DOI: 10.25100/eg.v0i27.13100
Espacios y Territorios

Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à estimativa de biomassa acima do solo em iLPF[1]

Análisis temporal de índices de vegetación como subsidio para la estimación de biomasa aérea en sistemas iLPF

Temporal analysis of vegetation indices as a support for aboveground biomass estimation in iCLF systems

[2]Marcelo Teixeira
Graduando em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. marcelo.teixeira@ufpr.br | 0009-0004-2521-0538

[3]Elias Fernando Berra
Pós-doutor em Sensoriamento Remoto (Engenheiro Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. eliasberra@ufpr.br | 0000-0002-0220-5048

[4]Adriane Avelhaneda Mallmann
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. mallmann.adriane@ufpr.br | 0000-0002-5588-9877

[5]Silvano Kruchelski
Doutorando do Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. silvanokr@ufpr.br | 0000-0002-3774-1641

Para citar este artículo: Teixeira, M., Berra, E., Avelhaneda, A., y Kruchelski, S. (2024). Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à estimativa de biomassa acima do solo em iLPF. *Entorno Geográfico*, (27), e23013100. https://doi.org/10.25100/eg.v0i27.13100

[1] Trabalho apresentado no VII Workshop da Rede Ibero-americana de Observação Territorial (RIDOT), realizado nos dias 27 a 29 de março de 2023, em Curitiba, Brasil, no eixo temático 5 - Ambiente e Território: Sustentabilidade e Adaptação.

[2] Estudante de graduação em Geografia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), realizando projetos de Iniciação Cientifica com foco em Sensoriamento Remoto em sistemas de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta (iLPF).

[3] Engenheiro Florestal (Universidade Federal de Santa Maria, UFSM), com mestrado (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS) e doutorado (Newcastle University) em Sensoriamento Remoto (SR). É professor adjunto da Universidade Federal do Paraná (UFPR) na área de Geotecnologias.

[4] Engenheira Florestal graduada pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Possui mestrado em Engenharia Florestal, na área de Manejo Florestal, pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atualmente é doutoranda em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

[5] Possui graduação em Ciências Biológicas, Mestre e doutorando em produção vegetal pela Universidade Federal do Paraná. Como mestre em produção vegetal desenvolveu um projeto de educação ambiental com foco em sustentabilidade para professores e escolares do ensino fundamental.

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Resumo

As mudanças climáticas, suas consequências e alternativas para minimizar seus efeitos estão entre os temas mais debatidos atualmente. Os sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) aparecem como uma alternativa na concepção de Agricultura Sustentável. Para o manejo da iLPF, o sensoriamento remoto tem se mostrado uma opção. Nesse estudo, conduzido numa área experimental de iLPF, em Pinhais, PR, foi analisado a variabilidade dos índices de vegetação (NDVI, sPRI e CO2flux) entre fevereiro e setembro de 2021, utilizando imagens da PlanetScope, em dois níveis de análise: nível de pixel e tratamento. No nível de pixel, os resultados indicaram leve tendência de queda do NDVI; estabilização dos valores de CO2flux; e leve aumento do sPRI. Enquanto, para o nível de tratamento, as tendências do NDVI e sPRI se mantiveram; já o CO2flux, foi observado uma queda em seus valores. Utilizando o teste de ANOVA, foi mostrado que não houve variação entre os índices para os diferentes tratamentos. Também foi analisada uma variável climática – precipitação – na atuação sobre os índices. Pela regressão linear múltipla, os valores do nível de pixel relacionados com os valores de biomassa do inventário florestal, como subsídio para a estimativa da biomassa acima do solo, demonstraram relações nulas a fracas.

Palavras-chave: análise de regressão, análise estatística, satélite, índice e modelo matemático

Resumen

El cambio climático, sus consecuencias y las alternativas para minimizar sus efectos se encuentran entre los temas más debatidos en la actualidad. Los sistemas de Integración Cultivo-Ganadería-Bosque (iLPF, por sus siglas en portugués) surgen como una alternativa dentro de la concepción de la Agricultura Sostenible. Para la gestión de los iLPF, el uso del sensoriamento remoto se ha mostrado como una opción viable. En este estudio, realizado en un área experimental de iLPF, en Pinhais, PR, se analizó la variabilidad de los índices de vegetación (NDVI, sPRI y flujo de CO_2) entre febrero y septiembre de 2021, utilizando imágenes de PlanetScope, en dos niveles de análisis: por píxel y por tratamiento. A nivel de píxel, los resultados indicaron una ligera tendencia a la disminución en el NDVI; estabilización de los valores de flujo de CO_2; y un leve aumento en el sPRI. Mientras que, a nivel de tratamiento, se mantuvieron las tendencias del NDVI y del sPRI; en cuanto al flujo de CO_2, se observó una caída en los valores. Mediante la prueba ANOVA, se evidenció que no hubo variación entre los índices para

los diferentes tratamientos. También se analizó una variable climática – la precipitación – en su desempeño sobre los índices. Mediante regresión lineal múltiple, los valores a nivel de píxel relacionados con los valores de biomasa del inventario forestal, como subsidio para la estimación de la biomasa aérea, mostraron relaciones nulas o débiles.
Palabras clave: análisis de regresión, análisis estadístico, satélites, índices y modelos matemáticos

Abstract

Climate change, its consequences, and the alternatives to minimize its effects are among the most debated topics today. The Crop-Livestock-Forestry Integration systems (iCLF, by its Portuguese acronym) emerge as an alternative within the framework of Sustainable Agriculture. For the management of iCLF systems, the use of remote sensing has proven to be a viable option. In this study, carried out in an experimental iCLF area in Pinhais, PR (Brazil), the variability of vegetation indices (NDVI, sPRI, and CO_2 flux) was analyzed between February and September 2021 using PlanetScope imagery at two levels of analysis: per pixel and per treatment. At the pixel level, the results indicated a slight downward trend in NDVI, stabilization in CO_2 flux values, and a slight increase in sPRI. At the treatment level, the trends in NDVI and sPRI remained, while CO_2 flux showed a decrease in values. ANOVA testing revealed no significant variation in the indices among the different treatments. A climatic variable—precipitation—was also analyzed in relation to its effect on the indices. Through multiple linear regression, the pixel-level values related to the forest inventory biomass data, used to support aboveground biomass estimation, showed null or weak relationships.
Keywords: regression analysis, statistical analysis, satellites, indices and mathematical models

Recibido: 17 de julio de 2023 **Aceptado:** 20 de julio de 2023
Publicado: 1 de junio de 2024

1. Introdução

As Mudanças climáticas e suas consequências estão entre os temas mais debatidos atualmente, com destaque a assuntos ligados a produção de alimentos e a insegurança alimentar em um mundo em constante mudança. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) é o órgão das Nações Unidas designado para avaliar as questões sobre

esse tema. Em seu Sexto Relatório foram divulgados diversos impactos, entre eles: o aquecimento induzido pelo ser humano desacelerou o crescimento da produtividade agrícola nos últimos 50 anos, em latitudes baixas e médias, dificultando cada vez mais os esforços para atender as necessidades humanas; a qualidade das colheitas e pastagens tem sido afetada negativamente; certas áreas poderão se tornar inadequadas para a produção de alimentos. Estes efeitos relacionados à produtividade e disponibilidade de alimentos, resultam no aumento do número de pessoas em situação de fome, desnutrição e mortalidade relacionada à dieta (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Diante da necessidade de buscar alternativas para minimizar os efeitos das mudanças climáticas, os sistemas agrossilvipastoris apresentam-se atualmente como medidas a serem tomadas na busca por uma concepção de Agricultura Sustentável (Balbino et al., 2012; Food and Agriculture Organization of the United Nations e UN Environment Programme, 2020). Estes sistemas, também conhecidos como Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), entram como um componente do Brasil dentro do Plano ABC, onde frente a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP) de 2009, o país assumiu o compromisso voluntário de reduzir as emissões de gases do efeito estufa no setor agropecuário (Gianetti e Filho, 2021).

De maneira específica, a iLPF, consiste em uma mesma área, incluir os respectivos sistemas produtivos por meio do cultivo consorciado, em rotação ou em sucessão. Os benefícios são diversos, sendo alguns deles: a reduzir da pressão por aberturas de novas áreas; melhorar a utilização dos recursos naturais pela complementaridade e sinergia entre os componentes vegetais e animais; mimetizar o ambiente natural; otimizar o uso da terra; elevar os níveis de produtividade; diversificar a produção e gerar produtos de qualidade; intensificar a ciclagem de nutrientes; diminuir a emissão de metano por quilograma de carne produzida; mitigar o efeito estufa, resultante da maior capacidade de sequestro de carbono (Balbino et al., 2012; Food and Agriculture Organization of the United Nations e UN Environment Programme, 2020; Moraes et al., 2018).

Portanto, o monitoramento e modelagem desses sistemas ganham destaque como subsídio às tomadas de decisão do manejo, que tem como intuito alcançar a produtividade potencial desses sistemas. Uma variável relacionada com estes pontos é a biomassa, importante para entender o balanço de carbono, que é fixado por meio das atividades fotossintéticas (Watzlawick et al., 2006). Além disso, nos ambientes florestais da iLPF, o tamanho e a forma das copas das árvores podem estar relacionados com a maximização

da produtividade. Nesse sentido, entender a partição da biomassa também é importante para subsidiar decisões no manejo florestal (Tonini et al., 2016).

Uma alternativa para a realização destas atividades é por meio do sensoriamento remoto, que se caracteriza pela obtenção de dados de um objeto sem estar necessariamente em contato com ele. Por meio do sensoriamento remoto, é possível capturar valores de reflectância em diferentes faixas do espectro eletromagnético, por exemplo. Na agricultura, estes dados vão estar associados às características das plantas, como índice da área foliar e biomassa acima do solo (Shiratsuchi et al., 2014). Com estes valores de reflectância, podem ser feitas transformações matemáticas utilizando diferentes bandas, denominadas índice de vegetação (Shiratsuchi et al., 2014).

Um dos índices de vegetação mais utilizados é o *Normalized Different Vegetation Index* (NDVI), desenvolvido por Rouse et al. (1974), onde é utilizado a faixa do vermelho e infravermelho próximo. Outro índice que utiliza a diferença normalizada é o *Photosynthetic Reflectance Index* (PRI), que faz uso das faixas do azul e verde. Este é também reescalonado para os resultados serem positivos, o qual é conhecido como sPRI. Um índice para medir a eficiência do sequestro de carbono pela vegetação foi desenvolvido por Rahman et al. (2000), conhecido como CO2flux, sendo resultado da utilização do NDVI e sPRI.

Dados de sensores ópticos a bordo de satélites, como o Sentinel-2, são usados há muito tempo para monitoramento da superfície terrestre em inúmeras aplicações, incluindo a estimativa de biomassa acima do solo em plantios florestais (Berra et al., 2012). Ao longo dos últimos anos, o aumento da disponibilidade de satélites de alta resolução espacial e temporal oferece uma oportunidade sem precedentes para monitorar a dinâmica da superfície terrestre de maneira rápida e em escalas finas. Como exemplo dessas novas gerações de satélites, a constelação *PlanetScope* de aproximadamente 130 microssatélites (*CubeSats*) fornece uma cobertura global quase diária a 3 metros de resolução espacial com até oito bandas espectrais (*coastal blue, blue, green I, green II, yellow, red, red-edge, NIR*) (Planet Labs, 2022). Com tais vantagens, o *PlanetScope* tem sido cada vez mais testado e utilizado como fonte de dados orbitais para subsidiar o monitoramento e avaliação da superfície terrestre, incluindo a estimativa de biomassa acima do solo em um contexto agrícola (Reis et al., 2020).

O presente estudo tem por objetivo analisar o comportamento espaço-temporal de três índices de vegetação: NDVI, sPRI e CO2flux. Derivados a partir de imagens dos satélites *PlanetScope* em um sistema agrícola com iLPF durante 8 meses em dois níveis de análise: uma com foco no componente arbóreo; e outra nos tratamentos em geral, considerando todas as heterogeneidades contidas. Também será analisada se a força das correlações entre dados espectrais *PlanetScope* e a biomassa acima do solo inventariada varia temporalmente.

2. Procedimentos Metodológicos

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no projeto Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), localizado na Estação Experimental Canguiri, município de Pinhais, Paraná, com coordenada central 25°23’30” S de latitude, 49°07’30” W de longitude e 935 metros de altitude.

A área total do objeto de estudo é de 17 hectares (Figura 1), onde o delineamento experimental está disposto em blocos ao acaso, com 3 repetições e 3 tratamentos, sendo eles: Lavoura-Floresta (LF) - *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage integrado com milho de verão (*Zea Mays*), plantado em outubro e cobertura de inverno de aveia (*A. strigosa*) sem pastejo); Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF - *E. benthamii* integrado com rotação de bovinos por 3 anos conforme PF e 1 ano de cultura de milho conforme LF.); e Pecuária-Floresta (PF - *E. benthamii* integrado a pastagem de inverno (*Avena strigosa*) e de verão (*Megathyrsus maximus* cv. Áries) com pastoreio de gado entre julho e abril do ano subsequente).

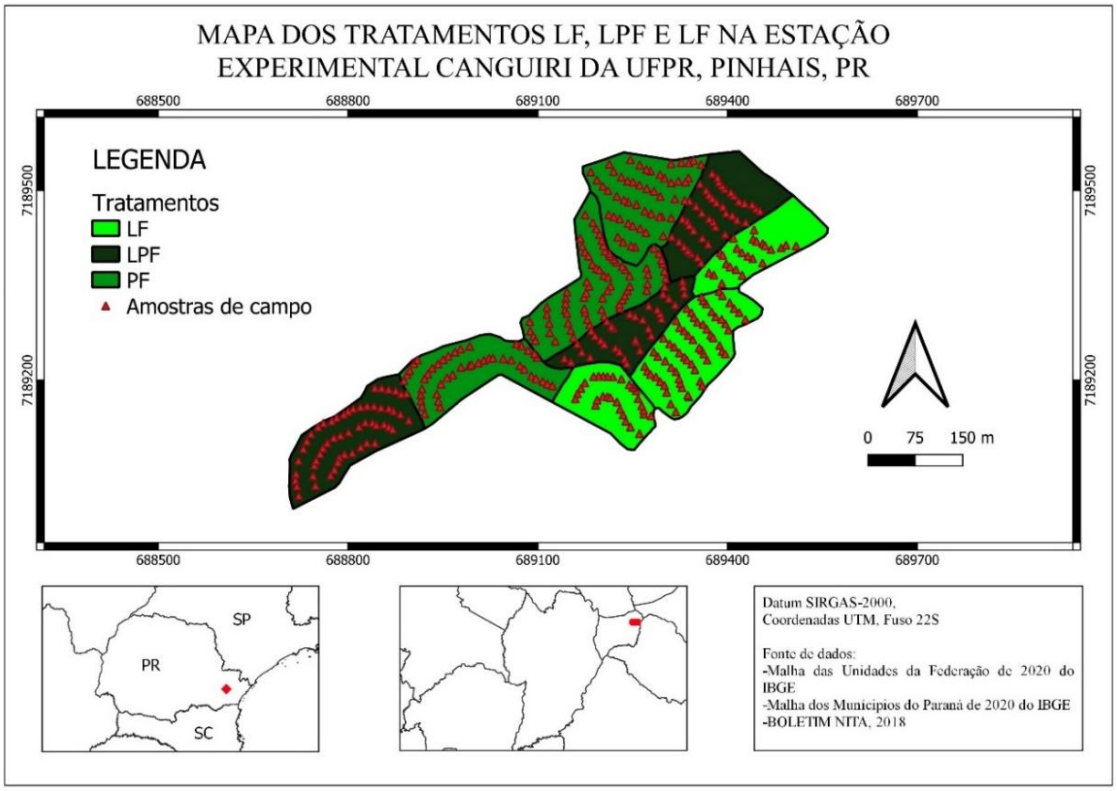

Figura 1. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS LF, LPF E PF NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL CANGUIRI DA UFPR, EM PINHAIS, PR

Fonte: Os autores (2022)

2.2 Inventário Florestal

O componente florestal da iLPF é composto por plantio de *E. benthamii* implantado em 2013. Em 14 de maio de 2021, após o plantio passar por um desbaste, foi realizado o inventário censitário dos três tratamentos (LF, LPF e PF) nos três blocos, no qual, um total de 414 árvores tiveram a circunferência a altura do peito (CAP) e altura total (Ht) medidas. Informações detalhadas do experimento podem ser encontradas em Kruchelski et al. (2021).

O CAP foi mensurado com fita centimétrica e Ht foi medida com um hipsômetro *Haglöf* Vertex IV®, a distância de 20 m da árvore. Além disso, a posição geográfica das árvores foi coletada com o GPS Garmin 62CSX. De acordo com o manual do proprietário da série GPSMAP 62, a margem de erro para a localização exata é de ± 12 pés (ou 3,66 m). O CAP e o Ht foram utilizados em equação alométrica para determinar a biomassa acima do solo (kg.árvore^{-1}) (Tabela 1). As informações de localização também foram usadas para calcular os valores dos índices de vegetação nos outros meses.

Tabela 1. ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS DE BIOMASSA OBTIDOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL.

ID	Biomassa média (kg/árvore) (±desvio padrão)	Nº amostral	Densidade (ind./ha)
LF1	964 (± 253)	25	17
LF2	897 (± 236)	64	29
LF3	697 (± 223)	28	21
LPF1	916 (± 248)	41	20
LPF2	876 (± 165)	35	26
LPF3	590 (± 157)	55	27
PF1	951 (± 199)	51	23
PF2	828 (± 226)	69	29
PF3	646 (± 184)	46	24

Fonte: Os autores (2022)

2.3 Dados de Sensoriamento Remoto

Na plataforma *Planet Explorer*, foi obtida as imagens produto do sensor *SuperDove* dos satélites *PlanetScope*, contendo 8 bandas, desde a região do visível até o infravermelho próximo, sendo a única exceção a imagem do dia 10 de setembro, produto do sensor DOVE-R, este contendo 4 bandas (Tabela 2). As imagens foram selecionadas tendo como critério: terem a diferença mais próxima de 1 mês entre elas, tendo como imagem base a do dia 19 de maio. Está foi definida, pois é a imagem mais próxima da coleta de campo (14 de maio de 2021) e que não apresentava nuvens. A primeira imagem da série temporal corresponde ao mês de fevereiro, enquanto a última o mês de setembro.

As imagens vêm corrigidas para a reflectância de superfície, derivada do *Planet Analytic*. Ela é processada para a reflectância no topo da atmosfera (TOA) e depois corrigida atmosfericamente para a reflectância de superfície utilizando o modelo de transferência radioativo 6S com dados auxiliares do sensor MODIS para contabilizar os efeitos atmosféricos (Planet Labs, 2022).

Tabela 2. RESOLUÇÕES DOS SENSORES DOS SATÉLITES PLANETSCOPE

SENSORES	BANDAS ESPECTRAIS	RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA	RESOLUÇÃO TEMPORAL
SUPER DOVE (PSB.SD)	Coastal Blue 431 - 452 nm Blue: 465 - 515 nm Green I: 513 - 549 nm Green II: 547 - 583 nm Yellow: 600 - 620 nm Red: 650 - 680 nm Red-Edge: 697 - 713 nm NIR: 845 - 885 nm	12 bits	Diária
DOVE-R (PS2.SD)	Blue: 464 - 517 nm Green: 547 - 585 nm Red: 650 - 682 nm NIR: 846 - 888 nm	12 bits	Diária

Fonte: Planet Labs (2022)

2.4 NDVI

O NDVI foi proposto inicialmente por Rouse et al. (1974). Ele consiste na utilização das bandas do vermelho e infravermelho próximo em um processo de diferença normalizada (Equação 1). Medindo a relação entre a alta absorção da vegetação na faixa do vermelho e seu pico de reflectância no infravermelho próximo (Silva & Baptista, 2015). Resultando em valores dos pixels entre -1 e 1, que em geral, quanto mais próximo de 1, maior tende a ser a quantidade de material verde fotossinteticamente ativo (verdor) da superfície imageada (até um limite de saturação do índice).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

2.5 CO2flux

Proposto por Rahman et al. (2000), o CO2flux, busca analisar a eficiência da vegetação no processo de sequestro de carbono (Baptista, 2003). Para isso, é utilizado dois índices de vegetação na sua formulação: NDVI e sPRI. O PRI é também um índice por diferença normalizada (Equação 2), mas utiliza a faixa de absorção no azul da vegetação e um pico de reflectância no verde. Os valores de PRI podem ser reescalonados para valores positivos, no qual é conhecido como sPRI (Equação 3), facilitando interpretação e comparação com outros índices de vegetação, como o NDVI e CO2flux (Equação 4).

$$PRI = \frac{Blue-Green}{Blue+Green} \quad (2)$$

$$sPRI = \frac{(1+PRI)}{2} \quad (3)$$

$$CO2flux = NDVI * sPRI \quad (4)$$

2.6 Análise dos Dados

Após o *download* das imagens de reflectância espectral (total de 8 imagens de fevereiro a setembro), foram gerados mapas de NDVI, CO2flux e sPRI da área de estudo. Para cada índice de vegetação, gerou-se uma coleção de mapas mostrando a variação espacial dos valores dos índices em cada data, dessa forma auxiliando a análise visual do comportamento espaço-temporal dos índices no sistema de iLPF.

Posteriormente, foram extraídos os valores dos pixels que intersectam a localização das árvores do plantio de Eucaliptos, conforme levantado no inventário florestal (Figura 1), para cada um dos tratamentos (LF, LPF, PF) em cada mês, utilizando a ferramenta *Point Sampling Tool*, do *software* QGIS (versão 3.22). Em seguida, foi feito o cálculo da média aritmética dos valores de cada índice de vegetação nos diferentes tratamentos, para cada data das imagens, cujos valores foram plotados em gráficos para suportar uma análise temporal do comportamento desses índices no período analisado para o componente arbóreo. Seguindo o mesmo intuito da análise a nível de pixel e metodologia com plotagem em gráficos, foi feito uma análise a nível do tratamento para cada um dos três, realizando uma média aritmética dos valores de todos os pixels contidos em cada tratamento, considerando todas a heterogeneidades contidas (pastagem, Eucalipto, culturas agrícolas, etc.).

Investigou-se se a precipitação apresenta alguma possível influência na variação temporal do NDVI, CO2flux e sPRI. Para isso foram utilizados dados de precipitação acumulada dos 30 dias anteriores à data das imagens *PlanetScope*. Os dados foram obtidos de estação meteorológica localizada na área de estudo (NITA), modelo HOBO RX3000 *Station* CELL - 3g, com sensor de precipitação S-RGF. Foi calculado o coeficiente de determinação entre os valores de precipitação acumulada e os índices de vegetação.

Foram geradas equações com os dados espectrais e a biomassa inventariada e o coeficiente de determinação (R^2) das equações foi analisado. Para a biomassa, tem-se um único conjunto de dados adquiridos em uma única data; já para o dado espectral, tem-se um conjunto de valores diferentes para cada mês nas datas de aquisição das imagens. Com os valores dos índices de vegetação extraídos e tabulados no s*oftware* Excel, foram feitas análises de regressão linear múltipla com o intuito de gerar modelos estimadores de biomassa, sendo: biomassa a variável dependente (conforme seção 2.2) e os índices de vegetação (NDVI, CO2flux e sPRI), as variáveis independentes.

3. Resultados e Discussão

3.1 Comportamento Espaço-Temporal do NDVI, CO2flux e SPRI

A variação temporal do NDVI, CO2flux e sPRI ao longo do ano, fevereiro a setembro de 2021, nas três combinações da iLPF é analisada ao nível de pixel (Figura 2; pixels que intersectam a localização das árvores de Eucalipto) e ao nível de tratamento (Figura 3; média dos pixels dentro de cada tratamento). De maneira geral, percebe-se uma leve tendência de diminuição dos valores de NDVI ao longo do tempo (Figura 2a e 3a); já o sPRI apresenta uma leve tendência de aumento dos valores (Figura 2c e 3c). Por outro lado, o CO2flux não apresentou tendências claras de variações no nível de pixel (Figura 2b) no mesmo período, ao menos visualmente, mas apresentou tendência decrescente no nível de tratamento (Figura 2c).

A análise da magnitude dos índices de vegetação mostra, de maneira geral, que o sistema LF apresentou valores mais elevados de NDVI e CO2flux que os demais tratamentos na maioria das datas (Figura 2a,b e 3a,b); padrão similar não foi observado para o sPRI (Figura 2c e 3c). É interessante notar que a magnitude dos valores de sPRI foram bastante próximas dentro de cada data para os três tratamentos (Figura 2c e 3c). Apesar dessas diferenças visuais, pelo teste da ANOVA ($\alpha = 0,05$; $n = 8$), constatou-se que os valores médios dos diferentes tratamentos (nesse caso, LF, LPF, PF) não tiveram diferença significativa entre os tratamentos em cada índice de vegetação, considerando os dois níveis de análise: i) ao nível de pixel: NDVI ($F = 0,99$; $p = 0,39$), CO2flux ($F = 1,188$; $p = 0,32$) e sPRI ($F = 0,11$; $p = 0,88$); e ii) ao nível de tratamento: NDVI ($F = 0,49$; $p = 0,61$), CO2flux ($F = 0,63$; $p = 0,53$) e sPRI ($F = 0,19$; $p = 0,82$).

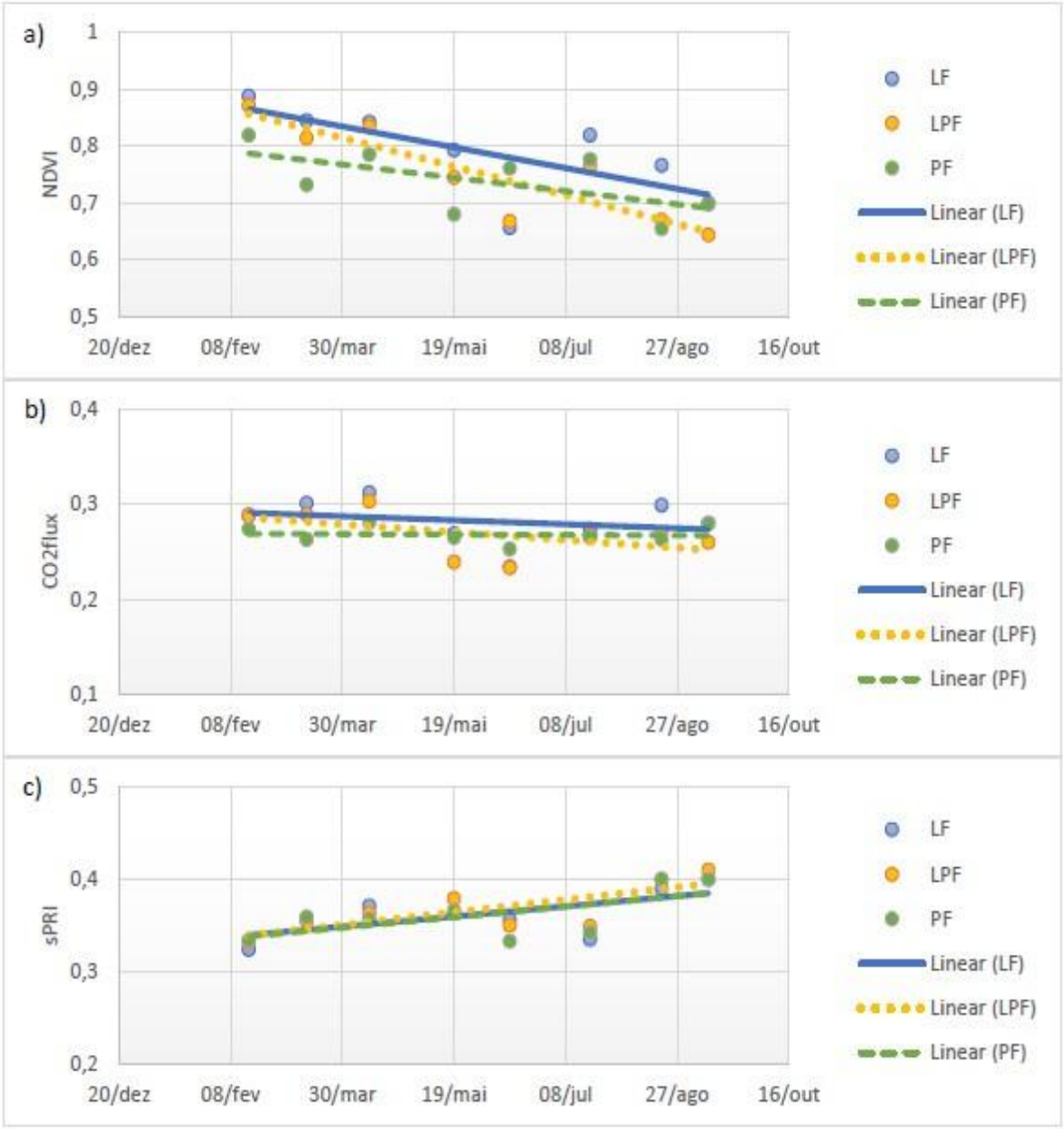

Figura 2. VARIAÇÃO TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DE NDVI, CO2flux e sPRI - NÍVEL DE PIXEL (PIXELS COINCIDENTES COM A LOCALIZAÇÃO DAS ÁRVORES). AS LINHAS (LINEAR) REPRESENTAM A REGRESSÃO LINEAR PARA CADA TRATAMENTO

Fonte: Os autores (2022)

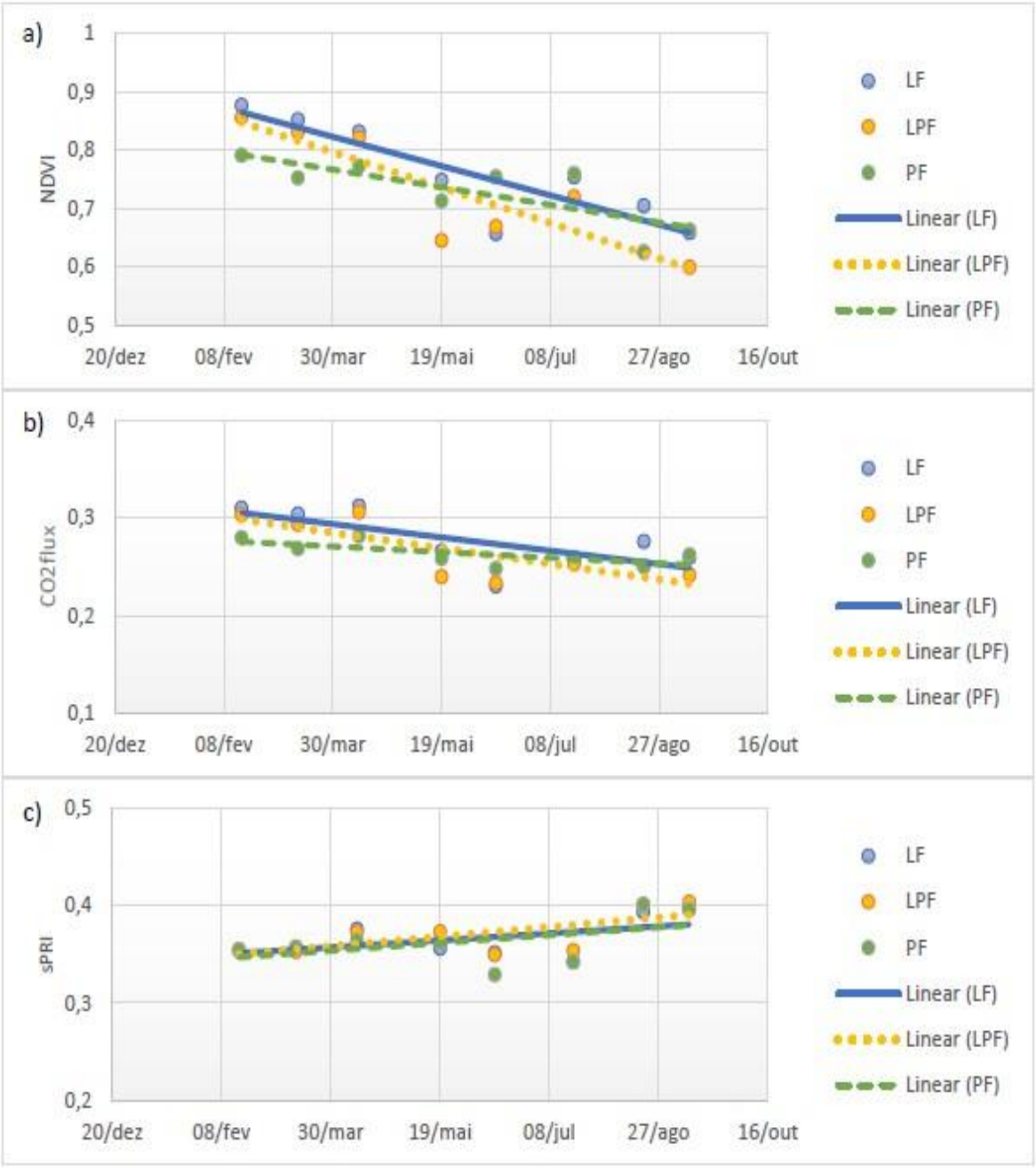

Figura 3. VARIAÇÃO TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DE NDVI, CO2flux e sPRI – NÍVEL DE TRATAMENTO (MÉDIA POR TRATAMENTO). AS LINHAS (LINEAR) REPRESENTAM A REGRESSÃO LINEAR PARA CADA TRATAMENTO

Fonte: Os autores (2022)

Os valores dos índices de vegetação extraídos em nível de pixel e em nível de tratamento são bastante similares. Ao se produzir gráficos de dispersão (não mostrado) entre os

valores dos três índices de vegetação extraídos nos dois níveis, ao longo do período analisado nos três tratamentos (n=24), obteve-se para NDVI, CO2flux e sPRI o R^2 de 0,86, 0,79 e 0,86, respectivamente, indicando que o valor extraído ao nível de pixel é bastante representativo do comportamento espectral sobre todo o tratamento, mas que existem diferenças da ordem de 15-20%.

As Figuras 4-6 apresentam tanto a variação espacial como a variação temporal dos três índices de vegetação aqui analisados. Importante notar que as Figuras 4-6 mostram o comportamento dos índices de vegetação de maneira contínua na área de estudo, ou seja, é mapeado todos os componentes do iLPF. Isso, por sua vez, causa uma variabilidade maior de valores de índices de vegetação, pela maior heterogeneidade de coberturas e esperada sazonalidade mais rápida do tratamento Lavoura-Pecuária (em relação ao Eucalipto).

De maneira geral, nota-se a coleção de mapas de NDVI (Figura 4) e de CO2flux (Figura 5) apresentando tendências similares, o que era de se esperar uma vez que o NDVI influencia diretamente a formulação do CO2flux. Já o sPRI (Figura 6) apresentou comportamento diferente do NDVI e CO2flux, de difícil interpretação; esse resultado do sPRI pode estar relacionado com as bandas espectrais utilizadas na normalização, azul e verde, as quais possuem uma amplitude espectral bastante baixa de alvos vegetais (se comparada ao vermelho e NIR utilizado no NDVI), o que, somado com desafios de calibração radiométrica do sensor (Houborg & McCabe, 2018), podem reduzir a eficiência desse índice na detecção e monitoramento de coberturas vegetais.

Interessante notar que, a partir de julho, tem-se nos mapas de NDVI e CO2flux uma faixa na porção leste da área de estudo com comportamento bastante distinto (tom avermelhado). Isso se deve à retirada de uma faixa de eucalipto, o que causou uma diminuição notável dos valores de NDVI e CO2flux naquela porção da área de estudo. Essa detecção confirma a sensibilidade desses índices à atividade fotossintética da vegetação, que é relacionada com variáveis biofísicas tais como índice de área foliar, fração da cobertura vegetal, biomassa, área basal e volume de madeira (Berra et al. 2012).

Alguns fatores podem estar influenciando nos padrões observados nas Figuras 4-6. A sazonalidade do componente agrícola da iLPF deve apresentar forte influência na variação espaço-temporal dos valores dos índices de vegetação do componente arbóreo, uma vez que pode haver mudanças significativas na cobertura do sub-bosque. A presença

de culturas agrícolas (aveia, milho e pasto) deve levar a mudanças fenológicas relativamente rápidas no ano, refletindo em mudanças de valores dos índices de vegetação no tempo. Soma-se a isso o pastoreio pelo gado que tende a alterar a quantidade de biomassa verde (pasto) o que, por sua vez, também deve influenciar na quantidade de energia eletromagnética refletida de volta ao sensor orbital.

De maneira geral, espera-se que a ocorrência de chuvas deva alterar o teor de umidade da classe de fundo, neste caso o componente agrícola, o que por sua vez influencia na quantidade de energia refletida. Portanto, analisou-se a precipitação acumulada nos últimos 30 dias antes da passagem do satélite, observando a correlação dos três índices de vegetação (NDVI, CO2flux e sPRI) com a precipitação (Tabela 3).

Tabela 3. VALORES DO R^2 ENTRE PRECIPITAÇÃO ACUMULADO DOS 30 DIAS ANTES DA PASSAGEM DO SATÉLITE COM OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO: NDVI, CO2FLUX E sPRI - PARA O NÍVEL DE TRATAMENTO E PIXEL

Nível de pixel	**NDVI**	**CO2flux**	**sPRI**
LF	0,26	0,11	0,11
LPF	0,2	0,18	0,08
PF	0,02	0,003	0,006
Nível de tratamento	**NDVI**	**CO2flux**	**sPRI**
LF	0,33	0,27	0,02
LPF	0,26	0,24	0,05
PF	0,03	0,14	0,01

Fonte: Os autores (2022)

Assim, percebe-se um leve aumento da correlação do NDVI e CO2flux com a precipitação, principalmente no sistema LF e LPF, nos coeficientes de determinação vindos das médias de índices de vegetação extraídos ao nível de tratamento. Indicando possivelmente a maior sensibilidade das culturas temporárias com a variabilidade da precipitação, como observado por Trentin et al. (2018).

Essa fraca a moderada correlação é observada por outros autores, Berra et al. (2014), observaram que a ocorrência de chuvas nos dias precedentes à passagem dos satélites utilizados, Landsat-5 e ResourceSat-1, influenciou a interação entre a radiação eletromagnética e a classe de fundo de maneira diferenciada já que as datas de aquisições

foram diferentes. Trentin et al. (2018), encontraram uma correlação representativa para alguns anos entre valor de NDVI e precipitação, em uma análise de séries temporais anuais em plantios de *Eucalyptus*, utilizando o sensor MODIS. Porém, é observado que culturas permanentes, como o Eucalipto, não necessariamente trazem uma resposta a precipitação (Trentin et al., 2018).

Em um estudo realizado na bacia do rio Coxim, região centro-oeste brasileira, Nicácio et al., (2009), calcularam as correlações de Pearson entre precipitação e NDVI. Os melhores resultados da correlação foram observados com o regime pluviométrico acumulado de quatro a cinco meses anteriores à data da imagem onde foi gerado o NDVI (valores de correlação em torno de 0,45 e 0,61). Os autores destacam para o melhor resultado o aumento da defasagem do tempo entre a chuva e a imagem (quando comparada com a chuva mais próxima da data da imagem), pela necessidade do acúmulo da água no solo até atingir a disponibilidade para o vegetal. Outra conclusão dos autores, é que foi denotada uma maior dificuldade de estabelecer uma relação entre NDVI e regiões antropizadas por processos agrícolas.

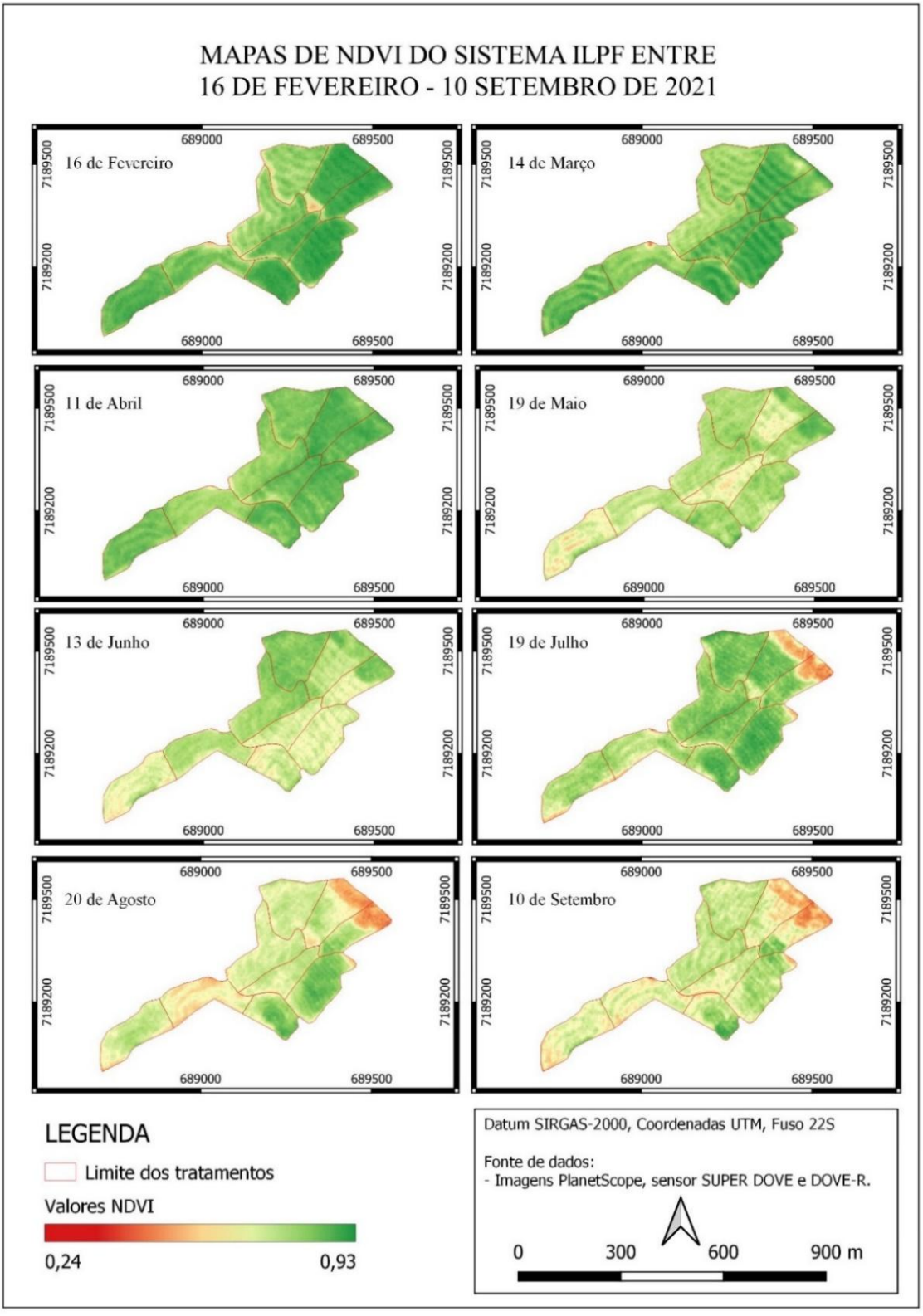

Figura 4. MAPAS DE NDVI DA ÁREA DE ESTUDO, ENTRE OS MESES DE FEVEREIRO E SETEMBRO DE 2021

Fonte: Os autores (2022)

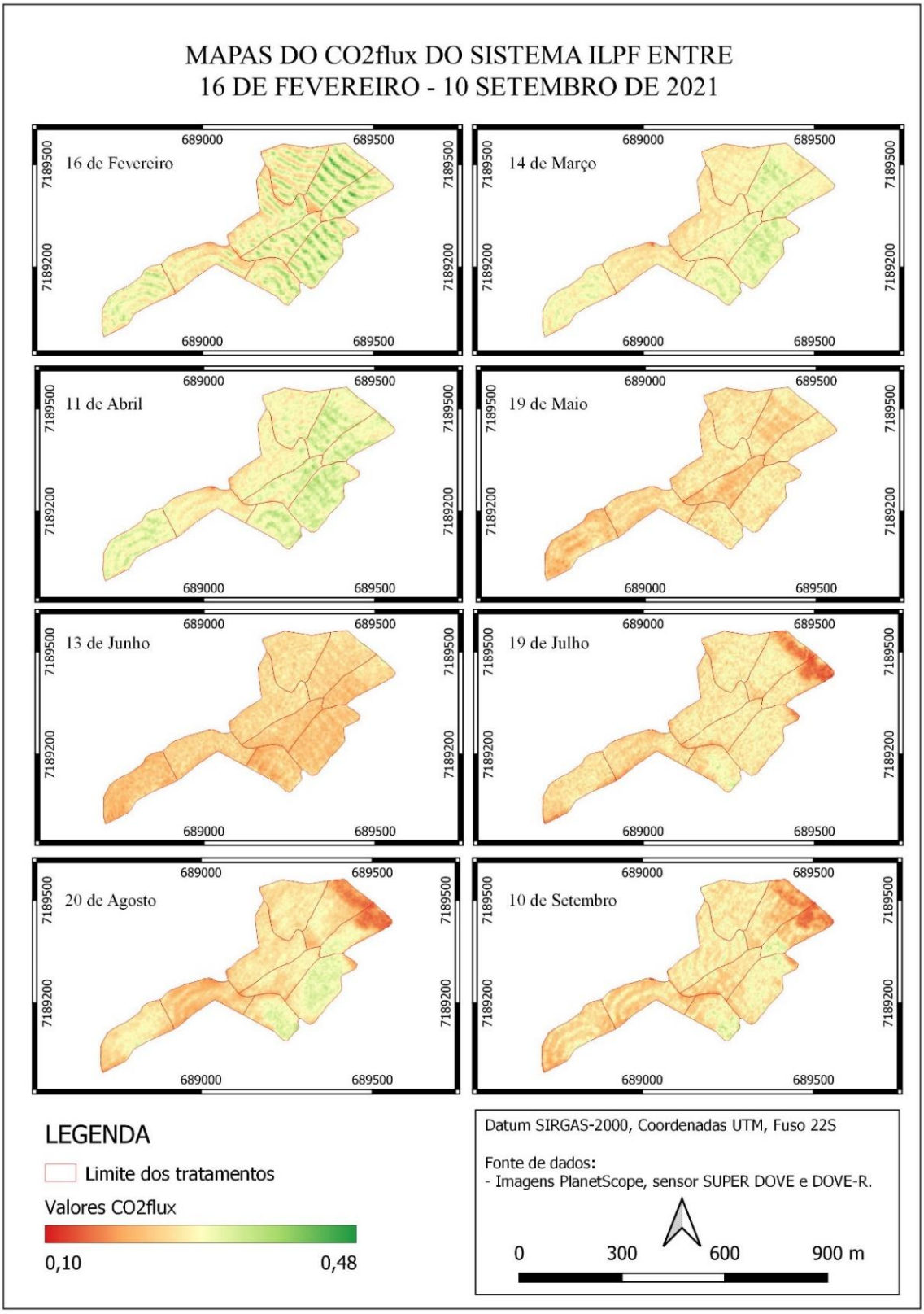

Figura 5. MAPAS DO CO2FLUX DA ÁREA DE ESTUDO ENTRE OS MESES DE FEVEREIRO E SETEMBRO DE 2021

Fonte: Os autores (2022)

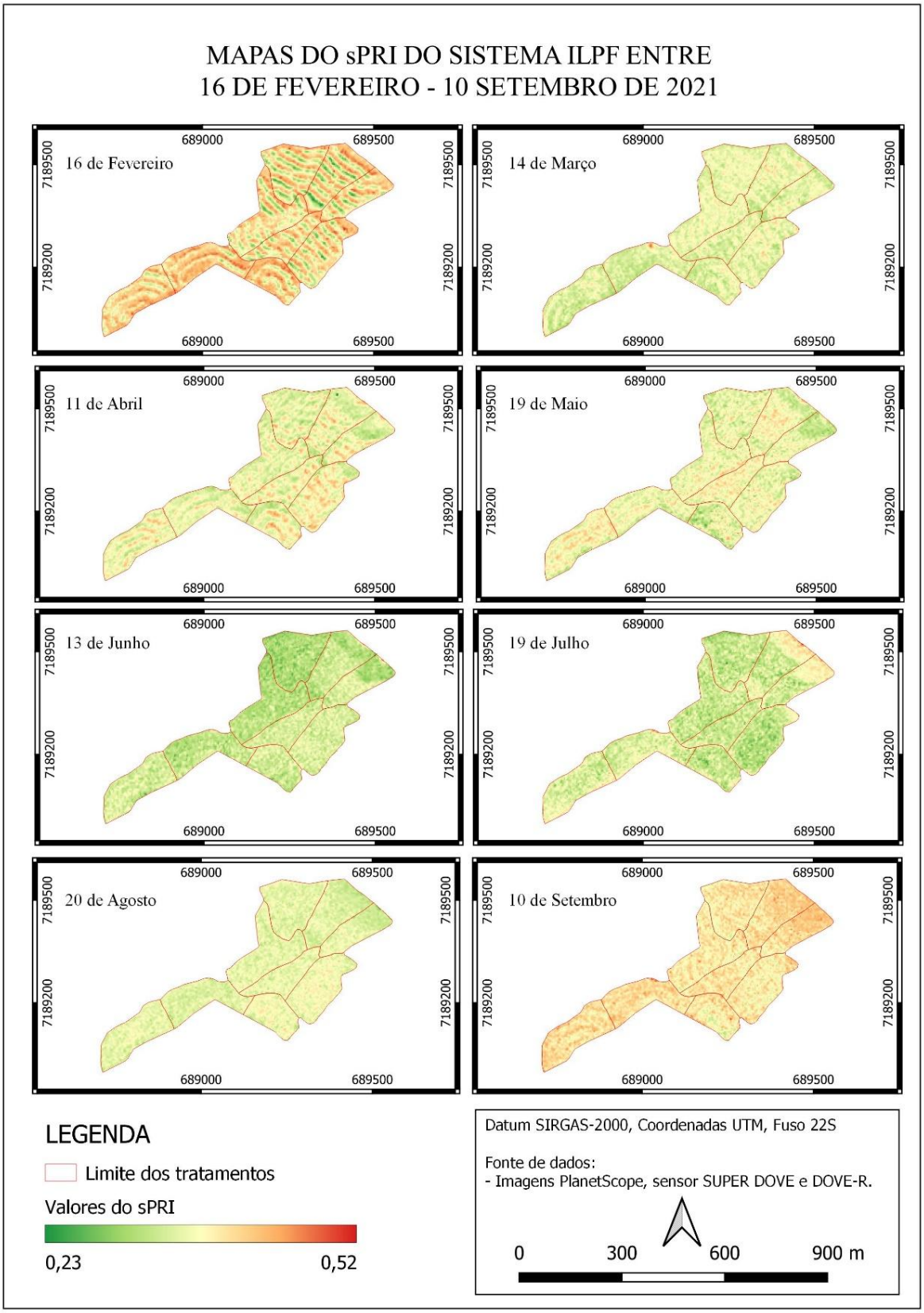

Figura 6. MAPAS DO sPRI DA ÁREA DE ESTUDO ENTRE OS MESES DE FEVEREIRO E SETEMBRO DE 2021

Fonte: Os autores (2022)

3.2 Variação Temporal da Biomassa Estimada

Ao analisar o coeficiente de determinação obtido da regressão linear múltipla entre a biomassa inventariada e os índices de vegetação (Tabela 4), obteve-se que variaram entre $0,01 \leq R^2 \leq 0,06$ para LF, $0,02 \leq R^2 \leq 0,28$ para LPF, e $0,00 \leq R^2 \leq 0,16$ para PF. Apesar dessa fraca correlação, percebe-se, no geral, que os maiores valores de R^2 ocorreram ao redor da data do inventário, 14 de maio, e os menores R^2 nas datas mais distantes, o que reforça a ideia de que os dados espectrais e os biofísicos devem, preferencialmente, ser adquiridos o mais próximo possível um do outro.

Tabela 4. VALORES DE R^2 DAS REGRESSÕES LINEARES MÚLTIPLAS ENTRE OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI, sPRI E CO2flux E A BIOMASSA INVENTARIADA - NÍVEL DE PIXEL. EM NEGRITO SÃO DESTACADAS AS MAIORES CORRELAÇÕES E EM VERMELHO AS MENORES

ID	16/fev.	14/mar.	11/abr.	19/mai.	13/jun.	19/jul.	20/ago.	10/set.
LF	0,03	0,01	0,06	0,01	0,04	0,06	0,06	0,04
LPF	0,03	0,07	0,12	**0,14**	**0,21**	**0,28**	0,02	0,08
PF	0,00	0,07	**0,13**	0,05	**0,16**	0,09	**0,15**	0,09

Fonte: Os autores (2022)

Alguns fatores podem estar influenciando esse baixo poder preditivo das equações. Primeiro, existe pouca variabilidade entre as amostras de biomassa. Todas as árvores inventariadas são da mesma espécie, *Eucalyptus benthamii*, e mesma idade, 8 anos, o que pode ocasionar um intervalo pequeno de valores da biomassa, dificultando a correlação com os valores espectrais orbitais. Segundo o erro de localização do aparelho GNSS utilizado para coletar as coordenadas das árvores é da ordem de 3 m. E terceiro, a acurácia posicional da imagem *PlanetScope*, segundo o fabricante, é menor que 10 m em 90% dos casos (Planet Labs, 2022).

Assim, considerando a propagação de erros, o dado espectral extraído dos pixels coincidentes com a localização das árvores pode estar representando outra cobertura, por exemplo, pasto ou o solo. A qualidade radiométrica dos sensores é outra questão a ser considerada, para contornar tal problema é proposto utilizar dados auxiliares dos satélites Landsat 8 e MODIS (Houborg & McCabe, 2018). Em estudos futuros, a qualidade posicional das imagens *PlanetScope* poderia ser melhorada por meio do registro com dados geoespaciais de alta acurácia posicional.

Um aspecto muito importante para o monitoramento de sistemas agrícolas por meio do sensoriamento remoto orbital é conseguir aliar alta resolução espacial, permitindo analisar as heterogeneidades dentro de um mesmo sistema (por exemplo, as áreas de eucalipto e o espaço entre eles com cultivo, tratado neste estudo); e a resolução temporal para acompanhar os estágios de desenvolvimento das culturas, se tornando um desafio extra em regiões tropicais com maior cobertura de nuvens mais frequentes (Nguyen et al. 2020).

4. Conclusões

As imagens *PlanetScope* apresentam enorme potencial para o monitoramento e modelagem ambiental, conseguindo aliar as resoluções espacial e temporal com sua constelação de nanossatélites. No presente estudo esses benefícios foram observados na possibilidade de dois níveis de análise: os pixels que intersectam a localização dos eucaliptos; e uma análise zonal do tratamento, considerando-o como um todo; com um período mensal de tempo entre as imagens. Os resultados indicaram para o nível de pixel uma leve tendência de queda do NDVI; estabilização dos valores de CO2flux; e um leve aumento do sPRI. Enquanto, para o nível de tratamento, as tendências do NDVI e sPRI se mantiveram, já o CO2flux foi observado uma queda em seus valores, indicando a maior influência da sazonalidade das culturas agrícolas, comparada com os eucaliptos. Utilizando o teste de ANOVA, foi mostrado que não houve variação entre os índices de vegetação para os diferentes tratamentos. Analisando uma variável climática – precipitação – na atuação sobre os índices de vegetação, os valores de correlação foram fracos. Um fator a se considerar é o tamanho da série temporal, com um tempo amostral relativamente pequeno, uma análise posterior com uma maior série-temporal seja necessária para uma melhor conclusão. Porém, ainda assim foram observados maiores valores de correlação, principalmente nos tratamentos LF e LPF, no nível de tratamento, indicando uma maior sensibilidade das culturas agrícolas a precipitação.

A força das regressões entre os índices de vegetação orbitais e a biomassa inventariada foram nulas a fracas. Infere-se que parte dessa dificuldade venha dos erros de posicionamento presentes tanto no dado inventariado como na imagem orbital. Há uma oportunidade para investigar se melhorando a acurácia posicional absoluta e relativa das imagens *PlanetScope* e dos dados inventariados, aumente o poder preditivo das equações, o que permitiria estimar a biomassa acima do solo em sistemas iLPF. Outro ponto é o

pequeno intervalo de valores da biomassa, ocasionado pela pouca variabilidade das amostras, sendo todas as árvores da mesma espécie e idade, dificultando a sua correlação com informações espectrais.

5. Referências

Balbino, L., Cordeiro, L., Oliveira, P., Kluthcouski, J., Galerani, P., & Vilela, L. (2012). Agricultura sustentável por meio da integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). *Embrapa*, (138), 1-18. https://tinyurl.com/y6wsbaka

Baptista, G. (5-10 de abril de 2003). *Validação da Modelagem de Sequestro de Carbono para Ambientes Tropicais de Cerrado, por meio de Dados AVIRIS e HYPERION.* XI SBSR, 2003, Belo Horizonte, Brasil, 1037-1044. https://tinyurl.com/5xdje987

Berra, E., Brandelero, C., Pereira, R., Sebem, E., Goergen, L., Benedetti, A., & Lippert, D. (2012). Estimativa do Volume Total de Madeira em Espécies de Eucalipto a partir de Imagens de Satélite Landsat. *Ciência Florestal*, *22*(4), 853-864. https://doi.org/10.5902/198050987566

Berra, E., Fontana, D., & Kuplich, T. (2014). Comparação da Reflectância Espectral e do IVDN dos Sensores LISS-III/RESOURCESAT-1 e TM/LANDSAT 5 em Povoamento Florestal. *Revista Brasileira de Cartografia*, *2*(66), 393-406. https://tinyurl.com/y9ba34nh

Food and Agriculture Organization of the United Nations y UN Environment Programme. (2020). *The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people*. Food and Agriculture Organization of the United Nations y UN Environment Programme. https://tinyurl.com/3skx53t9

Gianetti, G., & Filho, J. (2021). O Plano e Programa ABC: uma análise da alocação dos recursos. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, *59*(1), 1-15. https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.216524

Houborg, R., & McCabe, M. (2018). A Cubesat enabled Spatio-Temporal Enhancement Method (CESTEM) utilizing Planet, Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, *209*, 211-226. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.067

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Intergovernmental Panel on Climate Change. https://tinyurl.com/4fakpn86

Kruchelski, S., Trautenmüller, J., Deiss, L., Trevisan, R., Cubbage F., Porfírio-Da Silva, V., & Moraes, A. (2021). *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage growth and wood density in integrated crop-livestock systems in Brazilian subtropic. *Agroforest Syst, 95*, 1577-1588. http://dx.doi.org/10.5380/bdc/58

Moraes, A., Carvalho, P., Pelissari, A., Anghinoni, I., Lustosa, S., Lang, C., Assmann, T., Deiss, L., & Nunes, P. (2018). Sistemas Integrados De Produção Agropecuária: Conceitos Básicos E Histórico No Brasil. En E. Souza., F. Silva., T. Assmann., M. Carneiro., P. Carvalho., H. Paulino (Eds.), *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil* (p. 13-28). COPIART.

Nicácio, R., Araujo, L., Gonzaga, E., Libos, M., & Oliveira, L. (2009). Relação ndvi e precipitação na bacia do rio coxim – ms. *Revista Geografia*, *34*, 667-680. http://tinyurl.com/2khffyt5

Nguyen, M., Baez, O., Bui, D., Nguyen, P., & Ribbe, L. (2020). Harmonization of Landsat and Sentinel 2 for Crop Monitoring in Drought Prone Areas: Case Studies of Ninh Thuan (Vietnam) and Bekaa (Lebanon). *Remote Sensing, 12*(2), 281. https://doi.org/10.3390/rs12020281

Planet Labs. (2022). *Planet Imagery Product Specifications.* Planet. https://tinyurl.com/2jehuswz

Rahman, A., Gamon, J., Fuentes, D., Roberts, D., Prentiss, D., & Qiu, H. (2000). *Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS*

imagery. AVIRIS Workshop Proceedings. Anais...JPL/NASA, Pasadena. https://tinyurl.com/3upjdkrd

Reis, A., Werner, J., Silva, B., Figueiredo, G., Antunes, J., Esquerdo, J., Coutinho, A.., Lamparelli, R., Rocha, J., & Magalhães, P. (2020). Monitoring Pasture Aboveground Biomass and Canopy Height in an Integrated Crop–Livestock System Using Textural Information from PlanetScope Imagery. *Remote Sensing*, *12*(16), 2534. https://doi.org/10.3390/rs12162534

Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *ERTS-1 Symposium. Proceedings*, *1*(3), 309-317. https://tinyurl.com/2w8d84f3

Shiratsuchi, L., Brandao, Z., Vicente, L., Victoria, D., Ducati, J., Oliveira, R., & Vilela, M. (2014). Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. En A. Bernardi., J. Naime., A. Resende., L. Bassoi., R. Inamasu, (Eds.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*, (pp. 58-73). EMBRAPA. https://tinyurl.com/ycn3679p

Silva, S., & Baptista, G. (2015). Análise do grau de severidade de áreas queimadas na estação ecológica de águas emendadas por meio de dados do Landsat 8. *Revista Brasileira de Geografia Física*, *8*(2), 431-438. https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.2.p431-438

Tonini, H., Morales M., Meneguci, J., Antonio D., & Wruck, F. (2016) Biomassa e área foliar de clones de eucalipto em ILPF: Implicações para a desrama. *Nativa*, *4*(5), 271 – 276. https://tinyurl.com/bdfevmxx

Trentin, A., Trentin, C., Saldanha, D., & Kuplich, T. (2018). Modis Time Series Analysis And Trmm In Eucalyptus Plantations. *Mercator, Fortaleza*, *17*, 1-11. https://doi.org/10.4215/rm2018.e17022

Watzlawick L., Soares, H., & Kirchner, F. (2006). Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II. *Ciência e Natura*, *28*(1), 45-60. https://www.redalyc.org/pdf/4675/467546282004.pdf