

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICA – CCET  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE -PPGEA

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E DO SALDO DE RADIAÇÃO  
POR MEIO DO MÉTODO SEBAL NO ENTORNO DA FÁBRICA DE ALUMINA  
DA REGIÃO DE BARCARENA UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE  
LANDSAT**

São Luís - MA  
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICA – CCET  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE -PPGEA

**FÁBIO MARCELO FERREIRA MARQUES**

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E DO SALDO DE RADIAÇÃO  
POR MEIO DO MÉTODO SEBAL NO ENTORNO DA FÁBRICA DE ALUMINA  
DA REGIÃO DE BARCARENA UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE  
LANDSAT**

São Luís - MA  
2014

**FÁBIO MARCELO FERREIRA MARQUES**

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E DO SALDO DE RADIAÇÃO  
POR MEIO DO MÉTODO SEBAL NO ENTORNO DA FÁBRICA DE ALUMINA  
DA REGIÃO DE BARCARENA UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE  
LANDSAT**

Dissertação de Mestrado em Energia e Ambiente, apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão como requisito necessário à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Cícero Wellington Brito Bezerra

São Luís - MA  
2014

Marques, Fábio Marcelo Ferreira.

Estimativa da temperatura superficial e do saldo de radiação por meio do método SEBAL no entorno da fábrica de alumina da região de Barcarena utilizando imagens de satélite Landsat / Fábio Marcelo Ferreira Marques. — São Luís, 2014.

73 f.

Orientador: Cícero Wellington Brito Bezerra.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, 2014.

1. Temperatura de superfícies terrestre. 2. Saldo de radiação. 3. Método SEBAL. 4. Fábrica de alumina – Barcarena-PA. 5. Imagens do Landsat. I. Título.

CDU 551.525.2(811.5)

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E DO SALDO DE RADIAÇÃO  
POR MEIO DO MÉTODO SEBAL NO ENTORNO DA FÁBRICA DE ALUMINA  
DA REGIÃO DE BARCARENA UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE  
LANDSAT**

**FÁBIO MARCELO FERREIRA MARQUES**

Dissertação aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/ 2014.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Cícero Wellington Brito Bezerra  
Departamento de Química – UFMA - CCET

---

Prof. Dr. Eden Santos Silva  
PPG Engenharia Materiais – IFMA

---

Prof. Dr. Ulisses Magalhães Nascimento  
Departamento de Química – UFMA - CCET

Dedico este trabalho aos meus pais (Marco e Rosário), à minha querida maninha (Flávia, carinhosamente Pipoca) e em especial à minha esposa Werlane Lima dos Anjos Marques, companheira de todas as horas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus Providente e à Maria Santíssima, protetores dos seus filhos amados, pois nos momentos que me parecem difíceis de seguir e conseguir encarar os desafios da vida, a paz e conforto em meu coração são alcançados quando em sintonia e oração.

Agradeço minha eterna namorada, Werlane Lima dos Anjos Marques, hoje minha esposa e companheira de todas as horas: “- Vamos tomar cerveja? – Oba, vamos...; - Vamos à praia? – Oba, vamos...; - Vamos ao cinema? – Oba, vamos...; - Vamos à igreja, - Oba, vamos...”. Comigo ela vai a qualquer lugar, com a mesma alegria de mais de 11 anos de relacionamento, amo-te demais por estar sempre junto de mim.

Agradeço aos meus pais pelo constante carinho, proteção e ensinamento baseado em valores morais, fazendo do menino frágil um verdadeiro homem justo e honesto.

Agradeço o carinho de minha querida irmã, Flávia Marques (Pipoca), pessoa esta que sou fã número 1 pela forma como encara a vida profissional e pessoal. Saudades tenho dos tempos de brincadeira, dos tempos de filosofar sobre a vida, religião, arte, cultura e ciência. Momentos de pura descoberta e compartilhamento dos aprendizados iniciais que a academia, a vida e a leitura nos deram.

Quero agradecer meus talismãs, tio “Tônico” e tia “Linda” pela sorte, ou pelas felizes coincidências, das boas novas que sempre trazem a minha vida quando visitam o Maranhão. Meus sinceros agradecimentos pelo carinho, respeito e admiração que lhes digo que é recíproca.

Tenho que agradecer Priscila, Zé e agora um novo companheiro Wanderley, todos meus violões, que me fazem mais relaxado e feliz quando bate o cansaço do pesado fardo que carregamos diariamente na luta pelo pão; na busca por uma vida digna e para pagar pesadíssimos tributos cobrados pelo nosso governo.

E um agradecimento especial ao meu cunhado Werdson Lima “Décio”, pela ajuda incansável de instalação dos aplicativos para tratamento de imagens, explicações sobre o funcionamento de tecnologias digitais e pela disposição de sempre querer ajudar. Meu chapa, tu és porreta demais! Queria ter metade da tua inteligência e pelo menos 10% da tua energia.

Agradeço à Universidade Federal do Maranhão, pela oportunidade em cursar este mestrado profissional, aos professores doutores que compreenderam a dificuldade em seguir o curso, após transferência para outro estado. Muito obrigado!

Agradeço aos colegas de turma, que compartilharam experiências e se mostraram sempre disponíveis para ajudar a qualquer um que precisasse. Agradecimento especial para minha amiga Joyse Sá, que sempre se preocupou em me manter informado dos assuntos acadêmicos quando eu mais precisei.



*Eu não vim até aqui “pra” desistir agora! Entendo  
você, se você quiser ir embora.*

*(Humberto Gessinger)*

## RESUMO

Muito se discute sobre as contribuições antrópicas para o aumento de temperatura na superfície terrestre e possíveis consequências para processos físicos, químicos e biológicos. Formação de cidades, desmatamento, queima de combustíveis fósseis e a presença de indústrias são apontadas como exemplos de situações que podem contribuir para o aumento de calor. A região de Barcarena-PA é uma área com grande parte constituída por cobertura vegetal, porém conta com complexo industrial, onde se concentram a maior refinaria de alumina do mundo e outras indústrias do ciclo do alumínio, que podem representar aumento de temperatura para a região. Para investigar se tal contribuição é significativa, foram analisadas imagens de satélite Landsat com aplicação de algoritmo SEBAL para mapeamento da temperatura de superfície e do saldo de radiação no entorno do complexo industrial.

Palavras chave: Temperatura de Superfície. Saldo de Radiação. SEBAL.

## **ABSTRACT**

A lot of discussion about anthropogenic contributions to the temperature increase in the earth's surface and possible consequences for physical, chemical and biological processes. Formation of cities, deforestation burning of fossil fuels and the presence of industries are cited as examples of situations that may contribute to the increased heat. The region Barcarena-PA is an area with a significant proportion of vegetation cover, but has industrial complex, which concentrates the largest alumina refinery in the world and other industries of the aluminum cycle, which may represent an increase in temperature for the region. To investigate whether the contribution is significant were analyzed Landsat satellite images by applying SEBAL algorithm for surface temperature mapping and radiation balance that surrounds the industrial complex.

Keywords: Surface Temperature. Radiation balance. SEBAL.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do Saldo de Radiação .....	23
Figura 2: Média mensal de pluviometria de Barcarena.....	27
Figura 3: Localização da Cidade de Barcarena-PA.....	28
Figura 4: Setor alumífero no polo industrial de Barcarena.....	29
Figura 5: Pluviometria e umidade relativa. ....	30
Figura 6: Histórico de temperaturas e umidade relativa do ar.....	30
Figura 7: Localização da estação de monitoramento de Barcarena.....	31
Figura 8: Imagem de satélite do dia 11/09/2001 com grande formação de nuvens identificação da imagem: LE72240612001254CUB00.....	33
Figura 9: Imagem no ERDAS IMAGE, seleção da área a ser analisada.....	35
Figura 10: Método SEBAL construído em planilha Excel.....	46
Figura 11: Histograma Albedo de Superfície em 25/12/2001.....	47
Figura 12: Histograma Albedo de Superfície em 21/05/2003.....	48
Figura 13: Histograma Albedo de Superfície em 06/07/2014.....	48
Figura 14: Emissividade da superfície em 25/12/2001.....	51
Figura 15: Emissividade da superfície em 21/05/2003.....	51
Figura 16: Emissividade da superfície em 06/07/2014.....	52
Figura 17: Temperatura de superfície em 25/12/2001.....	53
Figura 18: Temperatura de superfície em 21/05/2003.....	53
Figura 19: Temperatura de superfície em 06/07/2014.....	54
Figura 20: Mapa de temperatura em 25/12/2001.....	55
Figura 21: Mapa de temperatura em 21/05/2003.....	55
Figura 22: Mapa de temperatura em 06/07/2014.....	56
Figura 23: Temperatura do ar 2001 – 2013.....	57

Figura 24: Saída de radiação de ondas longas em 25/12/2001.....	58
Figura 25: Saída de radiação de ondas longas em 21/05/2003.....	58
Figura 26: Saída de radiação de ondas longas em 06/07/2014.....	59
Figura 27: Saldo de radiação em 25/12/2001.....	60
Figura 28: Saldo de radiação em 21/05/2003.....	60
Figura 29: Saldo de radiação em 06/07/2014.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de imagens de satélite Landsat utilizadas na pesquisa.....	34
Tabela 2 – Lista de imagens utilizadas na pesquisa .....	34
Tabela 3- Valores LMIN e LMAX para Landsat 5 TM.....	38
Tabela 4 - Valores LMIN e LMAX para Landsat 5 TM.....	38
Tabela 5 – Valores de $ESUN_{\lambda}$ para Landsat 5 e 7.....	39
Tabela 6 – Constantes para a equação 19 para cálculos de $T_s$ .....	44
Tabela 7 – Resultados para entrada de Radiação de Ondas Curtas.....	49
Tabela 8 – Resultados para entrada de Radiação de Ondas Longas.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BPF** – Baixo Ponto de Fluidez
- DN** – Digital Number
- DRS** – Depósito de Resíduos Sólidos
- DOY** – Day On Year (dia sequencial do ano)
- dr*** – Distância Terra-Sol
- ESUN $\lambda$***  - Irradiância solar de médio exo-atmosférica
- IAF** – Índice de Área Foliar
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC** - Intergovernmental Panel on Climate Change
- NASA** - National Aeronautics and Space Administration
- NC** – Nível de Cinza
- RC** – Radiação térmica corrigida
- $R_{L\uparrow}$**  - Saída de Ondas Longas
- $R_{L\downarrow}$**  - Entrada de Ondas Longas
- $R_n$**  – Saldo de Radiação de Superfície
- $R_p$**  – Resplendor
- $R_{S\downarrow}$**  - Entrada de Ondas Curtas
- SEBAL** - Surface Energy Balance Algorithms for Land
- SR** – Sensoriamento Remoto
- USGS** - United States Geological Survey

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo Geral.....	19
2.2	Objetivos Específicos .....	19
3	JUSTIFICATIVA .....	20
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
4.1	Considerações sobre o Aquecimento Global.....	21
4.2	Estimativa da Temperatura de Superfície .....	22
4.3	Saldo de Radiação .....	23
4.4	O Método SEBAL .....	24
4.5	Sensoriamento Remoto LANDSAT .....	24
4.6	Características da Região .....	26
5	METODOLOGIA .....	32
5.1	Imagem de satélite .....	32
5.2	Saldo de Radiação na Superfície .....	35
5.2.1.	Albedo de Superfície .....	36
5.2.2.	Entrada de ondas curtas de radiação ( $RS_{\downarrow}$ ).....	40
5.2.3.	Saída Radiação de Onda Longa ( $RL_{\uparrow}$ ).....	41
5.2.4.	Índices de Vegetação .....	41
5.2.5.	Emissividade da Superfície .....	42
5.2.6.	Temperatura da Superfície .....	43
5.3	Entrada de Radiação de Ondas Longas ( $RL_{\downarrow}$ ) .....	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	47
6.1	Albedo de Superfície ( $\alpha$ ).....	47
6.2	Entrada de Radiação de Ondas Curtas ( $Rs_{\downarrow}$ ).....	49
6.3	Entrada de Radiação de Ondas Longas ( $RL_{\downarrow}$ ) .....	50



6.4	Emissividade ( $\epsilon_0$ ) .....	50
6.5	Temperatura de Superfície ( $T_s$ ).....	52
6.6	Saída de Radiação de Ondas Longas ( $RL\uparrow$ ) .....	57
6.7	Saldo de Radiação ( $R_n$ ) .....	59
7	CONCLUSÃO .....	62
	REFERÊNCIAS .....	64

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo vive a necessidade de manter o equilíbrio entre meio ambiente, economia e sociedade, equilíbrio este chamado de Sustentabilidade, definido em 1987 pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas (ONU), sendo: “O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais” (BRUNDTLAND, 1987). Satisfazer as necessidades atuais sem comprometer as necessidades das gerações futura, torna-se então o desafio da humanidade para sua sobrevivência de forma equilibrada no planeta, potencializado pelo rápido crescimento da população mundial, aumentando a necessidade do uso de ocupação do solo, demanda por energia, o consumo de alimentos e de água para diversos fins.

Na busca desse equilíbrio é primordial o conhecimento das alterações e impactos que uma atividade antrópica pode causar ao meio ambiente, bem como sua abrangência. Um dos temas comumente discutidos é a alteração de temperatura que pode impactar em microclima local e em alguns casos no clima global. A alteração de temperatura pode influenciar na vida de animais, desenvolvimento das plantas e causar possíveis problemas em atividades econômicas, como: piscicultura, agropastoril, hortifrutigranjeiros.

Várias transformações que ocorrem na superfície terrestre, como o desmatamento, a construção de barragens, a urbanização, a instalação de indústrias, outras intervenções antrópicas como mudanças do uso e cobertura do solo, podem afetar o microclima de diferentes modos (IDEAO, 2009). Portanto, faz-se necessário distinguir e conhecer os processos básicos das superfícies antes e após as alterações e, em particular, aqueles referentes à quantificação da radiação, principal fonte de aquecimento da superfície.

Mudanças no uso e na cobertura da terra estão entre os principais ocasionadores de uma gama de impactos de ordem ambiental, social e/ou

econômica. Em particular, são relevantes as alterações ambientais relacionadas à condição da temperatura superficial terrestre, devido sua influência no ciclo de umidade e calor na superfície e atmosfera, configurando o sistema hidrológico, terrestre e atmosférico. Interferindo assim, nas características do solo, da vegetação e da própria paisagem de determinado local (NASCIMENTO, SOUSA e OLIVEIRA, 2009).

A construção de cidades, por exemplo, pode apresentar aumento de temperatura local, diferentemente de áreas com cobertura vegetal. Dentro delas, as temperaturas aumentam das periferias em direção ao centro. O uso de grande quantidade de combustíveis fósseis em aquecedores, automóveis e indústrias transformam a cidade em uma potente fonte de calor (LOMBARDO, 1985 *apud* BIAS, BAPTISTA e LOMBARDO 2003). Sendo assim, a temperatura de superfície é de primordial importância para o estudo da climatologia urbana (VOOGT & OKE, 2003).

Os efeitos que surgem a partir das transformações do homem no meio ambiente podem afetar diretamente a população local causando-lhes sensação de desconforto de diversas formas. Alterações essas, causadas no espaço natural pelas cidades, proporcionam a formação de um clima urbano e de vários microclimas urbanos, derivados, principalmente, de diversas alterações no ambiente das cidades: retirada da cobertura vegetal e substituição por áreas construídas; introdução de novas formas no relevo; concentração de edificações, que em conjunto aumentam a rugosidade urbana; concentração de equipamentos e pessoas que através das atividades diárias liberam calor antropogênico na atmosfera aumentando a temperatura do ar; impermeabilização do solo; canalização do escoamento superficial; lançamento concentrado e acumulado de partículas e gases na atmosfera pela combustão dos veículos e indústrias; e produção de energia artificial (MENDONÇA F. A., 1994; SAYDELLES, 2005).

No caso da verificação do fenômeno de calor com a presença de uma indústria de transformação, produção de alumina, além da área de ocupação de suas instalações físicas e demanda por área de deposição de rejeitos sólidos de lama vermelha, temos o efeito adicional da emissão de energia pelos processos de obtenção da Alumina, onde é necessária a queima de combustíveis fósseis, como carvão e óleo BPF, para produção de vapor e aquecimento dos fornos.

Grande parte da energia é absorvida pelo processo e há sempre uma busca contínua da melhoria da eficiência energética da planta industrial, evitando o desperdício que resulta em produtividade e redução no custo de produção. Contudo, ainda assim existe energia residual que é lançada para a atmosfera, seja pela emissão de calor dos equipamentos de processo ou pelo lançamento de energia.

Uma das formas de identificar possíveis alterações de temperatura, abrangência e influência das instalações de uma planta industrial é a utilização de imagens satélites da série Landsat, que possuem sensoriamento remoto da superfície terrestre por meio de sensores termais, que registra de uma forma contínua a porção de radiação refletida e/ou emitida pela superfície da terra e a utilização do Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL). O método permite que as imagens do satélite, tendo seus sinais digitais convertidos em valores de temperaturas para cada ponto (pixel), em diferentes níveis de cinza.

Andrade R. *et. al* (2014) utilizou o método SEBAL analisando imagens da série Landsat para determinar a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, por meio de indicadores de biofísicos, na fazenda Boa Fé, localizada no Triângulo Mineiro, município de Conquista, Minas Gerais. Oliveira *et. al* (2014) avaliou a evapotranspiração real em Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, Sub-bacia do Rio Capibaribe, estado de Pernambuco. Andrade S. e Corrêa (2014) estimaram o saldo de radiação instantâneo à superfície para a cidade de Santarém, Pará, através de imagens do Landsat e do algoritmo SEBAL. Machado *et. al* (2014) utilizou o SEBAL para estimar o balanço de energia no Litoral Sul Pernambucano, avaliando o balanço de energia para diferentes coberturas no solo. Monteiro *et. al* (2014) utilizou o método SEBAL para estimar os componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil, utilizando imagens do Landsat. Wanderley *et. al* (2014) estimou o índice de área foliar e temperatura uma área de eucalipto, utilizando o SEBAL e imagens do Landsat, no município de Santa Rita do Passa Quarto, estado de São Paulo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estimar a temperatura de superfície e o saldo de radiação na região do entorno da fábrica de Alumina da Hydro ALUNORTE, situada em Barcarena-PA, utilizando imagens de sensoriamento remoto da série LAND SAT.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar banco de imagens, a partir dos produtos de sensoriamento remoto termal, de forma a possibilitar a aplicação do método SEBAL;
- Calcular os valores de Albedo e Emissividade da área estudada;
- Comparar as diferentes classes de temperatura e do saldo de radiação com a área de ocupação industrial, urbana e de cobertura vegetal.

### 3 JUSTIFICATIVA

A retirada da vegetação prejudica o poder refletor de determinada superfície (quanto maior a vegetação, maior é o poder refletor) e logo leva a uma maior absorção de calor. A impermeabilização dos solos pelo calçamento e desvio da água por bueiros e galerias reduz o processo de evaporação, e não dissipa o calor (JATOBÁ, RIBEIRO e SOUZA, 2015). Este fenômeno é chamado de Ilhas de Calor que podem causar grande desconforto para a população.

Ilhas de Calor são quantidades de ar quente que se fazem presentes em maior concentração no centro das cidades que sofrem com esse desequilíbrio, caracterizadas como ilha quente localizada (TEZA e BAPTISTA, 2005). Este processo caracteriza-se pelo incremento da temperatura nos centros urbanos em relação às áreas de entorno. Isso pode ser explicado pelo fato de os materiais empregados na construção civil armazenarem calor e das áreas mais adensadas e menos arborizadas tenderem a apresentar temperaturas mais elevadas, mesmo durante a noite (BIAS, BAPTISTA e LOMBARDO, 2003).

A construção de polos industriais assemelha-se a formação de cidades e tem como adicional o lançamento de energia pelo calor dissipado de suas atividades produtivas, no caso dos processos de transformação. Na indústria de fabricação da alumina existe a necessidade de disposição de rejeitos do minério de bauxita ou “lama vermelha” devendo ser depositada em áreas amplas, ampliando o potencial de formação de ilhas de calor.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Considerações sobre o Aquecimento Global

Muito se ouviu falar, nos últimos anos, sobre o fenômeno de aquecimento global (aumento de temperatura no planeta) e sobre as causas que estão associadas a este fenômeno que, na grande maioria, apontam a ação antropogênica como principal responsável pelas modificações climáticas, apesar de não ser um consenso entre especialistas do tema.

O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) afirma que as mudanças climáticas vão afetar a habitação, a saúde humana, a agricultura, os ecossistemas e a segurança da população do planeta. Ninguém está imune aos impactos das mudanças climáticas. Independente de aquecimento ou esfriamento, todas as mudanças afetam a humanidade de modo geral, portanto devemos estar preparados para quaisquer mudanças, seja no aumento da temperatura ou não (MIRANDA e ARAÚJO, 2014).

De acordo com o último relatório do IPCC, que foi divulgado dia 31 de Março de 2014 em Yokohama, no Japão, o aumento global da temperatura tem como origem as atividades humanas, afetando diretamente a biosfera com consequências inevitáveis, pois a ação antropogênica é um fator determinante ao aquecimento, com a formação de ilhas urbanas de calor e aumento de gases do efeito estufa (MIRANDA e ARAÚJO, 2014).

O cientista físico e meteorologista Luiz Carlos Molion é contrário as afirmações do IPCC e apresenta a argumentação de que as mudanças climáticas de ordem global ocorrem por processos naturais, e não pela ação do homem, principalmente pela atividade do Sol e dos oceanos, que constituem a maior proporção em nosso planeta. Em seu artigo, Molion (2007), desmitificando o Aquecimento Global, conclui: a variabilidade natural do Clima não permite afirmar que o aquecimento de  $0,7^{\circ}\text{C}$  seja decorrente da intensificação do efeito-estufa causada pelas atividades humanas, ou mesmo que essa tendência de aquecimento persistirá nas próximas décadas, como sugerem as projeções produzidas pelo Relatório da Quarta Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

(IPCC). A aparente consistência entre os registros históricos e as previsões dos modelos não significa que o aquecimento esteja ocorrendo.

Se por um lado não há consenso sobre as alterações climáticas em escala global, causado pela ação antropogênica, as concentrações e aumento de calor em clima local pode ser consequência do desmatamento e formação de cidades. Sobre superfícies vegetadas, a maior parte do calor é usada para a evapotranspiração, que resfria a superfície, e o restante para aquecer o ar. Com a mudança da cobertura superficial, de campos com vegetação para asfalto e concreto, a evapotranspiração é reduzida e sobra mais calor para aquecer o ar próximo da superfície, aumentando sua temperatura. Esse é o chamado efeito de ilha de calor, que faz as temperaturas do ar serem 3°C a 5°C maior nos grandes centros urbanos quando comparadas às de suas redondezas (MOLION, 2007).

#### **4.2 Estimativa da Temperatura de Superfície**

A temperatura de superfície pode ser estimada a partir das imagens da banda ou canal termal e frequentemente tem sido temas de pesquisas científicas e utilizada em várias aplicações na meteorologia e estudos dos recursos naturais, na análise qualitativa da perda de calor ou da evolução do balanço de calor urbano e, principalmente, na estruturação de modelos de balanço de energia, parâmetros biofísicos e bioclimáticos da superfície. A banda termal, assim como as demais bandas das imagens de satélite, é representada através de uma imagem composta por uma matriz de pixels em tons de cinza. Cada um dos pixels que compõem a imagem tem um número digital (ou DN – número digital de cada pixel) associado. Para a transformação dessa resposta em temperatura de superfície precisa-se utilizar modelos de conversão do DN em valores de temperatura (IDEAO, 2009).

No algoritmo SEBAL a temperatura da superfície é estimada apenas com base em temperatura de brilho e da emissividade sem fazer qualquer consideração aos efeitos atmosféricos. Courault, Seguin e Olioso (2005) apontam como vantagens do SEBAL o fato de não requerer correções atmosféricas no cálculo da temperatura da superfície e sua operacionalidade. Silva B. B., Lopes e Azevedo (2005) fizeram um estudo onde estimaram temperatura de superfície considerando os efeitos atmosféricos. E de acordo com os resultados, a diferença entre a temperatura de



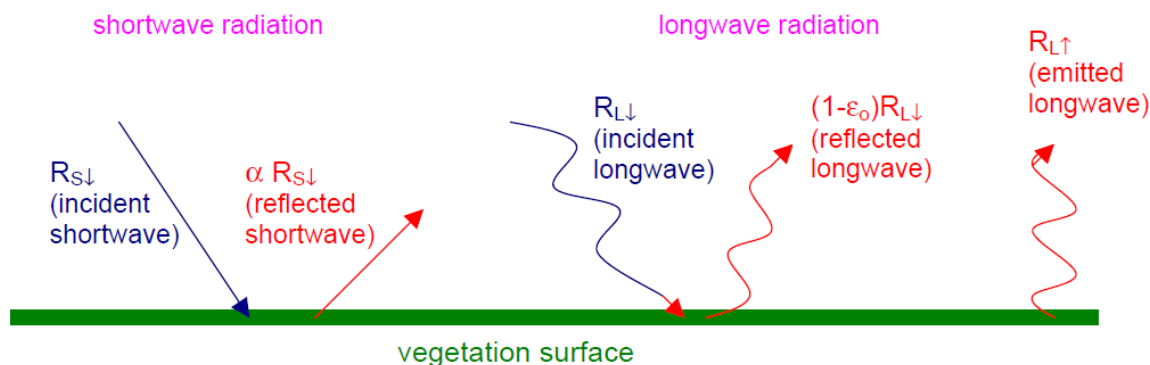
superfície obtida com correção apenas da emissividade e com correções da emissividade e da atmosfera, resulta em diferenças inferiores a 1°C.

### 4.3 Saldo de Radiação

O Sol é a fonte primária dos fluxos de radiação de onda curta, que podem ser divididas entres aquelas que são refletidas pela superfície planetária e aquelas que são provenientes a partir da interação com a atmosfera, já que, ao atravessar a atmosfera, a radiação interage com seus constituintes e, assim, sofre espalhamento, reflexão e absorção. Os fluxos radiantes de energia de onda longa são provenientes dos gases constituintes da atmosfera, das nuvens, das lâminas de água (oceanos, lagos, rios), da biosfera, e da superfície planetária (SOUZA, 2011).

Saldo de Radiação é a designação empregada para indicar a radiação disponível na superfície, em que devem ser consideradas tanto a radiação de onda longa quanto a radiação de onda curta. A diferença entre o fluxo de energia radiante que incide sobre a superfície terrestre e o fluxo de energia por ela emitida e refletida representa a quantidade de energia disponível para os processos de reciclagem de energia: aquecimento da atmosfera, evapotranspiração, aquecimento do solo e da água, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Representação do Saldo de Radiação



Fonte: ALLEN *et al.*, 2002

#### **4.4 O Método SEBAL**

Com o advento cada vez mais frequente das novas tecnologias o sensoriamento remoto vem se tornando um importante aliado ao aprimoramento da gestão e planejamento dos recursos naturais. Atualmente, tem sido desenvolvida uma gama de tecnologias voltadas aos sensores remotos, e o uso de satélites se destaca como uma das mais utilizadas (BATISTA, 2011).

O método SEBAL é um dos mais destacados e vem sendo utilizado por diversos países. Desenvolvido em 1995 por Bastiaanssen *et. al* (1998); Bastiaanssen (2000), trata-se de um algoritmo que promove a parametrização do balanço de energia e fluxos de superfície baseado em alguns dados locais e medições espectrais de satélites (WELIGEPOLAGE, 2005).

A física envolvida no algoritmo do método SEBAL permite o cálculo dos fluxos em superfície para uma ampla gama de usos do solo e calcula o balanço completo de radiação e de energia para cada pixel da imagem de acordo com Allen *et al.*, (2002) sem a necessidade de extensivas medidas de campo, ou seja, com um número reduzido de dados meteorológicos, facilmente obtido segundo Timmermans e Meijerrink (1999).

O método é aplicado para imagens obtidas por meio de satélites Landsat e é importante que a imagem é utilizada estejam com um céu totalmente claro. A presença de nuvens não permite uma avaliação correta do saldo de energia para o local, pois até mesmo uma fina camada de nuvem pode cair consideravelmente as leituras de bandas térmicas e causar grandes erros no cálculo dos fluxos de calor. Portanto, todas as imagens de satélite devem ser cuidadosamente selecionadas para a ocorrência de cobertura de nuvens e, se for encontrado, essas áreas podem ser mascaradas e tratadas individualmente.

#### **4.5 Sensoriamento Remoto LANDSAT**

O Sensoriamento Remoto (SR) é o termo usado para definir a tecnologia que permite o estudo de algumas características de um objeto, sem que, necessariamente, se estabeleça contato com o mesmo. A tecnologia usada nos satélites é um exemplo do sensoriamento remoto, os sensores colocados a bordo

dessas plataformas orbitais são capazes de registrar o nível de radiação eletromagnética refletida e/ou emitida de um determinado local na superfície terrestre (MENDONÇA F., 2003).

As plataformas de SR definem o nível de aquisição dos dados. Esses níveis podem ser orbitais (representados pelas plataformas espaciais, satélites), aéreos (representados pelas aeronaves e helicópteros) e terrestres (representados por torres e sistemas radiométricos de campo) (MOREIRA, 2005). Os satélites podem apresentar uma grande variação quanto ao padrão orbital em relação à Terra. Os que mais interessam para o SR são divididos em duas grandes categorias: os de órbita baixa (os de recursos naturais ou de observação da Terra) e os de órbita alta (os meteorológicos). Estes últimos são os geoestacionários e tem sua maior aplicação no campo da meteorologia (NOVAS, 2008).

Um sistema sensor a bordo de um satélite registra, de uma forma contínua, a radiação refletida e/ou emitida pela porção de superfície da Terra, que está sendo recoberta, e dentro de um campo de visada instantâneo. Desta forma, é gerado um sinal que pode ser registrado por uma antena receptora na Terra, na forma de um sinal analógico (REMPEL, 2000).

Posteriormente este sinal é colocado na forma digital constituindo assim uma imagem digital, sendo esta uma função bidimensional da intensidade de luz refletida ou emitida por uma cena (incluindo-se o efeito atmosférico), representada por  $f(x,y)$ , onde  $f$  correspondente a cada coordenada  $(x,y)$  e dá a intensidade da imagem no ponto. Essa intensidade é numericamente representada na imagem por um valor inteiro, não negativo e finito, chamado de “nível de cinza” (NC) (ou, “digital number” – DN; ou número digital) (Dutra *et al.*, 1981). Estes elementos são os valores de cada pixel (picture element).

Os satélites meteorológicos podem ser classificados de acordo com sua órbita em três diferentes classes: Geoestacionários, Polares e Tropicais. Os satélites de órbita geoestacionária estão localizados a 36.000 km acima da superfície da Terra, permitindo desta forma um monitoramento contínuo dos fenômenos atmosféricos que se desenvolvem na área de visada do satélite (NOVAS, 2008).

A série Landsat, utilizado para SR, representa maior coleção mundial continuamente adquirido de moderada resolução espacial de dados de sensoriamento remoto. As quatro décadas de imagens fornecem um recurso exclusivo para aqueles que trabalham na agricultura, geologia, florestal,

planejamento regional, educação, mapeamento e pesquisa em mudanças globais. O projeto Landsat recebe apoio do governo, comercial, industrial, civil, militar e comunidades educativas em todo os Estados Unidos e no mundo, e é uma iniciativa conjunta entre o U.S. Geological Survey (USGS) e a National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Por mais de um quarto de séculos, Landsat 5 observou as alterações no nosso planeta. Ele gravou o impacto dos riscos naturais, variabilidade e mudanças climáticas, alterações antrópicas, desenvolvimento e urbanização, evolução do ecossistema, a crescente demanda por recursos hídricos e energéticos, e mudando as demandas agrícolas em todo o mundo.

Em 30 de Maio de 2013, os dados do satélite Landsat 8 ficaram disponíveis após ser lançado como a missão de continuidade de dados do Landsat em 11 de fevereiro de 2013. Tal como acontece com as parcerias anteriores, esta missão continua a aquisição de dados de alta qualidade que atendam aos requisitos científicos e operacionais da NASA e USGS para observar o uso da terra.

#### **4.6 Características da Região**

Barcarena é um município brasileiro do estado do Pará que se localiza a uma latitude 01° 30' 21" Sul e a uma longitude 48° 37' 33" Oeste, estando a uma altitude de 15 metros em relação do nível do mar. Segundo o IBGE, área territorial de 1.310.336 km<sup>2</sup> e sua população está estimada em 109.975 habitantes<sup>1</sup>.

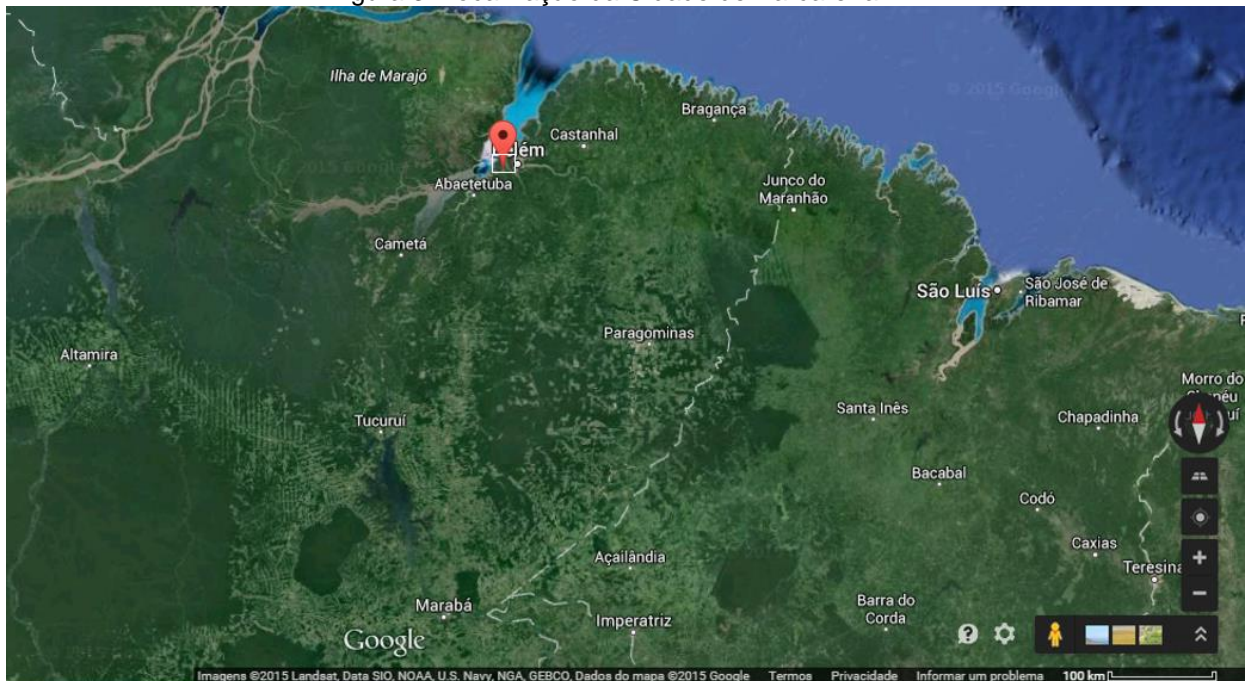
A região de Barcarena possui o clima quente e úmido, clima de floresta tropical úmida, e ocorrência de precipitação durante todo o ano sem variação sensível entre as estações, proporcionando muita instabilidade atmosférica, com forte convecção e precipitação. A precipitação distribui-se por um período chuvoso iniciado em Dezembro até o mês de Maio, por um período de transição envolvendo os meses de Junho, Julho e Agosto e um período menos chuvoso que vai de Setembro a Novembro, a Figura 2 confirma a precipitação de maior intensidade da região, entre os meses Dezembro a Maio, dados entre os anos de 2001 a 2013.

---

<sup>1</sup> Característica da Região. Disponível em <[www.barcarena.pa.gov.br/index.php/barcarena/geografia.html](http://www.barcarena.pa.gov.br/index.php/barcarena/geografia.html)> Acesso em: março 2014.



Figura 3: Localização da Cidade de Barcarena-PA



Fonte: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

As indústrias de produção de Alumina e Alumínio, Hydro Alunorte e Albrás, respectivamente, que fazem parte do complexo industrial de alumínio de Barcarena, demonstrado na Figura 4. A Alunorte tem capacidade de produção de 6,3 milhões de toneladas de alumina/ano, sendo a maior fábrica de produção de Alumina do Mundo. Parte da alumina é destinada para a Albrás que, por meio do processo de Redução,



transforma a alumina em alumínio, sua produção anual é em torno de 400 mil toneladas de alumínio por ano. Outras indústrias formam o complexo industrial de Barcarena que ainda conta com beneficiamento de caulim e produção de cabos para transmissão de energia elétrica. Além das indústrias, o polo industrial conta com o Porto de Vila do Conde por onde são realizadas as movimentações de bauxita, exportação de alumina e importação de coque e piche e carga geral, arrendado berço interno 102 para Alunorte; carga e descarga de navios contendo containers; possui Terminal de Graneis Líquidos (TGL) para descarga de navios com soda cáustica e óleo combustível.

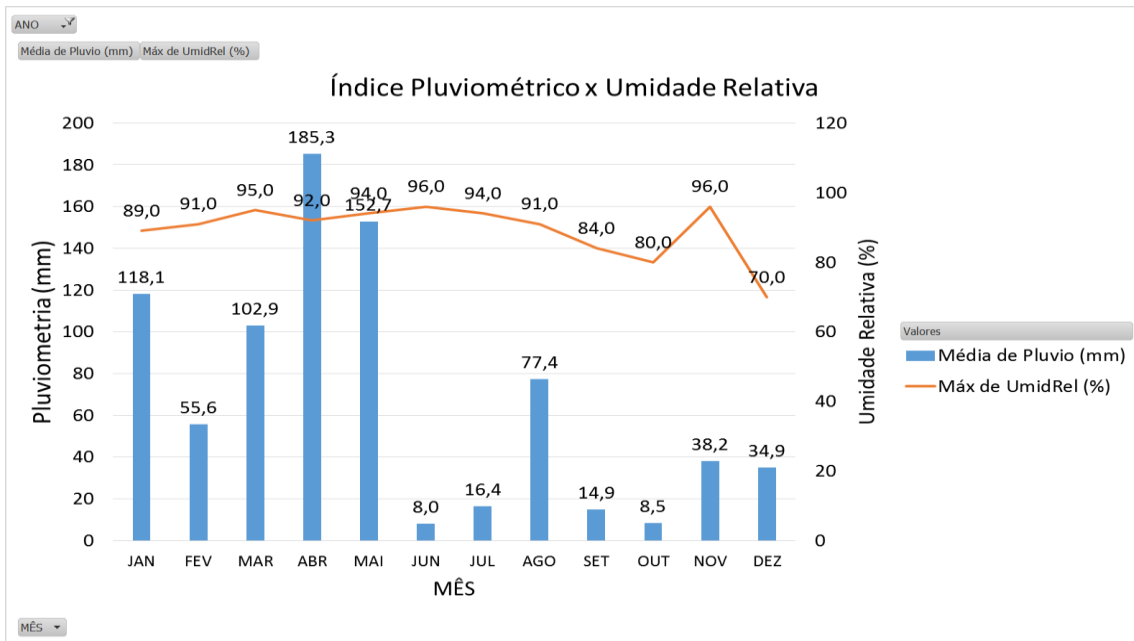
Figura 4: Setor alumífero no polo industrial de Barcarena.



Fonte: <https://www.google.com/maps>

A umidade relativa é comumente alta e tende a cair sempre nos períodos menos chuvosos do ano, ainda assim mantendo-se com grande quantidade de água no ar (valores máximos), como ilustra a Figura 5 para as médias pluviometria e umidade relativa no período de 2001 a 2013.

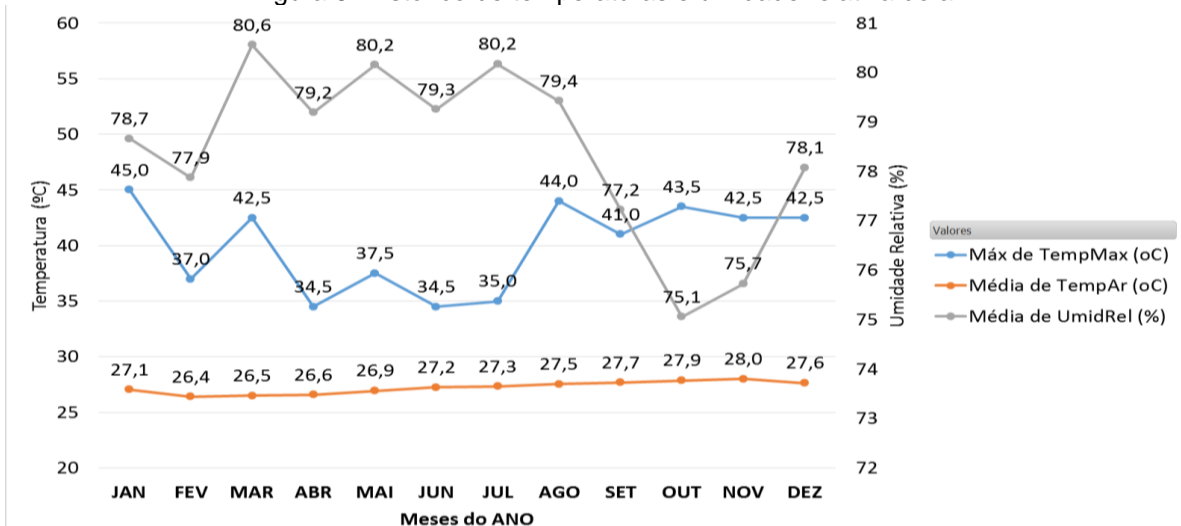
Figura 5: Pluviometria e umidade relativa.



Fonte: Dados do INPE.

Com base na Figura 6, pode-se perceber a redução da média de umidade relativa para os meses de Agosto a Novembro, quando há o período menos chuvoso. Contudo, a temperatura média da região se mantém estável com valores aproximados de 27°C, com valores máximos de até 45°C.

Figura 6: Histórico de temperaturas e umidade relativa do ar.



Fonte: Dados do INPE.



Os dados meteorológicos apresentados foram extraídos do INPE, estação de monitoramento atmosférico código: 32262; Longitude: 48,78°; Latitude: 1,54°, localizado na cidade sede de Barcarena, conforme Figura 7. O equipamento registra dados meteorológicos a cada 3 horas, assim os dados utilizados são registrados 00h:00; 03h:00; 06h:00; 09h:00; 12h:00; 15h:00; 18h:00 e 21h:00.

Figura 7: Localização da estação de monitoramento de Barcarena.



Fonte: <https://www.google.com/maps>

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Imagem de satélite

Imagens do satélite são criados com um arquivo de cabeçalho associado. O arquivo de cabeçalho para a imagem de satélite é relativamente pequeno arquivo que contém informações importantes para o processo de SEBAL. As seguintes informações foram obtidas a partir do arquivo de cabeçalho para a entrada no SEBAL:

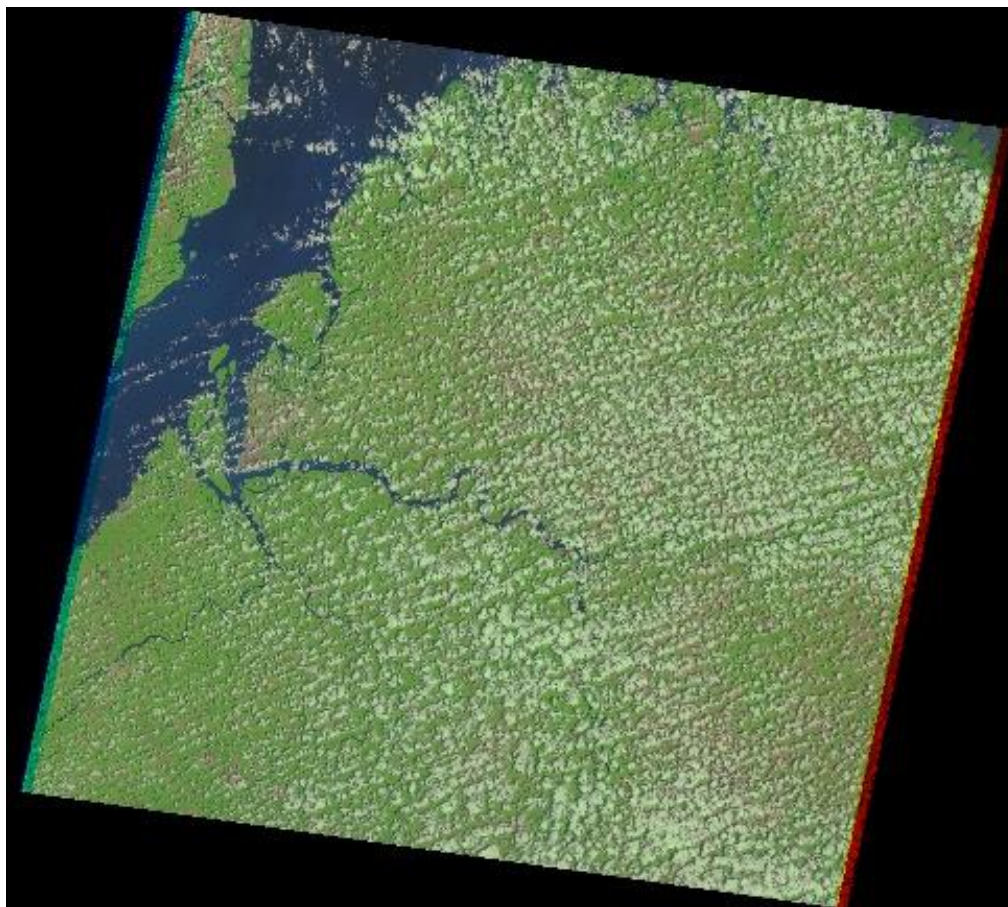
- A data e a hora passagem do satélite;
- A latitude e longitude do centro da imagem;
- O ângulo de elevação do Sol ( $\beta$ ) no momento viaduto;
- Ganho e perdas de polarização para cada banda.

Para Landsat 7, o arquivo de cabeçalho inclui os ganhos e perdas para as bandas 1-5 e 7. Estes parâmetros são usados para converter os números digitais (DN) nos arquivos originais em unidades de energia.

Foram efetuados os downloads de imagens na órbita no ponto e órbita, 223 e 61 respectivamente, esta localização de ponto e órbita consegue atingir com satisfação a área estudada. As imagens estão listadas no Anexo I – Imagens de Satélite da série Landsat para a região de Barcarena-PA.

A pesquisa de imagens pode ser realizada utilizando coordenadas geográficas, ou simplesmente pela formação de losango da área de interesse, com clique diretamente sobre o mapa, delimitando a região. As imagens selecionadas, conforme metodologia SEBAL, precisam estar livres de nuvens para que possam ser analisadas e não mascarar as informações de DN no cálculo de albedo, emissividade, temperatura e saldo de radiação para cada pixel. Este pré-requisito para seleção de imagens foi o grande obstáculo da pesquisa, visto que a região amazônica possui grande precipitação e, portanto, a formação de nuvens é comumente observada nas imagens digitais, conforme exemplo ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Imagem de satélite do dia 11/09/2001 com grande formação de nuvens, identificação da imagem: LE72240612001254CUB00.



Fonte: USGS

A Tabela 1 apresenta uma lista inicial de imagens, previamente selecionadas de mais de 300 imagens registradas pelo satélite. Ainda assim, uma verificação mais detalhada da região de interesse foi efetuada para que se chegassem as imagens mais adequadas para o estudo, de forma que possibilitasse a formação de resultados mais precisos da pesquisa.

Tabela 1 – Lista de Imagens de satélite Landsat utilizadas na pesquisa.

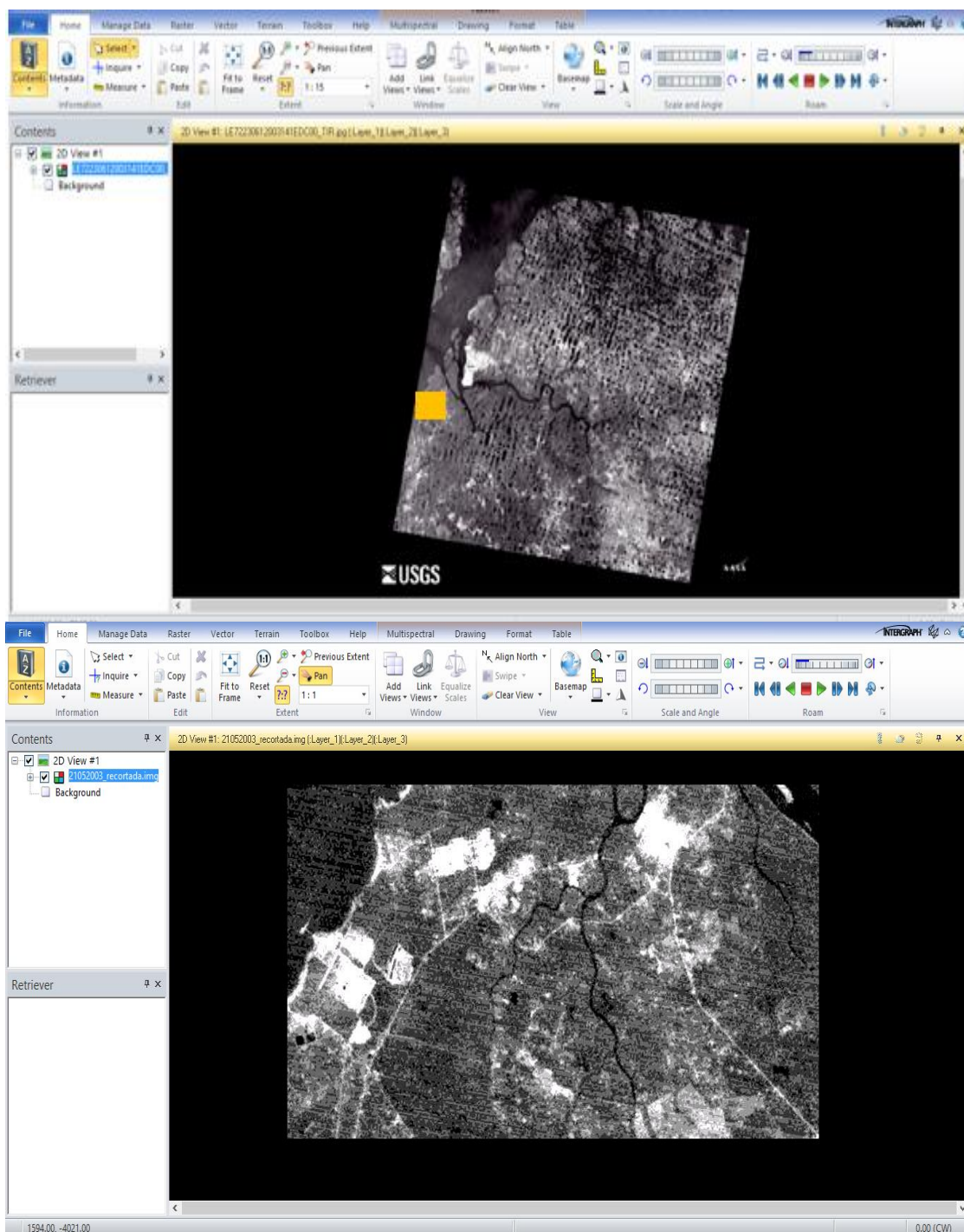
<b>Data</b>	<b>Identificação da Imagem</b>
08/09/2000	LE72240612000252EDC00
18/07/2001	LE72230612001199PFS00
03/08/2001	LE72230612001215EDC00
11/09/2001	LE72240612001254CUB00
22/10/2001	LE72230612001295EDC00
11/09/2001	LE72240612001254CUB00
25/12/2001	LE72230612001359EDC00
07/02/2002	LE72230612002250AGS00
18/02/2002	LE72240612002049EDC00
10/06/2002	LE72240612001254CUB00
26/06/2002	LE72240612002177CUB00
05/07/2002	LE72230612002186EDC00
07/09/2002	LE72230612002330EDC00
26/11/2002	LE72230612002330EDC00
21/05/2003	LE72230612003141EDC00
06/07/2014	LE72230612014187CUB00

Neste trabalho foram analisadas 3 imagens satélites para a região de Barcarena. Infelizmente, a grande formação de nuvens na região, não permitiu que mais imagens fossem utilizadas neste trabalho, e foi a principal dificuldade na seleção e, conseqüentemente, no desenvolvimento da pesquisa. A Tabela 2 apresenta informações iniciais para calcular os perfis de temperatura da região. Na Figura 9 é apresentado uma demonstração do tratamento da imagem utilizada ilustrando o “antes” e o “depois”, utilizando para os dados de DN apenas a área a ser estudada.

Tabela 2 – Lista de imagens utilizadas na pesquisa

<b>DATA</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO</b>
25/12/2001	LE72230612001359EDC00
21/05/2003	LE72230612003141EDC00
06/07/2014	LE72230612014187CUB00

Figura 9: Imagem no ERDAS IMAGE, seleção da área a ser analisada.



## 5.2 Saldo de Radiação na Superfície

O fluxo de radiação líquida da superfície ( $R_n$ ), ou saldo de radiação, é quantidade real de energia disponível na superfície e é calculado subtraindo-se todos os fluxos de saída de todos os fluxos radiantes de entrada, conforme a equação 1.



$$Rn = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow}$$

1)

Onde,  $\alpha$  representa o Albedo de Superfície (adimensional);  $R_{S\downarrow}$  a entrada de ondas curtas ( $W/m^2$ );  $R_{L\uparrow}$  a saída de ondas longas ( $W/m^2$ );  $R_{L\downarrow}$  a entrada de ondas longas ( $W/m^2$ ) e  $\epsilon_0$  é emissividade da superfície (adimensional).

Na Equação 1, a quantidade de radiação de ondas curtas ( $R_{S\downarrow}$ ) que permanece disponível na superfície é uma função do albedo de superfície ( $\alpha$ ). Superfície albedo é um coeficiente de reflexão definidos como a razão entre a intensidade de radiação refletida para o fluxo radiante incidente sobre o espectro solar. Ele é calculado usando a informação de imagem de satélite em radiância espectral para cada banda de satélite. A radiação de onda curta de entrada ( $R_{S\downarrow}$ ) é calculado usando a constante solar, o ângulo de incidência solar, a distância Terra-Sol relativa, e uma transmissividade atmosférica computadorizada. A radiação de onda longa de entrada ( $R_{L\downarrow}$ ) é calculado usando a equação de Stefan-Boltzmann modificada com transmissividade atmosférica e uma temperatura de referência da superfície selecionada. Radiação de Onda Longa ( $R_{L\uparrow}$ ) é calculado usando a equação de Stefan-Boltzmann com a emissividade da superfície calculada e temperatura da superfície. As temperaturas de superfície são calculadas a partir de informações de satélite imagem em radiância térmica.

O saldo de radiação exerce um papel fundamental nos processos de troca de calor e massa na baixa troposfera, uma vez que constitui no principal responsável pelo aquecimento do solo, do ar e, principalmente, pela evapotranspiração da vegetação nativa e das culturas (SILVA, B., LOPES e AZEVEDO, 2005).

### 5.2.1. Albedo de Superfície

Para a determinação do saldo de radiação, especialmente em escala regional, faz-se necessário o conhecimento do albedo, também muito importante nos estudos de mudança climática, desertificação, queimadas e meio ambiente em geral (SILVA, B., LOPES e AZEVEDO, 2005).

O albedo da superfície é um parâmetro biofísico cuja variação ocorre com o tipo de alvo sobre o qual incide a radiação eletromagnética e variações deste parâmetro são excelentes indicadores de mudanças no cenário de uma bacia hidrográfica (SILVA, J., RYLANDS, FONSECA, 2005). É a fração da radiação solar incidente que é refletida de volta por um corpo. O albedo do planeta Terra é a fração entre a radiação refletida para o espaço exterior e a radiação solar incidente. O seu valor depende das condições de superfície e atmosférica. Por exemplo, os maiores valores são encontrados na situação de céu coberto por nuvens (BARUEL e VEISSID, 2010).

No método SEBAL é calculado conforme apresentado na equação 2 e seguindo os passos a seguir.

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

Onde,  $\alpha_{toa}$  é o albedo do topo da atmosfera;  $\alpha_{path\_radiance}$  é a porção média da radiação solar que chega através de todas as bandas que é dispersa de volta para o satélite antes de atingir a superfície da Terra, os valores de  $\alpha_{path\_radiance}$  estão entre 0,025 e 0,04 e para SEBAL é recomendado um valor de 0,03 (ALLEN *et al.*, 2002), e é o  $\tau_{sw}$  transmissividade atmosférica.

Para se chegar aos valores de albedo da superfície para cada píxel da imagem, é necessário calcular seguindo a sequência abaixo a determinação das variáveis: Radiância espectral para cada banda ( $L\lambda$ ); Reflectividade para cada banda ( $\rho\lambda$ ); Albedo do topo da Atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ), além da transmissividade, já citada na equação 2.

A radiância espectral para cada banda ( $L\lambda$ ) é calculado como a energia de radiação de saída da banda observada no topo da atmosfera pelo satélite. Ele é calculado usando a seguinte equação dada para Landsat 5 e 7:

Para Landsat 5:

$$L\lambda = \left( \frac{LMAX - LMIN}{255} \right) \times DN + LMIN \quad (3)$$

Onde, DN: Número digital de cada píxel; LMAX & LMIN; Constantes de Calibração, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Valores LMIN e LMAX para Landsat 5 TM

Banda	Band Number depois de 15 jan 1984		Band Number para 2000	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
1	-1,500	152,1	-1,765	178,941
2	-2,800	296,8	-3,576	379,055
3	-1,200	204,3	-1,502	255,695
4	-1,500	206,2	-1,763	242,303
5	-0,370	27,19	-0,411	30,178
6	1,238	15,6	1,238	15,6
7	-0,150	14,38	-0,137	13,156

Fonte: SEBAL

Para Landsat 7:

$$L\lambda = (Gain \times DN) + Bias \quad (4)$$

Gain (Ganho) e Bias (Perda), estão disponíveis no cabeçalho da imagem do satélite, como citado no item 2.1. Contudo, quando o cabeçalho não apresenta as informações de ganho e perda, utiliza-se a equação geral (5) utilizando as informações das constantes de calibração para Landsat 7, conforme Tabela 3.

$$\left( \frac{LMAX - LMIN}{QCALMAX - QCALMIN} \right) \times (DN - QCALMIN) + LMIN \quad (5)$$

Tabela 4 - Valores LMIN e LMAX para Landsat 5 TM

Band Number	Antes de 1 de julho de 2000				Depois de 1 de julho de 2000			
	Low Gain		High Gain		Low Gain		High Gain	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
1	-6,20	297,50	-6,20	194,30	-6,20	293,70	-6,20	191,60
2	-6,00	303,40	-6,00	202,40	-6,40	300,90	-6,40	196,50
3	-4,50	235,50	-4,50	158,60	-5,00	234,40	-5,00	152,90
4	-4,50	235,00	-4,50	157,50	-5,10	241,10	-5,10	157,40
5	-1,00	47,70	-1,00	31,76	-1,00	47,57	-1,00	31,06
6	0,00	17,04	3,20	12,65	0,00	17,04	3,20	12,65
7	-0,35	16,60	-0,35	10,93	-0,35	16,54	-0,35	10,80
8	-5,00	244,00	-5,00	158,40	-4,70	243,10	-4,70	158,30

Fonte: SEBAL



A refletividade para cada banda ( $\rho\lambda$ ) é definida como a razão entre o fluxo de radiação refletida para o fluxo de radiação incidente. Ele é calculado usando a equação 6.

$$\rho\lambda = \frac{(\pi \cdot L\lambda)}{(ESUN\lambda \cdot \cos\theta \cdot dr)} \quad (6)$$

Onde,  $L\lambda$  é a radiância espectral para cada banda,  $ESUN\lambda$  é a irradiância solar de médio exo-atmosférica para cada banda ( $W/m^2/\mu m$ ), valores para  $ESUN\lambda$  são apresentados na Tabela 5. O  $\cos\theta$  é o cosseno do ângulo de incidência solar (a partir de nadir), cosseno de  $\theta$  é calculado usando os dados do arquivo de cabeçalho no ângulo de elevação do Sol ( $\beta$ ), onde  $\theta = (900 - \beta) \theta$ .  $dr$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e é calculado conforme apresentado na equação 7.

Tabela 5 – Valores de  $ESUN\lambda$  para Landsat 5 e 7.

Satélite	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7
Landsat 5	1957	1829	1557	1947	219,3	0	74,52
Landsat 7	1969	1840	1551	1044	225,7	0	82,07

Fonte: SEBAL

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left\{DOY \cdot \left[\frac{2\pi}{365}\right]\right\} \quad (7)$$

Onde, DOY é o dia sequencial do ano (neste trabalho calculado em planilha Excel, com base na data disponível no cabeçalho da imagem), e o ângulo ( $DOY \times 2\pi/365$ ) é em radianos. Os valores de  $dr$  variam entre 0,97 (quando o periélio que é o ponto de trajetória do planeta Terra que está mais próximo do sol) e 1,03 (que corresponde a maior distância do planeta Terra em relação ao sol, afélio). A unidade de medida de  $dr$  é a unidade astronômica (ua).

O albedo do topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ) deve ser determinado conforme equação 8, este é obtido efetuando-se o somatório do produto entre o coeficiente de ponderação para cada banda e a refletância calculada na equação 6.

$$\alpha_{toa} = \sum (\omega\lambda X \rho\lambda) \quad (8)$$

Onde,  $\rho\lambda$  é a refletividade calculado na etapa 2 e  $\omega\lambda$  é um coeficiente de ponderação para cada banda, obtido conforme a equação 9, e utilizando os dados disponíveis na Tabela 5, conforme a imagem de satélite obtida.

$$\omega\lambda = \frac{ESUN\lambda}{\sum ESUN\lambda} \quad (9)$$

A transmissividade atmosférica ( $T_{sw}$ ) é definido como a fração da radiação incidente que é transmitida pela atmosfera e que representa os efeitos de absorção e reflexão ocorre no interior da atmosfera.  $T_{sw}$  inclui transmissibilidade de tanto radiação solar direta e difusa (espalhadas) de radiação à superfície, a equação 10 define o cálculo para obter a transmissividade.

$$T_{sw} = 0,75 + 2.10^{-5} (Z) \quad (10)$$

Onde,  $z$  é a elevação acima do nível do mar (m). Essa elevação deve representar melhor a área de interesse, tais como a elevação da estação meteorológica relevante.

O albedo da superfície para todos os pixels foi calculado preparando planilha Excel com base nas informações formuladas pelo método SEBAL e em seguida as imagens foram classificadas no ERDAS IMAGINE 2014 para representar as classes de Albedo para a imagem escolhida da série Landsat.

### 5.2.2. Entrada de ondas curtas de radiação ( $RS\downarrow$ )

Radiação de ondas curtas de entrada é o fluxo de radiação solar direta e difusa que realmente atinge a superfície da Terra ( $W/m^2$ ). Calcula-se, assumindo condições de céu claro, como uma constante para o tempo imagem usando a equação 11.

$$Rs\downarrow = G_{sc} . \cos\theta . dr . T_{sw} \quad (11)$$

Onde,  $G_{sc}$  é a constante solar ( $1367 W/m^2$ ) valor que pode variar 0,3% a cada ciclo solar de 11 anos,  $\cos \theta$  é o cosseno do ângulo de incidência solar como já

informado na equação 6 para o cálculo de refletância,  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância Terra-Sol relativa (apresentado na equação 7) e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica (apresentado na equação 10). Os valores de  $R_{s\downarrow}$  podem variar de 200 - 1000 W/m<sup>2</sup>, dependendo do tempo e da localização da imagem.

### 5.2.3. Saída Radiação de Onda Longa ( $RL \uparrow$ )

A radiação de onda longa ( $RL \uparrow$ ) é o fluxo de radiação térmica emitida a partir da superfície da Terra para a atmosfera (W/m<sup>2</sup>). Ele é calculado em SEBAL através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); Solo Ajustado Vegetação Index (SAVI) e Índice de Área Foliar (IAF). Além disso, é necessário que sejam calculados a Emissividade da Superfície ( $\epsilon_0$ ) e a Temperatura da Superfície ( $T_s$ ).

### 5.2.4. Índices de Vegetação

O NDVI é a razão das diferenças de refletividade para a banda do infravermelho próximo ( $\rho_4$ ) e a banda vermelha ( $\rho_3$ ), calculado conforme apresentado na equação 12.

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (12)$$

Onde,  $\rho_4$  e  $\rho_3$  são refletividade para as bandas 4 e 3 e são encontrados a partir da equação 6. O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Os valores para a faixa de NDVI podem variar entre -1 e +1. Superfícies verdes têm um NDVI entre 0 e 1 e água e nuvem são geralmente menos de zero.

O SAVI é um índice que tenta "subtrair" os efeitos de fundo solo de NDVI para que impactos da umidade do solo são reduzidos no índice. É calculado de acordo com a equação 13.

$$SAVI = \frac{(1 + L) \cdot (\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (13)$$

Onde,  $L$  é uma constante para SAVI. Se  $L$  é igual a zero, SAVI torna-se igual a NDVI. Um valor de 0,5 frequentemente aparece na literatura de  $L$ .

O LAI é a razão da área total de todas as folhas de uma planta para a área do solo representado pela planta. É um indicador da biomassa e apresentado conforme a equação 14.

$$LAI = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (14)$$

Onde, SAVI é o índice apresentado na equação 13.

### 5.2.5. Emissividade da Superfície

Emissividade da superfície ( $\epsilon_0$ ) é a razão entre a energia térmica irradiada pela superfície com a energia térmica irradiada por um corpo negro à mesma temperatura. Dois valores de emissividade de superfície são usados em SEBAL. A primeira é uma emissividade representando o comportamento da superfície de emissão térmica no intervalo relativamente estreito da banda 6 Landsat (10,4-12,5 mm), expressa como  $\epsilon_{NB}$ . A segunda é uma emissividade que representa o comportamento da superfície de emissão térmica no largo espectro térmico (6-14 mm), expressa como  $\epsilon_0$ .  $\epsilon_{NB}$  é utilizado no cálculo da temperatura de superfície ( $T_s$ ) e  $\epsilon_0$  é usado mais tarde para calcular emissão total de radiação de comprimento de onda a partir da superfície.

As emissividades de superfície são calculadas em função do resultado de LAI calculado conforme equação 14. De acordo com o resultado de LAI utiliza-se a equação 15 ou 16.

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 LAI \quad , \text{ para } LAI < 3 \quad (15)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 LAI \quad , \text{ para } LAI < 3 \quad (16)$$

Quando LAI for maior ou igual a 3, então os valores a serem computados para emissividade são:  $\epsilon_{NB} = 0.98$  e  $\epsilon_0 = 0.98$ .

### 5.2.6. Temperatura da Superfície

Segundo Gusso, Fontana e Gonçalves (2007), a temperatura da superfície terrestre (TST) “é determinada a partir da detecção da radiação de ondas longas emitidas na faixa do infravermelho e detectada por sensores orbitais”, sendo um parâmetro físico que diz respeito ao fluxo de calor dado em função do balanço de radiação que chega e que sai de um corpo (AYOADE, 2001).

A temperatura de superfície é calculada para cada pixel da imagem considerando a radiação Radiação térmica corrigida ( $R_c$ ) que é obtida por meio da equação 17.

$$R_c = \frac{L6 - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB})R_{sky} \quad (17)$$

Onde,  $L6$  é a radiância espectral da banda 6 do, apresentado nas equações 3, 4 e 5,  $R_p$  é o resplendor caminho na 10,4 - 12,5 mm banda ( $W/m^2/sr/\mu m$ ),  $R_{sky}$  é a banda estreita para baixo térmica radiação para um céu claro ( $W/m^2/sr/\mu m$ ) e  $\tau_{NB}$  é a transmissibilidade estreita banda de ar (10,4-12,5 mm). Unidades para  $R_c$  são  $W/m^2/sr/\mu m$ .

A radiação térmica corrigida ( $R_c$ ) é a radiância real emitida a partir da superfície enquanto que  $L6$  é a radiância do satélite que "vê". Entre a superfície e o satélite duas coisas ocorrem: em primeiro lugar, uma parte da radiação emitida é interceptada pela atmosfera (transmissividade), em segundo lugar, algumas radiações térmicas são emitidas pela atmosfera na direção do satélite (caminho brilho) e do satélite que esta é a partir da superfície e é confundido como sendo emitida a partir da superfície.

Valores para  $R_p$  e  $\tau_{NB}$  requerem a utilização de um modelo de simulação de transferência de radiação atmosférica, tais como perfis de radiossonda MODTRAN e representando a imagem. Na ausência de valores para estes termos, podem ser ignoradas pela configuração  $R_p = 0$  e  $\tau_{NB} = 1$  e o termo  $R_{sky}$  também pode ser ignorada, definindo  $R_{sky} = 0$ . Isto converte  $R_c$  em um brilho não corrigido ( $L6$ ). Felizmente, os efeitos dos três parâmetros de  $R_c$  são amplamente auto-

cancelamento. No entanto, o resultado de qualquer correção para L6 será uma subestimação geral de temperatura da superfície (Ts) de até cerca de 5 °C por porções mais quentes de uma imagem. O termo Rsky é pequeno o suficiente para que ele provavelmente possa ser ignorado o tempo todo. Se calculada, pode ser baseada em um modelo Idso-Jackson de fórmula empírica como aplicado por Wukelic *et al.* (1989) *apud.* Souza e Silva B. B., (2005), aqui representado pela equação 18.

$$Rsky = (1,807 \cdot 10^{-10})Ta^4\{1 - 0,26 \exp[-7,77 \cdot 10^{-4}(273,15 - Ta)^2]\} \quad (18)$$

Onde, Ta é a temperatura do ar na superfície perto no momento da imagem (K).

Pode-se então, por fim, calcular a temperatura de superfície para cada pixel da imagem, podendo ser formado um mapa de cores com as classes de temperaturas identificadas. A equação 19 deverá ser utilizada para calcular a temperatura de cada pixel.

$$Ts = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\epsilon NB \cdot K1}{Rc} + 1\right)} \quad (19)$$

Onde, Rc é o resplendor térmica corrigido a partir da superfície usando a equação 17. K1 e K2 são constantes para as imagens Landsat, conforme Tabela 6. Unidades de Rc deve ser o mesmo que aqueles para K1.

Tabela 6 – Constantes para a equação 19 para cálculos de Ts (Markham and Barker, 1986)

Satélite	K1	K2
Landsat5 TM Band6	607,76	1260,56
Landsat7 ETM+ Band6	666,09	1282,71

Fonte: SEBAL

A Radiação de Onda Longa (RL<sub>L</sub>) é calculado considerando a equação 16 que determina o valor de emissividade. Isto é calculado usando a equação de Stefan-Boltzmann, conforme equação 20.

$$RL \uparrow = \varepsilon \sigma . T_s^4 \quad (20)$$

Onde,  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície "banda larga" (adimensional),  $\sigma$  é a constante Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ), e  $T_s$  é a temperatura da superfície (K), calculado na equação 19.

### 5.3 Entrada de Radiação de Ondas Longas ( $RL \downarrow$ )

$$RL \downarrow = [0,85 . (-\ln \tau_{sw})^{0,09}] . \sigma . T_{cold}^4 \quad (21)$$

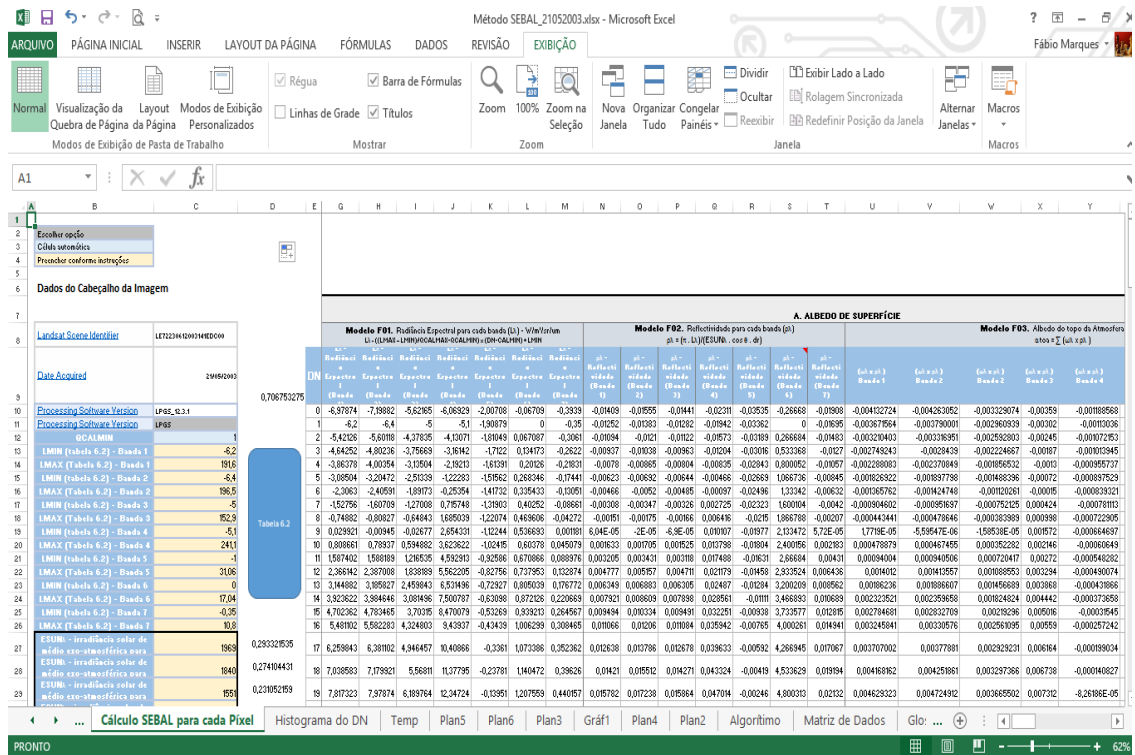
Onde,  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica calculados a partir da Equação 10. E a temperatura  $T_{cold}$  representa um pixel "ancora" chamado de pixel frio, onde é caracterizado por estar em área de interesse da pesquisa onde é caracterizado por ser uma região úmida, ou de irrigação.

Este cálculo é feito usando uma planilha ou calculadora. Os valores de  $RL \downarrow$  pode variar 200-500  $\text{W/m}^2$ , dependendo da localização e do tempo de imagem. Algumas estações meteorológicas automáticas incluem um radiômetro que mede toda a radiação de ondas longas e curtas de entrada e saída. Dados  $RL \downarrow$  medidos podem ser utilizados para verificar valores computados.

O saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) é agora calculada usando a Equação 1, utilizando as variáveis Albedo de Superfície (equação 2); Entrada de ondas curtas (equação 11); Saída de ondas longas (equação 20); e entrada de ondas longas (equação 21).

Todos os cálculos foram efetuados em planilha Excel, conforme ilustrado na Figura 10, utilizando-se as equações definidas no SEBAL e com base nas informações do cabeçalho da imagem. Em seguida o ERDAS IMAGINE foi utilizado para a definição das classes de acordo com os resultados obtidos em planilha eletrônica.

Figura 10: Método SEBAL construído em planilha Excel.



Os dados obtidos na planilha foram estratificados, conforme histogramas de DN das imagens para que se possa verificar a distribuição de classes de albedo, emissividade, temperatura e saldo de energia. Para isso foi necessário utilizar o ERDAS IMAGE para que as imagens de satélite fossem avaliadas conforme área de interesse.

No ERDAS IMAGINE as áreas de interesse foram definidas e do aplicativo foram verificados os histogramas de cada “nova” imagem para identificação do número de eventos para cada DN. A correlação do número de eventos foi estabelecida para os valores calculados na planilha Excel para formação das classes.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Albedo de Superfície ( $\alpha$ )

O albedo foi calculado segundo a equação 2, sendo considerado os valores do albedo do topo da atmosfera e da transmissividade atmosférica. Os resultados são apresentados em histogramas que mostram o aumento no valor de albedo para os períodos analisados. A área analisada constitui-se de áreas de vegetação densa, mas com presença significativa de ocupação urbana e complexo industrial da cadeia do alumínio e por isso a grande incidência da redução da cobertura vegetal, verificado na Figura 3. Estas áreas de ocupação impactam significativamente no aumento da porção de radiação solar refletiva para a atmosfera, ao contrário, as áreas com presença de cobertura vegetal absorvem mais a energia solar.

Os valores calculados para os dias 25/12/2001, 21/05/2003 e 06/07/2014 tiveram modas, apresentados nos histogramas, de 0,38 – 0,55 e 0,60 – respectivamente, conforme indicado nas Figuras 11,12 e 13 – e mostram o aumento de albedo ao longo dos anos, principalmente entre os anos de 2001 e 2003 que pode ser explicado pelo crescimento urbano, de forma desordenada, das comunidades periféricas da cidade de Barcarena.



Figura 12: Histograma Albedo de Superfície em 21/05/2003

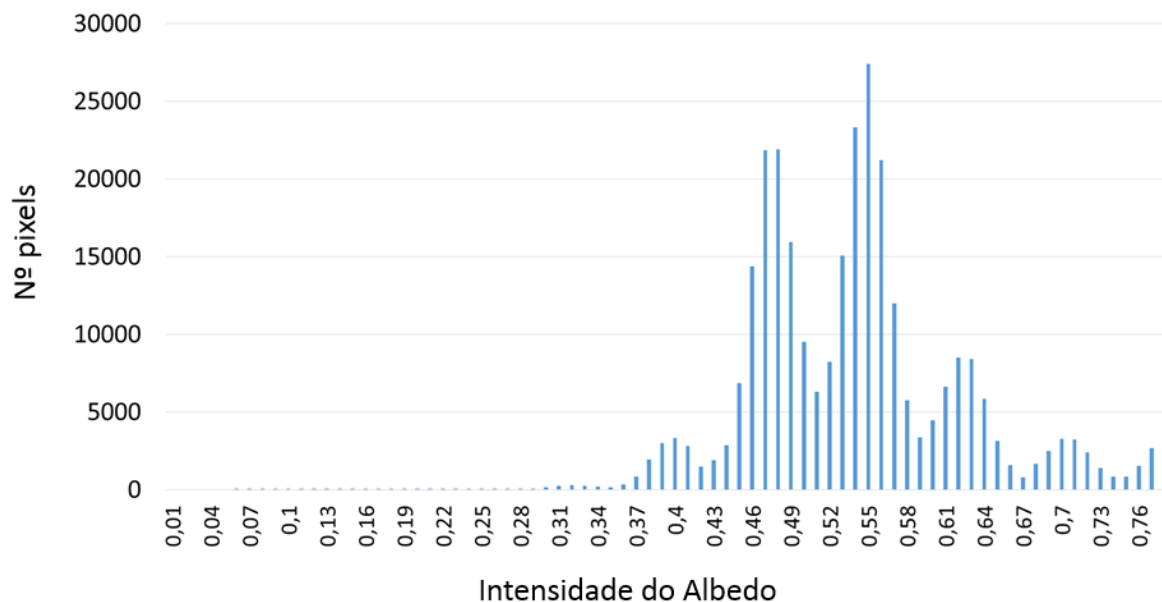


Figura 13: Histograma Albedo de Superfície em 06/07/2014



Pode-se apontar, também, como uma das principais áreas responsáveis pelo aumento do albedo de superfície a área de deposição da lama vermelha (resíduo de

bauxita) que aumenta a cada ano em função da produção de alumina e que é o principal aspecto ambiental da indústria de produção de alumina, por depender de grandes áreas para deposição do rejeito e, conseqüentemente, reduzindo as áreas de cobertura vegetal. A dimensão da área de rejeito deste material sólido, em relação ao complexo industrial, pode ser percebida na Figura 5.

## 6.2 Entrada de Radiação de Ondas Curtas ( $R_s\downarrow$ )

A entrada de radiação de ondas curtas foi calculada de acordo com a equação 11 que considera a distância da superfície terrestre em relação ao sol, em unidades astronômicas, e o ângulo de elevação solar. O  $d_r$  é calculado em função do DOY, conforme equação 7. Nesta observação, pode-se concluir de forma bem simples que quanto maior a aproximação do sol, em relação à terra, maior será a energia recebida, contudo isso também depende do ângulo de elevação solar, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados para entrada de Radiação de Ondas Curtas

DATA	ÂNGULO DE ELEVÇÃO SOLAR	DOY	$d_r$	$R_s\downarrow$ (W/m <sup>2</sup> )
25/12/2001	53,539303	359	1,03282414	851,98
21/05/2003	54,144898	141	0,97506872	810,57
06/07/2014	52,905983	187	0,96709896	791,20

As ocorrências de DOY em 187 e 359 registraram 851,98 W/m<sup>2</sup> e 791 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Estes valores representam bem os extremos de entrada de ondas curtas, visto que seus  $d_r$  compreendem valores mínimos e máximos, aproximadamente, registados na literatura. Valores para  $d_r$  variam de 0,97 até 1,03 (ALLEN *et al.*, 2002).

### 6.3 Entrada de Radiação de Ondas Longas ( $RL_{\downarrow}$ )

A radiação de entradas de ondas longas foi obtida a partir da equação 21 e os valores estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados para entrada de Radiação de Ondas Longas

DATA	Temperatura no momento da imagem (°C)	Altitude da Região (m)	$RL_{\downarrow}$ (W/m <sup>2</sup> )
25/12/2001	32,5	15	375,96
21/05/2003	33,0	15	378,43
06/07/2014	33,0	15	382,65

### 6.4 Emissividade ( $\epsilon_0$ )

Valores de emissividade foram calculados conforme equações 15 e 16 que, no método SEBAL, leva em consideração os índices de vegetação. A emissividade é um indicador biofísico importante e será utilizado para verificar a temperatura de superfície e a quantidade de radiação de ondas longas que são irradiados pela superfície terrestre.

Foi observada variação significativa entre os dias 25/12/2001 e 21/05/2003, onde a concentração de emissividade obtidos foram de 0,972 e 0,973 respectivamente, pode-se verificar nas figuras 14, 15 e 16. Em relação a data de 06/07/2014 apresentou resultado semelhante a 21/05/2003.

Figura 14: Emissividade da superfície em 25/12/2001

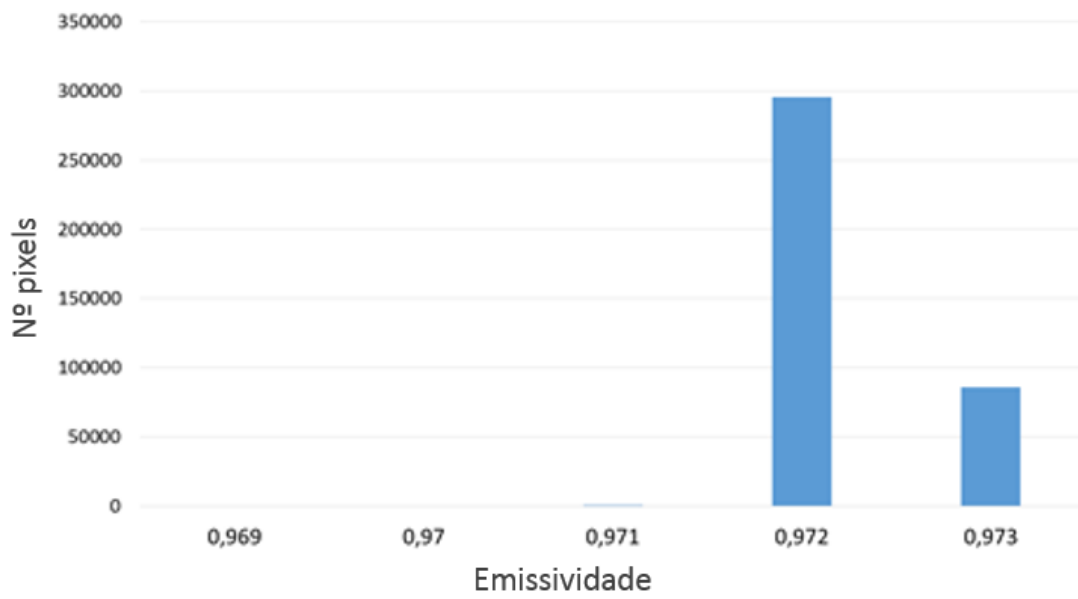


Figura 15: Emissividade da superfície em 21/05/2003

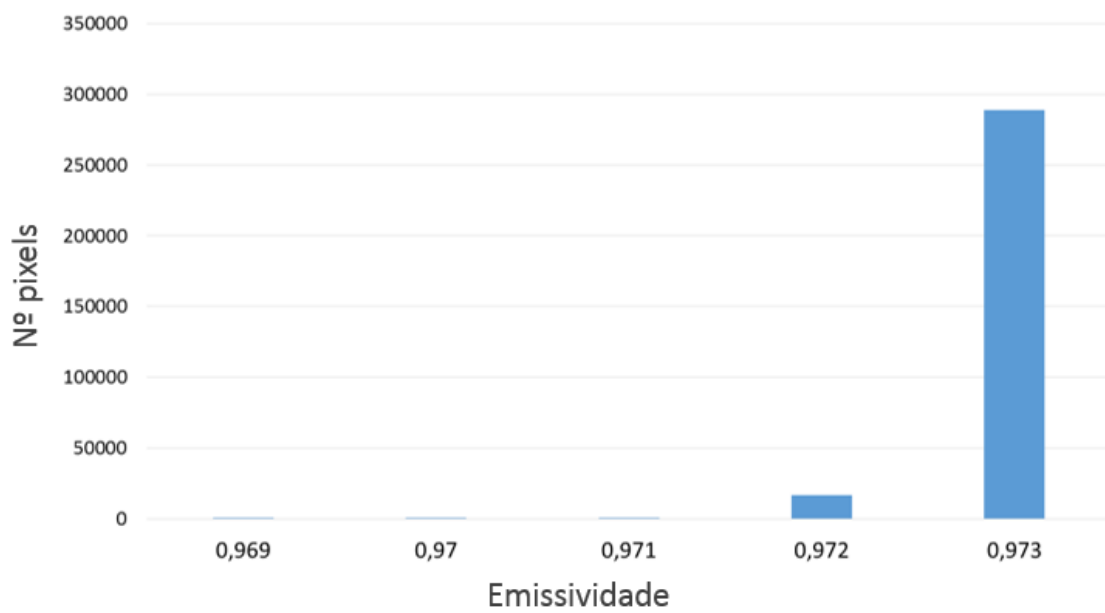
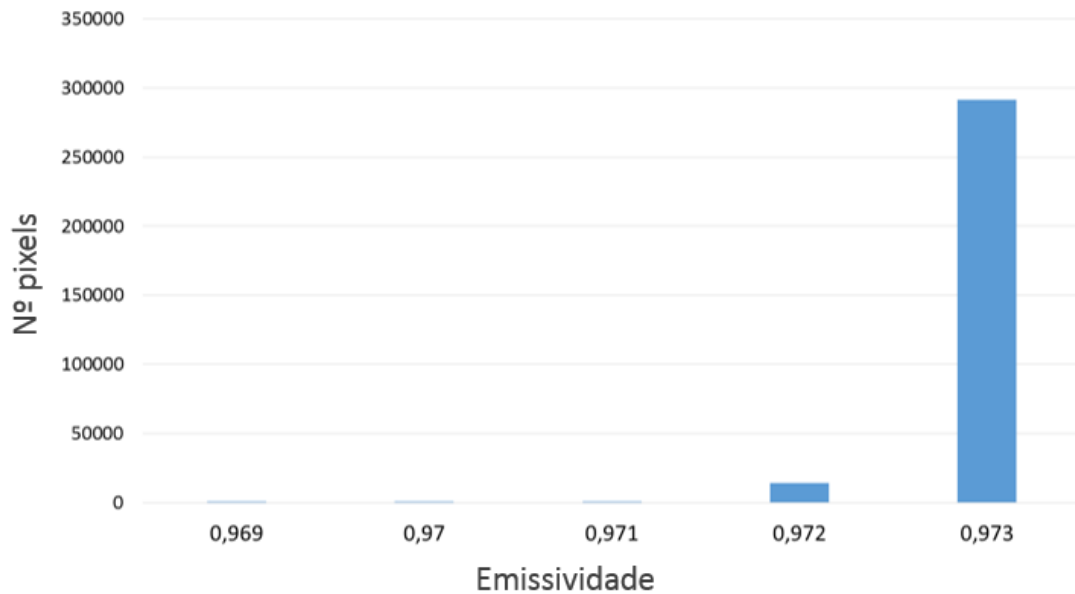


Figura 16: Emissividade da superfície em 06/07/2014



### 6.5 Temperatura de Superfície (Ts)

A temperatura de superfície foi calculada para cada pixel e representada nos mapas das figuras 20, 21 e 22 para melhor verificação das classes de temperatura em diferentes tonalidades de cores. Nota-se nos histogramas o perfil de temperaturas, apresentados nas figuras 17, 18 e 19. Baixas temperaturas foram registradas para o dia 25/12/2001, verificado na Figura 17, em relação aos demais avaliados. Este resultado está diretamente relacionado com o resultado de menor emissividade apresentado no item 4.4. Contudo, a distribuição está mais uniforme em relação aos demais dias observados, tendo como temperatura de maior frequência (proporcionalmente ao número de pixels) o valor de 26°C, mas que também tem resultados com frequências significativas para a faixa de 30 à 38°C.

Figura 17: Temperatura de superfície em 25/12/2001

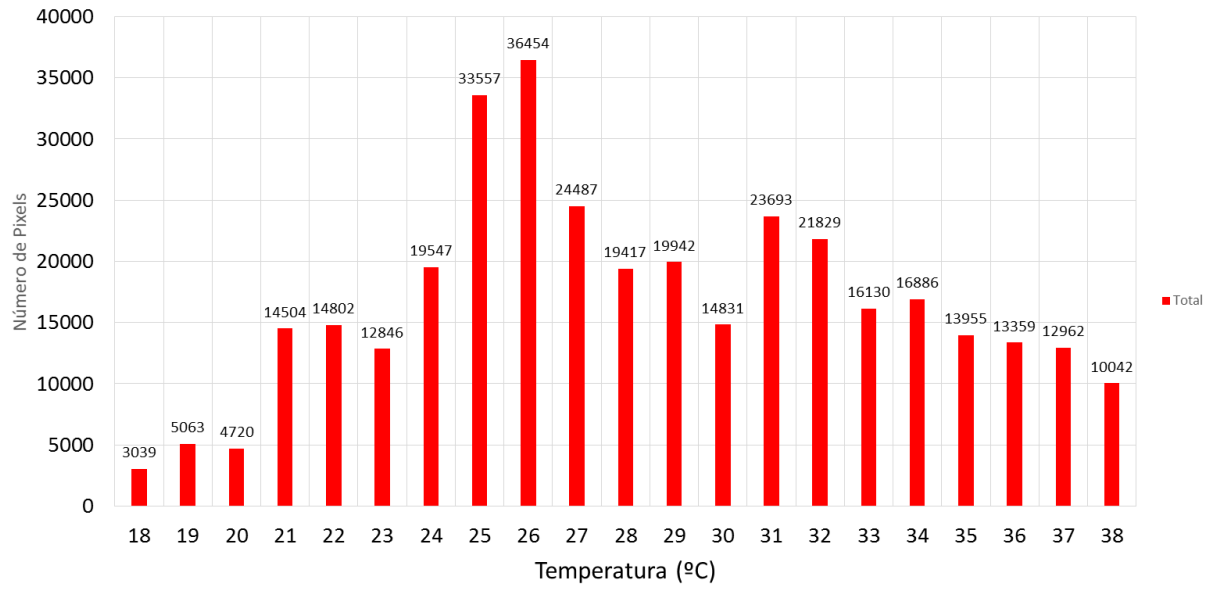


Figura 18: Temperatura de superfície em 21/05/2003

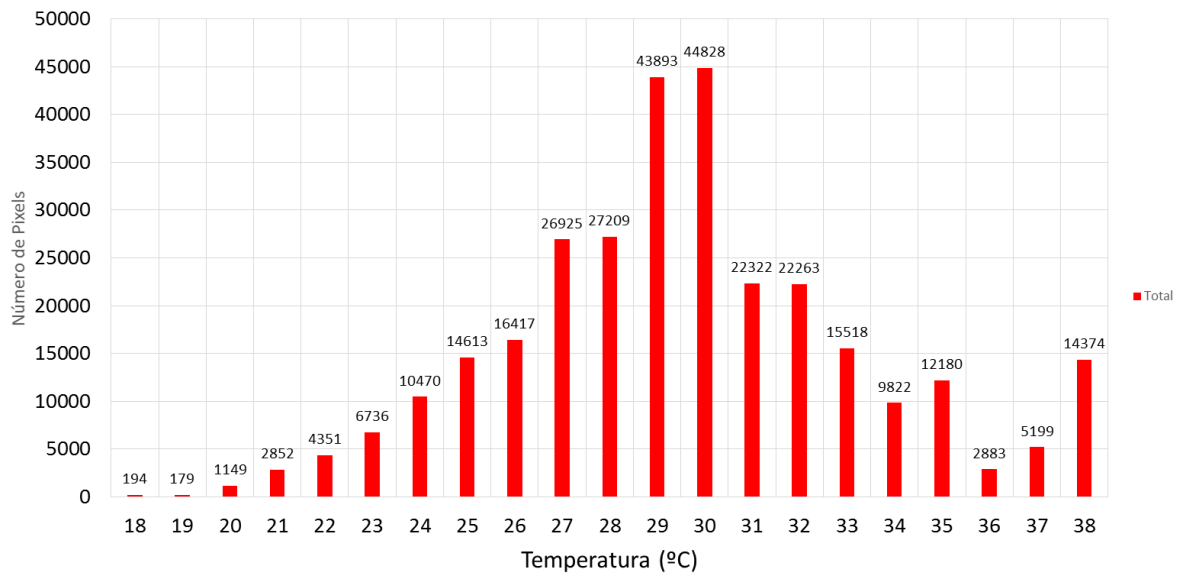
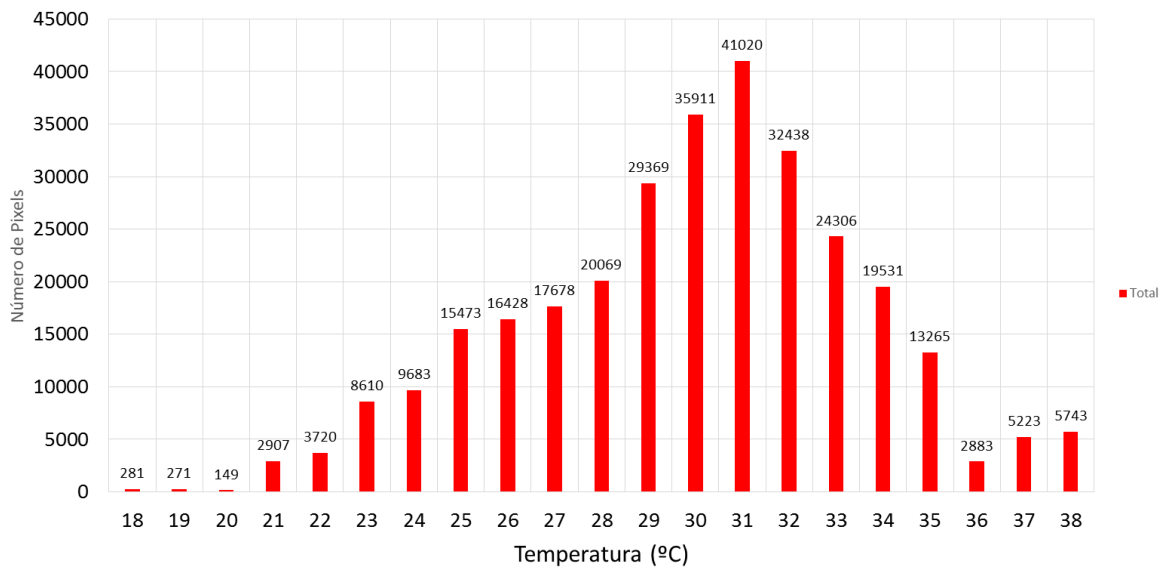


Figura 19: Temperatura de superfície em 06/07/2014



Para os dias 21/05/2003 e 06/07/2014, foram observadas concentrações de maior repetição entre 30 e 32°C, temperatura comumente registrada na região da cidade de Barcarena, pela estação meteorológica, mas que não representa todos os pontos da área ocupação urbana, como ilustrado no mapa. As temperaturas mais elevadas de 36 a 38°C são verificadas no complexo industrial, mas também em pontos centrais das áreas de ocupação urbana.



Figura 20: Mapa de temperatura em 25/12/2001

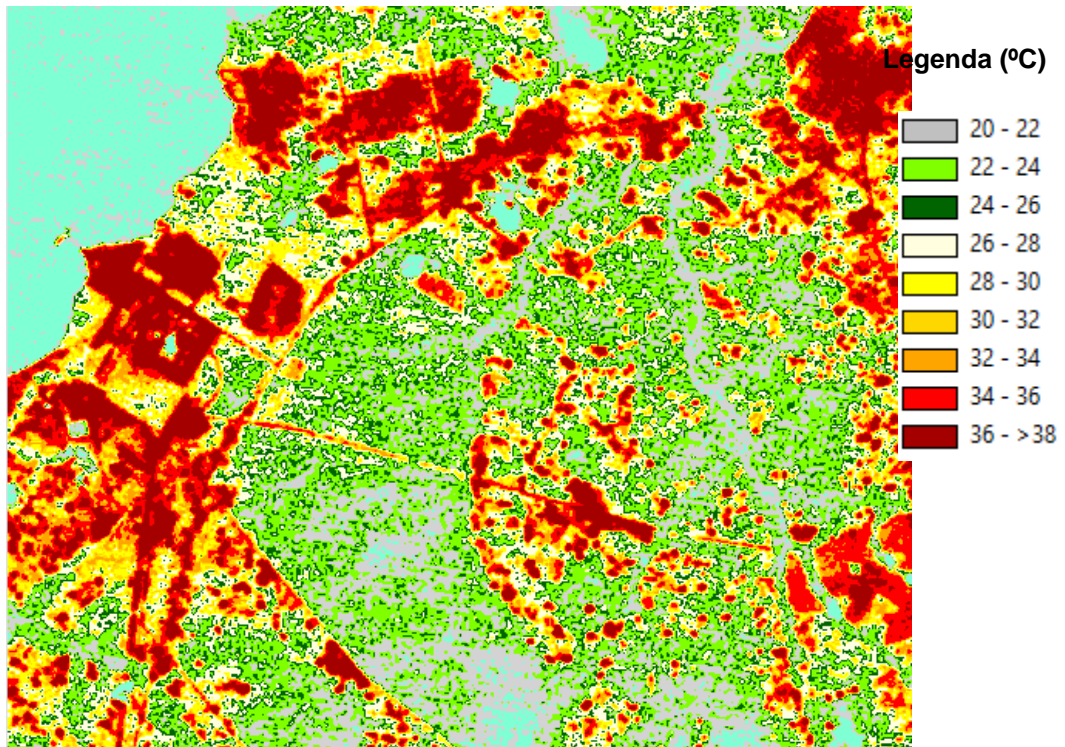


Figura 21: Mapa de temperatura em 21/05/2003

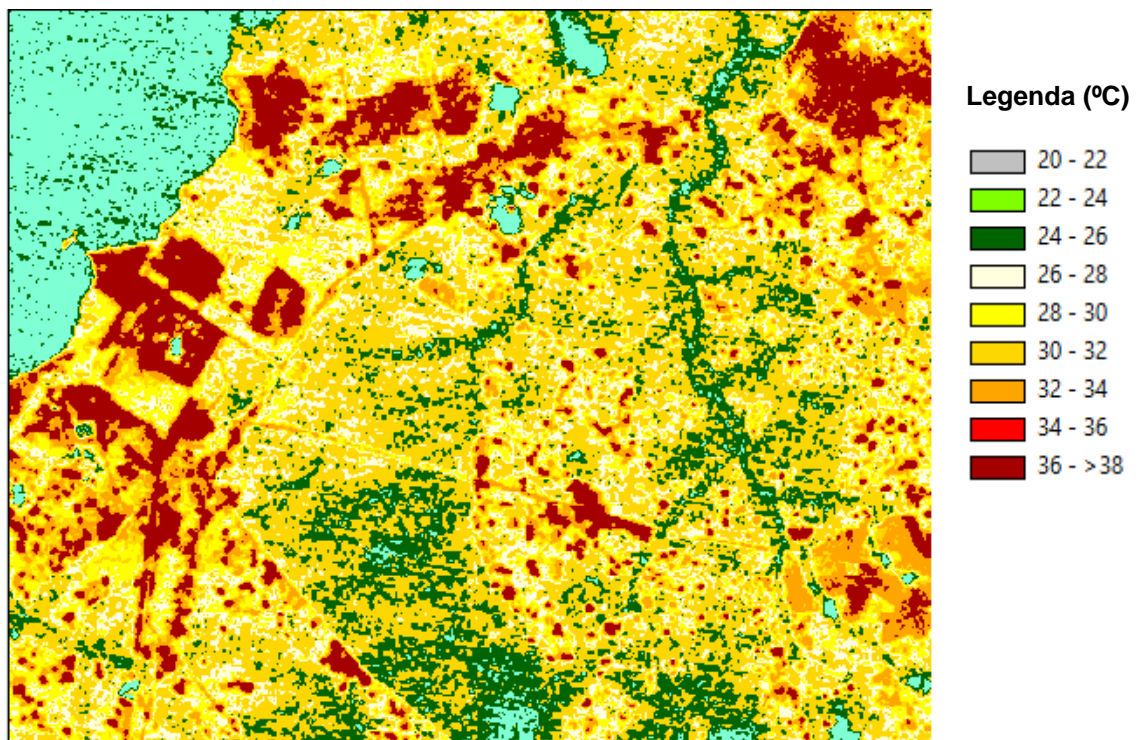
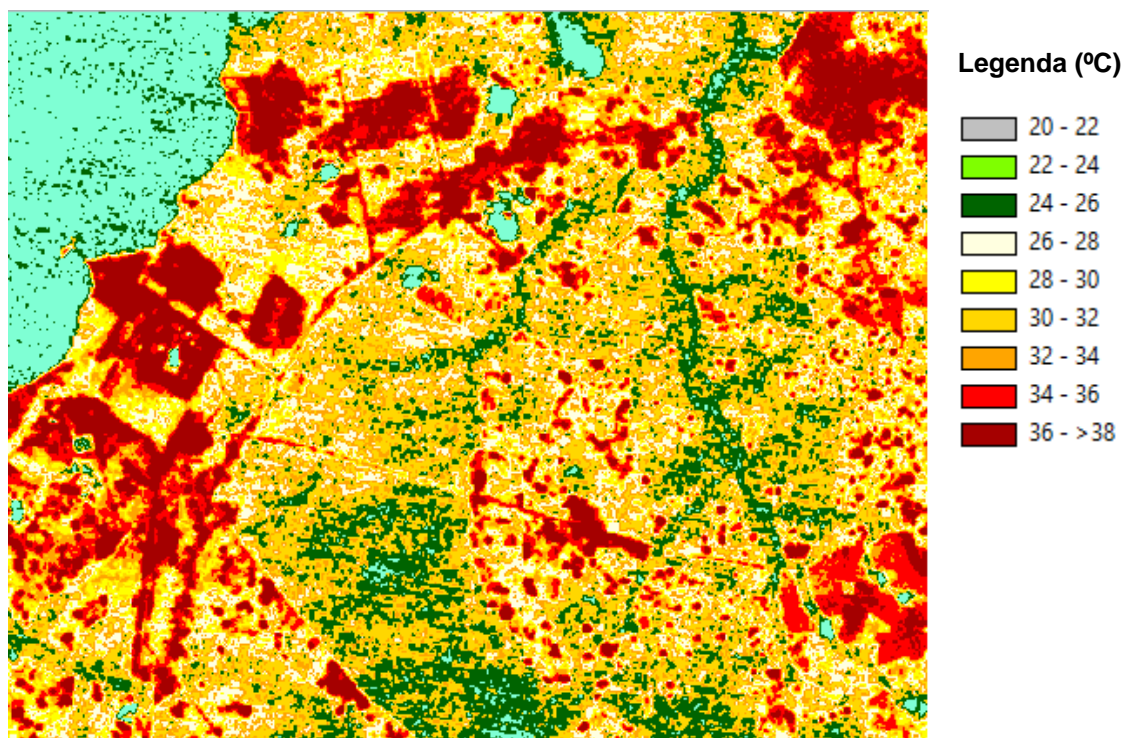


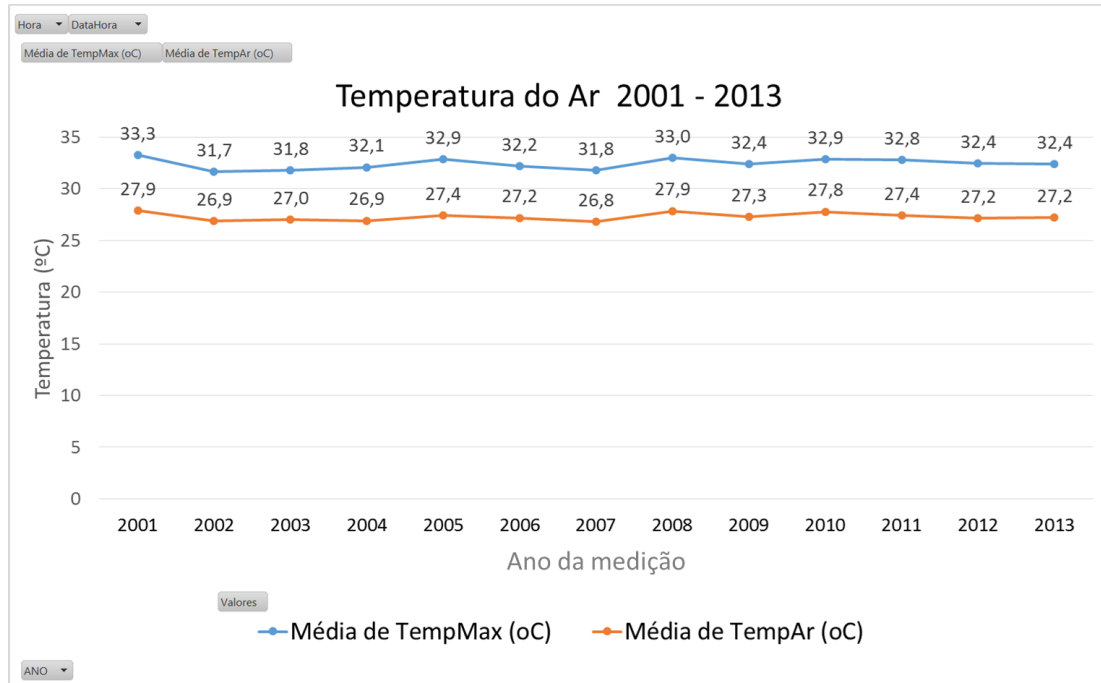
Figura 22: Mapa de temperatura em 06/07/2014



Observa-se que as faixas de transição de temperaturas entre as áreas de ocupação urbana e do complexo industrial possuem valores muito próximos, representados em tonalidade laranja para a faixa de temperatura de 32 a 34°C.

Acrescento que apesar dos registros verificados, a região de Barcarena não apresenta variação significativa de temperatura ao longo da última década, os valores médios de temperatura estão na faixa de 27,0°C e valores médios de temperatura máxima de 32,0°C, como representado na Figura 23.

Figura 23: Temperatura do ar 2001 - 2013



## 6.6 Saída de Radiação de Ondas Longas (RL↑)

A radiação de saída de ondas longas depende da emissividade da superfície e da temperatura calculados para cada pixel da imagem, os valores foram obtidos utilizando a equação 20 e os resultados estão apresentados nas figuras 24, 25 e 26.

Figura 24: Saída de radiação de ondas longas em 25/12/2001

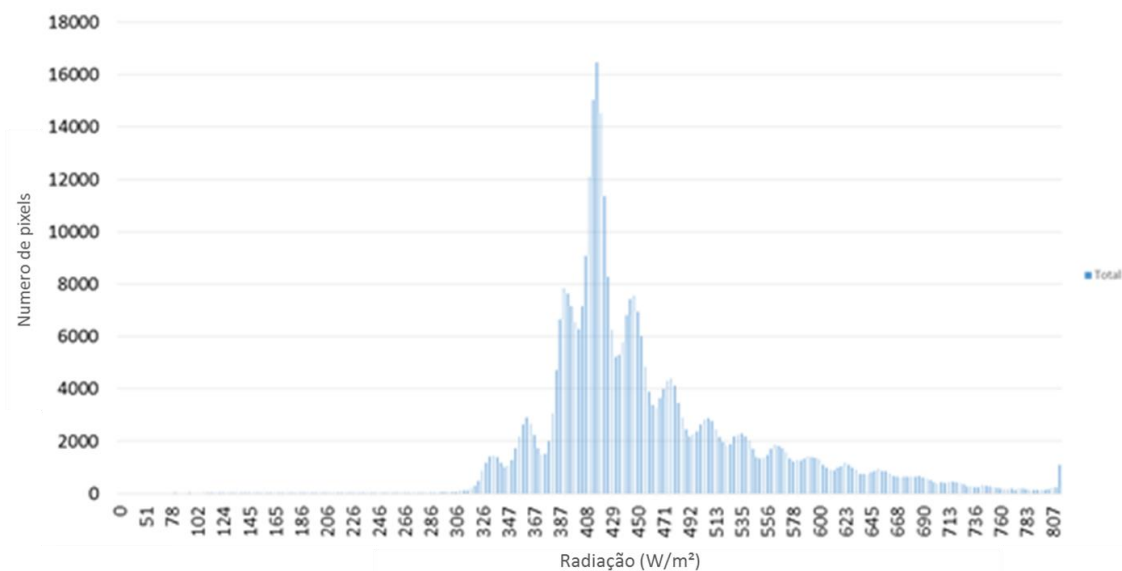


Figura 25: Saída de radiação de ondas longas em 21/05/2003

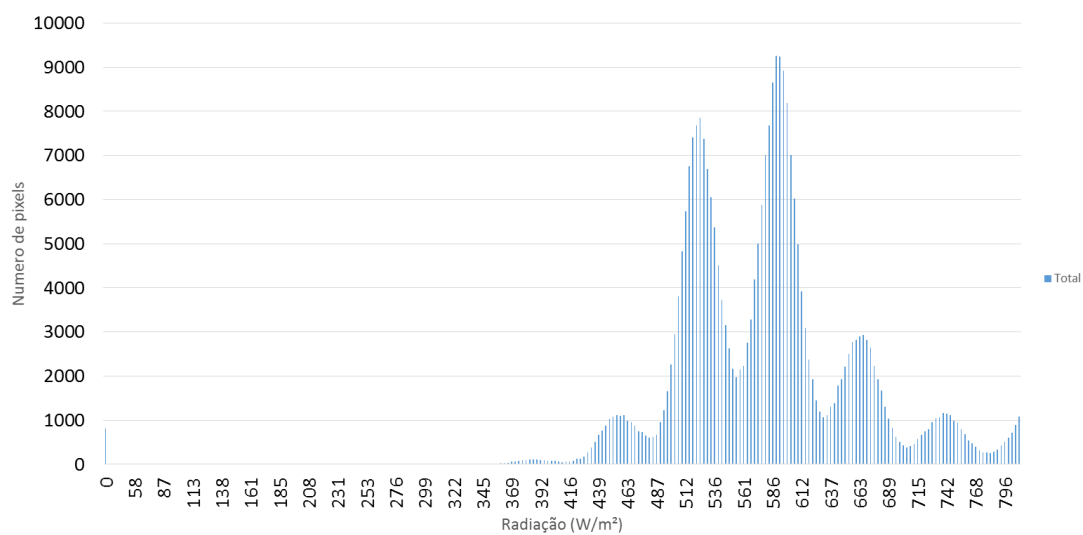
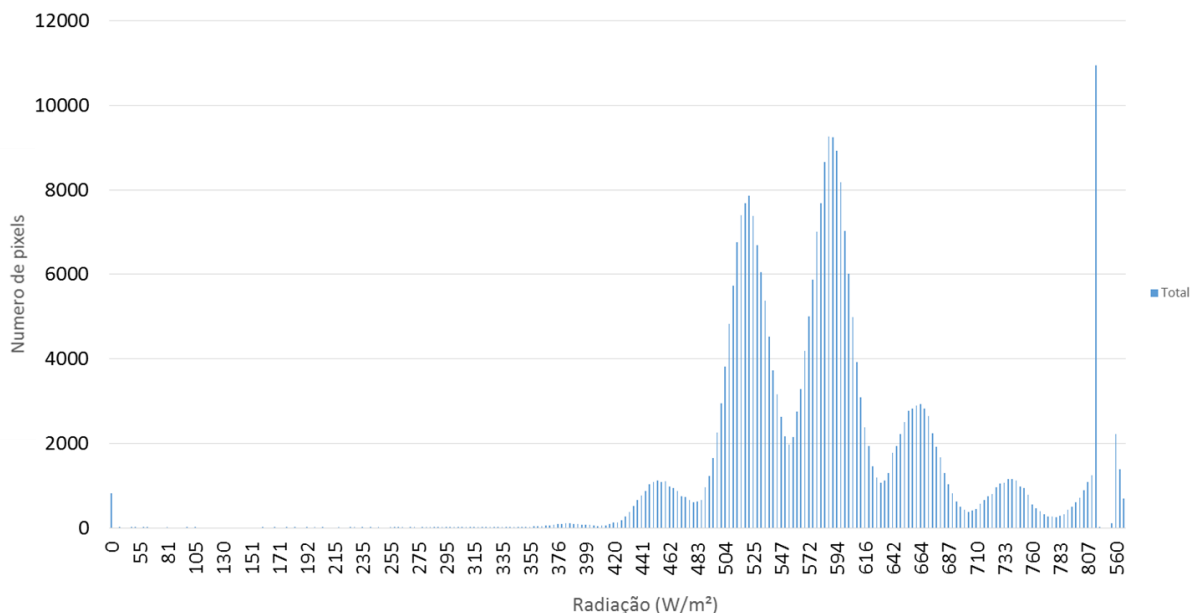


Figura 26: Saída de radiação de ondas longas em 06/07/2014



## 6.7 Saldo de Radiação (Rn)

Com as variáveis de albedo, entrada de radiação de ondas curtas, entrada de radiação de ondas longas, saída de radiação de ondas longas e emissividade, pode-se calcular e conhecer o fluxo de calor na região, o saldo de radiação. O resultado é obtido para cada pixel da imagem, podendo ser verificada a distribuição de radiação disponível na superfície terrestre. O cálculo foi feito a partir da equação 1 considerando, até aqui, todos os dados obtidos para as variáveis citadas.

Foi observada uma maior disponibilidade de saldo de radiação para o dia 25/12/2001, apesar de ter registrado baixa temperatura para a maioria dos pontos no mapa, a distribuição de temperatura foi mais uniforme que as demais, tendo grandes áreas com incidência de calor. Conforme demonstrado no histograma da Figura 27, o saldo de radiação está concentrado entre 600 e 850 W/m<sup>2</sup>, devido a grande quantidade de radiação de ondas curtas absorvida neste período em função do resultado do albedo de superfície, apresentado nos itens 4.1 e 4.2. O saldo de

radiação foi menor para os dias 21/05/2003 e 06/07/2014, ficando na faixa de 250 a 500 W/m<sup>2</sup>, ilustrado na Figura 28 e 29.

Figura 27: Saldo de radiação em 25/12/2001

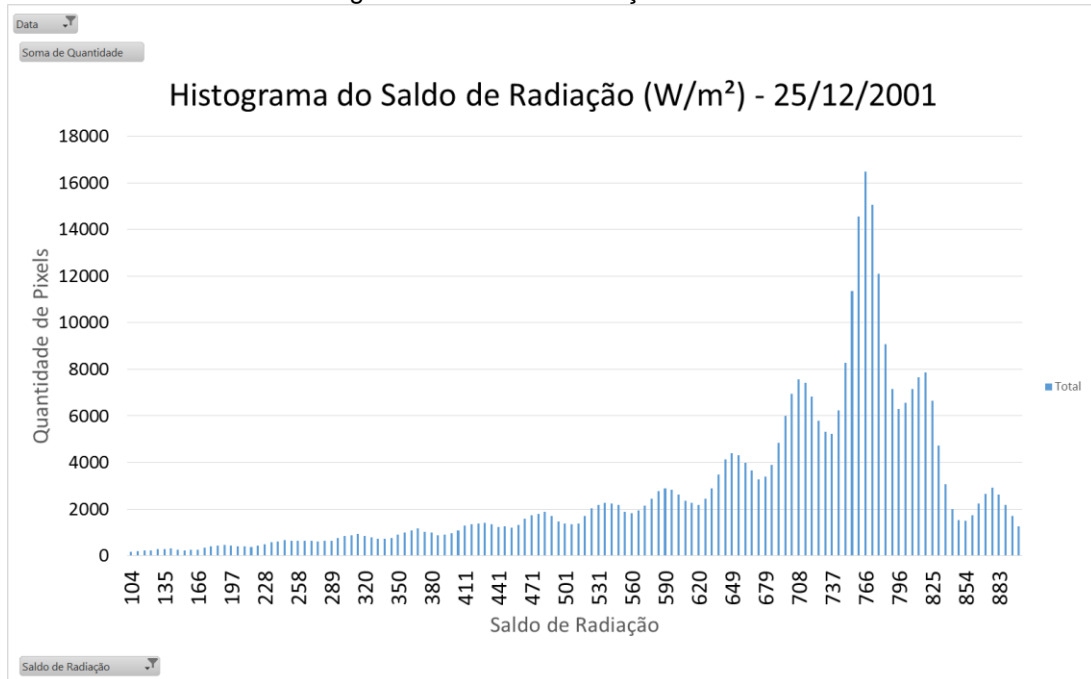


Figura 28: Saldo de radiação em 21/05/2003

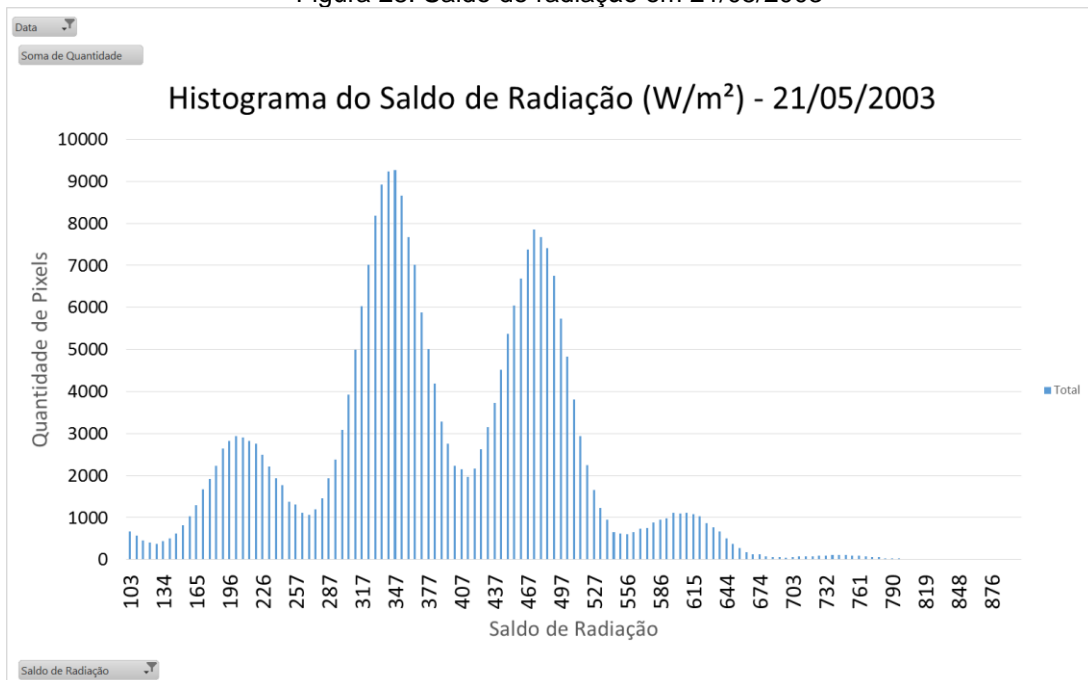
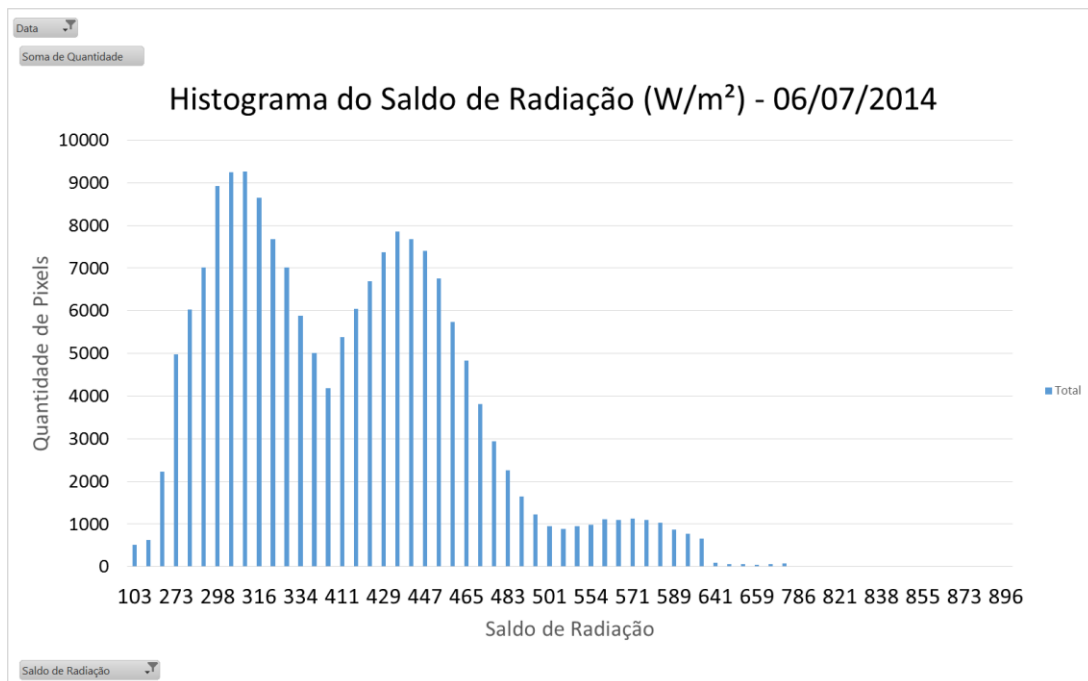


Figura 29: Saldo de radiação em 06/07/2014





## 7 CONCLUSÃO

Em relação ao método SEBAL, pode-se verificar que é uma ferramenta relativamente simples e com a vantagem de se obter os dados com poucas informações de campo. As imagens de satélite, utilizadas sem ônus, disponibilizada pela NASA ao público em geral e as informações meteorológicas gerados pelo INPE, contribuíram para que a pesquisa fosse efetuada sem grandes dificuldades em termos de material. O contato com o ERDAS IMAGE permitiu uma melhor compreensão dos resultados com a utilização de recursos que permitem a obtenção dos DN e do tratamento de imagens para ilustração dos mapas de temperatura, saldo de radiação ou outros objetos de pesquisa.

Para a região escolhida, a metodologia atingiu o objetivo proposto de mapear a temperatura de superfície e do saldo de radiação para a região de Barcarena, mais precisamente no entorno da área industrial da localidade. Contudo, a presença de nuvens visto o grande índice de precipitação na região, e o defeito de algumas imagens acabou por limitar a quantidade de amostras a serem analisadas e, conseqüentemente, a impossibilidade de que diferentes situações pudessem ser calculadas para uma melhor representatividade do estudo. Ainda assim, com os dados disponíveis, pode-se analisar a hipótese de contribuição no aquecimento ou influência na temperatura no clima local pela presença das indústrias que, a princípio, contribui tanto quanto a formação de cidades e outras áreas sem cobertura vegetal, observado pelos níveis de temperatura classificados em diferentes cores para a imagem selecionada.

Apesar de ser um dos pontos de maior concentração de temperatura, a área de deposição de lama vermelha pode ser reflorestada e com isso neutralizar os impactos de aumento de temperatura, mesmo que pontual, esta prática é utilizada, por exemplo, pela indústria de produção de alumina e alumínio no Maranhão.

Recomenda-se que seja acompanhada, ao longo dos próximos anos, a temperatura e/ou o fluxo de calor, pois apesar da grande quantidade de áreas verdes na região, muitas delas estão sofrendo supressão vegetal e como a região possui um polo industrial que atrai oportunidades de emprego, ainda há possibilidade de aumento de ocupação urbana. Estas alterações na camada da



superfície pode apontar se ainda assim haverá impactos significativos ou não para a região.

Áreas de atividades econômicas, como: piscicultura, agricultura familiar, agropastoril, hortifrutigranjeiros, não foram avaliadas, e nem era o objetivo deste trabalho, mas que podem e devem ser analisados os possíveis impactos que podem ocorrer em um eventual aumento de temperatura na região.

E por fim, o SEBAL permite uma análise mais completa sobre o balanço de radiação na superfície terrestre e que pode ser continuidade deste trabalho para futuras pesquisas de interesse na área de mudanças climáticas e impactos ambientais relacionados ao tema.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.; BASTIAANSEN, W.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Sebal: Surface Energy Balance Algorithms for Land (Idaho Implementation)**. University of Idaho. Advance Training and Users Manual. Version 1.0, p. 1-97. August. 2002.

ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; MENEZES, S. J. M. C. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o Sebal e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.3, p. 433 - 442, 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-77862014000300011&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-77862014000300011&script=sci_arttext)> Acesso em: Fevereiro de 2015.

ANDRADE, S. C. P.; CORRÊA, J. A. Estimativa do saldo de radiação instantâneo à superfície para a cidade de Santarém-PA, através de imagens do Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, n.4, P. 653- 661, 2014. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewFile/960/580>> Acesso em: Fevereiro 2015.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 332, 2001.

BARUEL, M. F.; VEISSID, N. **Albedo planetário medido pelo experimento célula solar do satélite brasileiro SCD2**. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 1. (WETE), 2010, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2010. V. WETE2010-1041. CD-ROM. ISSN 2177-3114. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/399KHQH>>. Acesso em: Fevereiro 2014.

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

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROENRINK, G. J.; VAN DER WAL, T. **A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2**. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.213-229, 1998.

BATISTA, W. R. M. **Balço de radiação e evapotranspiração na bacia hidrográfica do Rio Jacaré-SE mediante imagens orbitais**. 2011, 80f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe. 2011.

BIAS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M.; LOMBARDO, M. A. Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados landsat e ikonos. **Anais XI Simpósio Brasileiro Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 1741 – 1748. Disponível em < [http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.12.18.52/doc/14\\_005.pdf](http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.12.18.52/doc/14_005.pdf)> Acesso em: Fevereiro 2015

BRUNDTLAND, G. H. **Relatório Brundtland – Our Common Future**. United Nations, 1987. Disponível em: < [http://conspect.nl/pdf/Our\\_Common\\_Future-Brundtland\\_Report\\_1987.pdf](http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future-Brundtland_Report_1987.pdf) > Acesso em: Fevereiro 2014.

COURAULT, D.; SEGUIN, G.; OLIOSSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches. **Irrigation and Drainage Systems, Dordrecht**, v. 19, p. 223-249, 2005.

DUTRA, L. V.; SOUZA, R.C.M.; MITSUO II, F.A.; MOREIRA, J.C. **Análise automática de Imagens Multiespectrais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, p. 33, 1981.

GUSSO, A.; FONTANA, D.C.; GONÇALVES, G.A. Mapeamento da temperatura da superfície terrestre com uso do sensor AVHRR/NOAA. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v. 42, n.2, p.231-237, fev. 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/pab/v42n2/12.pdf>> Acesso em: Fevereiro 2014.

IDEÃO, S. M. A. **Imagens Multiespectrais e Aplicações em Recursos Hídricos: Temperatura da Superfície e Balanços de Radiação e Energia**. 2009. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2009.

IMAGEM DE SATÉLITE, Disponível em: < <http://earthexplorer.usgs.gov>> Acesso em: julho 2014.

JATOBÁ, R. M. A.; RIBEIRO, K. O.; SOUZA, R. S. **Formação e medidas de minimização do efeito de Ilhas de calor na capital paraibana**. *Anais ENID / UEPB*, v. 1, n. 2, ISSN 2318-7379, 2014. Disponível em < <http://www.editorarealize.com.br/revistas/eniduepb/resumo.php?idtrabalho=651>> Acesso em: Fevereiro 2015.

LOMBARDO, M. A. Ilhas de Calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo. *Hucitec*, São Paulo. p. 244, 1985. In: BIAS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M.; LOMBARDO, M. A. Análise do Fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas, por meio da combinação de dados landsat e Ikonos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte. **Anais-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. p. 1741-1748, 5-10 de abril. 2003. Disponível em: <

[http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.12.18.52/doc/14\\_005.pdf](http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.12.18.52/doc/14_005.pdf)  
Acesso em: Março 2014.

MACHADO, C. C.; SILVIA, B. B.; ALBUQUERQUE, M. B.; GALVINCIO, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens tm – landsat 5 e o algoritmo Sebal no Litoral Sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n.1, p. 55 - 67, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v29n1/a06v29n1.pdf>> Acesso em: Fevereiro 2015.

MENDONÇA, F. **O Estudo do Clima Urbano no Brasil: evolução, tendências e alguns desafios**. In: Monteiro, C, A. F.; Mendonça, F. (Orgs.). Clima Urbano. São Paulo: Contexto, p. 175-192, 2003.

MENDONÇA, F. A. **O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para o estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR**. 1994, 300f, Tese (Doutorado em geografia física). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MIRANDA, L. A.; ARAUJO, R. S. Mudanças climáticas: análise de dois pontos de vista. **Revista Perspectivas online: Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**, v. 4, n. 9, p. 47-55, 2014. Disponível em: <[http://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/humanas\\_sociais\\_e\\_aplicadas/article/view/536](http://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/humanas_sociais_e_aplicadas/article/view/536)> Acesso em: Fevereiro 2015.

MOLION, L. C. B. **Desmistificando o aquecimento global**. Intergeo, v.5, p.13-20, 2007 Disponível em: <[http://www.lgmh.ufpe.br/biomol/AGA/molion\\_desmist.pdf](http://www.lgmh.ufpe.br/biomol/AGA/molion_desmist.pdf)> Acesso em: Fevereiro 2015.

MONTEIRO, P. F. C.; FONTANA, D. C.; SANTOS, T. V.; ROBERTI, D. R. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Revista Agrometeorologia**, v. 73, n. 1, p.72-80, 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87052014000100010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87052014000100010&script=sci_arttext)> Acesso em: Fevereiro 2015.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 3ª. Edição. ed. Viçosa: UFV, p. 273, 282,285- 286, 2005.

NASCIMENTO, D.T.F.; SOUSA, S.B.; OLIVEIRA, I.J. A relação entre os valores de temperatura superficial terrestre (TST), o uso e cobertura do solo e a topografia no município de Minaçu – GO (2001). **Revista eletrônica Ateliê geográfico**, Goiânia-Go, v.3, n.2, p.93-107, set. 2009. Disponível em: <<http://www.revistas.ufg.br/index.php/atelie/article/viewFile/7288/5196>> Acesso em: Fevereiro 2014.

NOVAS, M. F. B. **Mapeamento das estimativas do saldo de radiação e índices de vegetação em área do estado de Alagoas com base em sensores remotos.** 2008.158f. Dissertação (Mestrado em meteorologia: Processos de Superfície Terrestre) - Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosférica. Maceió – AL, 2008.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C. D.; MOURAS, A. E. S. S. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1039–1046, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v18n10/v18n10a08.pdf>> Acesso em: Fevereiro de 2015.

REMPEL, C. **Aplicação do Sensoriamento Remoto para Determinação da Evolução da Mata Nativa da Bacia Hidrográfica do Rio Forqueta – RS, entre 1985 e 1995.** 2000. 85 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2000.

SAYDELLES, A. P.; **Estudo Do Campo Térmico E Das Ilhas De Calor Urbano Em Santa Maria-Rs.** 2005. 219f. Dissertação (Mestrado em Análise Espacial) Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil 2005.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 –TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SILVA, J. M. C., RYLANDS, A. B.; FONSECA, G. A. B. The Fate of the Amazonian Areas of Endemism”. **Conservation Biology**, v.19, p. 689-694, 2005.

SOUZA, R. M. **Balanço de Energia na Camada Limite Superficial sobre o Pantanal Sul Mato-Grossense - Estação Seca.** 2011. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia) - Instituto Alberto Luiz Coimbra. UFRJ. Rio de Janeiro. 2011.

TEZA, C. T. V. & BAPTISTA, G. M. M. Identificação do fenômeno ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER *on demand 08 – Kinetic Temperature (III): metrópoles brasileiras.* XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; Goiânia. **Anais- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, p. 3911- 3918, 16-21 de abril, 2005. Disponível em <<http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.01.17.52/doc/3911.pdf>> Acesso em: Fevereiro 2015.

TIMMERMANS, W.J.; MEIJERINK, A. M. J. **Remotely sensed actual evapotranspiration: implications for groundwater management in Botswana.** JAG, v. 1, p. 222-233, 1999.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. **Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environmet**, v. 86, p. 370-384, 2003.

WANDERLEY, R. L. N.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M. R.; FREITAS, H.C; BRASILIO, E. M. S.; SILVA, J. M. Estimativa do índice de área foliar e temperatura em uma área de eucalipto. **Revista Ciência e Natura, Santa Maria.** Edição Esp. p. 386 – 389, Dez. 2013. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/98550/1/2013AP59.pdf>> Acesso em: Fevereiro 2015.

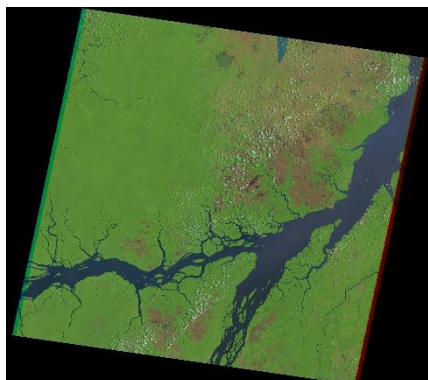
WELIGEPOLAGE, K. **Estimation of spatial and temporal distribution of evaporatranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek, The Netherland.** 2005. 114f. Dissertação (Master of Science in Geo-information Science and Earth Oservation in Water Resources and Environmental Management programme specialization)): International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2005.

WUKELIC G.E, GIBBONS D.E, MARTUCCI, L.M.; FOOTE, H.P. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band. *Remote Sensing of Environment*, 28: 339-347. 1989. In: SOUZA, J. D.S.; SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM- Landsat 5 . *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, p. 10, 2005.

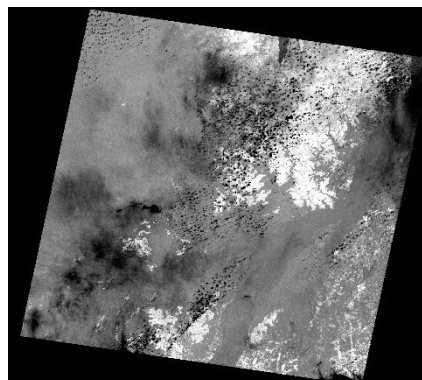
**Anexo I – Imagens de Satélite da Série Landsat para a região de Barcarena-PA**

**DATA:** 08/09/2000

**Identificação da imagem:** LE72240612000252EDC00



*Imagem Colorida*



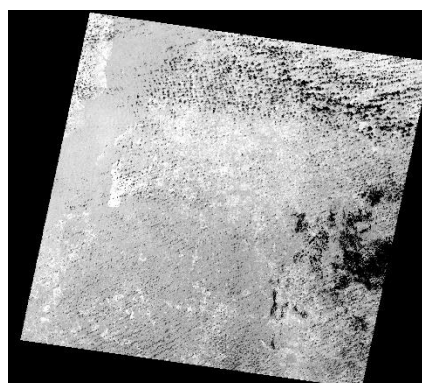
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 18/07/2001

**Identificação da imagem:** LE72230612001199PFS00



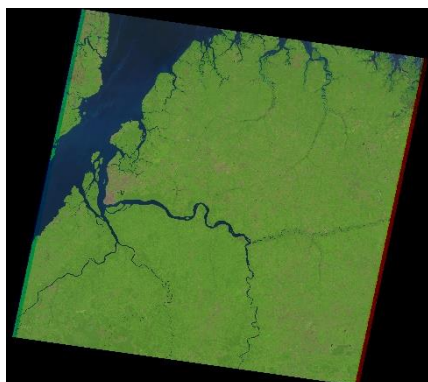
*Imagem Colorida*



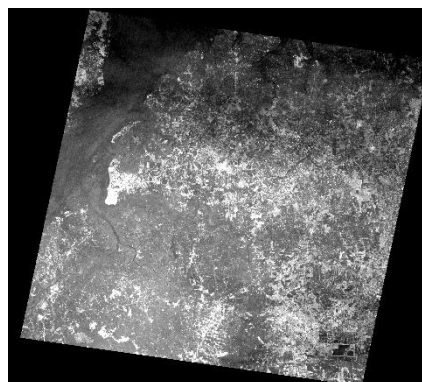
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 03/08/2001

**Identificação da imagem:** LE72230612001215EDC00



*Imagem Colorida*



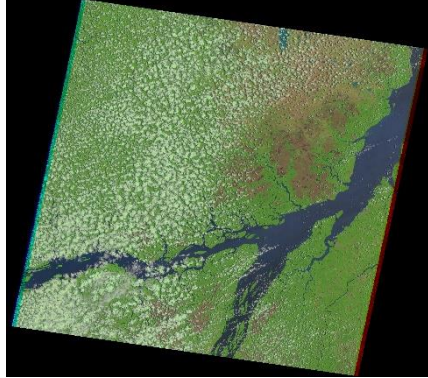
*Imagem produzida pelo Sensor*



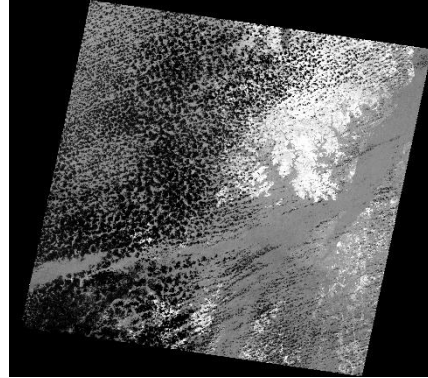
*Termal*

**DATA:** 11/09/2001

**Identificação da imagem:** LE72240612001254CUB00



*Imagem Colorida*

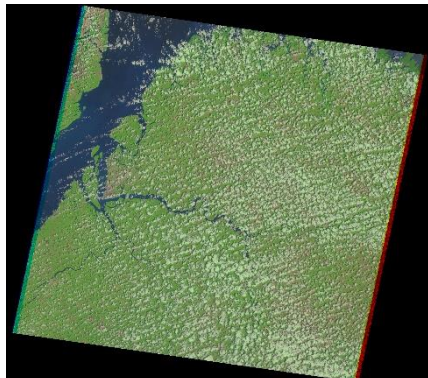


*Imagem produzida pelo Sensor*

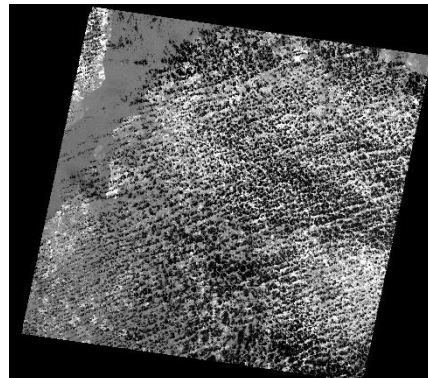
*Termal*

**DATA:** 22/10/2001

**Identificação da imagem:** LE72230612001295EDC00



*Imagem Colorida*

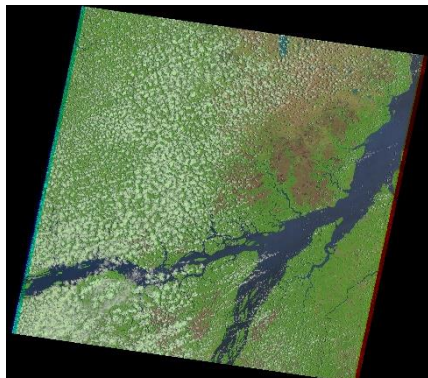


*Imagem produzida pelo Sensor*

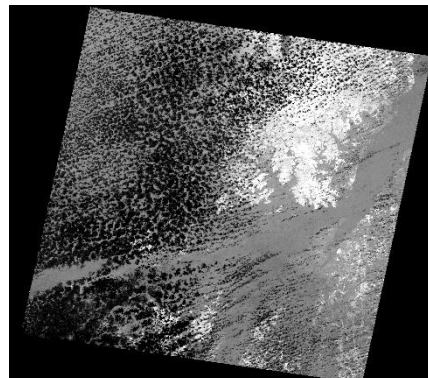
*Termal*

**DATA:** 11/09/2001

**Identificação da imagem:** LE72240612001254CUB00



*Imagem Colorida*



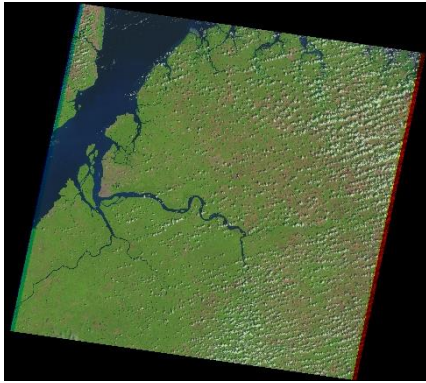
*Imagem produzida pelo Sensor*



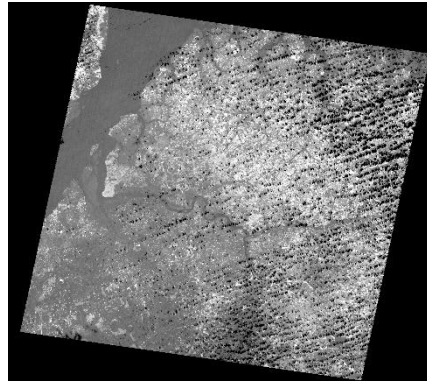
*Termal*

**DATA:** 25/12/2001

**Identificação da imagem:** LE72230612001359EDC00



*Imagem Colorida*



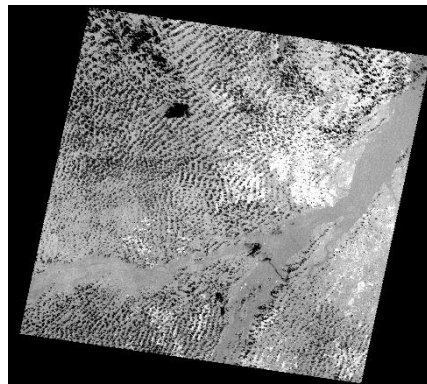
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 18/02/2002

**Identificação da imagem:** LE72240612002049EDC00



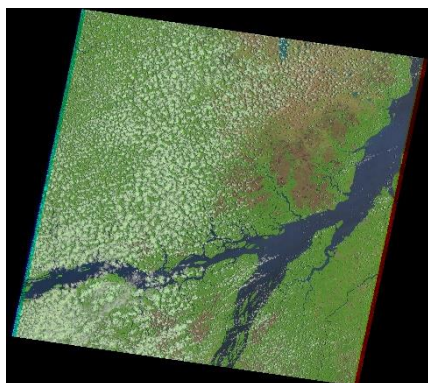
*Imagem Colorida*



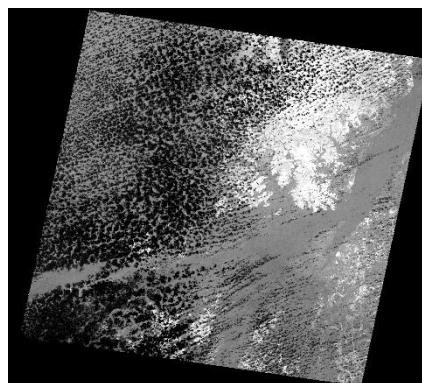
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 10/06/2002

**Identificação da imagem:** LE72240612001254CUB00



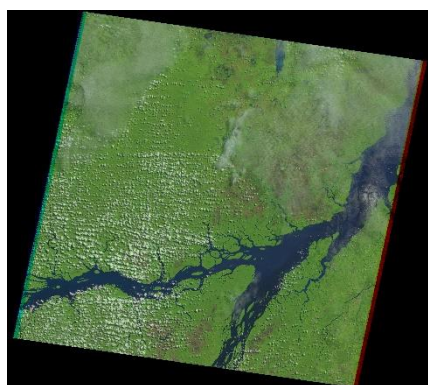
*Imagem Colorida*



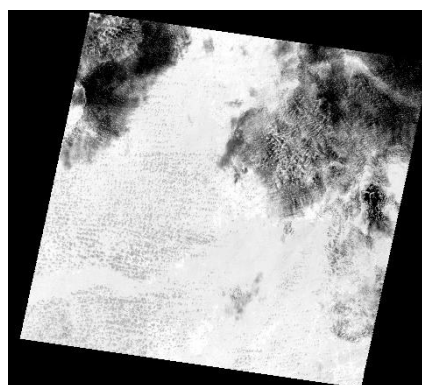
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 26/06/2002

**Identificação da imagem:** LE72240612002177CUB00



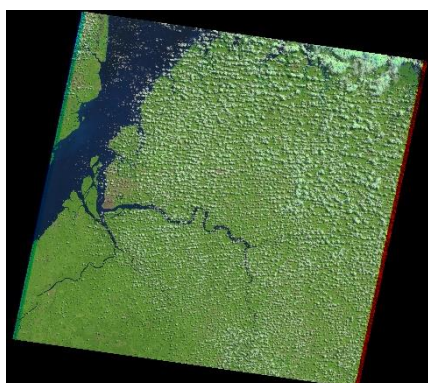
*Imagem Colorida*



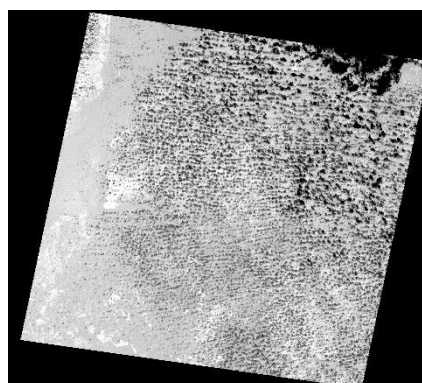
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 05/07/2002

**Identificação da imagem:** LE72230612002186EDC00



*Imagem Colorida*

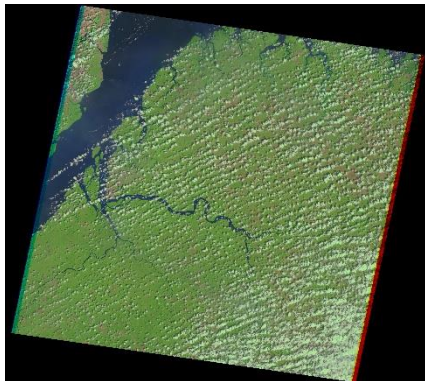


*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

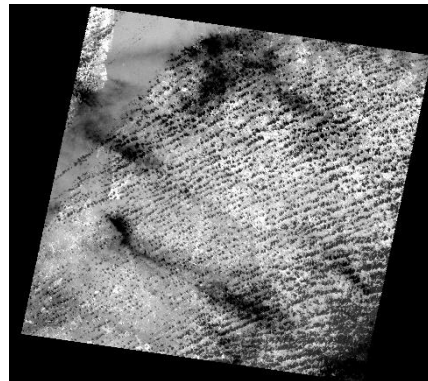


**DATA:** 07/09/2002

**Identificação da imagem:** LE72230612002330EDC00



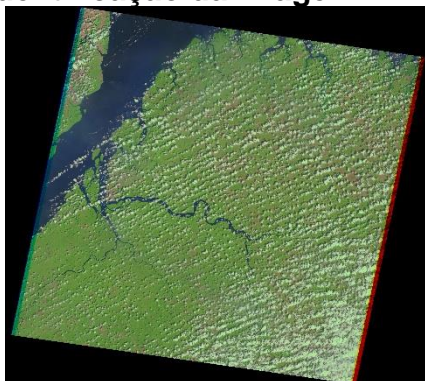
*Imagem Colorida*



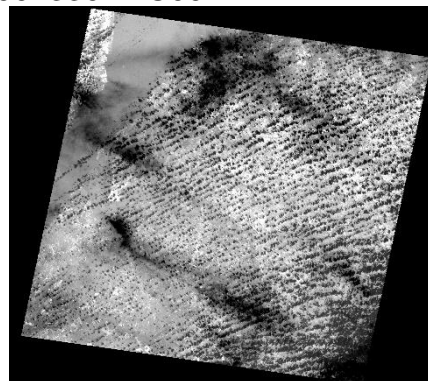
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 26/11/2002

**Identificação da imagem:** LE72230612002330EDC00



*Imagem Colorida*



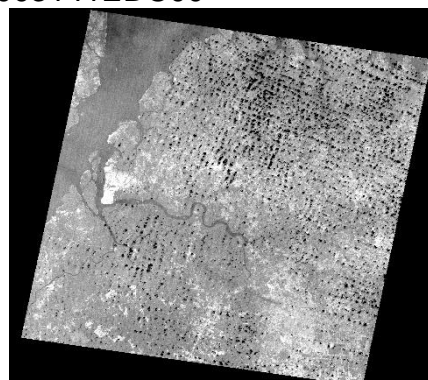
*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*

**DATA:** 21/05/2003

**Identificação da imagem:** LE72230612003141EDC00



*Imagem Colorida*



*Imagem produzida pelo Sensor  
Termal*