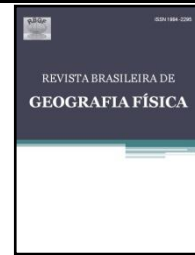




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Uso de Sensoriamento Remoto na análise da temperatura da superfície em áreas de floresta tropical sazonalmente seca

Cloves V. B. Santos¹, Herica F. S. Carvalho², Marcelo J. Silva³, Magna S. B. Moura⁴, Josicléda D. Galvêncio⁵

¹Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente; Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA); Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: 0000-0002-2870-8030. E-mail: clovesvilasboas@gmail.br (Corresponding author).

²Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente; Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA); Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: 0000-0002-9052-7898. E-mail: herica.carvalho@ufpe.br.

³M.Sc. em Engenharia Agrícola; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA); Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). ORCID: 0000-0001-9706-5983. E-mail: marcelosilva145@hotmail.com

⁴Ph.D.; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). ORCID: 0000-0002-2844-1399. E-mail: magna.moura@embrapa.br.

⁵Ph.D.; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: josicleda@ufpe.br [ORCID](#)

Artigo recebido em 15/06/ 2019 e aceito em 11/11/2029

RESUMO

Pesquisas com o foco na criação de modelos para analisar a temperatura da superfície com sensoriamento remoto são muito importantes, pois servem como base de informações que auxiliarão no gerenciamento hidrológico, agrícola e ambiental. O presente estudo utilizou dados remotos na estimativa de temperatura da superfície em áreas de florestas secas, e seu objetivo foi verificar qual entre os produtos MODIS melhor representa a temperatura da superfície em áreas de caatinga. A área de estudo compreende uma caatinga preservada e outra em sucessão ecológica. Foram utilizadas como base espacial, dados de temperatura da superfície e de NDVI obtidos a partir do sensor MODIS e dados de temperatura do ar mensuradas por meio de estações agrometeorológicas de superfície. A análise se deu por regressão linear e coeficiente de correlação de Pearson entre a temperatura estimada pelo satélite e do ar na superfície. Os resultados apresentaram variações temporais nas estimativas pelo MODIS, sendo que os produtos diurnos do Terra e noturnos do Aqua foram os que melhor representaram a temperatura máxima e mínima. Para isso, equações de ajustes são propostas para áreas de caatinga com diferentes tipos de cobertura. As variações na temperatura estavam de acordo com a sazonalidade do NDVI da floresta e, ao longo dos dezessete anos, foi verificado aumento nos valores de temperatura nas áreas de estudo.

Palavras-chave: Bioma Caatinga, LST, NDVI, MODIS.

Use of Remote Sensing in Surface Temperature Analysis in Seasonally Dry Tropical Forest

ABSTRACT

Research with a focus on creating models to analyze the surface temperature with remote sensing is very important, as they serve as a base of information that will assist in hydrological, agricultural, and environmental management. The present study used remote data to estimate surface temperature in dry forest areas, and its objective was to verify which of the MODIS products best represents the surface temperature in caatinga areas. The study area comprises a preserved caatinga and another in ecological succession. Surface temperature data and NDVI obtained by MODIS sensor and air temperature data measured using surface agrometeorological stations at each site were used. The analysis was done by linear regression and Pearson's correlation coefficient between the temperature estimated by the satellite and the air temperature on the surface. The results showed seasonal variations on the MODIS data, and the data that best fitted the maximum and minimum temperatures were obtained from Terra daytime and Aqua nighttime. Equations are proposed to best adjustments of the data according to the

caatinga surface vegetation cover. The temperature variations were, according to the NDVI forest seasonality, and over the seventeen years, the temperature increased in both studied sites.

Keywords: Caatinga Biome, LST, NDVI, MODIS.

Introdução

As pesquisas com foco na análise das variações da temperatura do ar e da superfície terrestre são muito importantes. Essas variáveis servem como parâmetro para questões relacionadas ao gerenciamento hidrológico, agrícola e ambiental (Hereher e El Kenawy, 2020), bem como, em estudos ecológicos, hidrológicos e climatológicos (Khesali e Mobasher, 2020; Galvêncio, 2019; Viana et al., 2019; Oliveira et al., 2018; Gomes et al., 2016, Silva et al., 2016; Lima et al., 2016; Maier et al., 2016; Silva et al., 2015; Singh, 2015; Oliveira et al., 2015; Aleixo e Silva Neto, 2015; Ribeiro et al., 2014; Zhu et al., 2013).

As informações de temperatura da superfície são convencionalmente coletadas por sensores instalados em estações meteorológicas (NourEldeen et al., 2020). Segundo Vancutsem et al. (2010), essas amostras são coletadas pontualmente, e raramente são projetadas para uma escala regional, além disso, dependem de uma infraestrutura para o seu funcionamento. Com essa limitação na área de abrangência nos dados das estações que monitoram mudanças em grandes áreas, faz-se necessário, a geração de matrizes de temperatura com melhor resolução espacial (Khesali e Mobasher, 2020).

De acordo com Benali et al. (2012), informações meteorológicas, a exemplo da temperatura do ar, têm uma capacidade limitada em função da heterogeneidade de grandes áreas. Para Hereher e El Kenawy (2020), as estações tradicionais são distribuídas de forma desigual no espaço, com dados que também podem ter descontinuidades temporais em função do não-funcionamento ou manutenção dos equipamentos.

O uso das informações extraídas por sensores remotos possibilita analisar a superfície sem o contato direto com os alvos existentes (Rosa, 2005). Estudos apontam que, apesar de algumas limitações, o aperfeiçoamento dos dados de sensores remotos com melhores resoluções e maior precisão nos dados, permite diversas aplicações (Pereira et al., 2016); e dentre elas está a análise da temperatura da superfície utilizando as faixas termiais dos sensores. Bartkowiak et al. (2019) ressaltam que o sensoriamento remoto contribui no aprimoramento das informações espaço-temporais sobre a distribuição da temperatura na superfície.

Segundo Alexander (2020), as resoluções espaciais de bandas termiais são menores que as do visível e do infravermelho, a exemplo do sensor Spectrorradiômetro de Imagem de Resolução

Moderada (MODIS). No entanto, os dados produzidos por meio desse sensor constituem uma alternativa para a obtenção de dados em larga escala por possuir uma frequência diária de imageamento. Portanto, com o uso dessas informações remotas, se tratando de estudos em escalas temporais, podem vir a reduzir a necessidade de estações em nível local se existirem bons modelos para as estimativas (Benali et al., 2012). Assim, é importante a criação de modelos que permitam a estimativa da temperatura para aplicações em escalas maiores.

A necessidade de desenvolver e validar modelos a partir de dados de satélite para que se tenham informações espaciais, sobretudo com relação a temperatura, levaram pesquisadores à busca por modelos baseados em informações orbitais (Zhu et al., 2013). O sensor MODIS é um dos principais sensores das plataformas Terra e Aqua do Sistema de Observação da Terra da NASA (Duan et al., 2019). Esta plataforma fornece o produto LST (*Land Surface Temperature*), que é gerado de dois canais na faixa do infravermelho termal (TIR), 31 (10,78 - 11,28 μm) e 32 (11,77 - 12,17) (Benali et al. 2012). O produto LST apresenta variações de temperatura da superfície com resolução temporal de até 20 anos de dados, o que permite segundo Pires (2015), uma análise de variações em escalas multitemporais.

Em ambientes semiáridos, o monitoramento climático tem limitações por possuírem poucas estações de monitoramento com boa distribuição espacial (El Kenawy et al., 2019), o que traz à tona grandes perspectivas de uso de produtos de satélite. Essas regiões no Brasil têm predominância de floresta tropical sazonalmente seca, localmente conhecida como caatinga. Trata-se de uma das áreas do país que tem passado por grandes secas e registros de precipitação que remetem a um clima variando de semiárido a árido. Com isso, se tratando de uma região com características muito peculiares, um dos desafios para o uso do sensoriamento remoto em análises espaciais tem sido a necessidade de validação das informações extraídas dos sensores a bordo de satélites.

Análises espaço-temporais com produtos validados para regiões específicas do semiárido brasileiro ainda são muito incipientes. Suas aplicações envolvem a caracterização e estudos climáticos em áreas importantes para o desenvolvimento regional, como bacias hidrográficas, agricultura, ecossistemas e no entendimento de processos de sucessão ecológica.

Ao longo do tempo foram desenvolvidas pesquisas visando análises e geração modelos que atendam a mensuração das variáveis ambientais como a temperatura em diversas regiões do mundo a exemplo dos estudos de Vancutsem et al. (2010); Benali et al. (2012); Zhu et al. (2013); Golkar et al. (2017); Cao e Sanchez-Azofeifa (2017); Araújo et al. (2018); El Kenawy et al. (2019); Zhao et al. (2019); Alexander (2020); NourEldeen et al. (2020) e Yao et al. (2020). Porém, sem validações de produtos para áreas da caatinga ou do semiárido brasileiro.

Portanto, o objetivo do presente estudo é analisar a temperatura da superfície obtida por meio de sensoriamento remoto com dados de superfície, e verificar qual entre os produtos MODIS melhor representa temperatura em áreas de florestas secas.

Material e métodos

Área de Estudo

A pesquisa foi realizada em dois sítios experimentais, conforme Figura 1, no estado de Pernambuco. O primeiro sítio se localiza no município de Petrolina, na região do Vale do São Francisco, em uma área de caatinga preservada (CP) (09°02 S; 40°19 W), situada na estação experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, no Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido (Embrapa Semiárido). Essa área apresenta temperatura em média anual de 26 °C e precipitação anual entorno de 510 mm (Souza et al., 2015). No entanto, a região tem apresentado precipitações abaixo da média desde 2012. A área está preservada há mais de 40 anos e é composta por uma vegetação arbustivo arbórea, hiperxerofítica com plantas de altura média de 5,0 m (Souza et al., 2017).

O segundo sítio experimental é uma área de caatinga em processo de sucessão ecológica (CS) (07°27 S; 40°25 W) situada na estação experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), no município de Araripina. Segundo Lacerda et al. (2016), a temperatura nessa região varia entre 24 e 26 °C, com precipitação média de 800 mm anuais.

Grande parte da região do Araripe passou por modificações no seu ambiente ocasionadas, principalmente, pela retirada da cobertura vegetal nativa para uso de lenha pelas indústrias gesseiras como fonte de energia (SÁ et al., 2008). Algumas dessas áreas encontram-se com a vegetação em estado de regeneração. Nesse sentido, a área CS do presente

estudo, após desmatada, foi utilizada para cultivos de feijão na década de 70, milho e sorgo até os anos 90, passando então por um período de uso apenas para pastejo animal durante a época das chuvas nos anos 2000, e a vegetação do local se encontra em sucessão ecológica obtendo uma altura média de 1,20 m de altura (Pires et al., 2017).

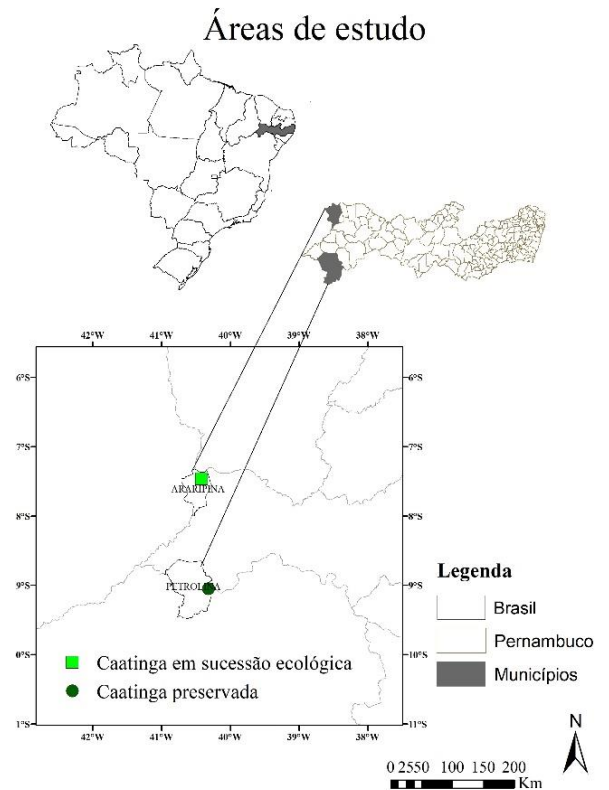


Figura 1 – Localização das áreas de estudo *Base Espacial (Produtos MODIS)*.

Como base espacial para o estudo foram utilizados dados de temperatura da superfície (Ts), assim como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) gerados por meio do sensor MODIS a bordo dos Satélites Terra e Aqua. O sensor possui uma resolução temporal de 1-2 dias, no entanto, a depender da variável e do produto que está sendo utilizado, pode ser diário ou em compilação de dados, a exemplo, entre 8 ou 16 dias (Martins e Rosa, 2019).

Para a temperatura da superfície foram utilizados os dados do dia e da noite dos produtos MOD11A2 e MYD11A2 (*Land Surface Temperature and Emissivity*). A resolução espacial do LST é de 1.000 metros. Esse produto é voltado especificamente para o mapeamento da temperatura e emissividade da superfície, sendo aplicado em diferentes tipos de usos (Martins e Rosa, 2019).

Para o índice de vegetação foi utilizado o NDVI obtido por meio dos produtos MOD13Q1 e MYD13Q1 (*Vegetation Indices*). O NDVI é um índice proposto por Rouse et al. (1973), e utiliza regiões do vermelho e infravermelho em um processo de diferença normalizada que realça a vegetação verde (Santos et al. 2017). Seus valores variam de -1 a 1, no qual, valores mais altos representam maior teor de clorofila e o potencial fotossintético de uma cobertura vegetal, o que é ao contrário nos valores mais baixos, onde representa estresse na vegetação por meio da redução da clorofila e as variações na estrutura interna das folhas em função do estresse hídrico (Amiri et al., 2020). Segundo Zanzarini et al. (2013), com esse índice sendo analisado em diferentes datas, é possível a análise da variação de área verde durante um período, e isso vem a ser um bom parâmetro para a avaliação da sazonalidade da vegetação.

A série temporal de LST e NDVI (Figuras 4 e 5) teve início em 2003 e foi utilizada até 2019 com dados compilados a cada 8 dias para Ts e 16 dias para o NDVI. É válido ressaltar que o uso dessas compilações evita contaminação nos dados por meio de nuvens e aerossóis (Hereher e El Kenawy, 2020).

Os dados do MODIS foram adquiridos gratuitamente por meio de uma plataforma eletrônica da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) (<https://modis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/global/subset.pl>). Para o presente estudo utilizou-se somente o pixel correspondente a área preservada (CP) e a área em estado de sucessão ecológica (CS), onde os dados de superfície foram obtidos.

Dados Meteorológicos

Foram utilizados dados diários de temperatura do ar (Ta) máxima (T_{máx}) e mínima (T_{mín}), obtidos por meio de duas estações agrometeorológicas localizadas nas proximidades das áreas de estudo, sendo uma pertencente a Embrapa Semiárido e outra a Agência Pernambucana de Águas e Clima, respectivamente, representando as áreas de caatinga preservada (CP) e em sucessão ecológica (CS). A medição da T_{máx} e T_{mín} nas áreas de estudo foi realizada a dois metros da superfície, conforme estabelecido de acordo com os padrões da Organização Meteorológica Mundial (OMM) (Vancutsem et al., 2010; Zhu et al., 2013).

A série de dados meteorológicos para fins de correlação com os dados do sensor MODIS correspondeu ao período de junho de 2015 a maio de 2018.

Comparação entre Ta e Ts nas análises

Os dados de Ts do sensor MODIS foram comparados com as medições diárias de T_{máx} e T_{mín}, extraídas das estações agrometeorológicas automáticas presentes em ambas as regiões. Também foram criados perfis diurnos e noturnos de Ts por meio dos dados extraídos dos produtos do sensor MODIS.

Segundo El Kenawy et al. (2019), existe um certo grau de incerteza no uso do produto LST do MODIS relacionado aos efeitos atmosféricos, angulares e de emissividade, no entanto, os autores sugerem comparações dos dados MODIS em relação a medições no solo para verificar o nível de relação entre a superfície e o satélite. Assim, no presente estudo, foi utilizado como parâmetro de avaliação a correlação de Pearson (*r*) para a análise da relação entre Ts obtida por meio do sensor MODIS Terra e Aqua e a Ta mensurada por meio das estações agrometeorológicas.

O coeficiente de correlação de Pearson assume valores de -1 a 1, à medida em que se aproxima de um, positivo ou negativo, a correlação fica mais forte (Galarça et al., 2010). Além deste, foi realizado o teste de significância ao nível de confiança de 5%.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R.

Resultados e discussão

Os perfis de análise da Ts do dia e da noite foram gerados com a extração dos valores de pixel do sensor MODIS correspondentes ao uso do solo de cada sítio de estudo para que fosse relacionado com os dados T_{máx} e T_{mín} das estações agrometeorológicas.

A distribuição dos dados apresentada conforme as Figuras 2 e 3, mostra sua variabilidade em ambos os sítios durante um os três anos de análise (2015 – 2018). Entre a Ts e Ta houve semelhanças nos padrões de comportamento ao longo do período analisado, no entanto, existem grandes variações na dispersão dos dados, com isso, é válido ressaltar que as correlações contemplam dados de Ta mensurada a 2 m da superfície e Ts mensurados a 705 km de altitude. Para as observações noturnas do MODIS, os padrões da Ts estavam mais próximos ao compará-los com a T_{mín} do ar.

Vale ressaltar que embora os dados de Ts tenham um comportamento semelhante a Ta e terem apresentado bons coeficientes de correlação, o pixel do sensor MODIS para o produto LST tem uma resolução espacial de 1.000 metros, ou seja, em alguns casos pode haver mistura de alvos, o que vem a influenciar os valores espectrais dos pixels, como o caso da CS, que

possui uma área de tamanho inferior a cobertura do pixel, no entanto, apresentou resultados significativos e superiores em relação a área CP, que apresenta uma área mais homogênea no local estudado, e com isso, valores mais representativos para uma amostragem. Galvêncio et al. (2009) comparando a temperatura do ar com a temperatura da superfície estimada com Landsat 5 em área do semiárido da Paraíba observaram que em CS a diferença entre a temperatura do ar e da superfície foi de apenas 4% no período diurno. Segundo os autores, apesar da temperatura da superfície ser superior à temperatura do ar, especialmente no período diurno, quando o solo recebe maior quantidade de radiação eletromagnética aquecendo a superfície, os valores estimados da temperatura à superfície por meio de imagem do satélite Landsat 5 se aproximam bastante às

temperaturas do ar na área estudada no horário do imageamento. A literatura tem mostrado que quanto mais degradada é a área, mais a temperatura do ar se aproxima da temperatura da superfície. Ou seja, mostrando a grande influência do desmatamento no aumento da temperatura do ar e, conseqüentemente, nos impactos sociais que esse desmatamento provoca. Portanto, há uma tendência da temperatura do ar se aproximar da temperatura da superfície em áreas degradadas. Os resultados deste estudo corroboram para esta discussão científica, uma vez que a temperatura máxima do ar está mais próxima da temperatura da superfície, no período diurno, na área degradada, Figura 3. Enquanto no período noturno, a área preservada apresenta uma maior relação com a temperatura da superfície, Figura 2, que tem maior equilíbrio térmico.

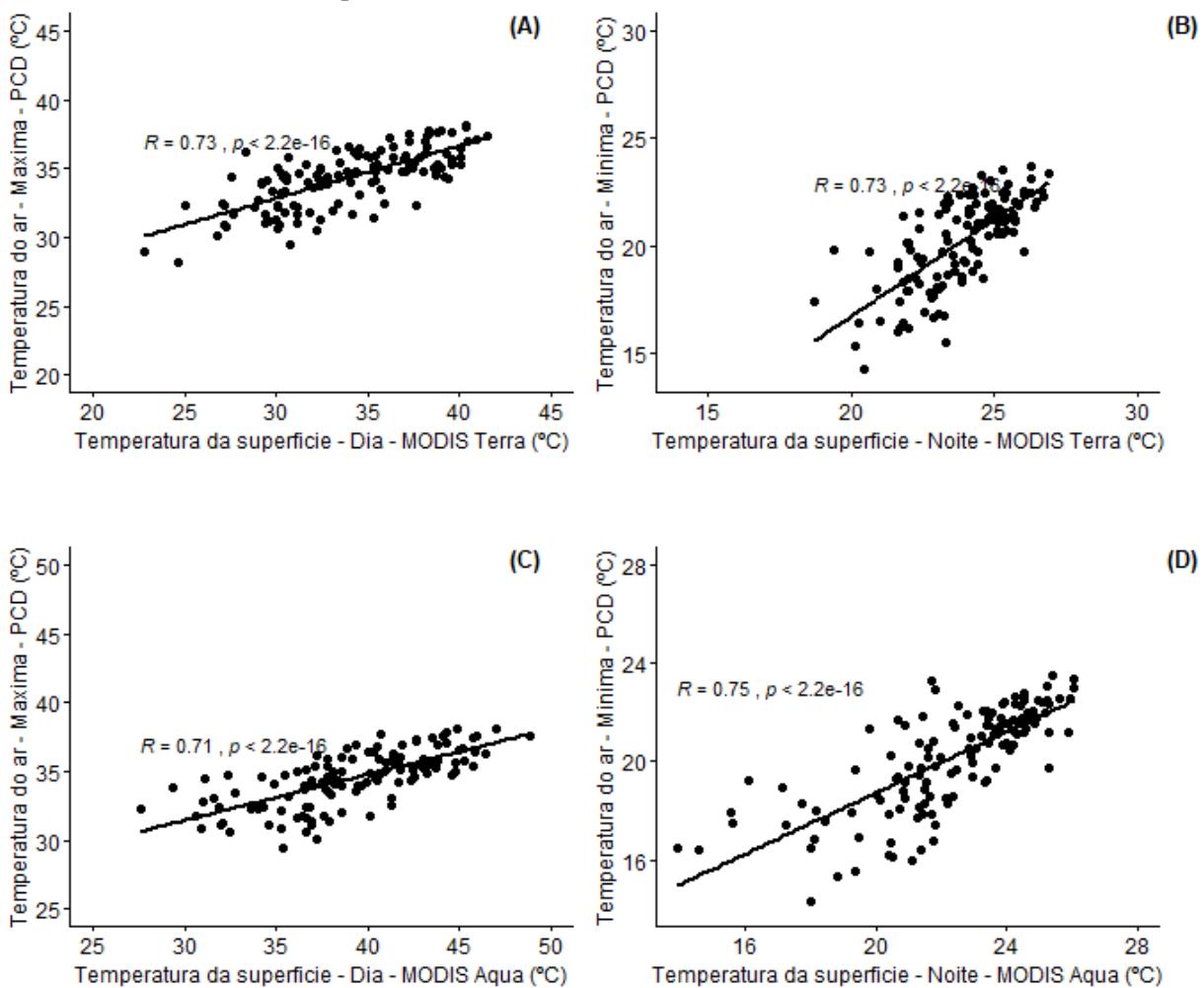


Figura 2 – Correlações entre a temperatura do ar máxima ($T_{máx}$) e mínima ($T_{mín}$) com a temperatura da superfície (T_s) diurna e noturna para o MODIS Terra e Aqua, em área de Caatinga preservada (CP).

O presente estudo mostrou variações na dispersão dos dados apresentando um coeficiente de determinação (R^2) variando entre 0,43 e 0,60 para as duas áreas de estudo. Outros estudos têm avaliados a

precisão dos dados estimados com MODIS e àqueles observados em superfície. Vancutsem et al. (2010) analisando diferentes usos do solo na África, em que foram obtidos R^2 variando entre 0,42 e 0,86, observaram que as informações diurnas do sensor

MODIS superestimaram a $T_{máx}$ na superfície com diferenças expressivas que chegaram a 20 °C; no entanto, mostraram boas correlações entre os dados da noite do Aqua em relação a $T_{mín}$. Com isso, foi verificado que o produto do Aqua noite foi melhor na análise da temperatura mínima. Apesar desses

estudos apontarem alguns problemas na precisão da estimativa da temperatura do MODIS é importante destacar que as relações entre as condições ambientais da superfície são muito bem representadas.

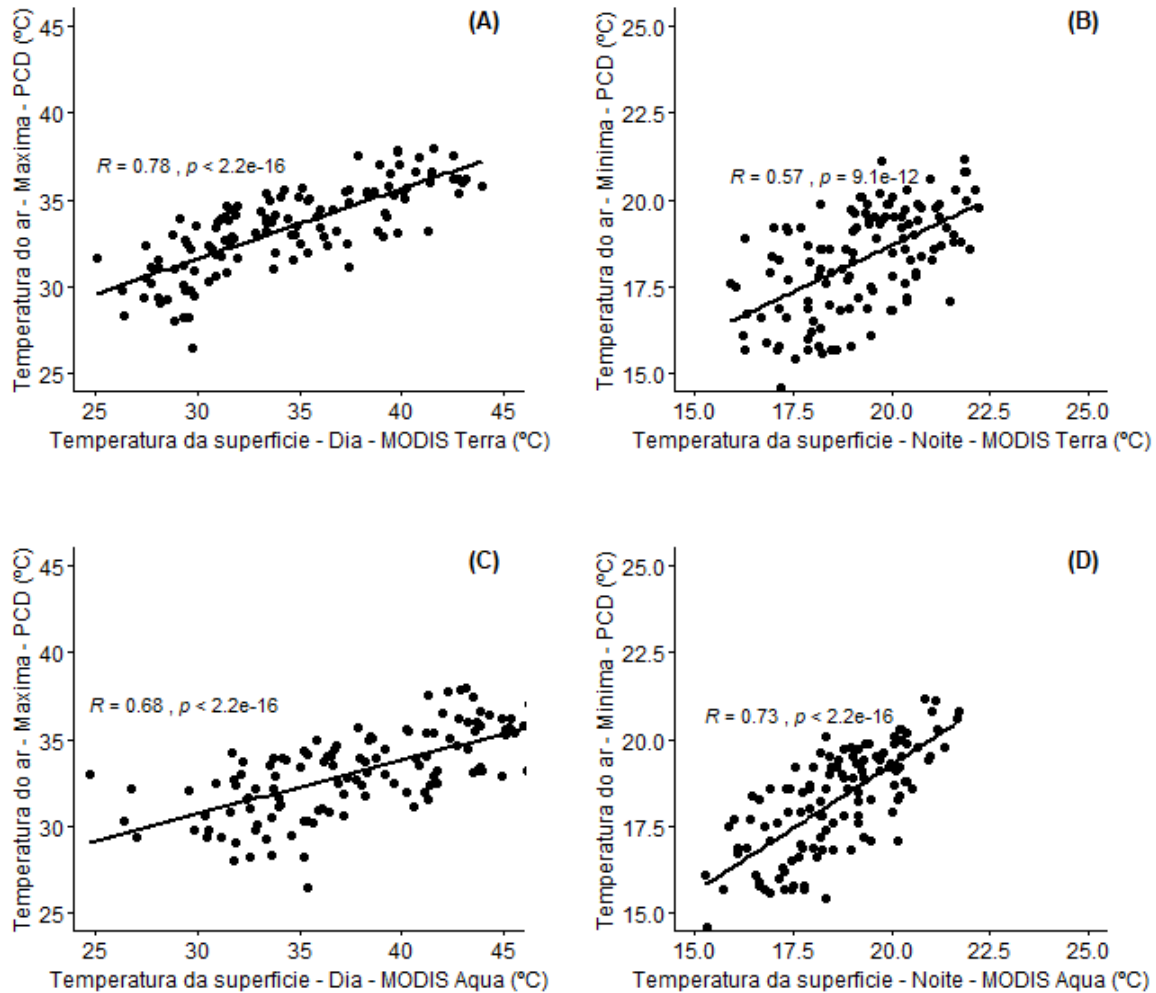


Figura 3 – Correlações entre a temperatura do ar máxima ($T_{máx}$) e mínima ($T_{mín}$) com a temperatura da superfície (T_s) diurna e noturna para o MODIS Terra e Aqua, em área de Caatinga em sucessão ecológica (CS).

O estudo de Benali et al. (2012), utilizando o MODIS e relacionando com a $T_{máx}$ e $T_{mín}$, também constatou que mesmo com dados do satélite Terra, as melhores relações entre as variáveis de temperatura foram obtidas com o produto da noite para $T_{mín}$. Outros resultados foram definidos por Golkar et al. (2017) analisando diferentes usos do solo em região semiárida. Estes autores relacionaram dados do sensor MODIS com temperatura instantânea na superfície. Eles verificaram diferenças entre os dados diurnos do MODIS com o ciclo diurno, principalmente em certas épocas do ano, no entanto, as relações entre as variáveis tiveram R^2 igual a 0,75, 0,73 e 0,78, respectivamente em áreas de agricultura,

floresta baixa e pastagem, mostrando relações satisfatórias.

O coeficiente de correlação de Pearson (Figuras 2 e 3) mostrou que as melhores correlações para a análise da $T_{máx}$ e $T_{mín}$ nas áreas CP e CS foram verificadas com o uso do MOD11A2 do dia para a $T_{máx}$ ($r = 0,73$ e $r = 0,78$) e do MYD11A2 da noite para $T_{mín}$ ($r = 0,75$ e $r = 0,73$), respectivamente.

Situação semelhante foi abordada por El Kenawy et al. (2019) para regiões desérticas, quentes e áridas também com o produto MOD11A2, em que foi observado que os dados diários do MODIS superestimaram a $T_{máx}$ chegando a diferenças de 5

°C e subestimaram a $T_{mín}$, no entanto, com diferenças que não ultrapassaram 1,5 °C, com isso foi verificado que a melhor estimativa ocorre com o uso do produto noturno do MODIS para a análise da $T_{mín}$. Resultados diferentes foram apresentados para outras regiões áridas e semiáridas por Zhu et al. (2013), utilizando os produtos MOD11A1 e MYD11A1 com T_a . Segundo estes autores, as diferenças verificadas entre os dados de satélite e de superfície estariam associadas ao tempo de passagem do satélites Terra e Aqua, no entanto, foram obtidas correlações acima de 0,8 para as análises utilizando os dois produtos do MODIS, porém, as melhores correlações para temperaturas máxima e mínima utilizando o MOD11A1 dia e noite, respectivamente, apresentaram $r = 0,83$ e $r = 0,94$.

É importante ressaltar que a temperatura da superfície observada por meio do sensor MODIS se diferencia quando comparada, principalmente, com a T_{max} das estações de superfície. Alexander (2020) aponta que a cobertura vegetal tem influência sobre a temperatura da superfície terrestre, que pode aumentar ou diminuir; e os tipos de vegetação se diferenciam na capacidade de redução dessa temperatura por meio do processo de transpiração que envolve a transferência de energia e, por conseguinte, a redução da temperatura das folhas.

De acordo com os coeficientes (R) apresentados nas Figuras 2 e 3, as correlações variaram de moderada a forte. Com isso, para extrair as temperaturas máximas e mínimas, para ambas as condições de caatinga a partir dos dados MODIS, são propostas as equações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos propostos para estimativa de $T_{máx}$ e $T_{mín}$ para áreas de caatinga preservada e em sucessão ecológica a partir da dados do sensor MODIS.

Variável	Produto	Equação
Temperatura Máxima CP	MOD11A2	$1,4021 \times LST \text{ (dia)} - 14,214$
Temperatura Mínima CP	MYD11A2	$0,9087 \times LST \text{ (noite)} + 3,953$
Temperatura Máxima CS	MOD11A2	$1,4934 \times LST \text{ (dia)} - 15,542$
Temperatura Mínima CS	MYD11A2	$0,726 \times LST \text{ (noite)} + 5,33$

A partir do uso das equações expostas na Tabela 1, são apresentadas, nas Figuras 4 e 5, as séries temporais com as temperaturas máximas e mínimas e do NDVI, respectivamente, nos dois sítios de estudo a partir de dados do sensor MODIS durante dezessete (17) anos (2003 – 2019) de observações (Material Suplementar 1). São observadas grandes variações na série temporal que resultam em uma tendência de aumento da temperatura da superfície (Material Suplementar 2) em ambos os sítios ao longo dos 17 anos, isso pode ser justificado em função dos últimos anos de estiagem prolongada ocorrentes na região, proporcionando uma tendência de redução nos valores de NDVI a partir de 2009 (Material Suplementar 3). Segundo Souza et al. (2015), no sítio CP em 2012 foi registrada precipitação em torno de 92 mm. Segundo Santos et al. (2017), entre os anos de 2013 e 2016 os registros de chuva totalizaram em 293 mm, 326 mm, 255 mm e 373 mm, para os anos de 2013 a 2016, respectivamente.

As variações das temperaturas mostram que nos períodos secos e chuvosos, os padrões estavam relacionados aos períodos sazonais de cada área de

estudo de acordo com o NDVI. O uso deste índice foi um indicador de verde da vegetação, e com ele, foi possível separar os períodos chuvosos dos secos, por meio de presença da vegetação. Segundo Amiri et al. (2020), o uso dos índices de vegetação representa bem o crescimento das plantas, pois seus valores ficam mais altos em períodos chuvosos, mostrando a presença de água no solo, e mais baixos em anos secos com redução da presença de folhas e, por vezes, mortalidade das plantas. Com isso, no presente estudo, as temperaturas se mostraram em grande maioria mais elevadas nos períodos mais secos e menores nos períodos mais chuvosos do ano.

Assim como observado nas Figuras 3 e 4, o acompanhamento entre o NDVI e o estágio fenológico da vegetação, é esperado, pois no estudo de Cao e Sanchez-Azofeifa et al. (2017) em outras áreas de clima tropical seco estudando áreas de clima tropical seco, essa dinâmica ocorreu de forma semelhante.

Os padrões apresentados nas Figuras 4 e 5, apresentaram correlações negativas para as áreas de estudo Material Suplementar 1 (MS1), sendo que a área CP relacionando $T_{máx}$ com NDVI obteve-se um

coeficiente de correlação $r = -0,36$ e para a área CS $r = -0,67$, no entanto, é observado relações entre os padrões do NDVI com as temperaturas, as mínimas estavam estão mais presentes nos períodos chuvosos e a medida em que o período seco chega as temperaturas tendem a aumentar, ou seja, o estágio fenológico da vegetação explicou bem as variações da Ts com o índice de vegetação. Esses padrões que acompanham a sazonalidade de uma vegetação que perdem ou ganham folhas ao longo dos seus estágios já são esperados no contexto de regiões semiáridas, pois a presença ou a ausência da vegetação influencia na dinâmica da temperatura da superfície (Material Suplementar 4 e 5). Outros padrões semelhantes foram encontrados por Cao e Sanchez-Azofeifa (2017).

Com isso, os dados de Ts do sensor MODIS mostrou-se um bom parâmetro para a análise espaço-temporal da temperatura na superfície em diferentes contextos de florestas secas, obtendo correlações

significativas nas avaliações realizadas. Sabe-se que há diferenças entre os dados de temperatura do ar e os dados de temperatura da superfície observadas ou estimadas por satélite. Assim, é importante destacar a necessidade de utilizar coeficientes de ajustes para melhor representação da Ta ao se fazer uso dos produtos de LST do sensor MODIS. Estudos como Vancutsem et al. (2010) também mostraram boas correlações em diferentes usos do solo, para diferentes regiões, o que reforça que os produtos MODIS precisam ser mais explorados para representação regional da temperatura tanto em áreas de caatinga, quanto em outras que apresentem diferentes tipos de fisionomias da vegetação natural, diversidade em tipos e usos dos solo, agricultura, pastagens, áreas em processo de desertificação, aglomerados urbanos, dentre outros.

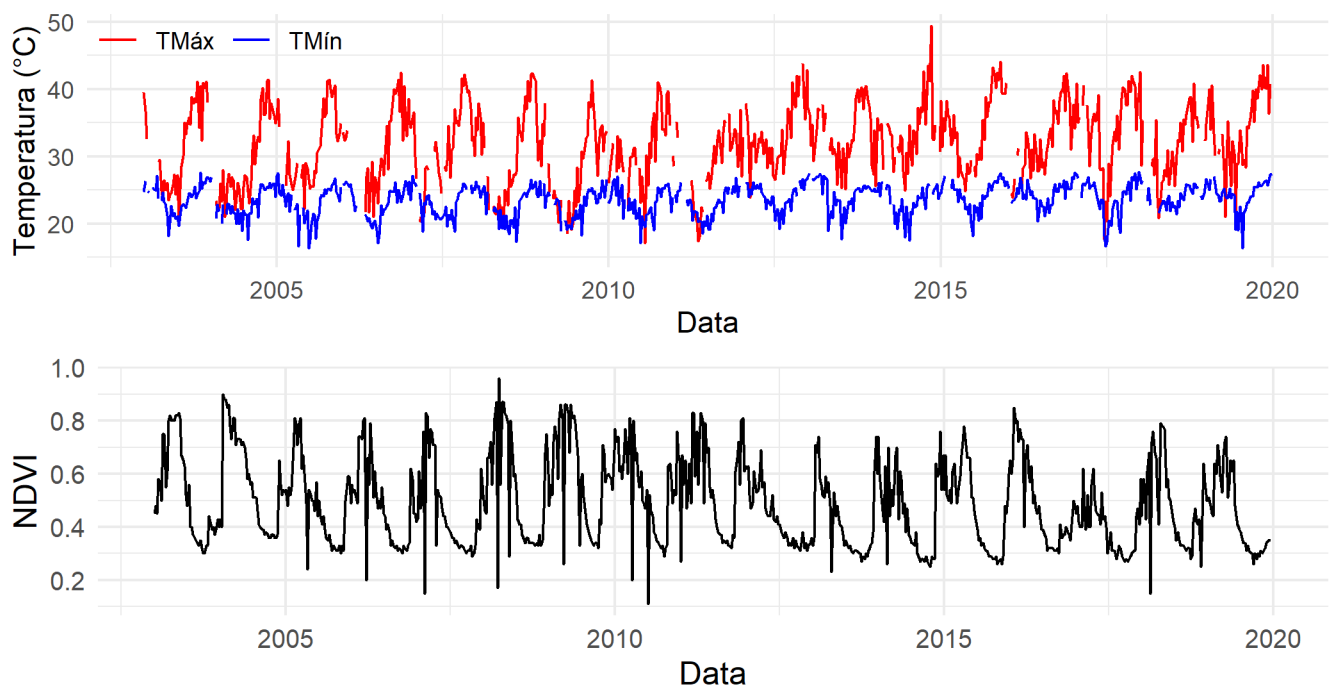


Figura 4 - Variação temporal da temperatura da superfície (Ts) e do índice de vegetação dor diferença normalizada (NDVI) entre 2003 e 2019 a partir dos dados do sensor MODIS para a área de caatinga preservada, em Petrolina, PE. A linha vermelha representa a Tmáx e a linha azul a Tmín.

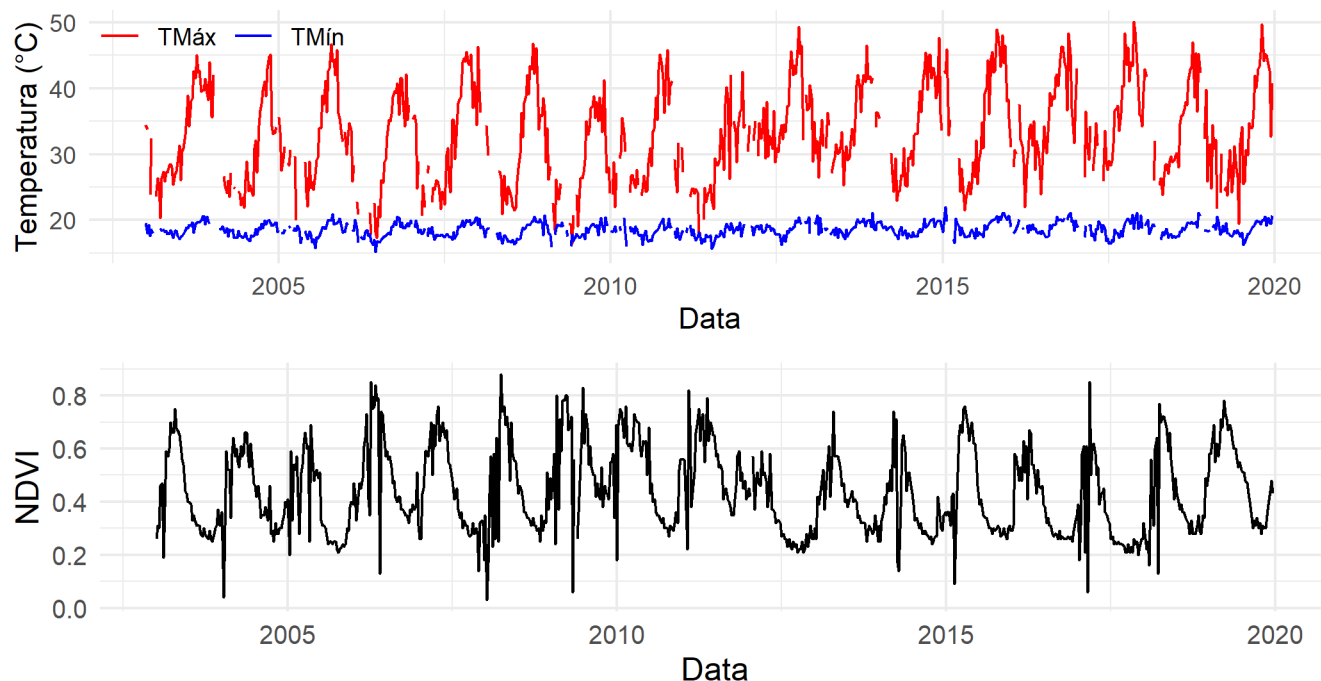


Figura 5 - Variação temporal da temperatura da superfície (Ts) e do índice de vegetação dor diferença normalizada (NDVI) entre 2003 e 2019 a partir dos dados do sensor MODIS para a área de Caatinga em sucessão ecológica, em Araripina, PE. A linha vermelha representa a Tmáx e a linha azul a Tmín.

Portanto, foi verificado que os produtos do sensor MODIS conseguem ter boa resposta sobre a temperatura do ar, mesmo sendo dados de temperatura da superfície, mostrando que para essas regiões semiáridas são muito úteis para análise das condições ambientais do lugar.

Conclusões

Com o objetivo de avaliar o potencial das informações extraídas por meio de sensoriamento remoto na estimativa de temperatura máxima e mínima, uma análise espaço-temporal comparando os dados do sensor MODIS mostrou que as informações orbitais tiveram boas respostas, e podem ser eficientes nas estimativas das tempestuarias do ar Tmáx e Tmín para áreas de Caatinga preservada e em áreas que estão em processo de sucessão ecológica.

Com base nas correlações entre as informações de satélite com os dados mensurados em superfície, verificou-se que por meio de dados remotos é possível a estimativa da temperatura do ar em regiões que são desprovidas de estações meteorológicas ou agrometeorológica considerando-se as equações propostas.

Utilizando dados do sensor MODIS para as regiões do presente estudo em uma série temporal de 17

anos, foi possível a análise de tendências temporais de temperatura da superfície ao longo do período, tanto para áreas de floresta preservada como em áreas que estão em processo de sucessão ecológica, pois os aspectos fenológicos da vegetação explicaram as variações da temperatura da superfície, verificando que com a perda das folhas há um aumento da temperatura que vai até o surgimento das folhas no início das estações chuvosas.

Material Suplementar

As seguintes figuras encontram-se nos materiais suplementares (MS), após as referências bibliográficas: MS1 – Figuras com as correlações entre a temperatura da superfície do MODIS e o NDVI; MS2 – Figuras com a representação na forma de “box plot” da temperatura da superfície para os anos de 2003 a 2019; MS3 - Figuras com a representação na forma de “box plot” do NDVI para os anos de 2003 a 2019; MS4 – gráficos com dados em escala de oito dias, por ano, da temperatura da superfície máxima e mínima entre 2003 e 2019; e MS5 – gráficos com dados em escala de 16 dias, por ano, do NDVI entre 2003 e 2019.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de Pós-Graduação para o primeiro autor e pelo financiamento do Projeto “Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d'água e da fenologia em áreas de Caatinga (Processo APQ 0062-1.07 / 15)”. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e ao Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA) pelo apoio logístico e infraestrutura para a realização dos trabalhos de campo.

Referências

- Aleixo, N., Silva Neto, J., 2016. Precipitação e Riscos em Tefê-AM (Precipitation and risk in Tefê -AM). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, 1176-1190.
- Alexander, C., 2020. Normalized difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 102013.
- Amiri, M., Jafari, R., Tarkesh, M., Moderres, R., 2020. Spatiotemporal variability of soil moisture in arid vegetation communities using MODIS vegetation and dryness indices. *Arid Land Research and Management*, 34, 1-25.
- Araújo, A. L., Silva, M. T., Silva, B. B., Santos, C. A. C., Dantas, M. P., 2018. Análise das Mudanças de Parâmetros Biofísicos Sobre o Nordeste Brasileiro de 2002 a 2011 com dados Modis. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 589-599.
- Bartkowiak, P., Castelli, M., Notarnicola, C., 2019. Downscaling Land Surface Temperature from MODIS Dataset with Random Forest Approach over Alpine Vegetated Areas. *Remote Sensing*, 11, 1319.
- Benali, A., Carvalho, A. C., Nunas, J. P., Carvalhais, N., Santos, A., 2012. Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data *Remote Sensing of Environment*, 124, 108-121.
- Cao, S., Sanchez-Azofeifa, A., 2017. Modeling seasonal surface temperature variations in secondary tropical dry forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 62, 122-134.
- Duan, S. B., Li, Z. L., Li, H., Götttsche, F. M., Wu, H., Zhao, W., Leng, P., 2019. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 225, 16-29.
- El Kenawy, A. M., Hereher, M. E., Robaa, S. M., 2019. An Assessment of the Accuracy of MODIS Land Surface Temperature over Egypt Using Ground-Based Measurements. *Remote Sensing*, 11, 1-29.
- Galarça, S. P., Lima, C. S. M., Silveira, G. D., Rufato, A. D. R., 2010. Correlação de Pearson e análise de trilha identificando variáveis para caracterizar portaxenoxer de *Pyrus communis* L. *Ciência e Agrotecnologia*, 34, 860- 869.
- Galvínio J.D., Dantas, L. G., Fernandes, J. G. Silva, J. B. 2009. Análise da Temperatura do Ar e da Superfície no Sítio Boa Felicidade em São José do Sabugi-PB no Semi-Árido do Brasil. *Revista de Geografia (UFPE)*, 26, 124-141. [Periódicos UFPE](#)
- Galvínio, J., 2019. Estimation of surface temperature with images obtained with drones. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 9, 397-406.
- Golkar, F., Sabziparvar, A. A., Khanbilvardi, R., Nazemosadat, M. J., Zand-Parsa, S., Rezaei, Y., 2017. Estimation of instantaneous air temperature using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 258-275.
- Gomes, V. P.; Galvínio, J. D.; Moura, M. S. B., Ferreira, P. S.; Paz, Y. M.; Miranda, R. Q., 2016. Hyperspectral remote sensing applied for analysis of the resilience indicators and biome caatinga susceptibility to climate change. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 1122-1136.
- Hereher, M. E., El Kenawy, A., 2020. Extrapolation of daily air temperatures of Egypt from MODIS LST data. *Geocarto International*, 1-17.
- Khesali, E., Mobasheri, M., 2020. A method in near-surface estimation of air temperature (NEAT) in times following the satellite passing time using MODIS images. *Advances in Space Research*.
- Lacerda, F. F., Nobre, P., Sobral, M. C. M., Lopes, G. M. B., Assad, E. D., 2016. Tendência do Clima do Semiárido Frente as Perspectivas das Mudanças Climáticas Globais: O Caso de Araripina, Pernambuco. *Revista do Departamento de Geografia*, 31, 132-141.
- Lima, R., Moreira, E., Nóbrega, R., 2016. A Influência Climática sobre a Epidemia Dengue na Cidade do Recife por Sistema de Informações Geográficas (Climate Influence on Dengue Epidemic in Recife City by Geographic Information System). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 384-398.
- Martins, A. P., Rosa, R., 2019. Procedimentos metodológicos para estimativas de variáveis relacionadas ao balanço de energia no sistema Terra-Atmosfera – Uma Revisão de Literatura. *Caderno Prudentino de Geografia*, 41, 100-119.

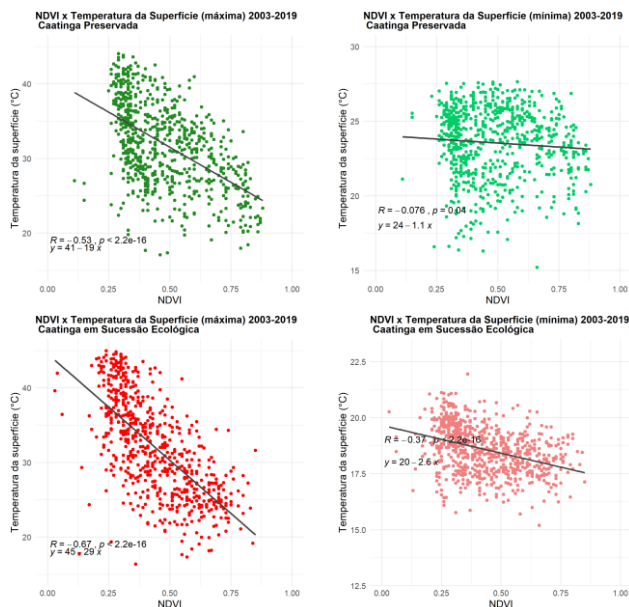
- Maier, É., Costi, J., Barreira, S., Simões, J., 2016. Precipitação na América do Sul: Médias Climáticas e Padrões da Variabilidade no Período entre 1979 e 2008. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 032-046.
- NourEldeen, N., Mao, K., Yuan, Z., Shen, X., Xu, T., Qin, Z., 2020. Analysis of the Spatiotemporal Change in Land Surface Temperature for a Long-Term Sequence in Africa (2003-2017). *Remote Sensing*, 12, 1-24.
- Oliveira, J., de Medeiros, B., da Silva, J., Moura, G., Lins, F., Nascimento, C., Lopes, P., 2018. Space-temporal evaluation of biophysical parameters in the High Ipanema watershed by remote sensing. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 7, 357-366.
- Oliveira, T.H.; Silva, J. E.; Santos, M. O.; Oliveira, J. S. E. S.; Galvêncio, J. D., 2015. Time-space evolution of surface drainage and waterproofing process in Santo Amaro, Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, 1571-1587.
- Pereira, C. C.; Mariano, Z. F.; Wachholz, F.; Cabral, J. B. P., 2016. Avaliação da Temperatura de superfície continental (TSC) e o uso da terra na Bacia da usina hidrelétrica de Barra dos Coqueiros (GO) por meio de sensoriamento remoto (Assessment of (Continental Surface Temperature (TSC) and Land Use in the Barra dos Coqueiros Hydroelectric Power Plant (GO) Basin by Remote Sensing), *Revista Brasileira de Climatologia*, 18, 92-107.
- Pires, W. N., Moura, M. S. B., DE Souza, L. S. B., Silva, T. G. F., Carvalho, H. F. S., 2017. Fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d'água em uma área de caatinga em regeneração. *Agrometeoros*, 25, 143-151.
- Ribeiro, R., Ávila, P., Brito, J., Santos, E., Sousa, L., 2014. Análise da Tendência Climática nas Séries Temporais de Temperatura e Precipitação de Tucuruí-Pará (Trend Analysis of the Climate in Time Series of Temperature and Precipitation of Pará-Tucuruí). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7, 798-807.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A.; Deering, D. W., 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceeding of Erts-1 Symposium*. Anais ... NASA, United States.
- Rosa, R., 2005. Geotecnologias na geografia aplicada. *Revista do Departamento de Geografia*, 16, 81-90.
- Sá, I. I. S., Galvêncio, J. D., Moura, M. S. B., Sá, I. B., 2008. Uso do índice de vegetação da diferença normalizada (IVDN) para caracterização da cobertura vegetal da região do Araripe pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 1, 28-38.
- Santos, C. V. B., Baptista, G. M. M., Moura, M. S. B., 2017. Seasonality of Vegetation Indices in different land uses in the São Francisco Valley. *Journal of Hiperespectral Remote Sensing*, 7, 158-167.
- Silva, E. R. A. C., Miranda, R. Q., Ferreira, P. S., Gomes, V. P., Galvêncio, J. D., 2016. Estimativa do Estresse Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Riacho do Pontal-PE / Hydrological stress estimate in Pontal watershed-PE. *Caderno de Geografia*, 26, 844-861.
- Silva, M., de Moura, F., Jardim, C., 2017. O diagrama de Caixa (Box Plot) Aplicado à Análise da Distribuição Temporal das Chuvas em Januária, Belo Horizonte e Sete Lagoas, Minas Gerais-Brasil (The box diagram (Box Plot) applied to the analysis of the temporal distribution of rainfall in Januária, Belo Horizonte and Sete Lagoas, Minas Gerais-Brasil). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10, 023-040.
- Singh, K. (2016). Uncertainties in Unmixing of Multi-phase Hyperspectral Data in Reflective Region: Effects of Texture and Fabric. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 5(3), 086-100. doi: [CrossRef Google Scholar](#)
- Silva, K., Gomes, R.,; Rego, N. 2015. Social And Environmental Hydrographics Implications Of The Land Use In The Plain And Coastal Boards Between Ilhéus And Olivença – BA. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 5(1), 013-026. doi: [CrossRef Google Scholar](#)
- Souza, L. S. B., Moura, M. S. B., Sedyama, G. C., Silva, T. G. F., 2015. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no semiárido Pernambucano, 8, 41-55.
- Souza, L. S. B., Moura, M. S. B., Sedyama, G. C., Silva, T. G. F., 2017. Carbon exchange in a caatinga area during an unusually drought year, 25, 37-45.
- Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., Connor, S. J., 2010. Evaluation of MODIS and surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114, 449-465.
- Viana, R., Santos, G., Moreira, D., Louzada, J., Rosa, L., 2019. O Uso da Geoestatística Espaço-Temporal na Predição da Temperatura Máxima do Ar (The Use of Space-Temporal Geostatistics in the Prediction of Maximum Air Temperature). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12, 096-111.
- Zanzarini, F. V., Pissarra, T. C., Brandão, F. J. C., Texeira, D. D. B., 2013. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6, 608-614.

Yao, R., Wang, L., W., Wang, S., Wang, L., Wei, J, Li, J., Yu, D., 2020. A detailed comparison of MYD11 and MYD21 land surface temperature products in mainland China. International Journal of Digital Earth, 1-17.

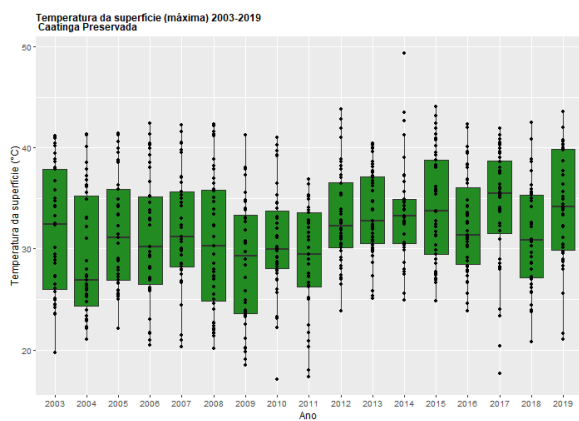
Zhao, W., He, J., Wu, Y., Xiong, D., Wen, F., Li, A., 2019. An Analysis of Land Surface Temperature Trends in the central Himalayan region based on MODIS products. Remote Sensing, 11, 1-19.

Material Suplementar (MS)

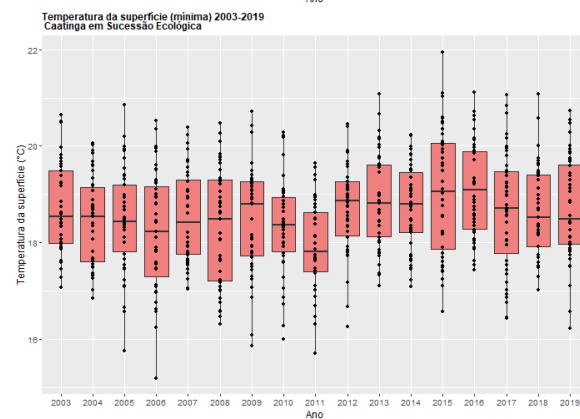
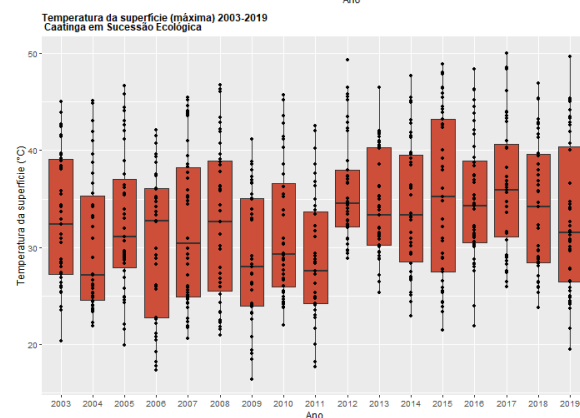
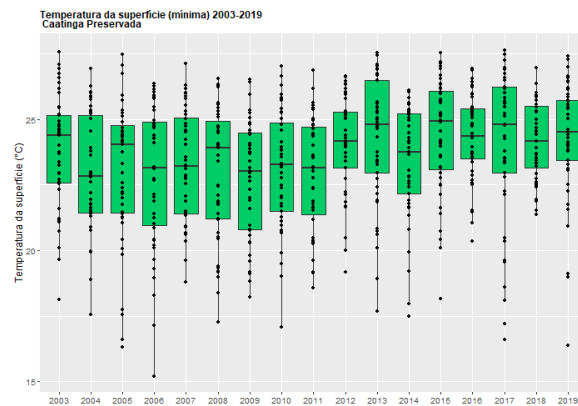
Material Suplementar 1 (MS1)



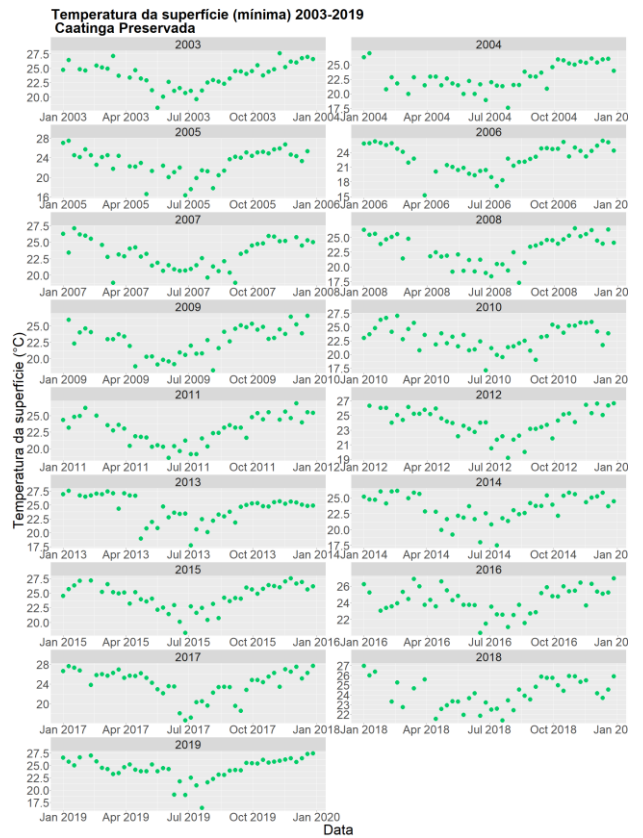
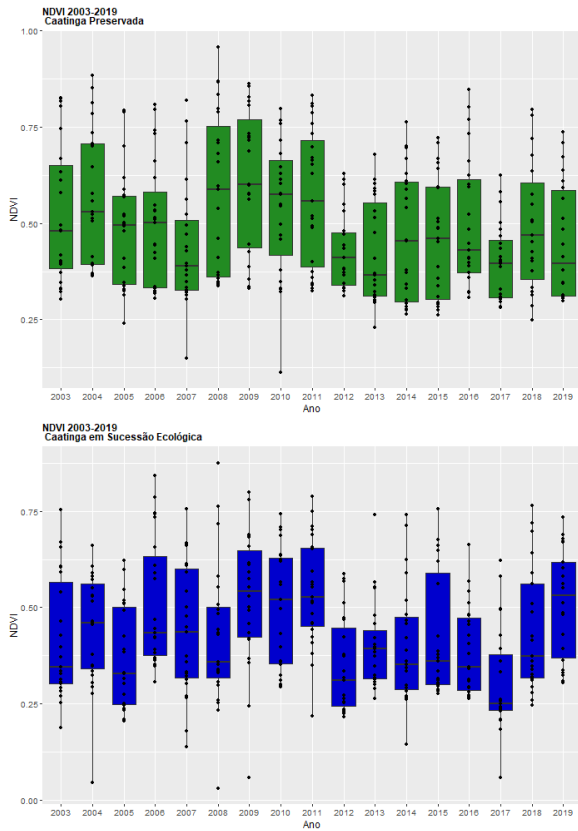
Material Suplementar 2 (MS2)



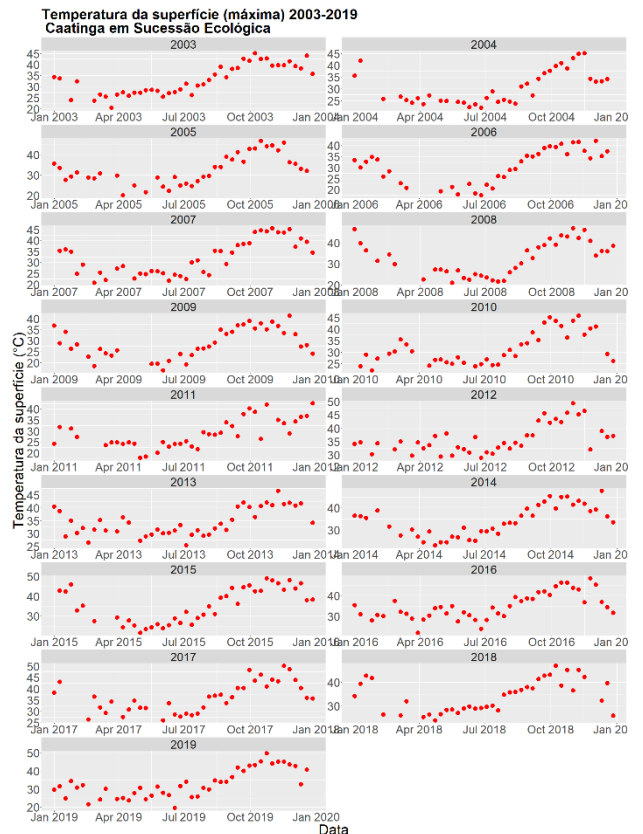
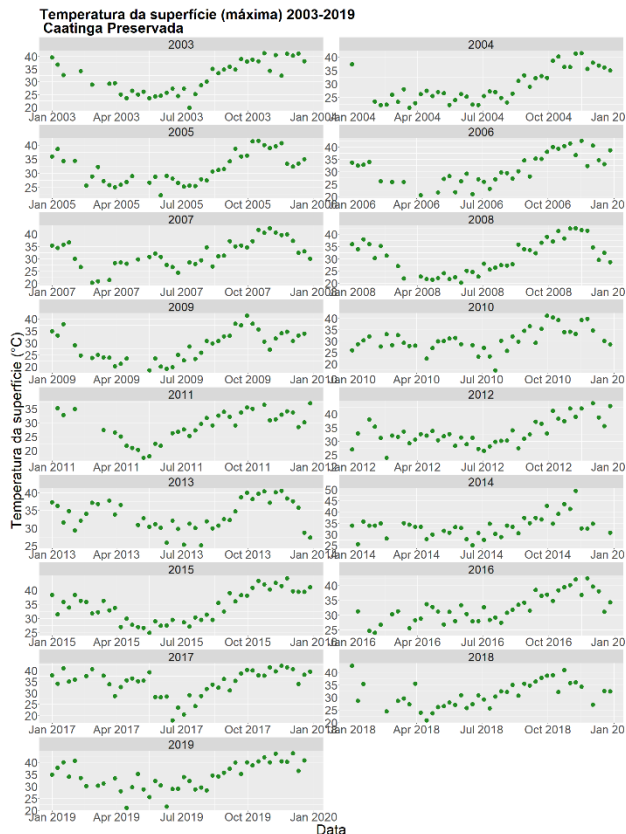
Zhu, W., Lú, A., Jia, S., 2013. Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. Remote Sensing of Environment, 130, 62-73.



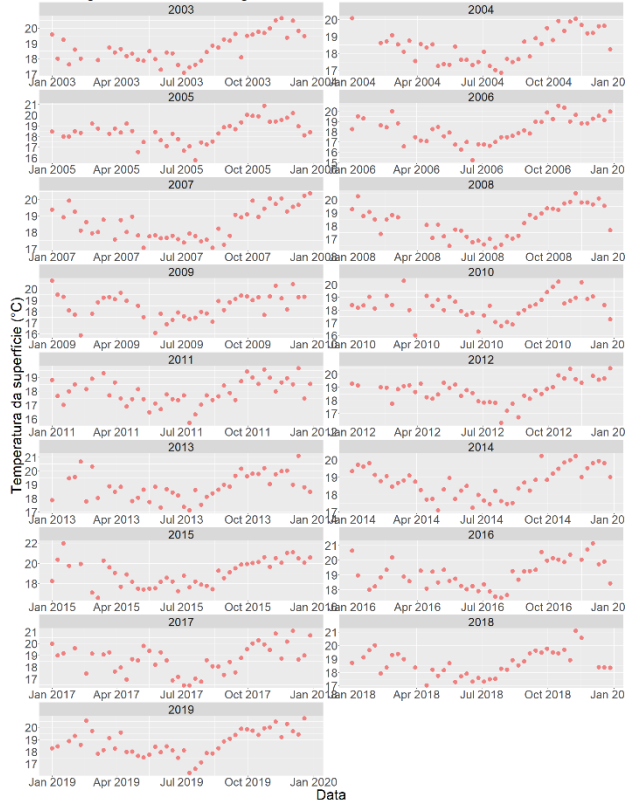
Material Suplementar 3 (MS3)



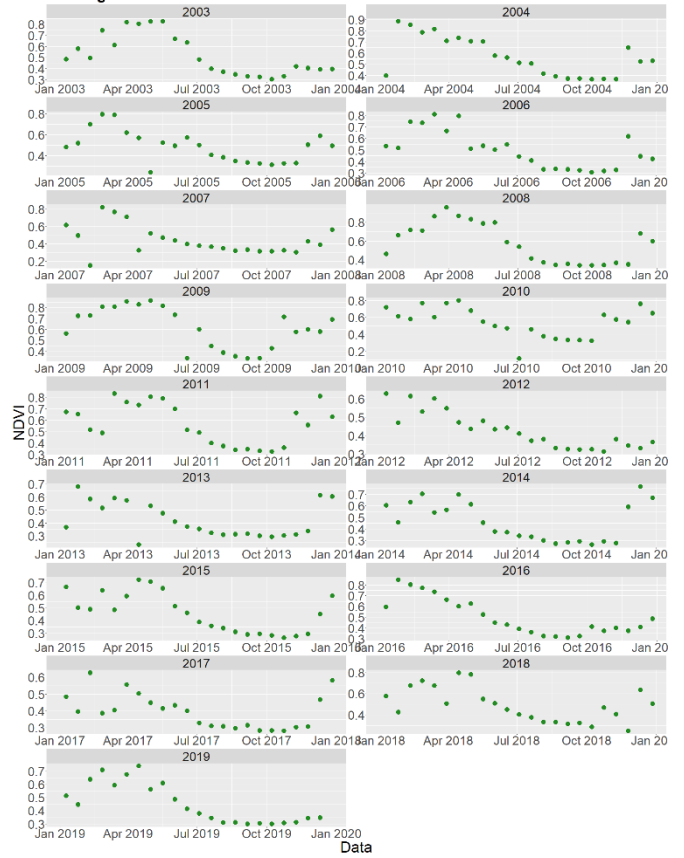
Material Suplementar 4 (MS4)



**Temperatura da superfície (mínima) 2003-2019
Caatinga em Sucessão Ecológica**

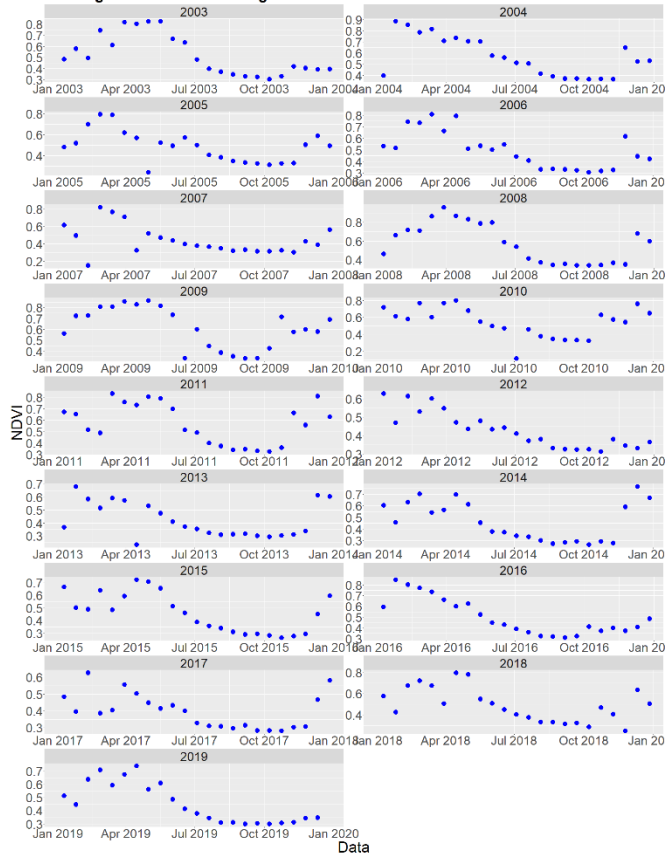


**NDVI 2003-2019
Caatinga Preservada**



Material Suplementar 5 (MS5)

NDVI 2003-2019
Caatinga em Sucessão Ecológica



Data