



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR – LABOMAR  
BACHARELADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**RODRIGO PASSOS FERNANDES**

**AVALIAÇÃO DO FENÔMENO ILHA DE CALOR URBANA NAS CAPITALS  
NORDESTINAS A PARTIR DOS DADOS DO SATÉLITE SENTINEL – 3 SLSTR**

**FORTALEZA**

**2021**

RODRIGO PASSOS FERNANDES

AVALIAÇÃO DO FENÔMENO ILHA DE CALOR URBANA NAS CAPITALS  
NORDESTINAS A PARTIR DOS DADOS DO SATÉLITE SENTINEL – 3 SLSTR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais. Área de concentração: Sensoriamento Remoto Aplicado.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira.

FORTALEZA

2021

---

Página reservada para ficha catalográfica.

Utilize a ferramenta *online* [Catalog!](#) para elaborar a ficha catalográfica de seu trabalho acadêmico, gerando-a em arquivo PDF, disponível para download e/ou impressão.

(<http://www.fichacatalografica.ufc.br/>)

---

RODRIGO PASSOS FERNANDES

AVALIAÇÃO DO FENÔMENO ILHA DE CALOR URBANA NAS CAPITALS  
NORDESTINAS A PARTIR DOS DADOS DO SATÉLITE SENTINEL – 3 SLSTR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais. Área de concentração: Sensoriamento Remoto Aplicado.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira (Orientador)  
LABOMAR – EOLLA<sub>b</sub>

---

MSc. Camille Arraes Rocha  
Doutoranda da Universidade Federal Fluminense

---

Msc. Thaís Regina Benevides Trigueiro Aranha  
Pesquisadora da FUNCEME

Aos meus pais, meus avós, minhas tias e todos  
que apoiaram-me durante meu percurso.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira, pela excelente orientação.

As professoras participantes da banca examinadora Camille Arraes Rocha e Thaís Regina Benevides Trigueiro Aranha pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas e meus amigos da turma de graduação e de outros lugares, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas, principalmente ao Pedro Lucas Gomes, Emanuel Gomes, Mateus Santos, Felipe Araújo, Leonardo Moura, esses eu conheci durante o percurso da Graduação. Também, aos meus amigos de infância, João Vítor (Juvito), Thales Sombra (*Shadow*) e José Ribamar (Zunior) e aos dois agregados do grupo que é meu amigo de moradia, Pedro Lucas (Pet) e o Daniel Ataíde (Nem chama).

Também, agradeço a minha namorada, por toda a paciência de me aturar durante a fase do TCC e me apoiar em situações difíceis.

Além disso, agradeço a Laila por todos os momentos de brincadeiras.

“A vida nunca está completa sem seus desafios.”

– Stan Lee

## RESUMO

As áreas edificadas da cidade, absorvem e retêm mais energia proveniente do sol em relação à superfície não urbanizadas, e essa retenção de temperatura é um meio de ocasionar o fenômeno da Ilha de calor Urbana (ICU), onde este pode ser entendido como a diferença da temperatura do ar dentro da área urbana e das suas áreas circunvizinhas. Logo, é comum que existam muitos trabalhos acerca do assunto nas cidades ao redor do mundo, entretanto, esses estudos focam somente em uma única localidade onde a definição de áreas urbanas e rurais são adaptadas para cada caso de estudo. Mas, não existe uma metodologia concreta para definir o que é área não urbana e a seleção adequada dessa área é de fundamental importância para a estimativa de ICU com maior acurácia. Logo, pensando sobre essa problemática, este trabalho propõe utilizar a metodologia proposta por Sobrino *et al.* 2020, sobre a determinação de área urbana e não urbana de forma mais objetiva e melhorar a acurácia de detecção de ICU, voltado para a região nordeste do Brasil, contribuindo como estudo pioneiro nesta região, ainda mais levando em consideração um clima semiárido. Portanto, o objetivo do trabalho é calcular e comparar valores de ilhas de calor urbana nas capitais do nordeste brasileiro. Com os produtos de temperatura da superfície obtidos do satélite Sentinel 3, para os anos de 2019 e 2020, foram calculados a Ilha de Calor Urbana Máxima e Média, os arredores das áreas urbanas em função da área de cada cidade e os índices complementares para auxiliar na análise da ilha de calor, o Índice de variação do campo térmico (UFTVI) e o Índice de desconforto (DI). As análises da Ilha de Calor Urbana máxima e média, com valores entre 1,85 e 8,25 e -4,92 e 2,50 K, respectivamente, permitiu expor a influência da ilha de calor na área urbana e em suas adjacências, onde a maioria das capitais analisadas possuíram as suas áreas centrais com maior valor de temperatura, podendo ser pelas análises das figuras, o aglomerado urbano, falta de vegetação e corpos hídricos. O UFTVI, com valores obtidos entre 0,010 e 0,040, expressa quão ruins estão os espaços eco ambientais das áreas urbanas e o DI, com valores obtidos entre 24,61 e 28,89 °C, expressando o conforto térmico da população. Estes índices em conjunto permitem uma melhor compreensão do fenômeno da ilha de calor urbana em superfície e suas consequências na qualidade de vida dos moradores das cidades analisadas.

**Palavras-chave:** Desconforto térmico. Ilha de Calor Urbana. Região Nordeste. Sentinel 3.



## ABSTRACT

The alteration of the natural space by built-up areas, causes damage to cities, since the materials used in the constructions absorb and retain more energy from the sun than non-urbanized surfaces, such as vegetation, water bodies and others, and this higher temperature retention is a means of causing the phenomenon of the Urban Heat Island (ICU), where it can be understood as the difference in air temperature within the urban area and its surrounding areas. Therefore, it is common to have many works on the subject in cities around the world, however, these studies focus only on a single location where the definition of urban and rural areas are adapted for each case study. However, there is no concrete methodology to define what is a non-urban area and the appropriate selection of this area is of fundamental importance for the estimation of the Urban Heat Island with greater accuracy. Therefore, thinking about this problem, this work proposes to use the methodology proposed by Sobrino et al. 2020, on the determination of urban and non-urban areas in a more objective way and to improve the accuracy of detection of ICU, aimed at the northeast region of Brazil, contributing as a pioneering study in this region, even more taking into account a semiarid climate. Therefore, the objective of the work is to calculate and compare values of urban heat islands in the capital cities of northeastern Brazil. With the surface temperature products obtained from the Sentinel 3 satellite, for the years 2019 and 2020, the Maximum and Average Urban Heat Island, the surroundings of the urban areas were calculated according to the area of each city and the complementary indices to assist in the analysis of the heat island, the thermal field variation index (UFTVI) and the discomfort index (DI). The analyzes of the maximum and average Urban Heat Island, with values between 1.85 and 8.25 and -4.92 and 2.50 K, respectively, allowing to expose the influence of the heat island in the urban area and its surroundings, where most of the capitals analyzed have their central areas with the highest temperature value, which may be due to the analysis of the figures, the urban agglomeration, lack of vegetation and water bodies. UFTVI, with values obtained between 0.010 and 0.040, expresses how terrible the Eco-environmental spaces of the urban area are and DI, with values obtained between 24.61 and 28.89 °C, expressing the thermal comfort of the population. These indices together allow a better understanding of the phenomenon of the urban heat island on the surface and its consequences on the quality of life of the residents of the cities analyzed.

**Keywords:** Thermal Discomfort. Urban Heat Island. Northeast Region. Sentinel 3.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Mapa das 9 capitais da Região Nordeste do Brasil .....	23
Figura 2	- Satélite Sentinel 3 da ESA .....	26
Figura 3	- Diagrama esquemático do Sensor SLSTR .....	28
Figura 4	- Exemplo das verificações dos parâmetros estatísticos no SNAP .....	30
Figura 5	- Mapa de cobertura da terra para a Região Metropolitana de Fortaleza .....	31
Figura 6	- <i>Shape</i> gerado a partir de dados do IBGE para a área urbana de Fortaleza-CE .....	31
Figura 7	- <i>Buffers</i> gerados para Fortaleza-CE .....	32
Figura 8	- Localização do Pixel mais quente de Aquiraz-CE obtido da imagem de Sentinel 3 .....	40
Figura 9	- Localização de Maceió-AL .....	41
Figura 10	- Cidade destacada na zona Sf de Salvador-BA .....	42
Figura 11	- Localização de São Luís-MA .....	43
Figura 12	- Localização de João Pessoa-PB e seu jardim botânico na parte central da cidade .....	44
Figura 13	- Localização de Recife-PE .....	45
Figura 14	- Localização de Teresina-PI .....	46
Figura 15	- Cidade de Xangai, com áreas adjacentes com características semelhantes com a área da cidade .....	47
Figura 16	- Localização de Natal-RN .....	48
Figura 17	- Localização de Aracaju-SE .....	49
Figura 18	- Pixel mais quente da área urbana de Fortaleza-CE gerado a partir da imagem do Sentinel 3 .....	51

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Ilha de calor urbana máxima para a Su .....	36
Gráfico 2	– Ilha de calor urbana máxima para a Sf .....	36
Gráfico 3	– Ilha de calor urbana máxima para a Sp .....	37
Gráfico 4	– Ilha de calor urbana média para a Su .....	38
Gráfico 5	– Ilha de calor urbana média para a Sf .....	38
Gráfico 6	– Ilha de calor urbana média para a Sp .....	39
Gráfico 7	– Valores da Cidade de Xangai .....	47
Gráfico 8	– Gráfico do Índice de Variação do Campo Térmico Urbano .....	50
Gráfico 9	– Gráfico referente aos pixels mais quentes .....	52
Gráfico 10	– Gráfico referente às médias dos pixels .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das capitais da Região Nordeste do Brasil .....	24
Tabela 2 – Características do Sentinel 3 .....	26
Tabela 3 – Dia e hora da aquisição das imagens Sentinel 3 para as capitais nordestinas	27
Tabela 4 – Valores limites do cálculo do UFTVI, com o Fenômeno de ICU e o Índice de Avaliação Ecológica .....	33
Tabela 5 – Categorias do DI com relação a temperatura obtida .....	34
Tabela 6 – Resumo dos principais resultados .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DI	Índice de Desconforto
ESA	Agência Espacial Europeia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilha de Calor Urbana
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LST	<i>Land Surface Temperature</i>
UFTVI	Índice de Variação do Campo Térmico Urbano

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Objetivo específico</b> .....	19
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
<b>3.1</b>	<b>Clima urbano</b> .....	20
<b>3.2</b>	<b>Ilha de calor e sensoriamento remoto</b> .....	20
<b>3.3</b>	<b>Índices UFTVI e DI</b> .....	22
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	23
<b>5</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA</b> .....	25
<b>5.1</b>	<b>Dados de satélite</b> .....	26
<b>5.2</b>	<b>Dados do INMET</b> .....	28
<b>5.3</b>	<b>Dados do IBGE</b> .....	28
<b>5.4</b>	<b>Metodologia</b> .....	29
<b>5.4.1</b>	<b><i>Seleção da ilha de calor urbana e seus arredores</i></b> .....	29
<b>5.4.1.1</b>	<b><i>Identificação da área urbana</i></b> .....	30
<b>5.4.1.2</b>	<b><i>Identificação das áreas adjacentes à área urbana</i></b> .....	32
<b>5.4.2</b>	<b><i>Índices UFTVI e DI</i></b> .....	33
<b>5.4.2.1</b>	<b><i>Índice de variação do campo térmico urbano (UFTVI)</i></b> .....	33
<b>5.4.2.2</b>	<b><i>Índice de desconforto</i></b> .....	34
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	35
<b>6.1</b>	<b>Ilha de calor urbana</b> .....	35
<b>6.1.1</b>	<b><i>Ilha de calor urbana máxima e média</i></b> .....	35
<b>6.1.1.1</b>	<b><i>Fortaleza-CE</i></b> .....	40
<b>6.1.1.2</b>	<b><i>Maceió-AL</i></b> .....	40
<b>6.1.1.3</b>	<b><i>Salvador-BA</i></b> .....	41
<b>6.1.1.4</b>	<b><i>São Luís-MA</i></b> .....	42
<b>6.1.1.5</b>	<b><i>João Pessoa-PB</i></b> .....	43
<b>6.1.1.6</b>	<b><i>Recife-PE</i></b> .....	44

6.1.1.7	<i>Teresina-PI</i> .....	45
6.1.1.8	<i>Natal-RN</i> .....	48
6.1.1.9	<i>Aracaju-SE</i> .....	48
6.2	<b>Índice de variação do campo térmico urbano</b> .....	49
6.3	<b>Desconforto térmico</b> .....	51
6.3.1	<i>Desconforto térmico Máximo</i> .....	51
6.3.2	<i>Desconforto térmico Médio</i> .....	52
6.4	<b>Resumo dos resultados</b> .....	53
7	<b>CONCLUSÃO</b> .....	55
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	56
	<b>APÊNDICE A</b> .....	58
	<b>APÊNDICE B</b> .....	68
	<b>APÊNDICE C</b> .....	77

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é o que mantém o planeta Terra aquecido, sendo importante para a manutenção da vida como conhecemos, e auxiliando no processo de evaporação, transpiração e fotossíntese, sendo esses processos naturais e essenciais para ocorrer esse aquecimento. Em decorrência disso, a radiação é considerada como principal elemento meteorológico e seu estudo para o sensoriamento remoto estende-se para efeitos de balanço de energia, efeito estufa, mudanças climáticas globais e para o estudo em questão, as ilhas de calor urbana (MARIN *et al.*, 2008).

Mas, enquanto que o aquecimento, mais propriamente falando sobre o efeito estufa, ocorre por meios naturais, as ilhas de calor se dão por questões antrópicas. Logo, com as modificações das estruturas urbanas com o passar dos anos, influenciadas pela migração da população rural para o ambiente urbano buscando melhorar a qualidade de vida, contribuíram para minar a capacidade de suporte do espaço natural, gerando muitos danos e modificações a sua estrutura. Os problemas mais comuns estão associados à utilização dos materiais de construção comuns que absorvem mais radiação do que em áreas arborizadas em zonas rurais menos urbanizadas, causando o fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbana (ICU).

Conforme afirma Gartland (2010, p.8)

Ilhas de calor são formadas em áreas urbanas e suburbanas porque muitos materiais de construção comuns absorvem e retêm mais calor do sol do que materiais naturais em áreas rurais menos urbanizadas. Existem duas razões para esse aquecimento. A primeira é que a maior parte dos materiais de construção é impermeável e estanque, e por essa razão não há umidade disponível para dissipar o calor do sol. A segunda é que a combinação de materiais escuros de edifícios e pavimentos com configuração tipo cânion absorve e armazena mais energia solar. A temperatura de superfícies escuras e secas pode chegar a 88°C durante o dia, ao passo que a superfície com vegetação e solo úmido sob as mesmas condições chegam a atingir apenas 18°C. O calor antropogênico, ou produzido pelo homem, menores velocidades dos ventos e poluição do ar em áreas urbanas também contribuem para a formação de ilhas de calor.

Além disso, de acordo com Sobrino *et al.* (2020), a ICU é definida como a diferença entre a temperatura do ar dentro da área urbana e a temperatura do ar dos seus arredores. Esses efeitos de altas temperaturas são reforçados pelos efeitos de mudanças



climáticas, em que não só afeta o psicológico e fisiológico das pessoas, como também controla os comportamentos diários de humor, financeiros entre outros.

Ainda segundo Sobrino *et al.* (2020), muitos autores possuem propostas de como abordar a detecção da ICU, com abordagens diferentes em escalas espaciais, temporais e espectrais, ou examinam qual sensor do satélite é o mais adequado para o estudo. Entretanto, a maioria destes estudos focam somente em uma única localidade onde a definição de áreas urbanas e rurais são adaptadas para cada caso de estudo, onde acaba complicando para comparações entre localidades de diferentes partes do mundo. Por outro lado, não existe uma metodologia concreta para definir o que é área não urbana cuja seleção adequada dessa área é de fundamental importância para a estimativa de ICU, no qual, a consideração errônea das áreas podem levar a uma subestimação ou superestimação dos valores. Além disso, áreas externas da área urbana e da adjacente podem ser consideradas uma mudança extrema para se usar como referência.

Então, este trabalho propõe aplicar metodologia proposta por Sobrino *et al.* (2020), para calcular e comparar valores de ICU para as 9 capitais do nordeste brasileiro, sendo esta uma aplicação inédita para a região nordeste do Brasil, incluindo regiões semiáridas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Aplicar a metodologia proposta por Sobrino *et al.* (2020), para calcular e comparar valores de ilhas de calor urbana nas capitais do nordeste brasileiro.

### **2.2 Objetivo específico**

- Calcular e avaliar o ICU para as cidades de Fortaleza-CE, Maceió-AL, Salvador-BA, São Luís-MA, João Pessoa-PB, Recife-PE, Teresina-PI, Natal-RN e Aracaju-SE.
- Calcular e avaliar o Índice de Variação do Campo Térmico Urbano (UFTVI) para as capitais citadas anteriormente.
- Calcular e avaliar o Índice de Desconforto (DI) para as capitais citadas anteriormente.
- Comparar o ICU, UFTVI e o DI entre as cidades estudadas.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

A seguir apresentamos o referencial teórico utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

#### **3.1 Clima urbano**

Os centros urbanos abrigam hoje a maioria da população ao redor do mundo, onde as interações do homem na paisagem natural vêm causando mudanças significativas nos microclimas. Mudanças estas sendo a retirada de áreas vegetadas, impermeabilização do solo, atividades industriais e entre outros fatores, nos quais causam o aumento de temperatura do ar e a diminuição da umidade relativa (FRANCO *et al.*, 2010).

Segundo Cavalcante *et al.* (2017), os centros urbanos são um conjunto de interações entre o homem e a natureza ao seu redor, acarretando em um clima próprio para a região, o clima urbano. As ações antrópicas alteram esse meio com a degradação da vegetação nativa, liberação de gases tóxicos e poluentes, impermeabilização do solo, construções de edificações, entre outros.

Segundo Santos (2011), algumas características físicas dos centros urbanos possuem efeito sobre o clima local. Em seu trabalho o autor cita a densidade da área urbana, a orientação e largura das ruas e a altura relativa das edificações, como algumas dessas características, além de materiais utilizados para a cobertura do solo, como asfaltos e concreto.

Essas alterações de clima urbano possuem seus efeitos percebidos pela população por meios que desorganizam a vida da cidade e deterioram a qualidade de vida de seus habitantes, pois as sensações térmicas mais elevadas podem influenciar psicologicamente, fisiologicamente, além de atividades econômicas, no aumento de morbidade e mortalidade e violência urbana (SOBRINO *et al.*, 2020).

#### **3.2 Ilha de calor e sensoriamento remoto**

Dentre as alterações climáticas ocorridas por conta do processo de urbanização, a

ilha de calor urbana constitui um dos fenômenos mais estudados nos centros urbanos, principalmente nas metrópoles. Ela é definida como sendo uma área mais quente do que seus arredores e é calculada considerando a diferença da temperatura entre o ambiente construído e o não construído no mesmo instante.

Segundo Xiong *et al.* (2012), os habitantes das principais cidades localizadas em zonas tropicais e semiáridas experimentam frequentemente este fenômeno climático conhecido como Ilha de Calor Urbana.

De acordo com Santos (2011), o desenvolvimento das ilhas de calor podem ser diversos, e um deles é a concentração relativa de fontes de calor na cidade. As propriedades térmicas dos materiais de construção facilitam mais rapidamente a condução de calor que o solo e a vegetação das áreas rurais, contribuindo para um contraste de temperatura entre essas regiões. Também, os altos edifícios entre as ruas estreitas aprisionam energia solar por meio de múltiplas reflexões dos raios solares.

Segundo Amorim (2016), as cidades localizadas nos trópicos já são naturalmente mais quentes, intensificando o fenômeno de ilha de calor urbana. Logo, sendo sentido pelas pessoas através do desconforto térmico que será abordado mais a posterior.

A utilização de imagens de satélite tem crescido devido ao desenvolvimento de satélites com alta resolução espacial e temporal, além disso, essas imagens vêm assumindo um importante papel na avaliação de alterações ambientais, por meio da aplicação de índices ecológicos voltados para a vegetação, emissividade, albedo, temperatura da superfície terrestre e entre outros índices relevantes (AMORIM, 2016)

Segundo Trindade *et al.* (2017) o sensoriamento remoto é uma poderosa ferramenta para monitorar as mudanças no espaço urbano. E uma das formas de monitorar o clima urbano é analisando o infravermelho termal uma vez que a energia proveniente do sol será parte absorvida e outra refletida pela superfície urbana. Assim, os sensores de satélite que operam na faixa do infravermelho termal podem captar esse tipo de onda eletromagnética e posteriormente, com as devidas correções, podem ser interpretados como temperatura da superfície (SANTOS, 2011)

Quando falamos de monitoramento de ilha de calor urbana por sensoriamento remoto, estamos falando sobre superfície urbana, pois o parâmetro estudado não é mais a temperatura do ar, mas sim a temperatura da superfície terrestre (SOBRINO *et al.*, 2020).

### 3.3 Índice UFTVI e DI

Liu *et al.* (2011), aplicou o Índice de Variação do Campo Térmico Urbano (UFTVI) para descrever quantitativamente os efeitos da ilha de calor urbana, na cidade de Hong Kong, que possui áreas com alta cobertura de vegetação e obteve um excelente índice de avaliação ecológica. Em compensação, a área da cidade, coberta de materiais que absorvem e retêm muita energia, apresenta o pior índice de avaliação ecológica, mostrando que um estudo de avaliação ecológica pode fornecer informações úteis aos gestores urbanos.

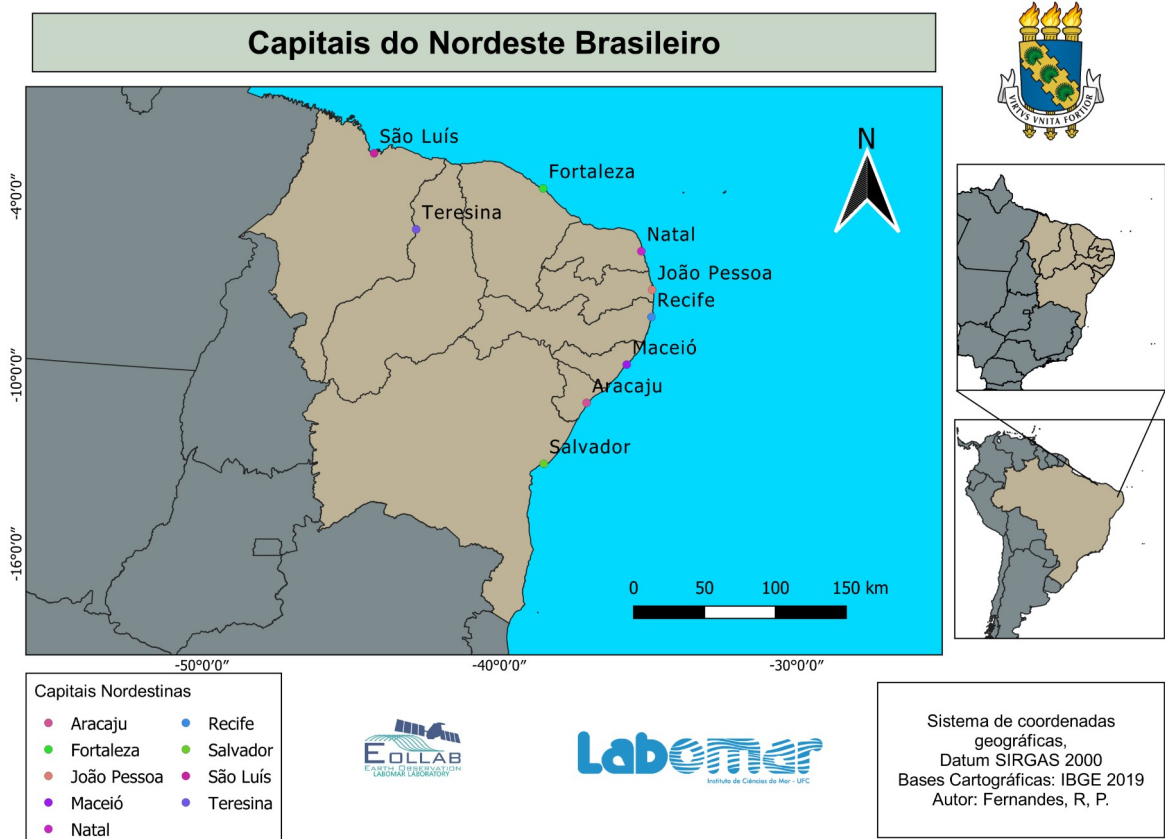
Quanto ao Índice de desconforto (DI), segundo Bracarense *et al.* (2018), esse índice vai permitir a estimativa do conforto térmico das pessoas quanto ao ambiente que elas vivem. A condição psicológica de um indivíduo, segundo este autor, é também influenciada pela temperatura do ambiente.

Segundo Pereira *et al.* (2015), o clima urbano tem sido amplamente investigado, pois este impacta diretamente no conforto térmico das pessoas. Ressalta-se, porém, que outras variáveis meteorológicas, como por exemplo, umidade relativa do ar, radiação solar incidente, vento, entre outros, são utilizadas no estudo do DI. Além disso, o DI influencia no funcionamento do organismo do ser humano (PEREIRA *et al.*, 2015). Por conta disso, diversos índices são utilizados para estudar e avaliar o conforto térmico, destacando o índice apresentado por Thom (1959), que determina o DI através de um modelo empírico, em que variáveis meteorológicas como temperatura e umidade relativa do ar, que interferem no conforto térmico das pessoas, são avaliadas. Complementando essa afirmação, o índice de desconforto está relacionado direta e indiretamente, ao clima, localização geográfica e altitude, pois esses fatores interferem no desconforto térmico (SOBRINO *et al.*, 2020)

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho, é a região nordeste do Brasil. Dentro desta região escolhemos as nove capitais nordestinas, ou seja, as cidades Fortaleza-CE, Maceió-AL, Salvador-BA, São Luís-MA, João Pessoa-PB, Recife-PE, Teresina-PI, Natal-RN e Aracaju-SE (Figura 1 e Tabela 1)

Figura 1 – Mapa das 9 capitais da Região Nordeste do Brasil



Fonte: Fernandes (2021)

Tabela 1 – Características das capitais da Região Nordeste do Brasil

Capitais Nordestinas e suas características

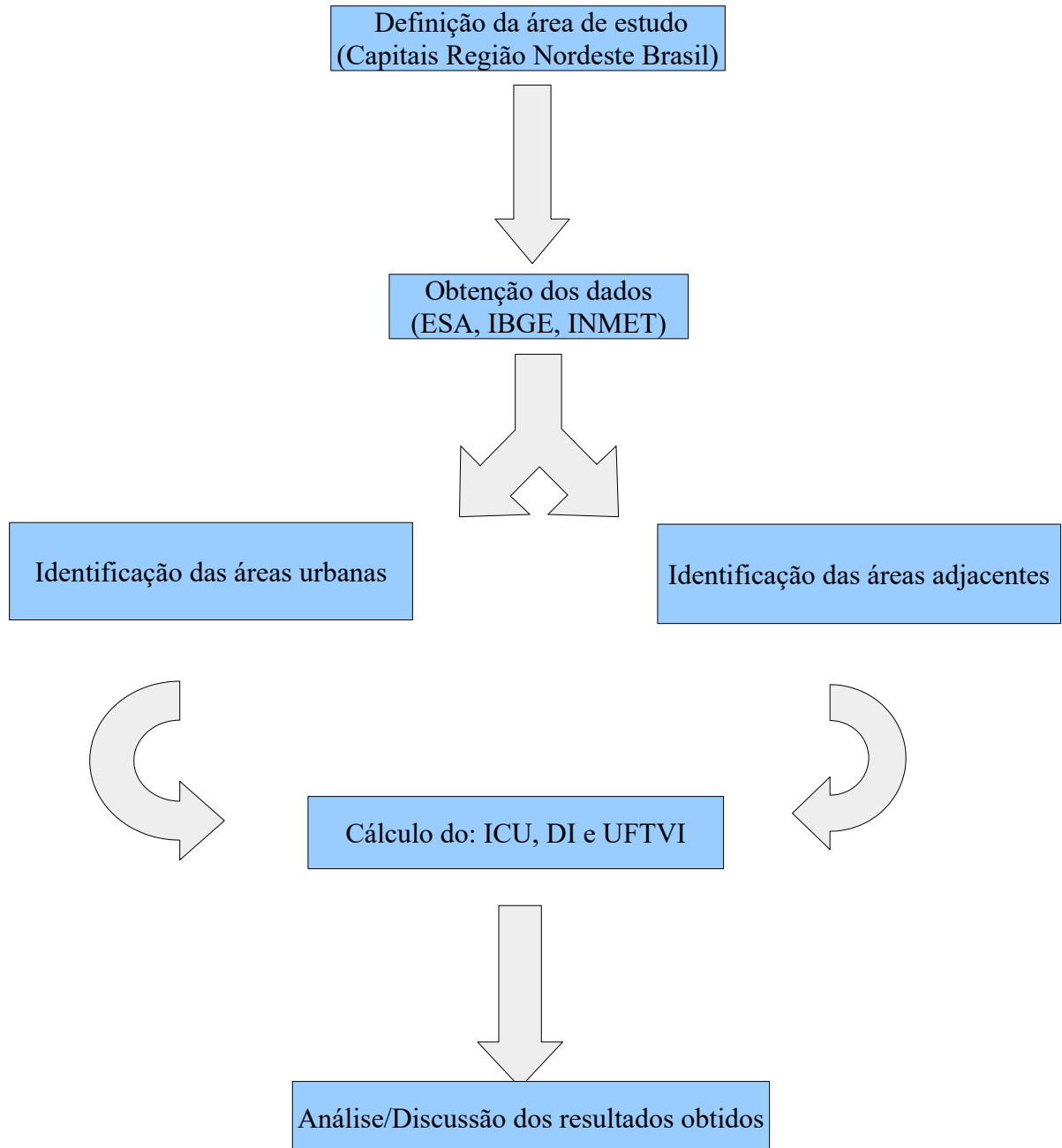
Capitais	Área km <sup>2</sup>	População estimada	Clima predominante
Fortaleza-CE	312,353	2.686.612	Semiárido
Maceió-AL	509,320	1.025.360	Úmido
Salvador-BA	693,453	2.886.698	Superúmido
São Luís-MA	583,063	1.108.975	Semiúmido
João Pessoa-PB	210,044	817.511	Úmido
Recife-PE	218,843	1.653.461	Úmido
Teresina-PI	1.391,293	868.075	Semiárido
Natal-RN	167,401	890.480	Semiúmido
Aracaju-SE	182,163	664.908	Semiúmido

Fonte: IBGE (2021)

Essas áreas foram escolhidas visando aplicar a metodologia proposta por Sobrino *et al.* (2020) para a região Nordeste do Brasil, em cidades de médio e grande porte, sendo algumas inseridas em região de clima semiárido.

## 5 DADOS E METODOLOGIA

A seguir, um fluxograma pontuando as etapas realizadas na metodologia para desenvolver o trabalho.





## 5.1 Dados de satélite

Neste estudo foram utilizados os dados do satélite Sentinel 3 (Figura 2), da ESA, cujas características encontram-se na Tabela 2. A ICU analisada usando o produto LST foi gerada a partir do sensor SLSTR encontrado a bordo do Sentinel 3A. Foram utilizadas imagens do infravermelho termal noturnas, relativas aos anos de 2019 e 2020, pois no período noturno os efeitos da ICU são mais perceptíveis.

Figura 2 – Satélite Sentinel 3 da ESA



Fonte: Agência Espacial Europeia – ESA (2021)

Tabela 2 – Características do Sentinel 3

Satélite Sentinel 3						
Lançamento	Sensor	Resolução	Órbita	Altitude	Inclinação	Período de revisita
16/02/2016	SLSTR	1 km para o termal	Polar/ Heliossíncrona	815 km	98.6°	27 dias

Fonte: Agência Espacial Europeia – ESA (2021)

Na Tabela 3, a seguir, são apresentados o dia e a hora de aquisição das imagens noturnas do Sentinel 3, para cada capital estudada.

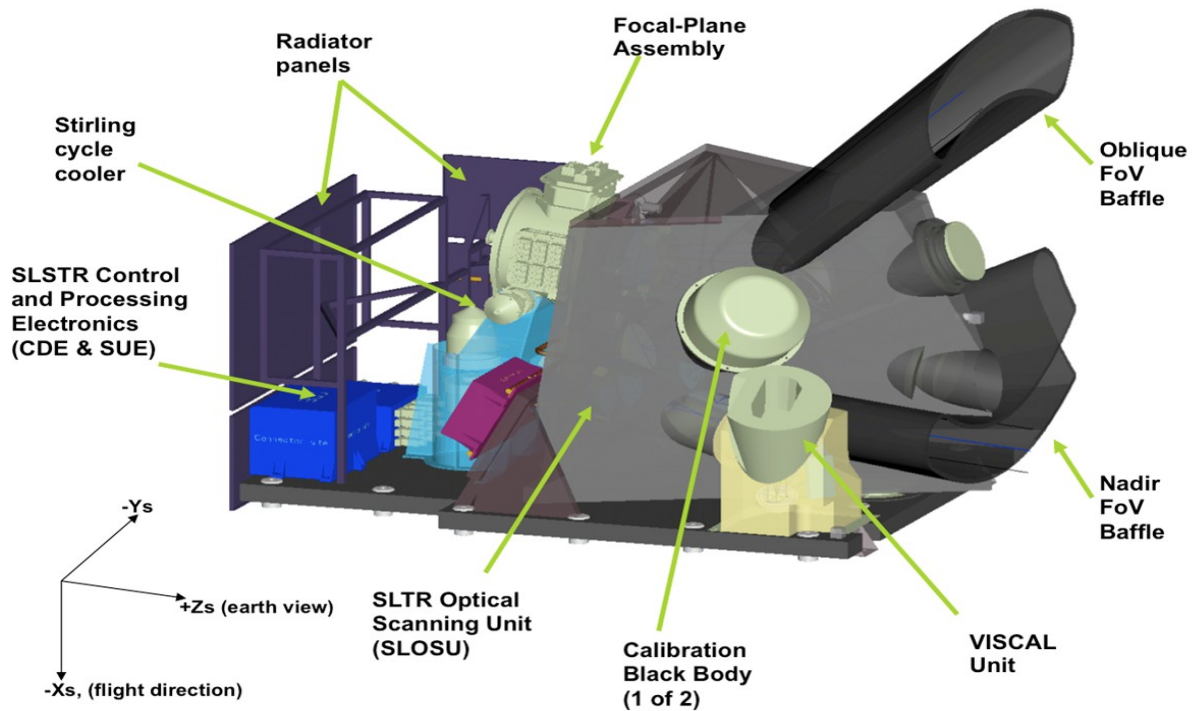
Tabela 3 – Dia e hora da aquisição das imagens Sentinel 3 para as capitais nordestinas

Capital	Data	Hora (GMT)
Fortaleza-CE	14/11/2020	00:21
Maceió-AL	25/02/2020	23:00
Salvador-BA	28/02/2020	23:22
São Luís-MA	29/12/2020	00:55
João Pessoa-PB	28/01/2020	23:26
Recife-PE	28/01/2020	23:26
Teresina-PI	27/11/2019	23:33
Natal-RN	25/02/2020	23:00
Aracaju-SE	28/02/2020	23:22

Fonte: Fernandes (2021)

O SLSTR (Figura 3) o sensor responsável por “medir” a temperatura da superfície da terra, fornece informações importantes para estudos sobre o clima urbano. Este sensor possui uma resolução espacial de 500 metros para as bandas espectrais do visível e da região do infravermelho próximo (intervalo:  $\lambda = 553$  nm até  $\lambda = 2.255$  nm). A banda espectral do infravermelho termal tem resolução espacial de 1 km e opera entre  $\lambda = 3.742$  nm até  $\lambda = 10.854$  nm (ESA, 2020).

Figura 3 – Diagrama esquemático do Sensor SLSTR



Fonte: Agência Espacial Europeia – ESA (2021)

## 5.2 Dados do INMET

Os dados de umidade relativa do ar, para as 9 capitais do Brasil, para calcular o Índice de desconforto (DI), foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no *site* (<https://bdmep.inmet.gov.br/>).

## 5.3 Dados do IBGE

Os *Shapes* das áreas urbanas foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pelo *site* (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>).

## 5.4 Metodologia

### 5.4.1 Seleção da ilha de calor urbana e seus arredores

Com finalidade de selecionar as áreas urbanas, dentro da região em estudo, foram utilizados dados de temperatura da superfície (*Land Surface Temperature* – LST) noturno obtido de dados do satélite Sentinel-3. ICU Máximo e o ICU Médio foram estimados conforme descrito a seguir:

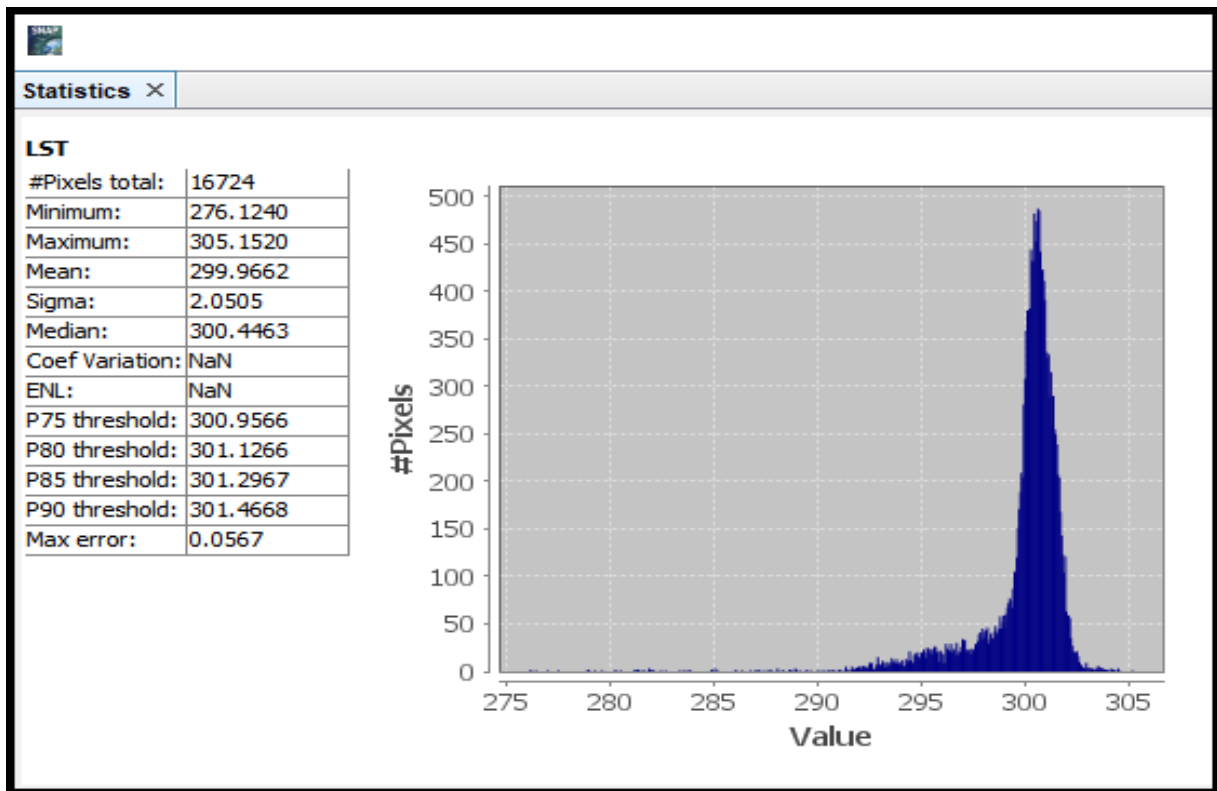
$$(1) \text{ ICU Máximo} = \text{LST Urbano Máximo} - \text{LST médio dos arredores}$$

$$(2) \text{ ICU Médio} = \text{LST Urbano Médio} - \text{LST médio dos arredores}$$

onde, o LST Urbano Máximo é o pixel mais quente, o LST Urbano Médio é a média de temperatura dos pixels que definem a área urbana e o LST médio dos arredores é a temperatura média dos pixels que compõem a área circundante.

O software SNAP, disponibilizado pela ESA, para processamento e análise das imagens dos satélites da série Sentinel, foi utilizado para analisar os parâmetros estatísticos das imagens utilizadas neste trabalho. A Figura 4 apresenta uma das janelas com resultados estatísticos.

Figura 4 – Exemplo das verificações dos parâmetros estatísticos no SNAP



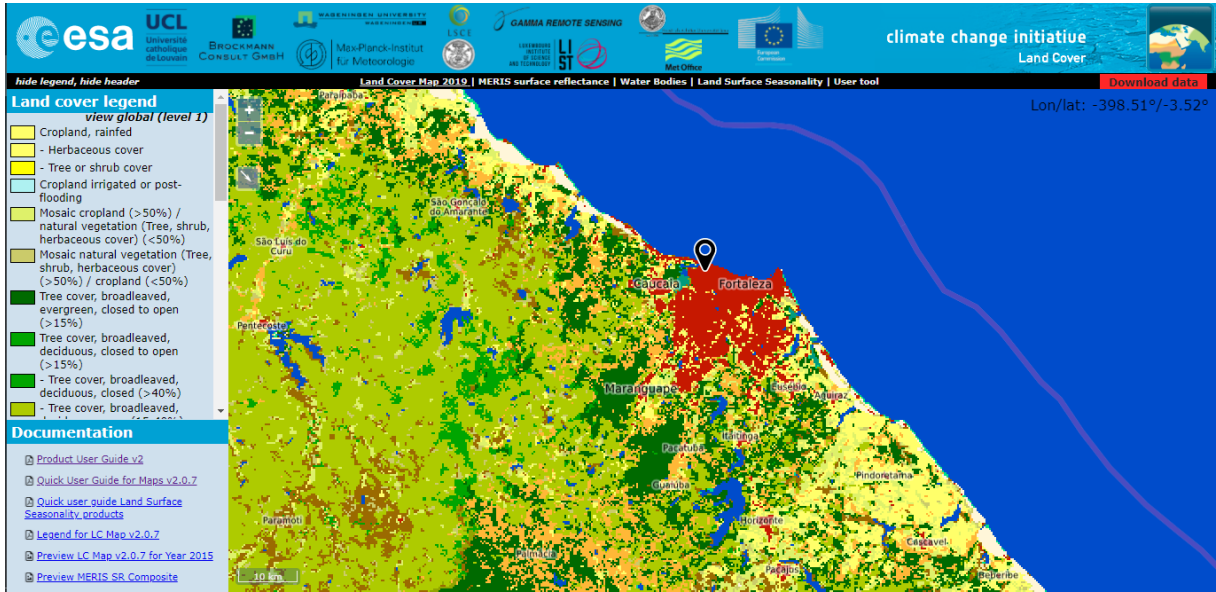
Fonte: Fernandes (2021)

Entretanto, há dificuldade em identificar o urbano e a área circundante. Para resolver tal problema propõe-se estas abordagens:

#### 5.4.1.1 Identificação da área urbana

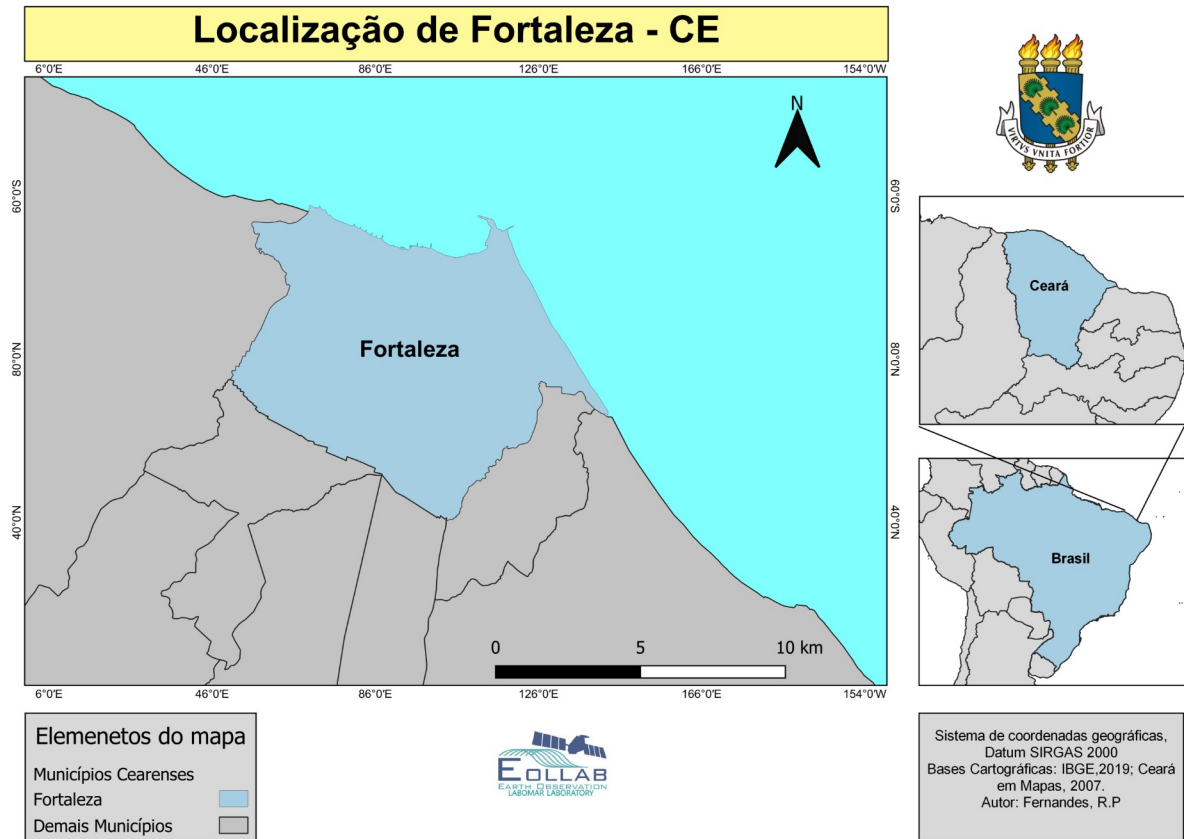
Para identificar a área urbano, Sobrino *et al.* 2020 propõe a utilização de um mapa de cobertura da terra (Figura 5) com representação explícita do aglomerado urbano, fornecido pela Agência Espacial Europeia (ESA, 2020). Entretanto, para assegurar a delimitação de áreas urbanas brasileiras, foi utilizado neste trabalho dados nacionais, mais especificamente do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde foram utilizadas informações das áreas urbanas através dos *shapes* disponíveis no site do instituto. Um exemplo de *shape* para a cidade de Fortaleza-CE é mostrado na Figura 6.

Figura 5 – Mapa de cobertura da terra para a Região Metropolitana de Fortaleza



Fonte: Agência Espacial Europeia – ESA (2019)

Figura 6 – Shape gerado a partir de dados do IBGE para a área urbana de Fortaleza – CE



Fonte: Fernandes (2021)

#### 5.4.1.2 Identificação das áreas adjacentes à área urbana

Quanto aos arredores, serão definidas três áreas de referência diferentes, sendo o adjacente urbano (Su), o adjacente urbano futuro (Sf) e o periurbano (Sp). Além disso, as larguras desses arredores Wu, Wf e Wp respectivamente, foram calculadas da seguinte forma de acordo com Sobrino *et al.* (2020):

$$(3) W_u = 0,25 A^{1/2}$$

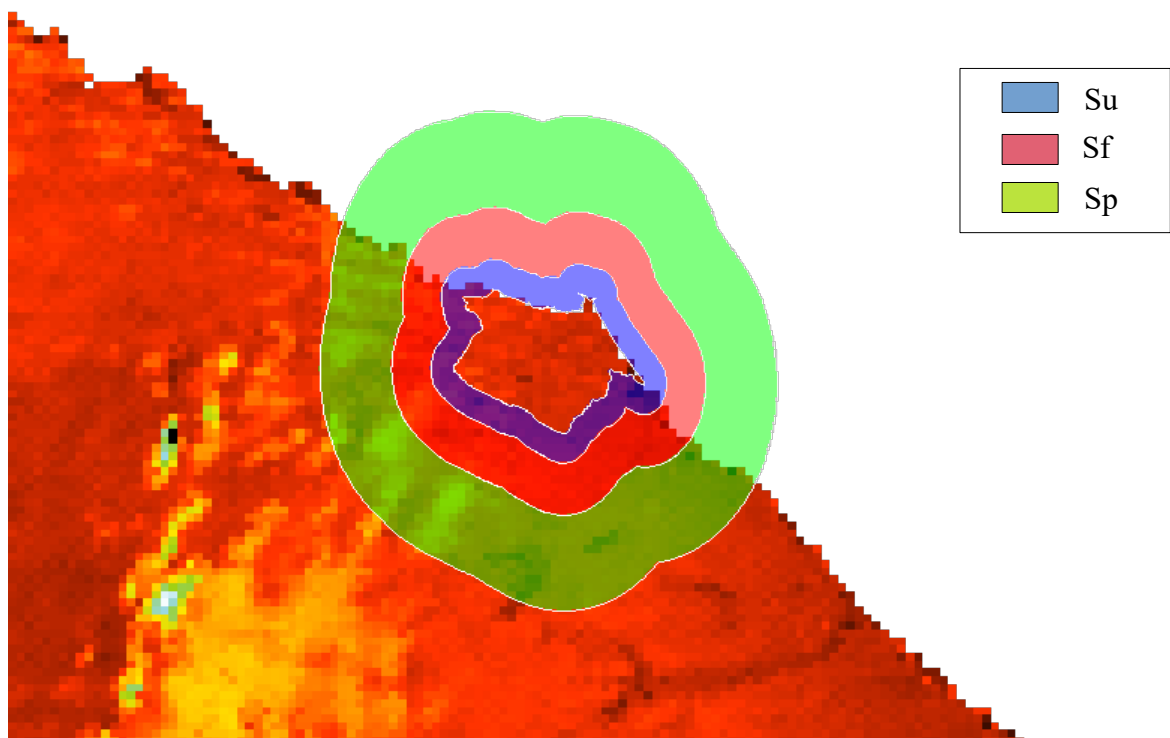
$$(4) W_f = 0,25 A W_u^{1/2}$$

$$(5) W_p = 1,5 A^{1/2} - W_f - W_u$$

nos quais, Wu, Wf e Wp são, respectivamente, a largura do adjacente urbano, do futuro adjacente urbano e do periurbano. Além disso, “A” representa a área do urbano e o AWu é o valor da soma das áreas de A e o Su.

A representação das áreas adjacentes à área urbana foi gerada por meio da ferramenta MMQGIS do software QGIS e gerada a Figura 7.

Figura 7 – Buffers gerados para Fortaleza-CE



Fonte: Fernandes, R. P. (2021)

### 5.4.2 Índices UFTVI e DI

Para complementar a análise da ilha de calor urbana na superfície, foram considerados dois índices adicionais.

#### 5.4.2.1 Índice de Variação do Campo Térmico Urbano (UFTVI)

O índice de Variação do Campo Térmico Urbano (UFTVI) é o mais utilizado para a avaliação térmica ecológica do ambiente urbano devido a sua relação com a LST e considera os impactos térmicos das diferentes subáreas, de acordo com a fórmula abaixo apresentada por Sobrino *et al.* (2020):

$$(6) \text{ UFTVI} = 1 - (\text{LST Urbano Médio} / \text{LST Urbano-Pixel})$$

na qual, LST Urbano-Pixel é a temperatura da superfície em Kelvin, obtido a partir de dados do satélite Sentinel – 3, de um determinado pixel da área urbana (A).

Segundo Sobrino *et al.* (2020), a ilha de calor urbana máxima e média descrevem o efeito da ICU em toda a área urbana e os arredores, enquanto que o UFTVI é usado para avaliar o efeito de cada pixel localizado na área urbana com relação à própria área urbana. Além disso, o índice é dividido em seis níveis por fenômeno de ocorrência de ICU relacionado a avaliação ecológica do ambiente urbano, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Valores limites do cálculo do UFTVI, com o Fenômeno de ICU e o Índice de Avaliação Ecológica

UFTVI	Fenômeno de Ilha de Calor urbana	Índice de Avaliação Ecológica
<0	Nenhum	Excelente
0 – 0.005	Fraco	Bom
0.005 – 0.010	Médio	Normal
0.010 – 0.015	Moderado	Mau
0.015 – 0.020	Forte	Ruim
>0.020	Muito forte	Pior

Fonte: Sobrino *et al.* (2020)



#### 5.4.2.1 Índice de desconforto

Sabemos que a ICU afeta a saúde das pessoas, logo o Índice de Desconforto (DI) é uma medida da reação do corpo humano a uma combinação de calor e umidade, podendo ser estimado da seguinte forma apresentada por Sobrino *et al* (2020):

$$(7) DI = LST - (0,55 - 0,055 UR) (LST - 14,5)$$

na qual, LST é a temperatura da superfície terrestre em de um determinado pixel de A, este devendo ser apresentado em graus Celsius, diferindo neste ponto em relação ao LST Urbano-Pixel, e por fim, o UR é a umidade relativa do ar em %. A umidade relativa do ar neste trabalho foi obtida através de dados *in situ* disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Segundo Sobrino, o DI é dividido em dez categorias, de acordo com a tabela 5.

Tabela 5 – Categorias do DI com relação a temperatura obtida

Categorias DI	Temperatura DI (°C)
Hiper Glacial	<-40
Glacial	-39,9 – -20
Extremamente frio	-19,9 – -10
Muito frio	-9,9 – -1,8
Frio	-1,7 – 12,9
Gelado	13 – 14,9
Confortável	15 – 19,9
Quente	20 – 26,4
Muito quente	26,4 – 29,9
Torrando	>30

Fonte: Sobrino *et al.* (2020)

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de ICU máxima e média, além de UFTVI e o DI devem ser interpretados como resultados do dia e hora obtidos de cada imagem analisada.

Além disso, este trabalho tem o objetivo de analisar a metodologia proposta por Sobrino *et al.* (2020), em que conseguimos identificar alguns pontos de vulnerabilidade nas capitais estudadas, tais como: Elevados valores de temperatura para áreas urbanas, péssimos índices ecológicos para as cidades e sensações térmicas prejudiciais para o ser humano. Identificar essas vulnerabilidades se torna ainda mais importante num contexto de aquecimento, pois, ainda segundo o autor, a tendência do aumento de temperatura global é linear em 0,18 K por década.

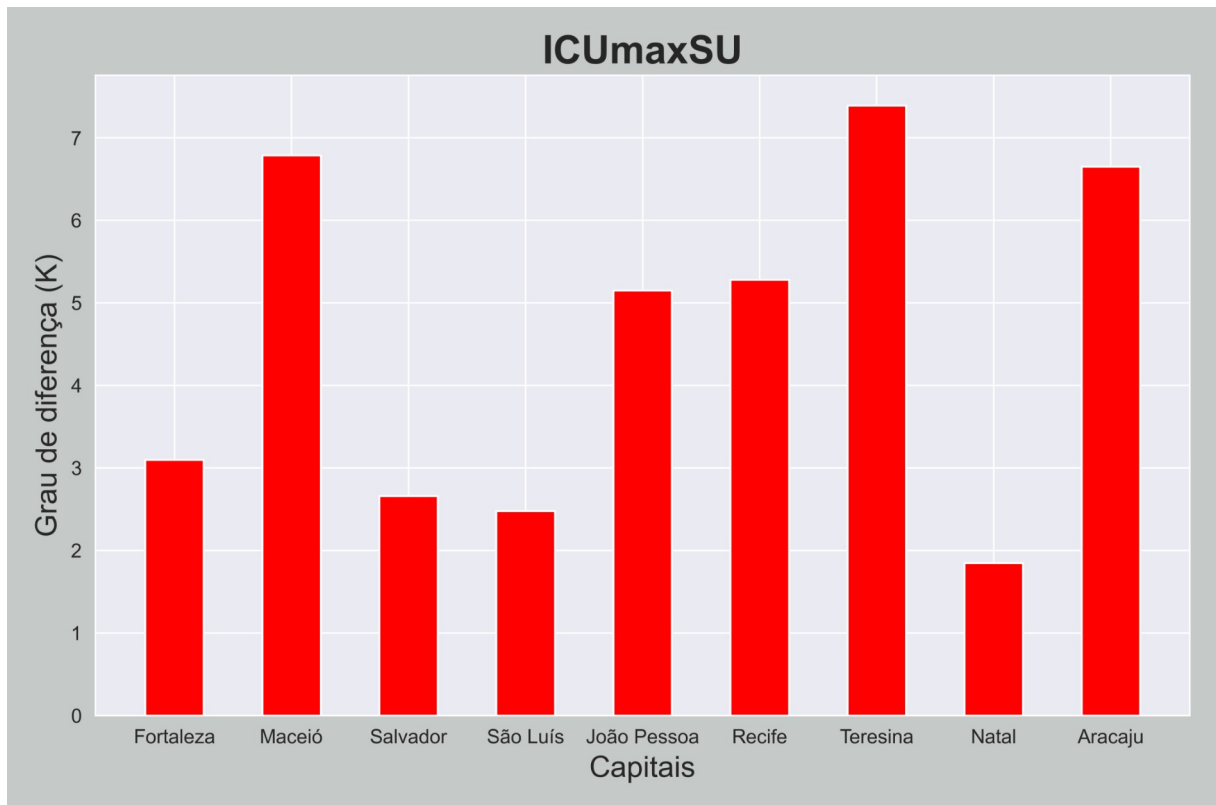
### 6.1 Ilha de calor urbana

Abaixo serão discutidos os resultados obtidos pela fórmula da ICU máxima e média, com dados obtidos com o produto LST do Sensor SLSTR, a bordo do satélite Sentinel-3.

#### 6.1.1 Ilha de calor urbana máxima e média

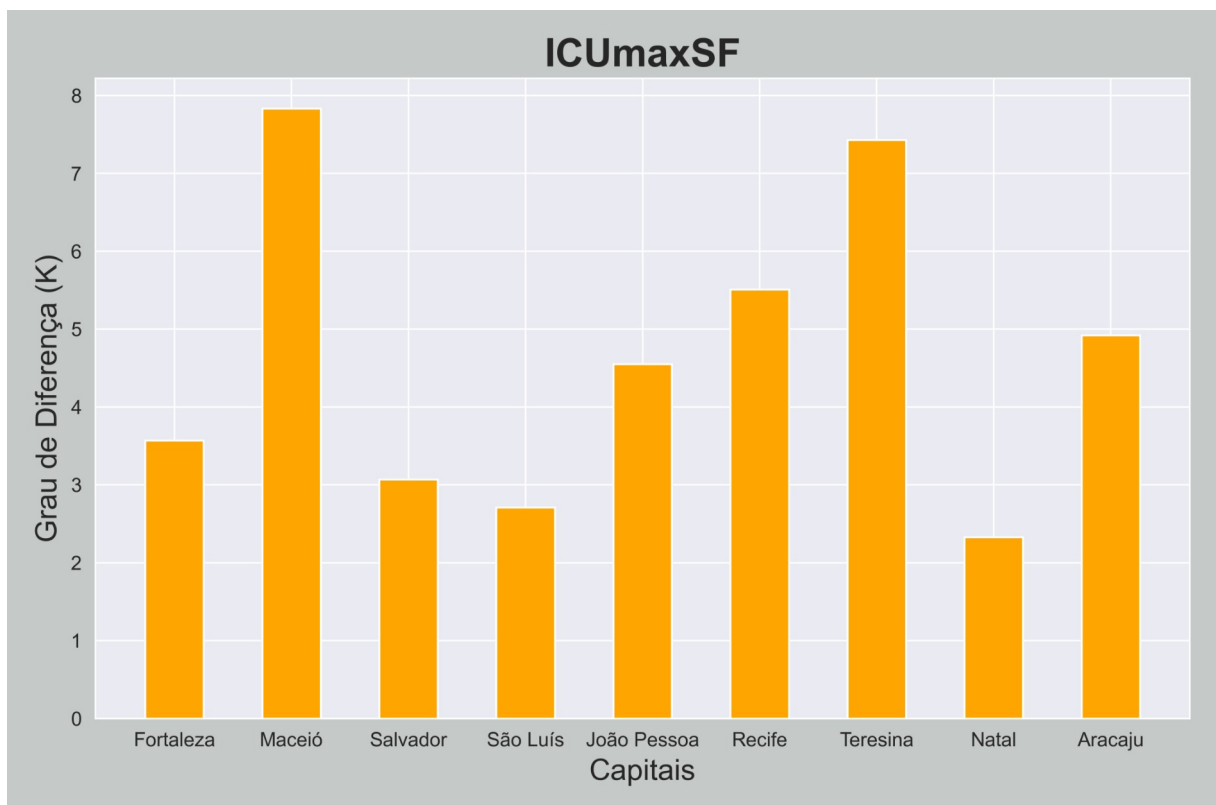
Para o ICU máximo, foram obtidos os seguintes resultados, de acordo com os gráficos de 1 a 3, respectivamente.

Gráfico 1 – Ilha de calor urbana máxima para a Su



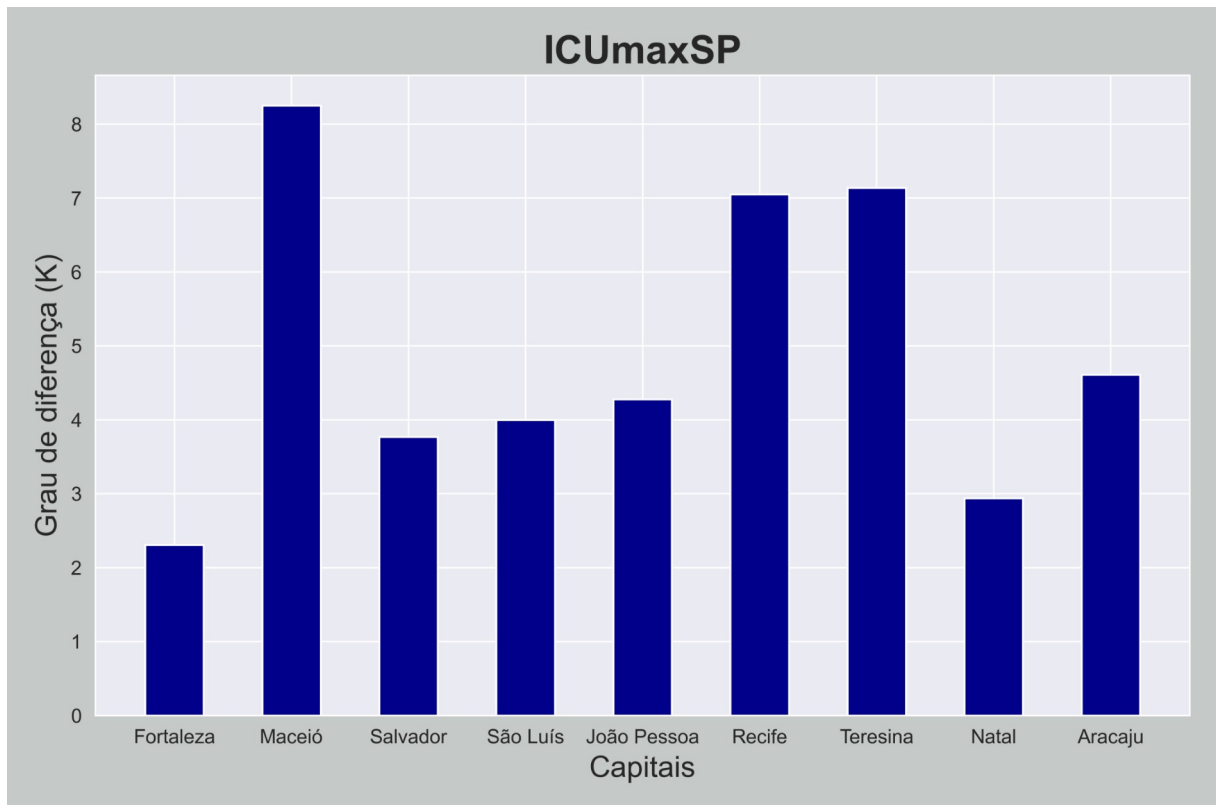
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 2 – Ilha de calor urbana máxima para a Sf



Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 3 – Ilha de calor urbana máxima para a Sp

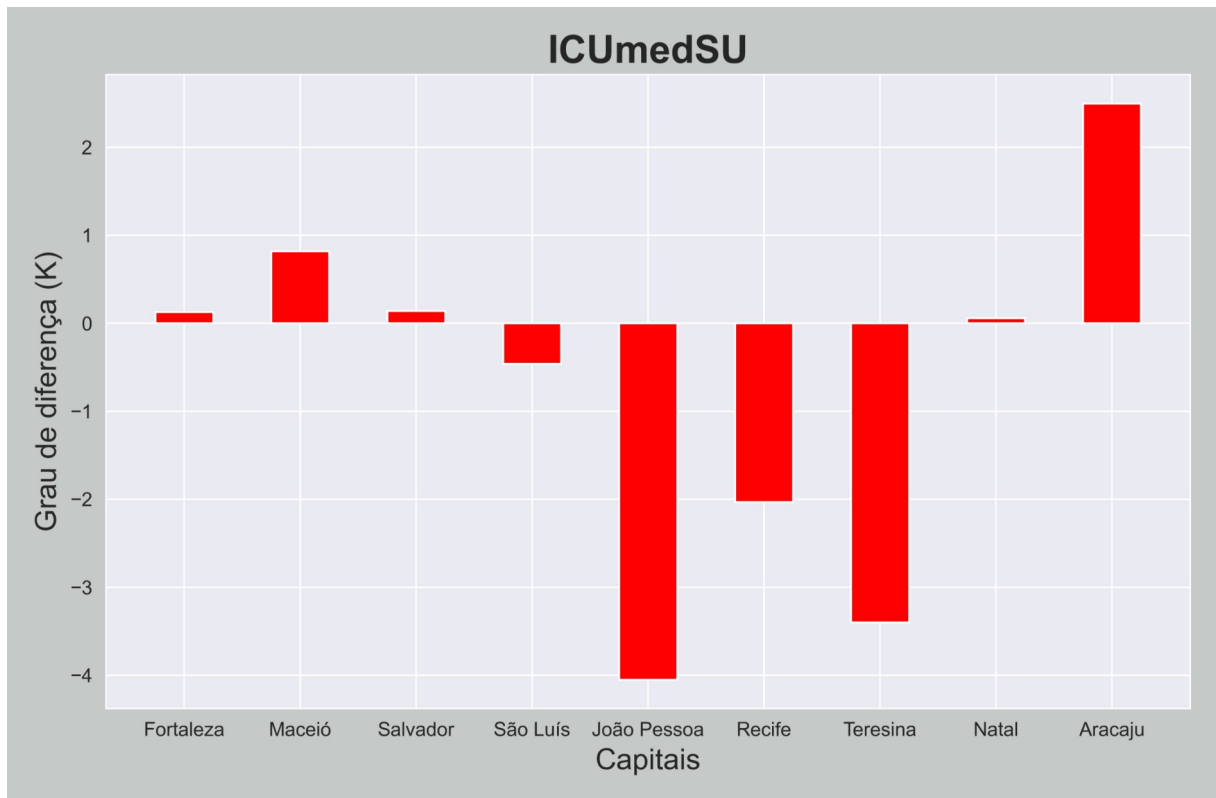


Fonte: Fernandes (2021)

As cidades de Maceió, Salvador, São Luís, Recife e Natal apresentaram os menores valores de  $S_u$  (Gráfico 1) entre as três áreas de referência, logo, as áreas mais próximas do centro urbano apresentaram valores mais elevados de temperatura com relação as suas áreas circunvizinhas. Entretanto, as capitais que obtiveram valores diferentes dos padrões (Gráfico 2 e 3), estas sendo, Fortaleza, João Pessoa, Teresina e Aracaju, obtiveram maiores valores de temperatura para suas áreas adjacentes.

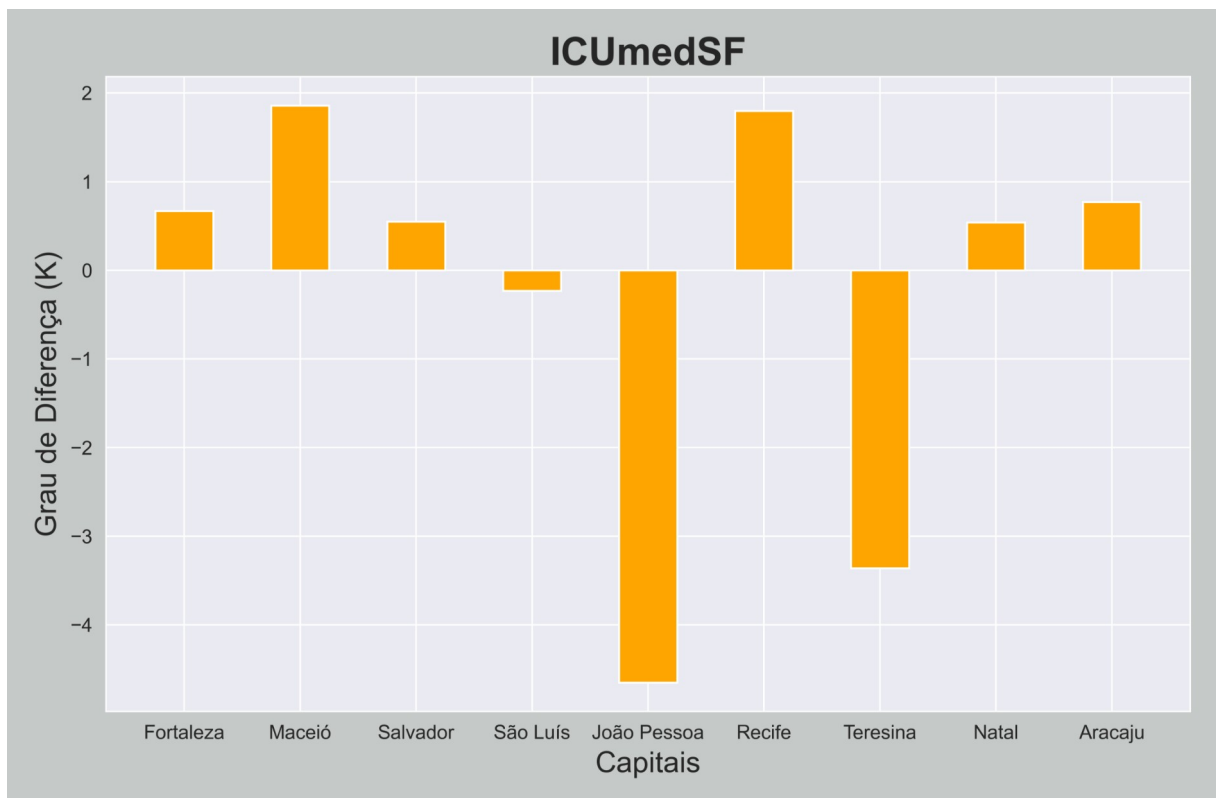
Os valores obtidos para o ICU médio estão representados nos Gráficos 4 a 6.

Gráfico 4 – Ilha de calor urbana média para a Su



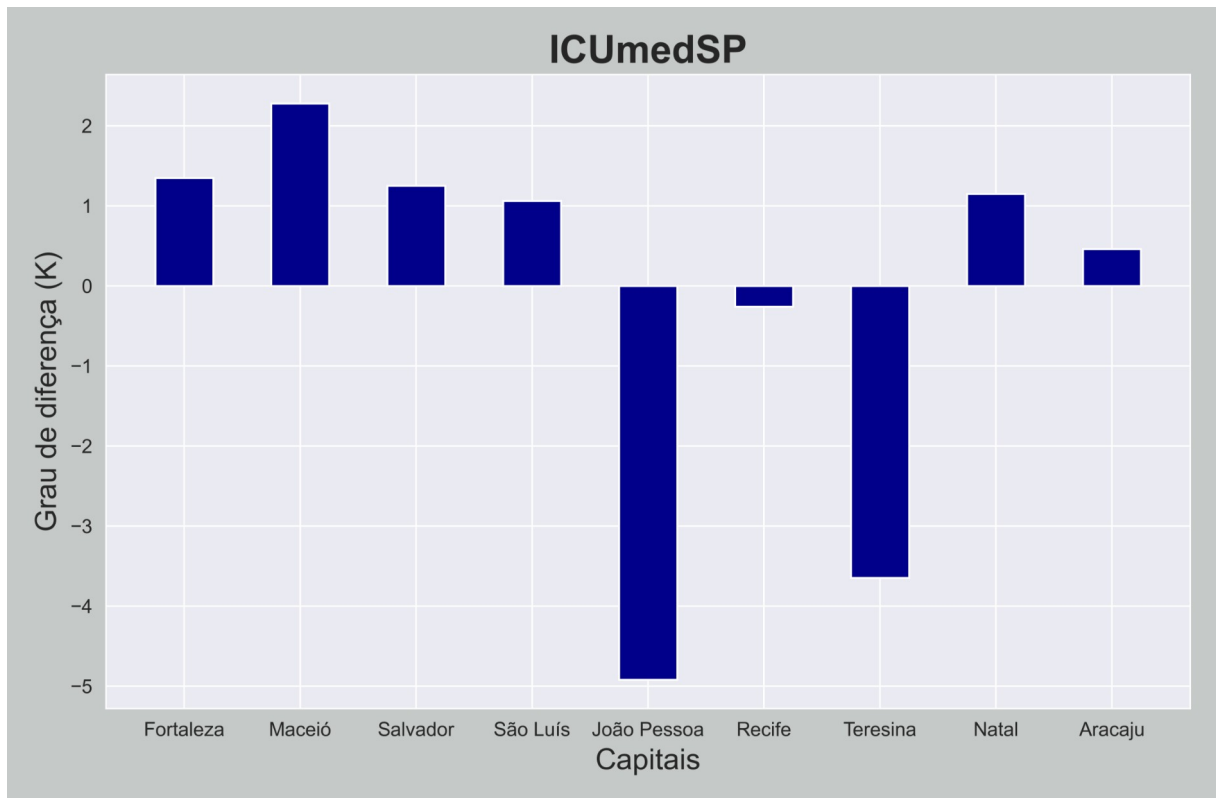
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 5 – Ilha de calor urbana média para a Sf



Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 6 – Ilha de calor urbana média para a Sp



Fonte: Fernandes (2021)

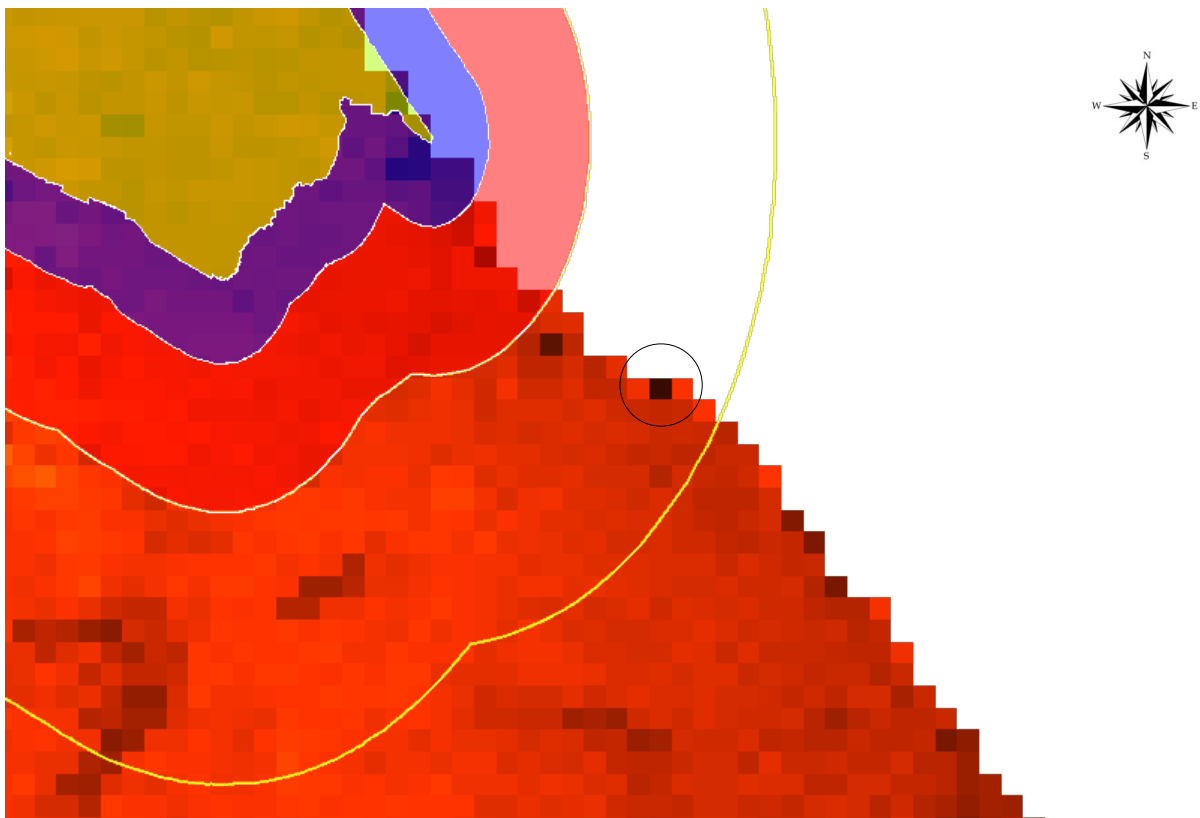
Notamos que para a média dos pixels, a configuração já se alterou um pouco, onde Fortaleza passou a apresentar as suas áreas mais próximas ao centro urbano com temperaturas mais elevadas (Gráfico 4 e Apêndice A, Figura 2A), em torno de 300 K (Apêndice C, Figura 1C), ou seja, aproximadamente 27 °C. Mesmo assim, Maceió, Salvador, São Luís e Natal configuram-se ainda com os valores padrões, onde a zona urbana possui maiores temperaturas (Gráfico 4). Por outro lado, Recife continuou com o seu valor menor em Su, mas o Sf obteve um valor maior (Gráfico 5) em relação ao Su e Sp, sendo assim mais frio nessa zona. Em contrapartida, para Teresina o valor do Sf foi menor (Gráfico 5), caracterizando-se assim como uma zona mais quente, e João Pessoa e Aracaju obtiveram suas zonas mais quentes em suas áreas mais distantes das respectivas zonas urbanas.

Logo, levando em conta que as áreas com vegetação e corpos d'água amenizam o calor acumulado, e áreas com solo exposto e com determinados materiais de construção aumentam a temperatura, foram levantadas hipóteses para explicar os resultados obtidos nas capitais nordestinas.

### 6.1.1.1 Fortaleza-CE

Analisando a ICU máxima de Fortaleza, pode ter ocorrido uma alta temperatura em sua região mais adjacente da área urbana, na Sp, com valor de 2,31, pois o pixel mais quente dessa área estava com uma temperatura elevadíssima de 304,11 K e 30,96 °C. A região em destaque é onde localiza-se Aquiraz (Figura 8), uma região metropolitana bem movimentada e pavimentada, podendo explicar o valor alto para essa análise. Mas em compensação, na ICU média, as médias das temperaturas dos pixels da área urbana da cidade possuem os valores mais elevados, correspondendo a 0,13, explicando a alta temperatura próxima às áreas urbanas, conforme mostrado no Apêndice A, Gráfico 2A.

Figura 8 – Localização do Pixel mais quente de Aquiraz-CE obtido da imagem de Sentinel 3



Fonte: Fernandes (2021)

### 6.1.1.2 Maceió-AL

As áreas adjacentes de Maceió são bastantes vegetadas e possuem muitos corpos hídricos na porção mais ao oeste, conforme Figura 9, podendo explicar a elevada temperatura

nas áreas urbanas em relação às adjacentes tanto no cálculo da ICU máxima e média, com valores de 6,79 e 0,82, respectivamente. (Apêndice A, Gráfico3A e 4A).

Figura 9 – Localização de Maceió-AL



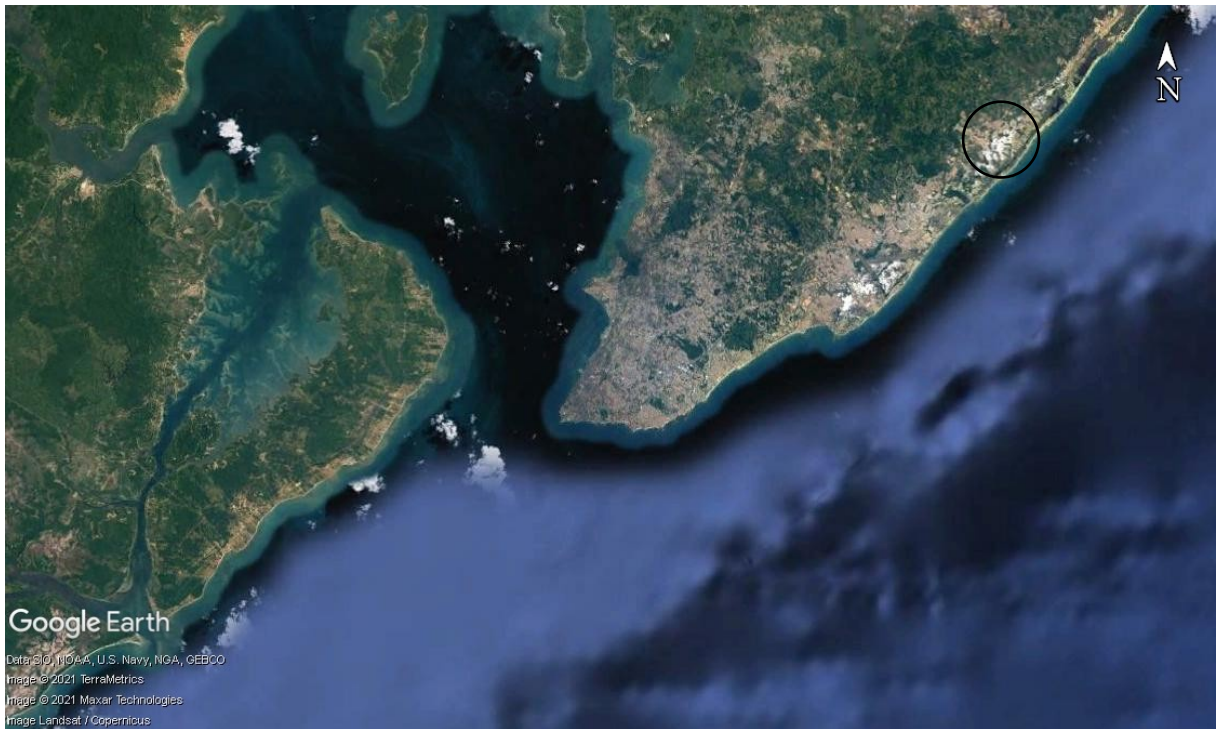
Fonte: Google Earth (2021)

### 6.1.1.3 Salvador-BA

Semelhante a Maceió, Salvador possui corpo hídrico a oeste da cidade e muitas áreas vegetadas nas suas áreas suburbanas, além de apresentar poucas cidades vizinhas nas zonas suburbanas. Enquanto que na ICU média é explícito a área urbana de Salvador possuindo maiores temperaturas do que suas adjacências, com valor de 2,66 na ICU máxima na Su. Entretanto, Sf possui valores bem similares, podendo ser explicado por conta da presença de uma cidade nos arredores de Sf (Figura 10), sendo dessa localidade esse aumento de temperatura.



Figura 10 – Cidade destacada na zona Sf de Salvador-BA



Fonte: Google Earth (2021)

#### 6.1.1.4 São Luís-MA

Na análise do ICU máximo, entre as três áreas de referência, o Su é menor, com o valor de 2,48, conforme pode ser visto no Apêndice A, Gráfico 7A. Logo, as áreas urbanas apresentam maiores temperaturas que seus arredores, onde o mesmo ocorreu para a ICU média, com o valor de 0,46. Vale ressaltar que as áreas ao redor da cidade são vegetadas e possuem corpos hídricos, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Localização de São Luís-MA



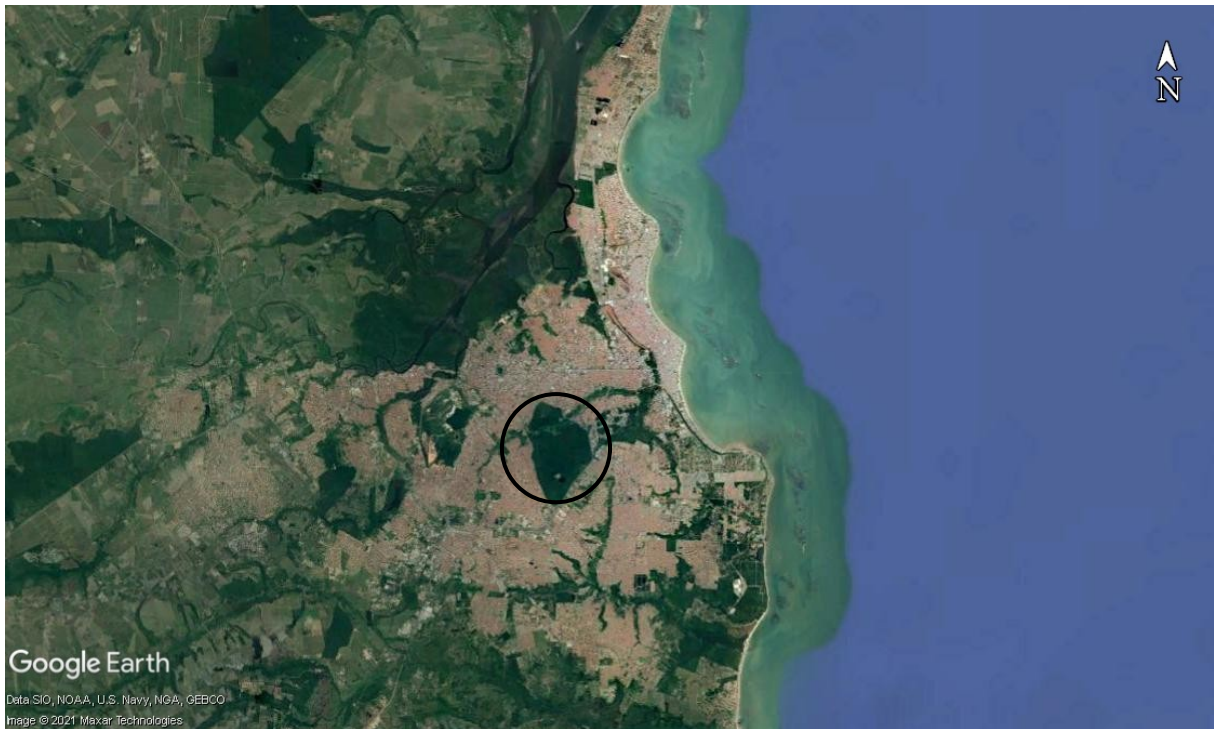
Fonte: Google Earth (2021)

#### 6.1.1.5 João Pessoa-PB

Com a análise da ICU máxima e ICU média de João Pessoa, é possível verificar que as temperaturas do Sp foram maiores para as outras regiões e com relação a área urbana, correspondendo 4,28 e -4,92, respectivamente. (Apêndice A, Gráficos 9A e 10A)

Estes resultados podem ter ocorrido pelo fato de Sp ser uma área com muito solos expostos, além de apresentar áreas com conjuntos habitacionais, justificando as altas temperaturas. Já com relação a temperaturas mais amenas da cidade, a região é bem arborizada em algumas localidades, mais especificamente quando olhamos a região central da cidade, localizando-se o Jardim Botânico, conforme Figura 12, esse possuindo 5 km<sup>2</sup> de extensão, sendo uma área com vegetação remanescente de mata atlântica (SUDEMA, 2021).

Figura 12 – Localização de João Pessoa-PB e seu jardim botânico na parte central da cidade

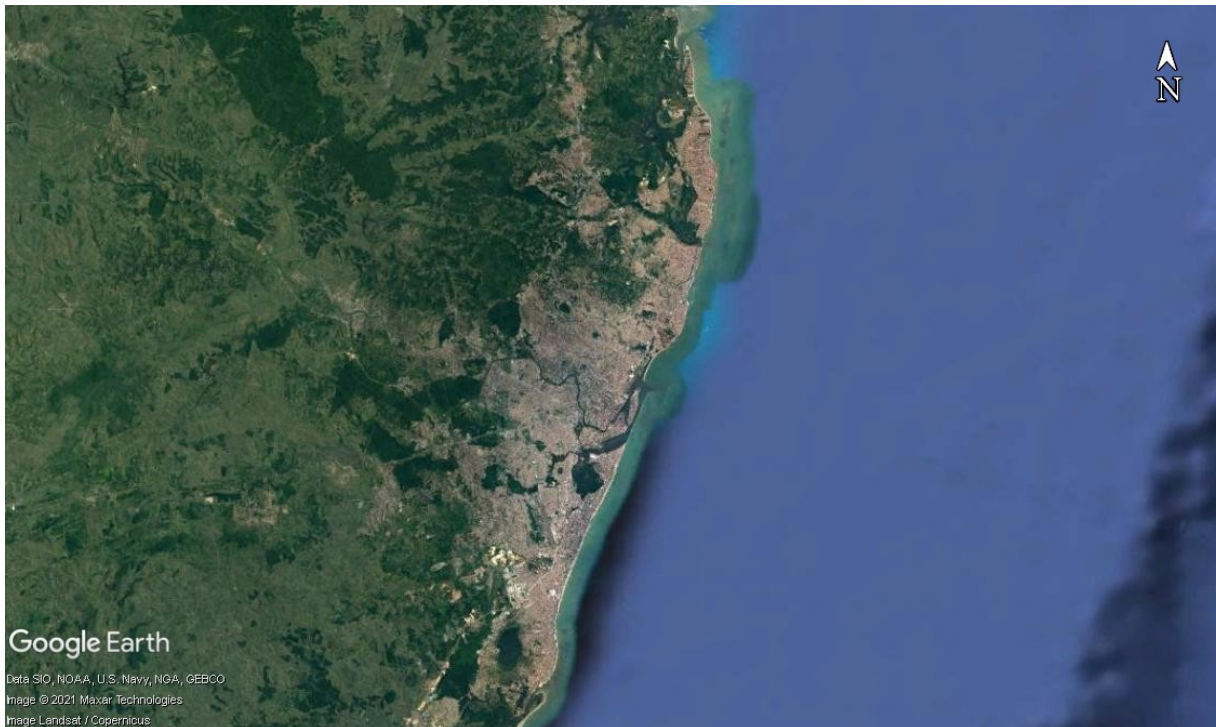


Fonte: Google Earth (2021)

#### 6.1.1.6 Recife-PE

No caso de Recife (Figura 13), no cálculo da ICU máxima e média os valores obtidos entre as regiões de referência foram menores para o Su, com 5.21 e -2.03, respectivamente, entretanto para as outras áreas, o Sp ainda é menor que o Sf, possuindo assim valores mais elevados de temperatura no Sp com relação ao mesmo. Isso pode ser explicado pelo fato de Su e Sp cobrirem mais áreas com solo exposto e edificadas de cidades vizinhas.

Figura 13 – Localização de Recife-PE



Fonte: Google Earth (2021)

#### 6.1.1.7 Teresina-PI

Os valores das áreas definidas em Teresina foram bem próximos, todos por volta de 7. Esta magnitude pode ter ocorrido devido ao fato de que a área urbana e suas áreas circunvizinhas apresentam características semelhantes às da área próxima ao núcleo urbano, como por exemplo, muita presença de solo exposto nos arredores, conforme a Figura 14. Entretanto, a área mais quente foram próximas do Sp, conforme pode ser visto no Apêndice A (Gráfico 14A). Aliás, ocorre vegetação próxima a área da cidade e nas adjacentes mais próximas, ainda com presença de um corpo hídrico, apesar desse ser “sufocado” pela cidade.

Figura 14 – Localização de Teresina-PI



Fonte: Google Earth (2021)

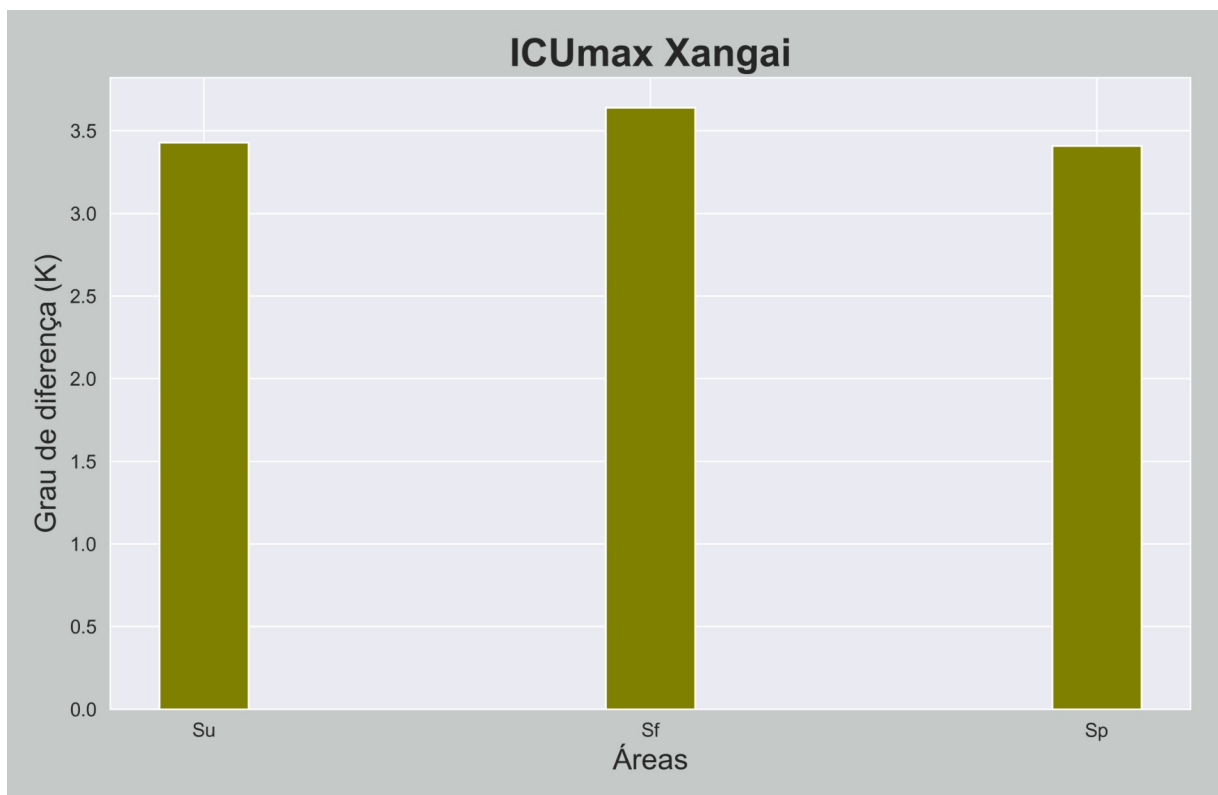
Segundo Sobrino *et al.* 2020, ocorreu um caso semelhante de valores muito próximos do  $S_u$ ,  $S_f$  e  $S_p$ . Conforme apresentado no seu trabalho, as cidades de Atenas, Xangai, Calcutá e Dammam, apresentaram as mesmas condições de Teresina, possuindo arredores parecidos com a área urbana, como exemplificado pela cidade de Xangai na Figura 15 e Gráfico 7.

Figura 15 – Cidade de Xangai, com áreas adjacentes com características semelhantes com a área da cidade



Fonte: Google Earth (2021)

Gráfico 7 – Valores da Cidade de Xangai



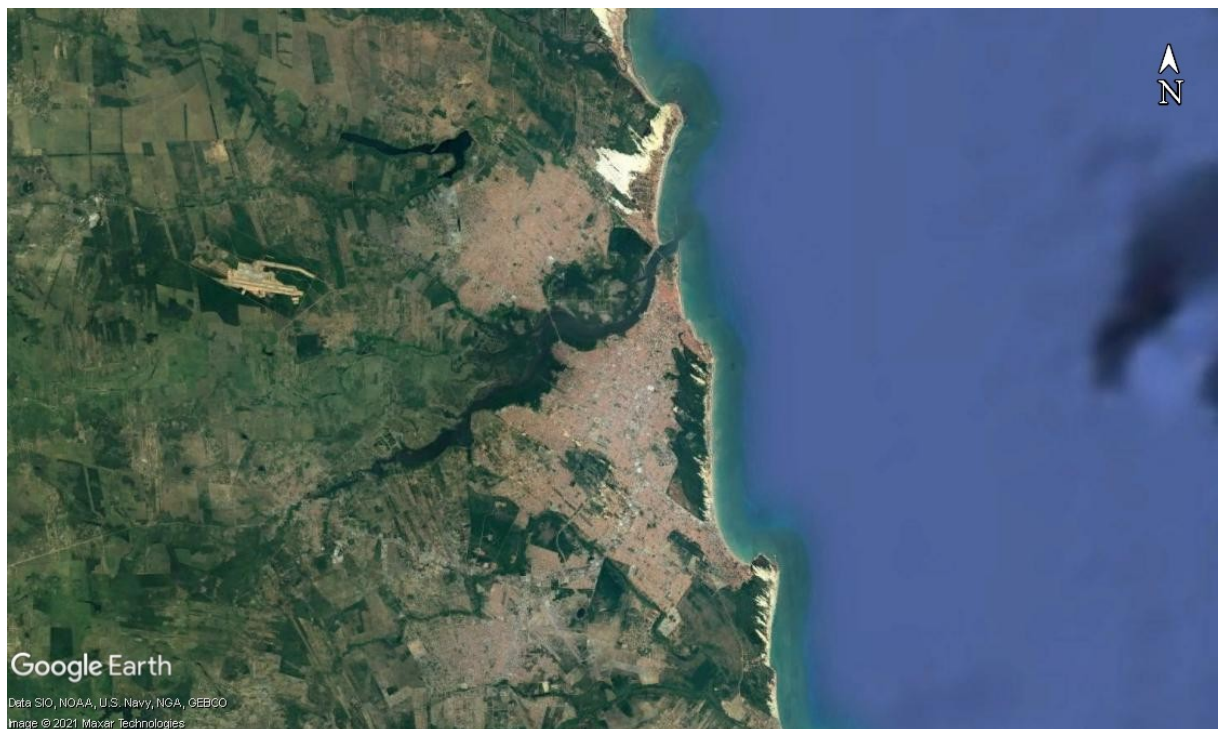
Fonte: Sobrino, *et al.* (2020)

#### 6.1.1.8 Natal-RN

Em Natal (Figura 16), os valores de Su foram menores para os dois cálculos de ICU máxima e média, 1,85 e 0,06, respectivamente, onde configura-se a zona urbana desta cidade bem quente em relação aos os seus arredores, levando em conta que possui bastante áreas vegetadas nas áreas adjacentes (Apêndice B, Figura 8B). Contudo, mesmo que possua um corpo hídrico significativo na cidade, ele é cercado por edifícios e construções, além de somar as poucas áreas verdes na cidade.

Levando em conta o estudo de Sobrino *et al.* (2020), das 71 cidades analisadas pelo autor, 68 apresentaram resultados similares ao de Natal, onde as suas Ilhas de Calor Urbanas (ICU) máximas e médias, nos dois casos, foram com elevados valores de temperatura próximo da área urbana em relação às áreas adjacentes.

Figura 16 – Localização de Natal-RN



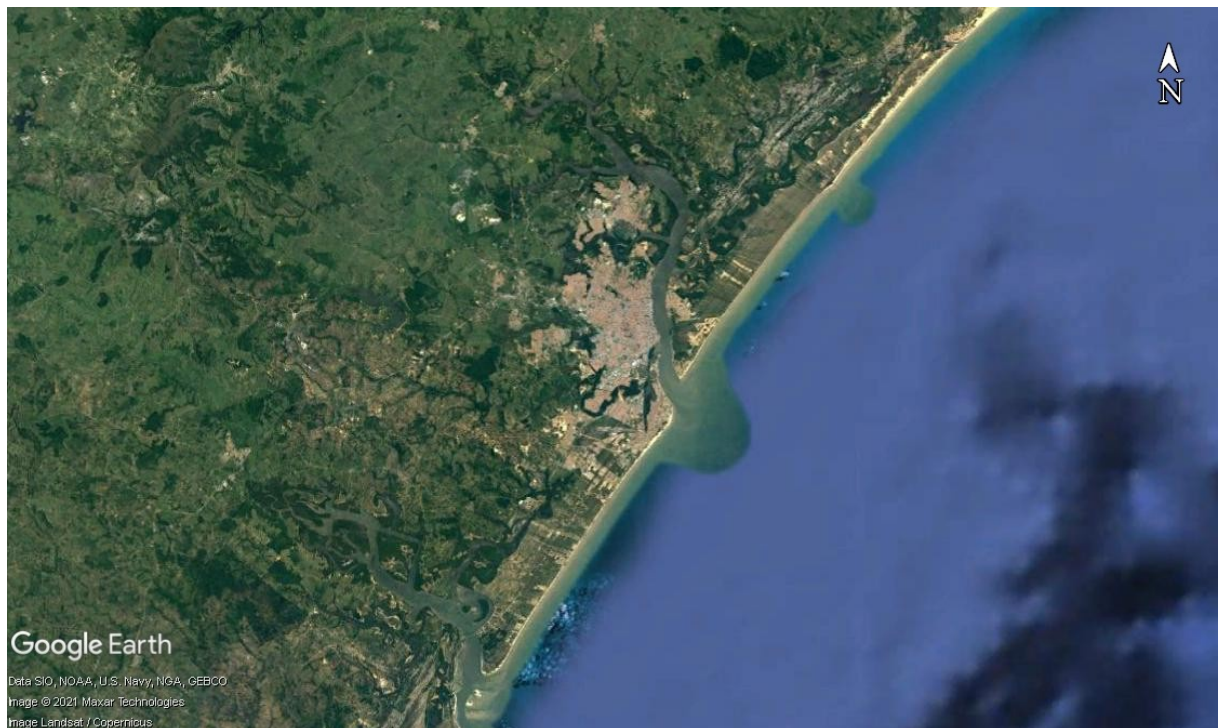
Fonte: Google Earth (2021)

#### 6.1.1.9 Aracaju-SE

No caso de Aracaju, o Sp apresentou os menores valores para os dois cálculos de

ICU máxima e média, com 4,61 e 0,46, respectivamente, principalmente quando analisada a média, conforme os gráficos no Apêndice A, Gráficos 17A e 18A. Além disso, a cidade possui algumas áreas vegetadas, margens de rios com mata ciliar e seus arredores próximos também possuem esses elementos, podendo justificar a ocorrência de menores temperaturas com relação a Sp, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Localização de Aracaju-SE



Fonte: Google Earth (2021)

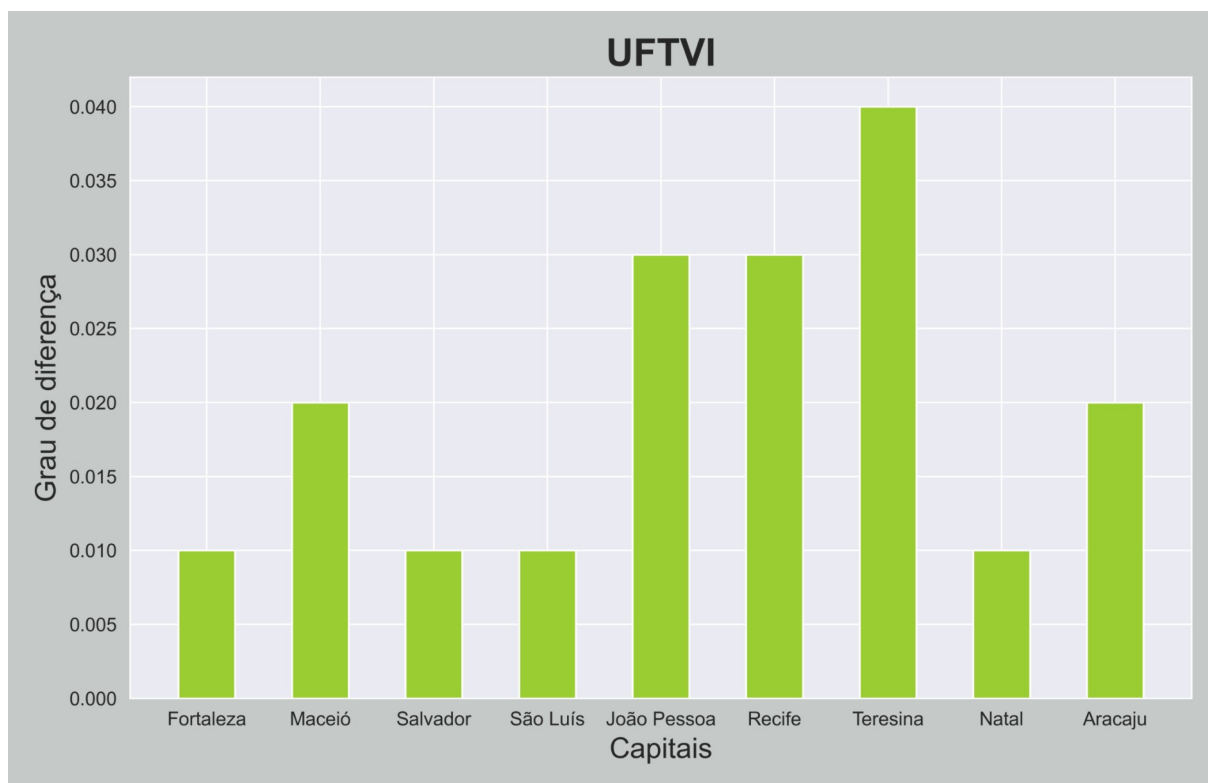
## 6.2 Índice de variação do campo térmico urbano

Para os valores de UFTVI, os maiores foram para João Pessoa, Recife e Teresina, conforme Gráfico 8, no qual esses valores foram acima de 0,020, possuindo um fenômeno de ilha de calor muito forte e os seus índices ecológicos sendo considerados os piores, conforme a Tabela 2. Ademais, Maceió e Aracaju apresentaram o fenômeno forte e as capitais restantes apresentaram os fenômenos de médio para forte. Entretanto, vale ressaltar que esses resultados são para as regiões da cidade com os pixels mais quentes de cada área urbana (Figura 18), configurando assim que essas áreas da cidade possuem médias, fortes e/ou muito fortes fenômenos de ilha de calor urbana naquela região em específico da área da cidade



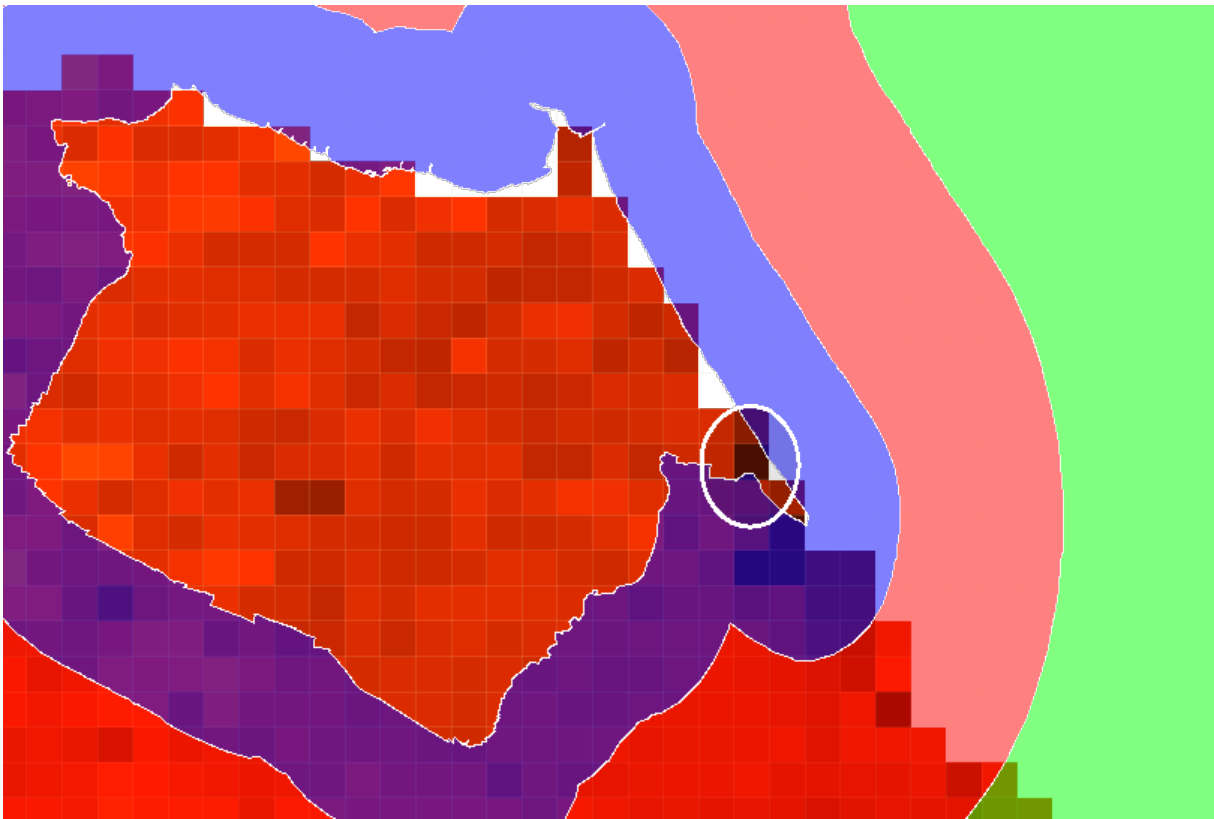
analisada, e assim também um eco ambiente normal, mal e/ou ruim.

Gráfico 8 – Gráfico do Índice de Variação do Campo Térmico Urbano (UFTVI)



Fonte: Fernandes (2021)

Figura 18 – Pixel mais quente da área urbana de Fortaleza-CE gerado a partir da imagem de Sentinel 3.



Fonte: Fernandes (2021)

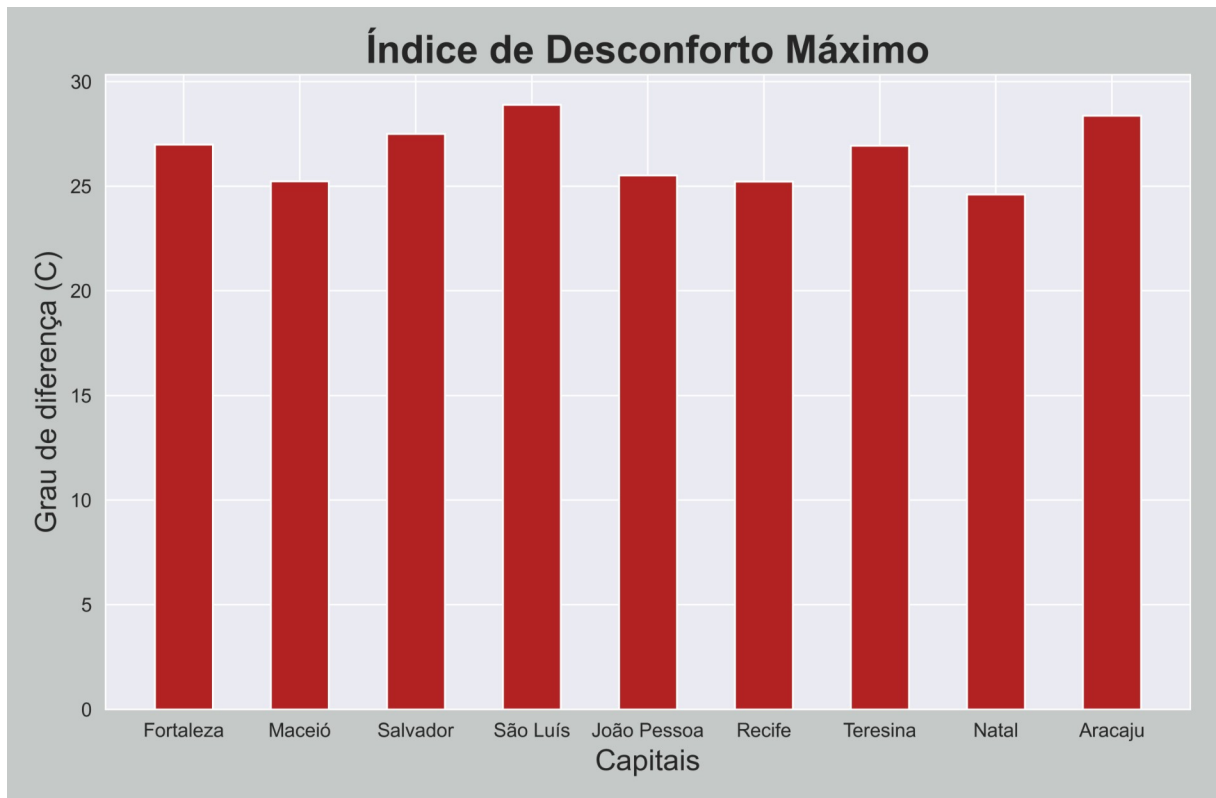
### 6.3 Desconforto térmico

Nas análises a seguir, apresentaremos o índice de desconforto térmico, indicando a influência da percepção das pessoas sobre a temperatura ao seu redor.

#### 6.3.1 *Desconforto térmico Máximo*

Para os pixels mais quentes da área urbana (Gráfico 9), o desconforto térmico foi Muito Quente, para Fortaleza, Salvador, São Luís, João Pessoa, Teresina e Aracaju. As demais áreas obtiveram classificação Quente.

Gráfico 9 – Gráfico referente aos pixels mais quentes



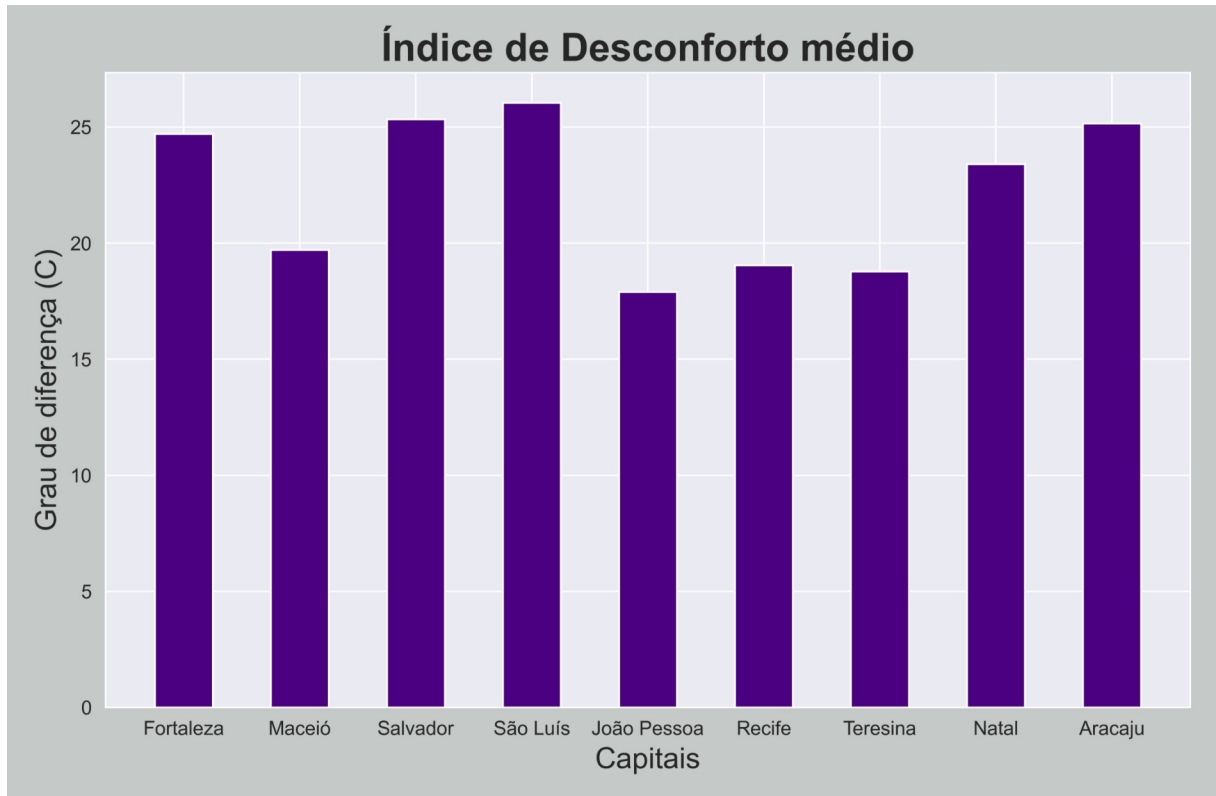
Fonte: Fernandes (2021)

Esses valores demonstram que todas as capitais, para as suas áreas mais quentes, estão com o conforto térmico acima de 20 °C, ou seja, acima do confortável para a população.

### 6.3.2 Desconforto térmico Médio

Para as médias dos pixels de cada área urbana (Gráfico 10), a classificação Muito Quente foi somente para São Luís; Quente para Salvador, Aracaju, Fortaleza e Natal e; Confortável para Maceió, Recife, Teresina e João Pessoa.

Gráfico 10 – Gráfico referente às médias dos pixels



Fonte: Fernandes (2021)

Esses resultados acima, demonstram que para a média dos pixels da área urbana, a maioria das capitais, 5 delas, apresentam o conforto térmico acima de 20 °C, sendo acima do confortável para a população.

#### 6.4 Resumo dos resultados

Segue abaixo, na Tabela 6 um resumo dos principais resultados obtidos para as capitais analisadas, onde LST é a temperatura média em Kelvin da área urbana. As colunas 3 a 8 representam os valores de  $S_u$ ,  $S_f$  e  $S_p$  para a ICU máxima e média, respectivamente. O UFTVI e DI estão representados por seus valores máximos e a Data é o dia da imagem obtida pelo satélite Sentinel 3.

Tabela 6 – Resumo dos principais resultados

Cidade	LST(K) Médio	ICU Su Máximo	ICU Sf Máximo	ICU Sp Máximo	ICU Su Médio	ICU Sf Médio	ICU Sp Médio	UFTVI Máximo	DI Máximo	Data
Fortaleza	300,54	3,10	3,57	2,31	0,13	0,67	1,35	0,01	26,99	14/11/20
Maceió	293,28	6,79	7,83	8,25	0,82	1,86	2,28	0,02	25,24	25/02/20
Salvador	300,33	2,66	3,07	3,77	0,14	0,55	1,25	0,01	27,50	28/02/20
São Luís	299,86	2,48	2,71	4,00	-0,46	-0,23	1,06	0,01	28,89	29/12/20
João Pessoa	291,77	5,15	4,55	4,28	-4,05	-4,65	-4,92	0,03	25,52	28/01/20
Recife	293,04	5,28	5,51	7,05	-2,03	1,80	-0,26	0,03	25,23	28/01/20
Teresina	293,41	7,39	7,43	7,14	-3,40	-3,36	-3,65	0,04	26,94	27/11/19
Natal	297,97	1,85	2,33	2,94	0,06	0,54	1,15	0,01	24,61	25/02/20
Aracaju	301,40	6,65	4,92	4,61	2,50	0,77	0,46	0,02	28,37	28/02/20

Fonte: Fernandes (2021)

Como já observado na parte de Resultados, os valores da Ilha de calor Urbana máxima e média de Natal-RN para as três áreas de referência foram similares as 68 cidades estudadas por Sobrino *et al.* (2020). Como pode ser visto na Tabela 6, os valores da ICU máxima e média, para Maceió-AL, Salvador-BA e São Luís-MA foram similares aos apresentados por Natal-RN.

Ressalta-se, a cidade de Teresina, conforme pode ser observado na Tabela 6, os valores de ICU máxima e média foram todos bem próximos

## 7 CONCLUSÃO

A obtenção da temperatura da superfície a partir do sensoriamento remoto permitiu estimar a ICU e a diferença de temperatura da superfície em relação as áreas adjacentes da cidade, mas para melhor detectar e estimar essas diferenças de temperatura, é necessário uma adequada seleção desses arredores urbanos. Levando estes fatos em consideração, utilizamos a metodologia proposta por Sobrino *et al.* (2020) para calcular de maneira mais acurada os efeitos da ICU nas cidades de Fortaleza-CE, Maceió-AL, Salvador-BA, São Luís-MA, João Pessoa-PB, Recife-PE, Teresina-PI, Natal-RN e Aracaju-SE da região nordeste do Brasil.

Neste trabalho, foi utilizado dados locais do IBGE para obter a área urbana (A) e assim localizar as áreas de referência dos arredores, sendo o Su, Sf e Sp, localizados por cálculos que dependem exclusivamente da área urbana. Além de ser efetuado o cálculo da ICU máxima e média da área urbana para cada área de referência.

Os dados bases da metodologia foram retirados do produto da temperatura de superfície do sensor SLSTR, este a bordo do satélite Sentinel 3 da ESA, onde foram retiradas imagens entre os anos de 2019 e 2020, das 9 capitais nordestinas.

Com os dados obtidos, a maioria das capitais obtiveram valores de ICU mais elevados que seus arredores. Para fazermos esta inferência foi levado em consideração fatores como falta de áreas vegetadas, sem presença ou corpos hídricos “sufocados” pela cidade, áreas com solo exposto e presença de materiais que retêm muito calor e energia do sol, todos esses são motivos para o aumento nas áreas urbanas e seus arredores, aspectos esses presentes nas áreas de estudo.

Os índices (UFTVI e DI) ajudam a complementar o estudo, no qual para o Índice de Variação do Campo Térmico Urbano, é verificado que para as regiões mais quentes da área urbana, as capitais apresentam resultados que comprovam que o espaço da cidade em questão apresenta um péssimo índice ecológico, de acordo com a classificação da Tabela 4 e resultados do Gráfico 8. Quanto ao Índice de Desconforto, também verificamos valores desconfortáveis termicamente para a população em geral (Tabela 5 e Gráficos 9 e 10).

Conclui-se, com os cálculos realizados neste trabalho, que os índices utilizados nessas análises poderiam ser usados pelos gestores urbanos na configuração futura da cidade.

Além disso, este trabalho foi utilizado para validar a metodologia proposta por Sobrino *et al.* (2020), sendo um trabalho pioneiro para as capitais da região nordeste do Brasil, região esta inserida no semiárido brasileiro.

## REFERÊNCIAS

- BRACARENSE, L. dos S. F. P. *et al.* Índices de conforto térmico: limitações e variações de classificação. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 8., 2018, Coimbra. **Paper**. Coimbra: Pluris, 2018. p. 1-13.
- CAVALCANTE, R. M. *et al.* Caracterização de Cânions Urbanos e seus Efeitos Climáticos em Área com Intenso Processo de Verticalização na Cidade de Fortaleza, Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.I.], v.10, n.04, 1046-1058, maio 2017. ISSN 1984-2295.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA (org.). **Applications**: Copernicus sentinel-3. 2016. Disponível em: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2016/01/Copernicus\\_Sentinel-3](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/01/Copernicus_Sentinel-3). Acesso em: 20 mar. 2021.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA (org.). **Instrument**. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr/instrument>. Acesso em: 30 mar. 2021.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA (org.). **Sentinel online**. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3>. Acesso em 15 jan. 2021.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA (org.). **Climate Change Initiative Land Cover**. 2015. Disponível em: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- FRANCO, F. M. *et al.* CLIMA URBANO: UM ESTUDO DE CASO PARA CLIMA TROPICAL CONTINENTAL. **Climep – Climatologia e Estudos da Paisagem**, Rio Claro, v. 5, n. 1, p. 81-89, jun. 2010.
- GARTLAND, L., 2010. **Ilha de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. Tradução: Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2, 248 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Geociências**. Disponível online: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de dados**. Disponível online: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- LIU, L. *et al.* Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: a case study in hong kong. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 3, n. 7, p. 1535-1552, 13 jul. 2011. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs3071535>.
- MARIN, F. R. *et al.* **Clima e Ambiente**: introdução à climatologia para ciências ambientais. Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2008. 127 p.
- SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO DO MEIO AMBIENTE – SUDEMA. **JardimBotânico**. Disponível online: <http://sudema.pb.gov.br/servicos/servicos-ao-publico/jardim-botanico>. Acesso em: 12 mar. 2021.

PEREIRA, V. da C. *et al.* Estimativa do Índice de Desconforto Térmico em Planaltina-DF. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19., 2015, Lavras. **Livro**. Lavras: SBAGRO, 2015. p. 1-5.

SANTOS, T. O. dos. **Identificação de ilhas de calor em Recife-PE por meio de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de superfície**. 2011. 54 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SOBRINO, J. A. *et al.* A Methodology for Comparing the Surface Urban Heat Island in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 2052, 25 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12122052>.

THOM, E. C.. The Discomfort Index. **Weatherwise**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 57-61, abr. 1959. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>.

TRINDADE, P. M. P. *et al.* UTILIZAÇÃO DO INFRAVERMELHO TERMAL NA ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E ILHAS DE CALOR URBANAS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Porto Alegre, n. 69/4, p. 837-855, abr. 2017.

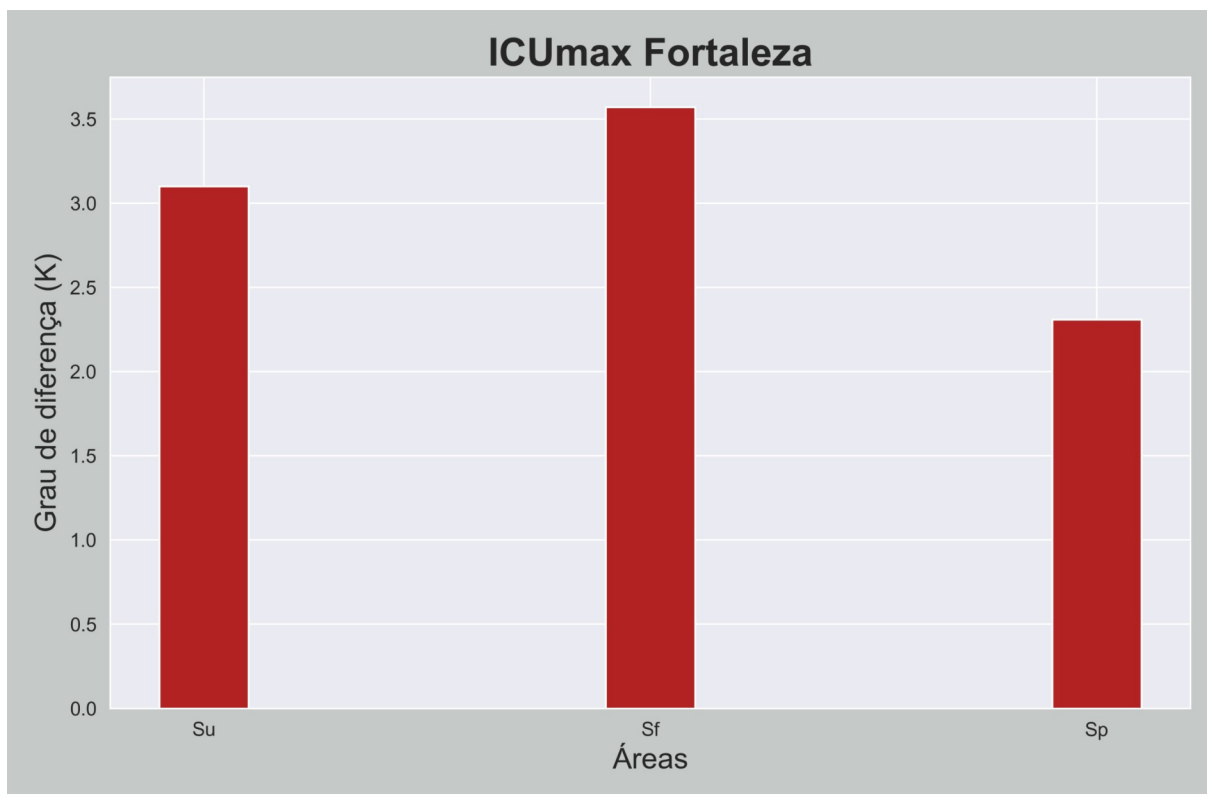
XIONG, Y. *et al.* The impacts of rapid urbanization on the thermal environment: A remote sensing study of Guangzhou, South China. **Remote Sensing**, [S.L.], v.4, n.7, p.2033-2056, 6 jul. 2012. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs4072033>.



## APÊNDICE A

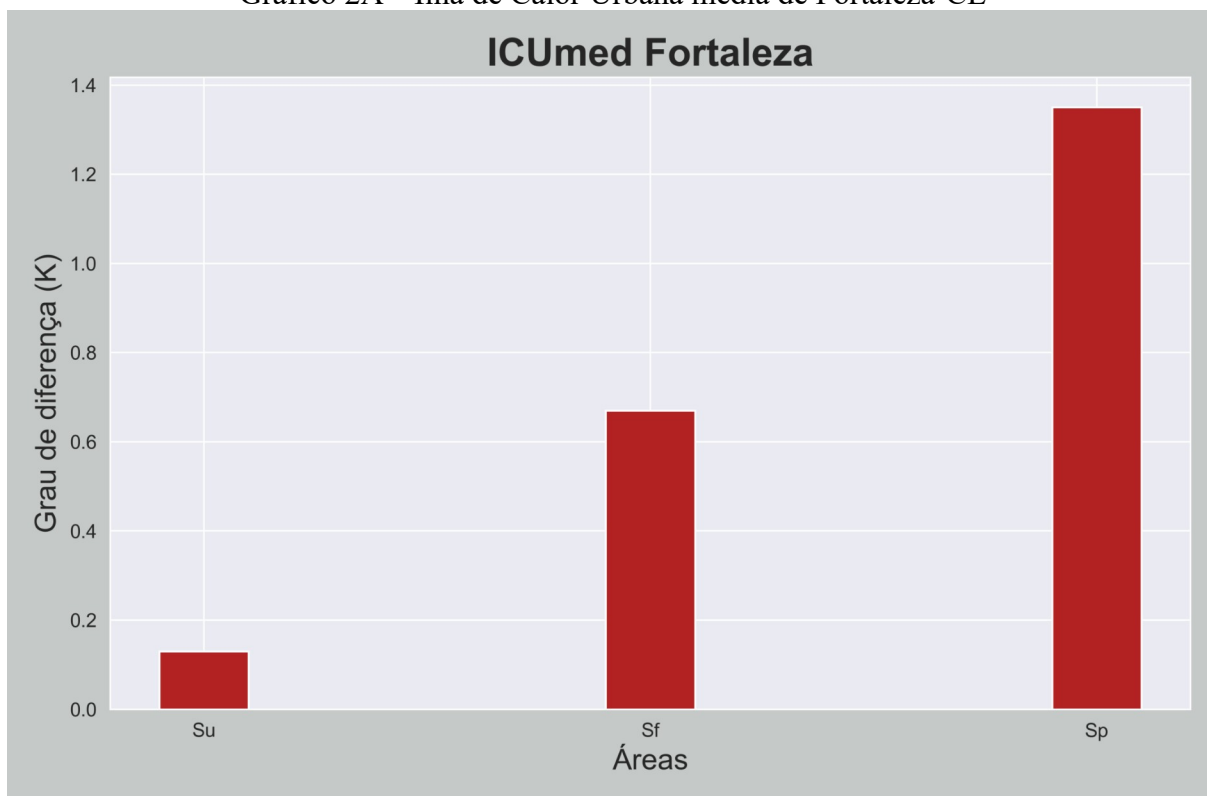
O apêndice A tem como objetivo de apresentar os gráficos das ICU máxima e média nas cidades de Fortaleza-CE, Maceió-AL, Salvador-BA, São Luís-MA, João Pessoa-PB, Recife-PE, Teresina-PI, Natal-RN e Aracaju-SE.

Gráfico 1A – Ilha de Calor Urbana máxima de Fortaleza-CE



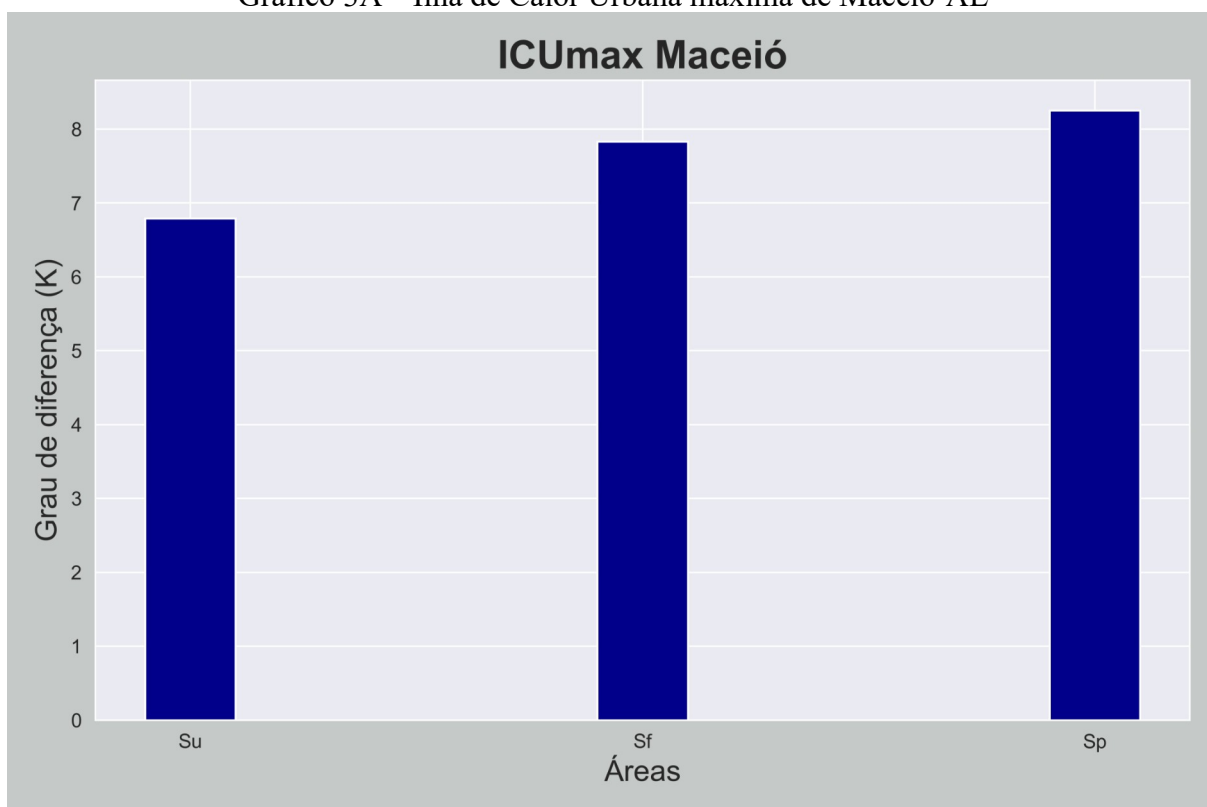
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 2A – Ilha de Calor Urbana média de Fortaleza-CE



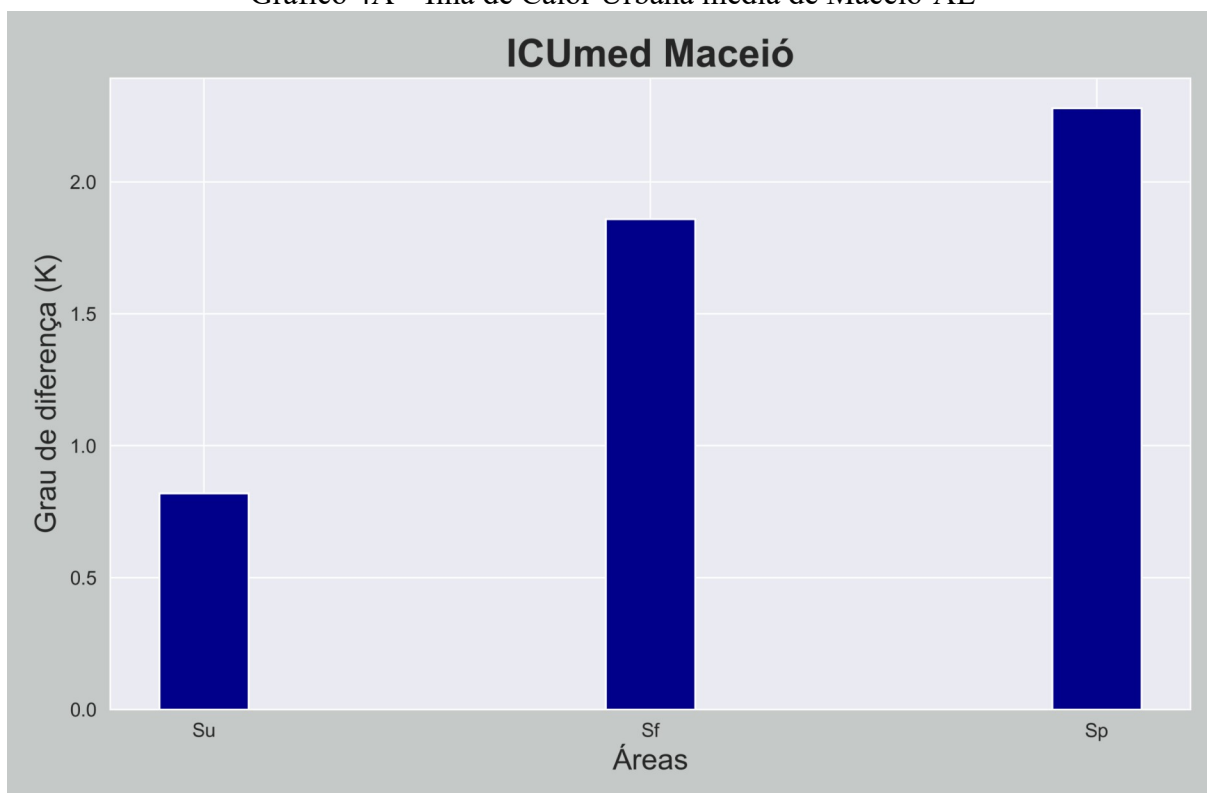
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 3A – Ilha de Calor Urbana máxima de Maceió-AL



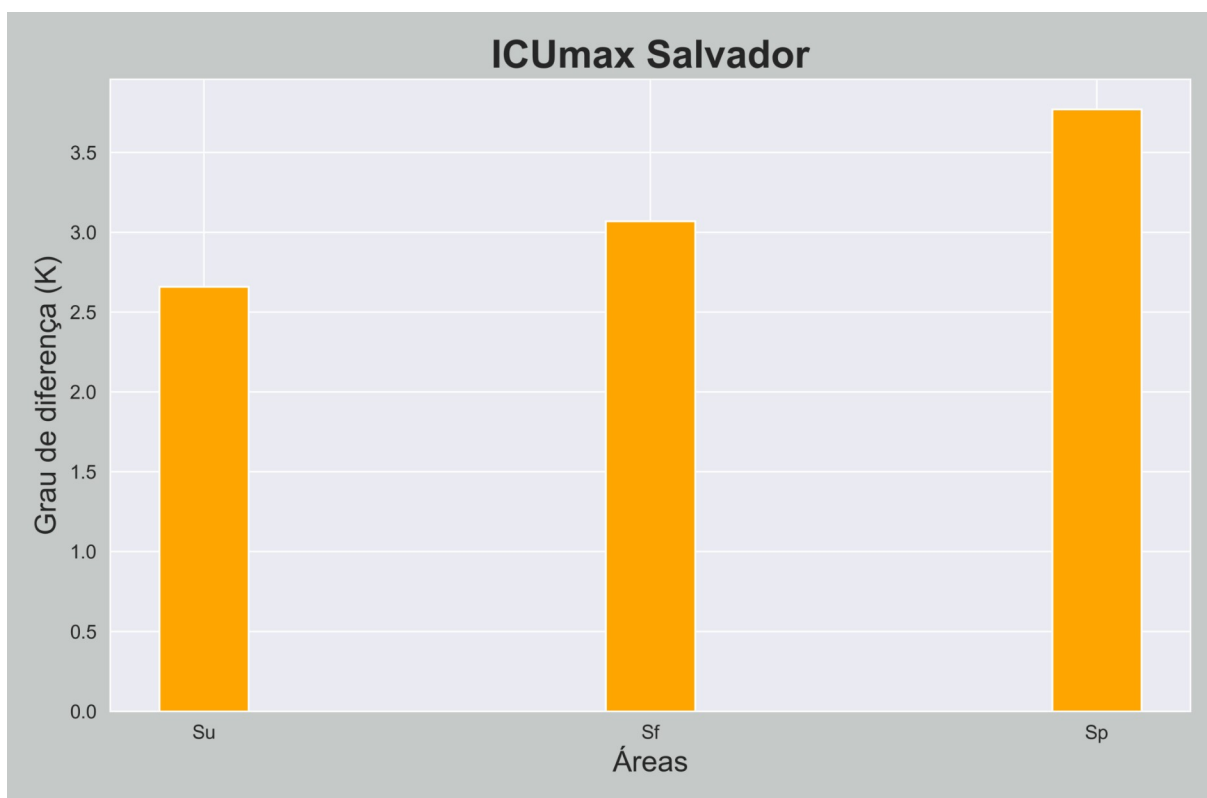
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 4A – Ilha de Calor Urbana média de Maceió-AL



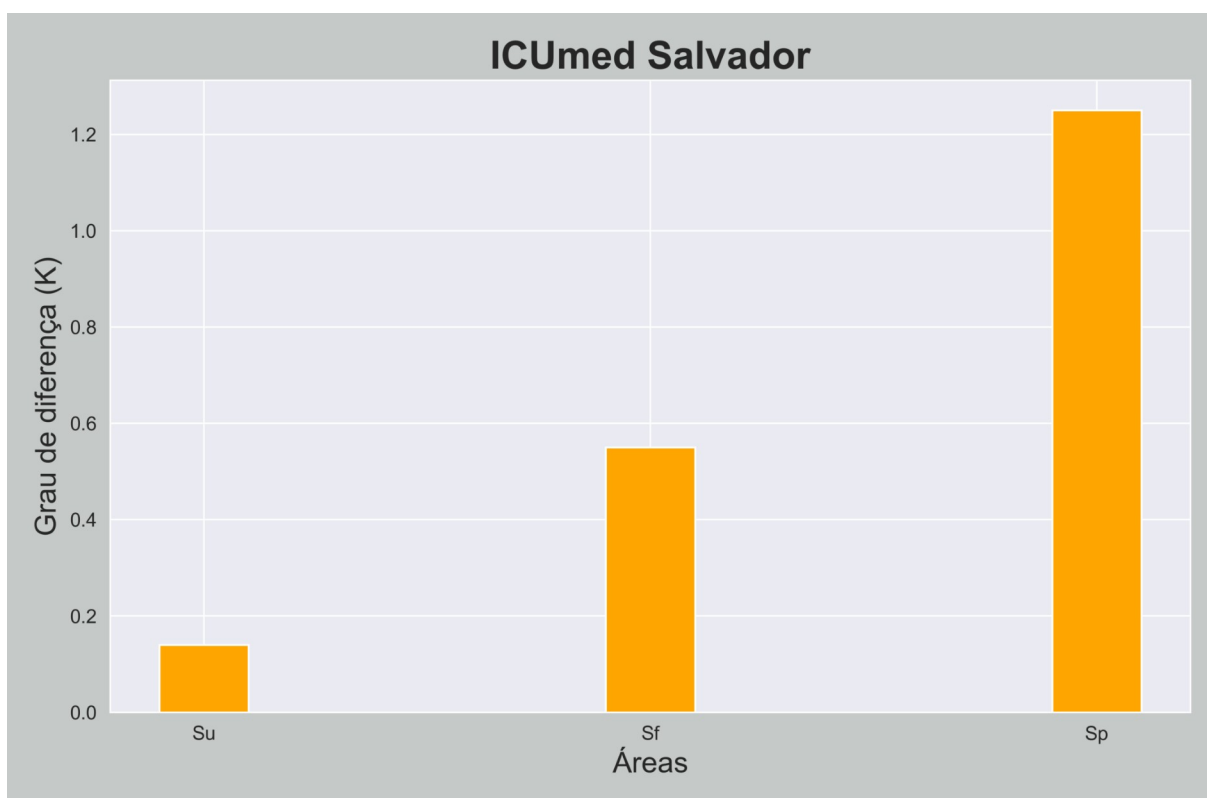
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 5A – Ilha de Calor Urbana máxima de Salvador-BA



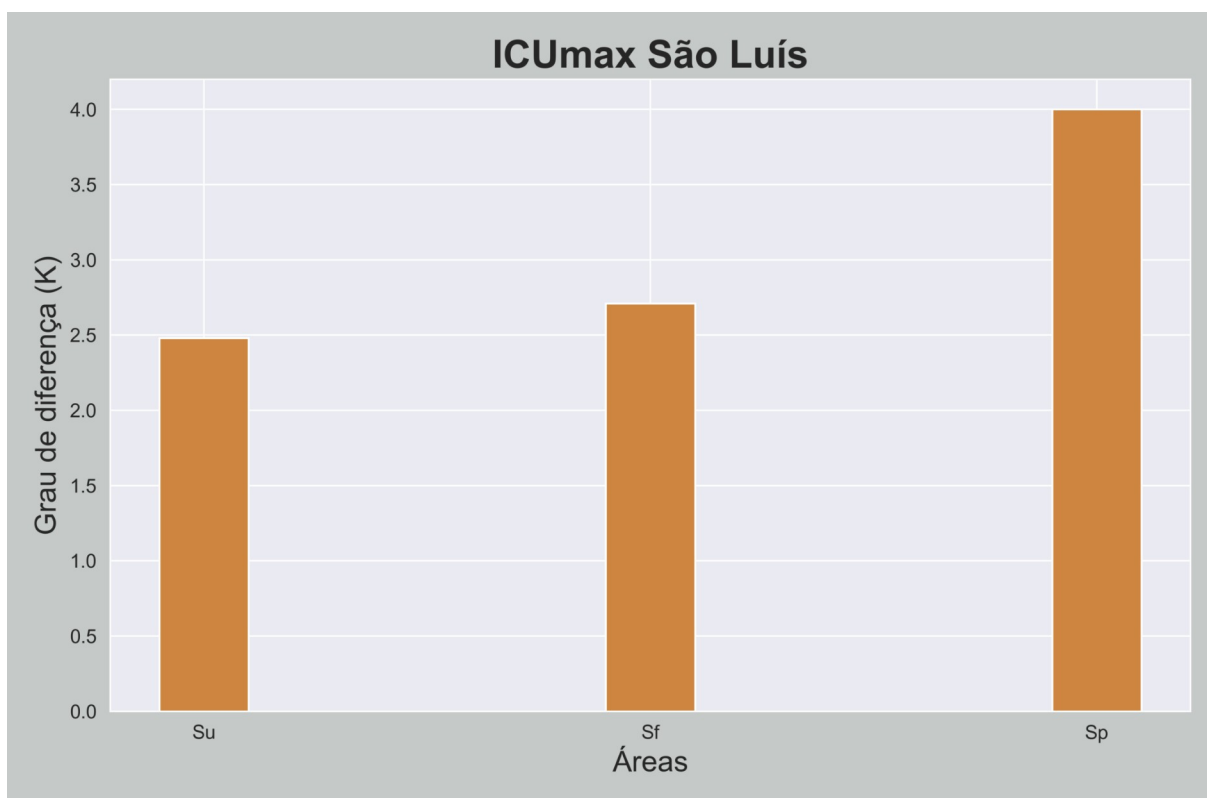
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 6A – Ilha de Calor Urbana média de Salvador-BA



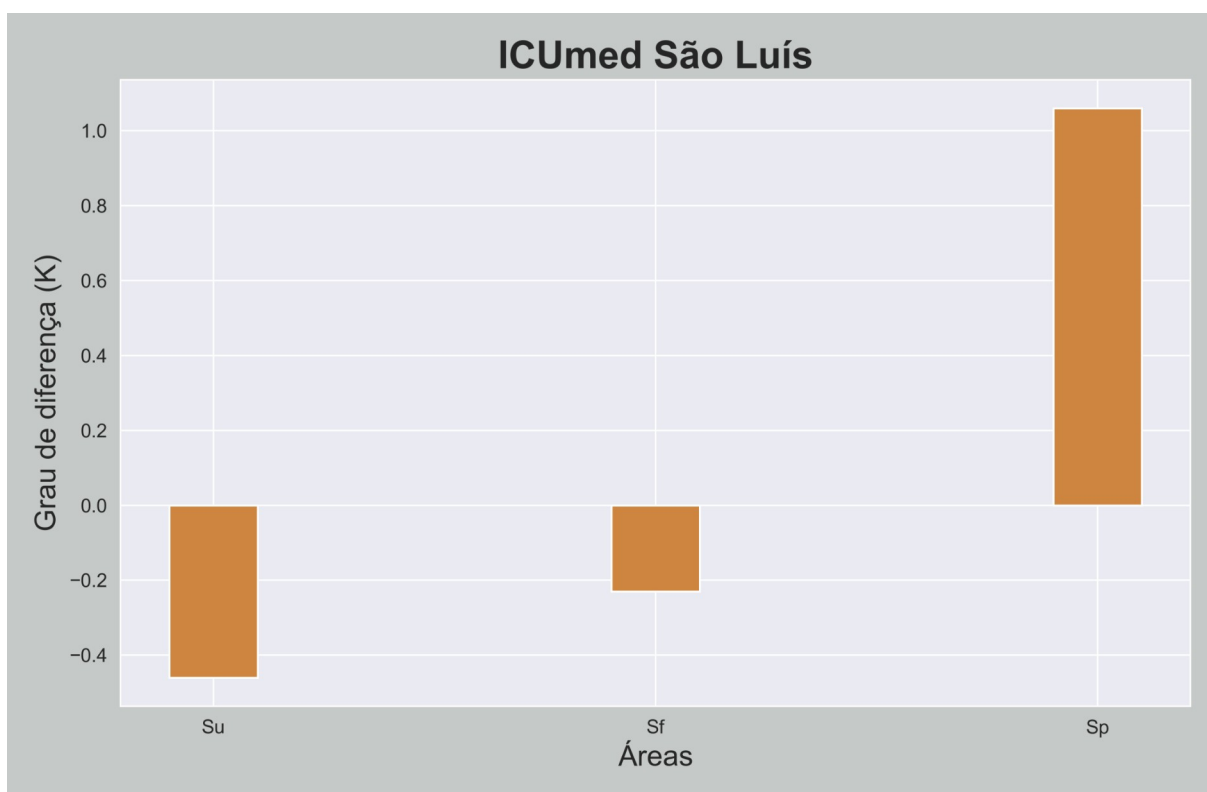
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 7A – Ilha de Calor Urbana máxima de São Luís-MA



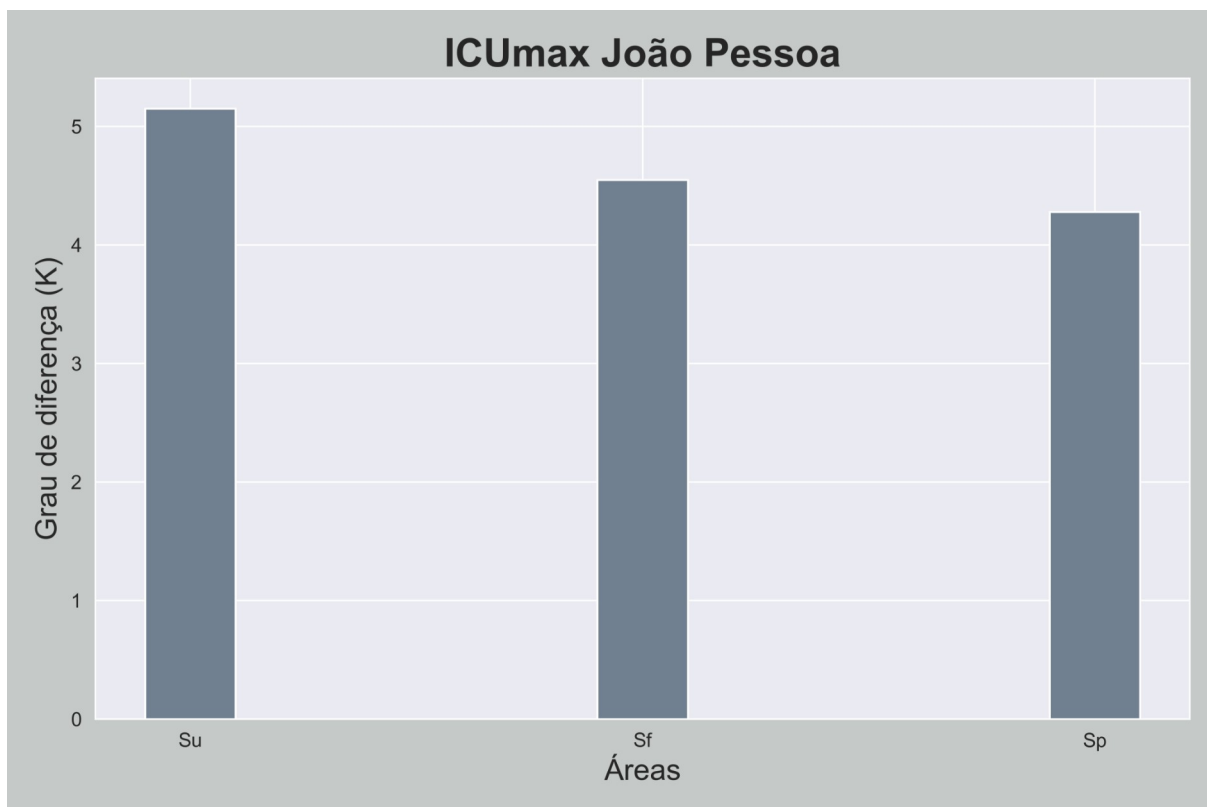
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 8A – Ilha de Calor Urbana média de São Luís-MA



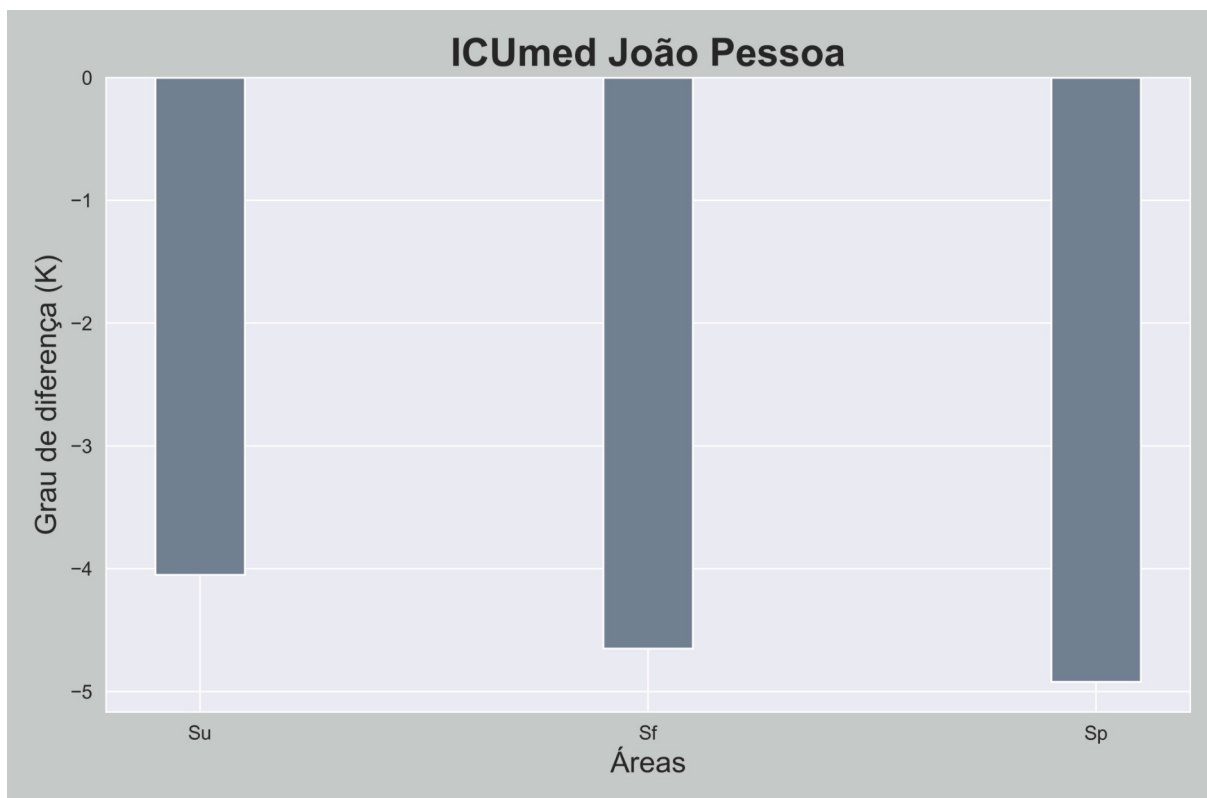
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 9A – Ilha de Calor Urbana máxima de João Pessoa-PB



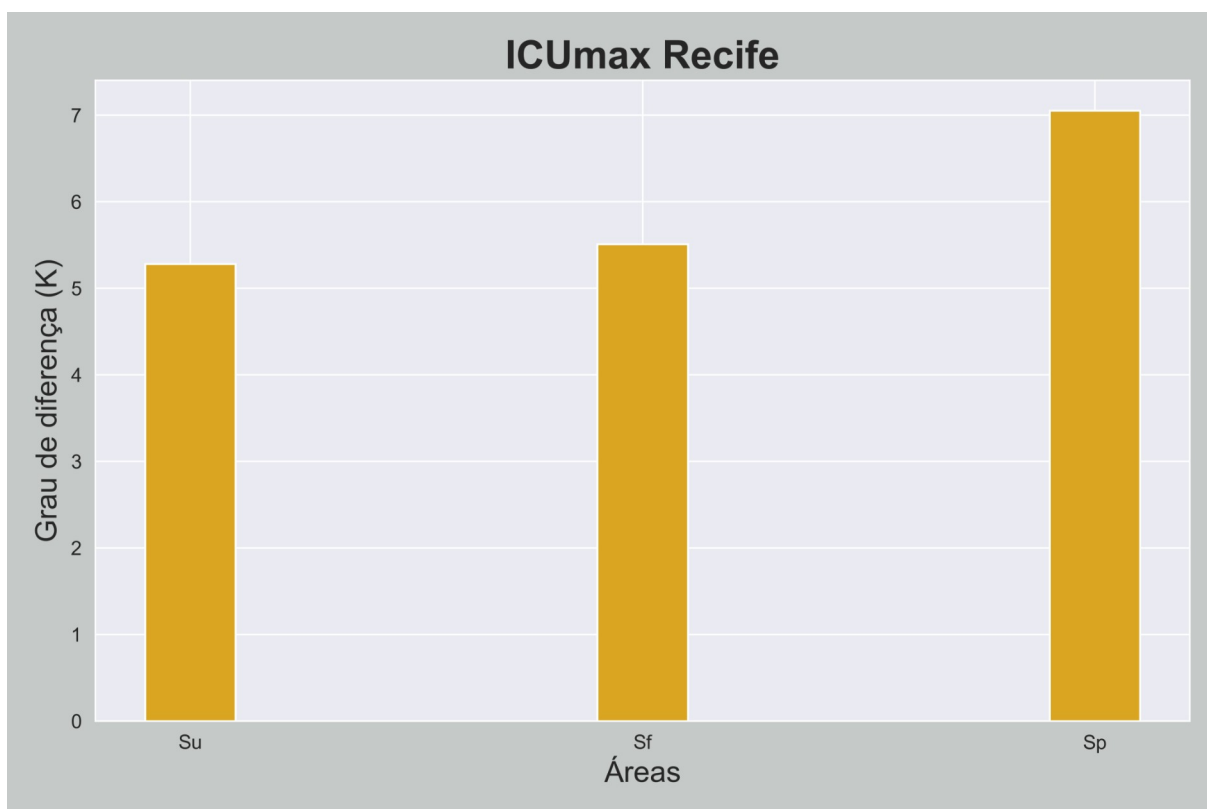
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 10A – Ilha de Calor Urbana média de João Pessoa-PB



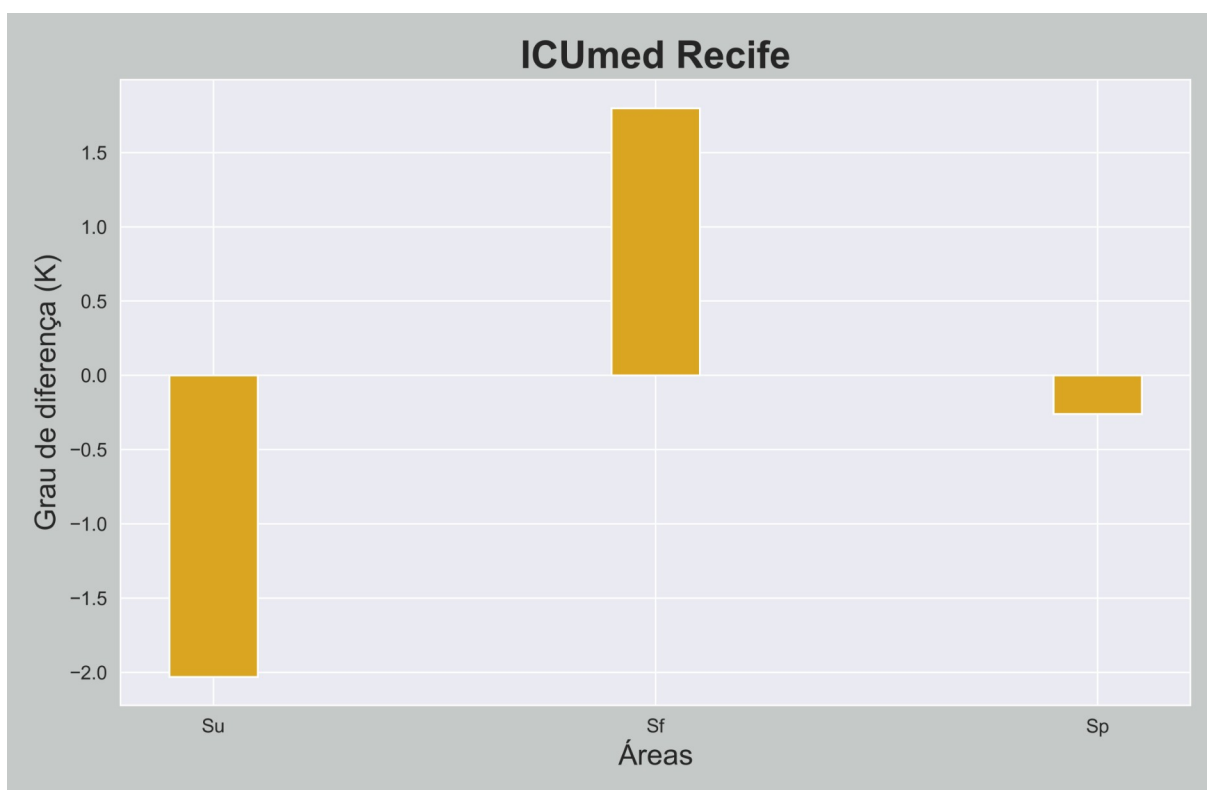
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 11A – Ilha de Calor Urbana máxima de Recife-PE



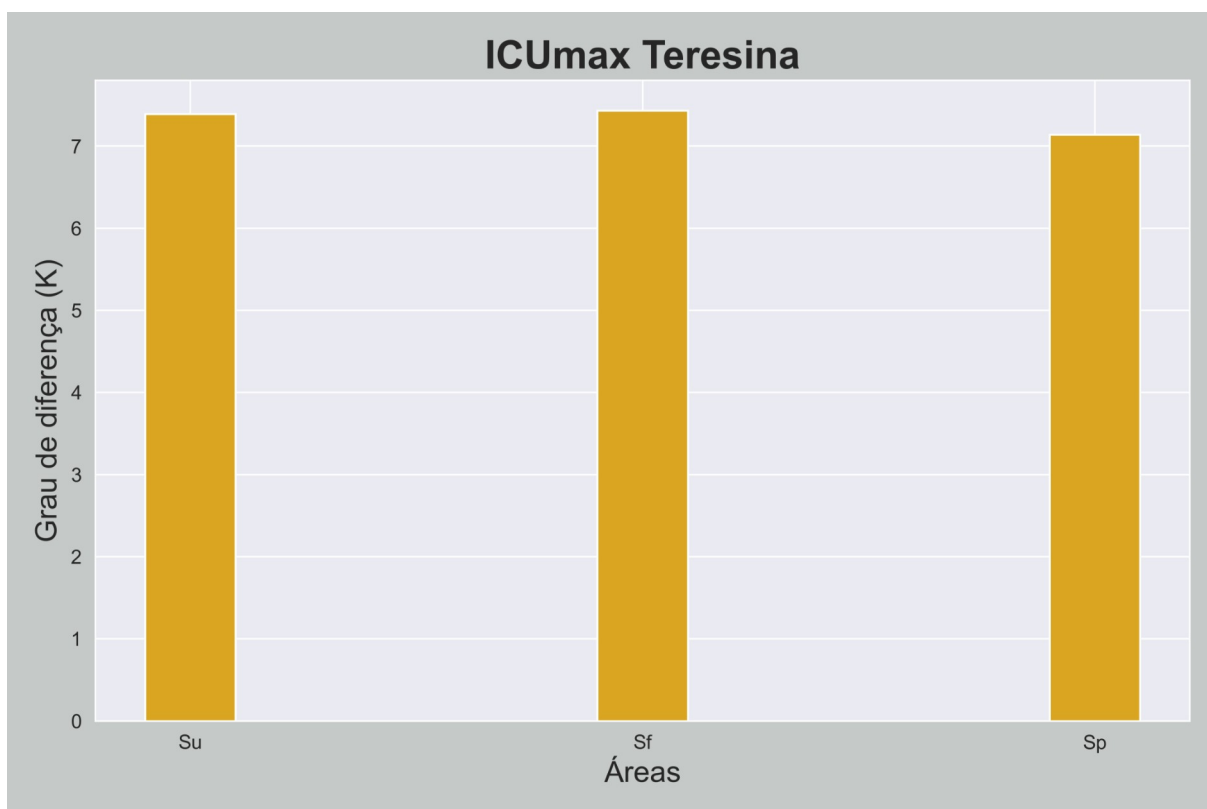
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 12A – Ilha de Calor Urbana média de Recife-PE



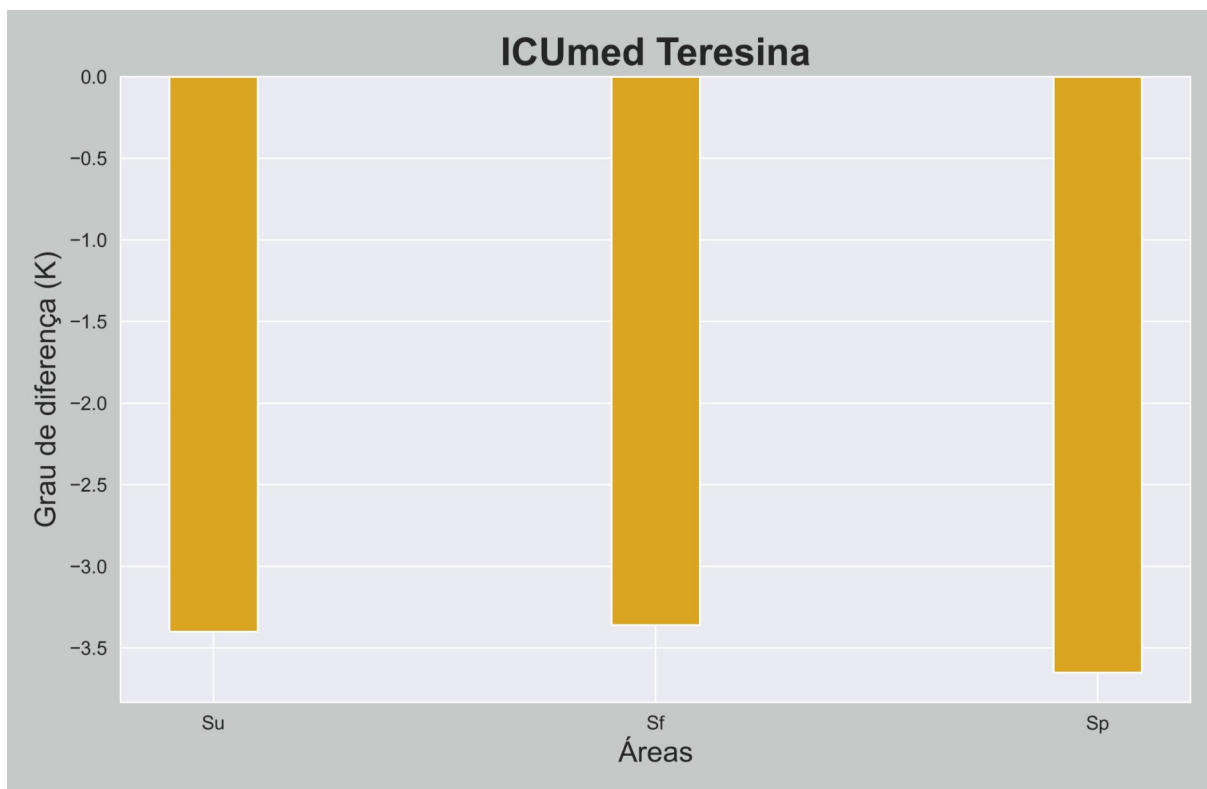
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 13A – Ilha de Calor Urbana máxima de Teresina-PI



Fonte: Fernandes (2021)

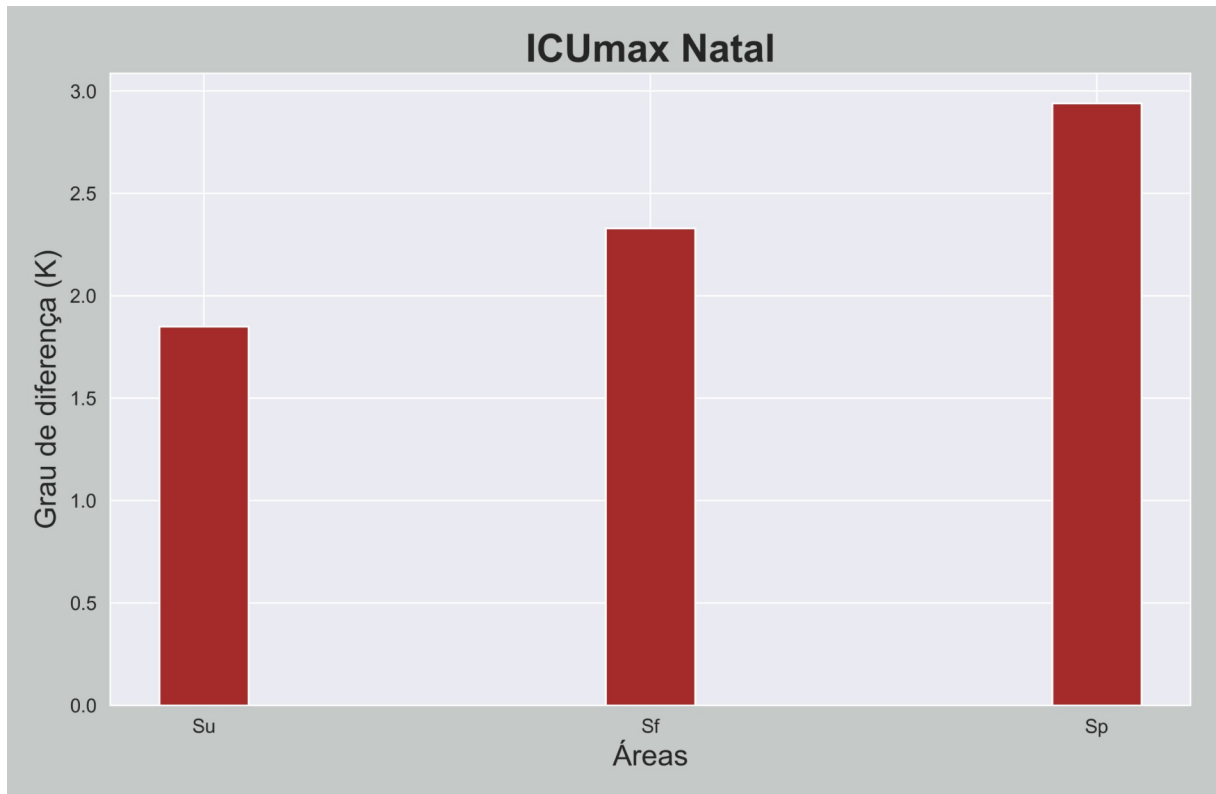
Gráfico 14A – Ilha de Calor Urbana média de Teresina-PI



Fonte: Fernandes (2021)

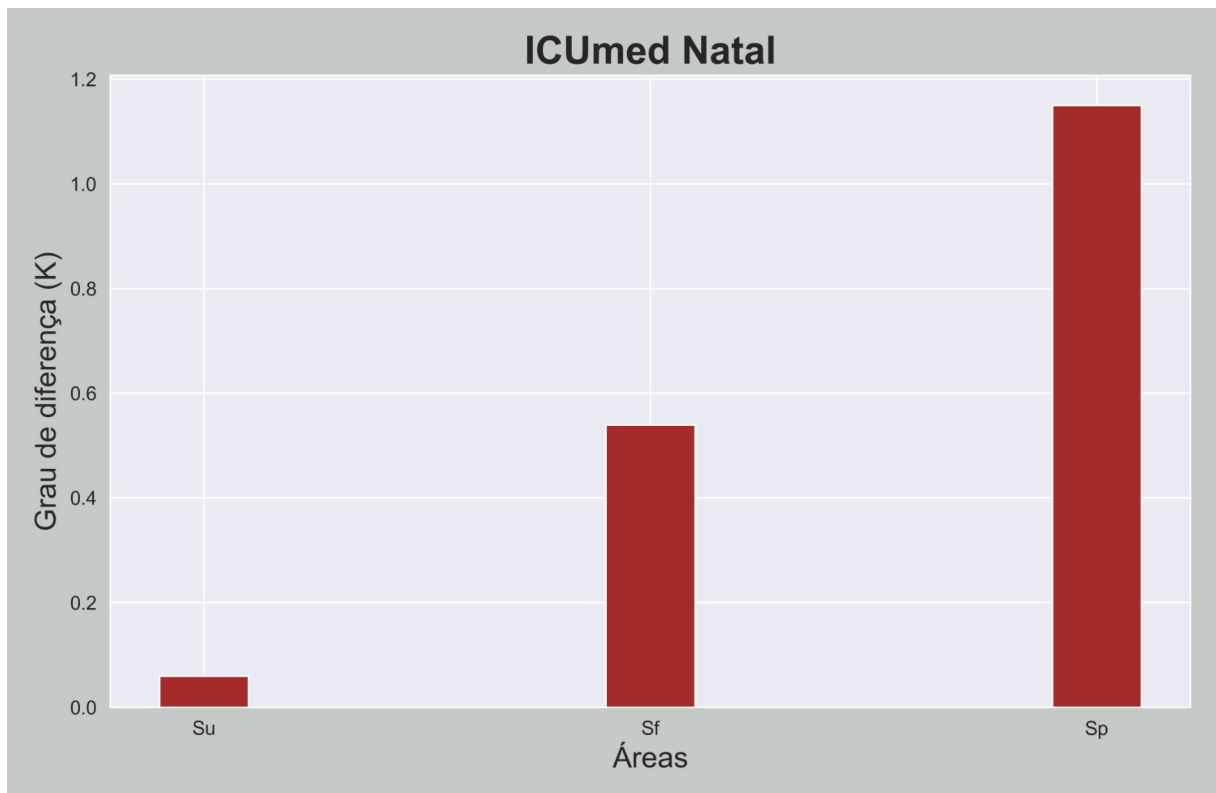


Gráfico 15A – Ilha de Calor Urbana máxima de Natal-RN



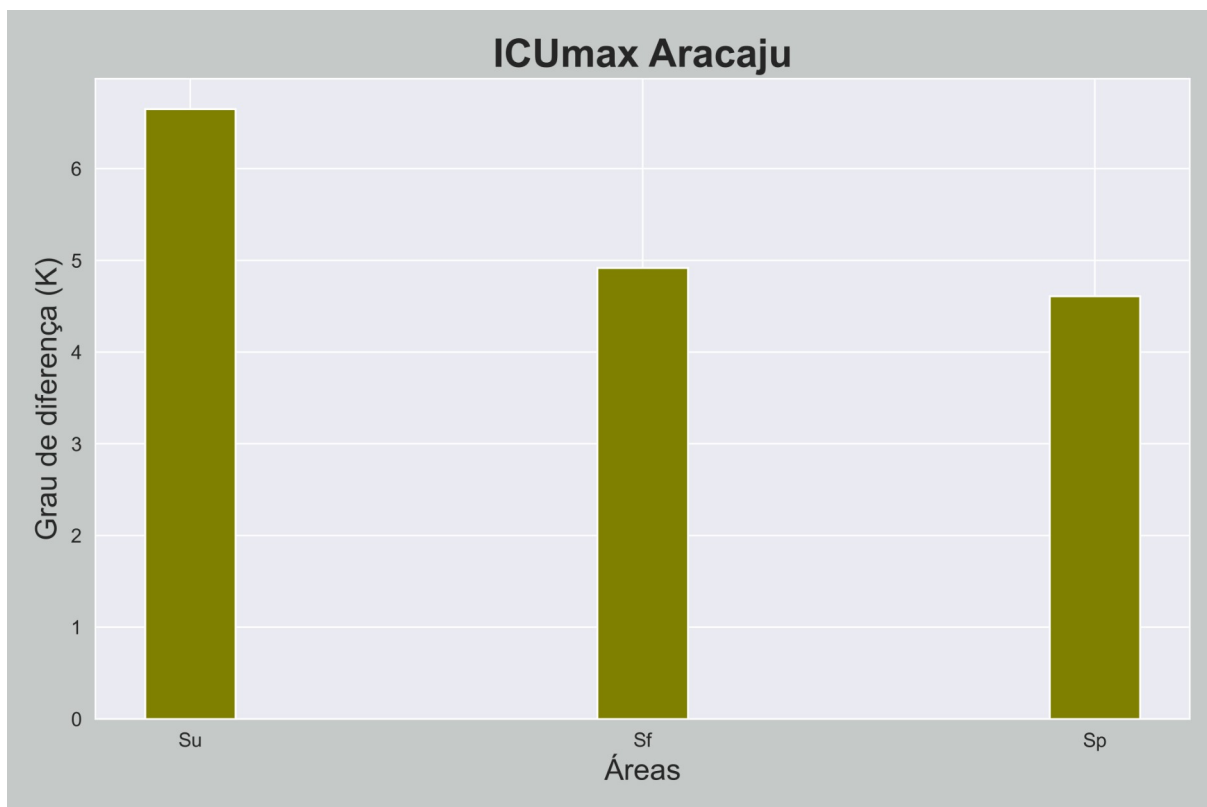
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 16A – Ilha de Calor Urbana média de Natal-RN



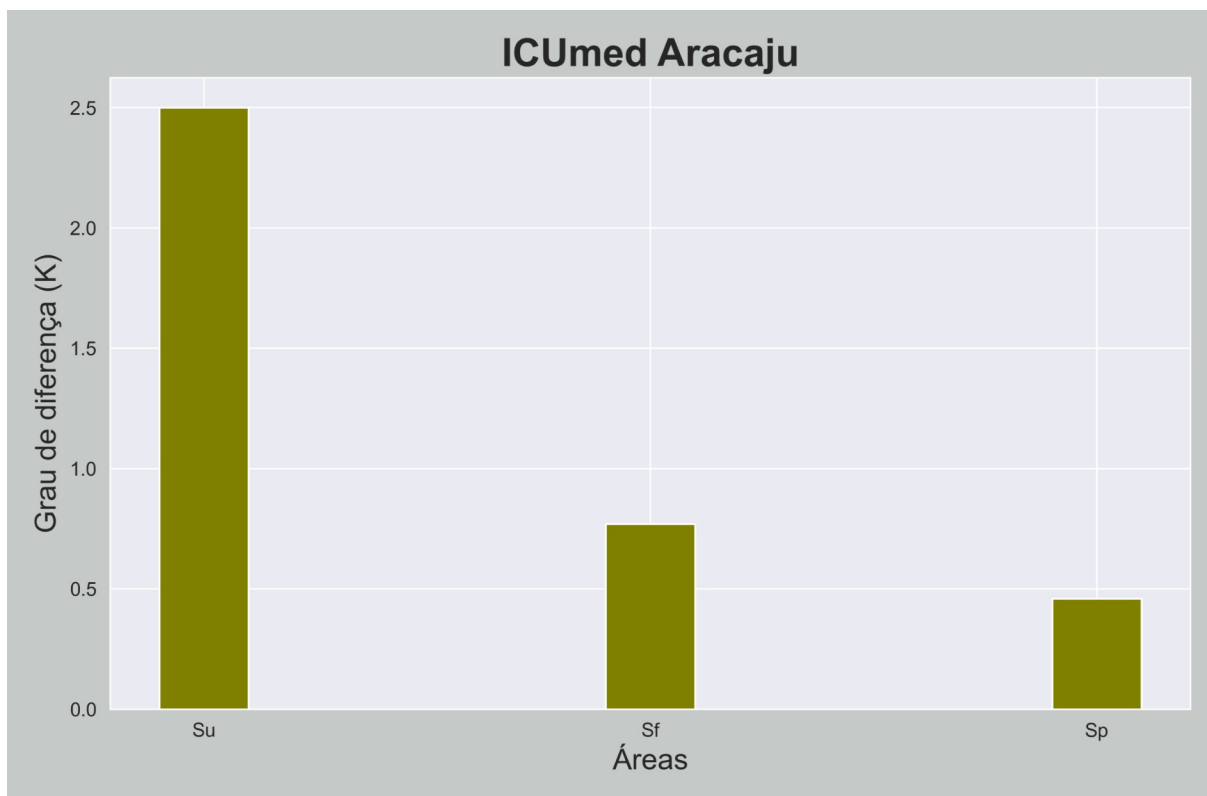
Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 17A – Ilha de Calor Urbana máxima de Aracaju-SE



Fonte: Fernandes (2021)

Gráfico 18A – Ilha de Calor Urbana médio de Aracaju-SE

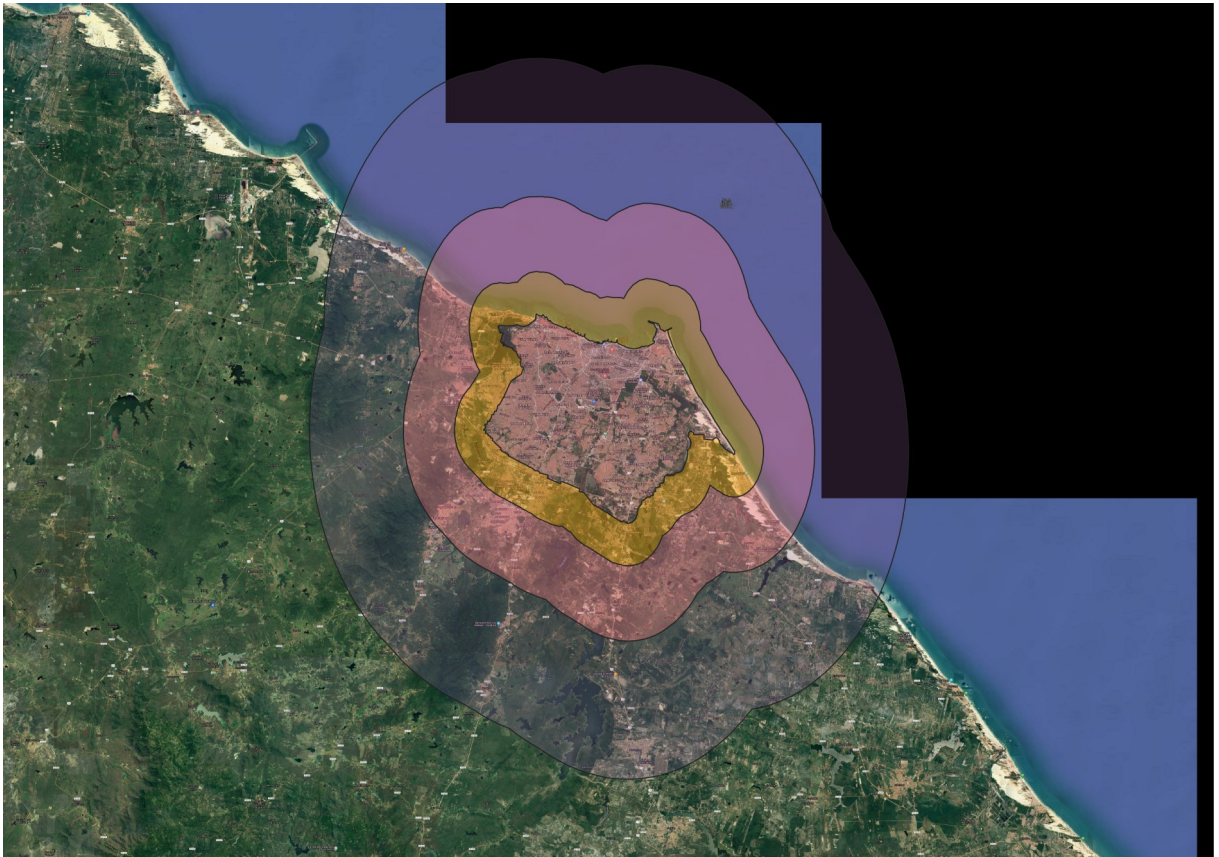


Fonte: Fernandes (2021)

## APÊNDICE B

Apêndice B tem por objetivo de apresentar as cidades de Fortaleza-CE, Maceió-AL, Salvador-BA, São Luís-MA, João Pessoa-PB, Recife-PE, Teresina-PI, Natal-RN e Aracaju-SE com suas respectivas áreas adjacentes delimitadas.

Figura 1B – Fortaleza-CE e suas áreas adjacentes delimitadas



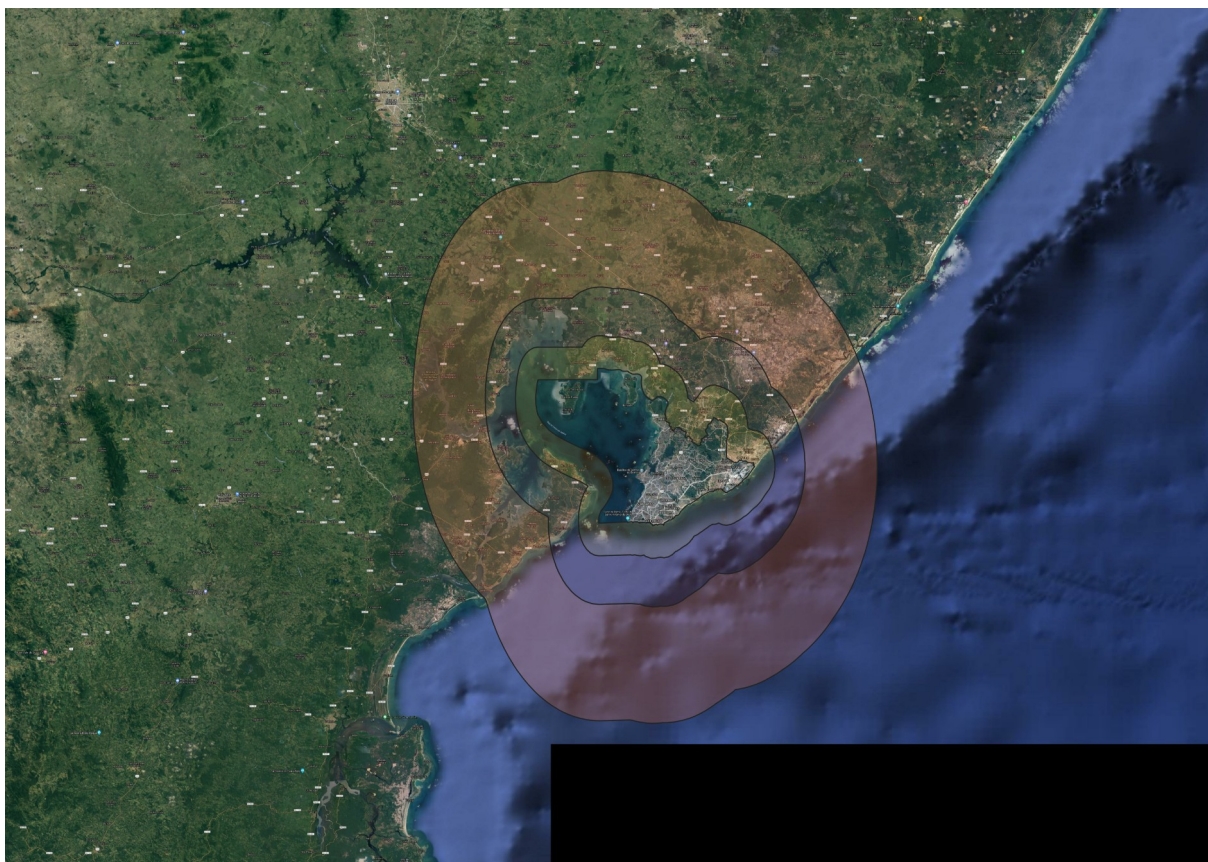
Fonte: Fernandes (2021)

Figura 2B – Maceió-AL e suas áreas adjacentes delimitadas



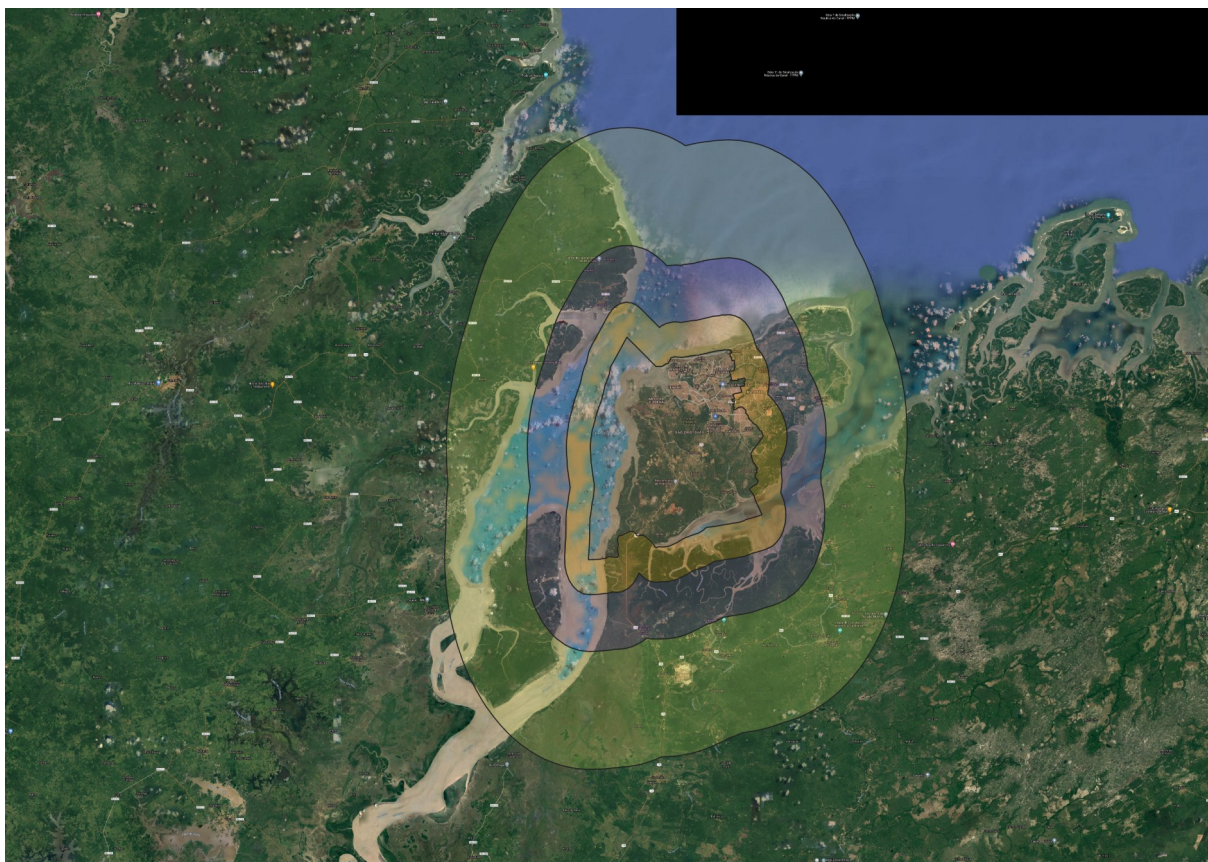
Fonte: Fernandes (2021)

Figura 2B – Salvador-BA e suas áreas adjacentes delimitadas



Fonte: Fernandes (2021)

Figura 4B – São Luís-MA e suas áreas adjacentes delimitadas



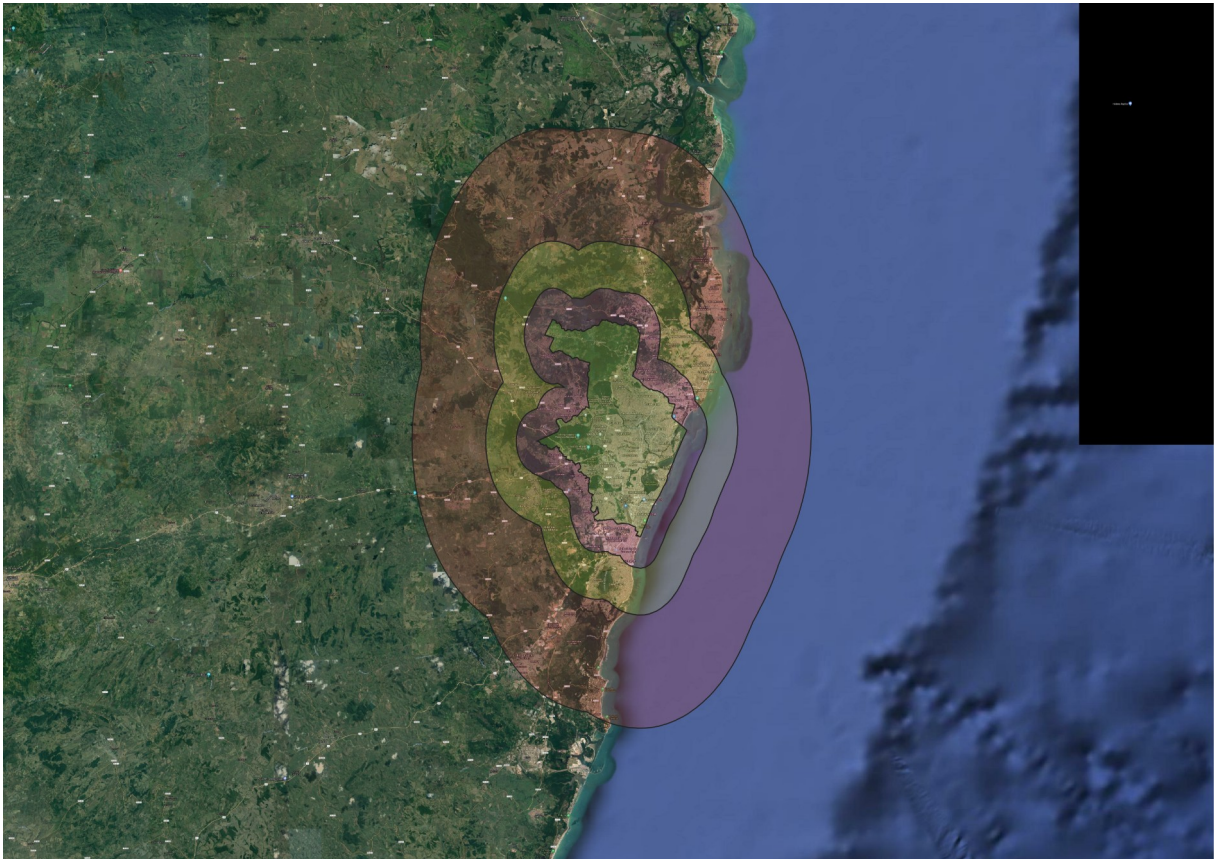
Fonte: Fernandes (2021)

Figura 5B – João Pessoa-PB e suas áreas adjacentes delimitadas



Fonte: Fernandes (2021)

Figura 6B – Recife-PE e suas áreas adjacentes delimitadas



Fonte: Fernandes (2021)

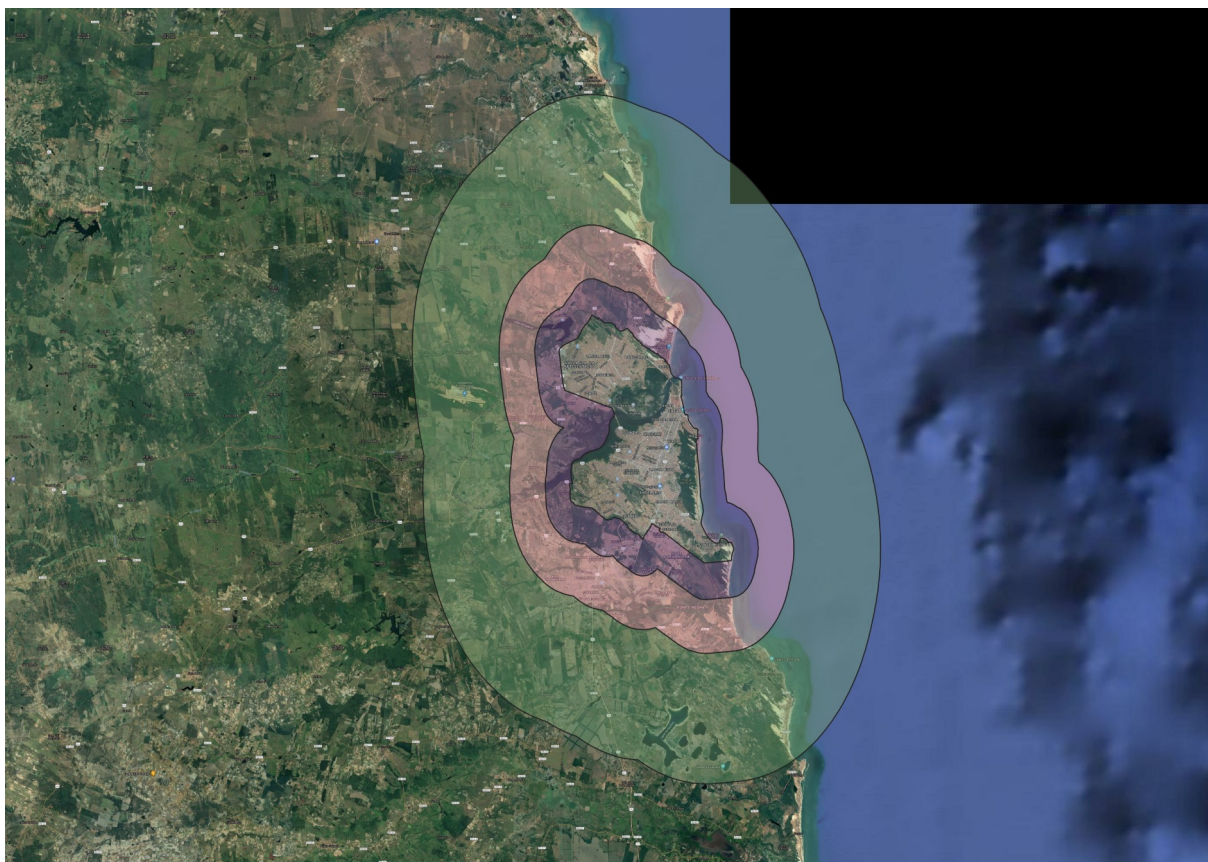


Figura 7B – Teresina-PI e suas áreas adjacentes delimitadas



Fonte: Fernandes (2021)

Figura 8B – Natal-RN e suas áreas adjacentes delimitadas



Fonte: Fernandes (2021)

Figura 9B – Aracaju-SE e suas áreas adjacentes delimitadas

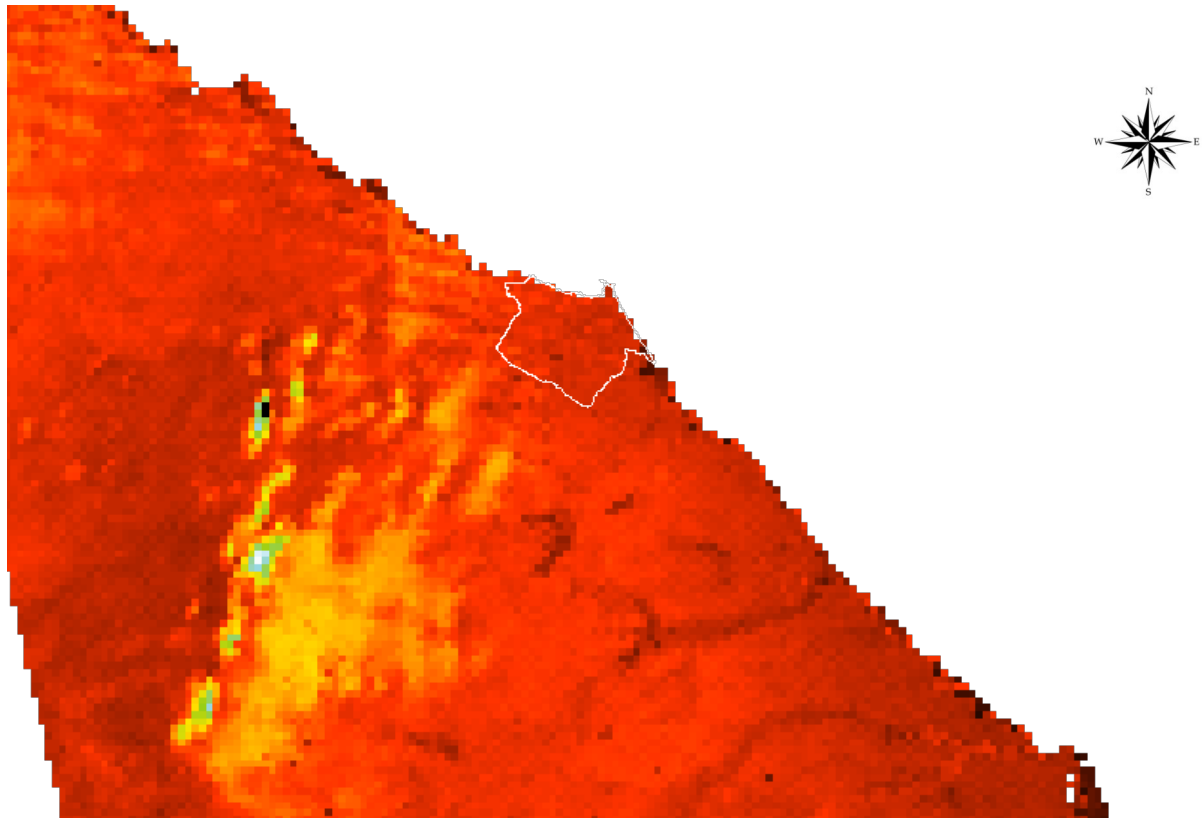


Fonte: Fernandes (2021)

## APÊNDICE C

O apêndice C tem por objetivo de apresentar as figuras das capitais nordestinas com a distribuição espacial da temperatura da superfície obtida das imagens do satélite Sentinel 3 do sensor SLSTR.

Figura 1C – Temperatura de superfície de Fortaleza-CE



Fonte: Fernandes (2021)

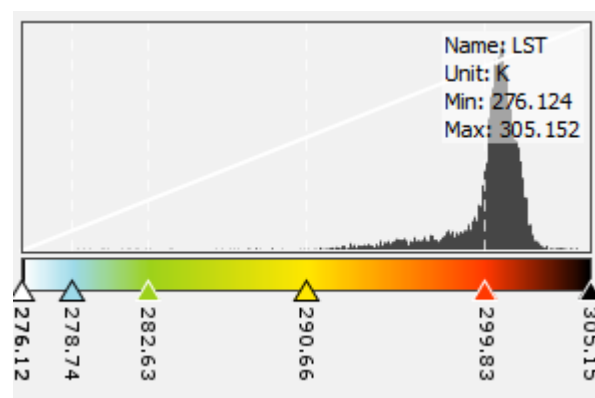
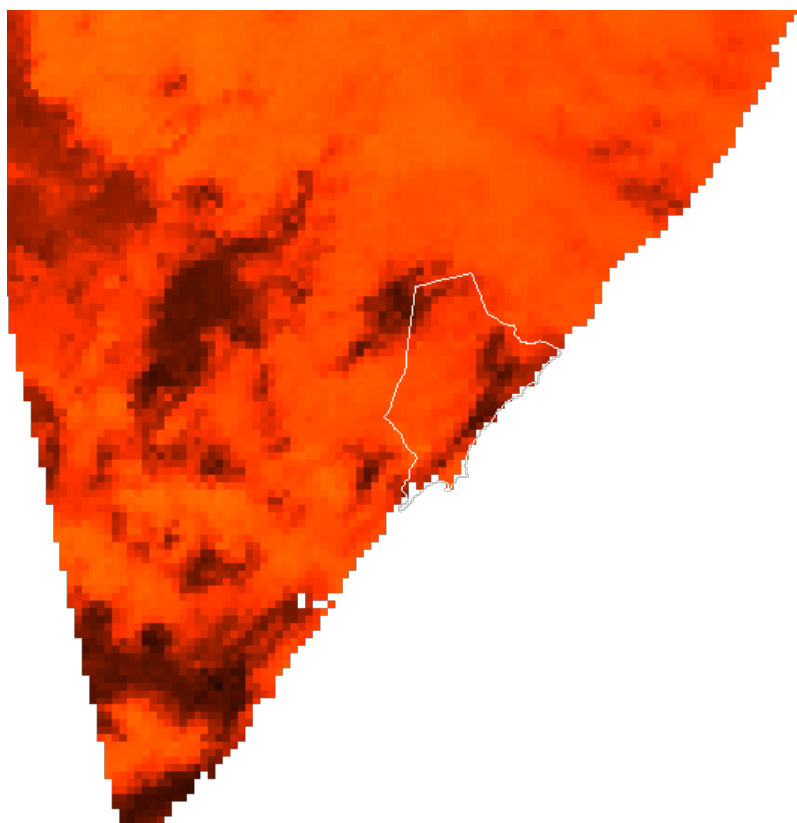


Figura 2C – Temperatura de superfície de Maceió-AL



Fonte: Fernandes (2021)

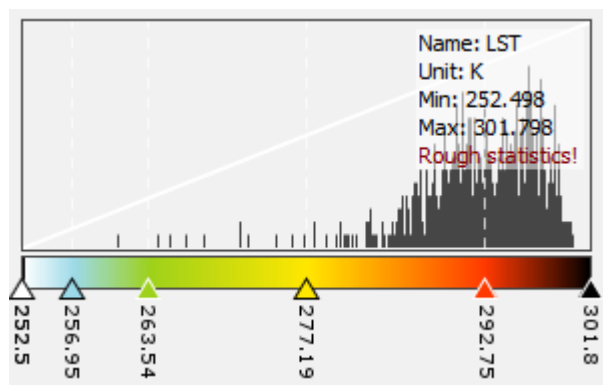
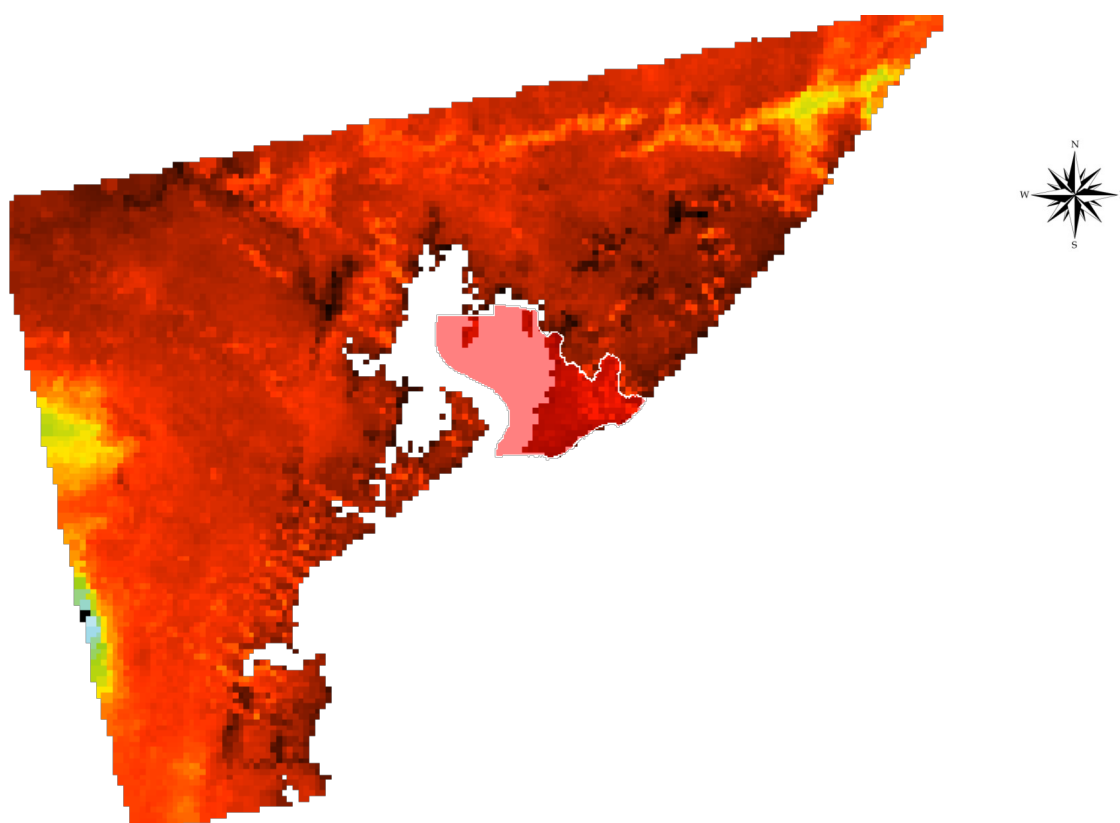


Figura 3C – Temperatura de superfície de Salvador-BA



Fonte: Fernandes (2021)

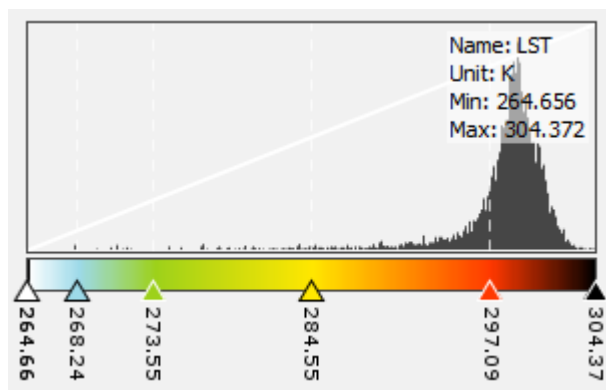
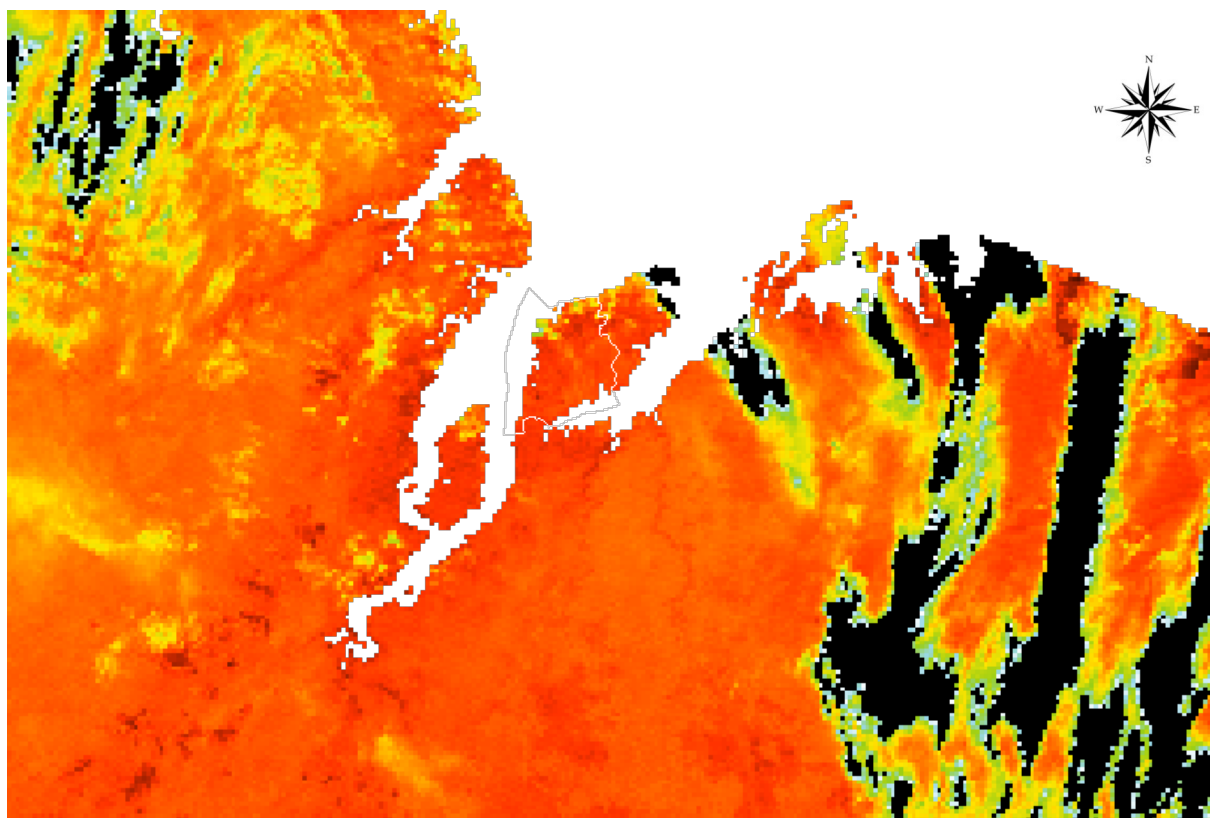


Figura 4C – Temperatura de superfície de São Luís-MA



Fonte: Fernandes (2021)

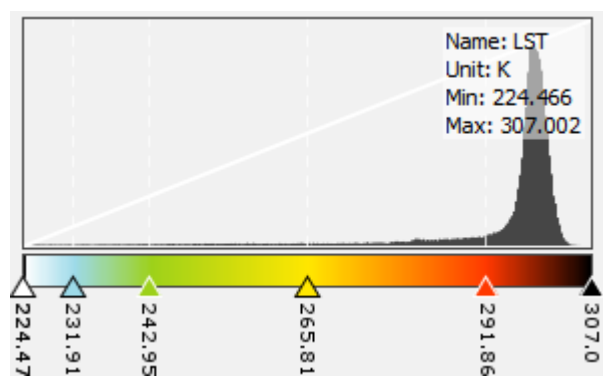
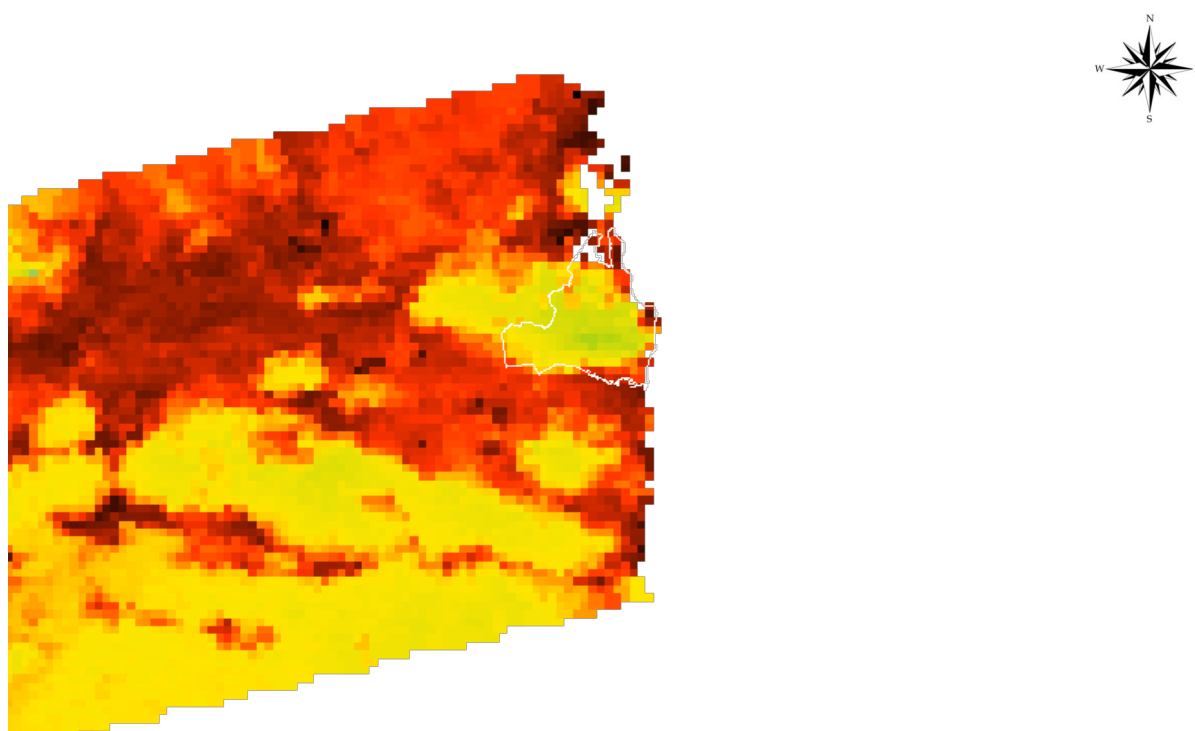


Figura 5C – Temperatura de superfície de João Pessoa-PB



Fonte: Fernandes (2021)

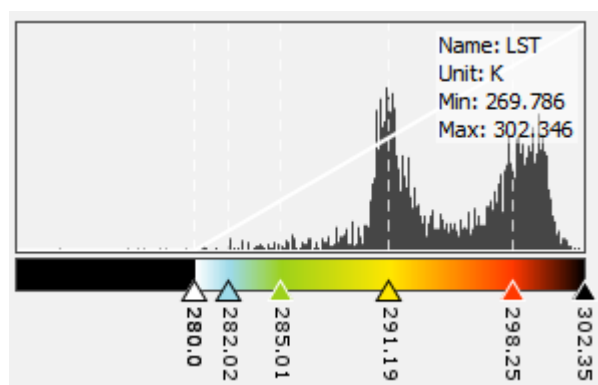
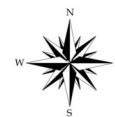
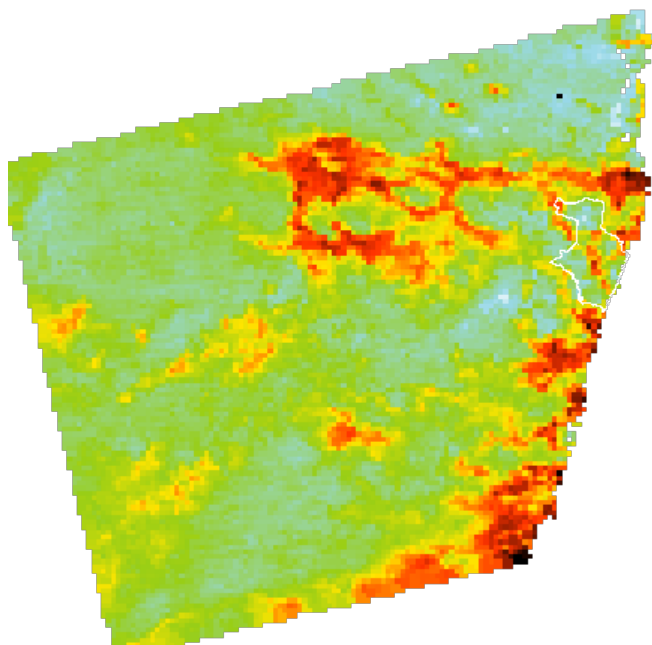




Figura 6C – Temperatura de superfície de Recife-PE



Fonte: Fernandes (2021)

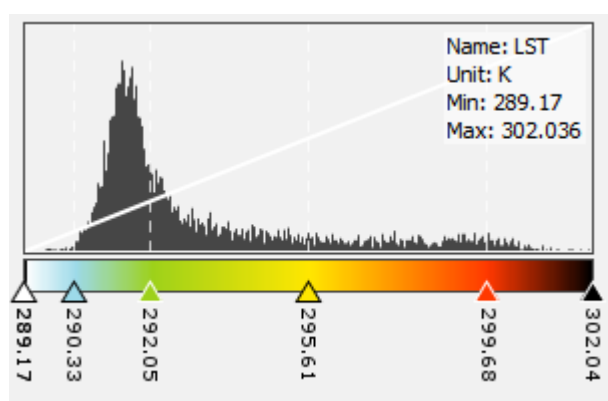
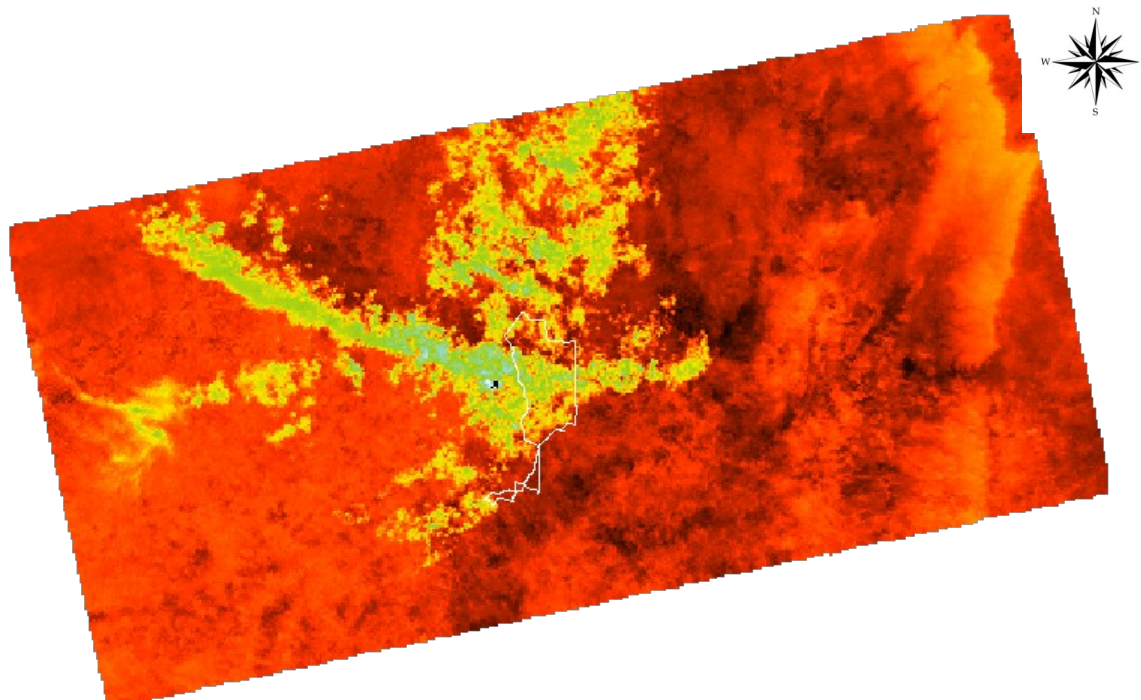


Figura 7C – Temperatura de superfície de Teresina-PI



Fonte: Fernandes (2021)

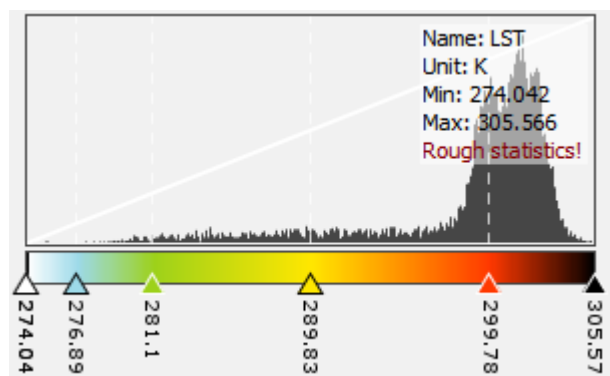
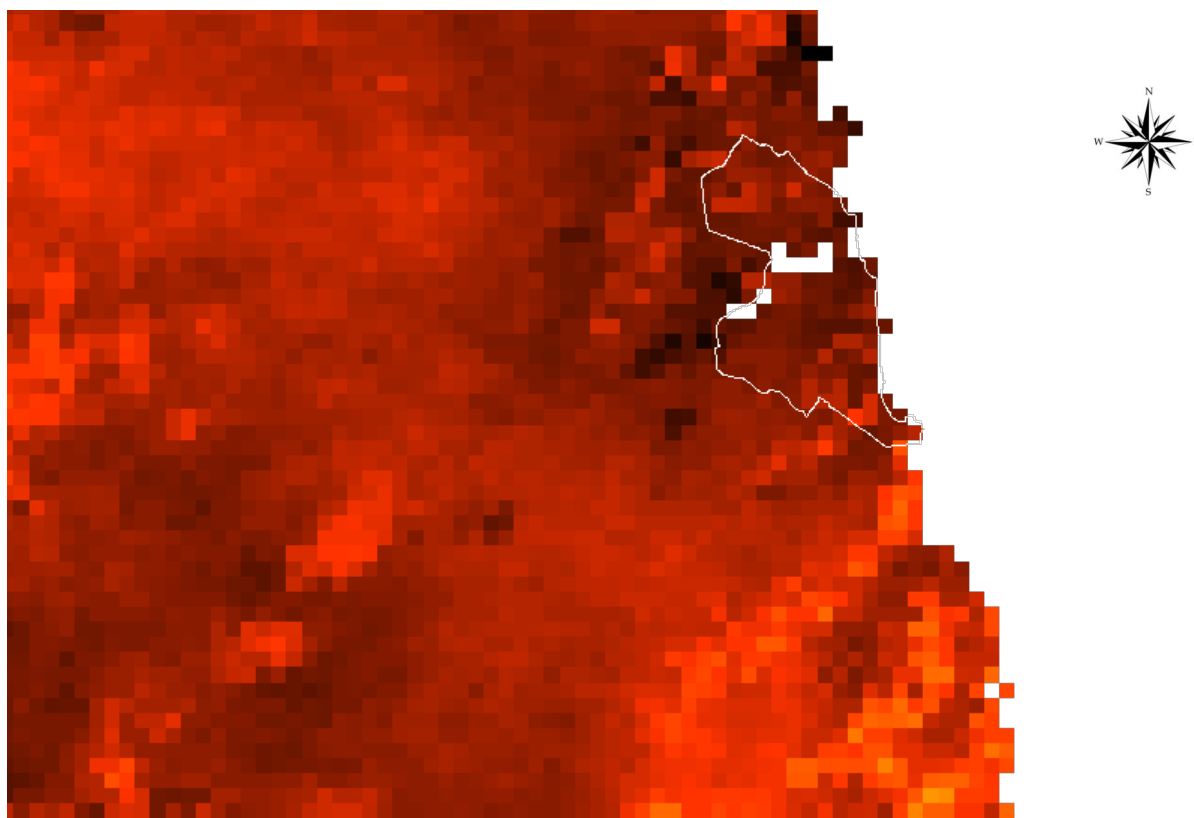


Figura 8C – Temperatura de superfície de Natal-RN



Fonte: Fernandes (2021)

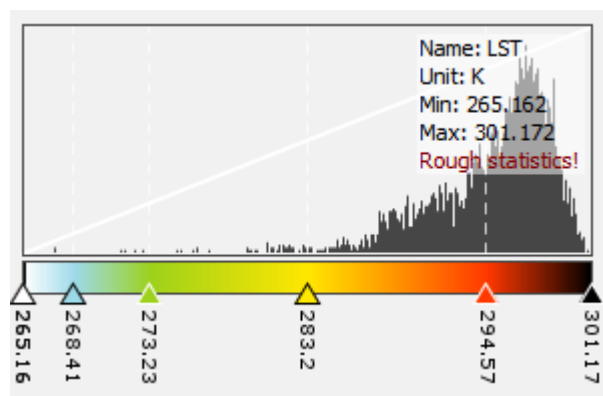
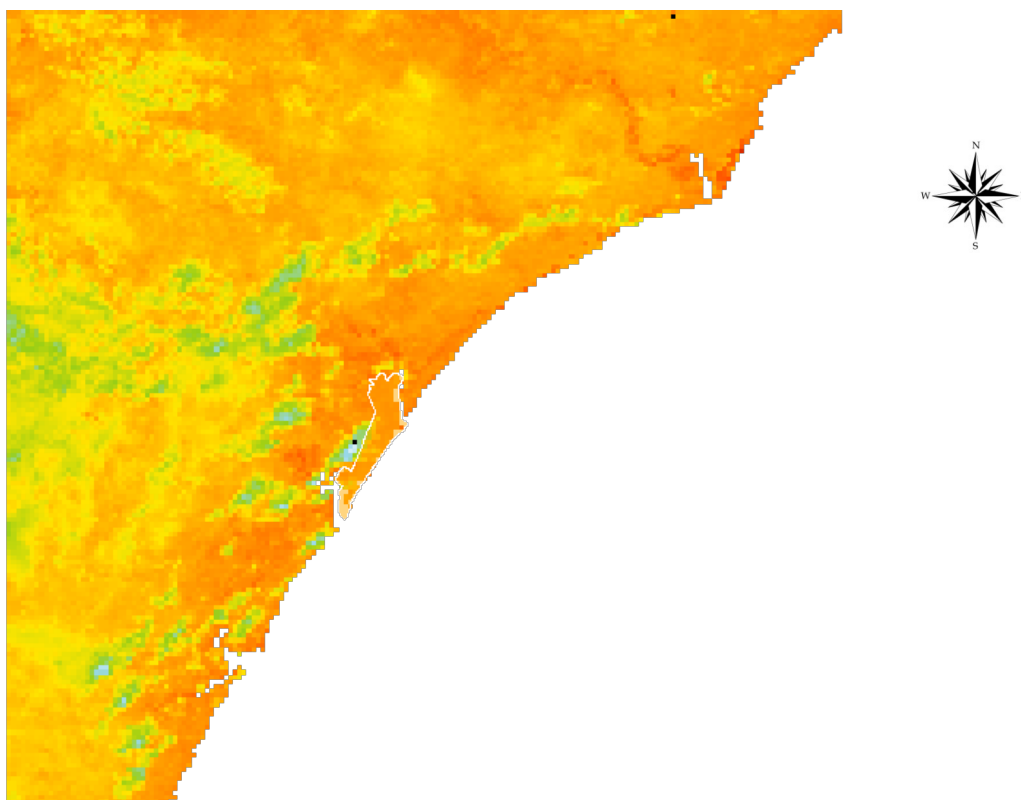


Figura 9C – Temperatura de superfície de Aracaju-SE



Fonte: Fernandes (2021)

