias 15 de julho de 1997 e 13 de julho de 2008. As horas de aquisição, segundo o metadata do arquivo das imagens, foram às 09:53 h para a imagem de 1997, e 10:09 h para a imagem de 2008, horas locais. Foram escolhidas imagens do mês de julho porque neste mês a cobertura de nuvens é muito baixa, quando a zona de convergência intertropical encontra-se sobre o hemisfério norte (SANTOS, 2006). Os anos foram definidos pela disponibilidade dos dados fornecidos pelas estações meteorológicas sinóticas e a estação climatológica.

As características das bandas do sensor TM são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações. Fonte: FOLHES, 2007.

Banda	Intervalo Espectral (µm)	Região do espectro	Resolução Espacial (m)	Principais aplicações
1	0,45 - 0,52	Azul	30	Alta absorção pelos corpos d'água. Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça.
2	0,52 - 0,60	Verde	30	Apresenta sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão. Boa penetração em corpos de água.
3	0,63 - 0,69	Vermelho	30	Bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	0,76 - 0,90	IV próximo	30	A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas.
5	1,55 - 1,75	IV médio	30	Sensível ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação.
6	10,4 - 12,5	IV termal	120	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de diversos materiais
7	2,08 - 2,35	IV médio	30	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia.

As imagens foram utilizadas para o cálculo das temperaturas de superfície utilizando a banda da faixa do infravermelho termal (Figuras 3 e 4) e para verificação da ocorrência de cobertura vegetal na área de estudo (bandas 3,4 e 5).

Além dessas informações, outros dados importantes foram levados em consideração, são eles:

- a) Data da aquisição.
- b) O ângulo de elevação solar no momento de aquisição da cena.

Estes dados foram necessários para a calibração da imagem em valores de radiância.

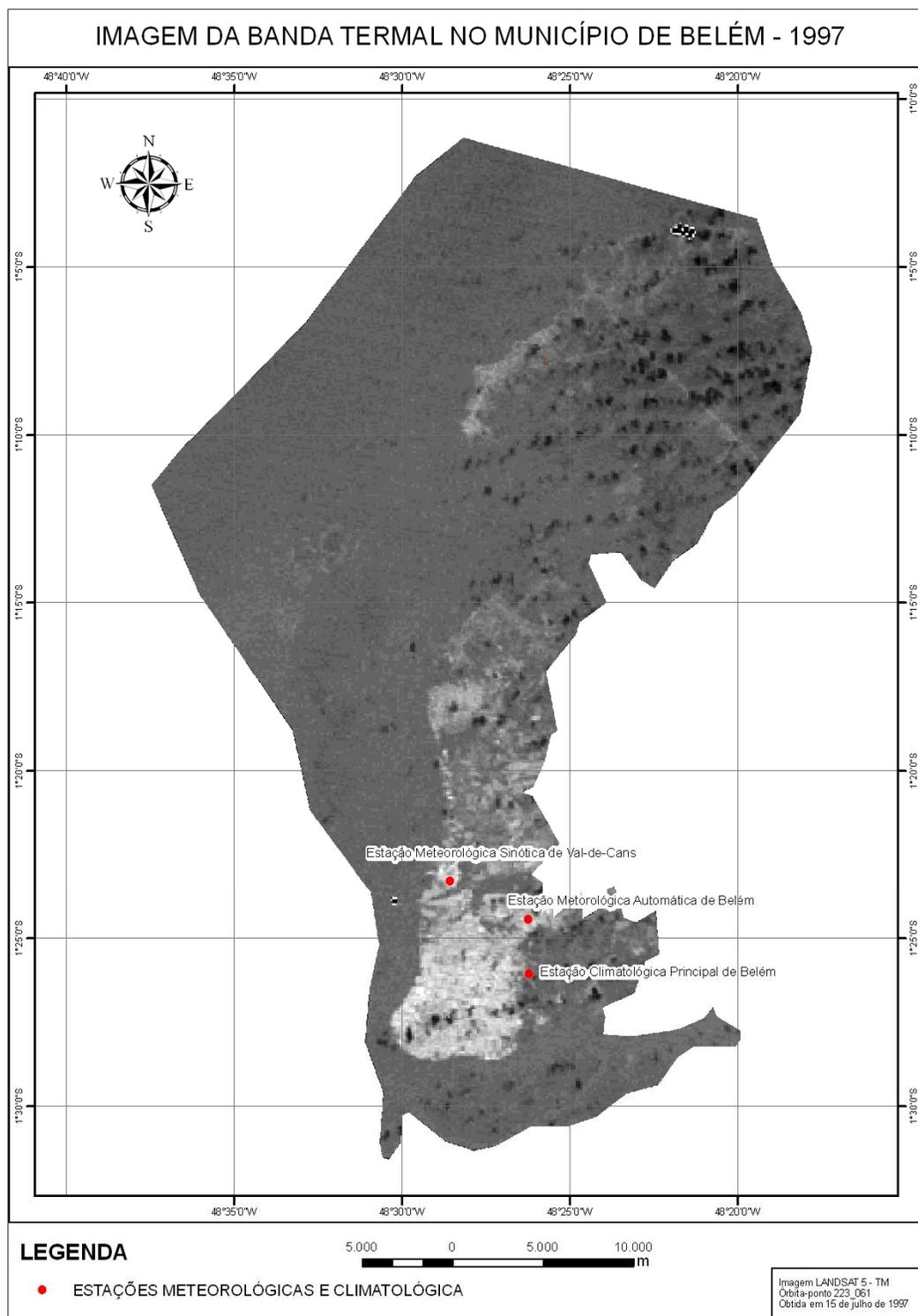


Figura 3 – Banda Termal do município de Belém do dia 15 de julho de 1997. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

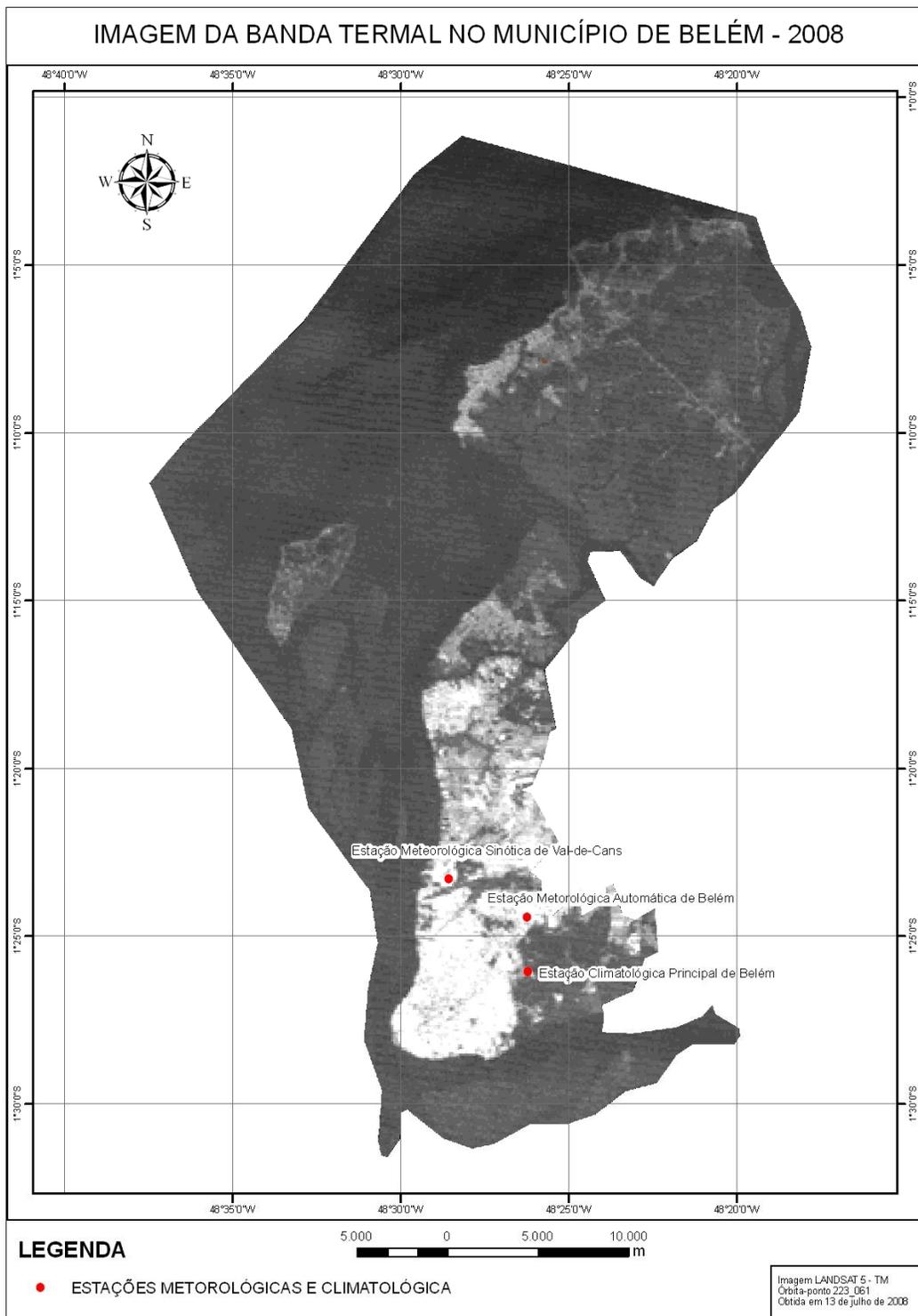


Figura 4 – Banda Termal do município de Belém do dia 13 de julho de 2008. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

4.2.3. DADOS CARTOGRÁFICOS

Também foram utilizados dados cartográficos da área de estudo, tanto para mapas de localização quanto para mostrar a divisão de bairros. Estes dados foram obtidos no produto gerado pela CODEM a partir do levantamento aerofotogramétrico realizado em 1998. Todos os dados estão referenciados ao datum SAD-1969, no sistema de coordenadas geográficas.

4.3. METODOLOGIA

4.3.1. TRATAMENTO DE IMAGENS

O tratamento de imagens de satélite corresponde a uma série de técnicas utilizadas para a preparação da imagem (NOVO, 1992). Para o processamento digital de imagens utilizado neste trabalho, foi utilizado o programa ENVI 4.5. Os procedimentos realizados foram os seguintes:

a) Junção de bandas em um único arquivo: Para facilitar o manuseio das imagens das bandas, optou-se por salvar todas as bandas em um único arquivo. Para isto, foi necessário reamostrar o tamanho do pixel da banda termal (banda 6), porque a mesma apresenta um tamanho de 120 metros, enquanto que as demais tem o tamanho de 30 metros. Para tal, recorreu-se à ferramenta de reamostragem espacial disponível no programa, a qual fez a transformação do pixel da banda termal para um pixel de 30 metros.

b) Georreferenciamento: O processo de georreferenciamento consiste em adequar uma imagem a um sistema de coordenadas. Para realizar o georreferenciamento das imagens, utilizou-se o método "imagem-imagem", que consiste em coletar pontos de controle de uma imagem georreferenciada para uma imagem não-georreferenciada.

A imagem que serviu de base para o georreferenciamento foi a imagem Landsat TM Geocover. O produto Geocover consiste em um mosaico de imagens ortorretificadas

disponíveis em projeção Universal Transversa de Mercator para minimizar distorções através da planificação de um pedaço da esfera que representa a Terra. Essas imagens estão com o sistema de projeção UTM e referenciadas ao datum WGS84. Como os dados utilizados neste trabalho estão referenciados ao datum SAD-1969, as imagens tiveram que ser reprojctadas para o datum SAD-1969.

c) Recorte da imagem: Utilizando a base vetorial do município de Belém, fez-se o recorte das imagens para diminuir o tamanho do arquivo e agilizar o processamento das mesmas. Para isto, criou-se uma máscara com a porção continental do município de Belém e aplicou-se a mesma nas imagens para fazer o recorte.

d) Geração do histograma textual das bandas: O histograma da imagem representa graficamente a quantidade de pixels para cada nível de cinza da cena de cada banda. O histograma também pode ser apresentado de forma textual, onde os níveis de cinza são apresentados de forma crescente e, a cada nível de cinza, é mostrada a quantidade de pixels que apresentam este nível de cinza.

e) Correção atmosférica: É um processo que visa corrigir as distorções espectrais causados pelo espalhamento da radiação eletromagnética devido à sua interação com a atmosfera. Nas imagens utilizadas neste trabalho, foi utilizado o método da quebra do histograma. O método da quebra do histograma consiste basicamente em verificar, em um histograma textual, qual nível de cinza em que após uma variação de quantidade de pixels irregular, de acordo com o nível de cinza, inicia-se uma variação coerente, depois de um incremento relativamente brusco no número de pixels (CPRM, 2005). Esta correção atmosférica foi aplicada nas bandas 3, 4 e 5. Os valores utilizados para as correções atmosféricas para as imagens são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de nível de cinza utilizados para a correção atmosférica.
 FONTE: CASTRO, A. R. da C., 2009.

1997		2008	
BANDA	VALOR DE CINZA	BANDA	VALOR DE CINZA
3	15	3	15
4	10	4	8
5	5	5	5

Para realizar a correção atmosférica, utilizou-se a ferramenta "dark subtraction", onde devem ser informados os valores de níveis de cinza da quebra do histograma. Para confirmar a correção, comparou-se o perfil espectral para visualizar o comportamento espectral das imagens corrigidas com as imagens originais.

f) Conversão do valor de NC para reflectância aparente: Antes de proceder ao modelo linear de mistura espectral, deve-se converter os valores de radiância para valores de reflectância aparente, através da fórmula proposta por Markhan e Barker (1986):

$$\rho = \pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2 / ESUN_{\lambda} \cdot \cos \Theta_s \quad (4.1)$$

em que:

ρ é a reflectância aparente; L_{λ} é a radiância espectral; d é a distância Terra-Sol em unidades astronômicas; $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância espectral média no topo da atmosfera; Θ é o ângulo zenital em graus.

4.3.2. MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL

O modelo linear de mistura espectral estima as proporções da radiância dos diferentes componentes que contribuíram na formação da radiância total dentro do elemento de resolução do sensor "pixel" (SHIMABUKURO & SMITH *apud* MOREIRA, 1998), que pode ser expresso pela fórmula:

$$r_i = a \cdot \text{vege}_i + b \cdot \text{solo}_i + c \cdot \text{águai} + e_i \quad (4.2)$$

onde,

r_i = resposta do pixel na banda i ;

a = proporção de vegetação;

b = proporção de solo;

c = proporção de sombra ou água;

vege_i = resposta espectral do componente vegetação na banda i ;

solo_i = resposta espectral do componente solo na banda i ;

águai = resposta espectral do componente sombra ou água na banda i ;

e_i = erro na banda i ; e

i = bandas do TM (1 a 5 e 7).

Este procedimento toma como base os pixels "puros", ou seja, os pixels da imagem que estão refletindo somente um elemento. Com base nesses pixels puros, são coletadas amostras espectrais para cada elemento identificado nas imagens, os quais serviram para realizar a estimativa de proporção de reflectância de cada elemento identificado em cada pixel da imagem, gerando as imagens-fração. Estas imagens-fração foram utilizadas para o cálculo de emissividade e para a classificação das imagens.

Para a realização do modelo linear de mistura espectral, recorreu-se às bandas 3, 4 e 5 das imagens utilizadas. Através das mesmas gerou-se a imagem de pixels puros, os quais apresentam sua reflectância correspondente a um único elemento, ou seja, nestes pixels encontra-se a presença total de um elemento procurado, que são registrados como extremos em um vetor. A imagem de pixels puros é composta pelos valores de pixels de acordo com o registro de vezes que ele foi considerado puro.

Convertendo-se estes pixels puros em regiões de interesse, puderam-se coletar amostras espectrais, correspondentes às componentes principais das imagens-fração identificadas. Na imagem de 1997, foram identificadas as componentes "vegetação", "solo", "sombra" e "água", enquanto que na imagem de 2008 foram identificadas apenas as componentes "vegetação", "solo" e "água". A partir destas amostras, gerou-se a biblioteca espectral para cada imagem. O algoritmo utilizado para solucionar a equação foi o algoritmo de Mistura Linear Espectral existente no ENVI 4.5. Como resultado, obteve-se as imagens-fração correspondentes aos componentes principais, mais a imagem-fração do erro na imagem. Estas serviram de base para a classificação das imagens.

4.3.3. MAPEAMENTO DA COBERTURA VEGETAL

A partir das imagens-fração geradas pelo modelo linear de mistura espectral, foi realizada a classificação das imagens, para distinguir áreas sem cobertura vegetal daquelas que apresentaram cobertura vegetal, recorrendo-se à classificação supervisionada e o método de máxima verossimilhança.

As amostras que serviram de base para a classificação foram coletadas a partir das imagens-fração, levando em consideração os pixels que apresentavam os valores mais altos para cada tipo de elemento em cada imagem, identificaram-se quatro classes para as imagens de 1997 e 2008, a saber. Para 1997 vegetação, solo, lagos e sombra. Para 2008 vegetação, solo, lagos e não classificado.

4.3.4. CÁLCULO DAS TEMPERATURAS

A obtenção dos valores de temperatura a partir de imagens de sensores remotos baseia-se "no pressuposto de que toda matéria emite radiação termal e possui um espectro contínuo de emissão própria e característico da sua temperatura e de suas propriedades" (FOLHES, 2007, p. 88). Através do processamento digital na imagem da banda termal do sensor TM, é possível converter os valores de cinza em valores de temperatura através do valor de radiância e da emissividade (SOUZA & SILVA, 2008).

Para a conversão dos números digitais da imagem em valores de radiância, utilizou-se a fórmula:

$$L_{\lambda} = L_{\min\lambda} + ((L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}) / DN_{\max}) * DN \quad (4.3)$$

em que:

L_{λ} : valor de radiância;

$L_{\min\lambda}$: Radiância espectral qual correlacionado com o DN_{\min} ;

$L_{\max\lambda}$: Radiância espectral qual correlacionado com o DN_{\max} ;

DN: Número digital;

D_{\max} : Máximo valor de DN.

Segundo Qin *apud* Silva & Souza (2008), a banda termal do LANDSAT-5 apresenta valores de $L_{\min\lambda} = 1,238 \text{ (Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1})$ para $DN_{\min} = 0$ e $L_{\max\lambda} = 15,6 \text{ (Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1})$ para $DN_{\max} = 255$

Para o cálculo da emissividade, utilizou a seguinte fórmula:

$$\varepsilon = 0,985P_v + 0,960(1 - P_v) + 0,06P_v(1 - P_v) \quad (4.4)$$

onde:

ε é a emissividade da superfície referente ao intervalo espectral do infravermelho termal na faixa do espectro eletromagnético registrada pelo sensor TM do LANDSAT – 5 (10,42 μm a 12,50 μm);

P_v é a porcentagem de cobertura vegetal obtida através do modelo linear de mistura espectral.

Para converter os valores de radiância em temperatura de brilho, utilizou-se a fórmula definida por Wukelic *apud* Silva & Souza (2008), com adaptações de Meireles(2007):

$$T_b: K_2 / \ln((K_1 / L_\lambda) + 1) - 273.15 \quad (4.5)$$

em que:

T_b é a temperatura de brilho, em graus Celsius, não corrigida dos efeitos atmosféricos e da propriedade de emissividade dos alvos;

K_1 e K_2 são constantes de calibração, onde $K_1 = 666.09$ e $K_2 = 1282.71$.

A radiância termal corrigida dos efeitos atmosféricos é obtida com base na modelagem da atmosfera no momento da passagem do satélite e nos valores de emissividade correspondente aos diferentes alvos da superfície por meio da equação:

$$L_c = (L_a - L_t) / \tau - (1 - \varepsilon) L_{ceu} \quad (4.6)$$

em que:

L_c é a radiância espectral termal corrigida na banda 6 do sensor TM/Landsat 5, em $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$;

L_a é a radiância espectral termal aparente na banda 6 do sensor TM, em $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$;

L_t é a radiância espectral termal ascendente da atmosfera na faixa espectral correspondente à banda 6 do TM, em $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$;

L_{ceu} é a radiância espectral termal incidente da atmosfera na faixa espectral correspondente à banda 6 do TM, em $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$;

τ é a transmitância da atmosfera na faixa espectral correspondente à banda termal do TM;

ε é a emissividade da superfície na faixa espectral correspondente à banda termal do sensor TM.

De acordo com Folhes (2007):

"A estimativa de L_t e τ requer a utilização de modelos de simulação de transferência radiativa e dados de radiossondagem para caracterizar a condição atmosférica no momento da passagem do satélite. Na ausência destes dados, Waters et al. (2002) recomendam ignorar os termos L_t , L_{ceu} e τ da equação, igualando a zero (0) os dois primeiros e a um (1) o último termo. De uma forma geral, estes termos da equação praticamente se cancelam; entretanto a não correção de L_a acarreta uma subestimativa da temperatura da superfície da ordem de 1°C a 5°C (PRATA et al, 1995; DASH et al, 2002 *apud* FOLHES, 2007, p. 91).

Assim, os resultados obtidos podem apresentar uma diferença de 1°C a 5°C menor do que a temperatura obtida pelas estações de superfície.

O cálculo da temperatura da superfície em graus Celsius obteve-se pela fórmula:

$$T_s = T_b / \varepsilon^{0,25} \quad (4.7)$$

Onde:

T_s é a temperatura de superfície;

ε é a emissividade da superfície referente ao intervalo espectral do infravermelho termal na faixa do espectro eletromagnético registrada pelo sensor TM do LANDSAT – 5 (10,42 μm a 12,50 μm).

4.3.5. DELIMITAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR E ILHAS DE FRESCOR URBANAS

As ilhas de calor e ilhas de frescor foram determinadas a partir dos valores de temperaturas obtidos pelo processamento das imagens do satélite LANDSAT-5. Foram delimitadas as áreas que apresentaram valores de temperaturas maiores do que as da área ao seu entorno, caracterizando ilhas. As ilhas de frescor são as áreas que apresentaram valores de temperatura menores que as áreas ao seu entorno.

4.3.6. ELABORAÇÃO DOS MAPAS

Para melhor visualização dos dados obtidos, elaboraram-se os mapas mostrando a distribuição das temperaturas, a cobertura vegetal e a delimitação das ilhas de calor e ilhas de frescor urbanas, a partir dos dados obtidos. Para isto, foi utilizado o programa ArcGis 9.2.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. COMPARAÇÃO DOS VALORES DE TEMPERATURAS DAS ESTAÇÕES DE SUPERFÍCIE E DAS IMAGENS DE SATÉLITE

Os resultados obtidos nas imagens de sensores remotos foram comparados com os dados levantados pelas estações, para que se pudesse mostrar a confiabilidade dos dados obtidos e, dessa maneira, poder analisar as ilhas de calor e frescor na área de estudo.

A imagem de 15 de julho de 1997 apresentou para o pixel em que se encontra a Estação climatológica principal de Belém o valor de 23,4° C, enquanto que a estação registrou a temperatura mínima para este dia de 22,3° C e máxima de 31,7° C. Para o pixel em que se encontra a Estação Sinótica de Val-de-Cans o valor de 27,0° C, enquanto que a estação registrou a temperatura neste dia às 10:00 h de 29,2° C, ou seja, uma diferença de 2,2° C. Esta foi a única comparação real entre os valores de temperatura da imagem e das estações possível de realizar. Para a área do pixel em que se encontra a Estação Automática de Belém, não se pôde realizar a comparação, pois a mesma ainda não tinha sido implantada.

A imagem de 13 de julho de 2008 apresentou para o pixel em que se encontra a Estação climatológica principal de Belém o valor de 21,0° C, enquanto que a estação registrou a temperatura mínima para este dia de 22,7° C e máxima de 32,8° C. Para o pixel em que se encontra a Estação Sinótica de Val-de-Cans, a imagem mostrou o valor de 25,7° C, enquanto que a estação registrou a temperatura mínima para este dia de 25,0° C e máxima de 32,2° C. Para a área do pixel em que se encontra a Estação Automática de Belém, o valor encontrado foi de 24,4° C, enquanto que a estação registrou para as 11:00 h deste dia, a temperatura de 26,9° C, já que não houve medição para as 10:00h.

De maneira geral, as temperaturas apresentaram valores aceitáveis, considerando a não correção da radiância espectral termal para a banda 6 do Landsat 5, conforme o padrão de subestimativa de 1°C a 5°C, descrito por Prata, *apud* Folhes (2007). Na Tabela 3 são apresentados os valores de maior temperatura e menor temperatura encontradas para cada bairro, obtidos através da banda termal do Landsat – 5.

Tabela 3 – Menor e maior temperaturas por bairro para o ano de 1997 e 2008. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

BAIRRO	Menor temperatura (° C) 1997	Maior temperatura (°C) 1997	Menor temperatura (°C) 2008	Maior temperatura (°C) 2008
ÁGUAS LINDAS	18	27	22	24
ÁGUAS NEGRAS	18	24	22	25
AGULHA	20	24	20	24
AURÁ	18	27	21	24
BARREIRO	18	24	22	26
BATISTA CAMPOS	20	24	21	26
BENGUÍ	18	24	22	25
CABANAGEM	21	24	22	26
CAMPINA	21	25	25	27
CAMPINA DE ICOARACI	18	24	22	25
CANUDOS	23	24	22	27
CASTANHEIRA	20	25	23	26
CIDADE VELHA	20	24	23	26
CONDOR	20	24	24	26
COQUEIRO	19	24	22	25
CREMAÇÃO	21	24	20	26
CRUZEIRO	20	23	22	25
CURIÓ-UTINGA	18	24	21	26
FÁTIMA	22	24	24	26
GUAMÁ	18	25	23	27
GUANABARA	18	23	21	24
JURUNAS	18	25	23	27
MANGUEIRÃO	18	25	22	26
MARACACUERA	18	23	20	24
MARACANGALHA	18	25	22	26
MARAMBAIA	18	25	20	27
MARCO	18	24	23	27
MIRAMAR	18	23	22	25
MONTESE (TERRA FIRME)	21	24	23	26
NAZARÉ	21	24	24	26
PARACURI	18	23	22	24
PARQUE GUAJARÁ	18	23	22	25
PARQUE VERDE	18	24	20	25
PEDREIRA	21	24	22	26
PONTA GROSSA	18	23	22	25
PRATINHA	18	23	22	25

(Continua)

(Continuação)

REDUTO	21	26	25	28
SACRAMENTA	20	26	22	27
SOUZA	18	24	22	27
SÃO BRAZ	19	24	23	27
SÃO CLEMENTE	18	23	21	24
TAPANÃ	18	24	22	26
TELÉGRAFO	18	24	23	26
UMARIZAL	22	24	23	27
UNA	19	23	22	24
UNIVERSITÁRIO	18	24	22	27
VAL-DE-CANS	18	26	22	27

A partir dos valores obtidos nas imagens de satélite, pode-se concluir que vários bairros apresentam uma variação de temperatura, em função da diversidade da paisagem. Isto demonstra a diversidade de usos do espaço dentro do bairro, como por exemplo, tem-se o bairro da Marambaia que entre 1997 e 2008, apresentou uma amplitude de 7 °C, conforme foi demonstrado na Tabela 3. Ao analisar-se a espacialização do bairro, observou-se que a menor temperatura foi registrada na área que pertence à Marinha onde, inclusive, se localiza a Estação Radiogoniométrica da Marinha, a qual apresenta como característica principal a presença da cobertura vegetal remanescente, o que determina a diminuição da temperatura. Em contrapartida, o bairro da Marambaia também apresenta áreas com construções, como a área do Entroncamento, próximo ao Shopping Castanheira, que nos últimos anos apresentou um crescimento da área construída em função da dinâmica comercial.

Existem também outros bairros como os que são atingidos pela Área de Proteção Ambiental de Belém, que demonstram paisagens naturais com aproximação de diversos conjuntos habitacionais planejados e habitações espontâneas, provocando uma variação da temperatura dentro do mesmo bairro.

Por outro lado, nota-se que existem bairros em Belém que apresentam altas temperaturas em suas extensões. Por exemplo tem-se o bairro do Reduto que em 1997 apresentou temperaturas de, respectivamente, 21° C e 26° C, ou seja, uma amplitude de 5° C, estando entre os bairros onde foram registradas as maiores temperaturas. Em 2008, para este mesmo bairro, observou-se temperaturas de, respectivamente, 25° C e 28° C, ou seja, uma

amplitude de 3° C mas com temperaturas maiores do que aqueles determinados para o ano de 1997. Foi o bairro mais quente no ano de 2008.

Para entendermos o porquê da amplitude e os valores altos, temos que analisar o bairro do Reduto dentro de um contexto espacial e histórico. Espacialmente, o bairro do Reduto se encontra cercado pelos bairros Umarizal, Nazaré e Campina, além da Baía do Guajará. Os dois primeiros apresentam áreas arborizadas com praças e túneis de mangueiras, característicos da cidade. Isso faz com que as temperaturas sejam menores, em função desta vegetação. Note-se que em 1997 o bairro de Nazaré apresentou temperaturas variando entre 21° C e 24° C, enquanto que em 2008 as temperaturas ficaram no intervalo de 23° C e 27° C. Já no bairro do Umarizal, observaram-se em 1997, temperaturas variando de 22° C a 24° C e em 2008 temperaturas de 23° C a 27° C. No bairro da Campina, em 1997, observaram-se temperaturas entre 21° C e 25° C e em 2008 as temperaturas oscilaram entre 25° C e 27° C.

Assim, as menores temperaturas do bairro do Reduto estão em áreas próximas aos bairros de Nazaré e Umarizal, em virtude da presença de cobertura vegetal, que ameniza as temperaturas. As maiores temperaturas no bairro do Reduto estão relacionadas com o seu contexto histórico, porque foi um bairro industrial de Belém, o que fez com que o espaço geográfico do bairro fosse configurado de forma a atender esta funcionalidade, fazendo com que a construção de galpões fosse predominante. Desta forma, esses elementos permaneceram na paisagem, agora com outra funcionalidade, mas as conseqüências no meio ambiente, principalmente a re-emissão do calor na forma sensível, continuam existindo. O resultado mostrou uma concentração de pontos com temperaturas altas na área do prédio da antiga companhia "Força e Luz" e do prédio da antiga "Fábrica Perseverança". É possível notar no bairro que as ruas estreitas pouco apresentam vegetação, somente nas áreas próximas ao bairro de Nazaré.

Nas figuras 5 e 6, são mostradas as distribuições dos valores de temperatura para os anos de 1997 e 2008.

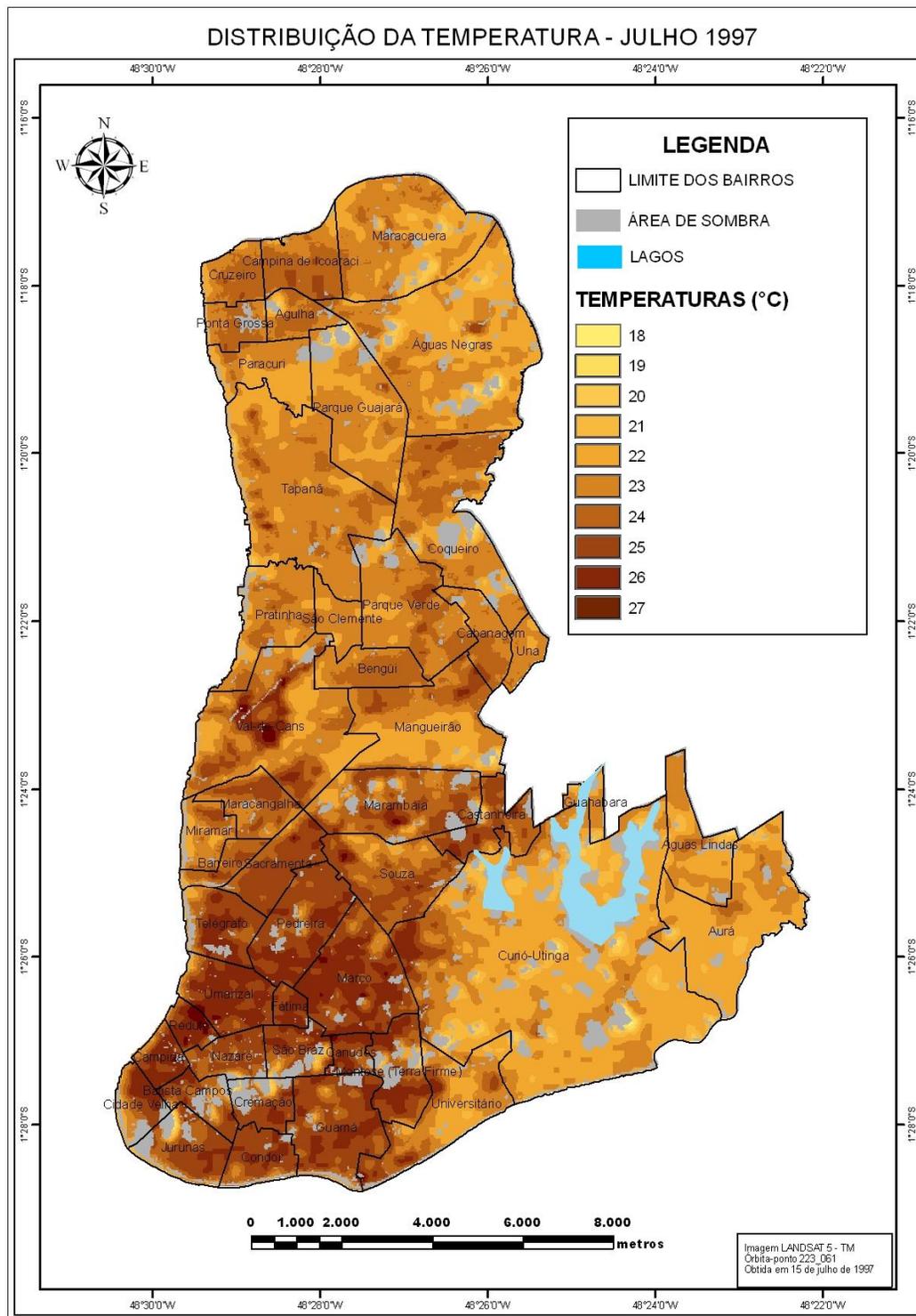


Figura 5 – Distribuição dos valores de temperatura na área de estudo em julho de 1997. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

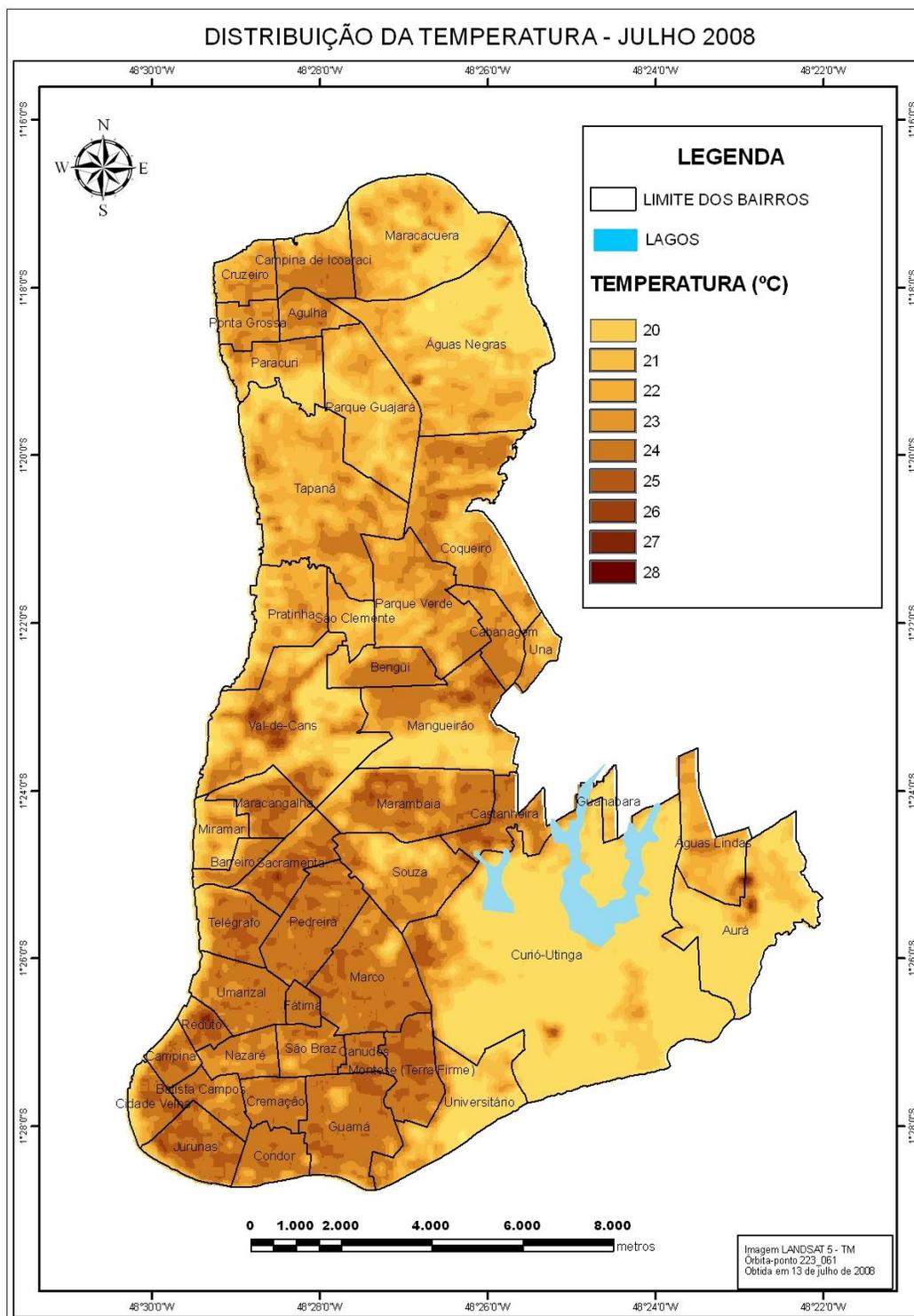


Figura 6 – Distribuição dos valores de temperatura na área de estudo em julho de 2008.
Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

5.2. ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL NA PORÇÃO CONTINENTAL DO MUNICÍPIO DE BELÉM

Os resultados obtidos revelaram que houve uma redução da área de cobertura vegetal na área de estudo entre os anos de 1997 (Figura 7) e 2008 (Figura 8). Em 1997, a área coberta com vegetação era de 7863,96 ha, enquanto que em 2008 a área era de 6861,07 ha, perfazendo uma redução de 12,75 %. O resultado do mapeamento por bairro é apresentado na tabela 4 e nas figuras acima citadas.

Tabela 4 – Variação da área de cobertura vegetal por bairro para a porção continental do município de Belém, para os anos de 1997 e 2008. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

BAIRRO	HECTARES (1997)	HECTARES (2008)	VARIAÇÃO (%)
ÁGUAS LINDAS	178,42	74,45	-58,27
ÁGUAS NEGRAS	748,22	598,79	-19,97
AGULHA	26,60	8,59	-67,71
AURÁ	557,33	576,42	+3,43
BARREIRO	11,71	5,01	-57,21
BATISTA CAMPOS	5,80	12,44	+14,45
BENGUÍ	59,12	24,30	-58,90
CABANAGEM	39,61	5,22	-86,83
CAMPINA	7,34	6,75	-8,03
CAMPINA DE ICOARACI	67,60	44,78	-33,75
CANUDOS	2,52	0,24	-90,32
CASTANHEIRA	26,54	12,57	-52,65
CIDADE VELHA	12,80	8,61	-32,78
CONDOR	13,46	7,17	-46,77
COQUEIRO	228,90	142,99	-37,53
CREMAÇÃO	3,87	2,54	-34,29
CRUZEIRO	56,25	14,64	-73,98
CURIÓ-UTINGA	2043,48	2486,37	+21,67
FÁTIMA	3,39	0,00	-100,00
GUAMÁ	26,22	11,29	-56,92

(Continua)

(Continuação)

GUANABARA	43,49	48,43	+11,37
JURUNAS	7,49	5,96	-20,49
MANGUEIRÃO	339,46	281,28	-17,14
MARACACUERA	440,86	325,00	-26,28
MARACANGALHA	50,13	23,69	-52,73
MARAMBAIA	103,44	65,24	-36,93
MARCO	48,19	33,23	-31,06
MIRAMAR	65,72	79,37	+20,77
MONTESE (TERRA FIRME)	10,65	3,94	-63,06
NAZARÉ	22,11	15,20	-31,25
PARACURI	162,22	132,70	-18,20
PARQUE GUAJARÁ	314,24	236,35	-24,79
PARQUE VERDE	212,34	90,35	-57,45
PEDREIRA	16,34	2,55	-84,41
PONTA GROSSA	50,10	17,70	-64,66
PRATINHA	172,94	81,26	-53,01
REDUTO	3,37	2,24	-33,41
SACRAMENTA	14,47	10,55	-27,13
SOUZA	137,50	128,67	-6,42
SÃO BRAZ	15,83	11,97	-24,38
SÃO CLEMENTE	87,32	57,30	-34,38
TAPANÃ	521,68	269,96	-48,25
TELÉGRAFO	16,78	7,31	-56,41
UMARIZAL	9,62	6,96	-27,64
UNA	54,96	24,78	-54,91
UNIVERSITÁRIO	318,70	346,99	+8,88
VAL-DE-CANS	504,86	508,97	+0,81

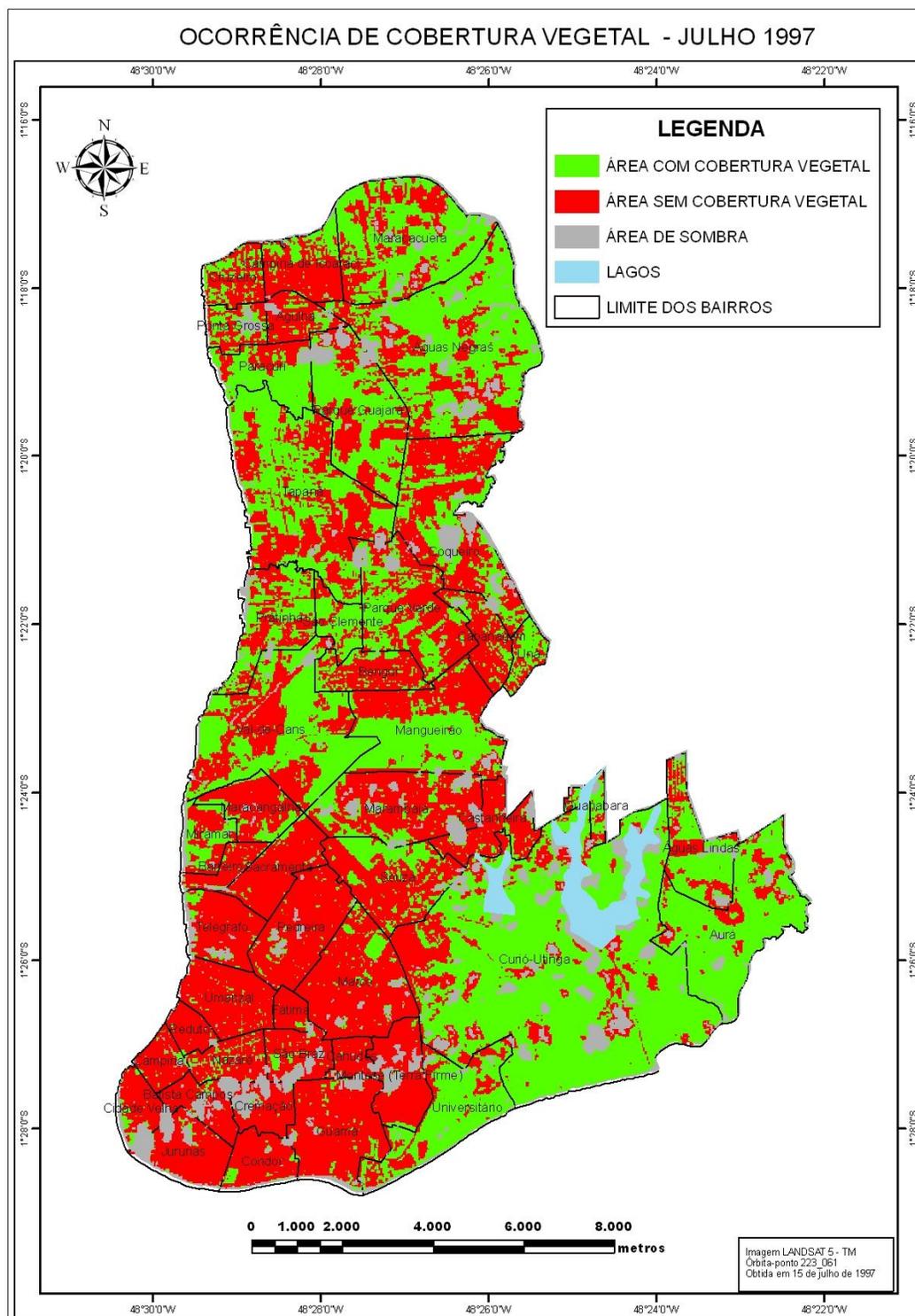


Figura 7 – Cobertura vegetal na área de estudo em julho de 1997. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

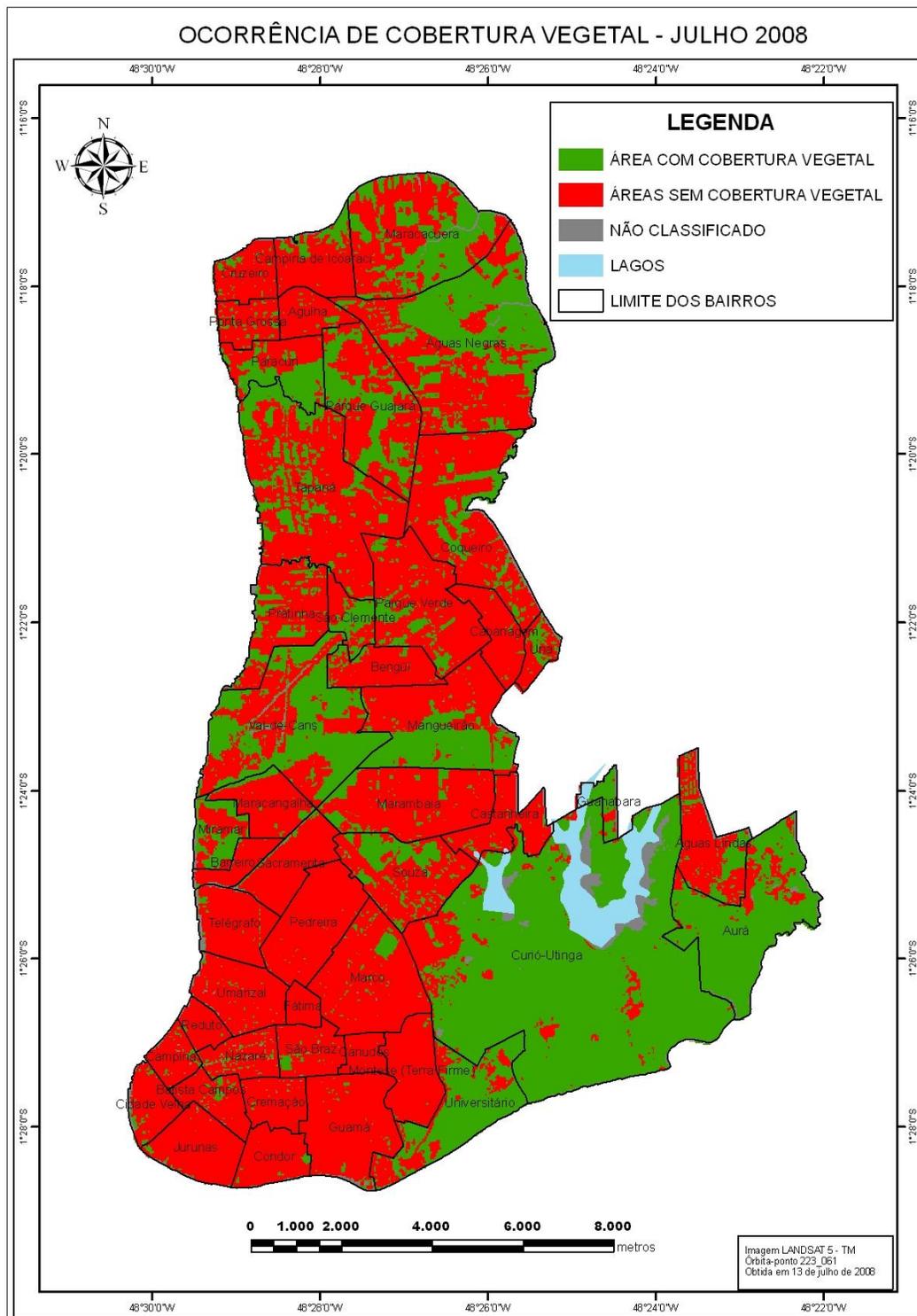


Figura 8 – Cobertura vegetal na área de estudo em julho de 2008. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

De acordo com os resultados obtidos, notou-se, em geral, que há uma redução na quantidade de vegetação nos bairros de Belém. Dentro da área da primeira légua patrimonial de Belém, houve uma redução da área de cobertura vegetal estimada em 12,71%, nos bairros localizados no eixo de expansão da cidade de Belém, a redução foi de 29,32% e nos bairros próximos à área da Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém, houve uma ampliação de 12,24%. Essa ampliação pode ter sido causada em função da perda de informação pela presença de nuvens na imagem de 1997.

Dentre os fatores que causaram a redução da cobertura vegetal evidenciada entre os anos de 1997 e 2008, foi a necessidade de construções para diferentes fins, principalmente de moradias, a especulação imobiliária, que gerou o aumento da verticalização nas áreas centrais (bairros do Umarizal, Nazaré e Batista Campos) e nas áreas limítrofes da Primeira Légua, como os bairros da Pedreira e Marco (OLIVEIRA, 1992). Também há uma pequena expansão da verticalização nos bairros da periferia imediata, as quais ainda mantinham a cobertura vegetal, como o Jurunas, além do aumento das áreas de ocupação nestes bairros, Figura 9 (A e B).

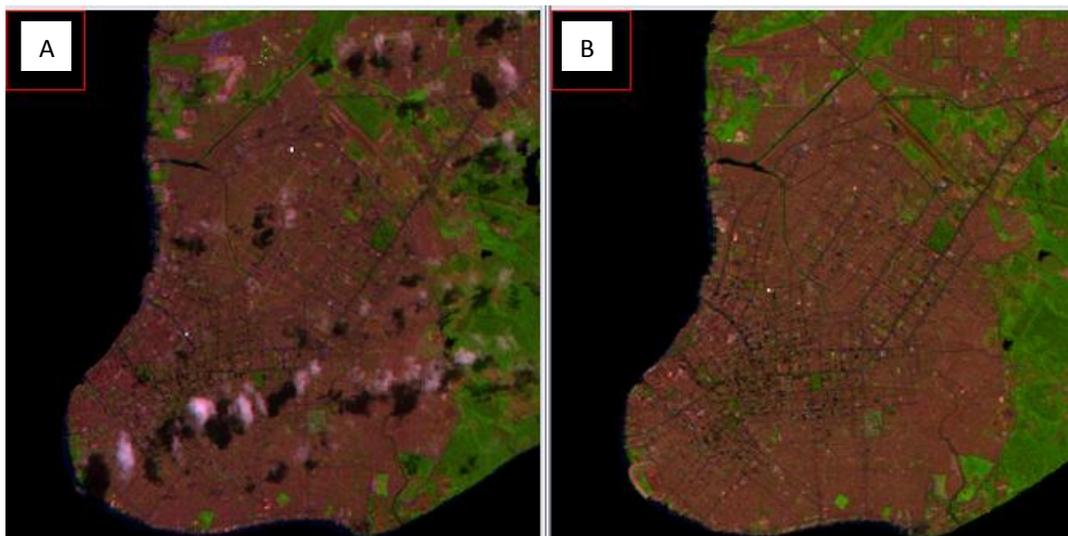


Figura 9 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a retirada da vegetação na área da Primeira Légua Patrimonial. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

Observou-se que entre os anos de 1997 e 2008 a vegetação foi retirada principalmente fora da Primeira Légua Patrimonial, ao longo da área que fica entre a Avenida Augusto Montenegro e a Rodovia Arthur Bernardes e suas adjacências, Figura 10 (A e B), nos bairros do Tapanã, Parque Verde, Parque Guajará, Mangueirão, Bengüí e Coqueiro. Esta

retirada ocorreu em função do surgimento de áreas de ocupação ilegal e condomínios horizontais e verticais que provocam a retirada brutal da cobertura vegetal, mostrando a expansão urbana ocorrida nesta área, confirmando o estudo realizado por Trindade Jr. (1998) e Oliveira (1992).

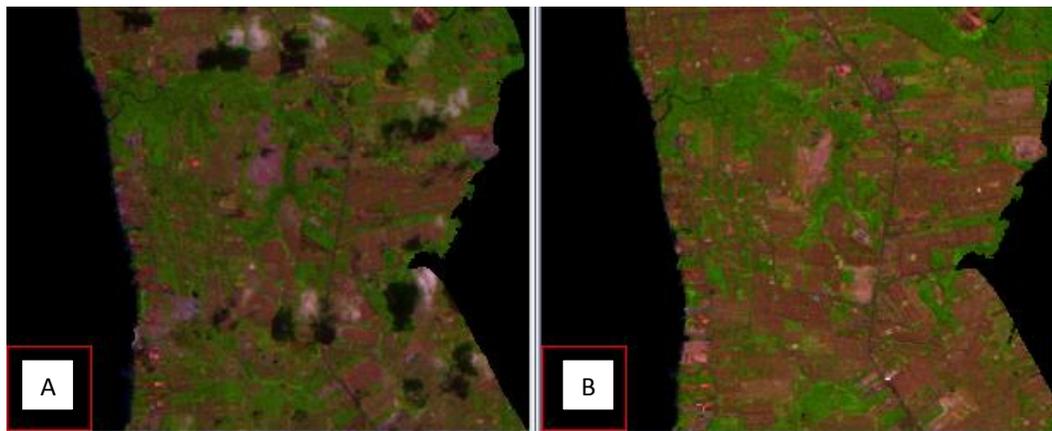


Figura 10 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a retirada da vegetação nos bairros do Tapanã, Parque Verde, Parque Guajará, Mangueirão, Bengüí e Coqueiro. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

Notou-se, também, que houve retirada de vegetação, próximo às áreas de preservação existentes na área de estudo, caracterizando uma pressão antrópica sobre as mesmas. Um exemplo é a área dos mananciais do Utinga, onde há o Parque Ambiental de Belém e a Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém, principalmente próximo à área do Conjunto Verdejantes, Figura 11 (A e B).

Outra área de preservação que sofreu a pressão antrópica foi a do Parque Ecológico de Belém, onde houve a construção do condomínio Cristal Ville, e também ao longo do canal São Joaquim e do igarapé Água Cristal que, anteriormente, mantinham suas matas ciliares preservadas, as quais foram retiradas, provavelmente a partir da intensificação da ocupação posterior ao projeto de macrodrenagem, concluído em 2004, Figura 12 (A e B).



Figura 11 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a retirada da vegetação na Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.



Figura 12 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a retirada da vegetação nas margens dos canais São Joaquim e Água Cristal. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

Observou-se que na área do distrito de Icoaraci, constituído pelos bairros da Agulha, Águas Negras, Paracuri, Ponta Grossa, Parque Guajará, Maracacuera, Campina de Icoaraci e Cruzeiro, houve uma intensificação na ocupação do solo, caracterizada pelo surgimento de ocupações ilegais como o Paracuri III. Nos bairros da Ponta Grossa, Cruzeiro, parte da Campina de Icoaraci e parte da Agulha, havia lotes de grandes dimensões, o que gerou especulação imobiliária, acarretando o parcelamento destes lotes para otimizar a ocupação dos mesmos, contribuindo para o adensamento das habitações. Também houve

retirada de vegetação na área dos bairros do Paracuri, Maracacuera, Parque Guajará e Agulha, Figura 13 (A e B).



Figura 13 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a retirada da vegetação no distrito de Icoaraci. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

Em contrapartida ao processo de retirada da cobertura vegetal, também foi observado que houve a implantação da cobertura vegetal em algumas áreas como próximo ao Aeroporto Internacional de Val-de-Cans, Figura 14 (A e B), na Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém, Figura 15 (A e B), Paracuri e Tapanã, próximo ao Igarapé Paracuri, Figura 16 (A e B).

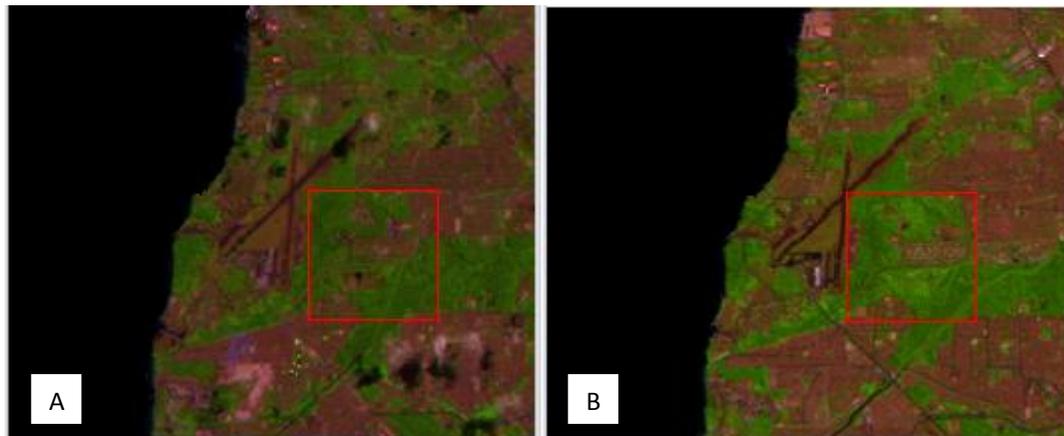


Figura 14 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a recomposição da vegetação, próximo ao Aeroporto Internacional de Val-de-Cans. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

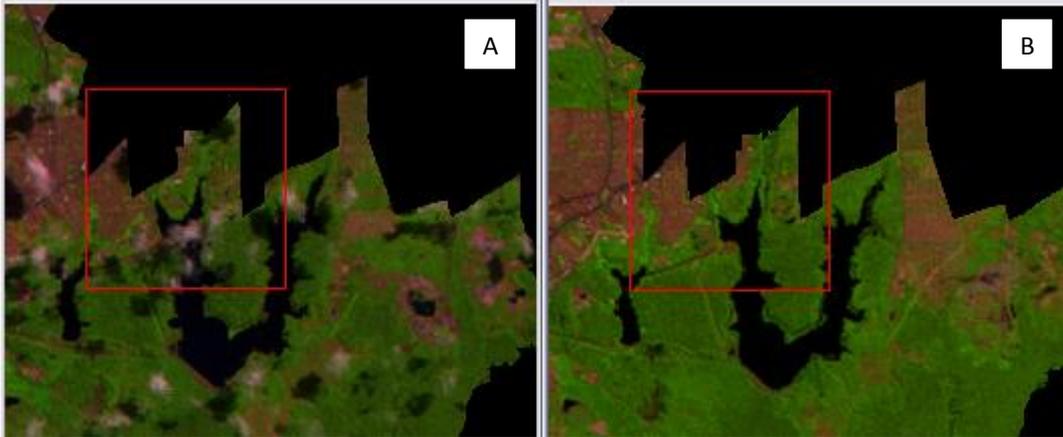


Figura 15 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a recomposição da vegetação na Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.



Figura 16 – Imagens de 1997 (A) e 2008 (B) evidenciando a recomposição da vegetação nos bairros do Paracuri e Tapanã, próximo ao igarapé Paracuri. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

5.3. ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR E ILHAS DE FRESCOR

Com o resultado do processamento das imagens da banda termal, pode-se analisar a dinâmica das ilhas de calor e de frescor na área de estudo (Figura 17 e Figura 18).

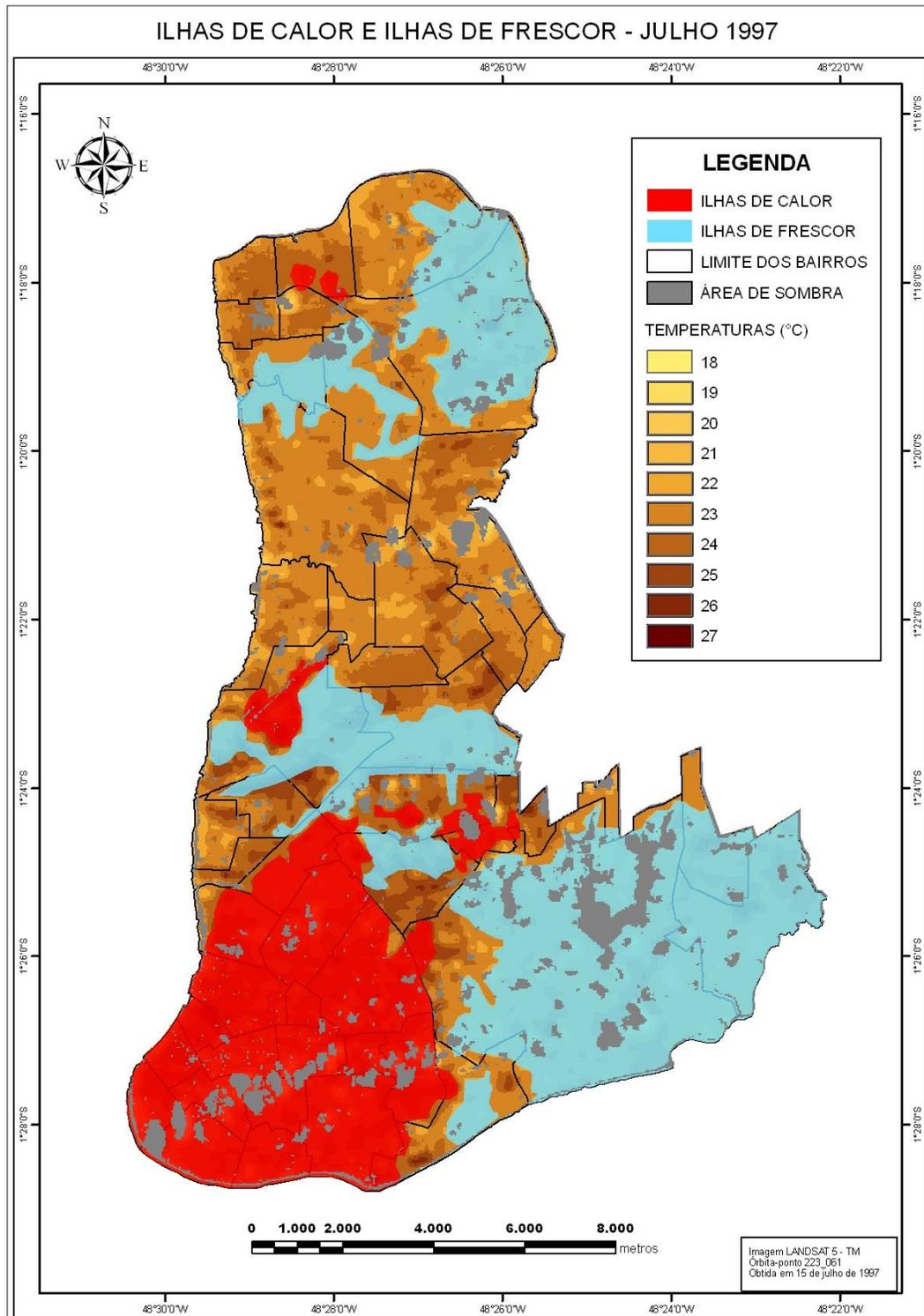


Figura 17 – Ilhas de calor e ilhas de frescor em julho de 1997. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

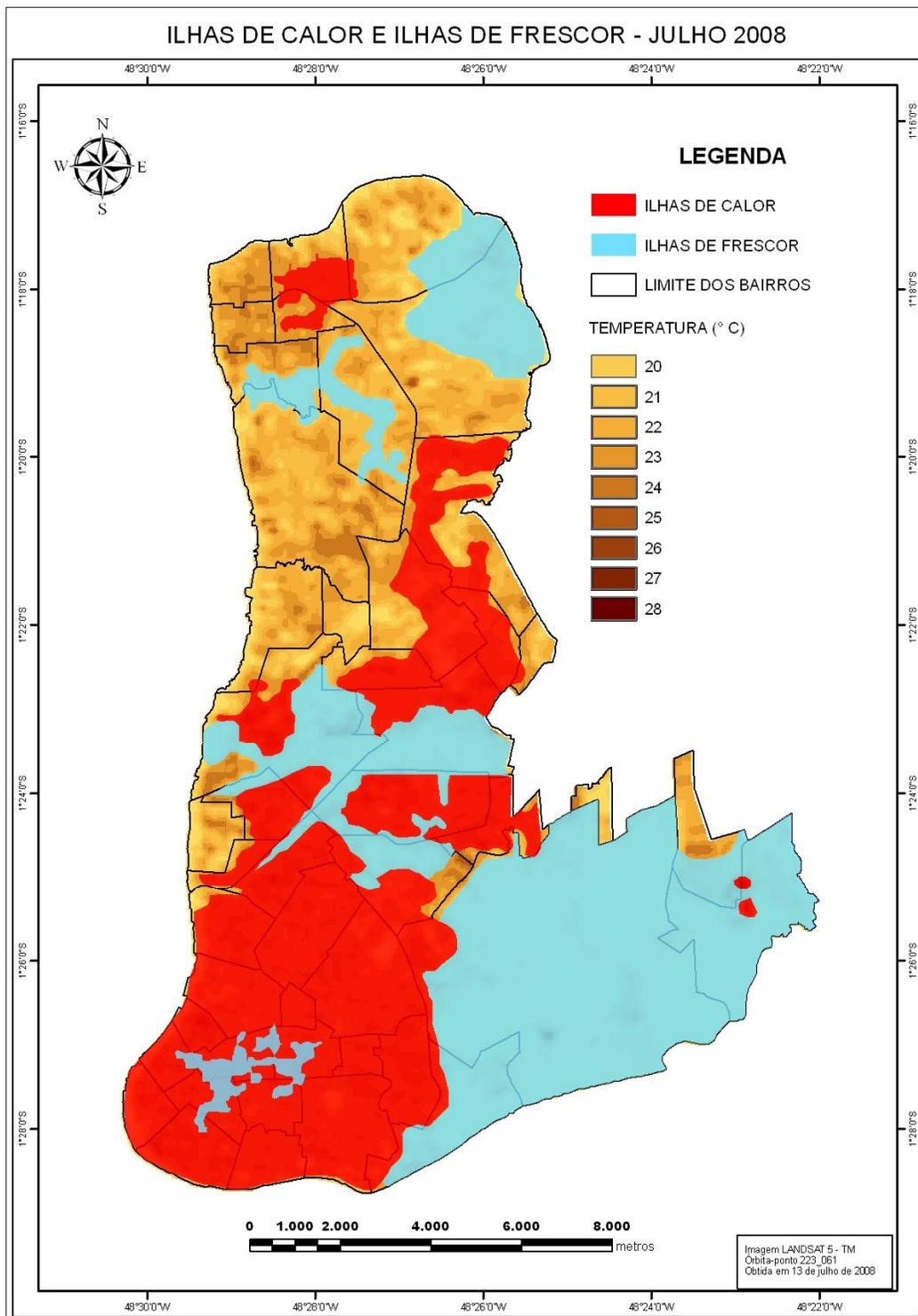


Figura 18 – Ilhas de calor e ilhas de frescor em julho de 2008. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

A área compreendida pela Primeira Léngua Patrimonial do município de Belém apresenta uma densidade de ocupação maior do que o resto do município, observando nesta área a predominância de temperaturas mais elevadas que as áreas do entorno, caracterizando uma ilha de calor, confirmando os estudos realizados por Nascimento (1995) e Costa (1998), verificando-se que o bairro do Reduto apresentou as maiores temperaturas tanto em 1997 quanto em 2008. É importante lembrar que o bairro do Reduto foi no passado um bairro industrial, o que justifica a existência de galpões, prédios e pouca cobertura vegetal.

Esta ilha de calor se estendia, em 1997, a leste até o limite dos bairros Universitário e Curió-Utinga, ao norte até o limite do bairro do Souza, e a noroeste nos limites dos bairros da Maracangalha e Val-de-Cans. Comparando os resultados de 1997 e 2008, notou-se que esta ilha de calor avançou em direção aos bairros de Maracangalha, Barreiro e Val-de-Cans, e também em direção aos bairros do Souza e do Curió-Utinga, havendo, portanto, uma expansão desta ilha de calor.

Fora da primeira léngua patrimonial, foi verificado que em 1997, havia a tendência de aparecimento de uma ilha de calor entre os bairros da Castanheira e da Marambaia. Em 2008, esta ilha de calor se consolidou, estando separada da ilha de calor da primeira léngua patrimonial pelo bairro de Souza. É válido lembrar que o bairro de Souza é predominantemente constituído pelas áreas institucionais, onde ainda prevalece significativa quantidade de vegetação.

Também nos bairros da Cabanagem, Bengüí, Coqueiro, Mangueirão, Parque Verde, Tapanã e Una, foi evidenciada uma ilha de calor que não existia em 1997. Esta ilha de calor pode se unir à ilha de calor dos bairros da Marambaia e da Castanheira, formando uma só. Como esta pode se unir à ilha de calor localizada na Primeira Léngua Patrimonial, é possível que num futuro próximo, tenhamos uma ilha de calor que se estenda do bairro da Cidade Velha até o bairro do Coqueiro.

Na área do Aeroporto Internacional de Belém, a ilha de calor é em função do Terminal de passageiros, com todo o material utilizado na sua construção como ferro, aço, concreto e vidro, além dos condicionadores de ar e do asfalto utilizado na pista. Esta se manteve estável entre 1997 e 2008.

No distrito de Icoaraci existia, em 1997, uma tendência de formação de uma ilha de calor na área dos bairros da Agulha e Campina. Em 2008, esta ilha de calor se consolidou, podendo se expandir para os bairros da Ponta Grossa e do Cruzeiro.

Por fim, na Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém está ocorrendo o surgimento de uma ilha de calor, nos bairros de Águas Lindas e Aurá, Figura 18.

Em relação às ilhas de frescor, foram identificadas cinco ilhas de frescor: uma que abrange os bairros Nazaré, São Braz, Batista Campos, Campina, Umarizal e Cremação; uma ilha de frescor na Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém; uma ilha de frescor no bairro da Maracacuera; uma ilha de frescor na área do igarapé Paracuri e outra na área da Estação de Rádio da Marinha e adjacências, Figura 18.

Em relação à ilha de frescor dos bairros de Nazaré, São Braz, Batista Campos, Campina, Umarizal e Cremação, esta apresenta temperaturas menores que o entorno por conta da grande quantidade de árvores existentes nas suas vias, como os tradicionais “túneis de mangueiras”, característicos da cidade. A grande quantidade de arborização proporciona, além de sombras, uma maior absorção da radiação solar incidente sobre a área, o que diminui significativamente o valor de temperatura. Foi verificada uma diferença de até 4° C entre áreas do bairro Nazaré e do Reduto. Considerando que esses bairros são vizinhos, isso é uma diferença significativa. Esta ilha de frescor não foi identificada na imagem de 1997 por conta da localização da área de sombra coincidir com a mesma.

Também foi identificada uma ilha de frescor abrangendo a Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém, que teve uma pequena expansão em direção ao bairro Universitário entre 1997 e 2008.

A ilha de frescor no bairro da Maracacuera sofreu uma redução entre 1997 e 2008, assim como a ilha de frescor na área do igarapé Paracuri. Em ambas, o que ocorreu foi a retirada da cobertura vegetal ocorrida nestas áreas, Figura 19 (A e B) e Figura 20 (A e B).

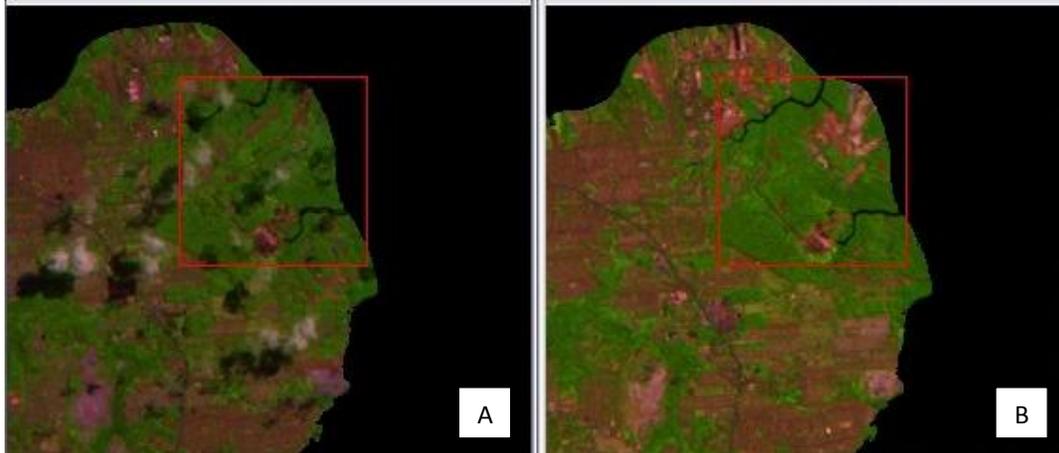


Figura 19 – Diminuição da cobertura vegetal no bairro da Maracacuera, provocando redução da ilha de frescor. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.



Figura 20 – Diminuição da cobertura vegetal na área do igarapé Paracuri, provocando redução da ilha de frescor. Elaborada por CASTRO, A. R. da C., 2009.

Foi observada na área da Estação de Rádio da Marinha e adjacências a existência de outra ilha de frescor, que sofreu ampliação entre os anos de 1997 e 2008, servindo também como separação entre as ilhas de calor da Primeira Léguas Patrimonial, dos bairros Castanheira e Marambaia, e dos bairros Cabanagem, Bengüí, Coqueiro, Mangueirão, Parque Verde, Tapanã e Una.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 - CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que está havendo surgimento de novas ilhas de calor na porção continental do município de Belém. Assim, os malefícios em função da temperatura elevada, principalmente o desconforto térmico, estão atingindo um maior número de pessoas. A retirada de cobertura vegetal, que é concomitante ao processo de expansão urbana é, de fato, um dos fatores que propiciam o aumento da temperatura. Isto ficou claro quando da análise da retirada de cobertura vegetal, que ocorreu em proporções elevadas na área dos bairros próximos à Avenida Augusto Montenegro e Rodovia Arthur Bernardes. Nessa área houve, inclusive, o surgimento de ilhas de calor que não existiam em 1997.

Notou-se, também, que as temperaturas mínimas e máximas por bairro de 2008, foram mais elevadas do que em 1997. Esse aumento de temperatura confirma a existência de ilhas de calor na área de estudo.

O emprego das imagens de satélite para a determinação das temperaturas de superfície facilitou este estudo, em virtude da visão abrangente o espaço e das possibilidades que as imagens de sensores remotos dão de estudar os elementos da superfície terrestre através do comportamento espectral dos alvos e do processamento digital de imagens. Juntamente com os dados fornecidos por estações meteorológicas sinóticas e climatológica a análise ficou mais embasada, já que as mesmas serviram como verdade de campo. Assim, foi possível localizar onde está ocorrendo, dentro da porção continental de Belém, o surgimento e a ampliação de ilhas de calor e a redução de ilhas de frescor

Por último, as dificuldades acerca da obtenção de dados diminuíram o enriquecimento do trabalho. A falta de valores de temperatura no horário de passagem do satélite assim como a falta de dados de radiossondagem também no horário de imageamento, fizeram com que não se obtivesse valores para comparação e dados para correção atmosférica da banda termal, respectivamente.

6.2 - Sugestões

A ação mais simples e que traz um resultado significativo na tentativa de reversão dos efeitos das ilhas de calor é a recolocação da cobertura vegetal em áreas que apresentem temperaturas elevadas. Entretanto, a característica de determinadas áreas, principalmente das áreas de ocupação, tornam esta prática um tanto quanto difícil, pois não há calçadas e as casas ocupam praticamente todo o lote. Entretanto, é possível estudar maneiras de arborizar tais áreas, através de parceria entre gestores públicos, como a prefeitura, que disponibilizaria seus técnicos para determinar junto com a comunidade, os locais que poderiam ser arborizados, como criação de praças, bosques ou simples arborização das vias.

Também é possível incentivar a população a usar materiais que não transformem o calor latente em calor sensível utilizados nas construções, como, por exemplo, a telha de fibrocimento. O uso de telhas de barro é uma alternativa, que alivia o calor dentro da própria construção.

Outra ação é a forma de construção das casas, que deve primar por um espaço entre as mesmas para circulação do vento, numa tentativa de resfriar as construções e assim diminuir a emissão de calor para o ar. Esta ação também vale para os edifícios que estão sendo construídos dentro da área da Primeira Légua Patrimonial, que servem como empecilho à circulação dos ventos, principalmente os localizados próximos à Baía do Guajará, que vão atuar como barreira aos ventos provenientes desta, aumentando o calor nas áreas mais internas.

Por fim, para que estas sugestões sejam concretizadas, é necessário que a população em geral seja conscientizada acerca destes problemas e aceite estas soluções ou sugira novas, uma vez que depende principalmente dela, a população, reverter esta situação.

REFERÊNCIAS

ABREU, Silvano Luiz de et al . **Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do sol, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto.** Ciência Rural , Santa Maria, v. 33, n. 2, 2003 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782003000200015&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 03/12/2007

ACKERMAN, Bernice. **Temporal march of the Chicago heat island.** In: Journal of climate and applied meteorology, American Meteorological Society, vol. 24, 1985. P. 547-554.

ANJOS, A. M. G.; LOPES, P. M. O.; MARCELINO, I. P. V. O. **Identificação de ilhas de calor em Manaus, através do canal termal do sensor Thematic Mapper - Landsat 5.** In: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu - Paraná. 2002. P. 327 – 333.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos.** São Paulo: Bertrand Brasil, 1983, p. 1-10 e 15-22.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os trópicos.** Ed. Brasileira: Maria Juraci Zani dos Santos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2006. 332 p.

BAUMANN, Paul R. **A urban heat island: Washington D.C.** New York: University of New York State. 2001.

BIAS, Edilson de Souza; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello; LOMBARDO, Magda Adelaide. **Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados LANDSAT e IKONOS.** In: Anais XI SBSR. Belo Horizonte – Minas Gerais. 2003. P. 1741 – 1748.

BORDALO, Carlos Alexandre Leão. **Gestão ambiental em bacias hidrográficas: Um estudo de caso dos mananciais do Utinga-PA. Bacias dos Igarapés Murutucum e Água Preta.** Dissertação de Mestrado. Presidente Prudente: Faculdade de Ciência e Tecnologia – UNESP. 1999. 189 p.

BRANDÃO, Waldiza. **Utilização de métodos geoestatísticos de krigeagem ordinária e krigeagem por indicação na interpolação de dados geoquímicos de solos: uma comparação.** Disponível em http://www.dpi.inpe.br/gilberto/papers/waldiza_sbsr2001.pdf, acessado em 11/06/2008.

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

COLTRI, Priscila Pereira; VELASCO, Giuliana Del Nero; POLIZEL, Jefferson Lordelo; DEMETRIO, Valdemar Antonio; FERREIRA, Nelson Jesus. **Ilhas de calor da estação de inverno da área urbana do município de Piracicaba, SP.** In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis – Santa Catarina. 2007. P. 5151 – 5157.

COSTA, A. C. L. **Estudo de variações termo-higrométricas de cidade equatorial devido ao processo de urbanização: O caso de Belém - PA.** Tese de Doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 1998. 232p.

COSTA, Rildo Aparecido; ROSA, Roberto. **Uso de imagens termais no estudo de ilhas de calor: O caso de Uberlândia – MG.** In: CD – ROM do I Encontro de Geógrafos de Uberlândia. Uberlândia – Minas Gerais. 2000. P. 1 – 8.

CPRM. **Processamento Digital Básico de Imagens de Sensores Remotos Ópticos para uso em Mapeamento Geológico.** Disponível em meio digital. 2005. 43 p.

FOLHES, Marcelo Theophilo. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos.** Tese de Doutorado. São José dos Campos: INPE, 2007. 186 p.

FUCKNER, Marcus André. **Aplicações do sensoriamento remoto no estudo do crescimento urbano.** Disponível em:
www.dsr.inpe.br/geu/Monografia_Final_ISR_Fuckner.pdf. Acessado em 11/03/2008.

GOLDEMBERG, J. **Física geral e Experimental. Vol. 1** São Paulo: Editora da Universidade de SP, 1968.

GOMES & SOARES. **A vegetação nos centros urbanos: considerações sobre os espaços verdes em cidades médias brasileiras.** Estudos Geográficos, Rio Claro, 1 (1), pág 19 – 29, junho, 2003. Disponível em <http://cecemca.rc.unesp.br/ojs/index.php/estgeo/article/view/270/225>. Acessado em 10 mar. 2009.

HINKEL, Kenneth M.; NELSON, Frederick E.; KLENE, Ana E.; BELL, Julianne H. **The urban heat island in winter at Barrow, Alaska.** In: International Journal of Climatology, 2003.

JÚNIOR, Michael Ference, LEMON, Harvey B., STEPHENSON, Reginald J. **Curso de Física. Calor.** Ed. Brasileira: GOLDEMBERG, José. São Paulo: Edgard Blücher. 1969. 157 p.

KATSOULIS, B. D.; THEOHARATOS, G. A. **Indications of the urban heat island in Athenas, Greece.** In: Journal of climate and applied meteorology, American Meteorological Society, vol. 24, 1985. P. 1296 – 1302.

LOMBARDO, Magda Adelaide. **Ilha de calor nas metrópoles: O exemplo de São Paulo.** São Paulo: Hucitec. 1985. 244 p.

MARKHAN, B. L.; BARKER, J. L. **Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures.** Lanham: EOSAT, 1986. 21 p.

MARTINS, Eduardo Sávio Passos Rodrigues, et al. **Utilização de imagens CBERS para mapeamentos dos espehos d'água do Brasil.** Disponível em www.funceme.br/revistaeletronica/Utiliz_Imagens_CBERS_Espelho_DERAM_2007.pdf. Acessado em 17/06/2009.

MÉNDEZ, Carlos Constatino Morales; URIBE, Delfino Madrigal; BECERRIL, Lidia Alejandra González. **Isla de Calor en Toluca, México.** In: Ciencia Ergo Sum, febrero. Año/vol. 14, número 003. Universidad Autónoma Del Estado Del México. Toluca, México. 2008. P. 307-316

MENDONÇA, Francisco. **Clima e criminalidade: ensaio analítico da correlação entre a temperatura do ar e a incidência da criminalidade urbana.** Editora da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba – Paraná, 2001.

MENDONÇA, Francisco; DUBREUIL, Vincent. **Termografia de superfície e temperatura do ar na RMC (Região Metropolitana de Curitiba/PR).** RA'E GA, Curitiba: UFPR, 2005. Nº 9, p. 25-35.

MOLLION, Luiz Carlos Baldicaro. **O buraco de ozônio: o outro lado da história.** In: Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, São Paulo, 1992, vol. 16, nº1. P 8-11.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Teoria e Clima Urbano.** Tese de doutorado. São Paulo: USP. 1976, 181p.

MOREIRA, Mauricio Alves; *et al.* **Modelo de mistura espectral para identificar e mapear área de soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais.** In: Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos – São Paulo. 1998. p. 53 - 57.

NASCIMENTO, Cicerino Cabral do. **Clima e morfologia urbana em Belém.** Belém: UFPA, NUMA. 1995, 157p.

NOVO, E. M. de M.; **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo: Edgard Blucher. 1989, 308p.

OLIVEIRA, J.M.G.C. **Produção e apropriação do espaço urbano: a verticalização em Belém-PA.** Tese de Doutorado. São Paulo: Universidade de São Paulo – USP. 1992.

OLIVEIRA, L. G. L. de; PEREIRA, G.; CAMARGO, F. F.; GUERRA, J. B. **Comparação entre os métodos de interpolação linear e o método estatístico de krigeagem para a geração de mapas de ilhas de calor através de sistemas de informação geográfica.** In: Anais do III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracajú – Sergipe. 2006.

PACHÊCO, Admilson Penha. **Sensoriamento remoto na faixa espectral do infravermelho termal (8 – 12 μ)**. In: Geodésia on line: Revista da Comissão Brasileira de Geodésia. Fevereiro de 2001. Disponível em <http://geodesia.ufsc.br/wikidesia/index.php/GO:Homepage>. Acessado em 19/12/2007.

PEREIRA et al. **Identificação do fenômeno de ilhas de calor para a região metropolitana de São Paulo através de dados provenientes do satélite LANDSAT 7 ETM +**. In: Anais do III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracajú – Sergipe. 2006.

ROSEMBACK, Roberta; FRANÇA, Andreia Maria Silva; FLOREZANO, Teresa Gallotti. **Análise comparativa dos dados NDVI obtidos de imagens CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5 em área urbana**. Disponível em www.obt.inpe.br/cbers/cbers_XIISBSR/104_paper_SBSR_urbana.pdf. Acessado em 23/06/2008.

SANTOS, Odete Cardoso de Oliveira. **Análise do uso do solo e dos recursos hídricos na microbacia do igarapé Apeú, nordeste do Estado do Pará**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2006

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 3ª ed. rev. atual. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001. 121p.

SOUZA, Juarez Dantas de; SILVA, Bernardo Barbosa da. **Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5**. Revista Brasileira de Geografia Física, São Paulo, v. 23, n. 4, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2005000400002&lng=en&nrm=iso. Acessado em: 23/02/2008.

TRINDADE JR, S. C. **A Cidade Dispersa: Os novos espaços de assentamentos em Belém e a Reestruturação Metropolitana**. USP/FFCH. São Paulo, 1998. (Tese de Doutorado)

www.ibge.gov.br, acessado em 11/06/2008.

ZUQUIM, Fernanda; BENEDICTIS, Guilherme de. **Geografia, fascículo 02**. Disponível em: http://www1.uol.com.br/aprendiz/n_simulado/revisao/revisao02/er030002.pdf. Acessado em 05/09/2007.