

LUÍS FLÁVIO PEREIRA

**A PREDISPOSIÇÃO AMBIENTAL E ANTRÓPICA CONTROLA MUDANÇAS NO
VERDOR DA VEGETAÇÃO: UM NOVO PARADIGMA?**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho

Coorientadores: Guilherme de Castro Oliveira
Lucas de Carvalho Gomes

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P436p
2022

Pereira, Luís Flávio, 1995-
A predisposição ambiental e antrópica controla mudanças
no verdor da vegetação: um novo paradigma? / Luís Flávio
Pereira. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (46 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.
Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2022.
Referências bibliográficas: f. 39-43.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.356>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solo - Uso. 2. Regiões áridas - Brasil, Nordeste.
3. Vegetação - Mapeamento. 4. Mudanças climáticas.
5. Desertificação. 6. Google Earth. I. Filho, Elpídio Inácio
Fernandes, 1963-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.4

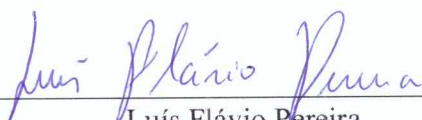
LUÍS FLÁVIO PEREIRA

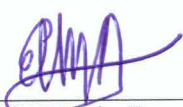
**A PREDISPOSIÇÃO AMBIENTAL E ANTRÓPICA CONTROLA MUDANÇAS NO
VERDOR DA VEGETAÇÃO: UM NOVO PARADIGMA?**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de fevereiro de 2022

Assentimento:


Luís Flávio Pereira
Autor


Elpídio Inácio Fernandes Filho
Orientador

*Dedico aos meus pais,
Terezinha e Maurilo;
À minha irmã, Daniela; e
À minha avó, dona Neguinha.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos trabalhadores que financiaram meus estudos em instituições públicas e de qualidade, através de seu trabalho e produção de riqueza. Durante o mestrado, esse financiamento foi realizado via apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e em forma de bolsa de estudos, concedida por esse mesmo órgão.

A todos que contribuíram para a minha chegada até aqui. Em especial, a meus pais, irmã e professores.

Ao Ricardo, meu namorado e companheiro, que viveu intensamente as dores e alegrias desse processo ao meu lado, durante a pandemia de Covid-19. Sem você eu não teria conseguido.

Aos amigos queridos, é impossível nomear e distinguir a importância de cada um de vocês. Deixarei essa tarefa pra nossos encontros e despedidas!

À comunidade LGBTQIA+, especialmente aos que vieram antes de mim, e me abriram caminhos e espaços. Muitas vezes, ao custo da própria vida ou existência.

Aos meus orientadores, não só pela confiança, comprometimento e profissionalismo, mas pela parceria, humanidade e sensibilidade em relação às minhas limitações.

À Daniela Rodrigues, pelo companheirismo e apoio, e ao Silvio Bueno Pereira, meu finado orientador de graduação, pela primeira oportunidade em pesquisa, que me abriu tantas portas.

À banca e avaliadores, pelas valiosas contribuições.

À UFV, LabGeo, DPS, CNPq pelo apoio financeiro, material e humano.

E por fim, a todas as coisas reais e imaginárias que nos dão força para seguir em frente, sejam elas chamadas de Deus ou não.

Meu MUITO OBRIGADO!

*Nordeste é uma ficção
Nordeste nunca houve.*

(Conheço o Meu Lugar, Belchior)

RESUMO

PEREIRA, Luís Flávio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **A predisposição ambiental e antrópica controla mudanças no verdor da vegetação: um novo paradigma?**. Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Coorientadores: Guilherme de Castro Oliveira e Lucas Carvalho Gomes.

Processos de aumento (*greening*) e perda (*browning*) do verdor da vegetação relacionados a mudanças climáticas e antrópicas são processos bem documentados na literatura, mas o controle dos fatores de predisposição sobre a resposta das vegetações a essas mudanças foi pouco estudado, e aparenta ser especialmente importante em regiões antropizadas. O presente estudo teve como objetivo definir e mapear processos de *greening* e *browning*, bem como caracterizar e analisar a distribuição espacial e ambiental desses processos em regiões fortemente antropizadas. Para isso, o Semiárido Brasileiro foi usado como área modelo, e duas novas abordagens metodológicas foram apresentadas: metodologia *double proxy* e multicritério de mapeamento de mudanças consistentes do verdor, baseada em computação em nuvem e código aberto; e metodologia de desagregação ambiental de *greening* e *browning* baseada em variáveis-chave. Os resultados mostraram que apesar do predomínio de áreas com verdor estável no Semiárido Brasileiro, *browning* é mais frequente e intenso que *greening*, e parece estar relacionado a processos de desertificação sobre áreas nativas e antropizadas. A distribuição das mudanças de verdor é zonal e heterogênea, devido ao controle espacialmente escalonado por fatores de predisposição ambiental e antrópica. Fatores de predisposição ambiental, principalmente a aridez, controlam a distribuição regional das mudanças do verdor, enquanto a interação sociedade-ambiente regula a intensidade e distribuição espacial desses processos localmente. Esses resultados confirmam a necessidade de uma mudança de paradigma nos estudos de modelagem de *greening* e *browning*. Novos estudos deveriam considerar o uso simultâneo e equilibrado de preditores relacionados à predisposição e mudança. Também é evidente a necessidade de avanços na interpretabilidade desses modelos, tendo em vista que as abordagens atuais falham em elucidar os mecanismos de regulação das mudanças de verdor.

Palavras-chave: Greening. Browning. Semiárido Brasileiro. Google Earth Engine. Aridez. Desertificação.

ABSTRACT

PEREIRA, Luís Flávio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Environmental and anthropic predispositions control changes in vegetation greenness: a new paradigm?**. Advisor: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Co-advisors: Guilherme de Castro Oliveira and Lucas Carvalho Gomes.

Increases (greening) and losses (browning) of vegetation greenness related to climatic and anthropic changes are processes well documented in the literature, but the control exerted by factors of predisposition on the response of vegetation to these changes has been little studied, and appears to be especially important in anthropized regions. The present study aimed to define and map greening and browning processes, as well as to characterize and analyze the spatial and environmental distribution of these processes in heavily anthropized regions. For this, the Brazilian Semiarid region was used as a model area, and two new methodological approaches were presented: double proxy and multicriteria methodology for mapping consistent greening and browning, based on cloud computing and open source; and a methodology of environmental disaggregation of greening and browning based on key variables. The results showed that despite the predominance of areas with stable greenness in the Brazilian Semiarid, browning is more frequent and intense than greening, and seems to be related to desertification processes in native and anthropized areas. The distribution of greening and browning processes is zonal and heterogeneous, due to a spatially and scaled control by environmental and anthropic factors. Factors of environmental predisposition, mainly aridity, control the regional distribution of greenness changes, while the society-environment interaction locally regulates the intensity and spatial distribution of these processes. These results confirm the need for a paradigm shift in studies of greening and browning modeling. Further studies should consider the simultaneous and balanced use of predictor related to both predisposition and changes. The need for advances in the interpretability of these models is also evident, given that current approaches fail to elucidate the regulating mechanisms of greening and browning processes.

Keywords: Greening. Browning. Brazilian Semiarid. Google Earth Engine. Aridity. Desertification.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1	Área de estudo e variáveis ambientais	11
2.1.1	Uso da terra	12
2.1.2	Solos.....	13
2.1.3	Vegetação.....	13
2.2	Detecção e mapeamento de <i>greening</i> e <i>browning</i> no Google Earth Engine	14
2.2.1	Modelagem Harmônica	15
2.2.2	Teste de Mann-Kendall	18
2.2.3	Crerios para definição de processos consistentes de <i>greening</i> e <i>browning</i>	18
2.3	Distribuição espacial e desagregação ambiental de <i>greening</i> e <i>browning</i>	19
3	RESULTADOS	20
3.1	Análises harmônicas e de tendência.....	20
3.1	Distribuição espacial de <i>greening</i> e <i>browning</i> e suas taxas	21
3.1.1	Zonas de <i>greening</i>	22
3.1.2	Zonas de <i>browning</i>	23
3.2	Desagregação ambiental de <i>greening</i> e <i>browning</i> e suas taxas.....	24
3.2.1	Mata Atlântica	24
3.2.2	Caatinga.....	25
3.2.1	Cerrado	28
3.2.2	Ecótonos, Formações Pioneiras e Refúgios Vegetacionais Montanos	28
4	DISCUSSÃO	29
4.1	Abordagem de mapeamento e ajuste de modelos	30
4.2	Padrão espacial de processos e taxas.....	31
4.3	Ambiente como fator de controle.....	33
4.4	Antropização como fator de controle	34
4.5	Como podemos explicar <i>greening</i> e <i>browning</i> ?.....	35
4.6	Semiárido Brasileiro em risco	37
5	CONCLUSÕES	38
	REFERÊNCIAS	39
	APÊNDICES.....	44

1 INTRODUÇÃO

Mudanças de verdor da vegetação e sua relação com mudanças climáticas e antrópicas são processos bem documentados na literatura, mas o controle dos fatores de predisposição sobre a resposta das vegetações a essas mudanças foi pouco estudado. Nas últimas décadas, tecnologias de monitoramento por satélite permitiram a construção de séries temporais espacializadas de índices de vegetação para monitoramento da vegetação global. Desde então, estudos mostram a existência concorrente de tendências de aumento e redução do verdor da vegetação, em diferentes escalas (FENSHOLT et al., 2012; ZHU et al., 2016; TIAN et al., 2017; LIU et al., 2020). O processo de aumento anual ou sazonal e estatisticamente significativo do verdor é denominado “*greening*”, e pode estar associado a diferentes fenômenos de mudanças na vegetação, como, por exemplo, nas variáveis tamanho médio das folhas, número de folhas por planta, densidade de plantas, composição de espécies, duração da presença de folhas verdes, e número de safras cultivadas por ano. O processo contrário, onde há perda de verdor, é chamado “*browning*”, que pode estar relacionado aos fenômenos opostos aos causadores de *greening*, e está intrinsecamente ligado a processos de desertificação, principalmente em regiões semiáridas (ZHU et al., 2016; PIAO et al., 2020).

Devido à diversidade abarcada por esses conceitos, se faz necessário delimitar uma abordagem consistente para definir o que se considera *greening/browning*, bem como são recomendadas análises *multi-proxy* e multicritério no mapeamento desses processos (CORTÉS et al., 2021). Além disso, o grande volume de dados requeridos por essas análises exige elevado poder computacional para armazenamento e processamento de séries temporais de imagens, o que demanda cada vez mais o uso de técnicas de computação em nuvem (GORELICK et al., 2017).

Processos de *greening* são globalmente mais frequentes que os de *browning*, ocorrendo mesmo em regiões de clima seco, comumente afetadas por processos severos de desertificação (ADEEL et al., 2005; PIAO et al., 2020). Para essas áreas, os ganhos de verdor ocorrem principalmente via mudanças na biomassa vegetal, seja em termos de biomassa lenhosa ou fotossinteticamente ativa (TIAN et al., 2017). A divergência de áreas para ganho ou perda de verdor, globalmente, está relacionada a mudanças climáticas e ambientais, principalmente alterações nos padrões de precipitação, temperatura e enriquecimento de CO₂ na atmosfera (ZHU et al., 2016; PIAO et al., 2020). Entretanto, em escalas regionais, a espacialidade da ocorrência e intensidade desses fenômenos é pouco explicável a partir desses fatores de mudança, principalmente em regiões fortemente antropizadas (FENSHOLT et al., 2012; ZHU

et al., 2016; PIAO et al., 2020). Nessas áreas, efeitos interativos entre mudanças antropogênicas e propriedades de sítio (como pedológicas, biológicas, bioclimáticas e topográficas) são hipotetizados como os principais reguladores da ocorrência e intensidade dos processos de *greening* e *browning* (FENSHOLT et al., 2012; ZHU et al., 2016; TIAN et al., 2017, GEMITZI et al., 2019; GICHENJE et al., 2019; LIU et al., 2020; PIAO et al., 2020; XU et al., 2020). Esses estudos têm sistematicamente falhado em elucidar os mecanismos indutores de processos de *greening* e *browning*, ou mesmo apontar fatores específicos relacionados à predisposição antrópica e ambiental ao longo de diferentes usos da terra.

Apesar da separação conceitual de efeitos ambientais e antrópicos nos processos de mudança do verdor, sua mensuração prática é complexa, porque a interferência antrópica expressa pela colonização, manejo e abandono terras é fortemente influenciada pelas características ambientais, bem como tende a alterá-las no tempo e espaço (RESENDE et al., 2014; RITO et al., 2017; PEREIRA et al., 2018; DE LEMOS et al., 2020). Por conta disso, estudos de processos e taxas de *greening* e *browning* a partir de abordagens multifatoriais, interativas e desagregativas em relação à tipo de fator condicionante e usos da terra em regiões fortemente antropizadas são de grande importância, porém escassos e pouco elucidativos (GEMITZI et al., 2019; GICHENJE et al., 2019). Na análise de processos socioambientais, solos e vegetação são excelentes estratificadores de ambientes, servindo como variáveis-chave sintéticas que permitem elevado grau de interpretação das potencialidades, limitações e interações entre sociedade e natureza em uma região (RESENDE et al., 2014; PEREIRA et al., 2018). Essa capacidade de estratificação é derivada principalmente do papel central da interação pedosfera-biosfera nas trocas de matéria e energia entre os demais componentes da zona crítica terrestre (CHOROVER et al., 2007).

Assim sendo, o presente estudo teve como objetivo definir e mapear processos de *greening* e *browning* usando computação em nuvem, bem como caracterizar e analisar a distribuição espacial e ambiental desses processos em regiões fortemente afetadas por antropização. Para esses fins, novas abordagens de mapeamento e desagregação ambiental foram apresentadas. Essas análises permitiram identificar fatores relacionados à predisposição ambiental e antrópica na regulação de *greening* e *browning*, gerando *insights* sobre a necessidade de uma mudança de paradigma nos estudos e modelagens de mudanças do verdor da vegetação. A área de estudo selecionada foi o Semiárido Brasileiro, devido à sua diversidade geoambiental, socioeconômica e de processos antrópicos, sendo reconhecida como a área seca mais densamente habitada do mundo (CUNHA et al., 2015; SANTOS et al., 2020).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para responder aos objetivos do estudo, dados de diferentes fontes foram compilados, processados e reanalisados, a fim de produzir mapas de unidades ambientais homogêneas (seção 2.1) e áreas de ocorrência e taxas consistentes de mudanças do verdor (seção 2.2). Esses dois produtos foram espacialmente comparados, gerando estatísticas de desagregação ambiental que permitiram analisar o papel da predisposição ambiental e antrópica na regulação de processos de *greening* e *browning* (seção 2.3).

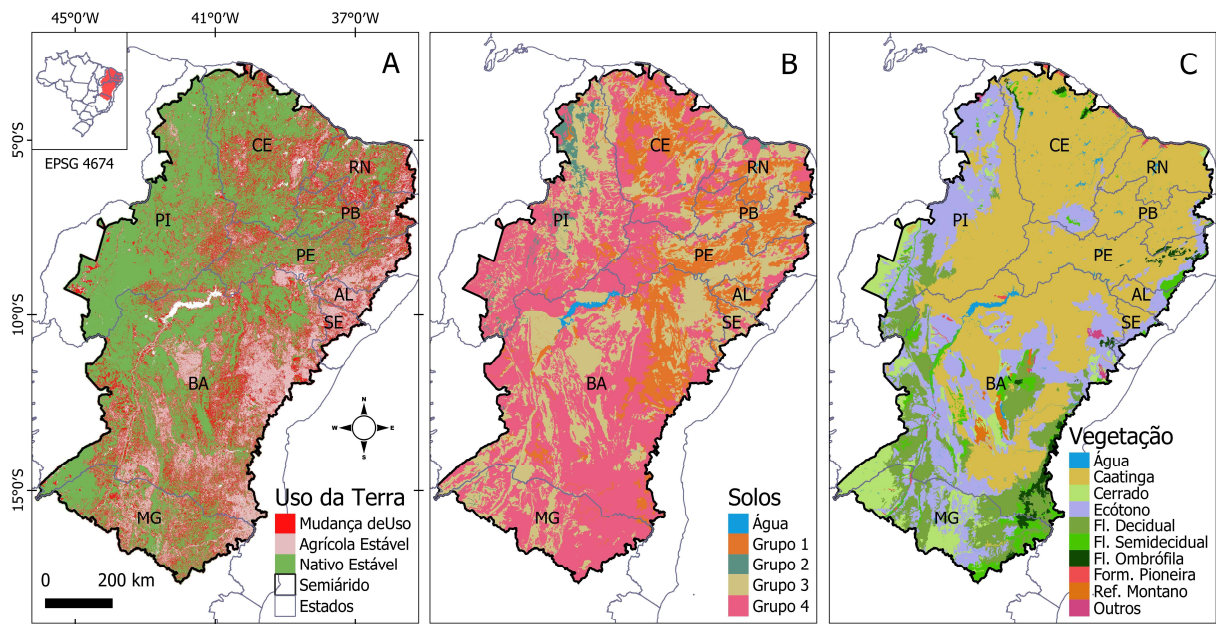
2.1 Área de estudo e variáveis ambientais

Área de estudo adotada foi a delimitação do Semiárido Brasileiro, segundo critérios fisiográficos, definidos conforme as resoluções do Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, nº 107, de 27/07/2017 e de nº 115, de 23/11/2017, sendo eles (I) Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; (II) Índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; e (III) Percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. A delimitação adotada no estudo foi a de 2014, Devido à maior estabilidade dentro da série temporal 2000-2021 (sessão 2.2), boa abrangência espacial e maior disponibilidade de dados legados (Figura 1).

O Semiárido Brasileiro é uma área de interesse global, sendo peça chave nos estudos de mudanças do verdor em regiões antropizadas devido à sua posição como área seca mais densamente habitada do mundo (CUNHA et al., 2015; SANTOS et al., 2020). É uma região ambiental e socialmente complexa, em que o processo histórico de retirada da cobertura vegetal, associado às fragilidades múltiplas derivadas das complexas interações sociedade-natureza, resultou em processos de desertificação e colapso ambiental em diversas áreas (DE LEMOS et al., 2020).

Com o objetivo de caracterizar a geodiversidade e promover a desagregação ambiental de processos de *greening* e *browning*, foram organizados mapas temáticos de uso da terra, solos e vegetação nativa do Semiárido Brasileiro. Essas variáveis são excelentes estratificadores ambientais, servindo como variáveis-chave sintéticas que permitem elevado grau de interpretação das potencialidades, limitações e interações entre sociedade e natureza em uma região (RESENDE et al., 2014; PEREIRA et al., 2018). Para uma análise mais assertiva, simplificada e elucidativa, esses dados foram reclassificados e organizados conforme os critérios apresentados a seguir.

Figura 1. Localização do Semiárido Brasileiro em sua delimitação de 2014, bem como usos da terra (A), grupos de solos (B) e vegetação da região (C).



Fonte: O autor.

2.1.1 Uso da terra

Os usos da terra foram derivados da coleção 5 do Mapbiomas (<https://mapbiomas.org/>). Esses mapas foram obtidos em resolução espacial de 30 m e temporal de um ano, em uma série temporal de 20 anos (2000-2019) (SOUZA et al., 2020). As classes foram reagrupadas em vegetação nativa, uso agrícola e outros usos, conforme a Tabela 1. Após a reclassificação, os mapas foram comparados pixel a pixel e reamostrados segundo a moda, para obtenção de um mapa de 500 m de resolução, com 3 classes: vegetação nativa estável (apenas vegetação nativa durante os 20 anos da série); uso agrícola estável (apenas usos agrícolas); e Mudança/Instabilidade de uso (pelo menos uma observação com uso distinto dos demais) (Figura 1A). O código fonte para essa análise está disponível em: <https://code.earthengine.google.com/9382a396498b9e60acef183e659baa49>.

Tabela 1. Tabela de reclassificação dos mapas de uso da terra, considerando a legenda da coleção 5 do Mapbiomas (<https://mapbiomas.org/codigos-de-legenda>).

Vegetação Nativa	Uso Agrícola	Outros Usos
3 - Formação Florestal	9 - Floresta Plantada	23 - Praia e Duna
4 - Formação Savânica	15 - Pastagem	24 - Infraestrutura Urbana
5 - Mangue	20 - Cana	25 - Outras Áreas não Vegetadas
11 - Campo Alagado e Área Pantanosa	21 - Mosaico de Agricultura e Pastagem	27 - Não Observado
12 - Formação Campestre	36 - Lavoura Perene	30 - Mineração
13 - Outras Formações não Florestais	39 - Soja	31 - Aquicultura
29 - Afloramento Rochoso	41 - Outras Lavouras Temporárias	33 - Rio, Lago e Oceano
32 - Apicum		

2.1.2 Solos

As ordens de solos presentes no Semiárido Brasileiro foram obtidas na base cartográfica 1:250.000, versão 2018, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Mesmo nessa escala, a região apresenta elevada pedodiversidade, tendo em vista a ocorrência de 12 das 13 ordens de solos presentes nos Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Tabela 2). As ordens de solos foram agrupadas em quatro grupos, considerando sua gênese e propriedades que influenciam seu manejo e comportamento ambiental, conforme Macedo et al. (2021) e Vieira et al. (2015) (Tabela 2). Solos intensivamente agricultáveis são os mais disseminados, enquanto solos afetados por umidade e hidromorfismo possuem a distribuição mais limitada (Figura 1B).

2.1.3 Vegetação

Os mapas de vegetações foram obtidos por Oliveira (2020), via agrupamento de fitofisionomias e dados descritivos oriundos dos levantamentos realizados pelo projeto RADAMBRASIL (1:1.000.000), e são apresentados na Figura 1C. Devido aos problemas clássicos de classificação de fitofisionomias no Semiárido Brasileiro (OLIVEIRA, 2020), optou-se por agrupar vegetações a nível de bioma, para caatingas e cerrados, e a nível de fitofisionomia, para vegetações do bioma Mata Atlântica (florestas ombrófilas, estacionais semidecíduais e decíduais). Na região, a Mata Atlântica ainda passa por processos agudos de desmatamento e conversões de uso da terra, especialmente em ecótonos entre florestas decíduais e caatingas (Figura 1A e C) (OLIVEIRA, 2020; SANTOS et al., 2020). Esse processo é resultante de boas condições de relevo e fertilidade do solo para expansão agrícola (ARRUDA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019), associadas à falta de políticas eficientes de proteção de

áreas nativas (OLIVEIRA, 2020). Ecótonos foram agrupados em uma classe homogênea, carregando toda a variabilidade e incertezas em relação às vegetações transicionais.

Tabela 2. Grupos de solos presentes no Semiárido Brasileiro, considerando processos pedogenéticos e o manejo de solos no Semiárido Brasileiro.

Agrupamento	Ordens	Descrição
Grupo 1	Luvissolos	Solos afetados por aridez. Processos de formação dos solos, associados ao manejo adotado, levam a problemas físicos e/ou químicos.
	Planossolos	
	Vertissolos	
Grupo 2	Gleissolos	Solos afetados por umidade e/ou hidromorfismo. A alta disponibilidade hídrica contrasta com os fatores limitantes de desenvolvimento da vegetação em regiões semiáridas.
	Organossolos	
	Plintossolos	
Grupo 3	Neossolos	Solos incipientes. A formação incipiente de horizontes e estrutura levam a um grupo de comportamento diverso e heterogêneo.
	Cambissolos	
	Afloramentos Rochosos	
Grupo 4	Argissolos	Solos intensivamente agricultáveis. Solos bem desenvolvidos, com alto potencial de uso agrícola e risco de degradação relativamente baixo.
	Chernossolos	
	Latosolos	
	Nitossolos	

O Semiárido Brasileiro é predominantemente ocupado por caatingas, cerrados e formações da Mata Atlântica, vegetações cuja distribuição é fortemente regulada pela variação climática e pedológica, principalmente associada ao efeito do gradiente de aridez (ARRUDA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019, OLIVEIRA et al., 2021). Por conta disso, vegetações e solos também foram caracterizados e ordenados quanto a esse fator. A aridez foi representada pela razão entre a temperatura média anual (BIO1) e a precipitação anual (BIO12), usando dados *raster* do WorldClim 2.1 na resolução de 2,5 minutos (FICK; HIJMANS, 2017). Quanto maior a razão entre temperatura e precipitação, maior a aridez. Os dados foram cruzados com o mapa de vegetação e solos do Semiárido Brasileiro (Figura 1) para o cálculo de estatísticas descritivas e ordenamento de solos e vegetações, apresentadas no Anexo 1.

2.2 Detecção e mapeamento de *greening* e *browning* no Google Earth Engine

O mapeamento da ocorrência e intensidade de processos de *greening* e *browning* foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE). O GEE é uma plataforma para computação em nuvem desenvolvida com foco em análise geoespacial em escala planetária. Essa plataforma usa recursos computacionais da Google para lidar com grandes coleções de dados que permitem análises de alto impacto, como avaliação de processos de desmatamento,

secas, desastres naturais, doenças, análises de segurança alimentar e nutricional, gerenciamento de água, monitoramento climático e proteção e planejamento ambiental. É uma plataforma integrada, projetada para democratização da utilização de supercomputadores por usuários pouco habituados a técnicas requeridas por recursos tradicionais de computação em nuvem em grande escala (GORELICK et al., 2017).

Para detecção de mudanças no verdor da vegetação, foram usados os índices de vegetação NDVI e EVI, disponíveis na coleção de dados do produto MODIS MOD13A1 V006. Esse produto consiste em dados de reflectância de superfície mascarados para água, nuvens, sombras de nuvem e aerossóis, com resolução espacial de 500 m e temporal de 16 dias obtidos pelos sensores *Moderate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites Terra e *Aqua* (DIDAN, 2015). Os dados também foram filtrados para remoção de pixels de qualidade baixa ou marginal, utilizando-se a máscara *SummaryQA* para seleção de pixels classificados como de alta confiabilidade. Foram utilizados dados de fevereiro de 2000 a dezembro de 2020 (21 anos), sendo essas séries temporais analisadas pixel a pixel por 2 abordagens distintas: modelagens harmônicas de primeira ordem e testes de Mann-Kendall (MK).

As modelagens harmônicas de primeira ordem foram usadas para remover a sazonalidade das séries, estimar as taxas anuais de mudança do verdor e selecionar o índice de vegetação com melhor ajustes de modelo. Os testes de MK, por sua vez, foram usados para extrair apenas pixels com tendência significativa de mudança monótona, isto é, com presença de *greening* ou *browning* predominantes para toda a série. A partir dos resultados obtidos, foram definidos critérios para consistência de processos de *greening* e *browning* remotamente detectados.

2.2.1 Modelagem Harmônica

Segundo a abordagem de Shumway e Stoffer (2017), a variação sazonal de um índice de vegetação ao longo do ano, em uma região com uma estação principal de enverdecimento e uma estação de perda de verdor, pode ser modelada como uma série harmônica de primeira ordem (Equação 1).

$$IV_t = \beta_0 + \beta_1 t + A \cos(2\pi\omega t - \varphi) + e_t \quad (1)$$

em que: IV_t é o índice de vegetação no tempo t ; β_0 é o coeficiente linear do termo linear da série; β_1 é o coeficiente angular do termo linear da série; t é o dia juliano; A é a amplitude do termo sazonal, que pode ser expressa a partir de dois coeficientes: $(\beta_2^2 + \beta_3^2)^{1/2}$; φ é a fase do

componente sazonal, expressa também a partir de dois coeficientes: $\text{atan}(\beta_3/\beta_2)$; ω é a frequência angular do componente sazonal; e e_t é o erro do modelo no tempo t .

Segundo os mesmos autores, identidades trigonométricas podem ser usadas para linearizar essa equação, obtendo-se a relação apresentada na Equação 2 e Figura 2:

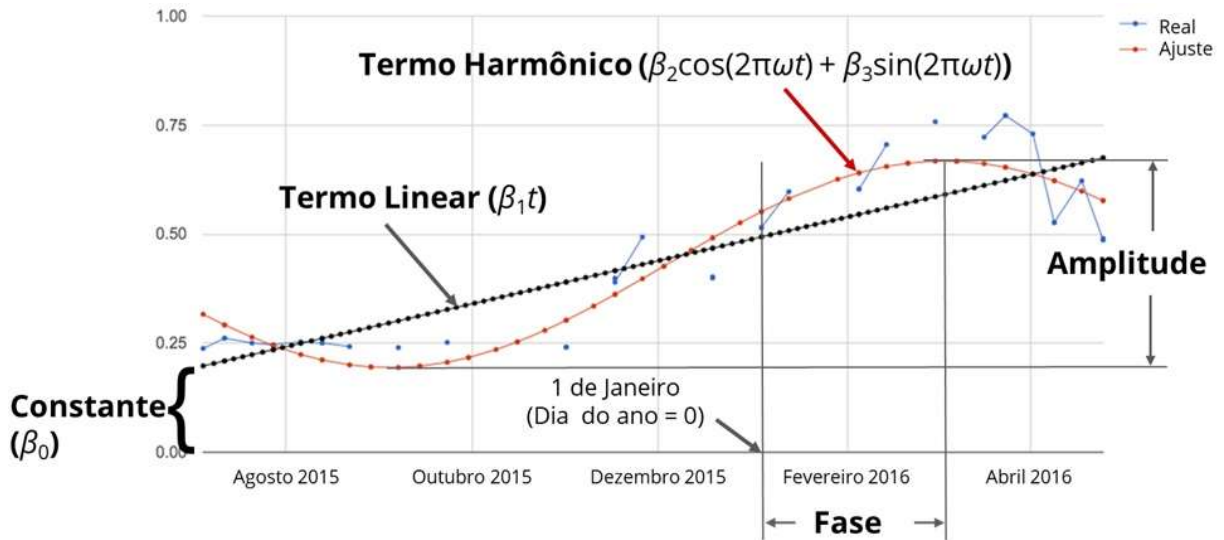
$$IV_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 \cos(2\pi\omega t) + \beta_3 \sin(2\pi\omega t) + e_t \quad (2)$$

em que: β_2 e β_3 são os coeficientes dos termos harmônicos da série.

Como as variáveis t e ω são conhecidas ou calculáveis a partir das datas e metadados das imagens, foi possível usar um modelo linear para estimar os coeficientes da equação, modelando-se a série pixel a pixel. Obteve-se uma camada raster contendo os coeficientes β_1 associado ao termo linear do modelo, que corresponde à taxa média anual de mudança do verdor ao longo das séries completas de NDVI e EVI. A implementação da rotina no GEE baseou-se na abordagem apresentada por Clinton (2017), adaptando-se a *demo* “MODIS Harmonic Modeling” (disponível em <https://code.earthengine.google.com/>). Para fins de validação dos modelos, a *demo* foi incrementada com a aplicação de testes de significância de ajuste dos modelos, bem como cálculo de métricas de qualidade do ajuste para seleção do índice de vegetação mais adequado à representação da sazonalidade.

O modelo linear usado para estimativa dos coeficientes foi ajustado aplicando-se uma regressão linear de cume através da função `ee.Reducer.ridgeRegression()`, mantendo-se o hiperparâmetro $\lambda = 0$, o que corresponde a uma regressão linear baseada em mínimos quadrados ordinários. A função `ee.Reducer.ridgeRegression()` foi escolhida para a análise de regressão por ser a única opção disponível no GEE que retorna uma camada *raster* de significância do modelo ajustado para cada pixel, usando um teste F para cálculo dos valores de probabilidade. Além do teste de significância, foram calculadas métricas de avaliação do ajuste dos modelos, que consistiram no Coeficiente de Determinação (R^2 – Equação 3), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE – Equação 4), e Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizada pela Média (nRMSE – Equação 5).

Figura 2. Representação gráfica dos termos linear e harmônico de um modelo harmônico de primeira ordem. O gráfico mostra dados NDVI para um pixel entre julho de 2015 e abril de 2016 (Real) e os valores preditos pelo modelo harmônico ajustado para esse período (Ajuste).



Fonte: Adaptado de Clinton (2017)

O Coeficiente de Determinação pode ser interpretado como a proporção da variância na variável dependente passível de predição pelo conjunto de variáveis independentes. O melhor valor corresponde a 1, quando os desvios são nulos, e o pior valor equivale a $-\infty$, em que os desvios são infinitamente maiores que a soma total de quadrados (CHICCO et al., 2021; WRIGHT, 1921). O RMSE é uma medida da magnitude dos erros do modelo, penalizando modelos com desvios mais extremos. Por sua vez, o nRMSE mede a proporção dos desvios em relação ao valor médio dos dados observados, o que permite a comparação de qualidade do ajuste de modelos considerando conjuntos de dados de magnitude distintas.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^m (\bar{Y} - Y_i)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2} \quad (4)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (5)$$

em que m é o número de observações, X_i são os valores preditos, Y_i são os valores observados e $\bar{Y}$ é a média dos valores observados.

Exemplos de séries temporais e seus modelos ajustados considerando diferentes cenários de qualidade de ajuste são apresentados no Apêndice B. O código fonte para estas análises no GEE pode ser integralmente visualizado e reproduzido em: <https://code.earthengine.google.com/c85520cdd8bb27fe8eb30acf06933cf4>.

2.2.2 Teste de Mann-Kendall

Tendo em vista que a modelagem harmônica no GEE permite apenas a avaliação do ajuste geral dos modelos, um teste de Mann-Kendall foi realizado para a seleção de pixels com tendência significativa ($p < 0,05$) de mudança da biomassa da vegetação. Esse teste, complementar à análise harmônica, foi escolhido por permitir a detecção de qualquer tendência monótona em séries temporais, além de ser não-paramétrico, dispensando pressupostos estatísticos (MORELL, FRIED, 2009). A abordagem utilizada para aplicação do teste no GEE foi uma adaptação da apresentada por Clinton (2020), e retorna duas camadas raster: p-valores do teste, para extração de pixels com tendência significante; e Coeficientes de Correlação Tau de Kendall (Tau). O Tau varia de -1 (correlação negativa perfeita com o tempo) a 1 (correlação positiva perfeita), e seu sinal negativo ou positivo pode ser comparado com o sinal das taxas de mudança modeladas via análise harmônica, para fins de análise de consistência. O código fonte dessa análise pode ser integralmente visualizado e reproduzido em: <https://code.earthengine.google.com/b10a84109d2879a2da1194657d8ed83a>.

2.2.3 Critérios para definição de processos consistentes de *greening* e *browning*

Devido à diversidade de processos e fenômenos abarcados pelos conceitos de *greening* e *browning*, é necessário defini-los de forma explícita, bem como combinar diferentes indicadores estatísticos para a detecção de processos consistentes (CORTÉS et al., 2021). Nesse estudo, *greening* e *browning* são definidos como processos de mudança do verdor da vegetação a longo prazo, detectáveis pela análise de séries temporais de índices de vegetação. Operacionalmente, para a definição de processos consistentes de *greening* e *browning*, foi proposta uma abordagem *double-proxy* (NDVI e EVI) e multicritério. Os critérios adotados

foram sumarizados em 4 regras, usadas para definição do que são áreas com processos consistentes de *greening/browning* no Semiárido Brasileiro:

- Ser um pixel correspondente à vegetação, segundo os mapas de uso da terra (Figura 1);
- Apresentar resultado significativo ($p < 0,05$) simultaneamente para EVI e NDVI, no teste de Mann-Kendall;
- Apresentar ajuste significativo ($p < 0,05$) e $0 \leq \text{nRMSE} < 100\%$ no modelo harmônico para EVI e NDVI, simultaneamente; e
- Os sinais dos testes de Mann-Kendall e da taxa de mudança da modelagem harmônica foram iguais entre si e entre índices, apontando consistentemente o mesmo processo (*greening* ou *browning*).

Pixels que não atenderam a esses critérios foram considerados sem processos consistentes, com mudança consistente indetectável ou, em outras palavras, verdor estável. O critério referente ao intervalo de nRMSE de 0 a 100 serve como filtro adicional para remover pixels com ajuste sazonal, mas fortemente influenciados por áreas não vegetadas ou frequentemente cobertas por nuvens, como as bordas de corpos hídricos e regiões muito nebulosas. A aplicação desses critérios sobre as camadas *raster* obtidas no GEE foi realizada utilizando-se o software QGIS versão 3.16.6 – Hannover.

2.3 Distribuição espacial e desagregação ambiental de *greening* e *browning*

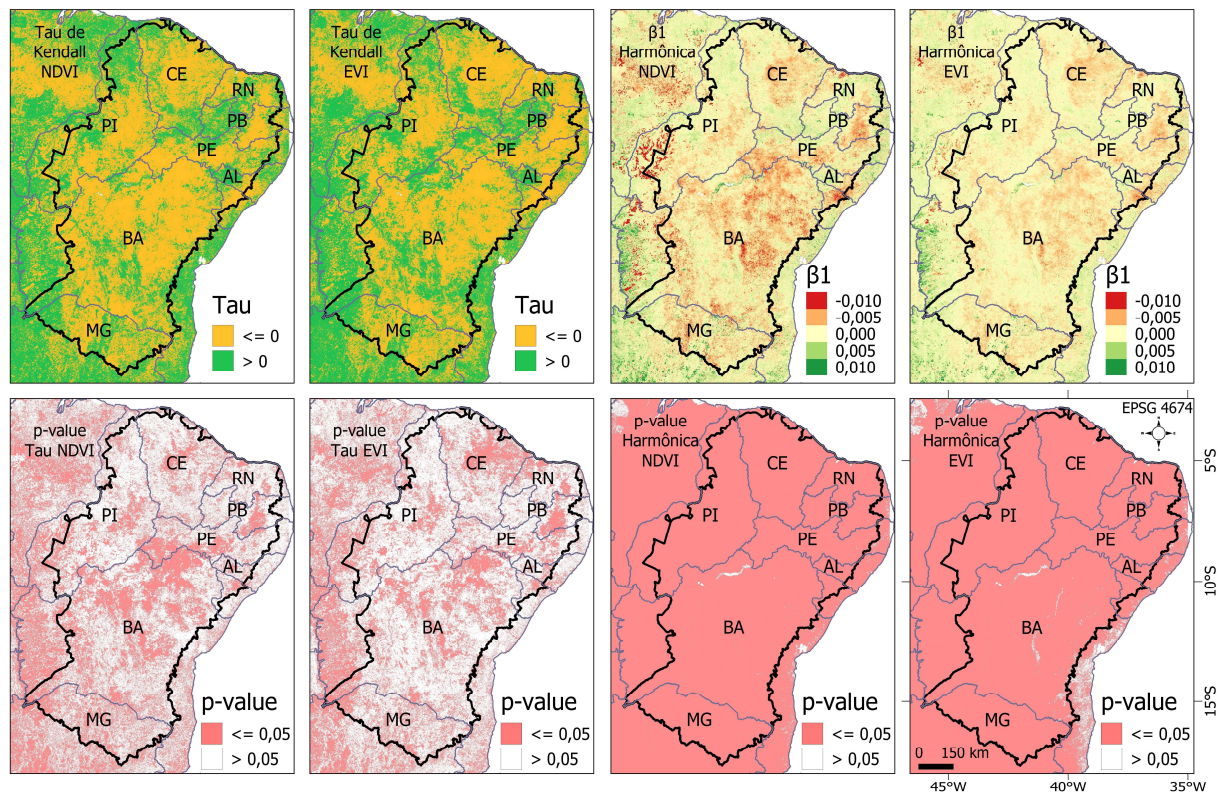
Os mapas de processos e taxas consistentes de mudança do verdor foram analisados espacialmente e ambientalmente. A análise espacial foi realizada por interpretação visual dos mapas, identificando-se zonas homogêneas para ocorrência de cada processo. A análise ambiental foi realizada através da desagregação espacial considerando unidades ambientais homogêneas quanto ao uso da terra, grupo de solos e vegetação original. Para isso, os mapas dessas três variáveis ambientais (Figura 1) foram cruzados entre si e com os mapas de processos e taxas de mudança do verdor, calculando-se a frequência e distribuição de processos e taxas para cada unidade ambiental distinta. Esse procedimento foi realizado utilizando-se o software R (R Core Team, 2021) e seus pacotes *terra* (HIJMANS, 2021), *dplyr* (WICKHAM et al., 2021) e *ggplot2* (WICKHAM, 2016).

3 RESULTADOS

3.1 Análises harmônicas e de tendência

Os resultados do teste de MK e da análise harmônica, para NDVI e EVI, mostram elevada equivalência espacial na distribuição de *greening* e *browning*, mas grandes diferenças nas taxas de mudança (Figura 3). Taxas calculadas via NDVI apresentam em geral maior módulo do que aquelas derivadas do EVI. Os modelos harmônicos apresentaram ajuste significativo para quase todo o semiárido, mostrando que a sazonalidade do verdor da vegetação pode ser representada por modelos harmônicos de primeira ordem. No entanto, há um padrão em mosaico para a significância das tendências nas séries temporais, de acordo com o teste de MK, indicando a estabilidade do verdor em grande parte do Semiárido Brasileiro.

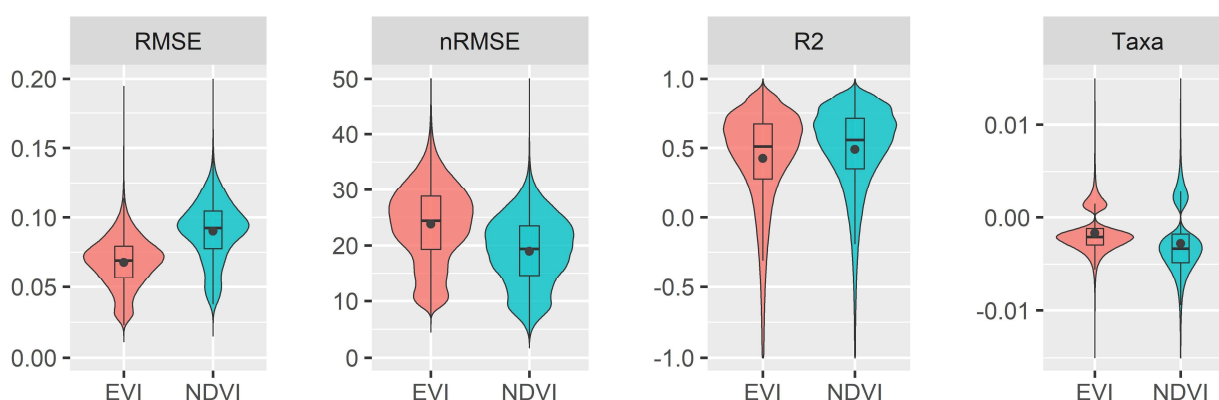
Figura 3. Outputs dos testes de Mann-Kendall e modelagens harmônicas do verdor da vegetação usando EVI e NDVI no Semiárido Brasileiro. Tau > 0 indica *greening*, Tau < 0 indica *browning*, e as taxas (β_1) são expressas em unidades de NDVI ano⁻¹.



Fonte: O autor.

Ambos NDVI e EVI apresentaram desempenho satisfatório na modelagem harmônica no verdor da vegetação. O desempenho dos modelos usando NDVI foi ligeiramente superior em termos de nRMSE e R^2 , sendo apenas os valores de RMSE superiores aos dos modelos usando EVI. As taxas calculadas usando NDVI apresentam maior amplitude de variação, representando mais detalhadamente a diferenciação da intensidade de processos de *greening* e *browning* (Figuras 3 e 4). Assim sendo, o NDVI foi escolhido para o cálculo das taxas de mudança do verdor da vegetação segundo o termo linear dos modelos harmônicos. Complementarmente, a distribuição espacial das métricas de validação dos modelos harmônicos pode ser observada no Apêndice C.

Figura 4. Distribuição estatística das taxas de *greening* e *browning* derivadas de modelos harmônicos considerando EVI e NDVI, bem como métricas de validação dos respectivos modelos. Os valores são referentes apenas às áreas com processos consistentes, apresentadas na seção 3.2.



Fonte: O autor.

3.1 Distribuição espacial de *greening* e *browning* e suas taxas

Aplicando-se os critérios descritos na seção 2.3 sobre os resultados apresentados na seção 3.1 e Apêndice C, foi possível delimitar áreas com processos consistentes de *greening* e *browning*, bem como suas taxas (Figura 5). Os resultados mostram que para o Semiárido Brasileiro há predominância de vegetação com verdor estável (72%), seguidas por aquelas com perda (22,5%) e ganho (5,5%) de verdor, respectivamente. As taxas de *greening* e *browning* calculadas através do termo linear dos modelos harmônicos de NDVI variaram de -0.040 a 0.037, com uma concentração de valores na faixa de -0,01 a 0,005 e mediana de -0.0034 unidades de NDVI ano⁻¹ (Figura 4). Considerando essa taxa mediana de perda de verdor, o

Semiárido Brasileiro perdeu 0.071 unidades de NDVI nos últimos 21 anos, o que corresponde 7,1% do verdor máximo possível em uma vegetação ($NDVI = 1$). Assim sendo, as taxas de *browning* são mais frequentes e elevadas do que de *greening*, indicando que processos de perda do verdor têm se desenvolvido de forma mais intensificada no Semiárido Brasileiro.

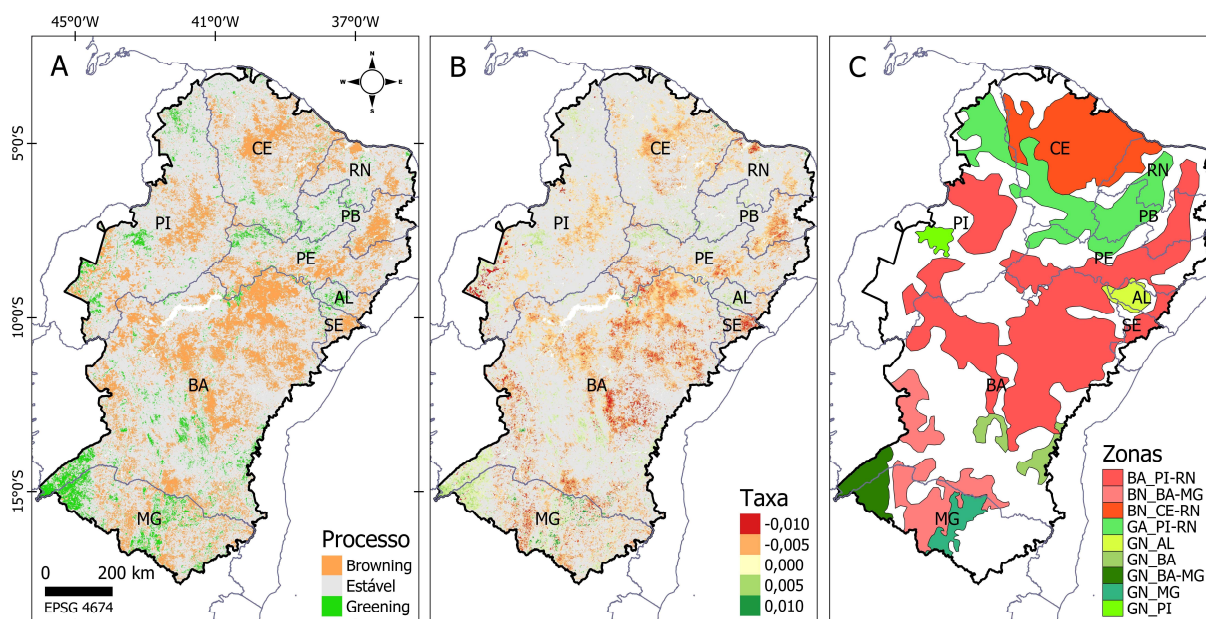
A distribuição espacial dos processos consistentes de mudança do verdor ocorre de forma agregada, em zonas espaciais bem definidas (Figura 5). Espacialmente, é possível definir 6 principais zonas de *greening* e 3 grandes zonas de *browning* no Semiárido Brasileiro, que ocupam cerca de 57% do Semiárido Brasileiro. Essas zonas são apresentadas e descritas nas seções 3.2.1 e 3.2.2. As zonas de *greening* e *browning* são imersas, e, portanto, delimitadas por uma matriz de áreas sem mudanças consistentes no verdor, ou sem predominância de determinado processo, apresentando comportamento espacialmente heterogêneo. Essas áreas se distribuem por quase 445.000 km², correspondendo a aproximadamente 43% do Semiárido Brasileiro.

3.1.1 Zonas de *greening*

As zonas espaciais de *greening* encontradas no Semiárido Brasileiro, apresentadas na Figura 5, podem ser assim definidas:

- **Greening arco PI-RN (GA_PI-RN):** estende-se do centro-sul do Rio grande do Norte (RN) até o norte do Piauí (PI), formando um grande arco que se alonga pelo oeste da Paraíba (PB) norte de Pernambuco (PE) e sul/sudoeste do Ceará (CE). Esse arco é composto uma faixa de áreas com verdor estável, povoadas por uma desidade variável de manchas de *greening*, e escassas e pequenas manchas de *browning*. Ocupa aproximadamente 9,1% do Semiárido Brasileiro (94.400 km²).
- **Greening núcleo AL (GN_AL):** pequeno núcleo que compreende o extremo norte de Sergipe (SE) e o centro-oeste de Alagoas (AL). É uma inclusão densa de machas de *greening* em uma matriz de estabilidade do verdor. Ocupa aproximadamente 0,9% do Semiárido Brasileiro (9.400 km²).
- **Greening núcleo BA (GN_BA):** núcleo de tamanho médio, composto por manchas do leste ao centro da Bahia (BA). Possui uma matriz de estabilidade ocupada por manchas de *greening* em diferentes tamanhos. Ocupa aproximadamente 1,4% do Semiárido Brasileiro (14.000 km²).

Figura 5. Áreas com processos consistentes de *greening* e *browning* (A) e suas respectivas taxas (B) e zonas (C) no Semiárido Brasileiro.



Fonte: O autor.

- **Greening núcleo BA-MG (GN_BA-MG):** núcleo de tamanho médio, localizado no extremo oeste da BA e norte de Minas Gerais (MG). É um núcleo muito denso, quase que inteiramente composto por *greening*. Ocupa aproximadamente 2% do Semiárido Brasileiro (21.000 km²).
- **Greening núcleo MG (GN_MG):** de tamanho médio, estende-se de forma alongada na porção central do norte de MG. É formado por uma matriz de estabilidade densamente povoada por manchas de *greening*, que apresentam as maiores taxas de mudança observadas. Apresenta também pequenas manchas de *browning*. Ocupa aproximadamente 1,4% do Semiárido Brasileiro (14.400 km²).
- **Greening núcleo PI (GN_PI):** pequeno núcleo na porção central do PI, formado por uma única grande mancha de *greening* isolada por uma matriz de estabilidade. Ocupa aproximadamente 0,6% do Semiárido Brasileiro (6.400 km²).

3.1.2 Zonas de *browning*

As zonas espaciais de *browning* encontradas no Semiárido Brasileiro, apresentadas na Figura 5, podem ser assim definidas:

- **Browning arco PI-RN (BA_PI-RN):** forma um arco que estende-se do PI ao RN, espalhando-se pelo centro e noroeste da BA. Esse arco é formado por grandes manchas de *browning* imerdas em uma matriz de estabilidade, e concentra grande parte das maiores taxas de *browning* observadas. Ocupa aproximadamente 27,1% do Semiárido Brasileiro (281.000 km²).
- **Browning núcleo BA-MG (BN_BA-MG):** formado por manchas que estendem-se do norte de MG ao meio-oeste da BA, é composto por uma matriz de estabilidade salpicada de manchas de *browning* com diferentes tamanhos e taxas. Ocupa aproximadamente 5,7% do Semiárido Brasileiro (59.000 km²).
- **Browning núcleo CE-RN (BN_CE-RN):** delimitado pelo Greening arco RN-PI, compreende o centro-nordeste do CE e o noroeste do RN. Esse núcleo é composto por grandes a pequenas e numerosas manchas de *browning* cercadas por manchas de estabilidade do verdor. Há apenas escassas e pequenas manchas de *greening*. Ocupa aproximadamente 8,8% do Semiárido Brasileiro (92.000 km²).

3.2 Desagregação ambiental de *greening* e *browning* e suas taxas

A desagregação ambiental mostrou que áreas sem processos consistentes dominam em todas as unidades ambientais, com exceção de duas unidades: áreas nativas do bioma Cerrado sobre solos afetados por hidromorfismo (grupo 2) onde há dominância de *greening*; e em áreas agrícolas de formações pioneiras também sobre solos afetados por hidromorfismo, onde há larga dominância de *browning* (Figura 6). Unidades relacionadas a mudanças de uso da terra tendem a apresentar maiores de taxas de mudança do verdor, independentemente da vegetação e solo (Figura 7).

3.2.1 Mata Atlântica

De forma geral, *browning* é mais frequente que *greening* em formações florestais associadas ao bioma Mata Atlântica (florestas ombrófilas, estacionais semidecíduais e decíduais) (Figura 6). Entretanto há diferenças na desagregação espacial de processos e taxas de mudança do verdor entre as fitofisionomias observadas.

Florestas estacionais decíduais são as mais afetadas por mudanças de verdor, especialmente por *browning*. Esse processo é largamente prevalecente sobre *greening*, com alta abrangência espacial (até 37,5%) em unidades antropizadas que possuem solos incipientes (grupo 3) ou

amplamente agricultáveis (grupo 4). Unidades com solos afetados por aridez (grupo 1) apresentam médias dominância e abrangência de *browning*, independente do uso da terra. Em unidades com solos afetados por hidromorfismo, há maior equilíbrio entre *greening* e *browning*. As taxas de mudança do verdor apresentaram mediana de cerca de $-0.005 \text{ NDVI ano}^{-1}$ para unidades ambientais dessa fitofisionomia.

Apesar da dominância de geral de *browning*, processos de *greening* assumem papel mais marcante para florestas ombrófilas e semidecíduais, em relação a florestas decíduais. Entretanto, áreas com mudança consistente de verdor são menos abrangentes nessas fitofisionomias. Processos de *browning* dominaram fortemente a mudança do verdor em florestas ombrófilas sobre solos incipientes, em taxas de aproximadamente $-0,003 \text{ NDVI ano}^{-1}$. Por outro lado, sobre solos afetados por aridez e solos agricultáveis, *greening* e *browning* apresentaram abrangência comparável e a taxas mais elevadas, para todos os usos da terra. Florestas ombrófilas sobre solos afetadas por hidromorfismo consistem em unidades raras, e foram as únicas sem a presença de processos consistentes de mudança do verdor. Florestas semidecíduais, por sua vez, apresentaram um comportamento intermediário em relação às florestas decíduais e ombrófilas, tanto em termos de taxas de mudança quanto em relação a abrangência e proporcionalidade de processos de *greening* e *browning*. O principal destaque nas unidades dessa fitofisionomia é a maior abrangência de processos de mudança do verdor (principalmente *browning*) em unidades com mudança de uso da terra, independentemente do tipo de solo (Figuras 6 e 7).

3.2.2 Caatinga

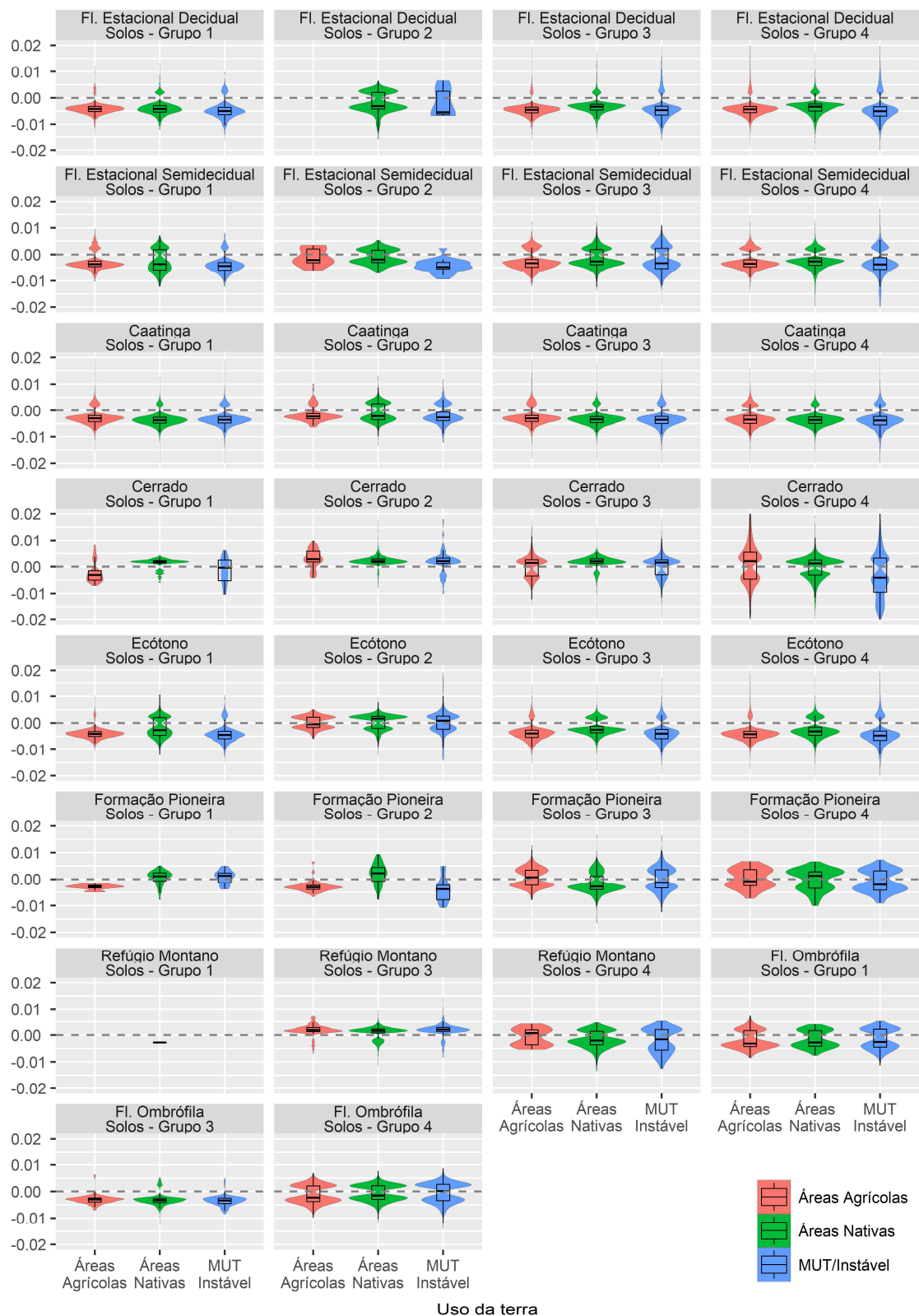
Vegetações relacionadas ao bioma Caatinga apresentam *browning* como processo predominante de mudança do verdor, com abrangência de *greening* bastante restrita. Para essas vegetações, unidades ambientais antropizadas apresentaram maior abrangência de *browning* do que aquelas com vegetação nativa, exceto para solos afetados por aridez, onde a abrangência dos processos foi a maior observada (25-30%) e independeu do uso da terra. As taxas de mudança do verdor foram de magnitude moderada e distribuição homogênea para os usos da terra em cada agrupamento de solos e vegetação (Figuras 6 e 7).

Figura 6. Desagregação ambiental dos processos de *greening* e *browning* em relação a solos, vegetação e uso da terra no Semiárido Brasileiro.



Fonte: O autor.

Figura 7. Desagregação ambiental das taxas de mudança do verdor para áreas com *greening* e *browning* consistentes, em relação a solos, vegetação e uso da terra no Semiárido Brasileiro.



Fonte: O autor.

3.2.1 Cerrado

Áreas de Cerrado se destacam das demais vegetações por apresentarem predominância generalizada de *greening* sobre *browning*, especialmente em áreas nativas e solos incipientes ou afetados por hidromorfismo. Essa predominância ocorre para todas as associações entre solos em usos da terra, com exceção de áreas agrícolas sobre solos afetados por aridez e áreas de mudança de uso da terra sobre solos agricultáveis, em que *browning* supera modestamente a abrangência de *greening*. Por outro lado, áreas nativas possuem ganho de verdor proeminente, mesmo sobre solos áridos. É também notável a maior abrangência de *browning* em unidades ambientais com solos agricultáveis, independente do uso da terra. Essas unidades também apresentaram a maior amplitude de taxas de mudança de verdor observadas em todo o Semiárido Brasileiro (Figuras 6 e 7).

3.2.2 Ecótonos, Formações Pioneiras e Refúgios Vegetacionais Montanos

Vegetações econotonais apresentaram prevalência de *browning* sobre *greening*, com exceção das unidades ambientais com solos afetados por hidromorfismo, onde *greening* ocorre com maior frequência. Para essas vegetações, unidades antropizadas tem maior ocorrência de processos de mudança de biomassa, principalmente *browning*, quando comparadas a unidades com vegetação nativa estável. As maiores dominâncias e abrangências (> 25%) de *browning* foram observadas em vegetações sobre solos incipientes ou agricultáveis. Por sua vez, as taxas de mudança do verdor foram moderadas, com concentração de valores entre -0.005 e 0.005 NDVI ano⁻¹. A maior amplitude de taxas foi observada em áreas de mudança de uso da terra. Por outro lado, Formações pioneiras e refúgios montanos se destacaram como as vegetações com comportamento mais sensível ao uso da terra e tipo de solo, sem dominância geral de nenhum dos processos de mudança de verdor (Figuras 6 e 7).

Formações pioneiras sobre solos afetados por aridez apresentaram alta sensibilidade ao uso da terra: em áreas agrícolas, *browning* é o único processo substancial (~10%), mas para vegetações nativas e áreas com mudança de uso há largo domínio de *greening*, com manutenção da abrangência de *browning*. Áreas agrícolas sobre solos afetados por hidromorfismo apresentaram dominância absoluta de *browning* (> 65%), enquanto vegetações nativas tiveram maior estabilidade, mas com prevalência de *greening* nas áreas com mudança de verdor. Áreas com mudança de uso da terra apresentaram *browning* como processo prevalecente, mas com menor abrangência (25%). Por outro lado, Formações pioneiras sobre solos incipientes ou

agricultáveis apresentaram maior homogeneidade, com equilíbrio entre processos de *greening* e *browning* independentemente do uso da terra. Para essas vegetações, as taxas de mudança do verdor também apresentaram alta variabilidade em relação a solos e usos da terra. Em solos afetados por aridez ou hidromorfismo, taxas de *browning* em áreas agrícolas concentraram-se em torno de $-0.0025 \text{ NDVI ano}^{-1}$. Em contrates, as demais unidades ambientais apresentaram amplo espectro de variação e distribuição das taxas, especialmente para unidades sobre solos agricultáveis (Figuras 6 e 7).

Refúgios montanos apresentaram forte regulação pedológica na distribuição de processos de *greening* e *browning*, mas menor influência do uso da terra. Em unidades com solos incipientes, *greening* foi processo prevalecente, com elevada abrangência espacial e taxas bastante reduzidas. Enquanto isso, para solos agricultáveis, houve elevado equilíbrio entre processos de *greening* e *browning*, em taxas de amplitude e distribuição em amplo espectro. Áreas de refúgios montanos sobre solos afetados por aridez ou hidromorfismo são extremamente raras ou inexistentes (Figuras 6 e 7).

4 DISCUSSÃO

Nesse estudo, foram aplicadas tecnologias emergentes de processamento de dados em nuvem para detecção de mudanças consistentes no verdor da vegetação em larga escala. As implementações em código aberto no GEE permitiram a execução das análises em alta velocidade e eficiência, comparadas à computação clássica. Além disso, os códigos base para análises harmônicas e de tendência disponibilizados pela plataforma foram aprimorados, permitindo agora a validação e comparação estatística de modelos, por meio de testes de significância e métricas de ajuste.

Os códigos prontamente executáveis para cada análise foram disponibilizados, o que garante a reprodutibilidade, reanálise e validação externa contínua dos resultados apresentados. Dessa forma, o presente estudo alcançou avanços em termos de monitoramento ambiental remoto em múltiplas escalas espaciais e temporais, tendo em vista que os *scripts* produzidos podem ser aplicados, editados e aprimorados livremente por qualquer usuário, atendendo à demanda crescente por automatização e reprodutibilidade de processos no monitoramento ambiental (GORELICK et al., 2017; BALZ, ROCCA, 2020; FRERY et al., 2020).

Além disso, uma nova abordagem de desagregação ambiental considerando fatores-chave foi apresentada. Essa abordagem consiste na construção de unidades ambientais homogêneas em relação a grupos de solos, vegetação e uso da terra. Em comparação às abordagens clássicas,

a combinação desses fatores constitui um modelo que permite analisar mais eficientemente a interação entre antropização e ambiente, tendo em vista duas características: elevado poder explicativo, devido à alta capacidade de estratificação ambiental dos fatores considerados (RESENDE et al., 2014); e elevada interpretabilidade, devido ao reduzido número de fatores.

4.1 Abordagem de mapeamento e ajuste de modelos

A validação dos modelos harmônicos mostrou que vegetação do Semiárido Brasileiro pode ser representada por modelos de primeira ordem, como duas estações principais na componente de sazonalidade: aumento e redução de verdor (Figura 3 e Apêndice B). As métricas de qualidade do ajuste de modelos apresentaram ampla distribuição numérica, mas a maioria das áreas apresenta baixos erros e elevados valores de coeficiente de determinação, indicando bom ajuste geral dos modelos (Figura 4 e Apêndice C). As escassas áreas sem ajuste significativo corresponderam a regiões com pixels removidos pelos filtros e máscaras de qualidade, ou com vegetações pouco sensíveis à oscilação estacional do clima, sobre áreas litorâneas ou refúgios vegetacionais de clima ameno (Figuras 1 e 3).

Fatores que afetam o comportamento sazonal estacional de áreas com modelos significativos, reduzindo a qualidade de ajuste dos modelos, podem estar relacionados a eventos que afetam a resposta da vegetação à oscilação climática normal, como secas e períodos úmidos extremos ou prolongados (ERASMI et al., 2014), queimadas (TELESCA; LASAPORANA, 2005), irrigação (NGUYEN et al., 2011) e desmatamento (SCHULTZ et al., 2016). Entretanto, mesmo em regiões com ajuste prejudicado por esses fenômenos, a representação da amplitude de sazonalidade e da tendência linear das séries é suficientemente adequada para manter a significância dos modelos (Figuras 3, 4 e Apêndices 2 e 3), viabilizando-os no cálculo da taxa média de mudança do verdor. Por sua vez, pixels com taxas de mudança que não diferiram de zero foram eliminados via teste de MK, independentemente da sazonalidade da série e qualidade de ajuste dos modelos (Figura 3). O NDVI foi escolhido para cálculo de taxas de mudança por apresentar ajuste de modelos e detalhamento de taxas substancialmente superiores ao EVI, comportamento que pode ser atribuído à maior sensibilidade do NDVI a vegetações de baixa biomassa verde, enquanto o EVI apresenta menor saturação em coberturas de dossel denso (HUETE et al., 2002). Ainda assim, a análise *double-proxy* de convergência dos testes e modelos usando NDVI e EVI foi usada como critério de definição das áreas de mudança do verdor, por permitir selecionar processos consistentes independentemente da sensibilidade do indicador.

Metodologias multi-proxy e multicritério e testes estatisticamente mais rigorosos são preferidas na discriminação de áreas com processos consistentes de *greening* e *browning* (CORTÉS et al., 2021, IVES et al., 2021). Entretanto, é importante compatibilizar as especificidades metodológicas aos objetivos de estudo, tendo em vista a diversidade de fenômenos que dão origem a *greening* e *browning* (ZHU et al., 2016; PIAO et al., 2020). Na metodologia aqui apresentada, os critérios aplicados (seção 2.2.3) garantiram que áreas mapeadas estão seguramente passando por mudanças relevantes no verdor, via remoção de pixels com baixa qualidade e análises de convergência de testes estatísticos sobre séries temporais de índices com diferentes sensibilidades à biomassa verde. Assim sendo, esse método penaliza áreas com processos incipientes, focando na identificação das regiões em que *greening* ou *browning* ocorrem de forma crônica, independentemente de sua intensidade. Devido a essas características, a abordagem apresentada é recomendada na identificação e monitoramento de núcleos de *greening* e *browning*, e pode ser usada no monitoramento espacial e temporal de evolução dessas áreas, a médio e longo prazo. Por outro lado, essa abordagem mostra-se pouco adequada pra identificação de mudanças a curto prazo, efeitos agudos de eventos climáticos ou antrópicos, e avaliação de mudanças de tendência ao longo da série. O uso de modelos harmônicos de primeira ordem deve limitar-se a regiões com duas estações principais, sendo necessário aplicar modelos de ordens superiores para regiões de vegetação com fenologia mais complexa (YOON & KIM, 2020).

4.2 Padrão espacial de processos e taxas

Estudos globais já revelavam que, similarmente a outras áreas secas ao redor do mundo, o Semiárido Brasileiro apresenta distribuição dos processos de *greening* e *browning* em um padrão agregado e embebido em matrizes de estabilidade (FENSHOLT et al., 2012; ZHU et al., 2016; TIAN et al., 2017; PIAO et al., 2020). Entretanto, essa região se difere em termos de complexidade da agregação, com distribuição de processos mais heterogênea, descontínua e salpicada, o que se atribuía ao intenso processo de antropização do Semiárido Brasileiro (FENSHOLT et al., 2012; TIAN et al., 2017). Os resultados encontrados permitiram a setorização desses agregados em zonas homogêneas, considerando a predominância, localização e continuidade espacial dos processos de mudança do verdor (Figura 5C). A caracterização dessas zonas revela elevada diversidade nos padrões espaciais de mudanças do verdor. Zonas de *greening* são numerosas, compactas e apresentam elevada variabilidade interzonal na densidade e distribuição interna das manchas de *greening*, enquanto zonas de

browning são extensas e ligeiramente mais homogêneas (Figura 5). O forte padrão zonal, aliado à diversidade intrazonal de distribuição e embebecimento das manchas de mudança do verdor, sugere forte escalonamento entre influência ambiental e antrópica no controle dos processos de *greening* e *browning* no Semiárido Brasileiro.

O padrão interzonal é aparentemente regulado por fatores ambientais em escala regional, onde as zonas de estabilidade que margeiam zonas de *greening* e *browning* correspondem a regiões de transição entre fatores favoráveis a cada processo. Esse fenômeno é constatado a partir da comparação entre a distribuição de solos, vegetações e zonas de mudança do verdor. É possível identificar uma clara sobreposição entre zonas de *browning* (especialmente BA_PI-RN e BN_CE-RN) e associações de solos incipientes e afetados por aridez, ao passo que há núcleos de *greening* atrelados a tipos vegetacionais específicos, com a associação entre as zonas GN_BA-MG e GN_BA e vegetações de cerrado. Além disso, as vegetações ecotonais, sabidamente distribuídas sobre zonas de transição ambiental (GONÇALVES et al., 2017, ARAUJO et al., 2021, OLIVEIRA et al., 2021), mostram forte associação com as zonas de estabilidade e/ou sem dominância de processos de mudança do verdor. (Figuras 1 e 5).

Por outro lado, o padrão intrazonal de densidade, tamanho e embebecimento na matriz de estabilidade observado para as manchas de *greening* e *browning* parece ter controle a nível local, provavelmente pela interação entre propriedades de sítio e interferência antrópica. Essa hipótese é reforçada pela associação entre regiões com dominância de solos intensivamente agricultáveis e as zonas mistas, sem processos dominantes (Figuras 1 e 5). Nessas áreas, há forte interferência antrópica devido à utilização historicamente mais intensiva das terras (VIEIRA et al., 2015; ESPINDOLA et al., 2021; VIEIRA et al., 2021), impedindo um padrão de resposta típico associado ao controle regional dos fatores ambientais (Figuras 1 e 5). Além disso, núcleos de *greening* sobre vegetações nativas, como o GN_BA-MG e o GN_PI, apresentam maior continuidade de manchas, bem como maior homogeneidade e moderação das taxas de mudança, quando comparadas às zonas antropizadas. Essas características podem ser atribuídas à menor interferência antrópica no padrão ambiental dentro dessas zonas.

Assim sendo, é possível postular que para regiões fortemente antropizadas, como o Semiárido Brasileiro, há de fato há um escalonamento entre forças ambientais e antrópicas na regulação da distribuição espacial de processos de *greening* e *browning*. Fatores ambientais têm papel na regulação regional, delimitando zonas de predominância de *greening* ou *browning*, enquanto a interferência antrópica regula a homogeneidade, intensidade e distribuição desses processos a nível local, intrazonalmente. Entretanto, ainda é necessário compreender a forma como ambiente e antropização atuam no condicionamento desses processos, tendo em vista o

processo crônico de ocupação e degradação da terra no Semiárido Brasileiro (ALMEIDA-FILHO, CARVALHO, 2010; PEREZ-MARIN et al., 2012; REDO et al., 2013; RITO et al., 2017; DE LEMOS et al., 2020).

4.3 Ambiente como fator de controle

A análise de desagregação ambiental permitiu a identificação de padrões na abrangência e intensidade de processos de *greening* e *browning* em unidades ambientais homogêneas, com amplo espectro de interações entre ambiente e antropização. Os padrões observados sugerem que o gradiente da aridez é um fator decisivo na regulação dos fenômenos de *greening* e *browning*, afirmação suportada pela convergência de resultados considerando as características de vegetações e solos.

No Semiárido Brasileiro, a distribuição da vegetação é regionalmente regulada por propriedades climáticas, e afetada local e regionalmente por propriedades pedológicas (ARRUDA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019), o que permite a organização de um gradiente vegetacional e pedológico quanto à aridez (Apêndice A). A análise das vegetações mostra que, independentemente de outros fatores, a abrangência e taxas de *greening* e *browning* têm estreita relação com o gradiente de aridez dessas vegetações. Quanto mais elevada a aridez, maior abrangência geral de *browning* e sua prevalência sobre *greening* (Figuras 6 e 7), seguindo a ordem Caatinga (mais árido) – floresta decidual – floresta semidecidual – floresta ombrófila – refúgios montanos (menos árido). Vegetações na classe “Ecótonos” compreendem um agrupamento de zonas de elevada variância da aridez, o que leva a um posicionamento impreciso entre os biomas estudados. Uma análise vegetacionalmente mais detalhada desses ecótonos poderia trazer um maior entendimento sobre a influência do gradiente de aridez nas mudanças de verdor. Por sua vez, áreas de cerrado estariam em uma posição intermediária em relação à aridez de florestas ombrófilas e Semidecíduais, mas fogem ao padrão observado, com prevalência e abrangência de *greening* muito superiores. Esse comportamento inesperado pode estar relacionado à interação complexa entre mudanças climáticas, mudanças antrópicas, e relações solo-vegetação, que fogem à sensibilidade da análise de desagregação ambiental.

O fator aridez é também identificado como condicionante em termos pedológicos. Para cada vegetação, unidades ambientais sobre solos afetados por hidromorfismo apresentam menor abrangência de *browning* e maior prevalência de *greening*, quando comparadas a unidades sobre outros grupos de solos de maior aridez (Apêndice A). Esse comportamento é observado até mesmo para cerrados e ecótonos, o que confirma a forte influência da aridez como fator

regulador, independentemente das interações complexas supracitadas (Figuras 6 e 7). Solos dos grupos afetados por aridez, incipientes e intensamente agricultáveis têm comportamento similar, o que indica que fatores antrópicos podem ter maior peso que a aridez na regulação de processos de mudança de verdor em unidades ambientes com essas pedologias. Além disso, solos dos grupos “incipientes” e “intensamente agricultáveis” também são encontrados em ambientes de elevada aridez (Apêndice A), devido a condições pretéritas de maior intemperismo químico e bioturbação (solos intensivamente agricultáveis) e condições atuais desfavoráveis à evolução pedogenética, condicionadas por um clima seco sobre certos relevos e materiais de origem (solos incipientes) (CAMPOS et al., 1997; PESSENDA et al., 2010; FREITAS et al., 2021; DE SOUZA et al., 2022). Formações pioneiras também fogem ao padrão encontrado, mas essas vegetações, assim como refúgios montados, têm distribuição muito limitada e parecem ter uma resposta mais acentuada aos fatores de controle antrópico (Figuras 6 e 7).

4.4 Antropização como fator de controle

Os fatores ambientais dão lugar aos antrópicos no controle de mudanças do verdor a nível local, de acordo com os padrões observados na desagregação ambiental de processos de *greening* e *browning* e suas taxas. Os resultados mostram que essa regulação ocorre tanto ao longo da variação pedológica nas vegetações, quanto pelo uso da terra em unidades homogêneas de solo e vegetação. É possível postular que as propriedades e aptidão agrícola dos solos regulam a atividade humana ao longo do gradiente ambiental, e essa antropização controla os processos de mudança do verdor e suas taxas, localmente.

O primeiro argumento para esse postulado é que a presença de solos agricultáveis ou incipientes afeta o balanço entre *greening* e *browning*, bem como suas taxas, de uma forma distinta da de solos afetados por aridez, especialmente em vegetações fortemente alteradas por desmatamento recente no Semiárido Brasileiro: florestas decíduais, cerrados, caatingas e ecótonos (SANTOS et al., 2020). A aridez é um fator ambiental que aumenta a abrangência e prevalência de processos de *browning* nessas vegetações, independentemente do uso da terra (Figuras 6 e 7). O mesmo não ocorre para unidades com solos incipientes ou agricultáveis, onde áreas antropizadas (historicamente agrícolas ou com mudança de uso) sofrem processos de *browning* mais abrangentes e intensos, enquanto áreas nativas são substancialmente mais estáveis e/ou com *browning* menos prevalecente sobre *greening*. Essas fenômeno é explicável pela maior antropização e extrativismo em unidades com essas vegetações e solos (VIEIRA et

al., 2015; SANTOS et al., 2020; ESPINDOLA et al., 2021; VIEIRA et al., 2021), associada a práticas inadequadas de manejo da terra comumente observadas no Semiárido Brasileiro (ALMEIDA-FILHO; CARVALHO, 2010; PEREZ-MARIN et al., 2012; REDO et al., 2013; RITO et al., 2017; DE LEMOS et al., 2020; VIEIRA et al., 2021). Enquanto isso, vegetações exuberantes explicitamente protegidas (florestas ombrófilas e semidecíduais) (BRASIL, 2015), ou presentes sobre solos mais resilientes e/ou com menor aptidão agrícola, são menos afetadas pela degradação da terra via manejo inadequado, desmatamento e extrativismo em áreas naturais (OLIVEIRA, 2020; ESPINDOLA et al., 2021; VIEIRA et al., 2021). Isso acarreta em um controle mais regional das mudanças de verdor, com distribuição mais homogênea de processos e taxas em relação ao uso da terra (Figuras 6 e 7).

Outros resultados também reforçam a postulação de um controle local pela interação pedologia-antropização. Para todas as vegetações, taxas de mudança de verdor com distribuição mais heterogênea e extrema tendem a ocorrer em áreas antropizadas sobre solos intensamente agricultáveis, o que sugere maior influência local/antrópica que regional/ambiental nas intensidades de *greening* e *browning*. Esse padrão é especialmente destacado no bioma cerrado, onde a expansão agrícola recente (ESPINDOLA et al., 2021, SANTOS et al., 2020) causou as mais elevadas taxas de mudança do verdor no Semiárido Brasileiro (Figura 7). Além disso, os padrões de distribuição dos processos e suas taxas por usos da terra mudam conforme a associação vegetação-solo, evidenciando um controle pedológico na resposta local da vegetação aos usos da terra (Figuras 6 e 7).

4.5 Como podemos explicar *greening* e *browning*?

Os resultados obtidos mostram um nítido controle ambiental e antrópico da distribuição nas mudanças do verdor, mas os mecanismos e fatores específicos de regulação desses processos permanecem desconhecidos. As áreas nativas mais afetadas por *browning* são as do bioma Caatinga, seguidas por Mata Atlântica e vegetações ecotonais. Esse resultado é concordante à modelos de distribuição de vegetações, que predizem que as projeções atuais de mudanças climáticas levariam ao *browning* das vegetações em direção a formações mais abertas, em um processo de desertificação (OYAMA, NOBRE, 2003; SALAZAR et al., 2007; COOK e VIZY, 2008; OLIVEIRA et al., 2021). Assim sendo, os resultados indicam consistentemente que os processos de desertificação em larga escala preditos para áreas nativas já ocorrem a elevadas taxas sobre essas vegetações. Entretanto, os cerrados apresentam *greening* intenso discordante desses modelos, que previram um *browning* pedologicamente inconsistente (ARRUDA et al.,

2015; OLIVEIRA et al., 2019) de cerrados em direção a florestas decíduais e caatingas (OLIVEIRA et al., 2021). Assim, a predisposição oriunda de relações solo-vegetação parece alterar a resposta dessas vegetações às mudanças climáticas.

Fensholt et al. (2012) relacionaram mudanças no verdor a séries temporais de precipitação, temperatura do ar e radiação solar sobre todas as regiões semiáridas do globo, e defenderam a inviabilidade de generalizações baseadas em mudanças climáticas como reguladoras de *greening* e *browning*. Os resultados mostraram que mudanças na precipitação e temperatura (fatores da aridez) podem conduzir a *greening* e *browning*, mas que essas mudanças não explicam esses processos sobre áreas antropizadas, como o Semiárido Brasileiro, e nem mesmo em algumas áreas pouco alteradas, como o sul argentino. Posteriormente, Zhu et al. (2016) mostraram que mudanças das concentrações de CO₂, deposição de nitrogênio, mudanças climáticas e mudanças de uso da terra agem regionalmente na condução de processos de mudança do verdor no Semiárido Brasileiro, mas que outros fatores não modelados controlam *greening* e *browning* em diversas zonas dessa região. Os resultados obtidos no presente estudo sugerem que esses outros fatores podem estar relacionados à predisposição ambiental, como tipos vegetacionais, uso da terra, solos e clima. De fato, Erasmi et al. (2014) também sugeriram que há controle desses fatores sobre eventos curtos de *greening* e *browning* em resposta às fases do El Niño -Oscilação do Sul (ENOS), mas aos mecanismos de interação entre os fatores de predisposição, mudanças de uso da terra e a oscilação climática para a região não são claros.

Estudos recentes têm se esforçado na utilização combinada de preditores antrópicos e ambientais e técnicas de *machine learning* para a modelagem de mudanças do verdor da vegetação em regiões antropizadas, como no sudoeste chinês (LIU et al., 2020), oeste europeu até a Ásia central (XU et al., 2020) e Quênia (GICHENJE et al., 2019). Essas técnicas se mostram promissoras em termos de poder preditivo, *ranking* de importância de preditores e análise da complexidade e não-linearidade de processos. Entretanto, os modelos criados a partir dessas técnicas são de elevada complexidade matemática e demandam grande número de preditores, o que resulta em baixa interpretabilidade (CORTEZ; EMBRECHTS, 2013). Além disso, os modelos apresentados carecem de maior rigor na amostragem de treinamento e validação, bem como na seleção, caracterização e harmonização de preditores quanto à sua representação de processos de mudança ou predisposição, ambiental ou antrópica. Essas características dificultam a elucidação dos mecanismos regulatórios de mudança do verdor, o que resulta na necessidade de desenvolvimento de novas metodologias para a geração de modelos com alta performance e interpretabilidade, simultaneamente.

A análise geral desses estudos mostra que abordagens baseadas no uso isolado de indicadores de mudança ou predisposição, ambiental ou antrópica, falham em explicar os mecanismos causadores de *greening* e *browning*. Assim sendo, e considerando os resultados obtidos, é razoável inferir que a predisposição ambiental é um forte modulador da resposta da vegetação às mudanças ambientais e antrópicas. Dessa forma, não é possível explicar ou prever processos de mudança do verdor a partir de modelos baseados unicamente em mudanças ambientais, tampouco considerando apenas propriedades ambientais e antrópicas estáveis no tempo. Por outro lado, o uso de modelos estatísticos baseados em um grande número de variáveis pode melhorar a previsão de processos de mudança de verdor, mas sua elevada complexidade impede o entendimento dos mecanismos de controle envolvidos.

Esse entendimento pode levar a uma mudança de paradigma nos estudos de *greening* e *browning* a nível global, deslocando o foco dos estudos em direção à construção de modelos mistos de melhor performance preditiva e interpretabilidade, considerando simultaneamente variáveis de predisposições e mudanças, ambientais e antrópicas. Esses modelos mistos poderiam responder questões ainda em aberto, relacionadas à natureza e mecanismos de regulação de mudanças no verdor. Dentre essas questões, destacam-se: 1. Qual tipo de regulação é mais importante: fatores de predisposição ou fatores de mudança? 2. Como os mecanismos de regulação variam ao longo de diferentes usos da terra? 3. Dentre fatores específicos de predisposição e mudança, qual sua ordem de importância e hierarquização nos mecanismos de regulação? 4. É possível ajustar modelos preditivos, interpretáveis e elucidativos em relação aos mecanismos de regulação de *greening* e *browning*? Essas questões são a chave para o avanço no entendimento de processos multiescalares de mudança do verdor, e precisarão ser respondidas em estudos futuros.

4.6 Semiárido Brasileiro em risco

Inúmeras questões sobre os mecanismos de controle de processos de *greening* e *browning* permanecem em aberto, mas a alarmante condição do Semiárido Brasileiro em relação às mudanças de verdor não é uma delas. Os processos de *browning* prevalecem fortemente sobre *greening*, em abrangência e intensidade assustadoras: zonas de dominância de *browning* ocupam quase mais de 40% da região, que apresentou elevada perda mediana de verdor nos últimos 21 anos. Esses resultados, aliados às discussões anteriores, acendem um alerta vermelho para os processos de degradação das vegetações no Semiárido Brasileiro: os processos de desertificação em larga escala já ocorrem em altas taxas tanto para áreas nativas quanto

antropizadas, onde os processos são ainda mais intensos. Esse cenário é agravado pelas lacunas de conhecimento em relação a mecanismos regulatórios de mudanças do verdor e a heterogeneidade espacial desses processos, que dificultam a construção de políticas de combate à desertificação e incentivo à recuperação de áreas degradadas a nível regional.

5 CONCLUSÕES

Em contraponto às clássicas abordagens baseadas em mudanças climáticas e antrópicas, o presente estudo analisou o papel da predisposição ambiental no controle de processos de mudança do verdor em áreas altamente antropizadas, usando como modelo a região seca mais densamente habitada do mundo: o Semiárido Brasileiro. Para isso, foram apresentadas duas novas abordagens para mapeamento e análise de *greening* e *browning*. Para mapeamento de processos e suas taxas, foi proposta uma abordagem *double proxy*, multicritério, baseada em computação em nuvem e em código aberto, o que garante reprodutibilidade, replicabilidade, validação externa e monitoramento contínuo. O controle da predisposição ambiental e antrópica sobre *greening* e *browning* foi estudado através de uma nova abordagem de desagregação ambiental baseada em unidades homogêneas de indicadores-chave (uso da terra, solos e vegetação), que permitiu analisar como as relações sociedade-natureza regulam mudanças de verdor e suas taxas. Os resultados mostraram que apesar do predomínio de áreas com verdor estável no Semiárido Brasileiro, *browning* é mais frequente e intenso que *greening*. Esses processos de desertificação são abundantes e ocorrem a elevadas taxas em áreas nativas, sendo ainda mais frequentes e intensos sobre áreas antropizadas, devido a práticas inadequadas no manejo de recursos naturais. A distribuição das mudanças de verdor é zonal e heterogênea, devido ao controle espacialmente escalonado por fatores de predisposição ambiental e antrópica. Fatores de predisposição ambiental, principalmente a aridez, controlam a distribuição das zonas homogêneas de processos de mudança do verdor, em um contexto regional. Enquanto isso, a interação sociedade-ambiente regula a intensidade e distribuição espacial desses processos localmente. Esses resultados confirmam a necessidade de uma mudança de paradigma nos estudos de modelagem de *greening* e *browning*. Ao contrário das abordagens clássicas, novos estudos deveriam preferencialmente considerar o uso simultâneo e equilibrado de fatores de predisposição e mudança, ambientais e antrópicos. Também é evidente a necessidade de avanços na interpretabilidade desses modelos, tendo em vista que as abordagens atuais falham em elucidar os mecanismos de regulação das mudanças de verdor ao longo de múltiplos usos da terra e regiões antropizadas. Assim sendo, as principais questões em aberto

estão relacionadas a como utilizar modelos complexos para explicar mecanismos de controle das mudanças de verdor, considerando a interação entre fatores de predisposição e mudança.

REFERÊNCIAS

- ADEEL, Zafar et al. **Ecosystems and human well-being: desertification synthesis**. World Resources Institute (WRI), 2005.
- ALMEIDA-FILHO, Raimundo; CARVALHO, Carolina M. Mapping land degradation in the Gilbues region, northeastern Brazil, using Landsat TM images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 4, p. 1087-1094, 2010.
- ARAUJO, Ademir Sergio Ferreira et al. Distinct taxonomic composition of soil bacterial community across a native gradient of Cerrado-Ecotone-Caatinga. **Applied Soil Ecology**, v. 161, p. 103874, 2021.
- ARRUDA, Daniel M. et al. Landforms and soil attributes determine the vegetation structure in the Brazilian semiarid. **Folia Geobotanica**, v. 50, n. 3, p. 175-184, 2015.
- BALZ, Timo; ROCCA, Fabio. Reproducibility and replicability in SAR remote sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 3834-3843, 2020.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Mapa de Vegetação Nativa na Área de Aplicação da Lei no. 11.428/2006-Lei da Mata Atlântica (ano base 2009). 2015.
- CAMPOS, Jackson CF et al. Gênese e micropedologia de solos do Médio Jequitinhonha, de Turmalina a Pedra Azul, MG. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 43-53, 1997.
- CHICCO, Davide; WARRENS, Matthijs J.; JURMAN, Giuseppe. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. **PeerJ Computer Science**, v. 7, p. e623, 2021.
- CHOROVER, Jon et al. Soil biogeochemical processes within the critical zone. **Elements**, v. 3, n. 5, p. 321-326, 2007.
- CLINTON, Nicholas. Non-Parametric Trend Analysis. In: **Google Earth Engine community tutorials**. 29 abr. 2020. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/nonparametric-trends#references>. Acesso em: 08 abr. 2021.
- CLINTON, Nicholas. **Time Series Analysis in Earth Engine**. Earth Engine User Summit. 2017. Apresentações do Google. 46 slides. color. Disponível em: goo.gl/6Ep5VC. Acesso em: 17 fev. 2022.
- COOK, Kerry H.; VIZY, Edward K. Effects of twenty-first-century climate change on the Amazon rain forest. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 542-560, 2008.

- CORTÉS, José et al. Where are global vegetation greening and browning trends significant?. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 6, p. e2020GL091496, 2021.
- CORTEZ, Paulo; EMBRECHTS, Mark J. Using sensitivity analysis and visualization techniques to open black box data mining models. **Information Sciences**, v. 225, p. 1-17, 2013.
- CUNHA, A. P. M. et al. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and forest meteorology**, v. 214, p. 494-505, 2015.
- DE FREITAS, Diana F. et al. Pedogeomorphology and paleoenvironmental implications of large termite mounds at the Brazilian semiarid landscape. **Geomorphology**, v. 387, p. 107762, 2021.
- DE LEMOS, Jeferson Emanuel; DE SOUZA, Bartolomeu Israel; DINIZ, Marco Túlio Mendonça. Sistemas, Caos e o Processo de Desertificação no Semiárido Brasileiro: complexidade e interações. **Ateliê Geográfico**, v. 14, n. 1, p. 136-154, 2020.
- DE SOUZA, José João Lelis Leal et al. Organic carbon rich-soils in the brazilian semiarid region and paleoenvironmental implications. **CATENA**, v. 212, p. 106101, 2022.
- DIDAN, K. MOD13A1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A1.006>. Acesso em: 08 abr. 2021.
- ERASMI, Stefan et al. Vegetation greenness in northeastern brazil and its relation to ENSO warm events. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3041-3058, 2014.
- ESPINDOLA, Giovana Mira et al. Cropland expansion as a driver of land-use change: the case of Cerrado-Caatinga transition zone in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 11, p. 17146-17160, 2021.
- FENSHOLT, Rasmus et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007—an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. **Remote sensing of environment**, v. 121, p. 144-158, 2012.
- FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International journal of climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.
- FRERY, Alejandro C.; GOMEZ, Luis; MEDEIROS, Antonio C. A badging system for reproducibility and replicability in remote sensing research. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 4988-4995, 2020.
- GEMITZI, Alexandra; BANTI, Maria A.; LAKSHMI, Venkat. Vegetation greening trends in different land use types: natural variability versus human-induced impacts in Greece. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 5, p. 1-10, 2019.

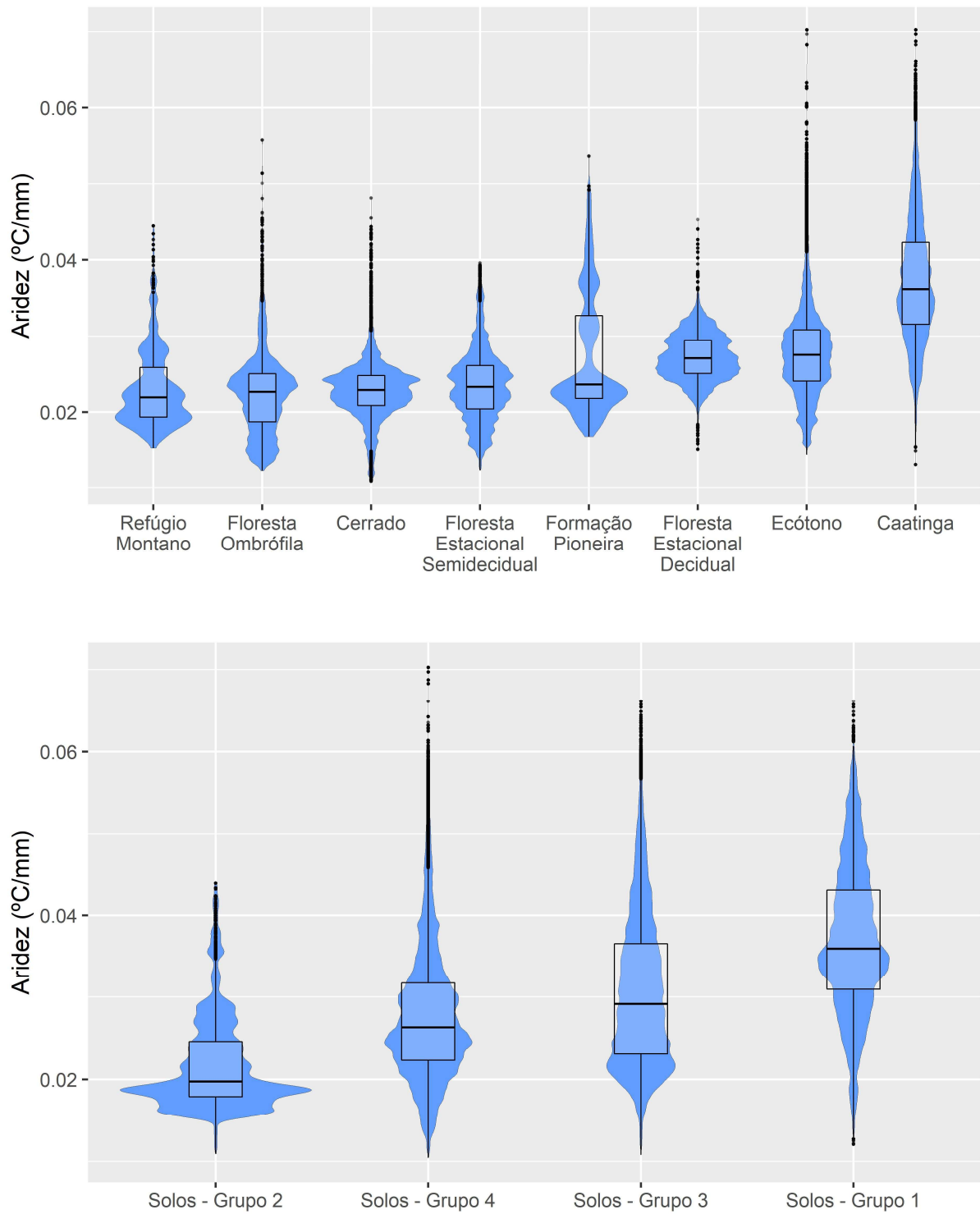
- GICHENJE, Helene; PINTO-CORREIA, Teresa; GODINHO, Sérgio. An analysis of the drivers that affect greening and browning trends in the context of pursuing land degradation-neutrality. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 15, p. 100251, 2019.
- GONÇALVES, Gabriela Ribeiro et al. The relationship between bird distribution patterns and environmental factors in an ecotone area of northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 140, p. 6-13, 2017.
- GORELICK, Noel et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.
- HIJMANS, Robert J. terra: Spatial Data Analysis. **R package version 1.2-10**. 2021
- HUETE, Alfredo et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote sensing of environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- IVES, Anthony R. et al. Statistical inference for trends in spatiotemporal data. **Remote Sensing of Environment**, v. 266, p. 112678, 2021.
- LIU, Huiyu et al. Nonlinear relationship of vegetation greening with nature and human factors and its forecast—a case study of Southwest China. **Ecological Indicators**, v. 111, p. 106009, 2020.
- MACEDO, Rodrigo Santana et al. Processos pedogenéticos e susceptibilidade dos solos à degradação no Semiárido Brasileiro. **Caminhos de Geografia**, [S. l.], v. 22, n. 81, p. 176–195, 2021.
- MORELL, Oliver; FRIED, Roland. On nonparametric tests for trend detection in seasonal time series. In: **Statistical Inference, Econometric Analysis and Matrix Algebra**. Physica-Verlag HD, 2009. p. 19-39.
- NGUYEN, Thi Thu Ha et al. Mapping the irrigated rice cropping patterns of the Mekong delta, Vietnam, through hyper-temporal SPOT NDVI image analysis. **International journal of remote sensing**, v. 33, n. 2, p. 415-434, 2012.
- OLIVEIRA, Guilherme de Castro et al. Climate and soils at the Brazilian semiarid and the forest-Caatinga problem: new insights and implications for conservation. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 10, p. 104007, 2019.
- OLIVEIRA, Guilherme de Castro et al. Soil predictors are crucial for modelling vegetation distribution and its responses to climate change. **Science of The Total Environment**, p. 146680, 2021.
- OLIVEIRA, Guilherme de Castro. **Modelling the Seasonally Dry Forests in the semiarid region of Brazil: current and future distribution in CMIP-5 scenarios**. Orientador: Márcio Rocha Francelino. 2020. v. 1, 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

- OYAMA, Marcos Daisuke; NOBRE, Carlos Afonso. A new climate-vegetation equilibrium state for tropical South America. **Geophysical research letters**, v. 30, n. 23, 2003.
- PEREIRA, Luís Flávio; GUIMARÃES, Ricardo Morato Fiúza; OLIVEIRA, Raphael Rivadávia Mendes. Integrando geotecnologias simples e gratuitas para avaliar usos/coberturas da terra: QGIS e Google Earth Pro. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 250-264, 2018.
- PEREZ-MARIN, Aldrin Martin et al. Núcleos de desertificação do Semiárido Brasileiro: ocorrência natural ou antrópica?. **Parcerias Estratégicas**, v. 17, n. 34, p. 87-106, 2012.
- PESSEDA, Luiz Carlos Ruiz et al. Late Pleistocene and Holocene vegetation changes in northeastern Brazil determined from carbon isotopes and charcoal records in soils. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 297, n. 3-4, p. 597-608, 2010.
- PIAO, Shilong et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 1, p. 14-27, 2020.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021.
- REDO, Daniel; AIDE, T. Mitchell; CLARK, Matthew L. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and Mato Grosso, 2001–2009. **Journal of Land Use Science**, v. 8, n. 2, p. 123-153, 2013.
- RESENDE, Mauro; LANI, João Luiz; FEITOZA, Leandro Roberto. Assentamento de pequenos agricultores no estado do Espírito Santo: ambiente, homem e instituições. 2014.
- RITO, Kátia F. et al. Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 3, p. 828-838, 2017.
- SALAZAR, Luis F.; NOBRE, Carlos A.; OYAMA, Marcos D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 9, 2007.
- SANTOS, Celso Augusto Guimarães; DO NASCIMENTO, Thiago Victor Medeiros; DA SILVA, Richarde Marques. Analysis of forest cover changes and trends in the Brazilian semiarid region between 2000 and 2018. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 18, p. 1-20, 2020.
- SCHULTZ, Michael et al. Performance of vegetation indices from Landsat time series in deforestation monitoring. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 52, p. 318-327, 2016.
- SHUMWAY, Robert H.; STOFFER, David S. **Time series analysis and its applications**. New York: springer, 2017.

- SOUZA, Carlos M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.
- TELESCA, Luciano; LASAPONARA, Rosa. Discriminating dynamical patterns in burned and unburned vegetational covers by using SPOT-VGT NDVI data. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 21, 2005.
- TIAN, Feng et al. Mapping gains and losses in woody vegetation across global tropical drylands. **Global change biology**, v. 23, n. 4, p. 1748-1760, 2017.
- VIEIRA, Rita Marcia da Silva Pinto et al. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. **Science of The Total Environment**, v. 782, p. 146900, 2021.
- VIEIRA, RM da Silva Pinto et al. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 347-360, 2015.
- WICKHAM, Hadley. **ggplot2: elegant graphics for data analysis**. springer, 2016.
- WICKHAM, Hadley; FRANÇOIS, Romain; HENRY, Lionel; Müller, Kirill. dplyr: a grammar of data manipulation. **R package version 1.0.7**. 2021.
- WRIGHT, Sewall. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research** v. 7, p. 557–585, 1921.
- XU, Xiaojuan et al. Nonlinear relationship of greening and shifts from greening to browning in vegetation with nature and human factors along the Silk Road Economic Belt. **Science of The Total Environment**, v. 766, p. 142553, 2021.
- YOON, Heeyeun; KIM, Soyoun. Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 166, p. 201-212, 2020.
- ZHU, Zaichun et al. Greening of the Earth and its drivers. **Nature climate change**, v. 6, n. 8, p. 791-795, 2016.

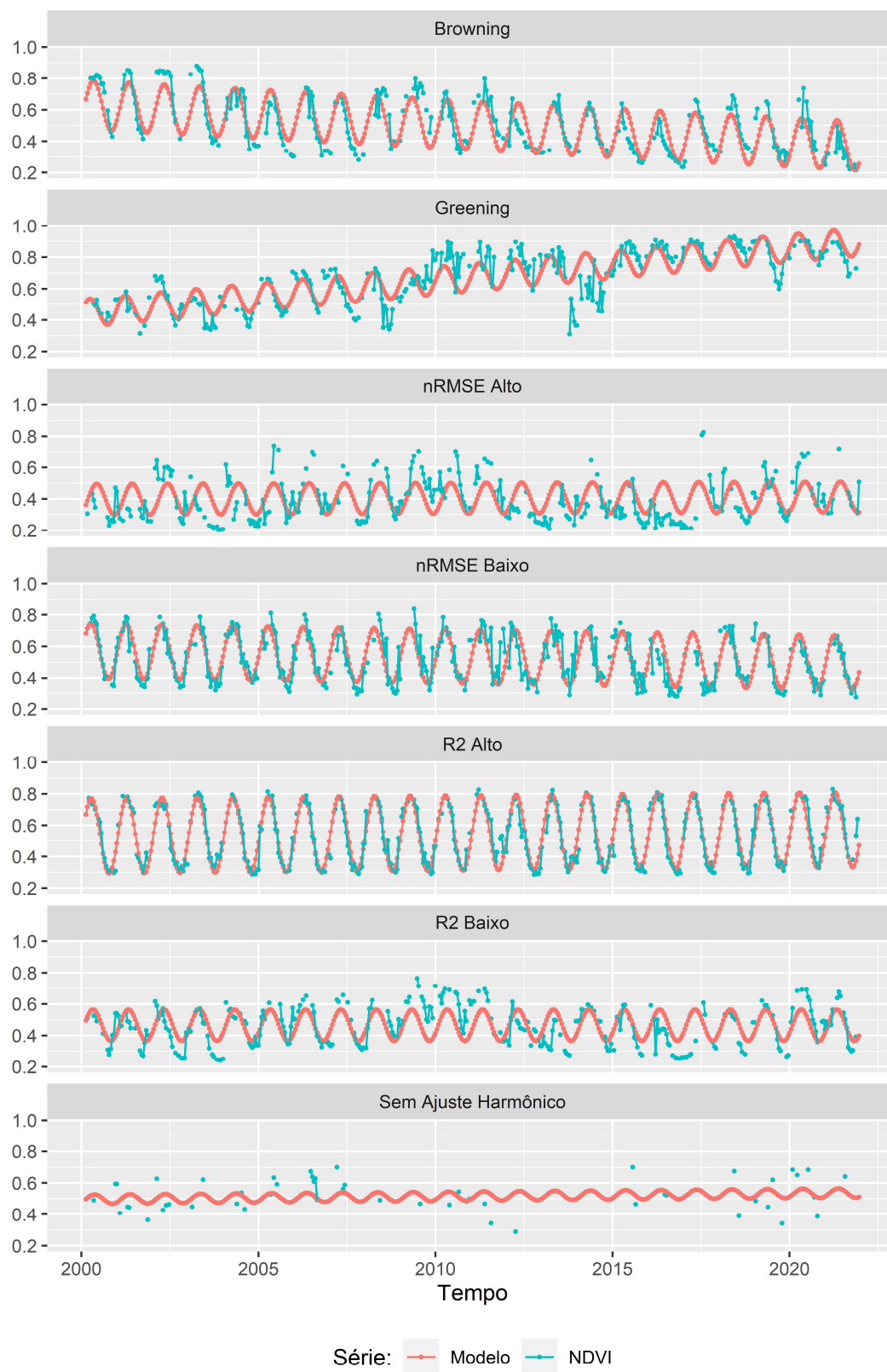
APÊNDICES

Apêndice A – Aridez em solos e vegetações no Semiárido Brasileiro. As vegetações e solos foram ordenados de menos a mais áridos segundo a mediada dos valores de aridez.



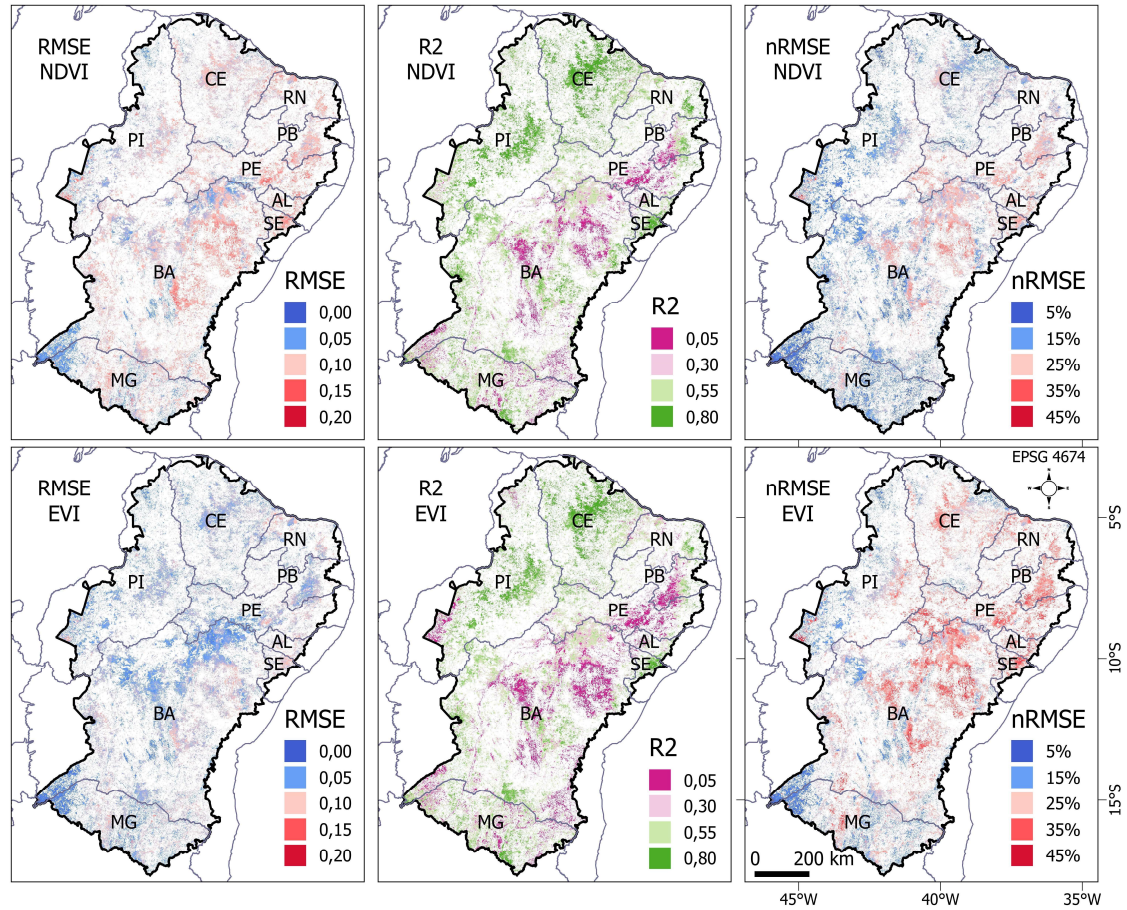
Fonte: O autor.

Apêndice B – Exemplos de séries temporais de NDVI calculados via imagens MODIS e estimadas por modelos harmônicos com diferentes qualidades de ajuste.



Fonte: O autor.

Apêndice C – Distribuição espacial das métricas de validação de modelos harmônicos para NDVI e EVI no Semiárido Brasileiro.



Fonte: O autor.