

IMPLICAÇÕES DA EXPANSÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA NO VIGOR VEGETATIVO E NA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE EM CASA BRANCA, SP

Taya Cristo Parreiras¹, Victória Beatriz Soares², Lucas Augusto Pereira da Silva³, Édson Luis Bolfe⁴, Gustavo Bayma⁵, Danielle Elis Garcia Furuya⁴, Victória H. Matusevicius e de Castro⁶

¹ Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, t232540@dac.unicamp.br; ² Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, SP, Brasil; ³ Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG, Brasil; ⁴ Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP, Brasil; ⁵ Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, Brasil; ⁶ Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil

RESUMO

A análise da temperatura da superfície (LST) e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é crucial para entender a dinâmica do uso da terra, pois a LST, influenciada pela vegetação, afeta o balanço de energia e os processos climáticos. Este estudo examina a variação trimestral do NDVI e da LST em resposta à expansão da agricultura irrigada em áreas degradadas de Casa Branca, São Paulo, entre 2001-2005 e 2016-2020, utilizando imagens do satélite MODIS e dados históricos de uso da terra. Os resultados mostraram aumento do vigor vegetativo e da temperatura, com correlações negativas entre NDVI e LST intensificadas ao longo do ano. A cana-de-açúcar destacou-se como o maior vetor de calor, enquanto as lavouras temporárias em ganho de vigor vegetativo. As pastagens, antes degradadas, melhoraram em vigor, mas também aumentaram em temperatura.

Palavras-chave — NDVI, LST, irrigação, cana-de-açúcar, conversão.

ABSTRACT

The analysis of Land Surface Temperature (LST) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is crucial for understanding land-use dynamics, as LST, influenced by vegetation, affects the energy balance and climate processes. This study examines the quarterly variation of NDVI and LST in response to the expansion of irrigated agriculture in degraded areas of Casa Branca, São Paulo, between 2001-2005 and 2016-2020, using MODIS satellite images and historical land-use data. The results showed an increase in vegetation vigor and temperature, with negative correlations between NDVI and LST intensifying throughout the year. Sugarcane emerged as the largest heat vector, while temporary crops showed the highest gain in vegetative vigor. Previously degraded pastures improved in vigor but also increased in temperature.

Keywords — NDVI, LST, irrigation, sugarcane, conversion.

1. INTRODUÇÃO

A análise da temperatura da superfície (LST) e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é essencial para entender o impacto da dinâmica de uso e cobertura da terra. A LST, influenciada pela vegetação, afeta o balanço de energia e processos climáticos, sendo que vegetações mais densas tendem a absorver mais radiação solar e, conseqüentemente, a regular melhor a troca de calor. O NDVI é utilizado para investigar a relação entre a vegetação e LST, evidenciando que áreas com NDVI elevado estão associadas a uma maior capacidade de evapotranspiração e temperaturas mais baixas na superfície [1].

Além disso, a LST é afetada por diferentes tipos de uso da terra (LULC) e rugosidade da superfície. A elevação, os índices de radiação solar e umidade do solo também desempenham papéis importantes nessa relação. Estudos mostram que o NDVI e a LST apresentam correlações que variam conforme as estações do ano e as condições de umidade do solo. Durante o inverno, ela tende a ser positiva, enquanto em épocas quentes, pode se tornar negativa. Uma correlação negativa entre NDVI e LST indica uma vegetação densa que resfria a superfície por meio da evapotranspiração, enquanto um NDVI baixo sugere solo exposto, que tende a aquecer mais rapidamente [2,3].

Neste sentido, o objetivo deste estudo foi analisar a variação temporal do vigor vegetativo (NDVI) e da temperatura de superfície (LST), bem como da correlação entre estas variáveis, em um cenário de expansão da agricultura irrigada em Casa Branca, São Paulo, entre 2000 e 2020.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Casa Branca é um município de 864 km² e 28 mil habitantes localizado no nordeste de São Paulo. O clima predominante é o subtropical úmido com invernos secos e moderados (Cwa), e a precipitação acumulada anual média é de cerca de 1.459 mm. Seu território encontra-se em região de ecótono Cerrado (45,5%) e Mata Atlântica (54,5%) [4].

O município apresentou nas últimas quatro décadas uma dinâmica agrícola peculiar. Em 1980, era predominantemente ocupado por pastagens degradadas [5], quando foram registradas cerca de 300 voçorocas [6]. Contudo, entre 1990 e 2020, passou por processos de conversão das pastagens degradadas em áreas altamente produtivas, tornando-se o maior produtor nacional de laranja, com 11 mil ha produzidos em 2023 [7], e pela instalação

de mais de 300 pivôs centrais de irrigação, ocupando cerca de 15,6% do território [4].

2.2 Aquisição e processamento dos dados

Para analisar a variação de temperatura de superfície e do vigor vegetativo em Casa Branca, foram obtidas séries temporais de médias trimestrais de NDVI (MOD13Q1) e LST (MOD11A2) do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS/Terra), para os quinquênios 2001-2005 e 2016-2020, via *Google Earth Engine* (GEE). As variáveis foram obtidas com resolução espacial de 1 km. A banda de qualidade foi usada para remoção de *pixels* contaminados por nuvens ^{1,2}. Em seguida, foram gerados mapas de correlação entre NDVI e LST. Os trimestres considerados foram: janeiro, fevereiro e março (1°); abril, maio e junho (2°); julho, agosto e setembro (3°); outubro, novembro e dezembro (4°).

Em seguida, foi gerado um banco de dados para análise da dinâmica de uso e cobertura da terra [8] e a sua relação com as variações de NDVI e LST. Os dados foram reclassificados para sintetizar as principais classes vegetacionais: formações naturais (FN), pastagens e mosaicos de uso (PAM), lavouras temporárias (LT), cana-de-açúcar (CA) e lavouras perenes e silvicultura (LPS). A classe modal entre os períodos de 2001-2005 e 2016-2020 foram identificadas para cada *pixel* MODIS (1 km).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variação espaço-temporal do NDVI e da LST

Os resultados sugerem um aumento no NDVI médio e na LST em todas as classes de vegetação cultivada e natural na área de estudo. As formações naturais apresentaram NDVI médio anual de 0,69 entre 2001-2005 e 0,71 entre 2016-2020, isto é, um aumento de 2,8%. A LST média foi estimada em 28,6°C em 2001-2005, com aumento de 0,3°C em 2016-2020. Nas áreas ocupadas por cana-de-açúcar, o NDVI médio passou de 0,61 para 0,62, enquanto a LST aumentou de 0,7°C.

O NDVI médio das áreas de lavouras temporárias entre 2001-2005 foi registrado em 0,59. No entanto, no período 2016-2020 elevou-se em 3,28% (NDVI = 0,61). A LST média (29,3 °C) também sofreu aumento no mesmo período (+0,2 °C). Nas áreas onde o uso predominante foram lavouras perenes ou silvicultura, o NDVI médio anual passou de 0,69 para 0,72, e a LST aumentou de 28,3°C para 28,6°C. Em áreas de pastagens e mosaicos de uso, o NDVI aumentou de 0,63 para 0,66, e a LST subiu de 29,1°C para 29,4°C.

As maiores variações de NDVI foram observadas para as lavouras temporárias e cana-de-açúcar, principalmente no segundo e quarto trimestres. Nesta classe, calendário agrícola e fenologia, influenciaram os valores de NDVI. A colheita da cana-de-açúcar ocorre no terceiro trimestre, com menor vigor vegetativo, e as lavouras anuais são produzidas principalmente sob regime de irrigação, com a primeira safra entre outubro e

janeiro, e a segunda entre maio e agosto [4], períodos em que o aumento de NDVI é superior a 0,4, com variação negativa no primeiro trimestre (pós-colheita da soja). As pastagens apresentaram maior NDVI em todos os trimestres (Tabela 2), refletindo o ganho de qualidade identificado no Atlas das Pastagens [5].

No que diz respeito à LST, todas as classes apresentaram aumento nos últimos seis meses do ano. A elevação média de LST foi de 0,48°C e 0,66°C no terceiro e quarto trimestres. As diferenças mais proeminentes foram observadas para áreas destinadas à produção de cana-de-açúcar, que ficaram entre 0,43°C e 1°C mais quentes, principalmente nos dois últimos trimestres. A LST nas áreas de pastagens permanece estável nos dois primeiros trimestres, mas aumenta em até 0,6°C nos dois últimos. A área com predomínio de lavouras anuais apresenta leve diminuição nos dois primeiros trimestres. Lavouras perenes e formações naturais apresentaram comportamento semelhante, com variações inferiores a 0,1°C no primeiro e segundo trimestres, mas entre 0,37°C e 0,56°C no terceiro e quarto trimestres.

A sazonalidade influenciou o comportamento do vigor vegetativo e da temperatura de superfície. A LST foi maior no quarto trimestre, na transição primavera-verão. A maior taxa de radiação solar acompanhada pela maior disponibilidade hídrica reflete-se em maior vigor vegetativo no primeiro trimestre, condições que favorecem a atividade metabólica da vegetação e aumenta a produtividade primária líquida [9].

Contudo, a dinâmica agrícola do município resultou em variações que não se explicam apenas pelas condições ambientais, mas que exigem conhecimento da dinâmica local. No segundo trimestre, por exemplo, ocorreu queda da LST e aumento do NDVI, principalmente nas áreas onde concentram-se os pivôs centrais, evidenciando a presença dos cultivos e indicando maior nível de evapotranspiração.

Classe / Trim.	Δ NDVI				Δ LST			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
CA	0,010	-0,006	-0,018	0,032	0,427	0,452	0,867	1,056
FN	0,025	0,029	-0,002	0,017	0,024	0,016	0,379	0,545
LA	-0,006	0,045	0,006	0,043	-0,015	-0,042	0,359	0,558
LPS	0,028	0,033	0,007	0,024	0,096	0,070	0,387	0,524
PAM	0,026	0,050	0,017	0,028	0,000	0,010	0,409	0,615

Tabela 1. Variações trimestrais médias nos índices de vigor vegetativo (NDVI) e temperatura da superfície (LST) para as classes de vegetação nativa e cultivada em Casa Branca, São Paulo, entre 2001-2005 e 2016-2020. Cana-de-açúcar (CA), Formações Naturais (FN), Lavouras Anuais (LA), Lavouras Perenes e Silvicultura (LPS), Pastagens e Mosaicos de Uso (PAM).

A Figura 1 exibe a variação das diferenças de NDVI e LST entre 2001-2005 e 2016-2020 em todo o município. Os mapas atestam terceiro e quarto trimestres até 1,4°C mais quentes em algumas partes do município, e até 2°C mais frescos nos dois primeiros trimestres do ano em relação ao primeiro período da série, principalmente nas áreas onde há concentração de pivôs.

¹Script para aquisição dos dados NDVI no GEE: <https://abrir.link/zLdwa>

²Script para aquisição dos dados LST no GEE: <https://abrir.link/rQosn>

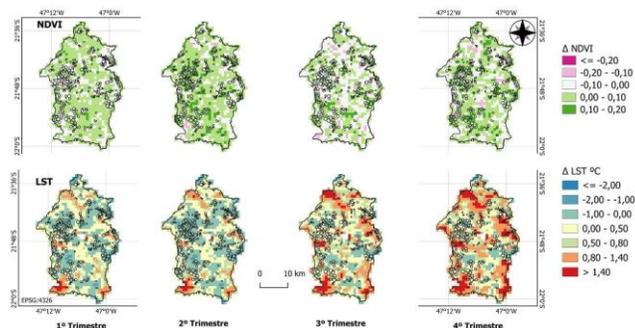


Figura 1 Variação do vigor vegetativo (NDVI) e da temperatura de superfície (LST °C), por trimestre, entre os quinquênios 2001-2005 e 2016-2020, em Casa Branca. Círculos pretos representam os pivôs centrais.

A Figura 2 exibe a assinatura temporal do coeficiente de correlação trimestral médio entre NDVI e LST ($r_{NDVI-LST}$), por classe de uso e cobertura da terra, entre 2001-2005 e 2016-2020. Em geral, os coeficientes de correlação ficaram mais negativos ao longo de todo ano, com exceção do segundo trimestre, cuja correlação foi -0,56 em 2001-2005, e -0,53 em 2016-2020, com variação positiva (+0,03). No primeiro e terceiro trimestres, os coeficientes permaneceram estáveis, com médias de -0,44 e -0,58 nos quinquênios 2001-2005 e 2016-2020. O quarto trimestre apresentou maior variação, com coeficiente passando de -0,42 para -0,46, ou seja, uma redução de 0,04, ou 9,52%.

As pastagens e mosaicos de uso apresentaram as maiores mudanças nas correlações, principalmente nos trimestres 1 e 2, quando as variações nos coeficientes foram de -31% e -16% (de -0,51 para -0,67, $\Delta = -0,17$ em 2001-2005; de -0,58 para -0,69 em 2016-2020, $\Delta = -0,11$). A Tabela 2 exibe o coeficiente de correlação médio por classe, assim como a variação no período.

Classe/Trimestre	$\Delta r_{NDVI \times LST}$			
	1º Trim.	2º Trim.	3º Trim.	4º Trim.
Cana-de-açúcar	-0,077	0,197	0,126	-0,119
Form.Naturais	0,104	0,015	-0,035	-0,065
Lav. Perenes	0,112	0,075	-0,029	0,139
Lav. Temporárias	0,025	-0,013	-0,036	-0,016
Pastagens/Mosaico	-0,167	-0,110	-0,055	-0,096

Tabela 2. Variação da correlação entre o vigor vegetativo (NDVI) e a temperatura de superfície (LST) em Casa Branca, por trimestre, entre 2005 e 2020.

3.2. Considerações acerca da dinâmica de uso e cobertura e do comportamento sazonal de NDVI e LST

A área de pastagens foi consideravelmente reduzida entre 2005 e 2020. A transição mais proeminente é de pastagem para lavouras temporárias de sequeiro ou irrigadas por pivôs centrais. Essa é uma constatação previamente encontrada para a região [4] (Figura 3). Foi encontrada uma redução de até 69% das pastagens devido à expansão da agricultura [4]. Essa tendência também foi constatada a nível de bioma, já que a agricultura (sobretudo a soja) tem avançado sobre pastagens no Cerrado nas últimas décadas [10].

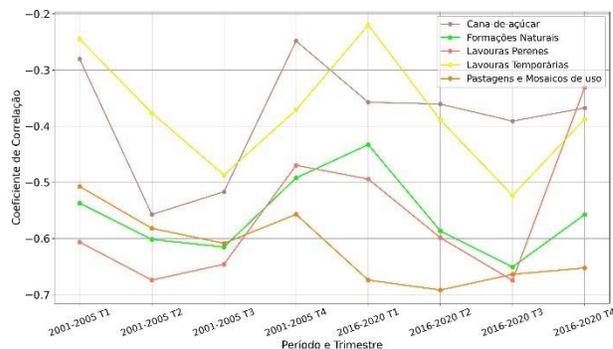


Figura 2. Perfil sazonal da correlação entre o vigor vegetativo (NDVI) e a temperatura de superfície (LST) em Casa Branca, por trimestre, entre 2001-2005 e 2016-2020.

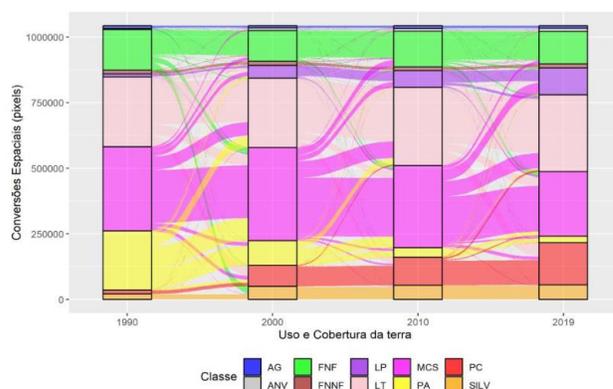


Figura 3. Diagrama de transições de uso e cobertura da terra, Casa Branca (1990 - 2020). Classes: água (AG), áreas não vegetadas (ANV), formações florestais (FNF), formações naturais não florestais (FNFN), lavouras perenes (LP), lavouras temporárias (LT), mosaicos de uso (MCS), pastagens (PA), pivôs centrais (PC) e Silvicultura (SILV). A cana-de-açúcar está representada em LT. Fonte: [4].

As transições no uso e cobertura da terra induziram a mudanças substanciais no NDVI e na LST. O município apresentou um aumento médio de 0,044% no NDVI nos últimos 20 anos (+7,41% em relação à média do quinquênio 2001-2005). A LST aumentou, em média, 0,3°C. Em 2005, a LST média era 29,0 °C, enquanto em 2020 foi de 29,3 °C.

Esses comportamentos no NDVI e LST refletem diretamente ao declínio das pastagens na área de estudo. Em geral, a pastagem possui baixa densidade vegetacional (menor NDVI), e por vezes expõe a matriz de solo exposto devido a um padrão de degradação ambiental. Portanto, a radiação solar incidente na superfície, é utilizada para aquecimento do solo, consequentemente, induzindo ao aumento da LST em áreas de pastagens [11], como foi observado no terceiro e quarto trimestres (Tabela 1).

As áreas agrícolas, principais *drivers* de conversão das pastagens, são intensamente irrigadas em Casa Branca [4]. Nessas condições, as culturas apresentam altos níveis de biomassa (representado por elevado NDVI). Dessa forma, devido à abundante disponibilidade hídrica, as culturas elevaram sua taxa de evapotranspiração real [12], promovendo o

umedecimento da superfície, declinando a LST. Esses padrões são evidenciados diante das correlações espaciais, uma vez que todas as classes de vegetação natural ou cultivada do município apresentaram correlação anual inversa entre NDVI e LST, uma média de -0,5 entre os quinquênios 2001-2005 e 2016-2020.

Embora tenha ocorrido um umedecimento da superfície devido às quedas de LST, esse resultado deve ser interpretado com cuidado. Casa Branca, seguindo a tendência do Cerrado [13], mostra uma amplificação de pivôs centrais nas últimas décadas, com uma média de 10 pivôs instalados por ano desde 1985 [4]. Portanto, considerando a alta taxa de consumo de água pelos pivôs centrais de irrigação, isso pode afetar sistematicamente o contexto socioambiental, a exemplos: i) intensificação de conflitos agrários, devido à disputa por água, ii) e a diminuição da disponibilidade hídrica em reservatórios. Isso torna ainda mais crítico considerando o cenário de crise hídrica no estado de São Paulo, uma área prontamente vulnerável quanto à disponibilidade hídrica [14]. De fato, Casa Branca se tornou o maior consumidor de águas das Bacias Hidrográficas dos Rio Pardo [4].

Entretanto, os coeficientes de correlação entre NDVI e LST não foram mais negativos em relação às demais classes vegetacionais. As pastagens e as lavouras perenes, incluindo a silvicultura, apresentaram correlações mais negativas em todos os trimestres. Esses resultados podem refletir o elevado e persistente consumo hídrico dessas culturas, em especial do eucalipto [15], assim como a maior exposição do solo nas áreas de pastagens. Altas correlações negativas ininterruptas entre NDVI e LST podem ser indicadores de baixa umidade do solo, merecendo, portanto, atenção especial [1-3].

4. CONCLUSÕES

Casa Branca registrou aumento médio nos índices de vigor vegetativo (+0,04 NDVI) e temperatura de superfície (+0,3°C) em todas as classes vegetacionais, cultivadas ou naturais entre os quinquênios 2001-2005 e 2016-2021. A cana-de-açúcar e as pastagens foram as classes que mais contribuíram com o aumento da temperatura (até +1°C) e as lavouras temporárias foram as que mais contribuíram com o aumento do NDVI. Em toda área de vegetação predominam correlações negativas entre NDVI e LST e, principalmente nos casos das lavouras perenes, estas correlações são constantes e significativas ao longo de todo o ano, podendo indicar consumo excessivo de recursos hídricos.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP (Processos 2022/09319-9, 2024/05205-4 e 2024/13150-5), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. REFERÊNCIAS

[1] I. Sandholt, K. Rasmussen, J. Andersen. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment

of Surface Moisture Status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213–224, 2002.

[2] F. Marzban, S. Sadoudi, R. Preusker. The influence of land-cover type on the relationship between NDVI–LST and LST–Tair. *International Journal of Remote Sensing*, 39 (5), 1377–1398, 2018.

[3] W. Ullah, K. Ahmad, S. Ullah, et al. Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon*, 9, e13322, 2023.

[4] T. Parreiras, E. L. Bolfe, E. E., Sano, L. A. P. Silva. Dinâmica espaço-temporal da expansão de pivôs centrais e da diversificação agrícola no município de Casa Branca (SP). *Labor & Engenho*, 18, e024004, 2024.

[5] Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG). Atlas das Pastagens. 2023. Disponível em: <https://atlasdaspastagens.ufg.br/map>. Acessado em 25 outubro 2024.

[6] G. M. Furlani. Estudo geomorfológico das boçorocas de Casa Branca. 1980. 380 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

[7] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2024. Portal Cidades. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/casa-branca.html>. Acessado em 25 outubro 2024.

[8] Projeto MapBiomias. Downloads. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>. Acesso em 20 outubro 2024.

[9] Y. Zhang, X. Feng, F. Bojie, et al. Satellite-Observed Global Terrestrial Vegetation Production in Response to Water Availability. *Remote Sensing*, 13(7), 1289, 2021.

[10] C.B. Caballero, A. Ruhoff, T. Biggs. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. *Science of Total Environment*, 808, 152134, 2022.

[11] G. Sampaio, C. Nobre, M. H. Costa. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34(17), 2007.

[12] L. Leipelt, J. B. Rossi, B. C. Andrade et al. Assessing Evapotranspiration Changes in Response to Cropland Expansion in Tropical Climates. *Remote Sensing*, 16(18), 3404, 2024.

[13] E. E. Sano, I. A. Magalhães, L. N. Rodrigues et al. Spatio-Temporal Dynamics of Center Pivot Irrigation Systems in the Brazilian Tropical Savanna (1985–2020). *Water*, 16(13), 1987, 2024.

[14] D. Althoff, L. N. Rodrigues, D. D. Silva. Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. *Applied Water Science*, 11, 176, 2021.

[15] L. A. P. Silva, C. M. P. Souza, M. E. Leite, R. Filgueiras. Estimating Water Loss in an Environmental Protection Area - Minas Gerais, Southeast Brazil. *Caderno de Geografia*, 30(62), 768-787, 2020.