



ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO FENÔMENO DE ILHAS DE CALOR DE SUPERFÍCIE NA CIDADE DE FORTALEZA/CE

Rafael Duarte Viana¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

rafael.viana@inpe.br

RESUMO: Dados de temperatura da superfície terrestre obtidos de produtos do Aqua/MODIS durante o período de 2003-2012, são utilizados neste estudo para caracterizar a variabilidade espaço-temporal da temperatura de superfície de Fortaleza (Ceará-Brasil) e arredores, em escala diurna, sazonal e interanual, e utilizados para discutir a possibilidade de ocorrência do fenômeno de ilhas de calor de superfície no município. Para isto são utilizadas técnicas de geoprocessamento, tais como a álgebra de mapas. Os resultados avaliaram que a magnitude da variabilidade espacial da temperatura em superfície possui um forte sinal durante o dia, porém o mesmo não ocorre a noite. Há também uma variação sazonal na temperatura em superfície, com o fenômeno ocorrendo com maior intensidade durante os primeiros meses do ano. A variação sazonal pode ser atribuída à sazonalidade da radiação solar e a climatologia da região. Os resultados apontam na possibilidade de existência de ilhas de calor de superfície sazonais na região intraurbana do município, sendo necessários estudos em maior resolução espacial afim de reduzir as imprecisões devido os métodos utilizados neste estudo.

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno de ilhas de calor urbano (ICU ou *UHI*, do inglês *urban heat island*) ocorre quando tanto a temperatura do ar quanto a temperatura de superfície (*LST*, do inglês *land surface temperature*) de uma área urbana apresentam média mais elevada do que as temperaturas na vizinhança do centro urbano. A superfície de uma área urbana é uma combinação heterogênea de vegetação, corpos d'água, materiais impermeáveis e solo exposto, de tal modo que a *LST* varia espacialmente e temporalmente (RASUL et. al., 2017).

Cidades mal planejadas tendem a sofrer com essa excessiva quantidade de construções e baixa concentração de áreas verdes. O aumento da temperatura pode acarretar em prejuízo da saúde e bem-estar dos seus habitantes. Algumas das consequências do fenômeno de ilhas de calor são o aumento do uso de energia para refrigeração em edifícios, diminuição da qualidade do ar e, em último caso, agravamento de doenças relacionadas ao ar e calor.

O efeito da ICU é um resultado das diferenças entre as regiões urbana/rural no balanço de energia na superfície. Durante o dia, superfícies impermeáveis absorvem mais radiação solar incidente do que as regiões com vegetação densa nas áreas rurais por possuírem uma capacidade calorífica maior do que a vegetação. Como resultado, parte dessa energia armazenada é reemitida à noite como radiação de ondas longas (RASUL et. al., 2017). Um problema deste método, porém, é estabelecer uma comparação entre cidades diferentes, pois não há um critério comum de identificação do que vem a ser rural ou urbano. No Brasil, áreas rurais são definidas como “aquela que não foi incluída no perímetro urbano por lei municipal. Caracteriza-se por uso rústico do solo, com grandes extensões de terra e baixa densidade habitacional. Incluem campos, florestas, lavouras, pastos, etc” (MANUAL..., 2014). Oke (2006) sugeriu o estabelecimento de uma padronização do critério de definição do que seja urbano e rural a partir da taxa de impermeabilização (ou área construída) da superfície.

Estudos sobre ilhas de calor podem ser conduzidos através de medidas *in-situ* da temperatura do ar utilizando estações meteorológicas e/ou através de medidas de temperatura da superfície utilizando imagens de satélites nas bandas termais. Enquanto o primeiro método oferece uma alta resolução temporal de dados porém baixa resolução espacial, o segundo método fornece uma maior distribuição espacial da informação, ao custo de uma menor resolução temporal (JIN, 2012). Segundo Barros e Lombardo (2016), a temperatura da superfície estimada através da banda termal das imagens de satélite, atualmente, é a melhor opção para avaliação espacial das temperaturas em grandes áreas.

Deste modo, o objetivo do presente trabalho é identificar e analisar as variações térmicas de superfície (ilhas de calor de superfície) diurnas, sazonais e interanuais na cidade de Fortaleza/CE utilizando imagens obtidas por sensoriamento remoto.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde ao município de Fortaleza, estado do Ceará, localizada na região do nordeste brasileiro com coordenadas geográficas variando entre 3°43'S à 3°56'S e 38°22'W à 38°32'W (Fig 1). A cidade possui clima tropical, com verão úmido e inverno seco, e é classificada como *Aw* de acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger (GUERREIRO et. al., 2012). A temperatura média anual em Fortaleza é 26.3 °C e pluviosidade média anual de 1400 mm.

Para este estudo foi realizado um recorte da área que contém o município, correspondente a uma caixa de 0.4° x 0.4° com as coordenadas do canto superior esquerdo 3.6 S e 38.75 W e coordenadas do canto inferior direito 4.0 S e 38.35 W. O tamanho dessa área foi parcialmente escolhido por incluir um número adequado de *pixels* que corresponde a região urbana e a região não-urbana. A escolha do termo não-urbano ao invés de rural para o estudo corresponde a dificuldade em ajustar o conceito rural à região metropolitana de Fortaleza/CE, cercada por variados centros urbanos municipais. Para efeito de classificação de área não-urbana, será utilizado o conceito proposto por Oke (2006), ou seja, cobertura do solo determinada pelo grau de impermeabilidade. Deste modo, áreas não-urbanas serão aquelas que forem classificadas como áreas com vegetação e/ou solo exposto.



Fig. 1. Área de estudo com a localização do município de Fortaleza, Ceará, Brasil.

2.2. *Dados de LST*

Para identificar as anomalias termais associadas com a área urbana, foram utilizados dados do produto de 8-dias de LST/emissividade do Aqua/MODIS (MYD11A2, versão 6), adquiridos durante o período de 2003 à 2012, que correspondem a média da LST adquirida em condições atmosféricas adequadas (céu limpo) durante o intervalo de 8 dias. Os dados possuem resolução espacial de 1-km no nadir, porém foram reamostrados para 500m utilizando a técnica de reamostragem do vizinho mais próximo para serem compatíveis com a mesma resolução dos dados de cobertura terrestre. Os dados são fornecidos na projeção Sinusoidal e foram convertidos para coordenadas WGS84. O Aqua obtém imagens em duas passagens: às 13:30 (LST_Day_1km) e 1:30h (LST_Night_1km) no horário solar local.

O produto MYD11A2 é gerado a partir de um algoritmo do tipo *split window*, que utiliza 7 bandas espectrais do sensor MODIS localizadas nas regiões do infravermelho de ondas curtas e do infravermelho termal. Estudos mostram que a precisão dos produtos MODIS é melhor do que 2 °C para a maioria dos casos de validação, e que além disso comparações entre diferentes satélites em relação a medições *in-situ* de LST em áreas urbanas encontraram diferenças menores que 5% para as medidas de LST do MODIS (WAN, 2014).

Os dados de LST correspondem a geo-campos de médias obtidas no período de 8 dias, cuja unidade é K (Kelvin). Utilizando-se da álgebra de campo pontual, calcula-se inicialmente a média mensal, para obter-se um valor médio de LST para cada mês.

2.3. *Dados de cobertura terrestre*

Para caracterizar a cobertura do solo, também foram utilizados dados do produto de cobertura terrestre do MODIS (MCD12Q1, versão 6), que contém parâmetros de tipos de cobertura da terra e mudança no uso. Ele é produzido com uma resolução espacial de 500 m, com base em dados trimestrais (FRIEDL et al., 2002).. A principal classificação da cobertura terrestre a ser empregada baseia-se no esquema de classificação do Programa Geosfera-Biosfera Internacional (FRIEDL et. al., 2002).

2.3. **Métodos**

2.3.1 *Escala de razão normalizada*

Neste estudo, utilizaremos uma escala de razão normalizada (NRS, do inglês *normalized ratio scale*) para normalizar o valor de cada pixel baseado em uma razão, com o intuito de poder comparar imagens de LST obtidas em diferentes períodos, mantendo simultaneamente os seus valores originais. Esta técnica foi proposta por Rasul (2017) e compara o valor real de cada pixel com a cena inteira, então compara os valores de diferentes imagens. A equação é dada por:

$$LST_{NRS} = \frac{(LST)}{\sqrt{\sum (LST)^2}} \quad (1)$$

Após o cálculo das medias mensais, utiliza-se da álgebra de campo zonal para ponderar o valor de cada pixel na área de estudo pelo inverso da raiz quadrada do somatório do valor de todos os *pixels* ao quadrado (conforme a Equação 1), para cada geo-campo de média mensal. Após, é realizada uma operação pontual onde se multiplica o valor de cada pixel por um valor constante apropriado, afim de produzir um geo-campo cujo resultado apresentará valores de temperatura normalizadas próximas ao valor real.

2.3.2 Cálculo do índice UHI_{skin}

Neste estudo, utilizaremos o índice proposto por Jin (2012) para estimar a Ilha de Calor Urbano de Superfície (UHI_{skin}), utilizando a equação:

$$UHI_{skin} = T_{skin,urbana} - T_{skin,não-urbana(LC)} \quad (2)$$

onde UHI_{skin} é o índice de Ilha de Calor Urbano a nível de superfície, $T_{skin,urbana}$ é a média da temperatura de todos os pixels urbanos para uma dada região, e $T_{skin,não-urbana(LC)}$ é a média da temperatura de superfície de todos os pixels não-urbanas na região para uma cobertura terrestre específica (LC). Normalmente, para ser consistente com o índice de UHI à 2m, quando disponível a cobertura terrestre correspondente a terras cultivadas é selecionada como área não-urbana a ser comparada. Contudo, para algumas cidades, não há cobertura suficiente e então é necessária que outro tipo de cobertura seja utilizado para o cálculo do índice.

Sobre cada média mensal, foi utilizado uma operação de fatiamento da cobertura de solo para obter as áreas que correspondem a área urbana e área não-urbana para cada tipo de cobertura terrestre. Com base no resultado da operação, foi realizado uma

operação de média simples sobre todos os *pixels* urbanos contidos dentro do polígono dos limites administrativos municipais de Fortaleza/CE para calcular a $T_{skin,urbana}$ e a média simples sobre todos os pixels não-urbanos, para cada tipo de cobertura de solo, para calcular a $T_{skin,não-urbana(LC)}$. A partir desses valores, é calculado o índice de ilha de calor de superfície para cada mês, e o resultado é apresentado na forma de uma série temporal histórica.

A Fig. 2 representa o diagrama do OMT-G (*Object Modeling Technique for Geographic Applications*) correspondente aos modelos de dados utilizados e as operações a serem efetuadas.

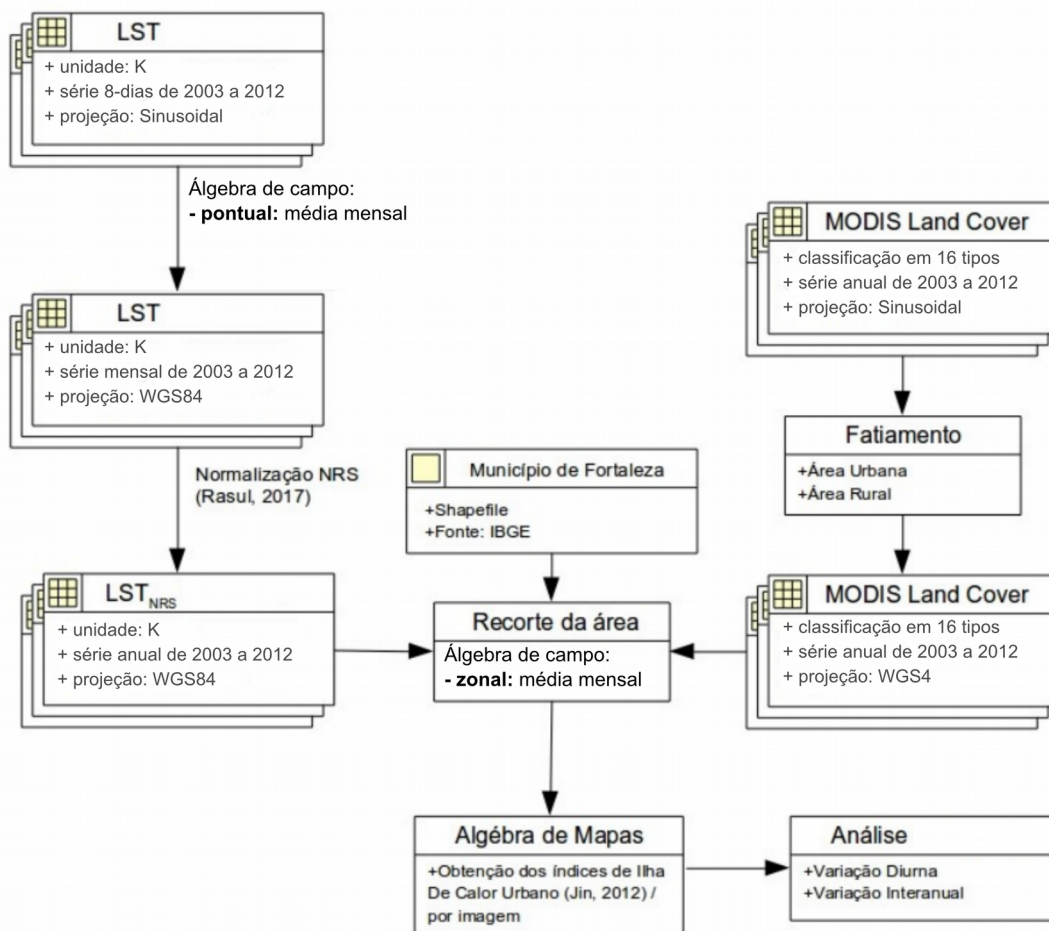


Fig. 2. Diagrama OMT-G com a metodologia sintetizada de geoprocessamento

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

a. Cobertura terrestre predominante na região não-urbana

A cobertura terrestre provida pelo MODIS é classificada em dezesseis tipos, conforme a Tabela 1. A cobertura terrestre de Fortaleza/CE e sua área de vizinhança são determinadas, para cada ano no período analisado, através dos dados de cobertura terrestre providos pelo MODIS, com resolução de 500m. As Figuras 3a e 3b ilustram a cobertura de solo de Fortaleza/CE e sua área de vizinhança para os anos de 2004 e 2012, respectivamente. A cobertura urbana de Fortaleza e região metropolitana foi marcada como a área em vermelho no mapa (LC = 13, área urbana); sendo uma cidade costeira (LC = 17), as regiões de vizinhança são predominantemente compostas por um misto entre savana-estépica (LC = 9) e vegetação herbácea (LC = 10), conforme ilustra as Figuras 3c e 3d. Desta forma, estas foram as coberturas terrestres utilizadas na comparação com a região urbana, na equação 2.

Tabela 1: Classificação de cobertura terrestre do MODIS (MCD12Q1).

Tipo de cobertura do solo	
1	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada
2	Floresta perene composta por vegetação latifoliada
3	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada
4	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada
5	Floresta mista
6	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem
7	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem
8	Savana arborizada
9	Savana estépica
10	Vegetação herbácea
11	Áreas úmidas permanentes
12	Terras agrícolas
13	Área urbana
14	Terras cultivadas
15	Gelo e neve
16	Vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
17	Água

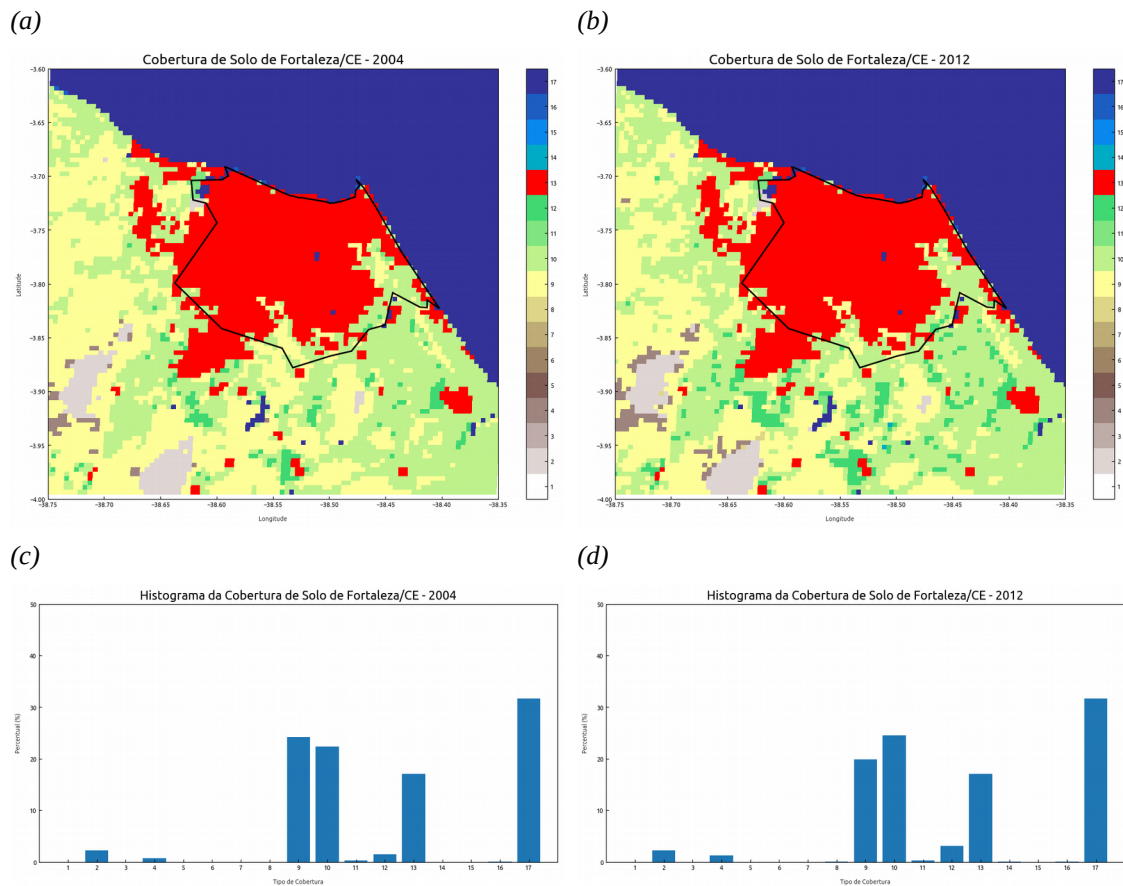


Fig. 3. Cobertura do solo em Fortaleza, Ceará, baseada sob observações do satélite MODIS em (a) 2004 e (b) 2012. Área urbana (LC = 13) está marcada em vermelho. Histograma com a distribuição de cobertura terrestre por pixel na área de estudo em (c) 2004 e (d) 2012.

b. Variação diurna e sazonalidade do UHI_{skin}

As Figuras 4 a 7 ilustram a variação espacial na LST_{NRS} no período diurno e o percentual de cobertura de dias com céu limpo para os anos de 2004 e 2012, respectivamente. É possível observar a partir das Fig. 3 e 5 que os máximos valores de LST_{NRS} no período diurno ocorrem nos meses de março, abril e maio. As temperaturas chegam a atingir valores entre 315 K e 325 K na área urbana, enquanto na maior parte da área não-urbana as temperaturas atingem um máximo de 310 K. Essas diferenças podem ser explicadas pela climatologia da região. No período entre Fevereiro e Maio, ocorre com maior frequência o regime de precipitação no município, sendo relacionado ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o hemisfério sul (GUERREIRO et. al., 2012).

A precipitação na região litorânea (que inclui o município) atinge mínimos de 600 mm e máximos de 2700 mm, com média próxima a 1400 mm (SANTOS et. al., 2009). As Fig. 4 e 6 representam bem a alta nebulosidade decorrente do deslocamento da ZCIT, uma vez que um percentual muito baixo de dias com condições de céu limpo pode ser observada nesse período. Com o deslocamento da ZCIT para o hemisfério sul, ocorre um enfraquecimento dos ventos alísios de sudeste, que constituem principalmente o campo de ventos local. A combinação desses fatores, ocasiona uma diminuição na troca de calor latente da superfície da área urbana por evaporação, uma vez que os ventos diminuem de intensidade e o ar fica rapidamente saturado de vapor d'água. Somado ao fato da impermeabilidade do solo urbano, ocorre um aumento na troca de calor sensível com a camada mais próxima de ar da atmosfera e um aumento na reemissão de ondas longas. Por outro lado, nas regiões vizinhas da área urbana, a presença de vegetação garante que a troca de energia predominante por evapotranspiração continue ocorrendo. O resultado é uma diferença nos valores de temperatura da superfície ao longo do dia entre a área urbana e a área não-urbana. No restante do período do ano, a diminuição no regime de chuvas e o fortalecimento dos ventos alísios devido o retorno da ZCIT para o hemisfério norte reestabelecem o equilíbrio na troca de energia por ondas longas, calor latente e calor sensível na área urbana.

As Figuras 8 a 11 ilustram a variação espacial na LST_{NRS} no período noturno e o percentual de cobertura de dias com céu limpo para os anos de 2004 e 2012, respectivamente. Ao contrário do que é documentado na literatura (JIN, 2012; RASUL et. al., 2017), não foi observado grandes diferenças entre a temperatura de superfície da área urbana e da área não-urbana durante o período noturno, com os valores máximos atingindo 298 K e mínimos atingindo 291 K em ambas as regiões. Apesar que em alguns meses a diferença entre as temperaturas foi aproximadamente de 2 K (equivalente a 2° C), consistente com os valores obtidos por Jin (2012) para as cidades de Beijing, na China, e Nova Iorque, nos Estados Unidos, as próprias incertezas na metodologia do presente estudo não permitem assegurar que o fenômeno observado é decorrente do acúmulo de energia pelos materiais urbanos (que possuem maior calor específico) liberado no período noturno, como é característico em ilhas de calor urbano.

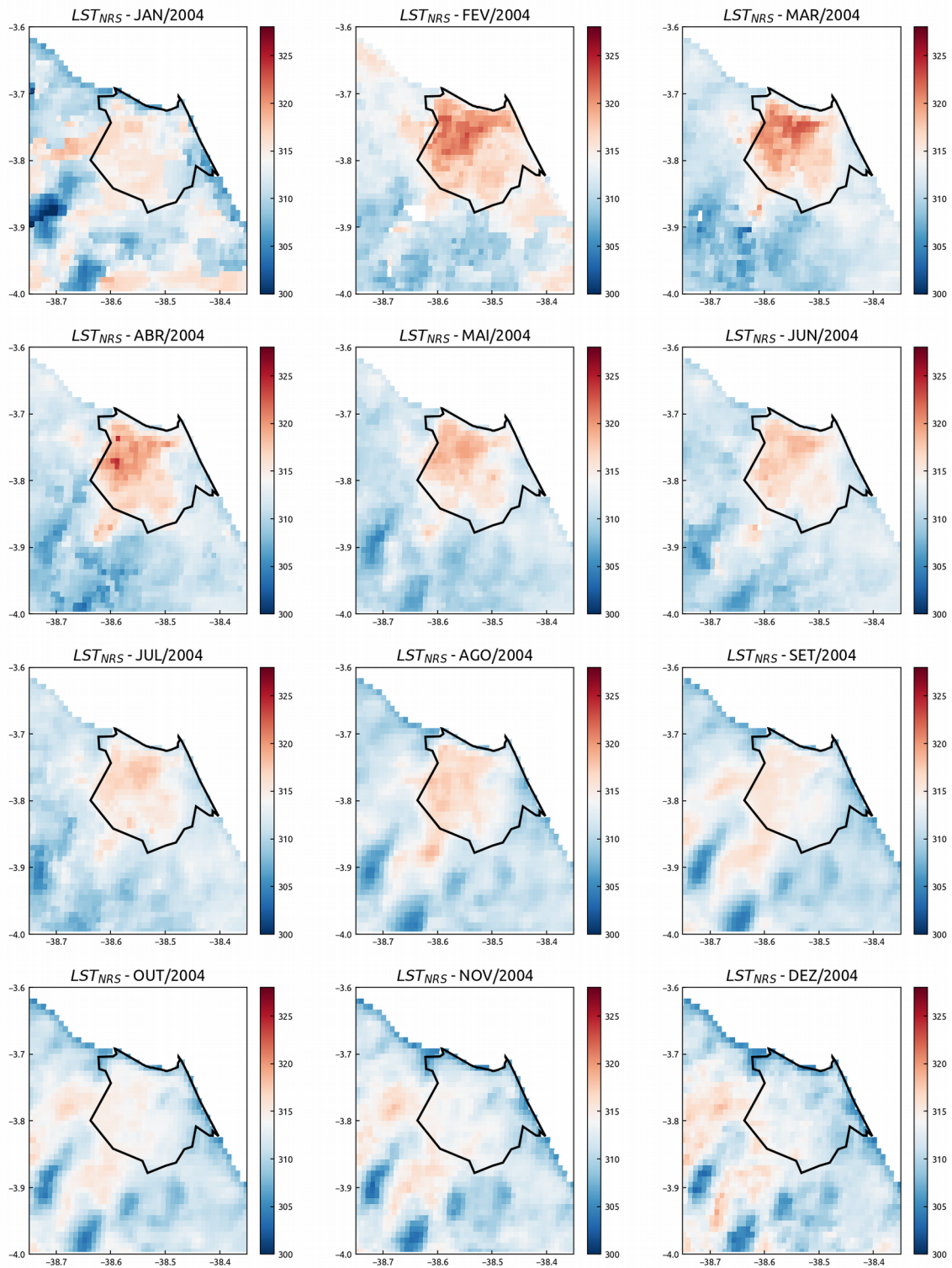


Fig. 4. Variação mensal da temperatura de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2004, no horário de 13:30 (dia). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

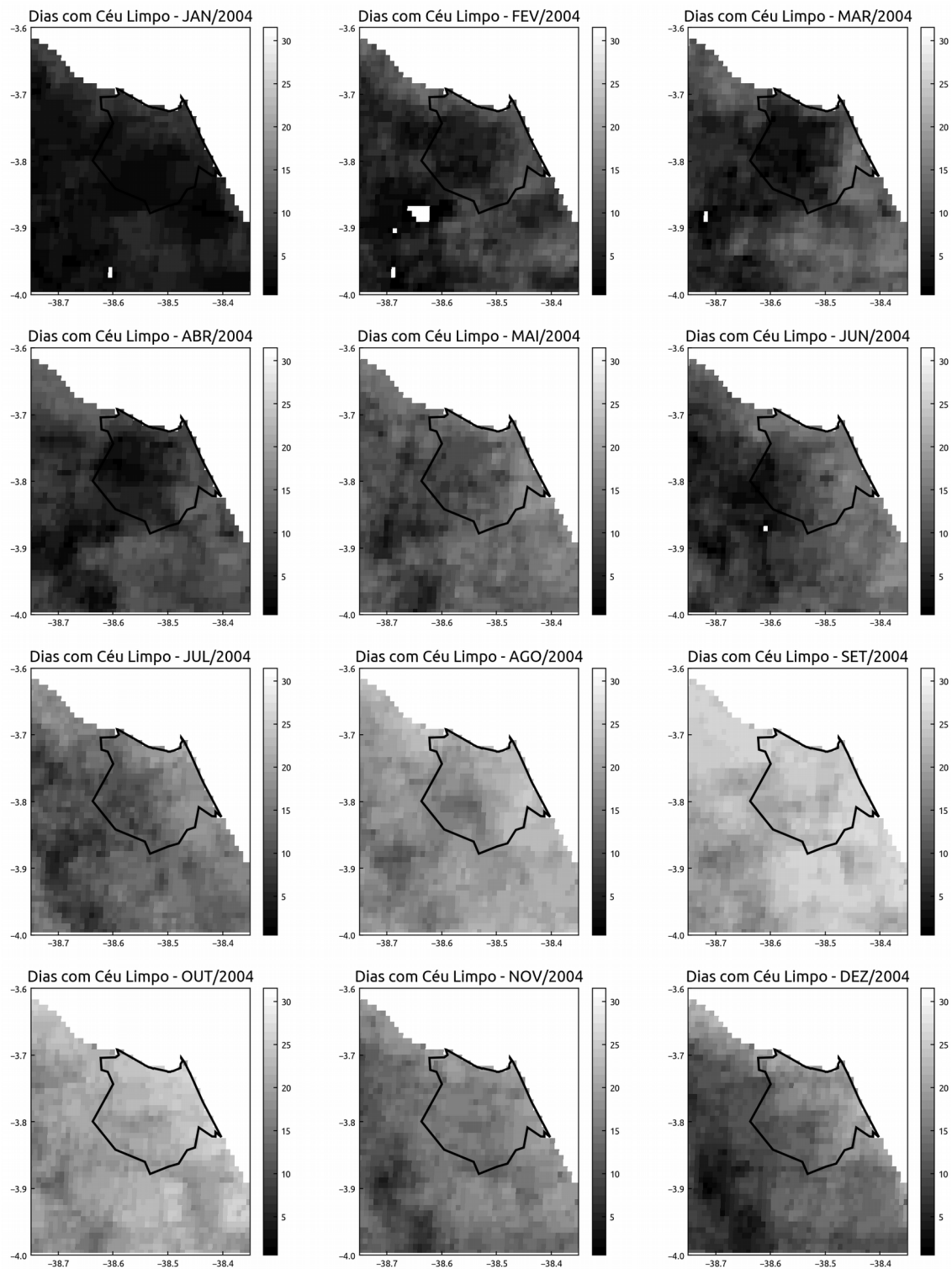


Fig. 5. Variação mensal do percentual de dias com céu limpo para cálculo da média de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2004, no horário de 13:30 (dia). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

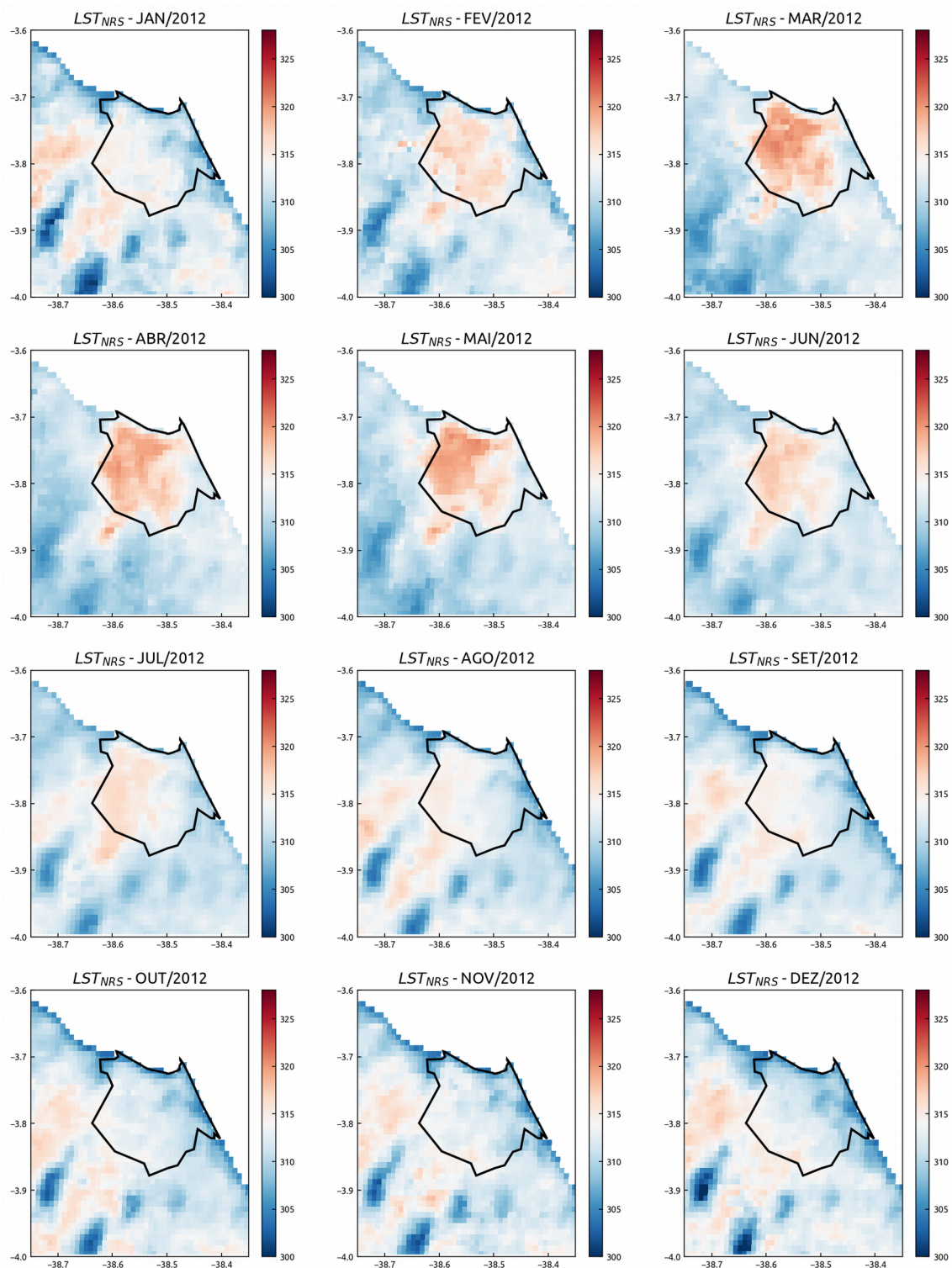


Fig. 6. Variação mensal da temperatura de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2012, no horário de 13:30 (dia). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

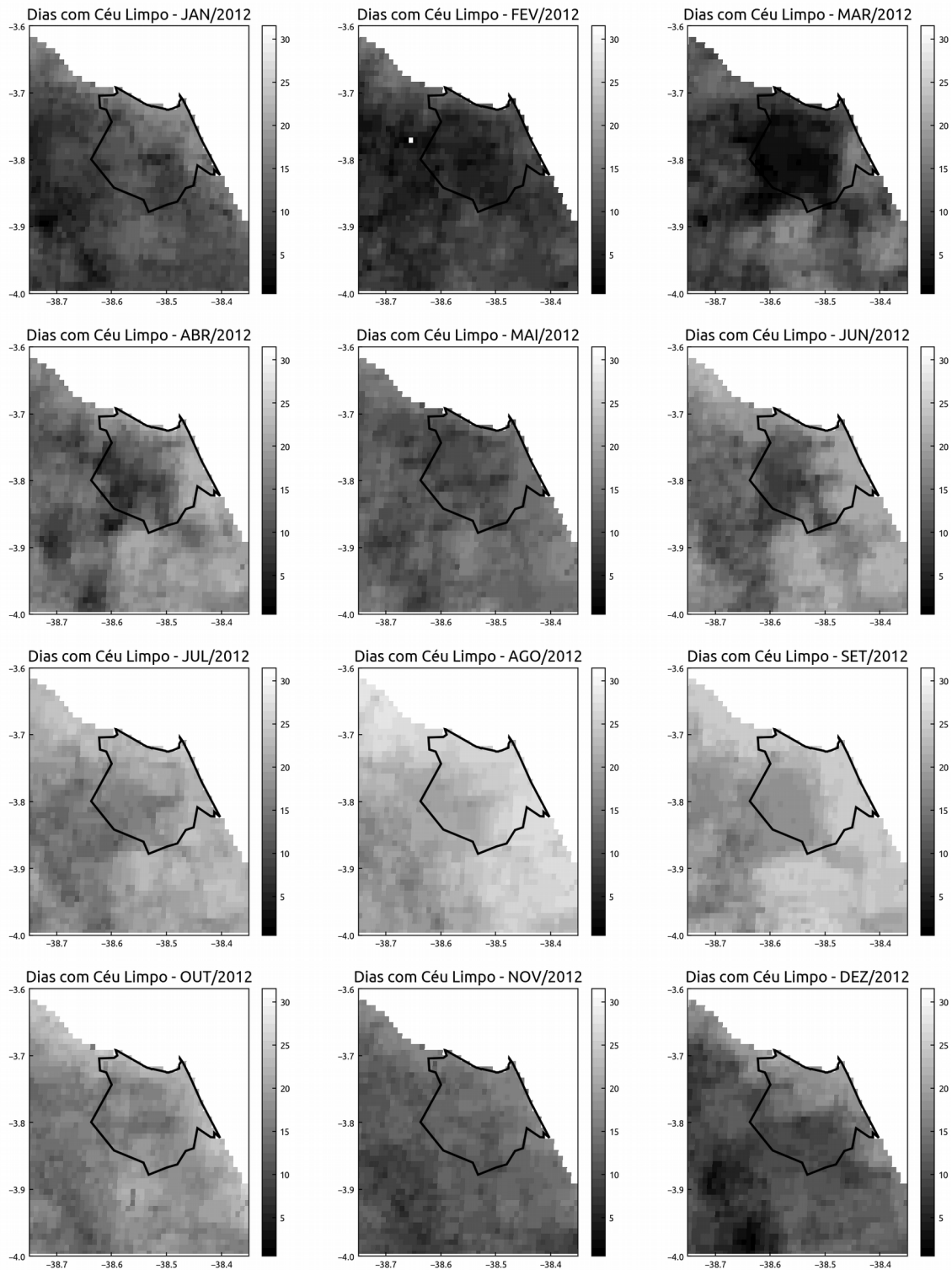


Fig. 7. Variação mensal do percentual de dias com céu limpo para cálculo da média de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2012, no horário de 13:30 (dia). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

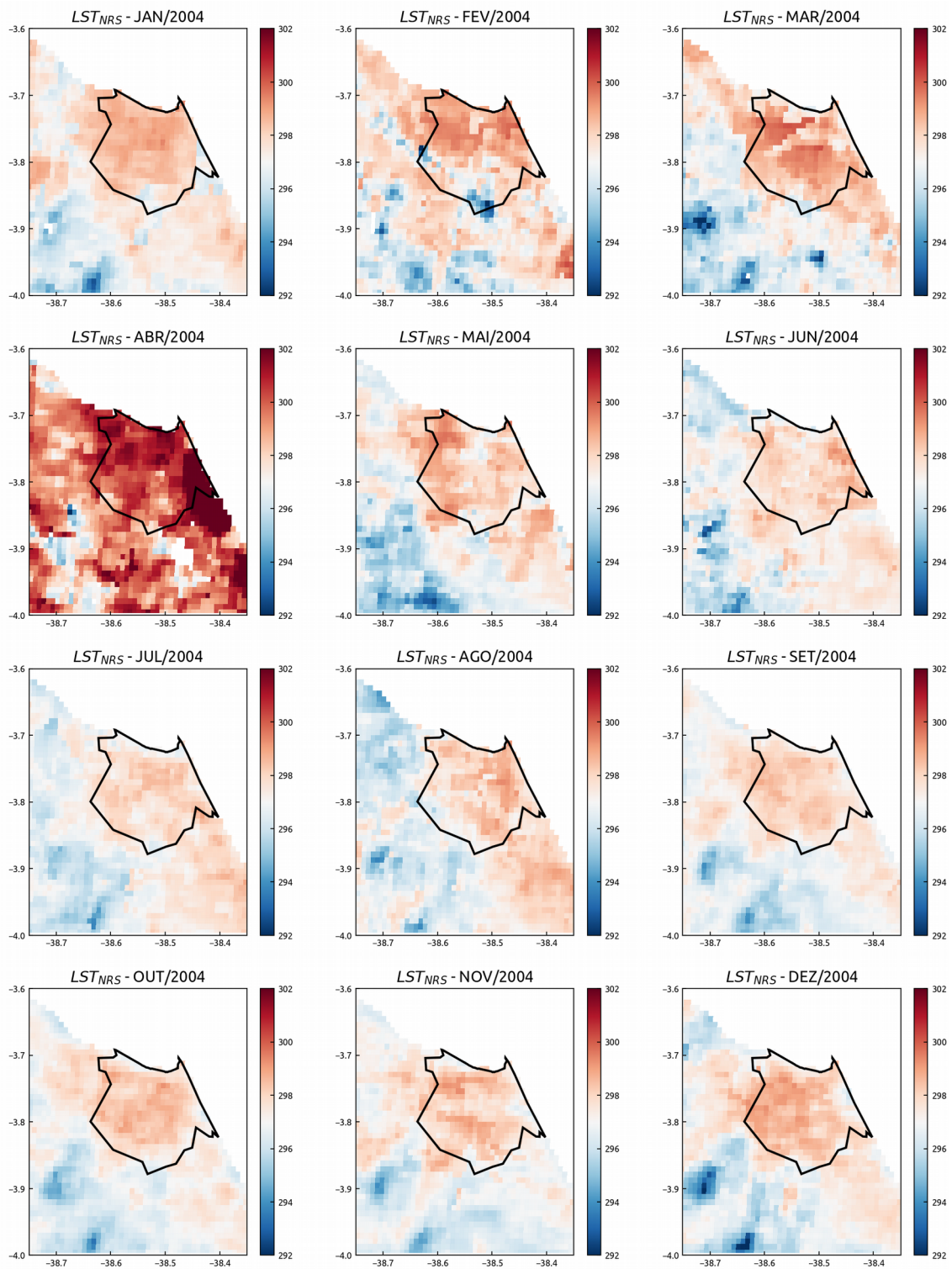


Fig. 8. Variação mensal da temperatura de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2004, no horário de 1:30 (noite). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

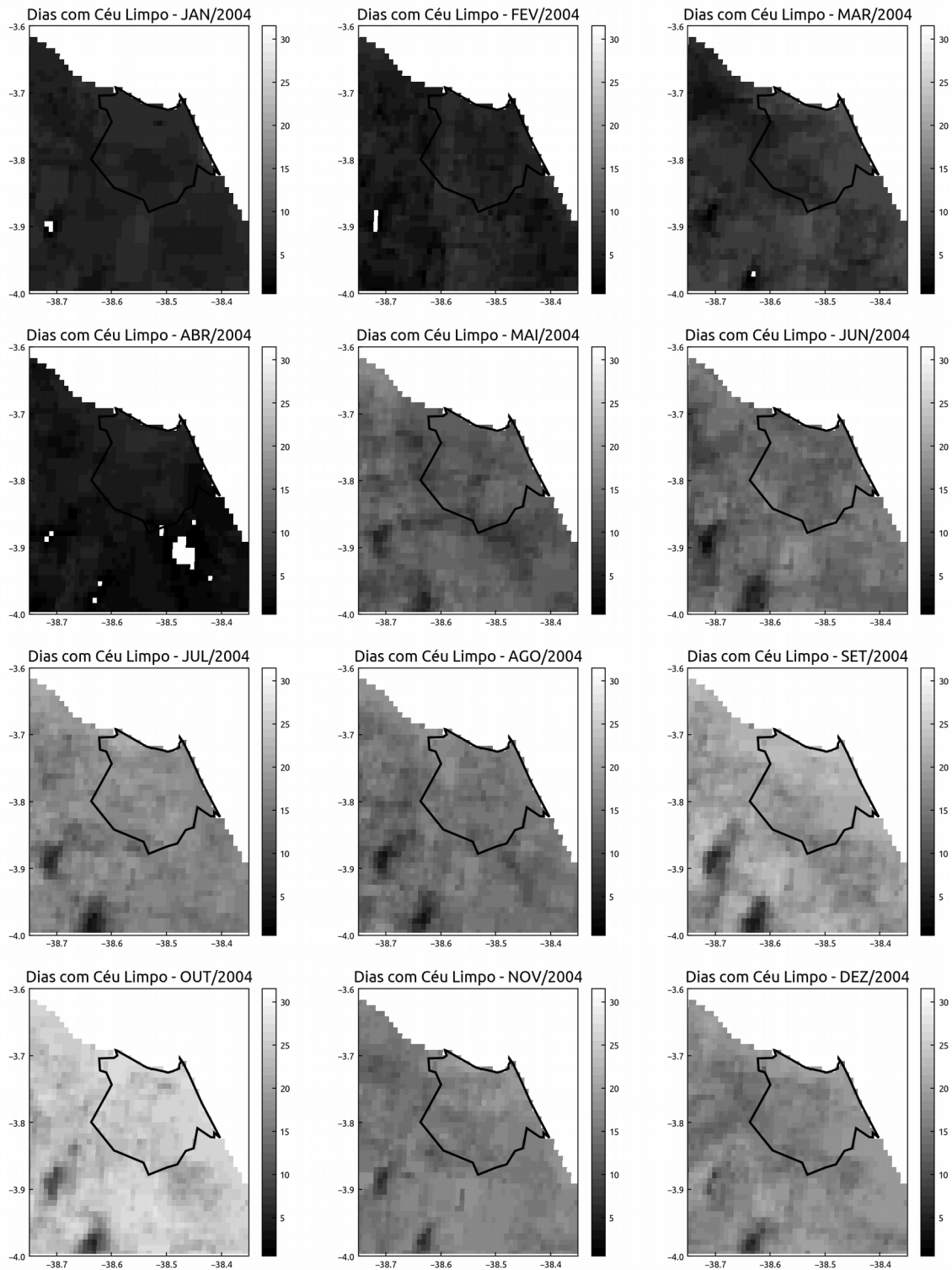


Fig. 9. Variação mensal do percentual de dias com céu limpo para cálculo da média de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2004, no horário de 1:30 (noite). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

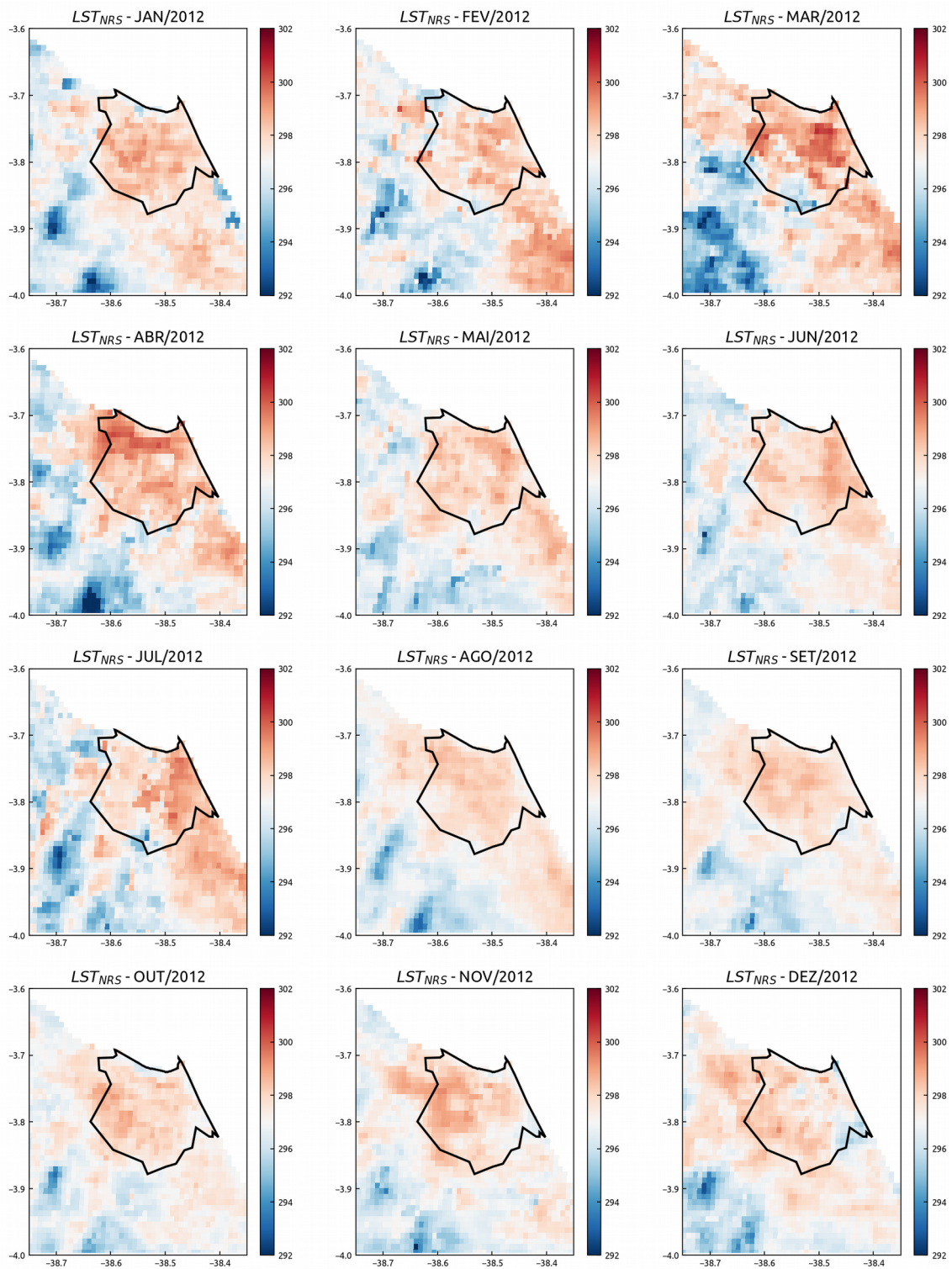


Fig. 10. Variação mensal da temperatura de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2004, no horário de 1:30 (noite). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

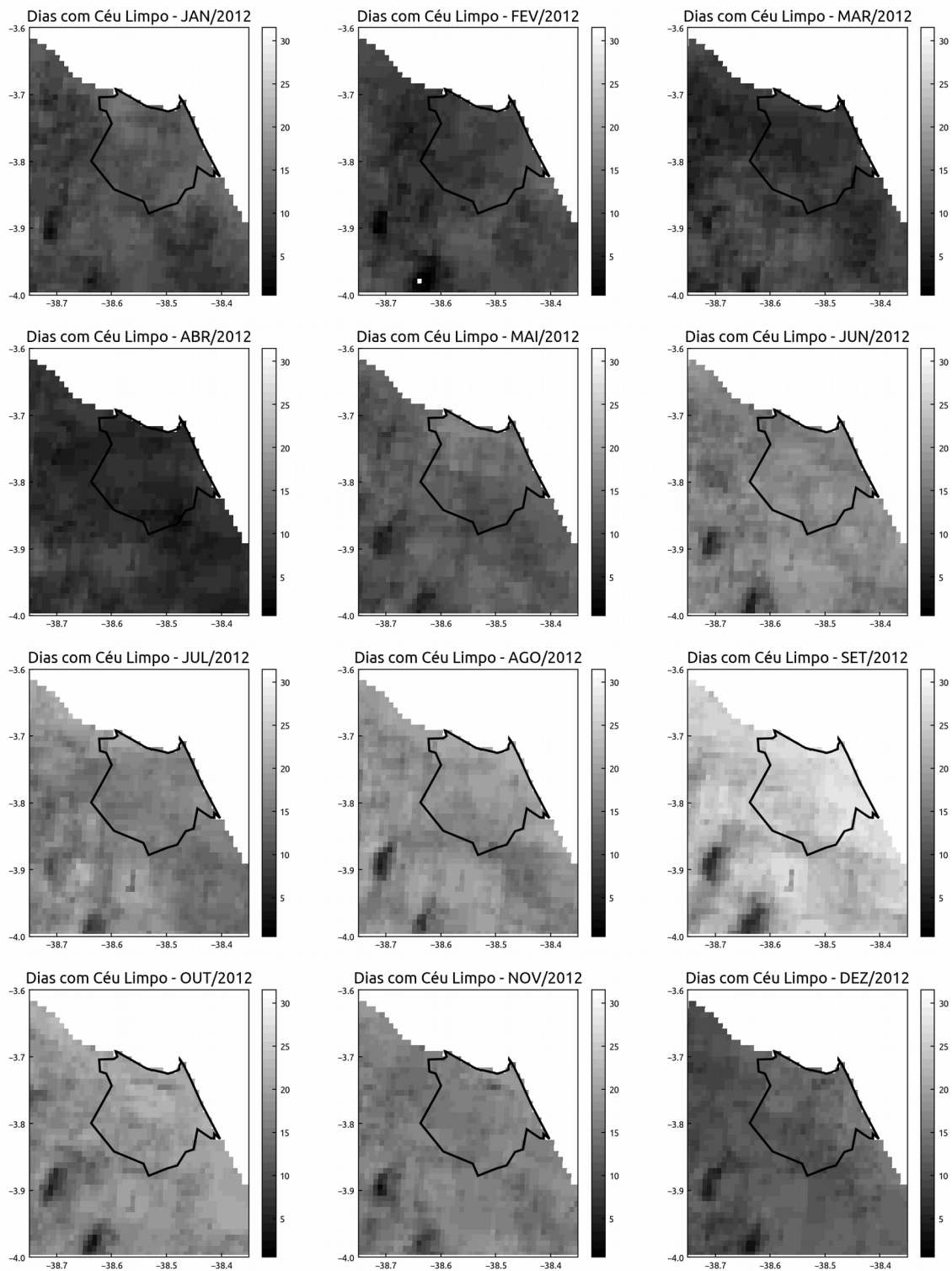
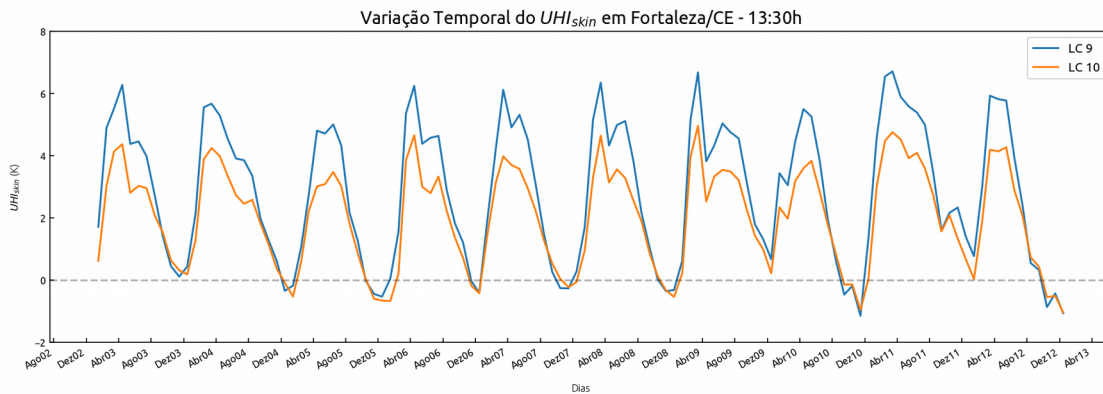


Fig. 11. Variação mensal do percentual de dias com céu limpo para cálculo da média de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, em 2012, no horário de 1:30 (noite). O polígono delimitado pela linha preta representa os limites do município.

c. *Variação interanual do UHI_{skin}*

A Figura 12 ilustra claramente a variabilidade interanual da UHI_{skin} no intervalo de 2003 à 2012, no período diurno. Os maiores índices observados variam entre 5 à 7 K durante o período de Mar-Abr-Mai, e a maior variação entre a temperatura de superfície da área urbana e com a região vizinha ocorre na savana-estépica (LC = 9). No entanto, apesar de uma diferença de aproximadamente 2 K entre os diferentes tipos de cobertura, o padrão geral não muda. Isso sugere que o UHI_{skin} é evidente, embora tenha variações interanuais e na magnitude de acordo com o tipo de cobertura utilizado.

(a)



(b)

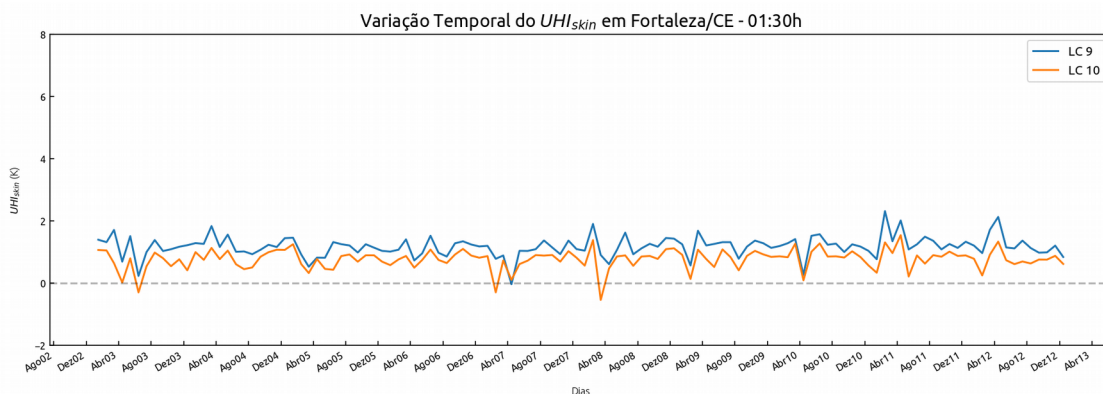


Fig. 12. Variação anual da temperatura de superfície terrestre normalizada (LST_{NRS}) em Fortaleza, Ceará, no horário de (a) 13:30 (dia) e (b) 1:30 (noite). Curva em azul representa a UHI_{skin} em relação à cobertura terrestre de savana-estépica (LC = 9) e a curva em laranja representa a UHI_{skin} em relação à cobertura terrestre de vegetação herbácea (LC = 10).



4. CONCLUSÕES GERAIS

No presente estudo foram utilizados métodos e técnicas de geoprocessamento para avaliar a possibilidade de ocorrência de UHI na cidade de Fortaleza, Ceará, que tornou-se evidente a partir da análise dos campos de temperatura de superfície. Há uma variação diurna na UHI_{skin} , com uma maior intensidade ocorrendo durante o período diurno do que durante o período noturno. Há também uma variação sazonal na UHI_{skin} , com o fenômeno ocorrendo com maior intensidade durante o período Março-Abril-Maio. Esta variação sazonal corresponde à uma combinação entre a sazonalidade da radiação solar e a climatologia da região.

A UHI_{skin} ocorrendo predominantemente durante o dia contraria o conceito de que ilhas de calor urbano são fenômenos exclusivamente noturnos. O fenômeno que ocorre no município de Fortaleza pode ser explicado em termos do balanço de energia entre o balanço de ondas longas e os fluxos de calor latente e sensível, que aumentam assim a temperatura da superfície. Apesar dos resultados obtidos serem preliminares, pois é necessário ajuste da metodologia na geração de uma UHI_{skin} mais precisa, sugere-se que as seguintes etapas adicionais sejam realizadas:

- Como a variabilidade da temperatura de superfície está relacionada com o tipo de uso e cobertura do solo e como sensores de média resolução espacial, devido ao tamanho de seus pixels, não são capazes de exprimir com exatidão a temperatura dos diversos alvos, tornam-se necessárias análises com maior refinamento dos dados a partir de sensores termais de maior resolução espacial, como através de produtos do Landsat/TM.
- O MODIS também fornece dados de albedo, dados de emissividade e dados de vegetação, que podem ser usados para abordar os mecanismos do balanço de energia na superfície.
- Avaliar as diferenças de temperatura entre Fortaleza/CE e os municípios pertencentes a sua região metropolitana, verificando ainda se existe correlação com entre a diferença na temperatura, a cobertura de solo e a densidade demográfica nos municípios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, H.R.; LOMBARDO, M.A. 2016. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 20, n. 1, p. 160-177.
- FRIEDL, M.A. et. al. 2002. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. **Remote Sens. Environ.**, 83, 287–302.
- GUERREIRO, M.J. et. al. 2013. Long term variation of precipitation indices in Ceará State, Northeast Brazil. **Int. J. Climatol.**, 33: 2929-2939.
- JIN, M.S. 2012. Developing an Index to Measure Urban Heat Island Effect Using Satellite Land Skin Temperature and Land Cover Observations. **J. Climate**, 25, 6193–6201
- MANUAL da base territorial 2014. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2014. 157 p.
- OKE, T.R. 2006. Towards better scientific communication in urban climate. **Theoretical and applied climatology**, v. 84, n. 1–3, p. 179–190.
- RASUL, A.; BALZTER, H.; SMITH, C. 2017. Applying a normalized ratio scale technique to assess influences of urban expansion on land surface temperature of the semi-arid city of Erbil **International Journal of Remote Sensing**, 38:13, 3960-3980
- SANTOS, C.A.C. et al. 2009. Tendências dos índices de precipitação no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 39-47.
- WAN, Z. 2014. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 36-45.