



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
Nível: Doutorado

**CARACTERIZAÇÃO ECOSISTÊMICA E FUNCIONAL
DAS PASTAGENS BRASILEIRAS**

CLAUDINEI OLIVEIRA DOS SANTOS

Goiânia - Go
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Claudinei Oliveira dos Santos

3. Título do trabalho

CARACTERIZAÇÃO ECOSSISTÊMICA E FUNCIONAL DAS PASTAGENS BRASILEIRAS

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **CLAUDINEI OLIVEIRA DOS SANTOS, Discente**, em 14/12/2021, às 07:57, conforme horário oficial de



Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Laerte Guimarães Ferreira Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 29/12/2021, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2511375** e o código CRC **19A795EF**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Claudinei Oliveira dos Santos

3. Título do trabalho

CARACTERIZAÇÃO ECOSISTÊMICA E FUNCIONAL DAS PASTAGENS BRASILEIRAS

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **CLAUDINEI OLIVEIRA DOS SANTOS, Discente**, em 14/02/2023, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Laerte Guimarães Ferreira Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 20/02/2023, às 14:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3529355** e o código CRC **49CE17CD**.

Referência: Processo nº 23070.035888/2021-14

SEI nº 3529355

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
Nível: Doutorado

**CARACTERIZAÇÃO ECOSSISTÊMICA E FUNCIONAL
DAS PASTAGENS BRASILEIRAS**

CLAUDINEI OLIVEIRA DOS SANTOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB), da Pró-Reitoria de Pós-Graduação (PRPG) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito parcial para obtenção do grau de doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: *Estrutura e Dinâmica Ambiental*

Linha de pesquisa: *Monitoramento e análise de recursos naturais*

Orientador: **Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira**

Co-Orientador: **Prof. Dr. Alexandre de Siqueira Pinto**

Goiânia - Go
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Claudinei Oliveira dos
CARACTERIZAÇÃO ECOSSISTÊMICA E FUNCIONAL DAS
PASTAGENS BRASILEIRAS [manuscrito] / Claudinei Oliveira dos
Santos. - 2021.
lxxx, 80 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira; co-orientador Dr.
Alexandre de Siqueira Pinto.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Pró-reitoria de
Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Goiânia, 2021.
Bibliografia. Apêndice.

1. Pastagem. 2. Pastagem degradadas. 3. Carbono. 4.
Sensoriamento remoto. 5. Índice de vegetação. I. Ferreira, Laerte
Guimarães, orient. II. Título.

CDU 502/504



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº **014** da sessão de Defesa de Tese de **CLAUDINEI OLIVEIRA DOS SANTOS** que confere o título de Doutor em **Ciências Ambientais**, na área de concentração em **Estrutura e Dinâmica Ambiental**.

Ao/s **oito dias do mês de julho de 2021**, a partir da(s) **14:00 horas**, no(a) **sala virtual <http://meet.google.com/pki-xrcj-was>**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada “**CARACTERIZAÇÃO ECOSSISTÊMICA E FUNCIONAL DAS PASTAGENS BRASILEIRAS**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Laerte Guimarães Ferreira Jr. (CIAMB/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **MERCEDES MARIA DA CUNHA BUSTAMANTE (UnB)**, membro titular externo; Professor Doutor **EDUARDO DELGADO ASSAD (EMBRAPA)**, membro titular externo, Professor Doutor **CINIRO COSTA JUNIOR (CGIAR)**, membro titular externo; Professor Doutor **MARIO BARROSO RAMOS NETO (TNC)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não** sugeriu alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Laerte Guimarães Ferreira Júnior**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, em **8 de julho de 2021**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Laerte Guimarães Ferreira Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 08/07/2021, às 20:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fausto Miziara, Coordenadora de Pós-Graduação**, em 12/07/2021, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2193822** e o código CRC **DF3F9EB6**.

Agradecimentos

Ao longo do processo de doutoramento tive a oportunidade e o prazer de partilhar experiência com muitas pessoas, e todos contribuíram em alguma medida para tornar essa experiência tão enriquecedora. A todas estas pessoas deixo aqui os meus agradecimentos! A seguir destaco reforço meus agradecimentos aqueles que contribuíram de forma mais direta na construção da presente tese.

Agradeço aos meus orientadores prof. Dr. Laerte Ferreira e o prof. Dr. Alexandre Pinto. Mais que um orientador, o prof. Laerte foi um mentor ao longo dessa jornada com ensinamentos importantes para a vida profissional e pessoal, e me inspirou/incentivou a pensar grande e a buscar a excelência, por isso e pelas inúmeras oportunidades de crescimento proporcionadas sou imensamente grato. Ao prof. Alexandre, sou muito grato pela orientação cuidadosa e paciente, sem todas as discussões enriquecedoras sobre fundamentos das ciências e processos ecossistêmicos, e sem todas as suas contribuições este trabalho não seria o mesmo. Destaco também meus agradecimentos ao prof. Victor Couto, as amplas discussões sobre os sistemas de produção pecuária no país foram fundamentais.

A todos os colegas do Lapig, com quem tive o privilégio de conviver durante esses anos e que me proporcionaram um ambiente amigável, acolhedor e colaborativo. A vivência no laboratório definitivamente foi um diferencial em minha formação. Ao Dr. Leandro Parente, prof. Elaine Silva, prof. Manuel Ferreira, Vinícius Mesquita, Sérgio Nogueira, Roberto Urzeda, João Victor, Arielle Arantes, Janete Silva, Anna Cláudia, Adriano Faria e ao Marcelo Gosch, agradeço. Todos contribuíram imensamente nesse processo.

A todos que participaram das campanhas de campo para coletas de dados utilizados no primeiro e segundo apêndice desta tese. Ao prof. Victor Couto, prof. Pedro Vieira, prof. Alliny Amaral, Nathália Teles, Vinícius Mesquita, Sergio Nogueira, Valéria Silva, Danillo Santos e Paulo Maia, as contribuições de vocês foram fundamentais.

Aos professores e pesquisadores Dra. Mercedes Bustamante, Dr. Cíniro Costa, Dr. Eduardo Assad e Dr. Mario Barroso, por aceitarem participar da banca examinadora da defesa desta tese de doutorado.

Sou grato ao FAPEG que concedeu uma bolsa de estudo durante esse processo, agradeço também ao Programa de Pós-Graduação CIAMB, e CAPES.

Agradeço especialmente a minha esposa Rose Santos e ao meu filho Gabriel Heitor, por todo o companheirismo, compreensão e apoio ao longo dessa jornada. Estendo os agradecimentos a toda a minha família que sempre me incentivou a seguir em frente, especialmente aos meus pais que sempre acreditaram no poder do estudo em nos tornar seres humanos melhores.

A todos meu muito obrigado!

Trajetória Acadêmica-Profissional

O curso de minha trajetória acadêmica tem seu início antes do meu ingresso na graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Mato Grosso.

Sou filho de pais agricultores, que entre as décadas de 60 e 90 migraram por diversas fazendas dos estados de Mato-Grosso e Rondônia, contando com a “bondade” dos proprietários para terem acesso a uma área de floresta para o cultivo de agrícola de subsistência, um meio para garantir a subsistência de si próprios e dos 9 filhos que se “acumularam” ao longo dos anos. Claro que em troca de tal “bondade”, deixa-se ao proprietário, um percentual da colheita, um percentual mensal da venda de bananas, e ao final do processo deixa-se a área formada com pastagem, geralmente *Brachiaria Sp.* Até que em 1997, mudamos para um assentamento rural do INCRA, no interior de Mato-Grosso, onde meus pais foram contemplados com um lote de terra. Foi nesse assentamento que concluí meu processo de educação básica, fundamental e média, como estava estruturado o sistema de ensino à época.

Ensino médio concluído, veio a escolha entre tentar um curso superior ou o trabalho braçal de catar raízes em áreas que estavam sendo convertidas para soja. Uma escolha não tão óbvia naquele momento, uma vez que o trabalho nas fazendas de soja era, à vista, mais lucrativo que a educação superior. Acabei por não fazer o óbvio, e em 2005 ingressei no curso de Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Mato Grosso (UNEMAT). Estudando a noite, trabalhando de servente de pedreiro durante o dia para me sustentar, fui seguindo no curso até ser contemplado com uma bolsa de estágio em práticas laboratoriais, o que me permitiu dedicar ainda mais aos estudos. Nesse período atuei como monitor de química, bioquímica e práticas laboratoriais de biologia e microscopia. Em meados do curso fui contemplado com bolsa de iniciação científica em projetos financiados pelo CNPQ no Laboratório de Ecologia Vegetal (LABEV), coordenado pela prof.^a Dra. Beatriz Marimon, a quem tive o privilégio de ter como orientadora nos anos seguintes, até a conclusão do curso em 2009.

Em 2010 iniciei o mestrado em Ecologia e Conservação, pela UNEMAT, também sob orientação da prof.^a Beatriz Marimon. No mestrado fui contemplado com uma bolsa de estudo financiada pela CAPES, sem a qual certamente não poderia ter cursado o mestrado. Durante o terceiro bimestre de 2011, participei de um estágio na Universidade de Leeds, na Inglaterra, viabilizado pela minha orientadora na época, por meio de uma parceria com pesquisadores daquela universidade. Concluí o mestrado em 2012, mesmo ano em que me tornei colaborador do IPAM - *Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia*, onde atuei sob supervisão do Dr. Paulo Brando, atualmente professor na University of California - Irvine. Em 2014 tive a oportunidade de participar da AGU Fall Meeting, em San Francisco - US, e em 2015 participei de um curso de *Eddy Covariance* no Max Planck Institute, Jena - GER.

Em 2016 iniciei o doutorado em Ciências Ambientais (CIAMB) na Universidade Federal de Goiás, orientado pelo prof. Dr. Laerte Guimarães, à época coordenador do LAPIG - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento, onde atuei ao longo do curso. No doutorado fui contemplado com uma bolsa de estudo da FAPEG - Fundação de Amparo à Pesquisa de Goiás, o que foi fundamental para ao longo do curso e no desenvolvimento das pesquisas apresentadas na presente tese. Ao longo do processo de doutoramento, atuar no LAPIG sob a orientação do prof. Laerte foi um diferencial. Sob a orientação do prof. Laerte, tive a oportunidade de participar de grandes projetos de pesquisas e interagir com diferentes grupos de pesquisadores, participando de congressos nacionais (e.g. SBSR, CBC) e internacionais (por duas vezes retornei a AGU Fall Meeting). Nesse período participei de projetos de pesquisas em parceria com outros países da América Latina, ocasião em que fui ao Paraguai e à Argentina para colaborar no mapeamento das áreas e pastagens degradadas no bioma Chaco.

Nesse percurso me especializei em processamento de dados, tendo cursado e ministrado alguns cursos nessa área. Ao final de de 2019, por meio da PRPG - Pró Reitoria de Pós-Graduação, tive a oportunidade de participar de um curso de redação científica, ministrado pelo prof. Dr. Gilson Volpato. Esse curso foi um marco em minha trajetória, mostrando um novo caminho para compreensão dos fundamentos e processo de construção do conhecimento científico, no qual me encontro atualmente.

Resumo

A atividade pecuária ocupa ~67% da área global destinada à atividade agrícola, estando diretamente relacionada a temas importantes para a humanidade como a segurança alimentar e a necessidade de mitigação das emissões de gases de efeito estufa - GEE. No Brasil, o sexto maior emissor de GEE, as mudanças de uso e cobertura da terra são a principal fonte de emissões. Considerando que grande parte das pastagens no Brasil apresentam algum nível de degradação, nestas áreas está uma oportunidade ímpar para mitigação de emissões de GEE. Nesta tese são analisados três aspectos importantes nesta classe de uso da terra: A influência da sazonalidade hídrica na biomassa e na resposta espectral das pastagens em diferentes escalas espaciais; O potencial do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), obtido por sensoriamento remoto para o mapeamento da qualidade das pastagens, e análise dos padrões espaciais em escala nacional; E estimativas do estoque de carbono no solo e na biomassa aérea das pastagens do bioma cerrado, por meio de modelos baseados em processos ecossistêmicos. Observamos que a média anual e amplitude dos estoques de biomassa variou em função da escala espacial, e não houve diferenças significativas nesses estoques durante as estações seca e chuvosa devido ao manejo por pastejo contínuo. O NDVI apresentou baixo potencial em prever o estoque de biomassa das pastagens nas áreas avaliadas, por outro lado, o potencial como indicador do vigor da pastagem foi alta, apresentando alta relação com a razão biomassa viva/morta, principalmente em pastagem não degradada. O padrão temporal do NDVI variou em função da qualidade da pastagem e escala espacial analisada, indicando que não é possível estabelecer limiares únicos para mapear a condição de pastagens em áreas tão amplas quanto o território brasileiro. A partir do mapeamento da qualidade das pastagens, foi possível analisar sua dinâmica espaço-temporal. Com essa análise, identificamos que houve ganhos de qualidade nas pastagens brasileiras, com a área que deixou de apresentar indícios de degradação sendo 2,7 vezes maior que a área que perdeu qualidade. Os resultados correspondem aos padrões observados na literatura e aos incentivos à recuperação das pastagens por meio de programas como o Plano ABC. A modelagem da dinâmica e estimativas dos estoques de carbono nas áreas de pastagens do bioma Cerrado por meio do modelo Century, com os parâmetros ajustados para simular o cenário de manejo convencional das pastagens no bioma, confirmou a versatilidade e robustez do modelo, sendo eficaz em estimar os estoques de carbono nas áreas analisadas, reproduzindo adequadamente os padrões espaciais característicos da influência sazonal no bioma Cerrado. Nesse sentido, acreditamos que os resultados alcançados por meio deste estudo podem contribuir para melhor caracterização e compreensão das pastagens no Brasil.

Palavras-Chave: Pastagem, Pastagens degradadas, Carbono, Sensoriamento remoto, Índice de vegetação

Abstract

Livestock activity occupies ~67% of the global area used for agricultural activity, being directly related to important issues for humanity such as food security and the need to mitigate greenhouse gas emissions - GHG. In Brazil, the sixth largest emitter of GHG, land use and land cover activity is the main source of emissions. Considering that most of the pastures in Brazil present some level of degradation, in these areas there is a great opportunity to mitigate GHG emissions. In this study, three important aspects of this land use class are analyzed: The influence of climatic seasonality on biomass and on the spectral response of pasture areas at different spatial scales; The potential of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), obtained by remote sensing for the mapping of pasture quality, and analysis of spatial patterns in national scale; And estimates of carbon stock in soil and aboveground biomass of pastures in the cerrado biome, using models based on ecosystem processes. We observed that annual mean and variation of biomass stocks varied with spatial scale, and there were no significant differences in these stocks during the dry and rainy seasons due to grazing management strategies. The NDVI had low potential to predict the biomass stock of pastures in the evaluated areas, on the other hand, the potential as an pasture vigor indicator was high, showing a significant linear relation with the living/dead biomass ratio, especially in non-degraded pastures. The temporal pattern of the NDVI varied depending on the quality of the pasture and the spatial scale analyzed, indicating that it is not possible to establish single thresholds to map the condition of pastures in large areas like the Brazilian territory. From the mapping of pasture quality, it was possible to analyze their spatiotemporal dynamics. In this analysis, we identified an improvement in the Brazilian pasture quality, with the area of gain quality being 2.7 times larger than the area of lost quality. The results correspond to the patterns observed in the literature and to the incentives for the recovery of pastures through programs such as the ABC Plan. The modeling of the dynamics and estimates of carbon stocks in the pasture areas of the Cerrado biome using the Century model, with the parameters adjusted to simulate the conventional pasture management in the biome, confirmed the versatility and robustness of the model, being effective in estimate carbon stocks in this areas, adequately reproducing the characteristic spatial patterns of seasonal influence in the Cerrado biome. In this sense, we believe that the results achieved through this study can contribute to a better characterization and understanding of pastures in Brazil.

Keywords: Pasture, Degraded pastures, Carbon, Remote Sensing, Vegetation index

Sumário

Sumário	8
Introdução geral	10
<i>Questões investigativas</i>	12
<i>Hipóteses</i>	12
<i>Objetivo geral</i>	13
<i>Objetivos específicos</i>	13
<i>Referências</i>	13
Capítulo 1 - Uso de imagens Landsat 8 para avaliação do estoques de biomassa e condição das pastagens e diferentes escalas espaciais	16
<i>Resumo</i>	16
<i>Introdução</i>	16
<i>Material e métodos</i>	18
<i>Área de estudo</i>	18
<i>Amostragem em campo</i>	19
<i>Dados satelitários e análises</i>	23
<i>Resultados</i>	24
<i>Estoque de biomassa em diferentes condições da pastagem e escalas espaciais</i>	24
<i>Relação entre NDVI e biomassa de pastagens em diferentes escalas espaciais</i>	26
<i>Discussão</i>	29
<i>Estoque de biomassa em diferentes condições da pastagem e escalas espaciais</i>	29
<i>Relação entre NDVI e biomassa de pastagens em diferentes escalas espacial</i>	31
<i>Conclusões</i>	33
<i>Referências</i>	33
Capítulo 2 - Dinâmica espacial e da qualidade das pastagens no Brasil entre 2010 a 2018	35
<i>Resumo</i>	35
<i>Introdução</i>	35
<i>Material e métodos</i>	37
<i>Classificação da qualidade de pastagens</i>	37
<i>Pré-processamento</i>	38
<i>Classes de degradação das Pastagens</i>	39
<i>Índice de Degradação das Pastagens por Propriedade (IDP)</i>	40
<i>Aplicação da abordagem de análise para avaliação da recuperação das pastagens, tendo áreas de financiamento pelo plano ABC como estudo de caso.</i>	41
<i>Análise de acurácia</i>	41
<i>Resultados</i>	42
<i>Dinâmica espaço-temporal da qualidade de pastagens no Brasil</i>	42
<i>Fatores relacionados com a variação na qualidade das pastagens por propriedade rural</i>	45
<i>Discussão</i>	48
<i>Dinâmica espacial e da qualidade das pastagens no Brasil</i>	48

<i>Relação entre tamanho da propriedade rural e aporte de recursos do Plano ABC com a qualidade das pastagens</i>	51
<i>Conclusões</i>	53
<i>Referências</i>	54
Capítulo 3 - Uso de modelo baseado em processos (Century) e Sistema de Informação Geográfica (SIG) para estimativa dos estoques de carbono em áreas de pastagens no Cerrado brasileiro	58
<i>Resumo</i>	58
<i>Introdução</i>	58
<i>Material e métodos</i>	60
<i>Área de estudo</i>	60
<i>Simulação do estoque de carbono</i>	61
<i>Histórico de uso da terra</i>	63
<i>Propriedades físico-química do solo</i>	64
<i>Dados climáticos: temperatura e precipitação</i>	65
<i>Análises e processamento de dados</i>	66
<i>Resultados e discussão</i>	67
<i>Estimativas de estoque de carbono nas pastagens do bioma Cerrado</i>	67
<i>Estoque de carbono por classes de solo e idade das pastagens</i>	68
<i>Conclusões</i>	71
<i>Referências</i>	71
Considerações finais	75
Apêndices	77
Método para o mapeamento e monitoramento do estado de degradação das pastagens brasileiras	77

Introdução geral

Abrangendo mais de 3,2 bilhões de hectares no mundo, a pecuária ocupa 67% de toda a área destinada à atividade agropecuária (agricultura, pecuária e silvicultura) em 2018 (FAO, 2020). Para além de sua importância econômica, a pecuária está diretamente relacionada à segurança alimentar, provendo macro e micronutrientes essenciais à população humana (Mottet et al., 2017). Por outro lado, ao ocupar extensas áreas e consumir grande parte da produção agrícola como alimento para os rebanhos, especialmente soja e milho, essa atividade está diretamente relacionada a importantes temas para a humanidade, como a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Mottet et al., 2017; West et al., 2014).

O Brasil é o sexto maior emissor de GEE, contabilizando 2,2 GtCO₂e (bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente) - ou 3,2% da emissão mundial - em 2019 (Albuquerque et al., 2020). A atividade rural (AFOLU - *Agriculture, Forestry and Other Land Use*) é sua principal fonte de emissões, respondendo por 72% das emissões em 2019, sendo 0,8 GtCO₂e atribuídos a mudanças de uso da terra e 0,6 GtCO₂e a agropecuária (Albuquerque et al., 2020). O País possui o maior rebanho bovino, é o segundo maior produtor e o maior exportador de carne do mundo (ABIEC, 2020; FAO, 2020). Portanto, no país o potencial da pecuária para agravar ou superar os desafios da mudança climática e segurança alimentar são ainda mais relevantes. Aproximadamente 20% do território brasileiro é ocupado por pastagens, em sua maioria pouco produtivas. Portanto, nestas áreas está uma oportunidade ímpar para mitigar emissões de GHG (Bustamante *et al.*, 2012).

Essa oportunidade passa por aumentar a produção em áreas degradadas e evitar desmatamento para implantação de novas áreas de pastagens. O estoque de carbono na matéria orgânica do solo e na biomassa aérea em pastagens produtivas é consideravelmente maior que em pastagens pouco produtivas (Braz et al., 2013). Assim, a recuperação de pastagens degradadas resultará tanto no aumento da produção pecuária quanto no aumento dos estoques de carbono do sistema. Além disso, vários estudos sugerem que a demanda por produção pecuária pode ser atendida em uma área consideravelmente menor do que a ocupada por pastagens atualmente. Para exemplificar, um aumento médio de 0.2 UA/ha (Unidade Animal por hectare) pode liberar o equivalente a 50% da área atualmente cultivada com soja. Portanto, além do ganho em maior estoque de carbono, é possível uma inversão na demanda por incorporar novas áreas ao sistema, com as pastagens passando a liberar áreas para outras atividades, como o cultivo de grãos e restauração da vegetação nativa, evitando desmatamento e queimadas (West et al., 2014; Bustamante et al., 2012; Nepstad et al., 2013). Importante ressaltar que esses avanços precisam estar alinhados a mecanismos de controles, para que não resulte em um efeito bumerangue, onde o aumento no consumo produza crescimento da atividade a ponto de gerar aumento do desmatamento para

abertura de novas áreas e ampliação desta classe de uso da terra, e por consequência, mais áreas improdutivas e maior emissão de Carbono no futuro.

Uma das principais causas de terras improdutivas no Brasil é a degradação das pastagens, que também resulta na demanda de uma grande extensão de terra para garantir o volume atual de produção nesse setor. O processo de degradação das pastagens, que geralmente está associado a prática de manejo inadequado, pode ocorrer ao longo de vários anos e se caracteriza pela perda de produtividade e redução na oferta de alimento para o gado e conseqüentemente, perda em capacidade de suporte (Dias-Filho, 2011; FAO, 2020;). Vários são os fatores que podem levar ao processo de degradação das pastagens, incluindo a escolha da forrageira, a lotação bovina, a adubação, que são parâmetros do manejo. Estima-se que entre 50% e 70% das pastagens brasileiras apresentam indícios de degradação, e poderiam ter sua produtividade aumentada ou serem convertidas para uso mais eficaz (FAO, 2020). Pastagens que alcançam estágio avançado de degradação apresentam altos custos de recuperação, sendo um estímulo para o desmatamento e posterior instalação de novas pastagens. Nas últimas décadas, a área ocupada por pastagens no bioma Amazônia aumentou, enquanto no bioma Cerrado a área total de pastagens se estabilizou a partir de 2010, enquanto em biomas como Mata Atlântica e Pampa essa área reduziu, dando lugar à agricultura (*i.e.* cana-de-açúcar e soja), e regeneração da vegetação nativa (Parente et al., 2019; Souza et al., 2020). Por outro lado, o manejo eficiente pode levar ao aumento da produtividade de modo sustentável, com saldo positivo quanto aos impactos da produção pecuária - com sequestro de carbono superando as emissões, evitando desmatamento (Braz et al., 2013).

Nas últimas décadas, várias iniciativas visando o aumento da eficiência e produtividade no setor pecuário, aliadas ao equilíbrio e sustentabilidade ambiental, têm sido observadas, a exemplo do Plano ABC - plano do governo brasileiro para Agricultura de Baixo Carbono, do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Um dos principais desafios encontrados por estas iniciativas, para a gestão eficiente e eficaz das áreas ocupadas por pastagens, é a escassez de ferramentas e métodos acessíveis e eficientes para classificar e monitorar eventuais aumentos em a dinâmica do vigor vegetativo e produtividade ao longo do tempo, ainda que a qualidade e produtividade das pastagens sejam tema recorrente em vários estudos (Aguiar et al., 2017; Arantes, 2017; Eckert et al., 2015; Pereira et al., 2018). Esses estudos, em sua maioria, são baseados em dados obtidos por sensoriamento remoto, envolvendo principalmente o uso de índices de vegetação derivados a partir de imagens orbitais.

Por sua vez, um grande desafio enfrentado para o mapeamento detalhado da qualidade das pastagens em regiões extensas, como é o caso no Brasil, têm sido o processo de calibração dos métodos e validação dos mapeamentos, dada a heterogeneidade e alta dinâmica do sistema pecuário (Oliveira e Couto, 2018). Os conceitos e protocolos de coletas de informações da qualidade das pastagens em campo

são diversos e geralmente não contemplam todos os aspectos que definem a qualidade das pastagens, estando relacionados à qualidade nutricional da planta ou aos dados de origem do mapeamento, de maneira exclusiva. Assim, faltam tanto indicadores objetivos da qualidade da pastagem em campo (Rocha et al., 2017), quanto indicadores espectrais para análise remota (Davidson et al., 2009), que contemplem toda a diversidade e complexidade das pastagens brasileiras. Nesse contexto, no presente trabalho, tendo por referência dados satelitários de alta resolução espacial, uso de técnicas de computação de alto desempenho e abordagens inéditas, investigamos questões relacionadas aos padrões anuais de disponibilidade de biomassa, padrões espaciais de qualidade e os estoques de carbono nas pastagens brasileiras.

Questões investigativas

Esta tese investigou as seguintes questões:

- I. Qual a influência da sazonalidade hídrica na dinâmica da biomassa em áreas de pastagem no estado de Goiás e como variam em função da escala espacial? Sensores remotos embarcados em satélites podem ser utilizados com acurácia para estimar a quantidade de biomassa em pastagem no Brasil?
- II. Diferentes níveis de qualidade em pastagem no Brasil podem ser mapeados por meio de dados satelitários? Uma vez mapeada a qualidade das pastagens, isto pode ser utilizado para avaliar a dinâmica temporal e espacial de forma acurada?
- III. Os estoques de carbono no solo e na biomassa aérea das pastagens no bioma Cerrado podem ser estimados de forma acurada pela integração entre modelagem da ciclagem biogeoquímica e sistema de informação geográfica?

Hipóteses

- I. A produtividade das pastagens é diretamente proporcional a disponibilidade hídrica, portanto a quantidade de biomassa aérea é maior na estação chuvosa.
- II. A correspondência existente entre o estado da pastagem e os índices de vegetação permite mapear níveis de qualidade das pastagens por meio de dados satelitários e também o estudo de sua dinâmica.
- III. Características edafoclimáticas são importantes fatores no funcionamento ecossistêmico de pastagens. Assim, acredita-se que o uso de bancos de dados georreferenciados de clima e solo como parâmetros de entrada para modelos baseados em processos ecossistêmicos são capazes de simular os estoques de carbono em áreas de pastagens.

Objetivo geral

Mapear e analisar os padrões espaço-temporais na qualidade das pastagens brasileiras a partir de dados obtidos por sensores remotos embarcados em satélites e analisar a dinâmica e estoque de carbono nas pastagens do bioma Cerrado por meio de modelos baseados em processos ecossistêmicos.

Objetivos específicos

- I. Avaliar a influência da escala espacial no estoque de biomassa aérea ao longo de um ciclo hidrológico completo e a relação entre estoque de biomassa e índices de vegetação obtidos a partir de dados satelitários.
- II. Mapear a qualidade das pastagens brasileiras e analisar sua dinâmica espaço-temporal, a fim de identificar a ocorrência de perdas ou ganhos em qualidade.
- III. Estimar os estoques de carbono associados às pastagens do bioma Cerrado por meio do modelo baseado em processos ecossistêmicos ajustado para o cenário de manejo convencional do Cerrado.

Referências

1. ABIEC. Perfil da pecuária no Brasil, Beef Report. 2020, p. 49.
2. Aguiar, D.A., Mello, M.P., Nogueira, S.F., Gonçalves, F.G., Adami, M., Rudorff, B.F.T., 2017. MODIS Time Series to Detect Anthropogenic Interventions and Degradation Processes in Tropical Pastures. *Remote Sens.* 9, 73. <https://doi.org/10.3390/rs9010073>
3. Albuquerque, I., Alencar, A., Angelo, C., Barcellos, T.A.F., Coluna, I., Junior, C.C., Cremer, M., Piatto, M., Potenza, R., Quintana, G., Shimbo, J., Tsai, D., Zimbres, B., 2020. Análise Das Emissões Brasileiras De Gases De Efeito Estufa E Suas Implicações Para As Metas De Clima Do Brasil 1970-2019 41.
4. Arantes, A.E., Couto, V.R. de M., Sano, E.E., Ferreira, L.G., 2018. Livestock intensification potential in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 53, 1053–1060. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900009>
5. Braz, S.P., Urquiaga, S., Alves, B.J.R., Jantalia, C.P., Guimarães, A.P., dos Santos, C.A., dos Santos, S.C., Machado Pinheiro, É.F., Boddey, R.M., 2013. Soil Carbon Stocks under Productive and Brachiaria Degraded Pastures in the Brazilian Cerrado. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 914–928. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0269>
6. Bustamante, M.M.C., Nobre, C.A., Smeraldi, R., Aguiar, A.P.D., Barioni, L.G., Ferreira, L.G., Longo, K., May, P., Pinto, A.S., Ometto, J.P.H.B., 2012. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Clim. Change* 115, 559–577. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3>

7. Davidson, E.A., Asner, G.P., Stone, T.A., Neill, C., Figueiredo, R.O., 2009. Objective indicators of pasture degradation from spectral mixture analysis of landsat imagery. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 114, 1–7. <https://doi.org/10.1029/2007JG000622>
8. Dias-Filho, M.B., 2011. Os desafios da produção animal em pastagens na fronteira agrícola brasileira. *Rev. Bras. Zootec.* 40, 243–252.
9. Eckert, S., Hüsler, F., Liniger, H., Hodel, E., 2015. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *J. Arid Environ.* 113, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.001>
10. FAO, 2020. World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020, World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1329en>
11. Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., Gerber, P., 2017. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Glob. Food Sec.* 14, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>
12. Nepstad, D., Irawan, S., Bezerra, T., Boyd, W., Stickler, C., Shimada, J., Carvalho, O., MacIntyre, K., Dohong, A., Alencar, A., Azevedo, A., Tepper, D., Lowery, S., 2013. More food, more forests, fewer emissions, better livelihoods: linking REDD+, sustainable supply chains and domestic policy in Brazil, Indonesia and Colombia. *Carbon Manag.* 4, 639–658. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.65>
13. Oliveira, E.R. de, Couto, V.R.M., 2018. Productive and Economic Viability of Raising Beef Cattle in the Savanna of the Brazilian State of Goiás. *Rev. Econ. e Sociol. Rural* 56, 395–410. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560302>
14. Parente, L., Mesquita, V., Miziara, F., Baumann, L., Ferreira, L., 2019. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sens. Environ.* 232, 111301. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111301>
15. Pereira, O., Ferreira, L., Pinto, F., Baumgarten, L., 2018. Assessing Pasture Degradation in the Brazilian Cerrado Based on the Analysis of MODIS NDVI Time-Series. *Remote Sens.* 10, 1761. <https://doi.org/10.3390/rs10111761>
16. Rocha Junior, P.R., Donagemma, G.K., Andrade, F.V., Passos, R.R., da Costa, A.S.V., Ruiz, H.A., 2017. Field-based quality indicators in degraded pasture of the Atlantic forest biome. *Aust. J. Crop Sci.* 11, 652–661. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.06.p326>
17. Souza, C.M., Shimbo, J.Z., Rosa, M.R., Parente, L.L., Alencar, A.A., Rudorff, B.F.T., Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L.G., Souza-Filho, P.W.M., de Oliveira, S.W., Rocha, W.F., Fonseca, A. V., Marques, C.B., Diniz, C.G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E.R., Vélez-Martin, E., Weber, E.J., Lenti, F.E.B., Paternost, F.F., Pareyn, F.G.C., Siqueira, J. V., Viera, J.L., Neto, L.C.F., Saraiva, M.M., Sales, M.H., Salgado, M.P.G., Vasconcelos, R., Galano, S., Mesquita, V. V., Azevedo, T., 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian

biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sens.* 12.
<https://doi.org/10.3390/RS12172735>

18. West, P.C., Gerber, J.S., Engstrom, P.M., Mueller, N.D., Brauman, K.A., Carlson, K.M., Cassidy, E.S., Johnston, M., MacDonald, G.K., Ray, D.K., Siebert, S., 2014. Leverage points for improving global food security and the environment. *Science* (80-.). 345, 325–328.
<https://doi.org/10.1126/science.1246067>

Capítulo 1 - Uso de imagens Landsat 8 para avaliação do estoques de biomassa e condição das pastagens e diferentes escalas espaciais

1.1. Resumo

O sistema pecuário brasileiro é diverso e as regiões classificadas como pastagens compõem um sistema de uso da terra extremamente complexo, abrangendo grande diversidade de espécies forrageiras, em diferentes estágios de degradação e com diferentes estratégias e padrões tecnológicos empregados no manejo desse sistema, o que resulta em diferentes níveis de produtividade. A produção de biomassa é determinante para a produção pecuária brasileira, uma vez que o rebanho bovino nacional é alimentado fundamentalmente a pasto. Assim, compreender sua dinâmica nesse sistema complexo pode contribuir para o manejo mais eficiente das pastagens e da atividade pecuária no país. O objetivo neste estudo foi avaliar a relação entre dados obtidos por sensoriamento remoto e a condição da pastagem quanto a produção de biomassa e degradação, em três escalas espaciais (local, regional e nacional). A partir de amostras em campo nas três escalas mencionadas, avaliamos a influência da heterogeneidade da pastagem no estoque de biomassa anual e relação entre dados obtidos por sensoriamento remoto (NDVI), o estoque de biomassa viva e morta e os níveis de degradação da pastagem nas estações climáticas. Observamos que a média anual e amplitude dos estoques de biomassa variou em função da escala espacial, e houve semelhança nesses estoques durante as estações seca e chuvosa. O NDVI apresentou baixo potencial em prever o estoque de biomassa das pastagens nas áreas avaliadas, por outro lado, o potencial como indicador do vigor da pastagem foi alta, apresentando alta relação com a razão biomassa viva/morta, principalmente em pastagem não degradada. O padrão temporal do NDVI variou em função da qualidade da pastagem e escala espacial analisada, indicando que não é possível estabelecer limiares únicos para mapear a condição de pastagens em áreas tão amplas quanto o território brasileiro.

1.2. Introdução

O sistema pecuário brasileiro é diverso e as pastagens constituem um sistema de uso da terra extremamente complexo (Volpe et al., 2008; IBGE, 2020). As regiões classificadas como pastagem podem abranger grande diversidade e forrageiras, como gramíneas nativas, pastagens cultivadas, áreas em diferentes estágios de degradação pastagem ou regeneração da vegetação nativa (Dias-Filho, 2014). Igualmente diversos são as estratégias e padrões tecnológicos de manejo empregados no sistema de produção pecuária, apresentando desde áreas extensivas com baixa produtividade a áreas intensivas com alta produtividade e sistemas de produção integrados (ABIEC, 2020). Essa complexidade do sistema pecuário torna os mapeamentos quantitativos e qualitativos difíceis de serem realizados para grandes extensões territoriais, i.e, escalas espaciais equivalentes à coberta por um bioma brasileiro, ou a totalidade das pastagens brasileiras (Aguiar et al., 2017; Parente et al., 2019). Estudos nesta escala

geralmente são baseados em dados satelitários, cuja informação espectral varia com a dinâmica e qualidade das pastagens (Ponzoni e Shimabukuro, 2010).

A qualidade de uma porção significativa das pastagens brasileiras é baixa, com estimativas que entre 50% e 70% apresentem indícios de degradação em algum nível, as quais poderiam ter sua produção aumentada ou serem convertidas para uso mais eficaz (FAO, 2019). De fato, a degradação das pastagens é um processo comum no Brasil e um grande desafio do setor pecuário atualmente. O processo de degradação, que geralmente está associado a práticas inadequadas de manejo, pode ocorrer ao longo de vários anos e se caracteriza pela perda de produtividade e conseqüentemente, redução na oferta de alimento para o rebanho (Dias-Filho, 2014). Atualmente, no Brasil não há um método que seja consenso na avaliação e identificação das pastagens degradadas, bem como o estágio de degradação em que se encontram. Entretanto, os indicadores mais comuns e aceitos estão relacionados à produtividade animal - geralmente representado pela capacidade de suporte, e a presença de espécies invasoras e solo exposto - e indiretamente, a produção e disponibilidade de forragem (Dias-Filho, 2011; FAO, 2019).

A disponibilidade de forragem - ou estoque de biomassa - varia em diferentes sistemas produtivos e são dependentes de fatores ambientais, como precipitação, temperatura e propriedades físico-químicas do solo, os quais podem variar espacialmente (Arantes et al., 2018). Em regiões com padrões sazonais bem definidos, como observado na porção central do território brasileiro, a produtividade de forragem apresenta um padrão correspondente ao ciclo climático. Entretanto, as ações antrópicas, como a escolha da forrageira, processos de fertilização, lotação bovina e manejo do pastejo, também exercem influência nesses padrões (Aguiar et al., 2017). Nesse contexto, analisar os padrões de estoques de biomassa ao longo do ano climático em áreas de pastagens com diferentes manejos, é um passo importante para a definição de indicadores da qualidade das pastagens, uma vez que o estoque de biomassa é determinante para a capacidade de suporte, e depende das ações de manejo, como controle de invasoras. O sensoriamento remoto orbital tem sido fundamental para estas iniciativas de análise e mapeamento da qualidade das pastagens, uma vez que o aumento na disponibilidade de imagens, combinado ao avanço de técnicas de análises e capacidade computacional tem possibilitado avaliar as mudanças de uso de cobertura da terra em uma escala sem precedentes (mapbiomas.org). Dentre os dados de sensoriamento remoto mais utilizados para avaliar mudanças no ambiente está o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), considerado um proxy do vigor vegetativo das pastagens (Xu e Guo, 2015); este índice tem sido utilizado como informação auxiliar ou principal em vários estudos para mapear as áreas e a qualidade, estimar a capacidade de suporte potencial e determinar o vigor vegetativo das pastagens (Pereira et al., 2018; Reinermann et al., 2020; Chen et al., 2021).

Estudos envolvendo imagens de satélite, de modo geral, se baseiam em abordagens top-down. Carecendo de avaliações da correspondência entre estes índices de vegetação e as características das pastagens por meio de parâmetros quantitativos e qualitativos medidos em campo, como o estoque de forragem, razão entre matéria orgânica viva e morta, densidade populacional e classificação quanto aos indícios de degradação, entre outros parâmetros (Edirisinghe et al., 2011; Reis et al., 2020). Assim, uma necessidade para o mapeamento da qualidade das pastagens brasileiras têm sido o desenvolvimento de métodos calibrados e validados, bem como informações de campo para validação dos mapeamentos, dada a heterogeneidade e alta dinâmica do sistema pecuário. Os conceitos e protocolos de coleta de informações da qualidade das pastagens em campo são diversos, caros, demorados e geralmente contemplam poucos aspectos / variáveis envolvidas, estando em geral restritos à qualidade nutricional da planta. Considerando as dimensões continentais do país, e os investimentos envolvidos (em tempo e dinheiro), faz-se necessário explorar melhor os dados orbitais, incluindo a análise de correspondência entre estoque de biomassa (e outros parâmetros biofísicos) e respostas espectrais (ex. via índices de vegetação).

Nesse contexto, no presente estudo avaliamos a relação entre dados obtidos por sensoriamento remoto e a condição da pastagem em três escalas espaciais (local, regional e nacional). Especificamente, avaliamos os seguintes aspectos: (1) influência da escala espacial, e conseqüentemente, da heterogeneidade da pastagem no estoque de biomassa anual; (2) relação entre dados obtidos por sensoriamento remoto e o estoque de biomassa viva e morta da pastagem nas estações climáticas; e (3) padrões temporais de índices de vegetação em pastagens em diferentes estados de degradação.

1.3. *Material e métodos*

1.3.1. *Área de estudo*

O presente estudo foi realizado em três escalas espaciais (*local, regional e nacional*), com diferentes estratégias para coleta de dados em campo. Na escala local as coletas foram realizadas em áreas de pastagens com a espécie forrageira *Urochloa brizantha* cv marandu, em propriedades voltadas à pecuária de corte, na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho - BHRV, no estado de Goiás. Na escala regional foram amostradas as pastagens do estado de Goiás, por meio de uma estratégia amostral concebida para contemplar a heterogeneidade das pastagens na região. E em escala nacional, foram avaliadas amostradas áreas de pastagens nos biomas brasileiros, exceto na Caatinga. Nessa escala, a amostragem foi realizada nos municípios com maior número de contratos para *Recuperação de Pastagens Degradadas* (RPD), no âmbito do programa ABC - *Agricultura de Baixo Carbono*, em cada bioma (MAPA, 2021).

1.3.2. Amostragem em campo

Em escala local, as pastagens foram amostradas mensalmente em cinco propriedades rurais na BHRV, entre maio de 2018 e abril de 2019, abrangendo um ano climático e contemplando o auge das estações de seca e chuva, bem como as transições entre elas (figura 1.1B). O experimento foi conduzido em áreas com a forrageira *Urochloa brizantha* cv marandu, em propriedades cuja atividade principal era a pecuária de corte. As áreas amostradas foram classificadas em três classes de condição da pastagem, sendo duas propriedades *não degradada* (E+), duas com *degradação moderada* (E0), e uma com *degradação severa* (E-), nessa última a degradação se deu por alta pressão de pastejo devido a alta lotação bovina e ausência de descanso ao longo do tempo, culminando com a necessidade de recuperação da pastagem pelo proprietário, na fase final do experimento. Os sistemas de produção nessas propriedades compreendem a cria, recria e engorda a pasto, e as estratégias de manejo incluíram o pastejo rotacionado e o pastejo contínuo, com diferentes estratégia quanto a reserva pasto para o período seco, ou suplementação do rebanho com ração concentrada (tabela 1). Em cada propriedade, foram coletadas três amostras simples equidistantes 150 metros, no mesmo piquete e sem alterações no manejo durante o experimento (figura 1.1A). Em cada amostra simples a biomassa foi cortada rente ao solo, e o processamento consistiu em homogeneizá-las em uma amostra composta, separar o material vivo e morto, e fazer a secagem em estufa de ventilação de ar forçada, à temperatura de 55 °C, durante 72 horas.

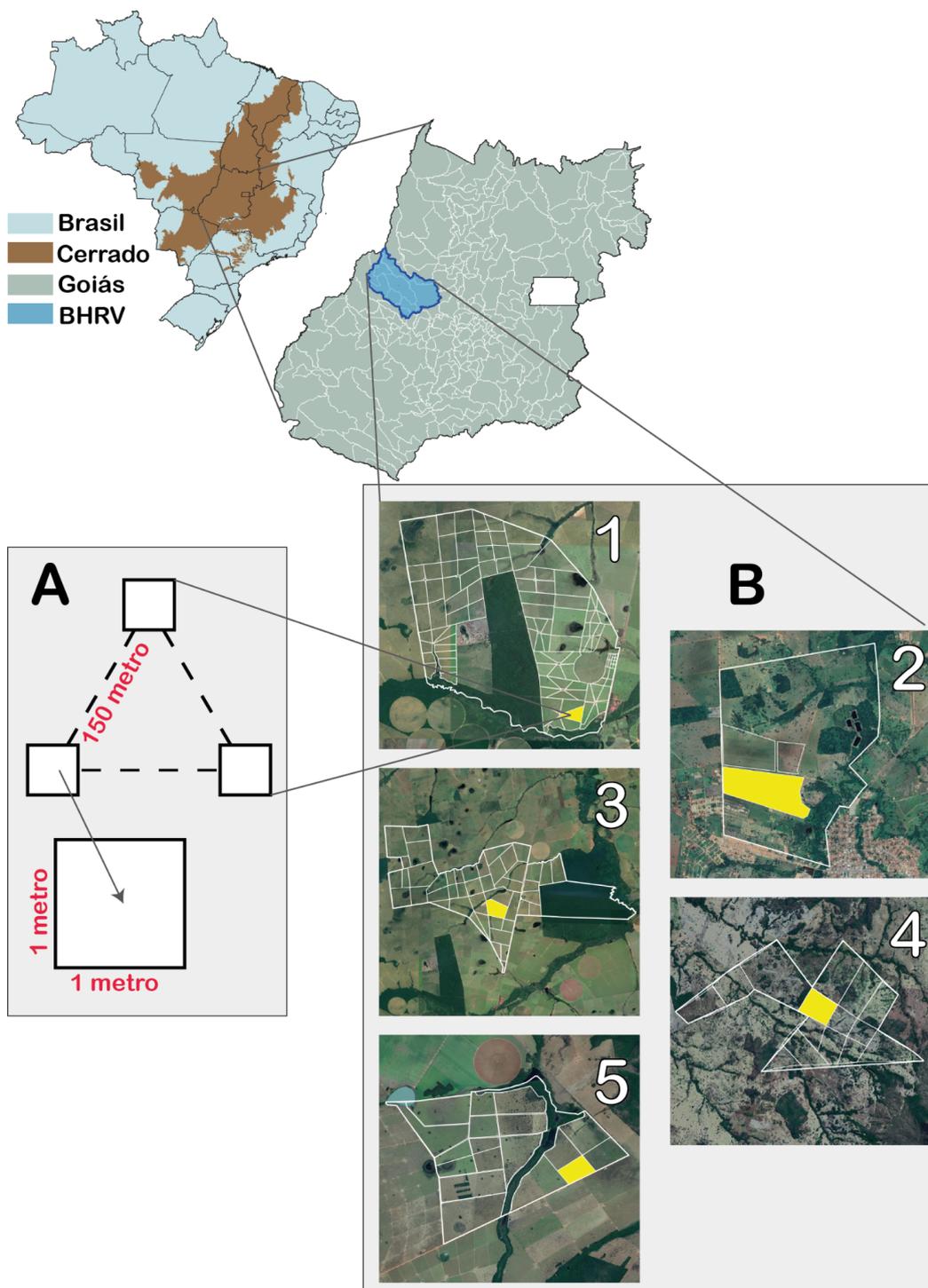


Figura 1.1. Desenho amostral para avaliação de pastagens na escala local (Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho), no estado de Goiás, na qual foram amostradas cinco propriedades rurais, com três amostras simples de 1m² em cada.

Tabela 1.1. Sistemas de produção e estratégias de manejo do pastejo em cinco fazendas, amostradas na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho (BHRV), na região oeste do estado de Goiás.

FZD	Sistema de produção	Manejo do pastejo no piquete avaliado	Área (ha)
Fzd 1	Cria e recria	Pastejo contínuo e reserva de área de pasto para a seca	1.500
Fzd 2	Cria, recria e engorda	Pastejo rotacionado sem reserva para a seca	4.840
Fzd 3	Cria	Pastejo contínuo com descansos periódicos ao longo do ano	7.260
Fzd 4	Cria e recria	Pastejo contínuo com descansos periódicos ao longo do ano	1.500
Fzd 5	Cria, recria e engorda	Pastejo contínuo com descansos periódicos ao longo do ano e suplementação com “concentrado”.	260

Na escala regional, a amostragem foi realizada por meio de um experimento conduzido no estado de Goiás no período entre 04/2019 e 01/2020, no qual foram amostrados 54 áreas de pastagens em quatro momentos do ano, que contemplaram o auge das estações seca e chuvosa na região (07/2019 e 01/2020, respectivamente) e as transições entre ambas (*i.e.* chuva-seca em 04/2019, e seca-chuva em 10/2019). O desenho amostral consistiu em subdividir o estado de Goiás em células de 50 por 50 km, e por meio da análise de qualidade das pastagens foram selecionados seis células para coleta de dados em campo (duas com predominância de pastagens pouco produtivas, duas com produtividade média e duas com produtividade alta) (figura 1.2A). Foram selecionadas as células que atenderam os seguintes critérios: (1) ter pelo menos 20% da área ocupada por pastagens e (2) ser possível transitá-la com veículo em qualquer período do ano. Em cada célula foram amostrados nove pontos, correspondendo a um pixel Landsat cada (30 m x 30 m) (figura 1.2b). Em campo, as pastagens foram avaliadas visualmente sete indicadores da condição da pastagem (Altura, Densidade de forragem, Cobertura do solo, Homogeneidade, Disponibilidade de folha verde, Razão folha/colmo, Idade de perfilhos), e a partir desta avaliação foi estimada a condição atual da pastagem, feita a sua classificação quanto ao estado de degradação nas classes E+, E0 e E-. Em cada ponto avaliado, foram coletadas amostras de biomassa em duas amostras simples com área de 0,25 m² cada, sendo que em áreas heterogêneas aumentou se o número de amostras simples, podendo chegar a cinco. Nesta escala o processamento da biomassa coletada consistiu em homogeneizá-las em um amostra composta, e fazer a secagem em estufa de ventilação de ar forçada, à temperatura de 55°C, durante 72 horas, não sendo realizada a separação entre biomassa viva e morta.

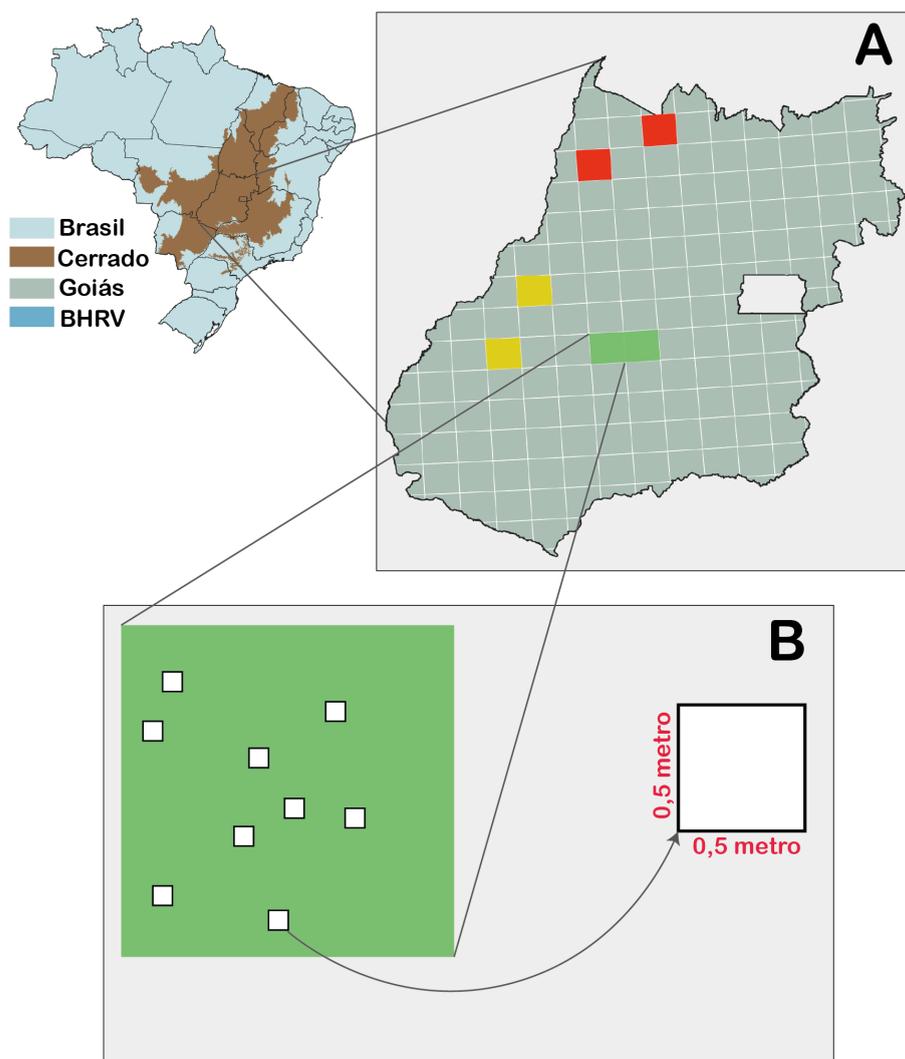


Figura 1.2. Estado de Goiás subdividido em pixels de 50 x 50 km, com destaque para os seis pixels amostrados no experimento para validação do escore de condição da pastagem (pixels vermelhos com predominância de pastagens de condição baixa, pixels amarelos predominância de pastagens de condição média, e pixels verdes com predominância de pastagens de condição alta).

A amostragem na escala nacional, foi realizada em campanhas de campo no período entre junho e outubro de 2019, com coletas nos biomas Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal, por limitação de recursos o bioma Caatinga não foi amostrado. Em cada bioma, o esforço amostral foi concentrado em municípios que apresentavam maiores números de contratos para recuperação de pastagens pelo plano ABC - Agricultura de Baixo Carbono, com a premissa que nesses municípios a atividade pecuária é heterogênea tanto em qualidade da pastagem quanto em diversidade de sistemas de produção (figura 1.3). As coletas foram realizadas de duas maneiras: (1) avaliando as pastagens ao longo do percurso, e (2) procurando atores do setor nos municípios (*e.g.* Empresas de Sementes, Empresas de Assistência Técnica, EMATER, Secretaria de Agricultura), para a partir destes contatos, compreender a atividade pecuária no município e identificar as áreas acessíveis a serem campo (*e.g.* pastagens improdutivas, pastagens recuperadas na última década e áreas de produção intensiva). As áreas

amostradas foram classificadas quanto ao estado de degradação nas classes E+, E0 e E-. Nesta escala não foram realizadas coletas de biomassa.



Figura 1.3. Municípios em que houve coletas nos cinco biomas visitados (Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal).

1.3.3. Dados satelitários e análises

Em cada ponto amostrado em campo nas três escalas espaciais, foram obtidas séries temporais de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) a partir de imagens do satélite Landsat 8, para os últimos cinco anos (2016 a 2020). As imagens foram filtradas com a banda de qualidade (*BQA*), para remoção de nuvens e sombras de nuvens (Roy et al., 2014). Um filtro temporal, baseado em *movie window* para detecção e remoção de ruídos foi aplicado a cada série temporal, e posteriormente para cada ano foi calculada a média mensal do índice.

Os estoques de biomassa nas escalas local e regional foram analisados comparativamente nas estações seca e chuvosa, sendo que na escala local foi avaliada também a similaridade entre o volume de biomassa viva e morta em ambas as estações. Para identificar se as variações no NDVI são correspondentes às variações no estoque de biomassa e na condição de pastagens, utilizamos modelos lineares para avaliar as relações entre essas duas variáveis ao longo do ano. Os modelos foram aplicados tanto à dimensão espacial quanto à condição da pastagem. Para avaliar o índice por classes de condição

da pastagem, consideramos os padrões sazonais de senescência e crescimento da pastagem durante a transição entre estações climáticas. Nesse sentido, buscamos identificar o potencial do NDVI em análises de estoques de biomassa e mapeamento da condição da pastagem.

1.4. Resultados

1.4.1. Estoque de biomassa em diferentes condições da pastagem e escalas espaciais

O estoque médio anual da biomassa total foi maior em escala local ($4,51 \pm 1,74$ ton/ha) quando comparado ao valor obtido na escala regional ($3,00 \pm 1,36$ ton/ha) (figura 1.4). A variação nos valores de biomassa aumentou com a heterogeneidade espacial, com amplitude de 3,43 ton/ha em escala local e 5,59 ton/ha em escala regional. A sazonalidade hídrica parece não ter influenciado a biomassa total pós pastejo, uma vez que os estoques médios calculados nas estações seca e chuvosa foram semelhantes dentro de uma mesma escala espacial. Localmente, as médias em ambas as estações tiveram o mesmo valor (4,48 ton/ha), enquanto em escala regional foram de 2,98 ton/ha e 3,03 ton/ha nas estações seca e chuva, respectivamente (figuras 1.4A e 1.4B).

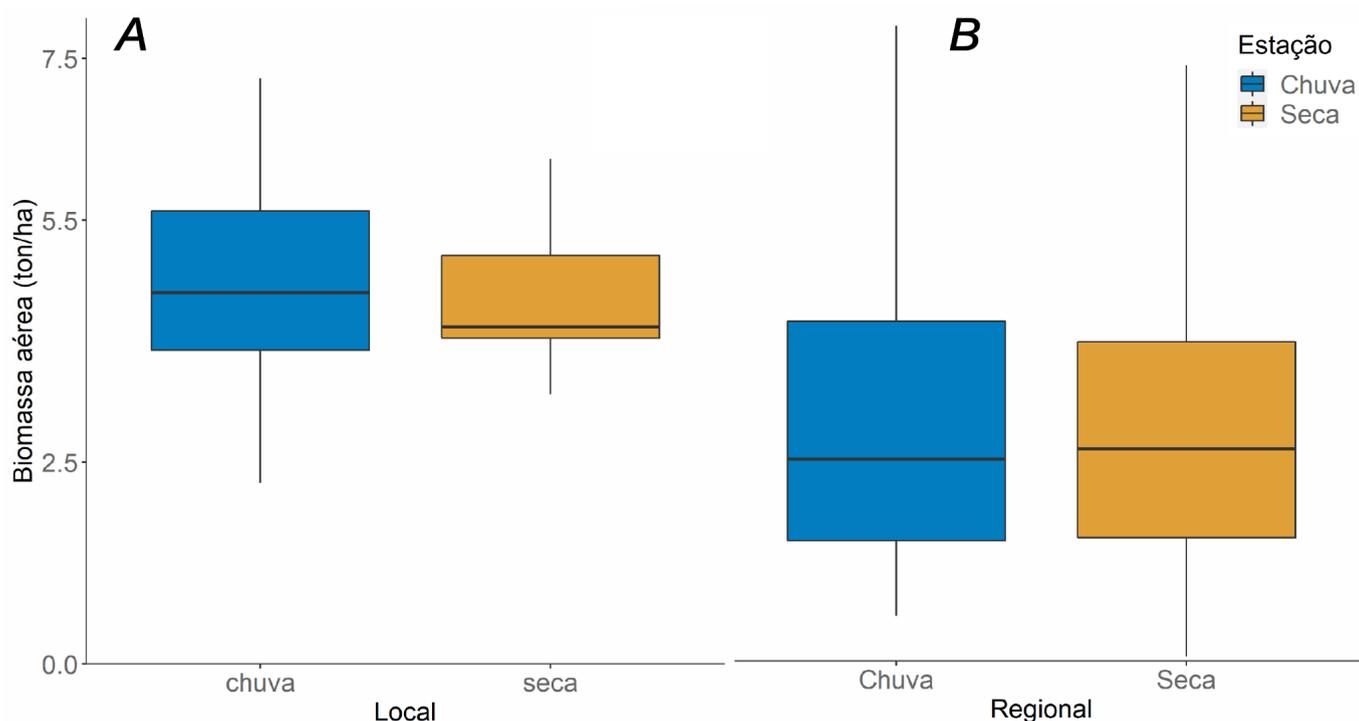


Figura 1.4. Estoque médio de biomassa aérea da pastagem durante as estações de chuva e seca, nas escalas (a) *Local* relativos ao período entre mai/2018 a abr/2019, e (b) *Regional* referente e abr/2019 e jan/2020.

Por outro lado, a partir da análise da composição morfológica das pastagens na escala local, foi possível observar a resposta à sazonalidade hídrica quando avaliadas as frações vivas e mortas da biomassa nessa escala. No período chuvoso houve semelhança entre os valores médios das frações

(aproximadamente 2,24 ton/ha), porém a biomassa da fração morta foi cerca de três vezes maior em comparação à fração viva na estação seca (figura 1.5).

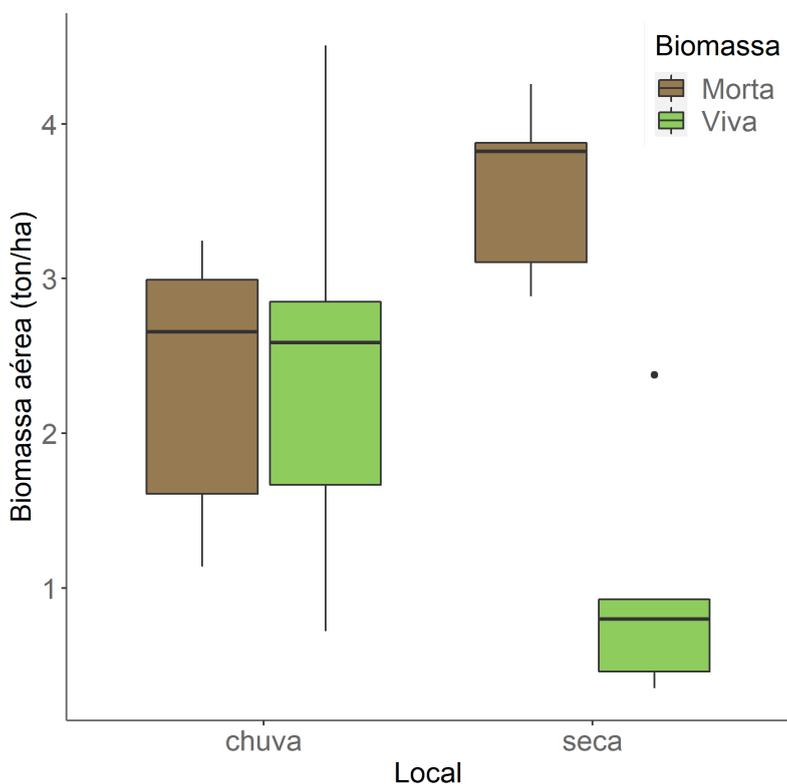


Figura 1.5. Estoque médio de biomassa área da pastagem estoque de biomassa viva e morta nas estações de seca e chuva, na escala local, em áreas amostradas na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho - GO.

Além das variações em função da escala espacial e sazonalidade hídrica, a biomassa total também respondeu à condição da pastagem, pois as maiores médias foram encontradas nas pastagens classificadas como não degradadas (E+), tanto na escala local ($5,02 \pm 1,80$ ton/ha) quando na escala regional ($3,93 \pm 1,98$) ton/ha, respectivamente. As menores médias, por outro lado, foram registradas nas áreas classificadas como tendo maior estado de degradação (E-), com valores de $2,83 \pm 2,02$ ton/ha e $1,42 \pm 1,35$ ton/ha, nas escalas local e regional, respectivamente. Um aspecto importante a ser mencionado relaciona-se aos valores de biomassa total representarem de forma aparente o estado da pastagem. Apesar das médias de biomassa das classes E+ e E0, em escala local, serem próximas (diferença de 0,26 ton/ha), as diferenças das médias entre as classes são maiores em escala regional (1,15 e 1,36 ton/ha, entre E+ e E0, e E0 e E-, respectivamente) (figura 1.6).

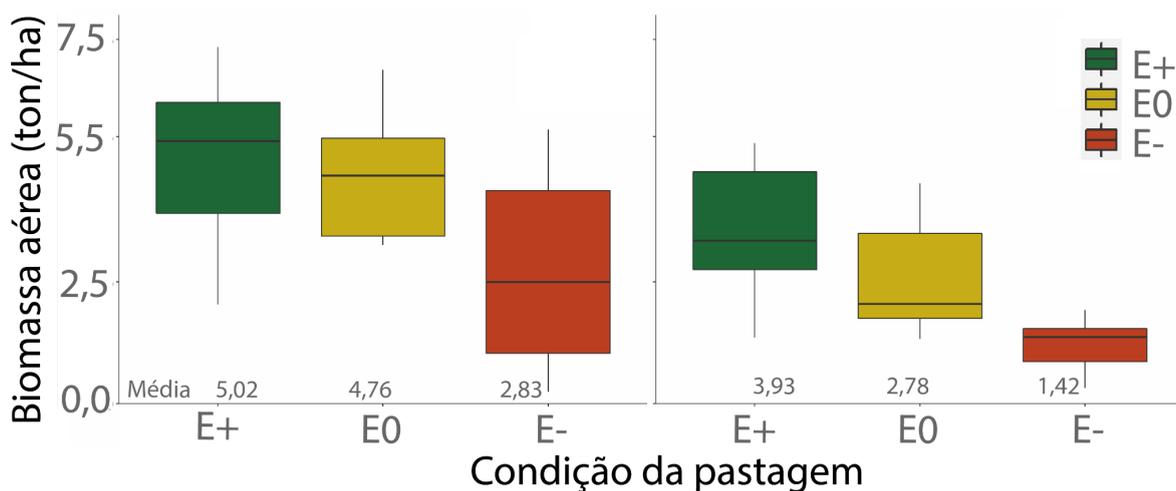


Figura 1.6. Estoque médio de forragem por classe de condição da pastagem nas escalas *Local* referente ao período entre mai/2018 e abr/2019 (a), e *Regional* referente ao período de abr/2019 e jan/2020 (b).

1.4.2. Relação entre NDVI e biomassa de pastagens em diferentes escalas espaciais

O NDVI é reconhecido como um *proxy* do vigor da pastagem por responder à condição da vegetação. De forma geral, percebe-se que os maiores valores de NDVI foram registrados na estação chuvosa (figura 1.7). Em escala regional, a relação entre NDVI e biomassa foi significativa ($R^2 = 0,10$ e $p < 0,01$) (figura 1.7A). Por outro lado, este padrão não foi mantido em escala local ($R^2 = 0,03$ e $p > 0,10$) (figura 1.7B). Para que a relação entre NDVI e biomassa de pastagens seja melhor compreendida, é necessário levar em consideração uma propriedade deste parâmetro, através do qual é possível avaliar o grau de cobertura verde (*degree of greenness*) presente em coberturas vegetais. Ao avaliarmos a relação entre NDVI e a fração viva da biomassa, em escala local, observamos um coeficiente de determinação significativo ($R^2 = 0,46$ e $p < 0,01$) (figura 1.7C), e como esperado, a relação com a fração morta da biomassa, apesar de significativa, é negativa e fraca ($R^2 = 0,12$ e $p = 0,02$) (figura 1.7D). Além disso, a relação positiva mais forte entre NDVI e dados de biomassa foi encontrada quando analisada com a razão entre as frações da biomassa viva e morta ($R^2 = 0,56$ e $p < 0,01$) (figura 1.7E).

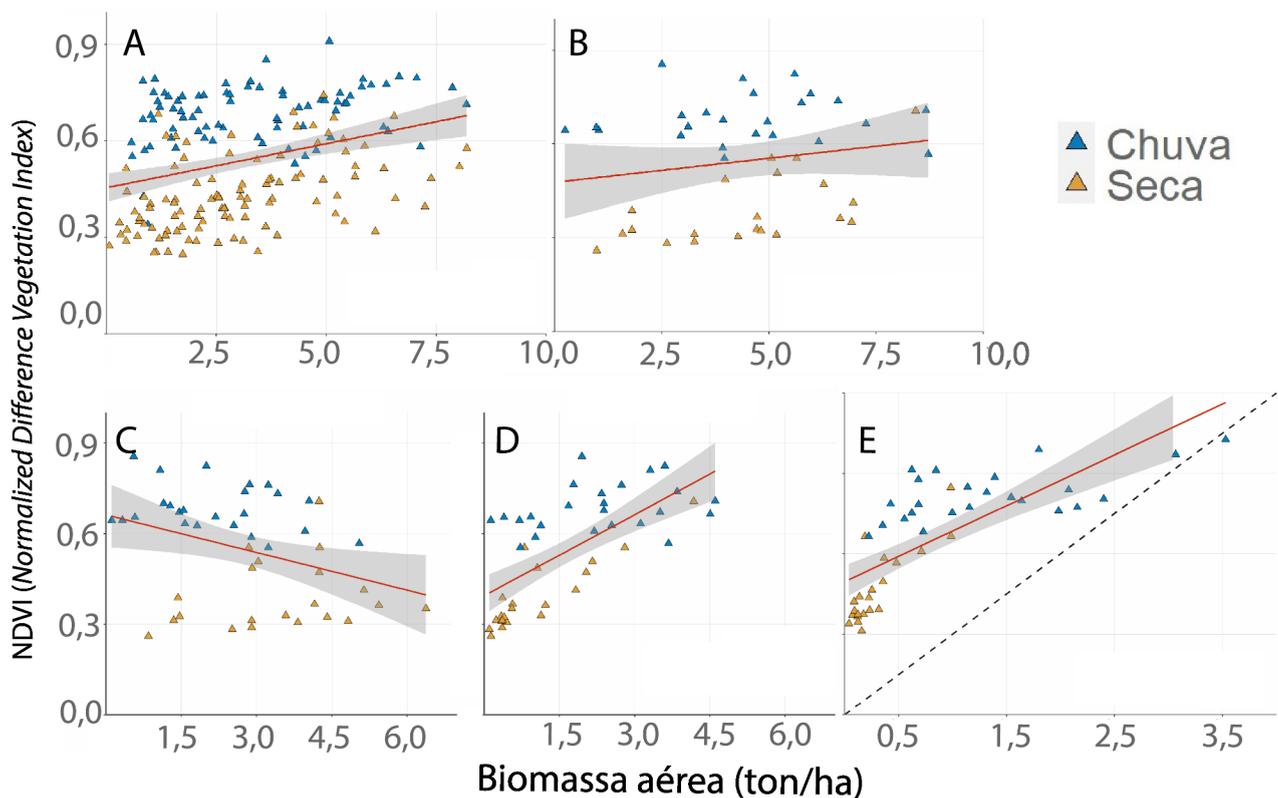


Figura 1.7. Relação entre NDVI e (a) estoque de biomassa total da pastagem na escala *Regional* (mai/2018 e abr/2019); (b) biomassa total na escala *Local* (abr/2019 e jan/2020); (c) biomassa na fração viva; (d) biomassa na fração morta e; (e) razão entre as frações de biomassa viva e morta.

Os padrões temporais de senescência e crescimento vegetativo (estimados pela queda e pelo aumento nos valores de NDVI ao longo de um ano, respectivamente) responderam à condição da pastagem, uma vez que foi observada senescência precoce e crescimento vegetativo tardio nas áreas degradadas (E-), em comparação à áreas com melhor qualidade (E+ e E0) (figura 1.8). É importante ressaltar que, anualmente, a classe E- apresenta os menores valores de NDVI, registrados no auge da seca, independente da escala espacial investigada; local, regional e nacional, sendo ainda menores nesta última (figura 1.8). Contudo, devido a peculiaridades do manejo da pastagem na área classificada como severamente degradada na escala local, o padrão temporal nessa classe foi distinto, apresentando altos valores de NDVI. Nessa área em particular, o processo de degradação da pastagem se deu por alta pressão de pastejo, durante o período do experimento, e na fase final deste, houve um processo de recuperação da pastagem, o que pode ser observado por um aumento no valor de NDVI no primeiro semestre de 2019. Esse padrão reafirma a sensibilidade do índice a variações no vigor da vegetação.

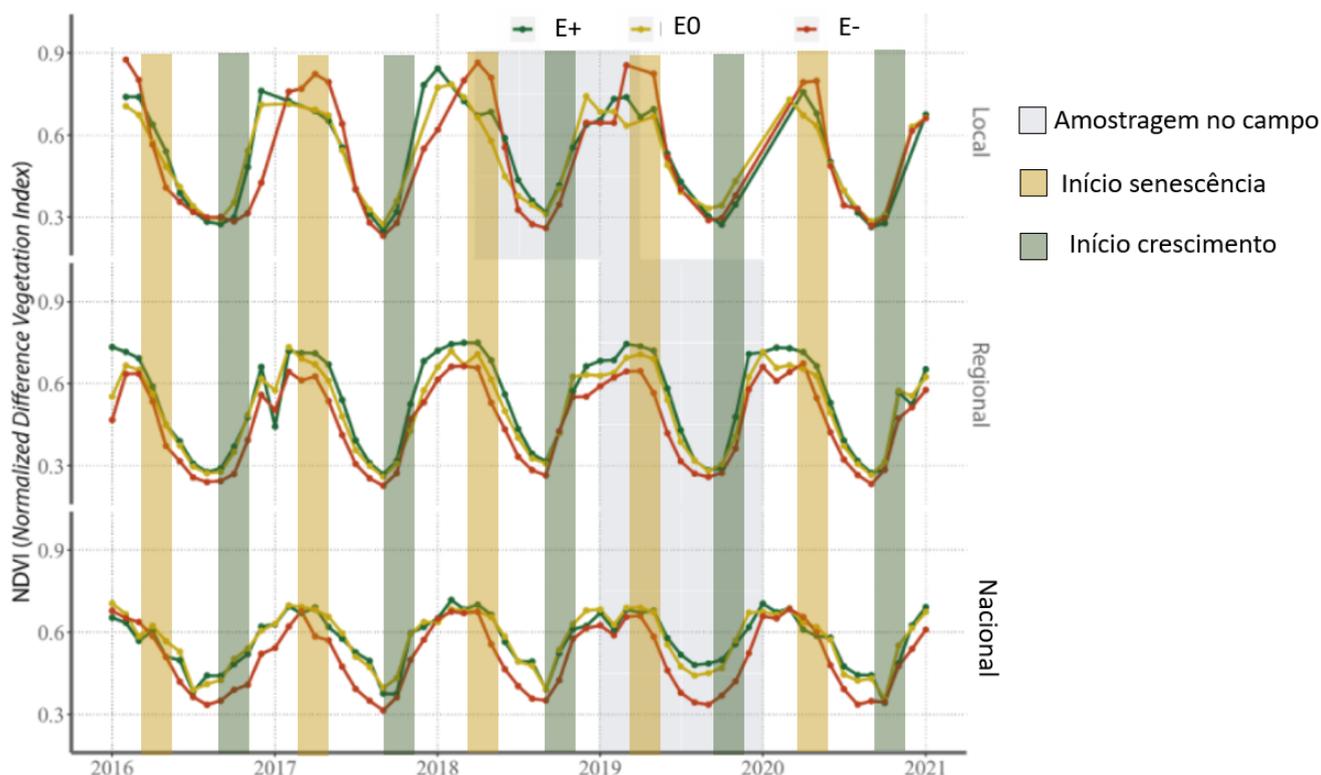


Figura 1.8. Séries temporais médias do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) por classe de condição da pastagem, obtidos a partir de imagens do satélite Landsat 8 do período entre 2016 e 2020 com destaque para o período amostrado em campo.

A análise das variações espectrais de pastagens no Brasil em diferentes escalas espaciais mostrou influência sobre os valores médios anuais de NDVI e, conseqüentemente, sobre seu potencial uso para classificar as áreas de pastagens quanto a sua condição. Em escala regional, os valores médios anuais seguiram uma seqüência do tipo $E^- < E0 < E+$ (tabela 2). Entretanto, esse padrão não se repetiu nas demais escalas, pois a menor média na escala local foi registrada em E0, e esta mesma classe também possuía o maior valor na escala nacional. Além dos valores médios anuais, o padrão mensal de NDVI em cada classe de condição da pastagem também apresentou variações nas diversas escalas analisadas, evidenciando que os critérios amostrais, número de amostras e abrangência da área são aspectos relevantes para compreender a relação entre o índice e as áreas de pastagens, e evidenciam que não é possível estabelecer limites fixos para classificar a condição da pastagem em múltiplas escalas (figura 1.9).

Tabela 1.2. Mediana anual do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - landsat 8), por classe de condição da pastagem nas escalas local, regional e nacional, tendo por referência o ano em que foi realizada a amostragem em campo (i.e. 2018-2019 na escala local, e 2019-2020 nas escalas regional e nacional).

Condição da pastagem	Escala de análise		
	Local	Regional	Nacional
E+	0.589	0.684	0.609
E0	0.543	0.624	0.627
E-	0.554	0.565	0.523

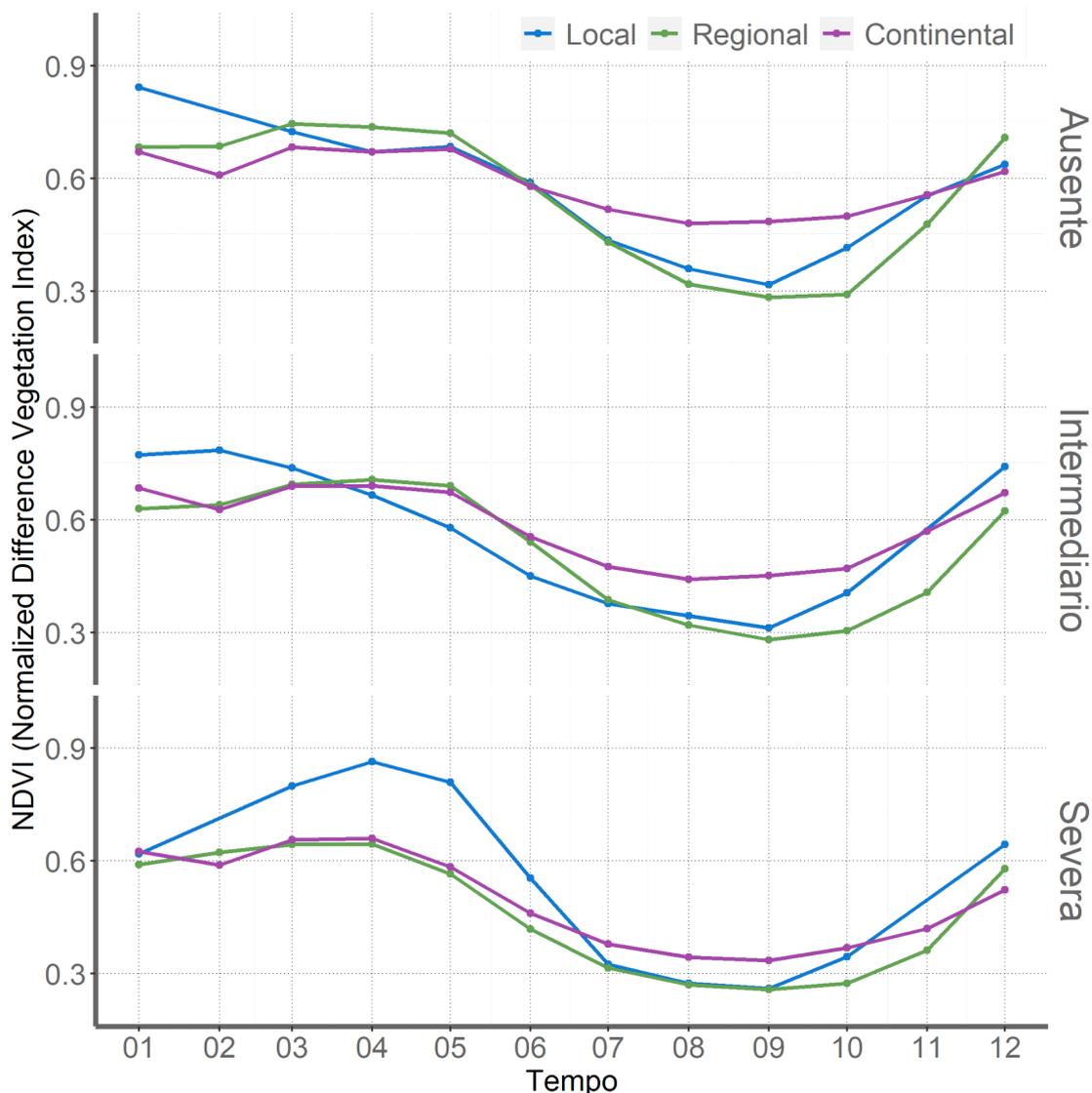


Figura 1.9. Média mensal do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) por classes de condição da pastagem, obtidos a partir de imagens do satélite Landsat 8, nas escalas local, regional e nacional.

1.5. Discussão

1.5.1. Estoque de biomassa em diferentes condições da pastagem e escalas espaciais

A complexidade da atividade pecuária aumenta em escalas espaciais mais abrangentes, envolvendo maior diversidade de manejo, espécies forrageiras e condições ambientais. A resultante é o aumento na variabilidade dos estoques de biomassa. Valores entre 0,74 ton/ha e 6,33 ton/ha são compatíveis com estudos com pastagem realizados no Brasil (Oliveira e Couto, 2018), e também no exterior (*e.g.*, Austrália - Chen et al., 2021, Estados Unidos - Edirisinghe et al., 2011, Etiópia - Meshesha et al., 2020). Portanto, os resultados observados no presente estudo estão dentro dos limites de estoque de biomassa de pastagem em termos globais, e a alta amplitude de variação registrada (5,59 ton/ha) reflete a heterogeneidade desta classe de uso da terra. Entender os motivos da variabilidade é importante pois, quanto maior for a variação dos dados, mais difícil é estabelecer a relação entre biomassa, dados

satelitários e estabelecer classes de condição da pastagem espacialmente abrangentes. A amplitude encontrada foi alta principalmente quando comparada com estudos que realizam a amostragem da biomassa em parcelas com exclusão do pastejo. Este tipo de pesquisa geralmente é feito em escala espacial reduzida e condições ambientais relativamente homogêneas, onde o foco é a avaliação da relação entre a biomassa de pastagem e espécies, ou variedades de forrageiras cultivadas. Portanto, neste tipo de experimento é removido um importante fator responsável pela variação na biomassa a ser amostrada, que é a pressão de pastejo. Por outro lado, estudos que investigam a relação entre as variáveis obtidas por sensoriamento remoto e os parâmetros da pastagem tendem a priorizar a avaliação da pastagem sob as condições normais de manejo (Aguiar et al., 2017; Chen et al., 2021). Quando se compara a amplitude de biomassa amostrada sob estas condições (e.g., Edirisinghe et al., 2011; Chen et al., 2021) os valores são similares aos observados neste trabalho.

Em regiões tropicais com acentuada sazonalidade hídrica, como ocorre neste estudo, espera-se que o estoque de biomassa variem ao longo do ano, apresentando um período de ganho em biomassa durante a estação chuvosa, e um período de senescência com redução na produção durante a estação seca. Essa resposta à condição climática resulta no fenômeno conhecido como estacionalidade da produção de forragem, que é caracterizado por uma curva de produção mensal síncrona à sazonalidade climática. O estoque de biomassa, por outro lado, está relacionado ao volume de biomassa disponível na área de pastagem no momento da observação, e portanto, depende tanto de fatores ambientais (e.g. sazonalidade climática e produtividade), quanto de fatores antrópicos (e.g. manejo da pastagem e do pastejo). A influência desses fatores pode resultar em estoques de biomassa semelhantes durante as estações seca e chuvosas, como observado no presente estudo, pois o estoque depende de eventos anteriores à amostragem em campo (i.e. a área pode estar em descanso ou ter sido pastejada recentemente), que podem afetar parâmetros relacionados ao estoque de biomassa, como a altura e a composição morfológica da forragem (Carvalho et al., 2015).

A redução na produção de biomassa durante a estação seca, somadas aos eventos de pastejo, resultam em uma dinâmica acentuada nas frações viva e morta. Como resultado desta dinâmica, o volume de biomassa viva e morta foi similar durante a estação chuvosa, entretanto, com um volume de biomassa morta três vezes (3,6) maior que o de biomassa viva durante a estação seca. A combinação dos dois fatores supracitados (redução na produção de biomassa e eventos de pastejo), são determinantes para essa dinâmica, uma vez que os animais pastam de modo seletivo, priorizando as partes mais palatáveis e protéicas, que vem a ser a biomassa viva, especialmente as folhas, como evidenciado em trabalhos que utilizam a técnica de pastejo simulado para avaliar a composição química da pastagem consumida pelos animais. Nesse processo, a biomassa viva consumida durante a estação seca não é compensada na mesma proporção pela produção de biomassa, já que a produtividade é reduzida nesse período. Em pastagens

degradadas a redução na produtividade em função da sazonalidade climática pode ser mais acentuada que em áreas produtivas.

As condições ambientais englobam uma diversidade de fatores que tanto limitam quanto potencializam a produção de forragem, e que representam o recurso ambiental disponível. Dentro deste limite potencial imposto pelo ambiente, a produção e estoque de biomassa das pastagens variam em respostas a fatores antrópicos que estão relacionados tanto ao manejo da pastagem (*e.g.* fertilização, correção solo, controle de invasoras), quanto a dinâmica do pastejo (*e.g.* rotacionado, contínuo). Assim, é esperado que a biomassa apresente variações correspondentes a condição das pastagens, com os maiores estoques ocorrendo nas áreas mais produtivas, reduzindo ao aumentar o grau de degradação, padrões que foram observados no presente estudo. As áreas de pastagens com degradação severa apresentaram menor volume de biomassa, em comparação a áreas com degradação intermediária ou ausente. A redução no estoque de biomassa é uma das características das pastagens pastagens, que independente do tipo de degradação (biológica ou agrônômica), tende a apresentar menor disponibilidade de forragem e conseqüentemente menor capacidade de suporte, com o avanço no estágio de degradação.

1.5.2. Relação entre NDVI e biomassa de pastagens em diferentes escalas espacial

Mesmo variando em resposta em resposta a alterações da vegetação na superfície terrestre, o NDVI apresentou baixa relação com os estoques de biomassa total, esse padrão vai ao encontro do observado por Chen et al., (2021), em estudo no qual os autores concluíram que somente com o NDVI a predição dos estoques de biomassa por meio de modelos lineares não é viável, sendo necessária a adição de outros índices de vegetação e bandas espectrais a análise, aumenta o poder de predição do estoque de biomassa das pastagens por dados remotos. Por outro lado, Edirisinghe et al., (2011) observaram alta relação entre NDVI e o estoque de biomassa, e concluíram que por meio de modelos exponenciais, é possível usar este índice para estimar o estoque de biomassa com precisão superior a 80%. O mesmo foi observado por Meshesha et al., (2020), que encontraram alta relação entre o NDVI, obtido a partir de dados do satélite Sentinel 2, e a biomassa da pastagem, amostrada em área na qual os autores fizeram isolamento, para evitar pastejo ou outras interferências durante o experimento. No presente estudo os resultados evidenciaram baixo potencial uso do NDVI em estimativas de biomassa por meio de modelos lineares. Esses resultados indicam que os critérios amostrais, como a não exclusão do pastejo, influenciam na correlação entre o índice de vegetação e o estoque de biomassa.

Por outro lado, os resultados observados no presente estudo reafirmam a eficácia do NDVI como um *proxy* do vigor da pastagem, observado pela alta correlação com a biomassa viva. Sendo similar a outros estudos nesta perspectiva, que observaram alta correlação entre este índice e a biomassa verde da

pastagem (Edirisinghe et al., 2011; Reis et al., 2020). Em áreas não degradadas, que tendem a apresentar maior vigor e produção de forragem, essa relação é mais evidente..

A relação entre o NDVI e a razão biomassa viva/morta é mais acentuada em áreas não degradadas, e reduz com o aumento do grau de degradação, como observado no presente estudo. A perda de vigor é uma das características do processo de degradação em pastagens, influenciando a taxa de senescência da vegetação na transição entre as estações climáticas chuva-seca, e de crescimento na transição seca-chuva. Esses processos, senescência e crescimento da vegetação, alteram a composição da biomassa em termos de proporção da matéria viva e morta, afetando também as respostas espectrais da vegetação e por consequência os padrões temporais do NDVI. O padrão temporal do NDVI ao longo do tempo variou em função da condição da pastagem e da escala espacial analisada, evidenciando que não é possível estabelecer limiares únicos para mapear a condição de pastagens em áreas tão amplas quanto o território brasileiro. As séries temporais desse índice apresentam padrão correspondente a sazonalidade climática, com menores valores durante a estação seca e maiores valores durante a estação chuvosa. Áreas de pastagens com degradação severa apresentam menores valores do índice, e padrão temporal distintas das demais classes. Nessa classe, o processo de senescência se inicia antes das demais classes, provavelmente por menor tolerância ao estresse hídrico, e o processo de “*Green-Up*” ocorre tardiamente em comparação às demais classes.

Os resultados encontrados neste estudo evidenciam a complexidade e heterogeneidade das pastagens brasileiras, já demonstradas em outros estudos voltados a esse uso da terra no país (Latawiec et al., 2015; Aguiar et al., 2017; Parente et al., 2019). A compreensão dessa complexidade é fundamental em estratégias para o mapeamento e classificação das pastagens quanto a sua condição. Nesse contexto, a análise da resposta espectral e estoques de biomassa aqui apresentados tem potencial para subsidiar estudos de mapeamento qualitativo das pastagens no Brasil, como o proposto no segundo capítulo da presente tese. A análise em múltiplas escalas mostrou que o NDVI tem potencial para distinguir a condição das pastagens, e consequentemente, para mapear as áreas de pastagens produtivas e as degradadas. Contudo, as diferenças observadas entre as três escalas evidenciam que não é viável a definição de limiares únicos para a classificação das pastagens em todo o território nacional. Assim, considerando a diversidade de condições ambientais em que as pastagens são encontradas, é fundamental definir os limiares das classes de degradação levando em conta regiões homogêneas em condições ambientais. Outra abordagem viável é a homogeneização da informação entre as diferentes regiões, de modo que as variáveis expressem o mesmo significado em termos de qualidade das pastagens. Neste cenário, os limiares únicos para condição da pastagem se tornam uma alternativa viável.

1.6. Conclusões

Neste estudo, em que analisamos o estoque de biomassa das pastagens em diferentes escalas, concluímos que a média anual e amplitude dos estoques podem variar em função da escala espacial, e observamos que houve semelhança nos estoques durante as estações seca e chuvosa em função a ocorrência de pastejo contínuo. A razão biomassa viva e morta, entretanto, apresenta acentuada dinâmica, podendo ser similares durante a estação chuvosa, contudo durante a estação seca o estoque de biomassa morta superando em mais de três vezes a biomassa viva, evidenciando o maior vigor da pastagem no período chuvoso.

O NDVI apresentou alto potencial como indicador do vigor da pastagem, sendo observada acentuada relação entre este índice e a razão biomassa viva/morta. Em áreas de pastagens não degradadas, e portanto com maior vigor, essa relação foi ainda mais evidente. Sugerindo que apesar do baixo potencial em prever o estoque de biomassa nas áreas avaliadas, o índice apresenta alto potencial para identificação e mapeamento do vigor vegetativo e conseqüentemente, da qualidade das pastagens.

O padrão temporal do NDVI ao longo do tempo varia em função da condição da pastagem e da escala espacial analisada, evidenciando que não é possível estabelecer limiares únicos para mapear a condição de pastagens em áreas tão amplas quanto o território brasileiro. As séries temporais desse índice apresentam padrão correspondente a sazonalidade climática, com menores valores durante a estação seca e maiores valores durante a estação chuvosa. Áreas de pastagens com degradação severa apresentam menores valores do índice, e padrão temporal distintas das demais classes, com padrões temporais de crescimento e senescência levemente distintos. Análises espacializadas, com informações de campo mais abrangentes são recomendadas para melhor compreensão desses padrões.

1.7. Referências

1. ABIEC. Perfil da pecuária no Brasil, *Beef Report*. **2020**, p. 49.
2. Aguiar, D.; Mello, M.; Nogueira, S.; Gonçalves, F.; Adami, M.; Rudorff, B. MODIS Time Series to Detect Anthropogenic Interventions and Degradation Processes in Tropical Pasture. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 73.
3. Arantes, A.; Couto, V.; Sano, E.; Ferreira, L. Livestock intensification potential in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. *Pesq. Agrop. Bras.* **2018**, *53*, 1053–1060.
4. Carvalho, D., Cabral, L., Silva, J., Abreu, J., Galati, R., Paula Gentile, G., Camargo, L., Soares, J., Junior, J. Suplementos para terminação de ovinos em pastos de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. *Semin. Agrar.* 2015, *36*, 313–326.
5. Chen, Y.; Guerschman, J.; Shendryk, Y.; Henry, D.; Harrison, M. Estimating Pasture Biomass Using Sentinel-2 Imagery and Machine Learning. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 603.
6. Dias-Filho, M.B. *Degradação de Pastagens: Processos, Causas e Estratégias de Recuperação*, 4th ed.; Embrapa Amazônia Oriental: Belém, Brazil, **2011**; p. 215.

7. Dias-Filho, M.B. *Diagnóstico das Pastagens no Brasil*. Embrapa Amazônia Oriental: Belém, Brazil, **2014**; p. 22.
8. Edirisinghe, A.; Hill, M.; Donald G.; Hyder, M. Quantitative mapping of pasture biomass using satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **2011**, 32:10, 2699-2724
9. FAO. Five practical actions towards low-carbon livestock, **2019**.
10. IBGE, *Pesquisa Pecuária Municipal*. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2019>, Acesso em dez-2020, **2020**.
11. Latawiec, A.E.; Strassburg, B.B.N.; Valentim, J.F.; Ramos, F.; Alves-Pinto, H.N. Intensification of cattle ranching production systems: Socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. *Animal* **2014**, 8, 1255–1263.
12. MAPA. Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – PLANO ABC, *Revista Brasileira de Geografia Física*, **2012**.
13. Meshesha, D., Ahmed, M., Abdi, D., Haregeweyn, N. Prediction of grass biomass from satellite imagery in Somali regional state, eastern Ethiopia. *Heliyon*, 2020, 6, e05272
14. Oliveira, E.; Couto, V. Productive and Economic Viability of Raising Beef Cattle in the Savanna of the Brazilian State of Goiás. *Rev. Econ. e Sociol. Rural*, **2018**, 56, 395–410.
15. Parente, L.; Mesquita, V.; Miziara, F.; Baumann, L.; Ferreira, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sens. Environ.* **2019**, 232, 111301.
16. Pereira, O.; Ferreira, L.; Pinto, F.; Baumgarten, L. Assessing Pasture Degradation in the Brazilian Cerrado Based on the Analysis of MODIS NDVI Time-Series. *Remote Sens.* **2018**, 10, 1761.
17. Ponzoni, J.; Shimabukuro, Y. *Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação*. Ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 128 p.
18. Reinermann, S.; Asam, S.; Kuenzer, C. Remote sensing of grassland production and management-A review. *Remote Sens.* **2020**, 12.
19. Reis, A.; Werner, J.; Silva, B.; Figueiredo, G.; Antunes, J.; Esquerdo, J.; Coutinho, A.; Lamparelli, R.; Rocha, J.; Magalhães, P. Monitoring Pasture Aboveground Biomass and Canopy Height in an Integrated Crop–Livestock System Using Textural Information from PlanetScope Imagery. *Remote Sens.* **2020**, 12, 2534.
20. Roy, D., Wulder, M., Loveland, T., Woodcock, C., Allen, R., Anderson, M., Helder, D., Irons, J., Johnson, D., Kennedy, R., Scambos, T., Schaaf, C., Schott, J., Sheng, Y., Vermote, E., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Hipple, J., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z., Lymburner, L., Masek, J., Mccorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R., Zhu, Z. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens. Environ.* 2014, 145, 154–172.
21. Volpe, E.; Marchetti, M.; Macedo, M.; Rosa, E. Renovação de pastagem degradada com calagem, adubação e leguminosa consorciada em neossolo Quartzarênico. *Acta Sci. Agron.* 2008, 30, 131–138.
22. Xu, D.; Guo, X. Some insights on grassland health assessment based on remote sensing. *Sensors (Basel)*. **2015**, 15, 3070–3089.

Capítulo 2 - Dinâmica espacial e da qualidade das pastagens no Brasil entre 2010 a 2018

2.1. Resumo

A pecuária brasileira é predominantemente extensiva, com aproximadamente 90% da produção sustentada a pasto. O país é o maior exportador de carne bovina do mundo, e para sustentar seu rebanho cerca 20% do território é ocupado por pastagens. A partir da década de 1970, houve expressivo incremento na produção pecuária no país, com expansão acentuada na área ocupada por pastagens até a década de 2000. No cenário atual de mudanças climáticas e em que terras para cultivo estão se tornando um recurso limitado, há uma crescente necessidade de aumentar a eficiência no uso deste recurso. Estima-se que cerca de metade das pastagens brasileiras estejam degradadas ou apresentem algum nível de degradação, entretanto ainda não há um mapeamento da qualidade das pastagens em escala nacional com resolução espacial alta ou moderada, o que é fundamental para subsidiar iniciativas públicas e privadas voltadas ao ganho de eficiência e produtividade nestas áreas. Nesse estudo, mapeamos e avaliamos a dinâmica espaço-temporal da qualidade das pastagens no Brasil, no período entre 2010 e 2018, considerando três classes de degradação: *Ausente* (D0), *Intermediária* (D1), e *Severa* (D2). Não houve variação na área total ocupada por pastagens no período avaliado, entretanto, a dinâmica espacial foi acentuada, com uma área de ~31 Mha - Milhões de hectares mudando de lugar, com retração no centro-sul e expansão ao norte, sob área de vegetação nativa. O percentual de pastagens não degradadas aumentou ~12% (29,1% em 2010 e 41,1% em 2018), devido a recuperação de áreas degradadas e a sua substituição por novas áreas de pastagens como resultado da dinâmica espacial predominante. No entanto, as pastagens severamente degradadas ainda somam uma área de ~44,3 Mha, e a degradação intermediária corresponde a um terço da área total (~32,2%). A dinâmica na qualidade das pastagens não é homogênea nas classes de tamanho das propriedades rurais. Observamos que nas cerca de 2,68 milhões de propriedades com atividade pecuária, a proporção com ganhos de qualidade foi duas vezes menor nas pequenas propriedades em comparação às grandes, e a proporção com perdas foi três vezes maior, evidenciando um aumento na desigualdade entre propriedades com mais e menos recurso (grandes e pequenas, respectivamente). As áreas ocupadas por pastagens no Brasil podem desempenhar um importante papel como reserva de terra, que com mudanças no setor, podem servir a outros usos e coberturas.

2.2. Introdução

O Brasil possui o maior rebanho bovino comercial do mundo, com cerca de ~215 milhões de animais segundo o IBGE (2020) ou ~238 milhões segundo o USDA (2019), alcançado a posição de segundo maior produtor e maior exportador de carne (IBGE, 2020; USDA, 2019). Entretanto, com um rebanho maior que o da União Europeia e Estados Unidos somados, a produção de carne bovina no país é

aproximadamente a metade da alcançada por ambos, sugerindo que a produção é baixa (USDA, 2019). Uma das razões para a baixa produção é que a pecuária brasileira é predominantemente extensiva, com mais de 90% do rebanho sustentado a pasto (Dias-Filho, 2011). Por este motivo as pastagens ocupam grande extensão territorial, aproximadamente 20% do território do país (Parente et al., 2019). Nas últimas décadas houve crescimento acentuado na atividade pecuária e mesmo havendo aumento significativo na lotação bovina segundo dados do IBGE, houve também grande expansão nas áreas ocupadas por pastagens (Vieira-Filho e Fishlow, 2017). Perante et al., (2019) observaram que existe correlação entre a expansão da área ocupada por pastagens e o desmatamento no período entre 1985 e 2010, no bioma amazônia, indicando que sua dinâmica espaço-temporal inclui a conversão de áreas nativas para pastagem, uma vez que o cultivo de forrageiras geralmente é o primeiro uso em áreas de conversão da vegetação nativa (Cardille e Foley, 2003; Barona et al., 2010). O processo de perda produção a níveis que fazem o pecuarista abandonar suas terras e buscar locais para instalação de novas pastagens precisa ser compreendido para que manejos mais eficientes possam ser sugeridos.

A degradação das pastagens é uma das principais causas de perda em produção no sistema pecuário Brasileiro, e um desafio enfrentado pelo setor a décadas (Oliveira et al., 2004; Volpe et al., 2008). O processo de degradação das pastagens pode ocorrer ao longo de vários anos e uma de suas características é a redução na produção de forragem e como consequência, a diminuição na oferta de alimento para o gado e redução na capacidade de suporte (Dias-Filho, 2014). Vários são os fatores que podem levar ao processo de degradação das pastagens, estando a maioria ligados a práticas de manejo inadequado, incluindo a escolha da forrageira, lotação bovina, adubação, dentre outros (Dias-Filho, 2011; Lahsen et al., 2016). O manejo adequado, pode recuperar áreas com baixa produtividade e aumentar a produção pecuária, contribuindo desta forma com a redução no desmatamento e consequentemente, nas emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) relacionadas ao setor (Bustamante et al., 2012; Braz et al., 2013; West et al., 2014; Pereira et al., 2018; FAO, 2019).

Nesse contexto, têm surgido iniciativas que incentivam a recuperação de pastagens degradadas e a adoção de manejos que promovam ganhos em produtividade e sustentabilidade, e reduzam impactos ambientais (EMBRAPA, 2021; Alves-Pinto et al., 2015; ICV, 2021). O Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), uma iniciativa do governo federal aprovada em 2011, é uma dessas iniciativas, e foi desenvolvido visando alcançar os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, relacionados à redução de emissões de GEE (MAPA, 2012). Como parte deste plano foi criado o programa de Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD), com a meta de promover a recuperação de 15 Mha de pastagens degradadas em todo o País até o ano de 2020, o que representa mais de 8% das pastagens brasileiras (MAPA, 2012; Latawiec et al., 2017). Portanto, o mapeamento e análise da qualidade das pastagens em escala nacional é fundamental tanto para avaliar a eficácia de iniciativas como o Plano

ABC, quanto para subsidiar ações futuras que busquem promover um uso mais eficiente das áreas ocupadas por pastagens no Brasil.

O sensoriamento remoto orbital tem sido fundamental em iniciativas para o mapeamento de pastagens, uma vez que o aumento na disponibilidade de imagens, combinado ao avanço das técnicas de análises e da capacidade computacional, tem possibilitado uma melhor avaliação das mudanças de uso e cobertura da terra em uma escala espaço-temporal sem precedentes (Souza et al., 2020). Além do monitoramento da dinâmica da área coberta por pastagens, é possível também utilizar o sensoriamento remoto para análises qualitativas. Nesse contexto, estudos voltados ao mapeamento e monitoramento da qualidade das pastagens por meio de sensoriamento remoto têm sido observados em várias regiões no mundo (Gao et al., 2006; Olexa e Lawrence, 2014; Reinermann et al., 2020). A maioria desses estudos utilizaram dados de resolução moderada (MODIS) (Aguiar et al., 2017; Arantes et al., 2018; Pereira et al., 2018). E mais recentemente, dados de alta resolução têm sido utilizados em avaliações da qualidade das pastagens e estimativas de biomassa (Reis et al., 2020; Chen et al., 2021). Dentre os produtos mais utilizados para estas análises qualitativas está o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), considerado um “proxy” do vigor vegetativo e da produtividade de forragem (Arantes et al., 2016). No Brasil, várias iniciativas com o objetivo de avaliar a qualidade de pastagens utilizando dados satelitários têm sido conduzidas em escalas regionais (Andrade et al., 2013), ou abrangendo biomas (Pereira et al., 2018) e em alguns casos o território nacional (Aguiar et al., 2017; Arantes et al., 2018), contudo ainda não existe um mapeamento da qualidade das pastagens brasileiras que apresente alta resolução espacial (i.e. Landsat), e que permita compreender os padrões de dinâmicas deste uso da terra em escala nacional.

A identificação de pastagens degradadas, ou seja, pouco produtivas, é fundamental para dar suporte a políticas públicas relacionadas à sua recuperação, e dada as dimensões da pecuária brasileira, tem importância global. Nesse contexto, no presente estudo os objetivos foram: (a) apresentar uma abordagem de análise para o mapeamento e monitoramento da qualidade das pastagens no Brasil; (b) caracterizar a dinâmica e o padrão espacial do estado de degradação das pastagens brasileiras no período entre 2010 e 2018, período que corresponde a primeira fase do Plano ABC; (c) avaliar a aplicação do método para medir os impactos de ações voltadas a melhorias na qualidade das pastagens, tendo como estudo de caso o programa RDP do Plano ABC.

2.3. *Material e métodos*

2.3.1. *Classificação da qualidade de pastagens*

A classificação da cobertura do solo em pastagem foi obtida de estudo que mapeou e analisou a dinâmica das áreas de pastagens no Brasil no período de 1985 a 2017 (Parente et al., 2019). Na classificação, os autores utilizaram todo o acervo de dados dos Satélites correspondente ao período

mapeado, e utilizaram o classificador *Random Forest*, que é um algoritmo de aprendizado de máquinas, treinado a partir de 31,4 mil pontos inspecionados visualmente. Os mapas dessa série temporal foram estendidos pelos autores até o ano de 2019 e disponibilizados na plataforma [Atlas Digital das Pastagens Brasileiras](#) (LAPIG, 2020). Para as análises no presente estudo, utilizamos os mapas de classificação das pastagens relacionados aos anos de 2010 e 2018. Essa janela temporal foi escolhida por compreender a primeira fase do Plano ABC, e possibilitar uma avaliação prática do método como uma ferramenta para medir os impactos de iniciativas voltadas à recuperação de pastagens degradadas, e conseqüentemente, a melhoria na produção deste uso da terra.

A qualidade de pastagens brasileiras foi estimada tomando-se por base a classificação inicialmente proposta para investigar pastagens degradadas no Tibet (Gao et al., 2006). Posteriormente, adequações foram feitas neste método em três estudos no Brasil que avaliaram: o estado de degradação de pastagens em três microbacias hidrográficas no estado de São Paulo (Andrade et al., 2013); a caracterização da dinâmica anual das pastagens em uma bacia hidrográfica em Minas Gerais (Pereira et al., 2018 [luís]); e a dinâmica da qualidade das pastagens em assentamentos rurais em Goiás (Gosch et al., 2020).

A classificação da qualidade de pastagens em todo o território brasileiro utilizada neste trabalho foi composta por três etapas sequenciais: (1) *Pré-processamento* dos dados indicadores do estado de degradação das pastagens, para que sejam comparáveis entre os anos analisados. Nessa etapa os dados ruidosos foram removidos, a disponibilidade de dados equalizadas, a diferença espectral entre os sensores corrigida e os dados normalizados por regiões homogêneas; (2) Estratificação das imagens de cada ano analisado, em *Classes de Degradação das Pastagens*. Nessa etapa a área de pastagem em cada classe de degradação é identificada; Posteriormente, realizada comparação dos mapas classificados para análise da dinâmica das classes entre os anos analisados; (3) Cálculo do *Índice de Degradação da Pastagens por Propriedade* (IDPP) a partir da área de pastagem por classe de degradação.

A seguir apresentamos uma descrição das três etapas que compõem o método. Maiores detalhes e ilustrações encontram-se no apêndice 1, ao final da presente tese.

2.3.2. *Pré-processamento*

A classificação do estado da pastagem foi baseada em valores de NDVI - *Índice de Vegetação da Diferença Normalizada* dos satélites Landsat (Rouse et al., 1973). O NDVI, que varia entre -1 e 1, apresenta correlação positiva com o vigor da vegetação (equação 1). Por isso tem sido utilizado para avaliar o estado de degradação e para estimativas de biomassa das pastagens (Eckert et al., 2014; Pereira et al., 2018; Gargiulo et al., 2020). Ao início e final do período analisado (i.e. 2010 e 2018), foram utilizados dados dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, respectivamente. O Landsat 5, equipado com o

sensor *Thematic Mapper* (TM), foi lançado em 1984 e esteve em operação até o início de 2013, e o Landsat 8 foi equipado com sensor *Operational Land Imager* (OLI) e lançado em 2013, estando em operação atualmente. Lançados ao espaço com uma diferença de 29 anos, os satélites apresentam diferenças significativas, com o Landsat 8 apresentando maior disponibilidade de imagens e resolução espectral.

Equação 1

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Onde *NDVI* é o índice de vegetação por diferença normalizada; e *NIR* é a reflectância da radiação eletromagnética no espectro infravermelho próximo, e *RED* é a reflectância da radiação eletromagnética no espectro de luz vermelha.

Para classificar as áreas de pastagens ao início e final do período analisado (i.e. 2010 e 2018), utilizamos imagens medianas de NDVI. No cálculo de mediana foram utilizadas todas as imagens disponíveis em uma janela temporal de 24 meses - necessários para contemplar um ano climático completo - compreendendo o segundo semestre do ano anterior, o ano de interesse e o primeiro semestre do ano posterior (i.e. julho de 2009 a junho de 2011 e julho de 2017 a junho de 2019). Para que as imagens medianas fossem equivalentes e comparáveis nas dimensões espacial e temporal, as diferenças na disponibilidade de imagens e resolução espectral entre dois satélites foram corrigidas (i.e. Landsat 5 e Landsat 8), as áreas cobertas por nuvens, sombras e ruídos foram removidas, e utilizadas somente as cenas com menos de 80% de cobertura de nuvens e sombras.

2.3.3. Classes de degradação das Pastagens

As imagens medianas de NDVI foram normalizadas por biomas para reduzir as diferenças esperadas nos valores deste parâmetro em resposta às condições edafoclimáticas tornando o índice equivalente entre os diferentes biomas (equação 2).

Equação 2

$$NDVInorm = \frac{NDVI - NDVimin}{NDVImax - NDVimin}$$

Onde *NDVInorm* é o NDVI normalizado, com escala entre 0 e 1; *NDVI* é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada; *NDVimin* é a média de 1% dos menores valores de todos os dados de NDVI na unidade de análise e o *NDVImax* é a média de 1% dos maiores valores.

As imagens de *NDVInorm* resultantes foram estratificadas em classes de estado de degradação das pastagens. Andrade et al., (2013) avaliaram quatro classes de estado de degradação das pastagens: (*Ausente* [$> 0,6$], *Leve* [$>0,5$ e $\leq 0,6$], *Moderada* [$>0,4$ e $\leq 0,5$] e *Severa* [$\leq 0,4$]), e concluíram que o método

é eficaz em identificar as classes *Ausente* e *Severa*, entretanto não distingue as classes *Leve* e *Moderada* entre si. Portanto, agrupamos as classes *Leve* e *Moderada* de forma a trabalharmos com apenas as três classes de estado de degradação em que o método mostrou eficácia em distinguir (*Ausente* [$>0,6$], *Intermediária* [$>0,4$ e $\leq 0,6$] e *Severa* [$\leq 0,4$]) (figura 2.1). As classes de degradação, daqui por diante serão referidas pelas siglas D0 (*Ausente*), D1 (*Intermediária*), D3 (*Severa*), e as áreas não mapeadas em determinado ano serão referidas por NP (*Não Pastagem*).

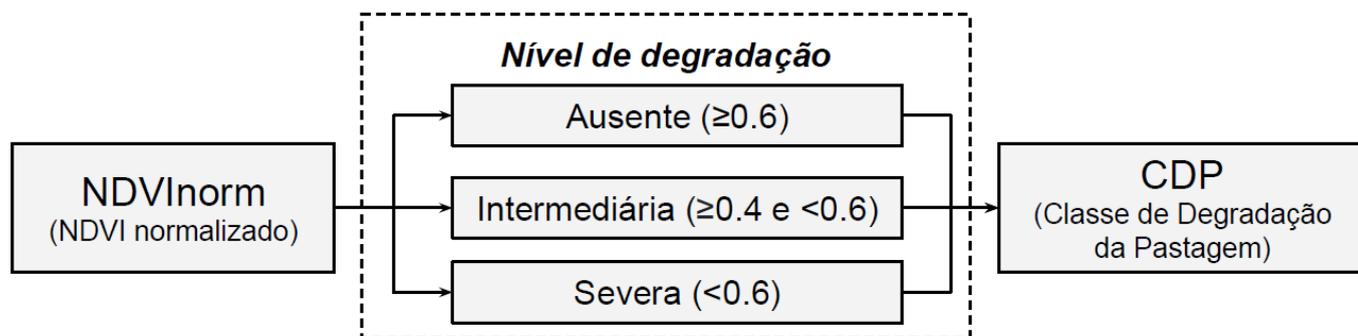


Figura 2.1. Fluxograma ilustrando a estratificação do NDVI norm (NDVI normalizada), em três classes de estado de degradação - *Ausente*, *Intermediária* e *Severa*.

2.3.4. Índice de Degradação das Pastagens por Propriedade (IDP)

O Índice de Degradação da Pastagens (IDP), foi utilizado para avaliar a dinâmica da qualidade das pastagens nas propriedades rurais brasileiras. Mais especificamente avaliamos o ganho, a perda ou a estabilidade em termos de estado de degradação das propriedades rurais pequenas, médias e grandes. Calculamos também o IDP em áreas sob contrato do Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono) para recuperação de pastagens degradadas (RPD), no período entre 2016 e 2017. Espera-se que nesses polígonos a qualidade das pastagens tenha aumentando, e com isso o IDP tenha reduzido.

O IDP foi calculado para cada propriedade rural com área de pastagem mínima de um hectare e ocupando mais 10% da propriedade. Esse critério foi utilizado para analisar somente propriedades com uso efetivo na atividade pecuária. Os limites das propriedades foram obtidos na base de dados do CAR (Cadastro Ambiental Rural) do serviço florestal Brasileiro (Brasil, 2012), que no período de análise foi composta por 5,5 milhões de propriedades rurais. Para o cálculo do IDP, consideramos as quatro classes de estado de degradação propostas por Andrade et al., (2013) e utilizada por Gosch et al., (2020). O IDP varia entre 1,0 e 4,0 e foi calculado de acordo com a equação 3.

Equação 3

$$IDP = \frac{(\sum_{i=1}^n Pi * Ai)}{A}$$

Onde *IDP* é o Índice de Degradação das Pastagens; *P_i* o peso atribuído a classe de estado de degradação *i*; *A_i* a área de pastagem na classe de estado de degradação *i*; e *A* a área total de pastagem na unidade de análise.

Seguindo o disposto na legislação que disciplina a reforma agrária no Brasil (lei Nº 8.629), distribuímos as propriedades rurais em três grupos de tamanho de acordo com o número de módulos fiscais: *Pequenas*, até quatro; *Médias*, entre quatro e quinze; *Grandes*, acima de 15 módulos fiscais. As diferenças nos valores de IDP de cada propriedade por grupo, entre 2010 e 2018, foram distribuídas em três classes, de forma a avaliar a dinâmica da qualidade da pastagem no tempo em três categorias: *Estável*, diferenças de IDP entre 0,0 e 0,5; *Aumentou*, diferenças superiores a -0,5; *Reduziu*, diferenças inferiores a +0,5.

2.3.5. *Aplicação da abordagem de análise para avaliação da recuperação das pastagens, tendo áreas de financiamento pelo plano ABC como estudo de caso.*

Para analisar a viabilidade do método de mapeamento da qualidade das pastagens, em avaliação da recuperação de pastagens degradadas, realizamos um estudo de caso tendo o programa de RPD do Plano ABC. Nesse sentido, analisamos a qualidade das pastagens em 1.693 polígonos que tiveram contratos com o Banco Central no âmbito do Plano ABC. Estes contratos foram estabelecidos durante os anos de 2016 e 2017, e abrangeram todas as regiões brasileiras. Com maior percentual de contratos no Centro-Oeste (36,6%), seguido do Norte (26,1%), às regiões Sudeste, Nordeste e Sul vieram em seguida, com respectivamente 24,6%, 8,6% e 4,1%. Com exceção do Nordeste, o percentual de contratos por região foi proporcional à área de pastagens, ou seja, regiões com maior proporção de pastagens tiveram maior proporção de contratos.

A qualidade das pastagens foi determinada pelos valores de IDP de cada polígono, que foram comparados entre 2010 e 2018, de forma a identificar se houve melhora, piora ou estabilidade na condição das pastagens. Para isso, agrupamos os polígonos pelos mesmos critérios utilizados para avaliar as propriedades rurais e consideramos que o recebimento de recursos foi eficaz quando foram detectados ganhos de qualidade.

2.3.6. *Análise de acurácia*

Uma análise de acurácia das classes de degradação da pastagem foi conduzida para avaliar a qualidade dos resultados. A análise foi restrita ao bioma Cerrado, devido a impossibilidade de coletar informações em todos os biomas, por limitação de recursos. A priorização deste bioma é estratégica pois concentra um terço das pastagens brasileiras (~32,8%), e um terço do rebanho bovino (~34,0%). Em um experimento conduzido no bioma entre 04/2019 e 01/2020, avaliamos a condição das pastagens em 53 pontos, em quatro momentos de acordo com a sazonalidade climática (Janeiro - *Auge da chuva*, Abril - *Transição chuva-seca*, Julho - *Auge da seca*, Outubro - *Transição seca-chuva*). Em cada ponto, a partir da

avaliação de sete parâmetros indicadores da condição da pastagem (*Altura, Densidade, Cobertura do Solo, Homogeneidade, Disponibilidade de folha verde, Relação folha/colmo, Idade dos perfilhos*), classificamos a pastagem quanto às classes de degradação *Ausente, Intermediária* ou *Severa*. A partir desses pontos, geramos uma matriz de confusão e calculamos a acurácia geral e de cada classe de condição da pastagem (Olofsson et al., 2014).

2.4. Resultados

2.4.1. Dinâmica espaço-temporal da qualidade de pastagens no Brasil

A estimativa das áreas cobertas por pastagem em 2010 e 2018 resultou em valores similares, totalizando ~171,6 Mha e 170,7 Mha, respectivamente, ou seja, houve uma redução de 0,9 Mha na área classificada como pastagem no período deste estudo (figura 2.2). Por outro lado, uma superfície equivalente a 31,7 Mha deixou de ser classificada como pastagem em 2018, ou seja, foi convertida em outros usos ou coberturas, enquanto ~30,8 Mha foram incorporados a esta classe de uso da terra neste mesmo ano.

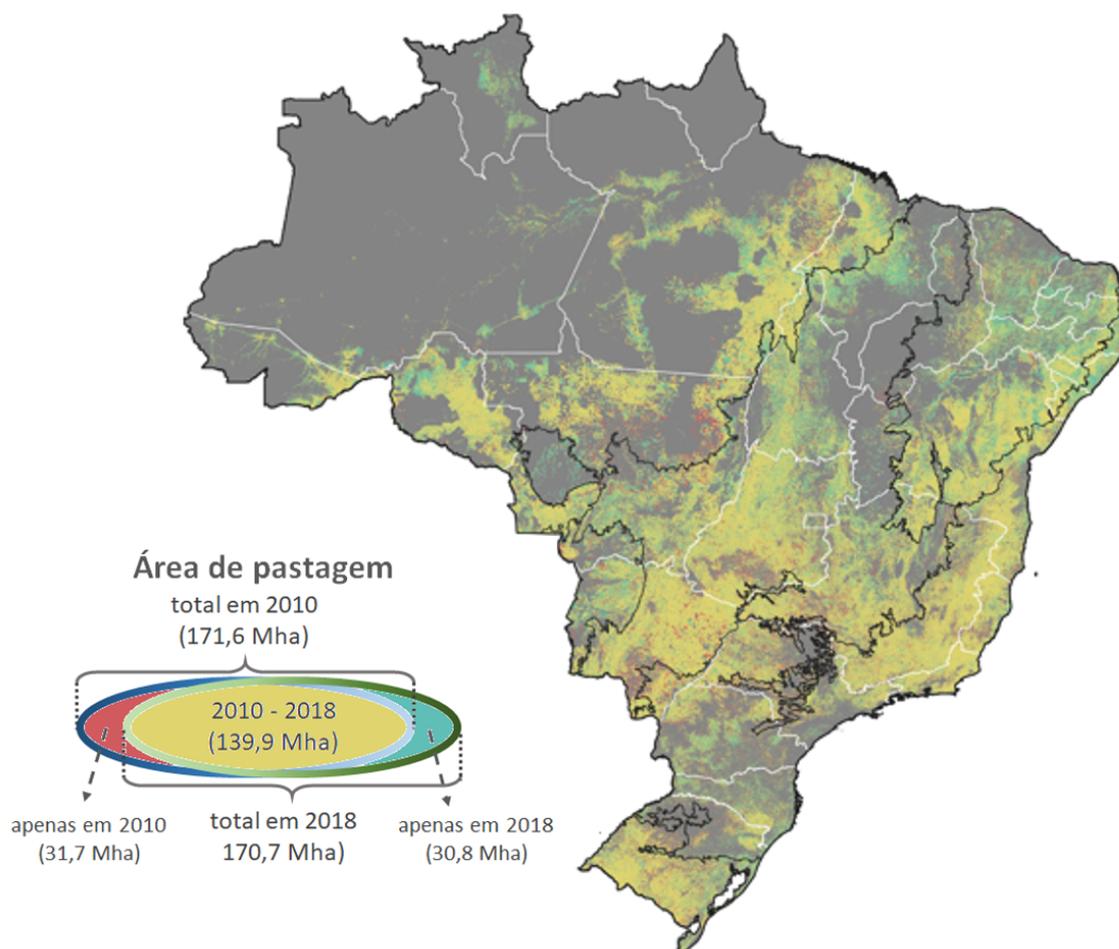


Figura 2.2. Áreas ocupadas por pastagens no Brasil em 2010 e 2018 (<https://pastagem.org/atlas>). [31,7 Mha (milhões de hectares) mapeados somente em 2010; 139,9 Mha mapeados em 2010 e 2018; 30,8 Mha mapeados somente em 2018]

A discriminação das áreas de pastagem em classes permitiu-nos perceber que, apesar da pequena variação na cobertura total de pastagem entre 2010 e 2018, houve uma mudança acentuada entre as classes de estado de degradação. Em 2010 a área classificada como degradação Ausente (D0) correspondeu a 29,1% das pastagens, enquanto 38,8% foi classificada como Intermediária (D1) e 32,1% como Severa (D2) (figura 2.3). Todavia, as proporções de D0, D1 e D2 ao final do período avaliado foram de, respectivamente, 41,1%, 32,2% e 26,7%. Ou seja, observamos um aumento na área ocupada por pastagens com melhor qualidade, pois houve incremento em 2018 em D0 (de 48,8 a 68,3 Mha), e uma redução em D1 (de 65,0 para 53,4 Mha) e em D2 (de 53,9 para 44,3 Mha).

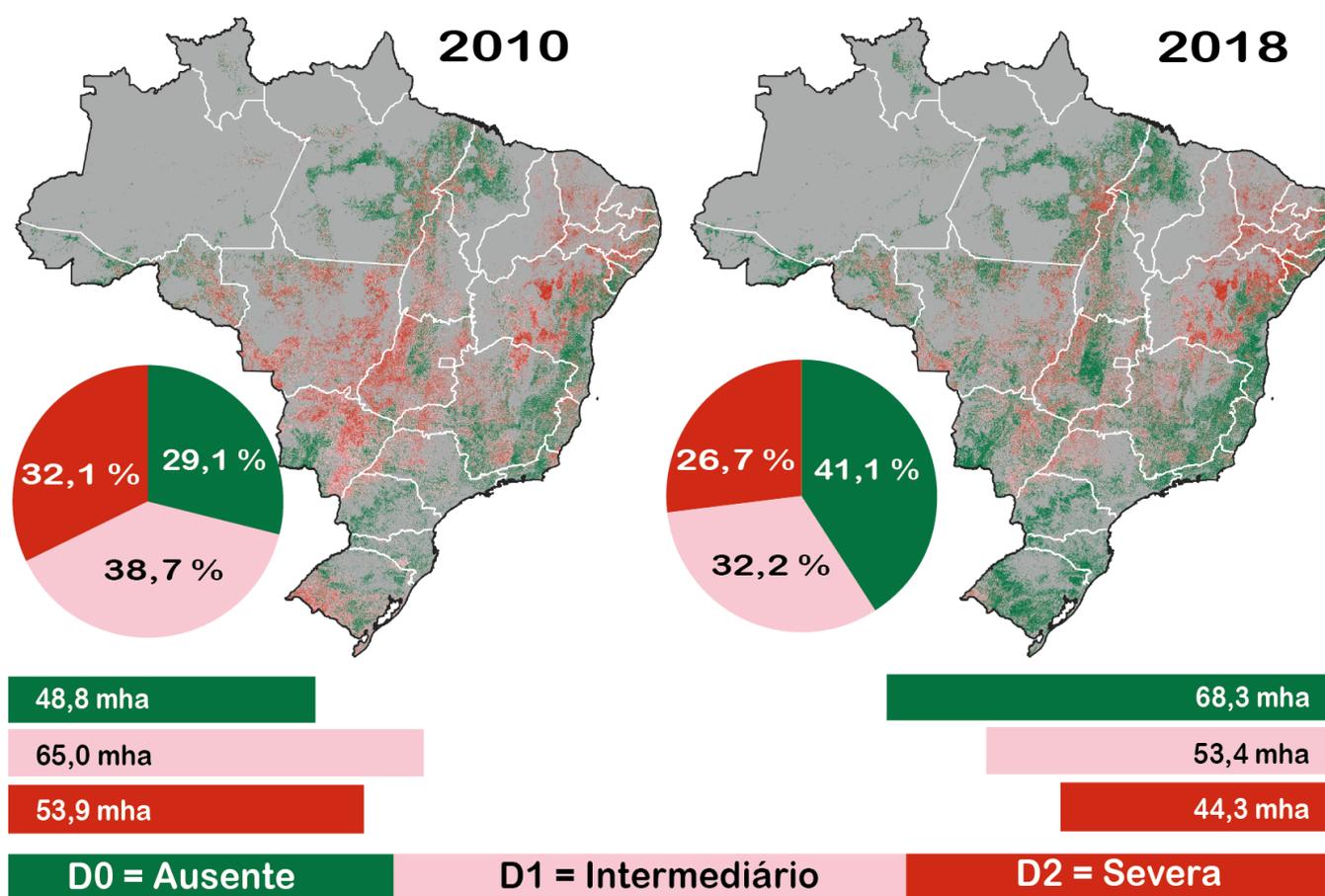


Figura 2.3. Área de pastagem no Brasil, classificadas em três classes de estado de degradação (D0: Ausente, D1: Intermediária e D2: Severa), para os anos de 2010 e 2018.

O menor erro de omissão foi observado para a classe de degradação severa (78% de acurácia do produtor), seguido da classe ausente (65% de acurácia do produtor), apresentando uma acurácia global de 58% (tabela 1). Distinguir bem essas duas classes (D0 e D2) é fundamental, pois incluem as áreas que precisam ser mantidas produtivas e as áreas que precisam ser recuperadas. A classe intermediária apresentou baixa acurácia (69% de acurácia do usuário e 46% de acurácia do produtor), por ser uma

classe mais dinâmica, e aparentemente ser uma condição temporária da pastagem. As pastagens nessa classe avançará para degradação severa (e.g. em áreas de especulação ou grilagem de terras, e áreas abandonadas) ou retornará a classe não degradada (e.g. em áreas com manejo tradicional, em que a pastagem é utilizada até a perda de produtividade, sendo então reformanda, em um processo recorrente).

Tabela 2.1. Análise de acurácia do mapeamento da qualidade das pastagens no ano de 2018, baseado em 53 pontos avaliados em campo, no bioma Cerrado. *AP** = *Acurácia do Produtor*; *AU** = *Acurácia do Usuário*;

	Ausente	Intermediária	Severa	AU*
Ausente	13	8	1	59%
Intermediária	4	11	1	69%
Severa	3	5	7	47%
AP*	65%	46%	78%	

A dinâmica temporal de cada classe de degradação contribuiu para verificarmos de forma precisa as mudanças entre estados de qualidade de pastagem ao longo do tempo (figura 2.4). Quase metade da área classificada como D0 em 2010 (42,9%) mudou de classe de degradação em 2018. Observamos que 15,8% foi para D1 e 4,9% foi para D2, indicando perda de qualidade em ambos os casos. Outros 22,3% foram classificados como NP. Por outro lado, o incremento em área e porcentagem observados na classe D0 em 2018 ocorreu devido à melhora na qualidade em área vindas de D1 (31,9%) e D2 (7,3%), mas também pela mudança no uso da terra, pois 19,9% vieram de NP.

Uma dinâmica acentuada foi observada em D1, pois 58,1% da área desta classe em 2018 veio por mudanças em outras classes, principalmente com o ganho em qualidade nas pastagens da classe D2 (28,5%), seguido de áreas recém convertidas (15,2%). As áreas que tiveram perda de qualidade (vindas de D0) contribuíram com 14,4%. Aproximadamente 54,5% da área classificada como D2 em 2018 já pertencia a esta classe em 2010, ou seja, houve a manutenção de uma área considerável de pastagem em estado de degradação severa (24,1 Mha) ao longo do tempo. Cerca de 9,6 Mha nesta classe foram áreas que perderam qualidade, e 8,2 Mha foram áreas não mapeadas em 2018. As áreas que deixaram de ser mapeadas como pastagens no período avaliado, foram predominantemente áreas classificadas como pouco produtivas em 2010, principalmente da classe D1 (35,3%), seguido da classe D2 (30,3 %). As áreas não degradadas que deixaram de ser mapeadas como pastagens somaram 34,4% (D0).

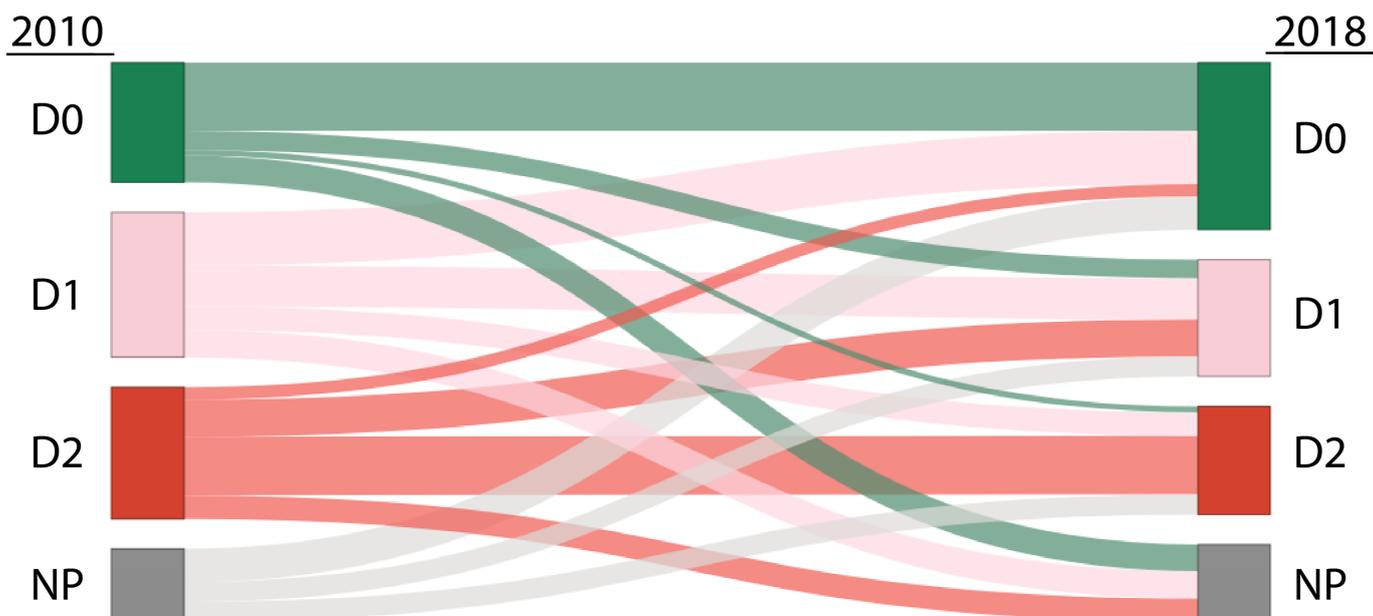


Figura 2.4. Dinâmica da degradação das pastagens no Brasil no período entre 2010 e 2018. Classes de degradação: D0 = Ausente, D1 = Intermediário e D2 = Severa. NP = área não mapeada como pastagem.

2.4.2. Fatores relacionados com a variação na qualidade das pastagens por propriedade rural

A pastagem representa um importante uso da terra no Brasil, uma vez que quase metade (49,1%) dos aproximadamente 2,7 milhões de propriedades disponíveis na base do CAR tem a pecuária entre suas atividades econômicas, considerando os critérios de inclusão para análise de IDP. A grande maioria das propriedades rurais no Brasil são compostas por unidades pequenas (91,4%), seguidas de médias (6,4%) e grandes (2,2%) (figura 2.5). Ao avaliarmos a evolução da qualidade das pastagens por propriedade rural entre 2010 e 2018, independente do tamanho da propriedade, foi possível observar que cerca de 60% foram classificadas como Estável (tabela 2). Neste mesmo período houve aumento de qualidade em um quarto das propriedades (25,3 %) e redução em 15,8% (tabela 2). Percebemos que a dinâmica de qualidade de pastagens foi afetada pelo tamanho da propriedade, pois pequenas unidades apresentaram redução na qualidade duas vezes maior em comparação com as de tamanho médio, e quase três vezes maior que nas grandes (16,6% , 8,9% e 6,2% , respectivamente) (tabela 1). Considerando o ganho em qualidade no tempo, as Grandes propriedades apresentaram aumento cerca de duas vezes maior em relação às Pequenas (41,2% e 24,3%, respectivamente).

As mudanças na qualidade das pastagens nas propriedades não estão homogêneamente distribuídas no país, havendo predominância de aumento na qualidade nas regiões Sul e Centro-Oeste (figura 2.6). A classe de propriedades médias foi a que apresentou menor evidência de heterogeneidade na distribuição espacial (figura 2.6B), com os três níveis de condição da pastagem sendo observados nas

diversas regiões. Por outro lado, a classe de propriedades pequenas, que apresentou predominância de perda na qualidade das pastagens, nos estados do Maranhão, Minas Gerais, Bahia, e nos limites entre os estados de Tocantins e Pará (figura 2.6A). E nas grandes propriedades, que são predominantes nas regiões de fronteiras agrícolas e regiões com histórico de uso da terra mais recentes, houve aumento na qualidade das pastagens, principalmente nos estados da região Centro-Oeste (Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) (figura 2.6C).

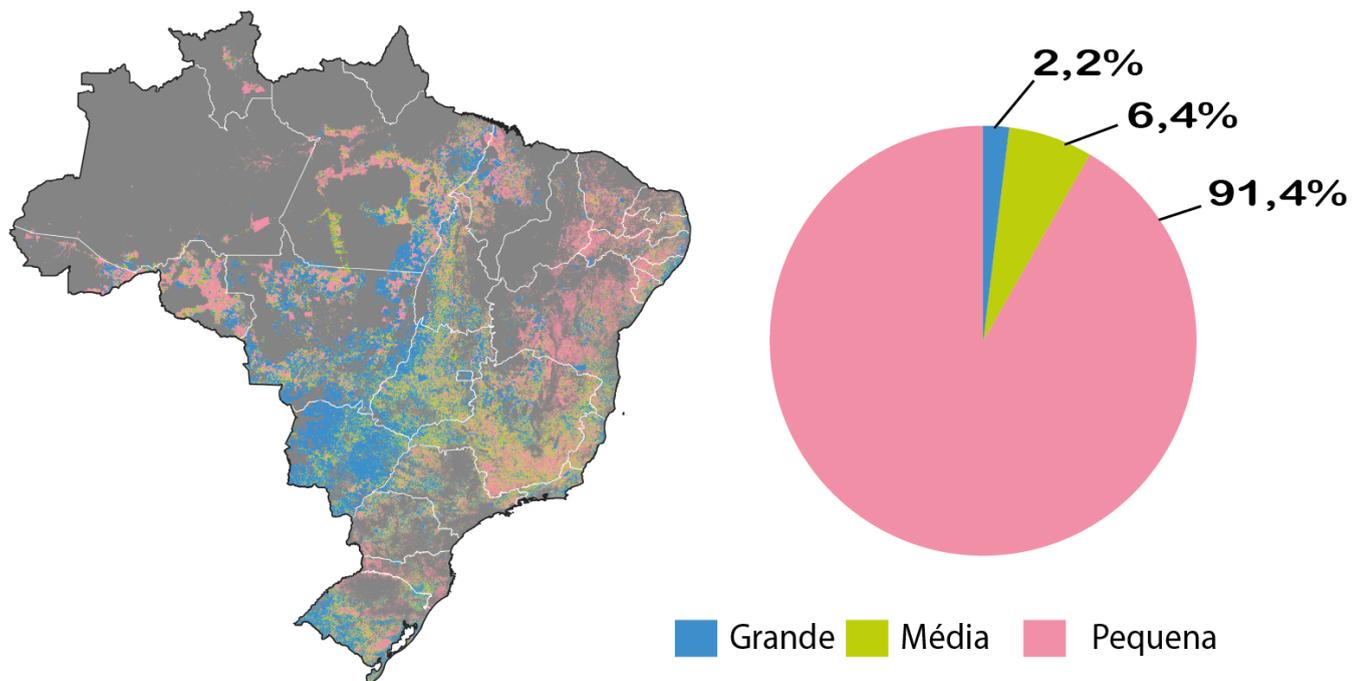


Figura 2.5. Distribuição espacial das propriedades rurais brasileiras, por classe de tamanho (*Pequena, Média e Grande*), segundo limites disponíveis na base do CAR - Cadastro Ambiental Rural.

Tabela 2.2. Distribuição do número de propriedades rurais brasileiras quanto a dinâmica da qualidade das pastagens no período entre 2010 e 2018.

Qualidade	Número de propriedades rurais			
	Pequenas	Média	Grande	Total
Estável	1.451.311 (59,2%)	97.200 (57,3%)	31.589 (52,7%)	1.580.100 (58,9%)
Aumento	595.445 (24,3%)	57.452 (33,9%)	24.696 (41,2%)	677.593 (25,3%)
Redução	406.192 (16,6%)	15.027 (8,9%)	3.711 (6,2%)	424.930 (15,8%)
Total	2.452.948 (100%)	169.679 (100%)	59.996 (100%)	2.682.623 (100%)

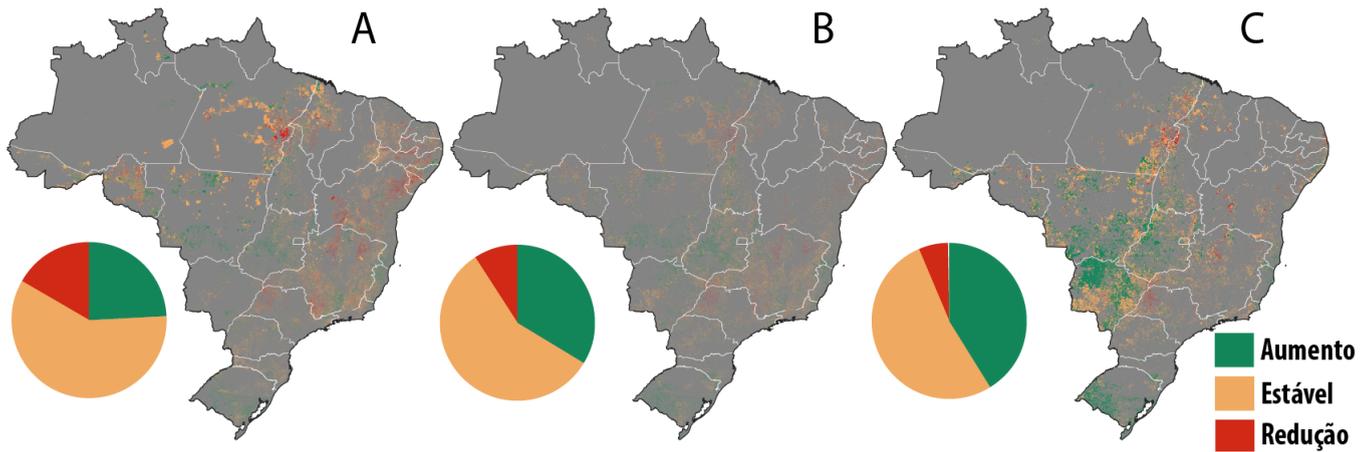


Figura 2.6. Distribuição espacial da dinâmica na qualidade das pastagens nas propriedades rurais brasileiras entre 2010 e 2018. (A = Pequenas propriedades, B = Médias propriedades, e C = Grandes propriedades)

Um questionamento importante sobre a gestão de recursos públicos aplicados ao uso da terra relaciona-se à sua eficácia, ou seja, se as propriedades que recebem recursos financeiros conseguem aumentar a sua produção. Nesse sentido, tendo áreas de investimentos pelo plano ABC como estudo de caso, observamos que aproximadamente 56% dos polígonos com pastagens que receberam recursos do Plano ABC não apresentaram mudança na qualidade das pastagens, permanecendo estáveis segundo os critérios estabelecidos (figura 2.7). Por outro lado, cerca 12% das áreas apresentaram redução na qualidade, enquanto uma proporção cerca de três vezes maior apresentou ganho em qualidade, totalizando cerca de 32% dos polígonos com melhora na condição das pastagens, indicando que o investimento de recursos pode estar induzindo a melhora das pastagens nessas áreas (figura 2.7).

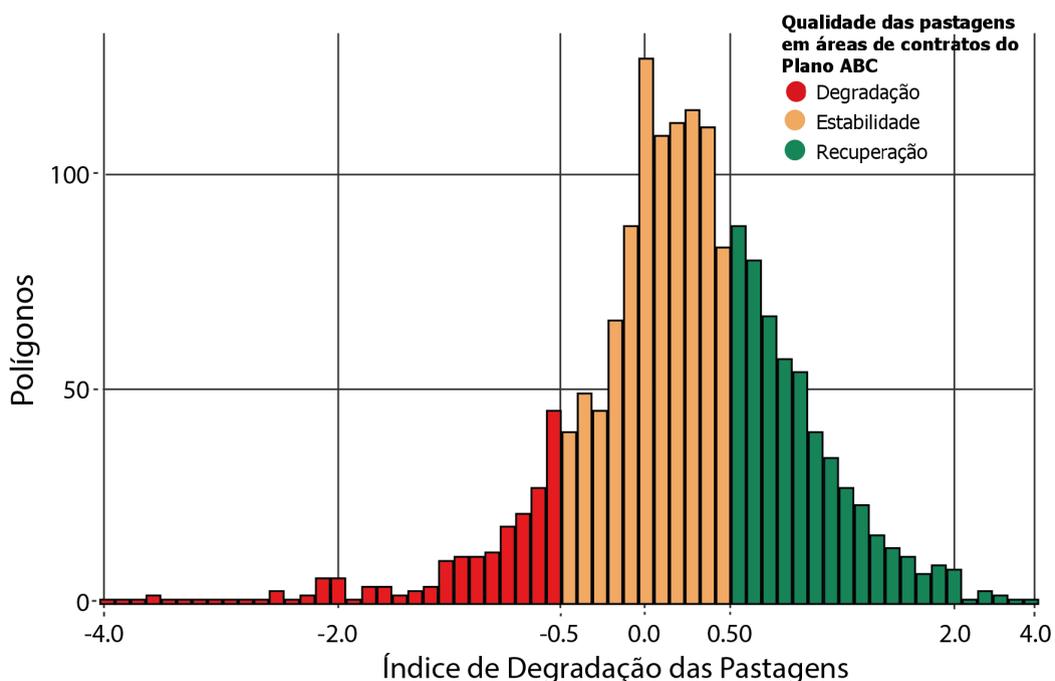


Figura 2.7. Distribuição dos polígonos com contratos de financiamentos do Plano ABC para recuperação de pastagens degradadas, no período de 2016 a 2017, classificados quanto perda (*Degradação*), ganho (*Recuperação*) ou *Estabilidade* na qualidade das pastagens.

2.5. Discussão

2.5.1. Dinâmica espacial e da qualidade das pastagens no Brasil

A redução de ~0,9 Mha na área total ocupada por pastagem entre 2010 e 2018 está dentro do intervalo de confiança do mapeamento ($\pm 2.5\%$), reportado por Parente et al., (2019), portanto, não houve variação significativa na área ocupada por pastagens no Brasil nesse intervalo de tempo. Estudos mostraram que a estabilização no total área ocupada por pastagens no país teve início no final da década de 2000, após um período de grande expansão nessa classe de uso da terra (Parente et al., 2019). Segundo estes autores, em menos de três décadas (i.e. entre 1985 e 2010) houve um acréscimo de ~60 Mha na área ocupada por pastagens, o equivalente a uma taxa de aumento de 2,4 Mha ao ano.

Entretanto, a análise temporal de variações nos valores absolutos de área pode esconder uma dinâmica espacial intensa, pois regiões classificadas como pastagem somente em 2018 possuíam extensão territorial semelhante às que deixaram de ser classificadas como tal neste mesmo ano, ou seja, houve ganhos e perdas de áreas de pastagem em quantidades equivalentes (em torno de 31 Mha). Por se tratar de uma mudança considerável em termos territoriais, equivalente à extensão de países como Alemanha ou Itália, compreender a dinâmica espacial das pastagens no país requer a avaliação dos fatores que estão contribuindo para a retração e expansão desta classe de uso da terra. Por se tratarem de dois processos antagônicos, e devido à magnitude de variação em área, estes só podem coexistir caso ocorram em regiões diferentes.

A retração nas áreas de pastagens ocorreu principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do País, enquanto a expansão foi detectada predominante na região Norte. Vários fatores foram apontados como determinantes da dinâmica espacial das pastagens no Brasil, estando intrinsecamente ligada aos processos de uso e ocupação da terra prevalentes no país (Sparovek et al., 2019; Barona et al., 2010; Davidson et al., 2012). Apesar dos processos não estarem totalmente claros, em Mato Grosso, estado responsável por cerca de 25% das exportações de carne bovina brasileira (ABIEC, 2020), a expansão agrícola em áreas de pastagens entre 2001 e 2004 correspondeu à mais de 60% das novas áreas cultivadas na região, e forçou um deslocamento da atividade pecuária para a região Norte (Morton et al., 2006). E numa escala mais abrangente, Parente e Ferreira, (2018) identificaram forte retração na área de pastagem e no rebanho bovino no Centro-Sul do país, e aumento de ambos na região Norte entre 2000 e 2016. As áreas de retração das pastagens foram ocupadas por agricultura, (i.e. soja, milho, algodão e cana de

açúcar), predominantemente nos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Por outro lado, a expansão ocorreu em áreas de conversão da vegetação nativa, principalmente no bioma Amazônia (Souza et al., 2020).

A expansão da agricultura sobre áreas de pastagens é um processo comum na dinâmica de uso da terra no Brasil, e tem sido registrado a décadas (Cardille e Foley, 2003; Barona et al., 2010; Stabile et al., 2020). Fatores econômicos são importantes diretrizes determinando as mudanças de uso da terra. As áreas de conversão da vegetação nativa tendem a ser primeiramente ocupadas por pastagens, pois esta classe de uso da terra geralmente possui menor custo de implantação em comparação a outros usos (Barona et al., 2010). Posteriormente, as áreas com aptidão agrícola são convertidas para usos mais rentáveis e geralmente mais tecnificado, como a produção de grãos e o cultivo de cana-de-açúcar, consolidando o uso da área (Cardille e Foley, 2003; Souza et al., 2020). Importante ressaltar que nem sempre os fatores econômicos estão associados à produção do sistema. Grande parte do desmatamento em regiões de fronteiras agrícolas tem sido atribuído à especulação imobiliária e grilagem de terras da união não designadas (Stabile et al., 2020). Nessas regiões a supressão da vegetação nativa geralmente ocorre de forma ilegal (Azevedo et al., 2019), e o objetivo dos atores é a valorização da área. Desta forma, as áreas desmatadas tendem a ser ocupadas com pastagens, porém sem o objetivo de desenvolver uma pecuária rentável. A designação das áreas de terras devolutas, somada às políticas de comando e controle, podem ser fatores desencorajadores desta prática, a qual não é ambientalmente sustentável (Stabile et al., 2020). Isso poderia contribuir para a redução no desmatamento, e conseqüentemente o aumento da eficiência da pecuária para a região norte, levando a mudanças de manejo, com ganho de eficiência e produtividade.

A atual dinâmica de uso e ocupação da terra vêm contribuindo para a manutenção da produção pecuária, visto que o aumento das pastagens não degradadas em 2018 tem parte de sua composição vinda de áreas que antes não eram classificadas como pastagem. Este processo se deve ao fato de a retração da pastagem ocorrer em áreas predominantemente degradadas (D1+D2), e as áreas recém convertidas serem predominantemente não degradadas (D0), uma vez que pastagens recém formadas tendem a apresentar produtividade alta nos primeiros anos de uso, devido a alta disponibilidade de nutrientes, resultante do processo de conversão da vegetação nativa (Oliveira et al., 2004). Contudo, essa dinâmica não é ambientalmente sustentável uma vez que a expansão se dá ao custo de desmatamento (Souza et al., 2020). A boa notícia é que mudanças no sistema de produção pecuária parecem estar em curso, uma vez que a dinâmica supracitada explicaria a manutenção da produção, mas não seria suficiente para explicar o suporte ao crescimento do rebanho bovino, indicando um ganho de eficiência. Segundo Dias et al., (2016) a ocorrência de um processo de intensificação pecuária é evidente no Centro-Oeste do país. Em escala nacional, Parente et al., (2019) identificaram o início desse processo no final da década de 2000. Nesse contexto, a redução na proporção de pastagens com algum nível de degradação (D1 + D2) entre 2010 e 2018 (de 71% para 58%), e conseqüente aumento na área de pastagem não degradada (D0), observada no

presente estudo, evidencia melhora na qualidade das pastagens e confirma o aumento de eficiência da atividade pecuária.

Durante esse período houve um acréscimo de ~5,5 milhões de animais ao rebanho bovino brasileira, o equivalente a uma taxa de incremento anual de 0,7 milhões de animais (IBGE, 2020). Esse aumento foi observado em um período em que não houve mudança na área total ocupada por pastagens, indicando um aprimoramento e aumento na capacidade de suporte no setor pecuário. Estudos recentes que identificaram esse processo de intensificação da atividade pecuária, com ganhos em eficiência e produtividade a partir da década de 2000 (Dias et al., 2016; Parente et al., 2019; ABIEC, 2020). Analisando dados do rebanho bovinos e áreas de pastagens, (ver pastagem.org/atlas), identificamos que entre 1985 e 2018, a lotação bovina aumentou de 0,8 para 0,92 UA/ha (Unidade Animal por hectare). Sem esse aumento médio de 0,12 UA/ha seriam necessários 15 Mha adicionais ao sistema pecuário para suportar o rebanho bovino contabilizado em 2018 (IBGE, 2020). Contudo, em média a lotação bovina continua baixa e as pastagens pouco produtivas. Há décadas pesquisadores vêm alertando para a necessidade de se promover mudanças no manejo das pastagens e reabilitação das áreas degradadas para uma pecuária sustentável (Oliveira et al., 2004; Dias-Filho, 2011; Mazzetto et al., 2015). Os resultados observados no presente estudo indicam que possivelmente estas mudanças estão em curso.

Especialmente, a redução nas áreas degradadas foram observadas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, onde predominam áreas de uso consolidados e conseqüentemente, maior custo de oportunidade da terra (Dias-Filho, 2011). Possivelmente esse processo é impulsionado pela valorização da terra, que pode levar a investimentos para aumento da produtividade pecuária em áreas que permanecem nesta classe de uso da terra. O aumento da rentabilidade pode levar à maior disponibilidade de recursos para investimentos, resultando em um ciclo positivo de melhoria das pastagens (Stabile et al., 2020). O melhor manejo, e conseqüentemente maior proporção de pastagens não degradadas, nem sempre indica uma mudança de comportamento ou de percepção do proprietário em relação a pecuária, e sim uma dinâmica social em que os proprietários que optam pela atividade pecuária de forma extensiva tendem a migrar para regiões de fronteiras, onde o preço da terra é menor, e conseqüentemente, pode-se adquirir áreas maiores, e continuar praticando a pecuária extensiva. As áreas que estes ocupavam tendem a ser adquiridas por atores com maior capital e portanto com meios necessários para manter uma pecuária intensiva, muitas vezes trazendo experiências e conceitos de outros setores, resultando em uma administração profissional para a atividade pecuária (Oliveira e Couto, 2018). Com isso, é esperado que a proporção de áreas com pastagens de melhor qualidade aumente nas regiões de uso consolidado, como observado no presente estudo.

Apesar do ganho em eficiência, supracitado, observamos uma extensa área de pastagens (44,3 Mha) classificada como tendo degradação severa (D2) em 2018, ou seja, as pastagens pouco produtivas superam em área a extensão de países como Alemanha ou Noruega. Pouco mais da metade desta área já tinha sido classificada como D2 em 2010, evidenciando que a baixa produtividade está persistindo ao longo do tempo. O custo de recuperação da área aumenta em estágios avançados de degradação, e esse fator certamente contribuiu para a permanência de áreas nessa classe, e menor proporção de recuperação em comparação a recuperação de pastagens com degradação intermediária (Dias-Filho, 2011). A maior dinâmica na classe de degradação intermediária provavelmente está relacionado ao manejo tradicional da pecuária extensiva no Brasil, no qual é comum a ocorrência do processo de degradação das pastagens, em razão do manejo pouco tecnificado com ausência de correção do solo e do processo de adubação para manutenção da produtividade da forrageira (Martha-Júnior e Vilela, 2002; Volpe et al., 2008). Em uma primeira fase, ocorre uma degradação intermediária (D1), que na ausência de uma intervenção de manejo para recuperação da produtividade, avança para a degradação severa (D2) (Dias-Filho, 2011). Assim, a degradação intermediária parece ser uma condição transitória na pecuária brasileira, que geralmente segue um de três caminhos: (a) a maior proporção é recuperada, como observado neste estudo, e não havendo mudanças no manejo possivelmente voltará à essa classe em alguns anos e será novamente reformada, em um ciclo vicioso; (b) uma proporção menor pode avançar para a degradação severa pela ausência de intervenção; e (c) parte da área sai do sistema pecuário, possivelmente por conversão para outros usos ou cobertura.

2.5.2. Relação entre tamanho da propriedade rural e aporte de recursos do Plano ABC com a qualidade das pastagens

Em termos numéricos, a maioria dos imóveis rurais no Brasil são compostos por propriedades pequenas, como também apontado por Sparovek et al., (2019). A qualidade da pastagem está fortemente relacionada aos padrões temporais na produção de biomassa, que por sua vez possibilita o aumento no retorno econômico desta atividade, pois o produtor consegue aprimorar o manejo (tecnificação + intensificação). Para isto, o proprietário precisa tanto de assistência técnica quanto de recursos financeiros (Garret et al., 2018). Porém, o pequeno produtor costuma ter menor capital próprio, baixo acesso a linhas de créditos junto a instituições financeiras, e lhes falta também assistência técnica para intensificar sua produtividade (Alencar et al., 2016; Castro e Pereira, 2016). Portanto, a maior proporção de perda de qualidade observada no presente trabalho nas pequenas propriedades ilustra esta realidade. No outro extremo, a maior proporção de ganho em qualidade observada nas propriedades de grande porte possivelmente refletem o maior acesso aos recursos financeiros necessários a melhoria na atividade pecuária, e evidenciam um aumento na desigualdade socioeconômica no setor pecuário. Vale ressaltar que a variável módulos fiscais, utilizada nesta análise tem grande amplitude em representação de área ao

longo do país. Assim, em algumas regiões outro fator que pode influenciar a perda de qualidade em pequenas propriedades é a falta de área mínima viável para a adoção de sistemas produtivos mais tecnificados, como o manejo rotacionado de pastejo, movendo rebanho entre piquetes de modo a promover o descanso da pastagem e recuperação da biomassa entre eventos de pastejo.

As propriedades com ganhos em qualidade das pastagens estão localizadas principalmente na região Centro-Oeste do Brasil, onde houve iniciativas para recuperação de pastagens degradadas como o programa Novo Campo, iniciado em 2012, ao norte de Mato Grosso ([ICV, 2021](#)). Em 2009, após um período de altas taxas de desmatamentos, mais de 20 municípios de Mato Grosso, que não atingiram as metas de redução no desmatamento, estavam inseridos na lista de municípios embargados por desmatamento, pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), o que implicava redução de receitas e restrição de acesso a créditos (Nepstad et al., 2014). Nesse contexto, iniciativas como o programa Novo Campo contribuíram para a melhora na qualidade das pastagens nesta região (Latawiec et al., 2017). Entre 2016 e 2017, esta foi a região com maior proporção de contratos para recuperação de pastagens degradadas no âmbito do programa RPD, o que também pode ter contribuído para os resultados observados no presente estudo.

A proporção de casos em que houve ganho de qualidade das pastagens nas áreas sob contratos do programa RPD foi superior ao ganho de qualidade observado para as propriedades em geral (32% e 25%, respectivamente), evidenciando um efeito positivo do programa na qualidade das pastagens nessas áreas com investimentos. Por outro lado, o fato de mais da metade (56%) dos polígonos sob contratos não apresentaram ganhos de qualidade, sugere que este efeito ainda que positivo é baixo, uma vez que é esperado que as pastagens sejam melhoradas em 100% das áreas de receberam investimentos de recursos financeiros para essa finalidade. É importante ressaltar que o processo de melhora na qualidade das pastagens podem ainda estar em andamento, uma vez que o curto período entre a assinatura do contrato e o ano avaliado neste estudo pode não ter sido suficiente para que mudanças na classe de qualidade sejam detectadas pela abordagem de análise aqui utilizada, indicando que as pastagens ainda estejam em fase inicial de recuperação em muitos dos polígonos avaliados.

Os resultados obtidos neste trabalho reforçam as afirmações de vários estudos voltados para a dinâmica de uso e ocupação da terra no Brasil, os quais analisaram o papel desempenhado pelo país na produção de alimentos e segurança alimentar global, cujos apontamentos são na direção que o modelo atual de produção pecuária é insustentável (Oliveira et al., 2004; Bustamante et al., 2012; Strassburg et al., 2014; Souza et al., 2020; Stabile et al., 2020). Na região norte do Brasil, a principal fronteira agrícola do País e também no mundo, ainda há um intenso processo de conversão da vegetação em áreas de cultivo (agricultura ou pecuária). Essas ações antrópicas afetam o clima, biodiversidade e serviços

ecossistêmicos no país. Portanto, um novo modelo de produção, que priorize a intensificação da pecuária nas áreas já abertas podem promover o aumento de produção e a liberação de terras para produção de grãos, suficientes para atender a demandas das próximas décadas, sem a necessidade de converter novas áreas de remanescentes da vegetação nativa (Strassburg et al., 2014). A melhora na qualidade das pastagens observadas neste estudo pode indicar um passo nessa direção, mas todos os resultados indicam que há ainda um longo caminho a ser percorrido rumo a uma pecuária mais sustentável e mais produtiva.

2.6. Conclusões

Neste estudo, analisamos a dinâmica da degradação das pastagens brasileiras na última década - 2010 a 2018. Neste período houve aumento na qualidade e capacidade de suporte das pastagens no país. Observamos que não houve mudanças na área total ocupadas por pastagens, enquanto a porcentagem de áreas não degradadas e o rebanho bovino aumentaram, indicando que houve ganhos de produtividade. A melhora na qualidade das pastagens, aliada ao aumento observado no rebanho bovino indicam que o ganho em produtividade foi por intensificação - aumento vertical da produção pecuária.

O aumento da área de pastagens não degradadas ocorreu por dois fatores: (a) retração das pastagens com degradação intermediária ou severa no centro-sul do país, e conversão de áreas de vegetação nativa para pastagens na região norte. (b) a recuperação de pastagens degradadas, que foi 2,7 vezes maior que a área que perdeu qualidade nesse período. Entre 2010 e 2018 cerca 26,8 Mha deixaram de ser classificadas como degradadas, e nesse mesmo período, cerca de 10,1 Mha passaram a ser classificadas como degradadas.

Cerca de 60% das propriedades rurais, com atividade pecuária, não apresentaram mudanças no Índice de Degradação das Pastagens (IDP). Por outro lado, a proporção de propriedades com ganhos de qualidade foi superior a de propriedades em que houve perda de qualidade. Indicando que, em média, a degradação das pastagens nas propriedades rurais está diminuindo. Entretanto, essa mudança não é homogênea nas classes de tamanho. A proporção de propriedades de pequeno porte que ganhou qualidade é cerca de duas vezes menor que nas de grande porte, enquanto a proporção com perda de qualidade foi cerca de três vezes maior. O aumento na desigualdade entre essas classes pode estar associado a maior disponibilidade de recursos financeiros e tecnológicos, a ser empregados na atividade pecuária, nas grandes propriedades. Um terço das áreas com contratos do Plano ABC apresentaram ganhos de qualidade, entretanto os resultados não foram suficientes para conclusões sobre a eficácia do Plano, sendo necessários estudos de longo prazo.

2.7. Referências

1. ABIEC. Perfil da pecuária no Brasil, *Beef Report*. **2020**, p. 49.
2. Aguiar, D.; Mello, M.; Nogueira, S.; Gonçalves, F.; Adami, M.; Rudorff, B. MODIS Time Series to Detect Anthropogenic Interventions and Degradation Processes in Tropical Pasture. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 73.
3. Alencar, A.; Pereira, C.; Castro, I.; Cardoso, A.; Lucimar, S.; Costa, R.; Bentes, A.; Stella, O.; Azevedo, A.; Gomes, J.; Novaes, R. *Desmatamento nos Assentamentos da Amazônia: Histórico, Tendências e Oportunidades*, 1st ed. IPAM, Brasília, DF, Brasil, **2016**.
4. Alves-Pinto, H.; Newton, P.; Pinto, L. Reducing deforestation and enhancing sustainability in commodity supply chains: Interactions between governance interventions and cattle certification in Brazil. *Trop. Conserv. Sci.* **2015**, *8*, 1053–1079.
5. Andrade, R.; Rodrigues, C.; Sanches, Torresan, F.; Quartaroli, C. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na detecção de processos de degradação de pastagens. *Eng. na Agric.* **2013**, *21*, 234–243.
6. Arantes, A.; Ferreira, L.; Coe, M. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2016**, *117*, 66–78.
7. Arantes, A.; Couto, V.; Sano, E.; Ferreira, L. Livestock intensification potential in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. *Pesq. Agrop. Bras.* **2018**, *53*, 1053–1060.
8. Azevedo, T.; Rosa, M.; Shimbo, J.; Martin, E.; Oliveira, M. Relatório Anual do Desmatamento no Brasil. *Mapbiomas*, **2020**, p. 49.
9. Barona, E.; Ramankutty, N.; Hyman, G.; Coomes, O. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environ. Res. Lett.* **2010**, *5*, 2.
10. Brasil. Brazilian native vegetation protection law "LEI nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012". Law Nº 12.651. Presidência da República do Brasil, Brasília, Brazil 25-May-2012, **2012**.
11. Braz, S.; Urquiaga, S.; Alves, B.; Jantalia, C.; Guimarães, A.; Santos, C.; Santos, S.; Pinheiro, É.; Boddey, R. Soil Carbon Stocks under Productive and Brachiaria Degraded Pastures in the Brazilian Cerrado. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2013**, *77*, 3, 914–928.
12. Bustamante, M.; Nobre, C.; Smeraldi, R.; Aguiar, A.; Barioni, L.; Ferreira, L.; Longo, K.; May, P.; Pinto, A.; Ometto, J. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Clim. Chang.* **2012**, *115*, 559–577.
13. Cardille, J.; Foley, J. Agricultural land-use change in Brazilian Amazônia between 1980 and 1995: Evidence from integrated satellite and census data. *Remote Sens. Environ.* **2003**, *87*, 551–562.
14. Castro, C.; Pereira, C. *Agricultura familiar, assistência técnica e extensão rural e a política nacional de ATER* (Texto para discussão No. 2343). IPEA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, **2017**.
15. Chen, Y.; Guerschman, J.; Shendryk, Y.; Henry, D.; Harrison, M. Estimating Pasture Biomass Using Sentinel-2 Imagery and Machine Learning. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 603.
16. Davidson, E.; Araújo, A.; Artaxo, P.; Balch, J.; Brown, I.; Bustamante, M.; Coe, M.; DeFries, R.; Keller, M.; Longo, M.; Munger, J.; Schroeder, W.; Soares-Filho, B.; Souza, C.; Wofsy, S. The Amazon basin in transition. *Nature*, **2012**, *481*, 321–328.
17. Dias, L.; Pimenta, F.; Santos, A.; Costa, M.; Ladle, R. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Glob. Chang. Biol.* **2016**, *22*, 2887–2903.
18. Dias-Filho, M.B. *Degradação de Pastagens: Processos, Causas e Estratégias de Recuperação*, 4th ed.; Embrapa Amazônia Oriental: Belém, Brazil, **2011**; p. 215.

19. Dias-Filho, M.B. *Diagnóstico das Pastagens no Brasil*. Embrapa Amazônia Oriental: Belém, Brazil, **2014**; p. 22.
20. Eckert, S.; Hüsler, F.; Liniger, H.; Hodel, E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *J. Arid Environ.* **2015**, 113, 16–28.
21. EMBRAPA, *Projeto GeoDegrade*, <http://www.geodegrade.cnpm.embrapa.br/apresentacao>, acesso em jan-2021, **2021**.
22. FAO. Five practical actions towards low-carbon livestock, **2019**.
23. Gao, Q.; Li, Y.; Wan, Y.; Lin, E.; Xiong, W.; Jiangcun, W.; Wang, B.; Li, W. Grassland degradation in Northern Tibet based on remote sensing data. *J. Geogr. Sci.* **2006**, 16, 165–173.
24. Gargiulo, J.; Clark, C.; Lyons, N.; Veyrac, G.; Beale, P.; Garcia, S. Spatial and temporal pasture biomass estimation integrating electronic plate meter, planet cubesats and sentinel-2 satellite data. *Remote Sens.* **2020**, 12, 1–16.
25. Garrett, R.; Koh, I.; Lambin, E.; Polain de Waroux, Y.; Kastens, J.; Brown, J. Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. *Glob. Environ. Chang.* **2018**, 53, 233–243.
26. Gosch, M.; Parente, L.; Ferreira, N.; Oliveira, A.; FERREIRA, L. Pastagens degradadas, uma herança dos imóveis rurais desapropriados para os assentamentos rurais do Cerrado goiano. *Rev. Campo-Território.* **2020**, 15, 202–229.
27. IBGE, *Pesquisa Pecuária Municipal*. <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2019>, Acesso em dez-2020, **2020**.
28. ICV, *Programa Novo Campo*, https://www.icv.org.br/projeto_especial/programa-novo-campo/, Acesso em jan-2021, **2021**.
29. Lahsen, M.; Bustamante, M.; Dalla-Nora, E. Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril. *Environ. Sci. Policy Sustain. Dev.* **2016**, 58, 4–15.
30. Lapig, *Atlas Digital das Pastagens Brasileiras*, pastagem.org/atlas, Acesso em dez-2020, **2020**.
31. Latawiec, A.E.; Strassburg, B.B.N.; Valentim, J.F.; Ramos, F.; Alves-Pinto, H.N. Intensification of cattle ranching production systems: Socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. *Animal* **2014**, 8, 1255–1263.
32. MAPA. Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – PLANO ABC, *Revista Brasileira de Geografia Física*, **2012**.
33. Martha-Júnior, G.; Vilela, L. *Pastagens no cerrado: baixa produtividade pelo uso limitado de fertilizantes*. Planaltina: Embrapa-CPAC, **2002**, p30.
34. Mazzetto, A.; Feigl, B.; Schils, R.; Cerri, C.; Cerri, C. Improved pasture and herd management to reduce greenhouse gas emissions from a Brazilian beef production system. *Livest. Sci.* **2015**, 175, 101–112.
35. Morton, D.; DeFries, R.; Shimabukuro, Y.; Anderson, L.; Arai, E.; Del Bon Espirito-Santo, F.; Freitas, R.; Morissette, J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2006**, 103, 14637–14641.
36. Nepstad, D., McGrath, D., Stickler, C., Alencar, A., Azevedo, A., Swette, B., Bezerra, T., DiGiano, M., Shimada, J., Motta, R.S., Armijo, E., Castello, L., Brando, P., Hansen, M.C., McGrath-Horn, M., Carvalho, O., Hess, L. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, 2014, 344, 1118–1123.

37. Olexa, E.; Lawrence, R. Performance and effects of land cover type on synthetic surface reflectance data and NDVI estimates for assessment and monitoring of semi-arid rangeland. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2014**, *30*, 30–41.
38. Oliveira, E.; Couto, V. Productive and Economic Viability of Raising Beef Cattle in the Savanna of the Brazilian State of Goiás. *Rev. Econ. e Sociol. Rural*, **2018**, *56*, 395–410.
39. Oliveira, O.; Oliveira, I.; Alves, B.; Urquiaga, S.; Boddey, R. Chemical and biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2004**, *103*, 289–300.
40. Olofsson, P.; Foody, G.; Herold, M.; Stehman, S.; Woodcock, C.; Wulder, M. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *148*, 42–57.
41. Parente, L.; Mesquita, V.; Miziara, F.; Baumann, L.; Ferreira, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sens. Environ.* **2019**, *232*, 111301.
42. Parente, L., Ferreira, L. Assessing the spatial and occupation dynamics of the Brazilian pasturelands based on the automated classification of MODIS images from 2000 to 2016. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 606
43. Pereira, L.; Ferreira, C.; Guimarães, R. Manejo, Qualidade E Dinâmica Da Degradação De Pastagens Na Mata Atlântica De Minas Gerais - Brasil. *Nativa*, **2018** *6*, 370.
44. Pereira, O.; Ferreira, L.; Pinto, F.; Baumgarten, L. Assessing Pasture Degradation in the Brazilian Cerrado Based on the Analysis of MODIS NDVI Time-Series. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1761.
45. Reinermann, S.; Asam, S.; Kuenzer, C. Remote sensing of grassland production and management-A review. *Remote Sens.* **2020**, *12*.
46. Reis, A.; Werner, J.; Silva, B.; Figueiredo, G.; Antunes, J.; Esquerdo, J.; Coutinho, A.; Lamparelli, R.; Rocha, J.; Magalhães, P. Monitoring Pasture Aboveground Biomass and Canopy Height in an Integrated Crop–Livestock System Using Textural Information from PlanetScope Imagery. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 2534.
47. Rouse, W.; Haas, R.; Deering, D. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, NASA SP-351. *Third ERTS-1 Symp.* **1974**, Vol. 1.
48. Souza, C.; Shimbo, J.; Rosa, M.; Parente, L.; Alencar, A.; Rudorff, B.; Hasenack, H.; Matsumoto, M.; Ferreira, L.; Souza-Filho, P.; Oliveira, S.; Rocha, W.; Fonseca, A.; Marques, C.; Diniz, C.; Costa, D.; Monteiro, D.; Rosa, E.; Vélez-Martin, E.; Weber, E.; Lenti, F.; Paternost, F.; Pareyn, F.; Siqueira, J.; Viera, J.; Neto, L.; Saraiva, M.; Sales, M.; Salgado, M.; Vasconcelos, R.; Galano, S.; Mesquita, V.; Azevedo, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sens.* **2020**, *12*.
49. Sparovek, G.; Reydon, B.; Guedes Pinto, L.; Faria, V.; Freitas, F.; Azevedo-Ramos, C.; Gardner, T.; Hamamura, C.; Rajão, R.; Cerignoni, F.; Siqueira, G.; Carvalho, T.; Alencar, A.; Ribeiro, V. Who owns Brazilian lands? *Land use policy*, **2019**, *87*, 104062.
50. Stabile, M.; Guimarães, A.; Silva, D.; Ribeiro, V.; Macedo, M.; Coe, M.; Pinto, E.; Moutinho, P.; Alencar, A. Solving Brazil’s land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. *Land use policy*, **2020**, *91*, 104362.
51. Strassburg, B.; Latawiec, A.; Barioni, L.; Nobre, C.; da Silva, V.; Valentim, J.; Vianna, M.; Assad, E. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Glob. Environ. Chang.* **2014**, *28*, 84–97.
52. USDA, *Livestock and Products Annual, Brazil 2019*, **2019**, p17.

53. Vieira-Filho e Fishlow, *Agricultura e Indústria no Brasil Inovação e Competitividade*, Brasília, IPEA **2017**. p305
54. Volpe, E.; Marchetti, M.; Macedo, M.; Rosa, E. Renovação de pastagem degradada com calagem, adubação e leguminosa consorciada em neossolo Quartzarênico. *Acta Sci. Agron.* **2008**, 30, 131–138.
55. West, P.; Gerber, J.; Engstrom, P.; Mueller, N.; Brauman, K.; Carlson, K.; Cassidy, E.; Johnston, M.; MacDonald, G.; Ray, D.; Siebert, S. Leverage points for improving global food security and the environment. *Science*, **2014**, 345, 325–328.

Capítulo 3 - Uso de modelo baseado em processos (Century) e Sistema de Informação Geográfica (SIG) para estimativa dos estoques de carbono em áreas de pastagens no Cerrado brasileiro

3.1. Resumo

O Brasil foi considerado o sexto maior emissor de GEE - (Gases de Efeito Estufa) em 2019, respondendo por ~3,2 % das emissões globais. A maior parte dessas emissões vem dos setores Uso da Terra (44%) e Agropecuária (28%). Assim, incentivar manejos que aumentem a eficiência no uso da terra e promovam ganhos em produtividade e estoques de carbono nas pastagens é uma alternativa para reduzir as emissões brasileiras. O mapeamento e monitoramento dos estoques de carbono é fundamental para esse objetivo, de modo que, neste estudo apresentamos uma abordagem para mapeamento e monitoramento dos estoques de carbono nas pastagens do bioma Cerrado, integrando o modelo biogeoquímico *Century* e dados ambientais em Sistema de Informações Geográficas (SIG), por meio de rotinas de processamentos de alto desempenho em ambiente *R*. Com a aplicação desta abordagem, o estoque médio de carbono no solo estimado para as pastagens no Cerrado (~30,8 MgC.ha⁻¹) foi correspondente ao observado em outros estudos que amostraram estoques de carbono em pastagens nesse bioma. Estoques de C estimados para a biomassa aérea (4,0 MgC.ha⁻¹) também foram similares aos reportados em outros estudos que avaliaram esses estoques. Os padrões edáficos influenciaram os estoques de carbono no solo, com maiores estoques estimados para solos com alto teor de argila, como os Argissolos (~31,5 MgC.ha⁻¹), menores estoques em solos mais arenosos como os Neossolos (~28,9 MgC.ha⁻¹) e valores intermediários para os Latossolos (~30,4 MgC.ha⁻¹), que é o grupo mais representativo no bioma. A idade das pastagens também influenciou os resultados, com estoque de carbono apresentando tendência de redução em pastagens antigas. O modelo *Century* foi capaz de estimar adequadamente os estoques de carbono nas áreas ocupadas por pastagens no Cerrado, reproduzindo adequadamente os padrões espaciais característicos da influência edafoclimática no bioma.

3.2. Introdução

Um grande desafio para a humanidade neste século é promover os avanços técnicos, sociais e políticos necessários para manter o aquecimento global abaixo de 2 °C em relação aos níveis do período pré-industrial (Peter et al., 2013). Face a esse desafio, em 1994 foi criada a UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - *United Nations Framework Convention on Climate Change*), que foi assinada por 197 países (unfccc.int) que se uniram em resposta às ameaças representadas pelas mudanças climáticas. Estabilizar a concentração de GEE (gases de efeito estufa) na atmosfera, de modo que interferências antrópicas não alterem perigosamente o clima, se tornou um objetivo prioritário. Avaliar o ciclo do carbono é fundamental para alcançar este objetivo, pois permite compreender como e em que proporção o balanço entre emissão e absorção influenciam a concentração

de CO₂ na atmosfera (Houghton, 2007), uma vez que esse gás responde por mais 75% das emissões de GEE.

O estoque de carbono no planeta está, basicamente, alocado em quatro macro reservatórios (*Atmosfera, Ecossistemas oceânicos, Ecossistemas terrestres e Combustíveis Fósseis*), sendo que o ciclo global desse elemento químico se refere a trocas entre esses reservatórios (Friedlingstein et al., 2020). A escala temporal em que essas trocas acontecem pode variar de poucos segundos a alguns milênios, e no que tange aos impactos sobre as condições climáticas global, interessam as trocas que acontecem nas escalas de um ano a poucos séculos. O balanceamento do carbono ocorre como resultado dessas trocas (Houghton, 2007), que acontecem por processos ecossistêmicos naturais e antrópicos, sendo que na fase natural o estoque de carbono pode flutuar anualmente em função da variabilidade climática, mas ao final a emissão e absorção tendem ao balanceamento. Entre 2010 e 2019, a emissão e absorção média nessa fase natural do ciclo do carbono foi de 210 PgC, sendo 120 PgC nos ecossistemas terrestres, e 90 PgC nos ecossistemas oceânicos (Friedlingstein et al., 2020). Entretanto, a influência antrópica vem alterando o equilíbrio, contribuindo para que o volume emitido supere o absorvido. Na última década as emissões anuais médias somaram 11 PgC e a absorção média somou 5,9 PgC, indicando que nesse período a compensação das emissões foi de 53,4% (Friedlingstein et al., 2020). Atingir o equilíbrio climático, compensando 100% dessas emissões é um dos objetivos da UNFCCC.

Os ecossistemas terrestres são cruciais para alcançar esses objetivos, pois são uma importante fonte de emissões de CO₂ por ações antrópicas, por meio da agricultura, silvicultura e outros usos da terra (AFOLU - *Agriculture, Forestry and Other Land Use*). Ao mesmo tempo, em que é a principal fonte absorção de C, principalmente por meio do crescimento da vegetação secundária, e ganho de produtividade nas áreas cultivadas (agricultura, pecuária e silvicultura), com a otimização do manejo (Houghton, 2007; Albuquerque et al., 2020). Assim, nesses ecossistemas está uma grande oportunidade para reduzir e compensar emissões, avançando no sentido de zerar as emissões líquidas (diferença entre as emissões e as remoções de carbono por meio de ações sustentáveis, uma vez que os ecossistemas terrestres são muito afetados por ações antrópicas. A atividade pecuária ocupa papel de destaque nesse potencial, pois é a principal forma de uso da terra em termos de ocupação de área, com pastagens abrangendo cerca de 37% da superfície terrestre não congelada - sendo 17% de savanas e áreas arbustivas, 19% de pastagem extensiva e somente 2% com pastagem intensiva (Shukla et al., 2019).

No Brasil, onde os setores Uso da Terra e Agropecuária somam ~72% das emissões, e as pastagens ocupam ~20% do território (Parente et al., 2019; Albuquerque et al., 2020), o incentivo a manejos que aumentem a eficiência no uso da terra e promovam ganhos em produtividade e estoque de C podem contribuir para redução das emissões nacional. Assim, com incentivos políticos, financeiros e

manejos eficientes, a atividade pecuária no Brasil pode contribuir para redução das emissões. Nesse sentido, mapear e monitorar os estoques de carbono nas áreas de pastagens é fundamental. Dentre as possíveis abordagens para essa tarefa, o uso de modelos matemáticos baseados em processos ecossistêmicos ajustados a partir de informações reais têm se mostrado o mais viável e factível (Henderson et al., 2015). Atualmente vários modelos baseados em processos ecossistêmicos e ciclos biogeoquímicos têm sido utilizados para simular os ciclos de elementos químicos (e.g. Carbono, Nitrogênio, Fósforo), em cenários diversos (Smith et al., 1997; Nicoloso et al., 2020). O Century (Soil Organic Matter Model Environment) é um modelo biogeoquímico que tem se destacado. E o uso de modelos baseados em processos ecossistêmicos ajustados a partir de informações reais tem se mostrado um caminho viável nessa tarefa. Atualmente vários modelos baseados em processos são utilizados para simular os ciclos de elementos químicos em cenários diversos (e.g. Carbono, Nitrogênio, Fósforo) (Smith et al., 1997; Nicoloso et al., 2020).

O Century tem se destacado dentre uma série de outros modelos utilizados para simular o ciclo do carbono em cenários de uso e cobertura da terra, dada a sua versatilidade em simular estoque no solo e nos diversos compartimentos da vegetação, independente da classe de uso e cobertura da terra e técnica de manejo utilizada, desde que calibrado de forma específica para os respectivos usos e manejos (Smith et al., 1997). Inicialmente desenvolvido para simular os estoques de carbono no solo em áreas de pastagens nas regiões temperadas (Parton et al., 1987), o modelo Century tem sido utilizado para simular os estoques de carbono no solo também em áreas de pastagens em regiões tropicais e o potencial de mitigação de gases de efeito estufa também em regiões tropicais (Bortolon et al., 2011; Brandani et al., 2014; Henderson et al., 2015; Ouyang et al., 2014; Tornquist et al., 2009; Vezzani and Mielniczuk, 2011). É nesse contexto que, no presente estudo, apresentamos uma abordagem de análise para o mapeamento dos estoques de carbono em áreas de pastagens, integrando o modelo baseado em processos ecossistêmicos *Century* e Sistemas de Informações Geográficas (SIG); e, por meio desta abordagem, mapeamos e quantificamos os estoques de carbono nas áreas ocupadas pastagens no bioma Cerrado.

3.3. *Material e métodos*

3.3.1. *Área de estudo*

Para as análises, a identificação das pastagens no bioma Cerrado foi baseada em estudo que mapeou essa classe de uso da terra no Brasil, no período entre 1985 e 2017 (Parente et al., 2019). No mapeamento, os autores utilizaram o algoritmo baseado em aprendizado de máquinas *Random Forest*, treinado com mais de 30 mil amostras de pastagem e outros tipos de cobertura do solo. A série temporal de mapas produzidos foi disponibilizada pelos autores na plataforma [Atlas Digital das Pastagens Brasileiras](#) (LAPIG, 2020). Aqui, tomamos como referência as áreas classificadas como pastagens no

bioma Cerrado no mapa relativo ao ano de 2017. A modelagem foi realizada com o detalhamento espacial de 1 km^2 , portanto o mapa referência de área de pastagens, com resolução de $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, foi reamostrado para a escala da modelagem. No processo de reamostragem, foi utilizado o critério de moda, permanecendo classificados como pastagens, apenas os pixels 1 km^2 com mais de 50% de sua área classificada como pastagens no mapa de referência, somando uma área de $\sim 50,7 \text{ Mha}$ (figura 3.1).

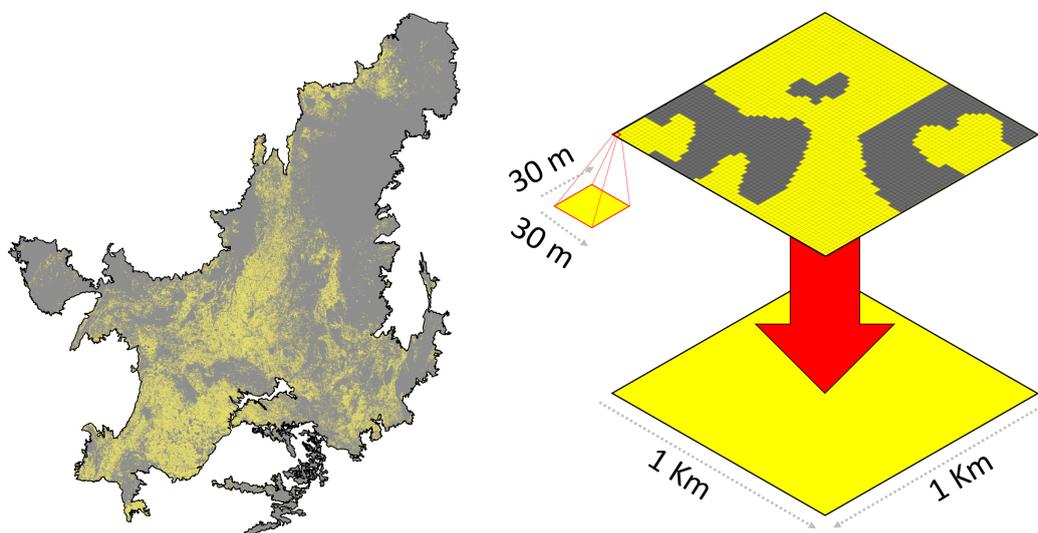


Figura 3.1. Áreas de pastagens no bioma Cerrado, com resolução espacial reamostrada de $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ para 1 km^2 , somando aproximadamente $50,7 \text{ Mha}$, no ano de 2017.

3.3.2. Simulação do estoque de carbono

Os estoques de carbono das pastagens do bioma Cerrado foram estimados por meio do modelo Century - *Soil Organic Matter Model Environment*, baseado em simulações *per-pixel*, para a camada superficial de 0-20 cm (Parton et al., 1987). O Century é um modelo baseado em processos biogeoquímicos, que simula a ciclagem de nutrientes na interação vegetação-solo-atmosfera e, conseqüentemente, a dinâmica do Carbono, Nitrogênio, Fósforo e Enxofre, em escala mensal. Neste estudo, analisamos apenas a dinâmica e estoques de Carbono. Sendo inicialmente aplicado em áreas das grandes planícies norte americanas (Parton et al., 1987), estudos posteriores constataram que o Century é eficaz também em regiões tropicais, de modo que nas últimas décadas o modelo tem sido aplicado com sucesso em diversos ecossistemas, como áreas de vegetação nativa, agricultura e pastagens, com parâmetros ajustados de modo específico para as respectivas classes de uso e cobertura do solo, se mostrando capaz de simular o carbono em todos sistemas de uso da terra analisados (Smith et al., 1997; Cerri et al., 2004; Bortolon et al., 2011; Brandani et al., 2014; Althoff et al., 2018).

O Century consiste em vários submodelos, como o submodelo da dinâmica da matéria orgânica, submodelo de água e submodelo de produção vegetal. A maioria das variáveis necessárias ao submodelo de dinâmica da matéria orgânica são calculadas pelos submodelos água e produção vegetal (Leite e Mendonça, 2003). Os parâmetros requeridos para simulações pelo modelo são as variáveis climáticas

temperatura média do ar e precipitação mensal, e as variáveis edáficas relacionada a textura do solo (areia, argila e silte), além de variáveis relacionadas ao manejo para o uso da terra a ser simulado, como aporte de nitrogênio (Leite e Mendonça, 2003). O ambiente do modelo century é composto pelos programas que incluem as equações dos submodelos e estrutura de exportação das simulações, arquivos de descrição do processo a ser simulado incluindo eventos ocorridos no mesmo, como ações de manejo, arquivos de parâmetros edáficos e climáticos locais, e arquivos de parâmetros ambientais do local e processo a ser simulado pelo modelo (figura 3.2).

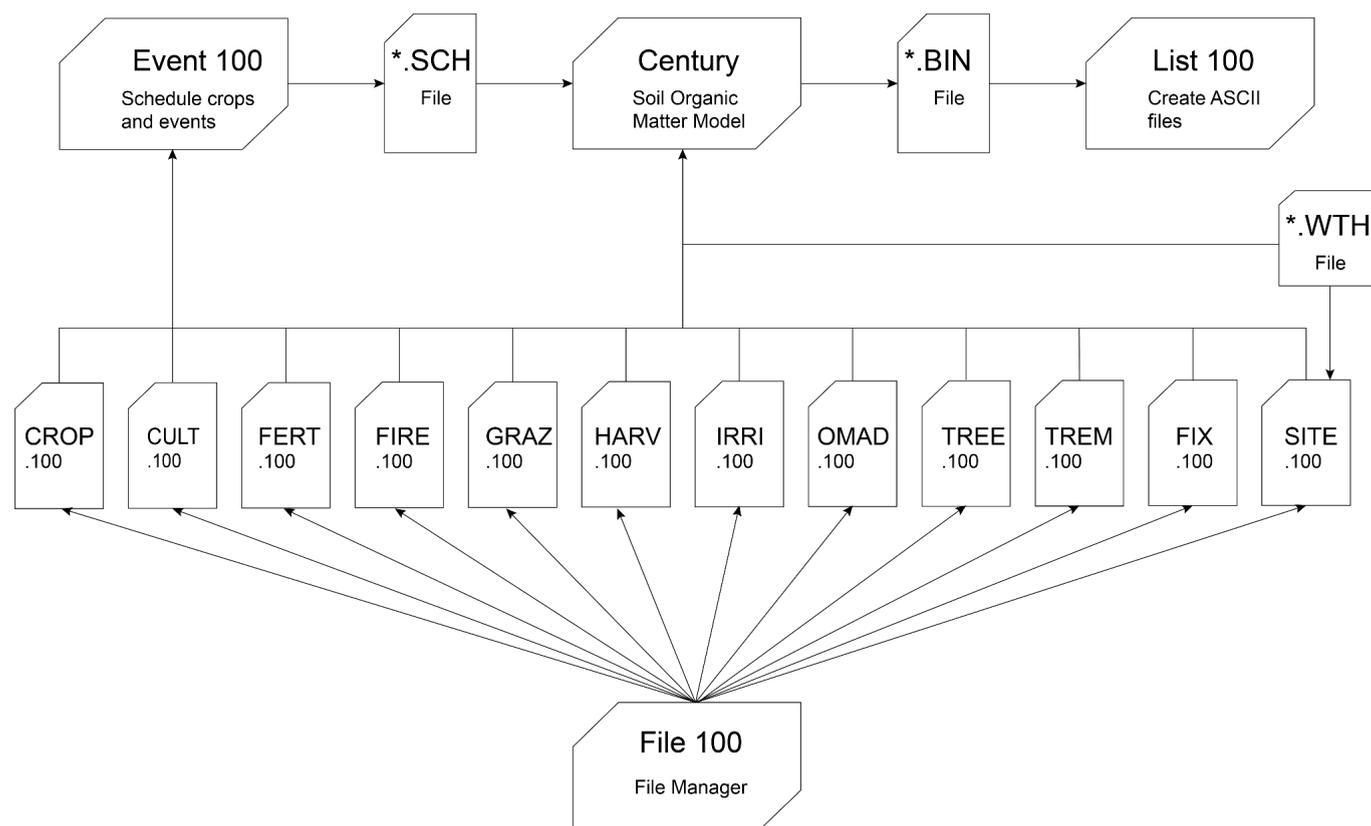


Figura 3.2. Ambiente do modelo century, mostrando as relações entre programas (*Century* e *List 100*), e estrutura de arquivos de descrição das simulações (*Event 100*), parâmetros edafoclimáticos locais (**.WTH*) e parâmetros das estimativas a serem realizadas (*Arquivos *.100*).

Em estudo realizado por Silva (2019), os parâmetros do modelo Century foram ajustados para simular a dinâmica de carbono sob condições de pastagem no Cerrado, no qual o modelo foi calibrado e validado com dados independentes. Nesse estudo os autores simularam uma situação de manejo convencional das pastagens no bioma. Esse manejo é o mais comum na região, sendo caracterizado por uma pecuária extensiva, com pastejo contínuo ao longo do ano, baixa frequência de fertilização das pastagens e de suplementação do rebanho bovino. Para os ajustes nos parâmetros do modelo, bem como a análise de acurácia dessa calibração os autores utilizaram bancos de dados de amostras de solos no Cerrado, publicados por Assad et al., (2013), o qual contempla diferentes tipos de solo e abrangem os diversos estados do bioma. As variáveis do solo necessárias para o ajuste do modelo foram textura, ph e

densidade. As variáveis climáticas necessárias foram obtidas por meio da rede de estações do INMET, priorizando as estações mais próximas a cada ponto amostrado. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que a calibração do modelo simula adequadamente a dinâmica do carbono em pastagens no Cerrado, sob manejo convencional (figura 3.3).

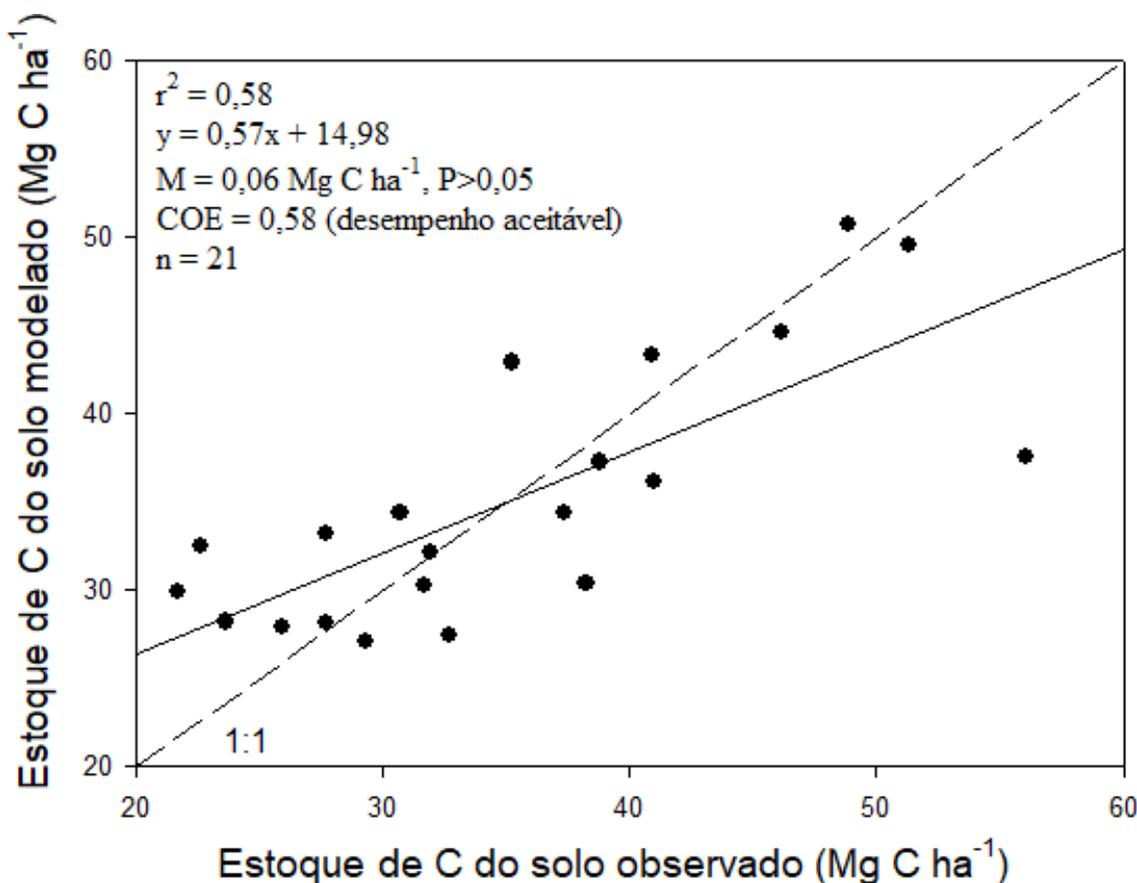


Figura 3.3. Localização dos pontos de calibração e validação da pastagem no bioma Cerrado (fonte: Silva, 2019).

3.3.3. Histórico de uso da terra

As informações referentes ao histórico de uso da terra (*e.g.*, cobertura vegetal, manejo adotado, tempo de uso, etc.) são importantes para as simulações, por se tratarem de fatores diretamente relacionados aos fluxos de entradas e saídas de carbono e, conseqüentemente, seu estoque no ecossistema. Para estabelecimento do histórico de uso em áreas de Cerrado utilizamos a série temporal de mapas produzidos por Parente et al., (2019), para identificar o ano de conversão da área para pastagem. Foi considerado como ano de conversão, aquela com maior área convertida, pois uma vez que cada pixel modelado (1 km²) contém aproximadamente 1,1 mil pixels nos mapas da série temporal (30 m x 30 m), e podem ter sido convertidos para pastagens em anos distintos. Assim, utilizamos o critério de moda para identificar o ano de conversão para pastagem. Considerando o período de abrangência temporal da série de mapas (1985 - 2017), foi possível determinar o histórico de uso dos últimos 33 anos. Portanto, nas

áreas já classificadas como pastagens em 1985, este ano foi definido para o início das simulações. Esta decisão foi tomada, por estudos indicarem que entre duas ou três décadas o processo de conversão de uso da terra já não exerce influência significativa nos estoques de carbono, pois nesse período os fluxos de entrada e saída teriam se estabilizados, e portanto as condições edafoclimáticas e de manejo seriam determinantes para os estoques (Cerri et al., 2004; Lal, 2006).

3.3.4. Propriedades físico-química do solo

As propriedades físico-químicas do solo são determinantes para o estoque de carbono na matéria orgânica do solo, e portanto são *inputs* necessários para a utilização do modelo Century. Nesse contexto, para cada pixel, a textura (*areia*, *argila* e *silte*), a densidade e a acidez (pH) são variáveis utilizadas no processo de modelagem. Estas variáveis foram obtidas da base de dados SoilsGrids (Hengl et al., 2014; Batjes et al., 2019). O SoilsGrids é uma base de dados global, com resolução espacial de 1 km², que em seis camadas de profundidade, disponibiliza informações de propriedades físico-químicas para todo o planeta, e portanto atende aos pré-requisitos necessários ao modelo Century (figura 3.4).

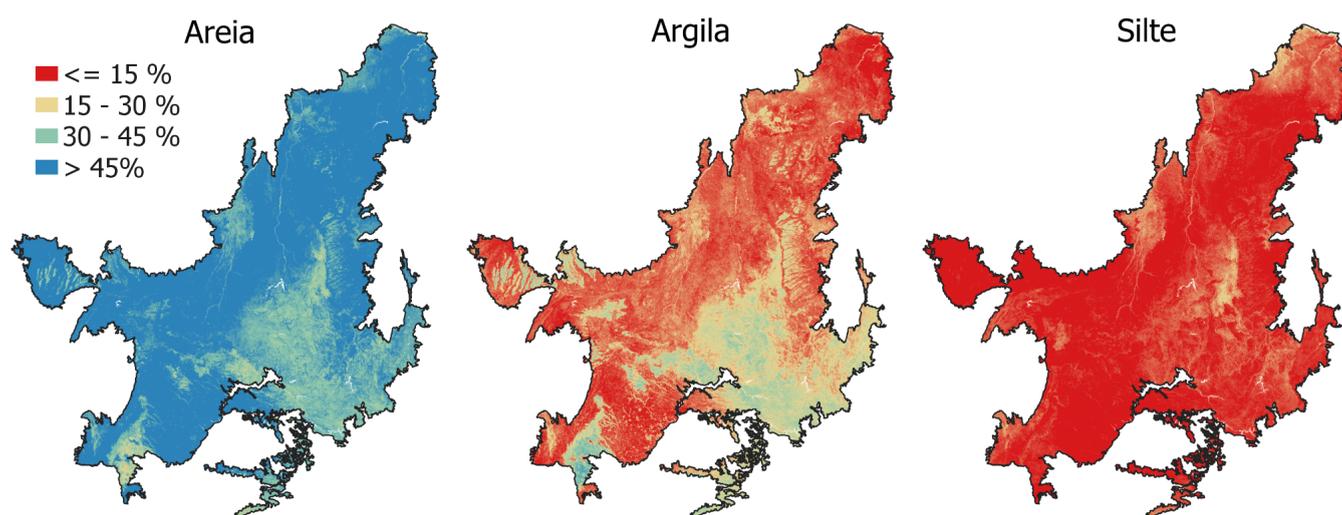


Figura 3.4. Mapas de textura do solo no Cerrado, obtidos na base de dados do SoilGrids e utilizados para modelar os estoques de carbono nas áreas de pastagens do Bioma. Mapas de densidade e acidez (Ph) foram obtidos na mesma base.

No presente estudo, utilizamos a média das três camadas superficiais (*0 cm - 5 cm*, *5 cm - 15 cm* e *15 cm - 30 cm*) de cada variável supracitada. As concentrações médias de areia, argila e silte, foram respectivamente, 61,3 %, 23,6 % e 15,5 %, enquanto o pH médio foi 5,1 e a densidade de aproximadamente 1,4 ton/m³ (tabela 3.1).

Tabela 3.1. Dados de textura do solo no Cerrado, obtidos na base de dados do SoilGrids e utilizados para modelar os estoques de carbono nas áreas de pastagens do Bioma. Mapas de densidade e acidez (Ph) foram obtidos na mesma base.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
Areia (%)	84,0	28,0	61,3	9,0
Argila (%)	52,0	9,0	23,6	6,2
Silte (%)	37,0	3,0	15,5	4,3

<i>pH KCl</i>	6,5	4,3	5,1	1,6
<i>Densidade (Kg/m³)</i>	1535,0	1137,0	1397,1	33,5

3.3.5. Dados climáticos: temperatura e precipitação

A sazonalidade climática e os valores de precipitação e temperatura - *média mensal máximas e mínimas* - são determinantes para a produtividade de biomassa e, conseqüentemente, influenciam a dinâmica e o estoque de carbono em áreas de pastagens. Especialmente no bioma Cerrado, onde há grande variação edafoclimática, e com isso o uso de informações espacializadas no processo de modelagem é crucial na estimativa acurada do estoque de carbono. No presente estudo essas variáveis supracitadas foram obtidas da base de dados Terraclimate (Abatzoglou et al., 2018). A Terraclimate possui resolução temporal mensal e resolução espacial de 4 km, abrangendo o período 1958 a atual, sendo uma base de dados climáticos contempla as variáveis, pré-requisitos no processo modelagem por meio do Century, com a abrangência temporal e espacial, e a frequência necessárias aos objetivos deste estudo (figura 3.5).

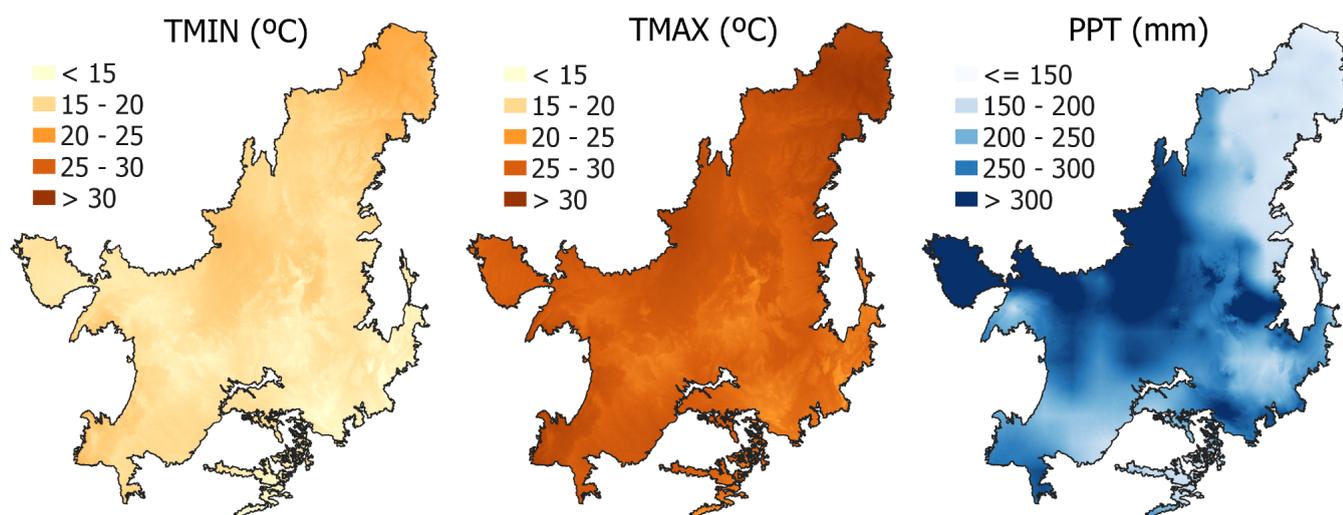


Figura 3.5. Mapas de variáveis climáticas no Cerrado, obtidos na base de dados do Terraclimate, e utilizados para modelar os estoques de carbono nas áreas de pastagens do Bioma. (TMIN - Temperatura mínima; TMAX - Temperatura máxima; PPT - Precipitação; Para ilustração, foram utilizados dados de dezembro/2017).

Por ser baseada em modelos e interpolação, os dados da Terraclimate apresentam erros sistemáticos quando comparados a dados locais, obtidos de estações climáticas. Nesse sentido, com base em dados de estações climáticas do INMET no bioma Cerrado, foram gerados fatores de correção para as variáveis analisadas, por meio dos quais os erros sistemáticos da base Terraclimate foram corrigidos (Carvalho et al., 2015). Refletindo a sazonalidade climática do bioma Cerrado, em 2017 a precipitação anual média anual de 1030 mm, enquanto a temperatura máxima média mensal variou espacialmente entre 23,6 °C e 34,8 °C, e a temperatura mínima média mensal ficou entre 11,7 °C e 24,0 °C (tabela 3.2).

Tabela 3.2. Variáveis climáticas no Cerrado, obtidos da base de dados do Terraclimate, e utilizados para modelar os estoques de carbono nas áreas de pastagens do Bioma, relativos ao ano de 2017.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
<i>Precipitação (mm)</i>	2553,0	363,0	1030,0	204,0
<i>Temperatura Máxima (°C)</i>	34,8	23,6	31,0	1,4
<i>Temperatura Mínima (°C)</i>	24,0	11,7	18,9	1,7

3.3.6. *Análises e processamento de dados*

O modelo Century foi desenvolvido em linguagem computacional *Fortran*, e seu funcionamento projetado para simulações por pontos, em processos pouco automatizados e ineficientes para grandes volumes de dados (i.e milhares de pontos). Com isso, sua aplicação em larga escala depende da automatização por meio de integração a outras linguagens de programação e construção de rotinas de processamentos (figura 3.6). Algumas iniciativas foram desenvolvidas nesse contexto, para uso do modelo Century em escala regional (Tornquist et al., 2009) e global (Henderson et al., 2015), entretanto, essas abordagens utilizam análise de SIG em etapas posteriores à modelagem da dinâmica do carbono, e os recursos desenvolvidos nestas abordagens não estão disponíveis para uso público. Portanto, para o presente estudo, construímos rotinas de processamentos baseadas em ambiente computacional *R* utilizando uma lógica de processamento em blocos de dados, customizável para computadores independentemente da configuração de hardware e para modelagem em quaisquer escalas e resoluções espaciais. Com a ressalva de que a configuração de hardware e detalhamento espacial exercem grande influência no tempo de processamento. Integramos o modelo Century a essas rotinas de processamentos, possibilitando a utilização de bancos de dados necessários para a modelagem de carbono (condições edafoclimáticas) e o seu uso em ampla escala espacial.

Por meio dessas rotinas de processamento, o estoque de carbono associado às pastagens foi simulado para toda a área classificada como pastagens no bioma Cerrado no ano de 2017. As simulações compreenderam o período entre 1958 e 2019, e para avaliações foram utilizados os resultados do último ano. Os resultados foram analisados por meio de variáveis, que representam o estoque de carbono da biomassa aérea e do solo nas áreas de pastagens: (*carbono na biomassa aérea viva, carbono na biomassa aérea morta, carbono na biomassa das raízes e carbono na matéria orgânica do solo*). Por meio destas variáveis, analisamos os padrões espaço-temporais dos resultados, a dinâmica intra-anual do estoque de carbono nas pastagens do bioma, e o potencial uso do modelo century na perspectiva do mapeamento e monitoramento desses estoques em grandes áreas e considerando diferentes cenários de manejo das pastagens.

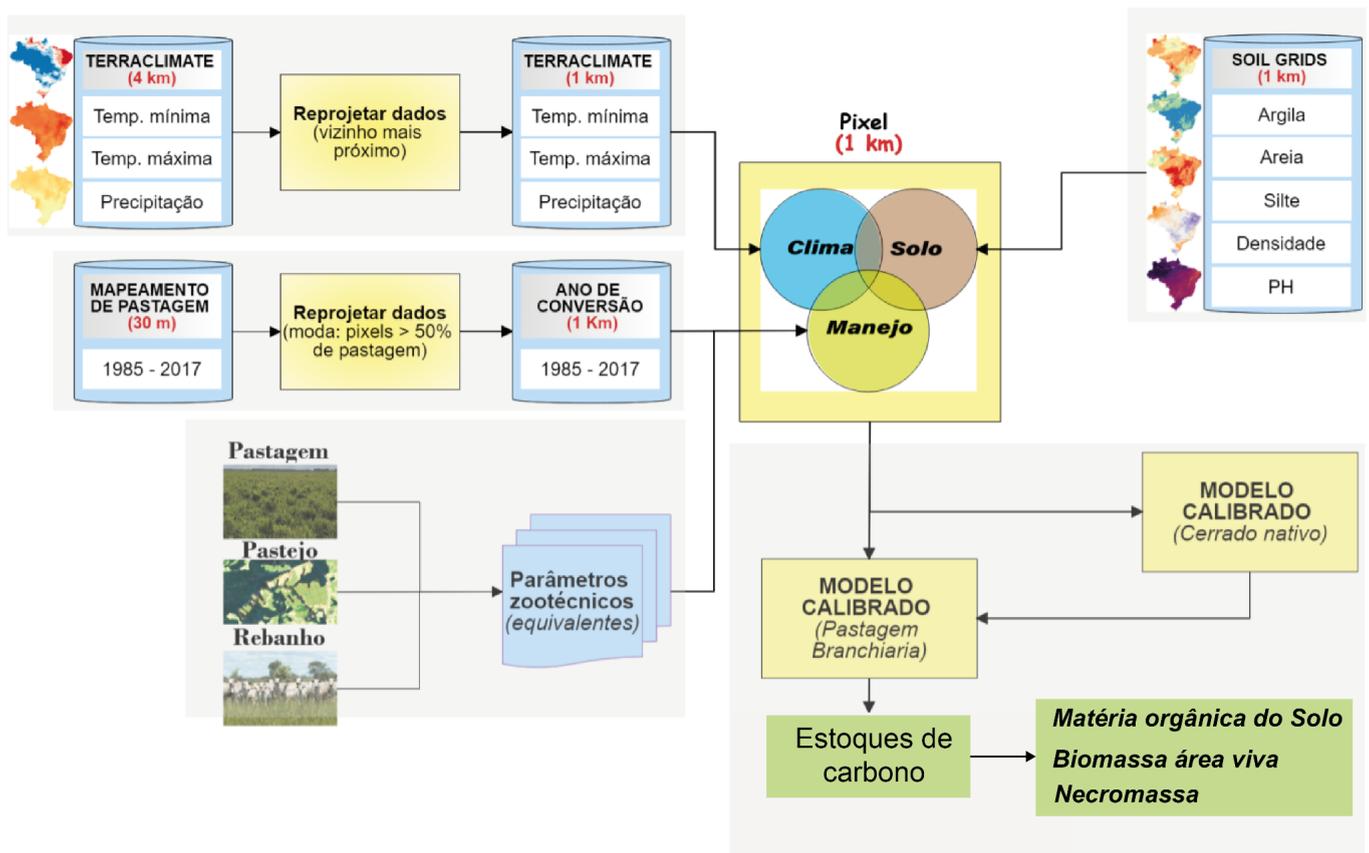


Figura 3.6. Estrutura de processamento e harmonização das bases de dados com parâmetros edafoclimáticas, que são entradas requeridas para estimativas dos estoques de carbono em áreas de pastagens, por meio do pelo modelo Century.

3.4. Resultados e discussão

3.4.1. Estimativas de estoque de carbono nas pastagens do bioma Cerrado

O estoque total de carbono estimado por modelagem para as pastagens do bioma Cerrado em 2019 somou 1,69 PgC (*Petagrama de Carbono*), sendo que 89% é composto por carbono presente na matéria orgânica do solo (1,51 PgC) (figura 3.7). Fidalgo et al., (2007) estimaram estoques de C em solos do Brasil de aproximadamente 36 PgC na camada superficial (0-30 cm). Considerando a proporção de solos no Cerrado coberta por pastagens, isto equivaleria a um estoque de 2,17 PgC nesse tipo de uso da terra, ou seja, o valor estimado através de modelagem foi próximo a estimativas prévias. Devido à grande extensão territorial do Cerrado (~2 milhões de km²), com importante proporção coberta por pastagens principalmente na parte sul desse Bioma (Souza et al., 2020), a variação nos estoques médios de C em solos sob pastagem costuma ser alta. Isto seria consequência da heterogeneidade edafoclimática na região, aliado à diversidade de tipos de manejo utilizados nas pastagens. Através do modelo Century foram encontrados estoques de C em solos sob pastagem no Cerrado até 20 cm de profundidade variando entre ~7,0 e 43,6 MgC.ha⁻¹, com média de ~30,8 MgC.ha⁻¹ (figura 3.7A). Enquanto Fidalgo et al., (2007) encontraram estoque médio de C em solos sob áreas antropizadas de Cerrado no valor de 39,7 MgC.ha⁻¹ (0-30 cm), Assad et al., (2013) reportaram valores entre 6,0 e 47,7 MgC.ha⁻¹ para a camada superficial

0-10 cm, e entre 15,9 e 100,9 MgC.ha⁻¹ na camada 0-30 cm de solos sob pastagens no Brasil. Mais recentemente, Englund et al., (2017) ao compararem mapas oficiais - utilizados na terceira comunicação nacional ao UNFCCC - de carbono e mapas disponíveis na literatura, também encontraram grande amplitude nos valores de estoque de C no solo em áreas de pastagem.

O estoque estimado de C na biomassa aérea total foi de 0,18 PgC, enquanto a média foi de 4,0 MgC.ha⁻¹, sendo este valor próximo ao estimado por Bustamante et al., (2012), que foi de 4,1 MgC.ha⁻¹ em pastagens do Cerrado. Avaliar a proporção entre os componentes vivo e morto da biomassa aérea traz importante inferência sobre a qualidade da forragem disponível para o gado, a qual tem relação direta com a porção verde ingerida pelos animais. Os estoques de C estimados na biomassa aérea viva variaram entre ~1,5 e ~2,7 MgC.ha⁻¹, enquanto no componente morto variaram entre ~0,7 e ~1,5 MgC.ha⁻¹ (figura 3.7B e 3.7C). Ao considerar os valores médios de estoque de C, a proporção nas frações viva e morta foi de 58% e 42%, respectivamente. Estes resultados foram semelhantes aos encontrados em estudo realizado na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho (GO), onde os estoques médios de C na biomassa viva e morta amostrados em campo foram de ~1,6 MgC.ha⁻¹ e ~1,1 MgC.ha⁻¹, correspondendo a proporções de 59% a 41%, respectivamente (ver Capítulo 2).

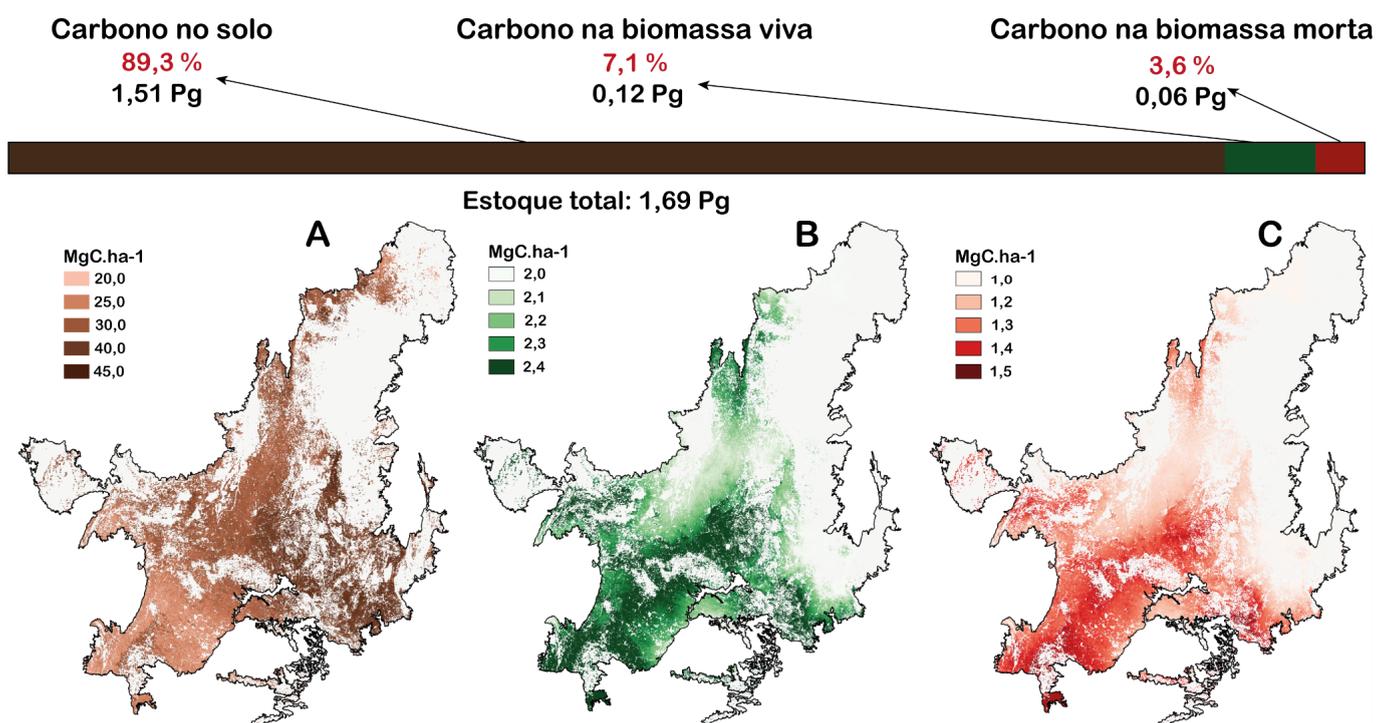


Figura 3.7. Estoque de carbono estimado para as áreas de pastagens do bioma Cerrado no ano de 2019. (A: Carbono na matéria orgânica do solo, B: carbono na biomassa aérea viva e C: carbono na biomassa aérea morta).

3.4.2. Estoque de carbono por classes de solo e idade das pastagens

A textura do solo tem grande influência na variação dos estoques de C da matéria orgânica, uma vez que solos argilosos tendem a possuir maiores valores. Isto acontece porque as menores partículas (argila) contribuem para maior estabilização da matéria orgânica. As áreas de Latossolos compreendem

cerca de 48% das pastagens no bioma Cerrado e tiveram estoque médio estimado em $\sim 30,8 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$, apresentando valor intermediário em relação às demais ordens de solo analisadas. Os Neossolos compõem a segunda ordem em proporção de área, abrangendo cerca de 17,8% das pastagens no bioma, e a menor média de estoque de C ($\sim 28,9 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$). Os solos dessa ordem, por terem passado por menor tempo de intemperização, tendem a apresentar menor teor de argila e, conseqüentemente, baixa capacidade de retenção de matéria orgânica, resultando em menores estoques de C. O padrão oposto é esperado para os Argissolos, que tendem a apresentar maior teor de argila e, conseqüentemente, maior retenção do carbono no solo. Neste tipo de solo observamos que o estoque médio estimado foi de aproximadamente $\sim 31,5 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$. Por sua vez, nas áreas de Plintossolos os valores foram intermediários, com estoques similares aos estimados para Latossolos ($\sim 30,4 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$). Pode-se afirmar que os valores simulados pelo modelo Century estão em acordo com a relação esperada entre os estoques de C e os respectivos tipos de solo.

Entretanto, nas áreas de Cambissolo, os resultados indicam que o modelo superestimou os estoques de C no solo, apresentando média superior aos demais tipos de solos analisados ($34,0 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), o que não condiz com o esperado (figura 3.8A). Apesar dos Cambissolos poderem apresentar alto teor de argila, tem baixa capacidade de reter e estocar de carbono por serem solos rasos e que geralmente apresentam concreções, assim, é esperado que os estoques sejam menores nessas áreas. Desse modo, os resultados observados indicam que o uso do modelo para simular os estoques em grande escala espacial é adequado para os principais tipos de solo no bioma Cerrado, entretanto para as áreas de Cambissolos é necessário que alguns ajustes sejam realizados em parâmetros relacionados com o efeito do teor de argila na estabilização da matéria orgânica do solo. Outro fator limitante para a eficácia do modelo está relacionado a precisão dos dados de entradas em representar a realidade. Como observado na tabela 3.1, os valores médios de argila do solo nas pastagens do bioma Cerrado (23,6 %) é abaixo do esperado para o bioma (Assad et al., 2013), e nas bases de dados edafoclimáticas foram detectados erros sistemáticos nas variáveis precipitação e temperatura, nas quais foram aplicados fatores de correção calculados a partir de dados climáticos locais. Isto reforça a importância de bases de dados edafoclimáticas com alta acurácia, para estudo da dinâmica do carbono por meio de modelagem ambiental.

Além do tipo de solo, o tempo de conversão da vegetação nativa para pastagem também contribui para explicar os valores de estoque de C do solo. Devido aos procedimentos relacionados à instalação das pastagens, existe uma tendência de queda dos estoques de C com o aumento na idade deste uso da terra. Enquanto na vegetação nativa em condição de equilíbrio os estoques de C do solo tendem a variar pouco no tempo, pois as saídas de C deste compartimento são compensadas pelas entradas, eventos como remoção do componente arbóreo, queimadas, entre outros, utilizados no desmatamento promovem a perda do C armazenado no solo para a atmosfera. A simulação pelo modelo Century mostrou que os

estoques de C do solo apresentam tendência a reduzir com a idade da pastagem, padrão esperado ao se utilizar o manejo convencional de pastagens (Figura 3.8B). Na classe de menor idade o estoque médio estimado foi de $\sim 32,4 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$, enquanto pastagens com idade até 35 anos apresentaram estoques de $\sim 29,02 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$.

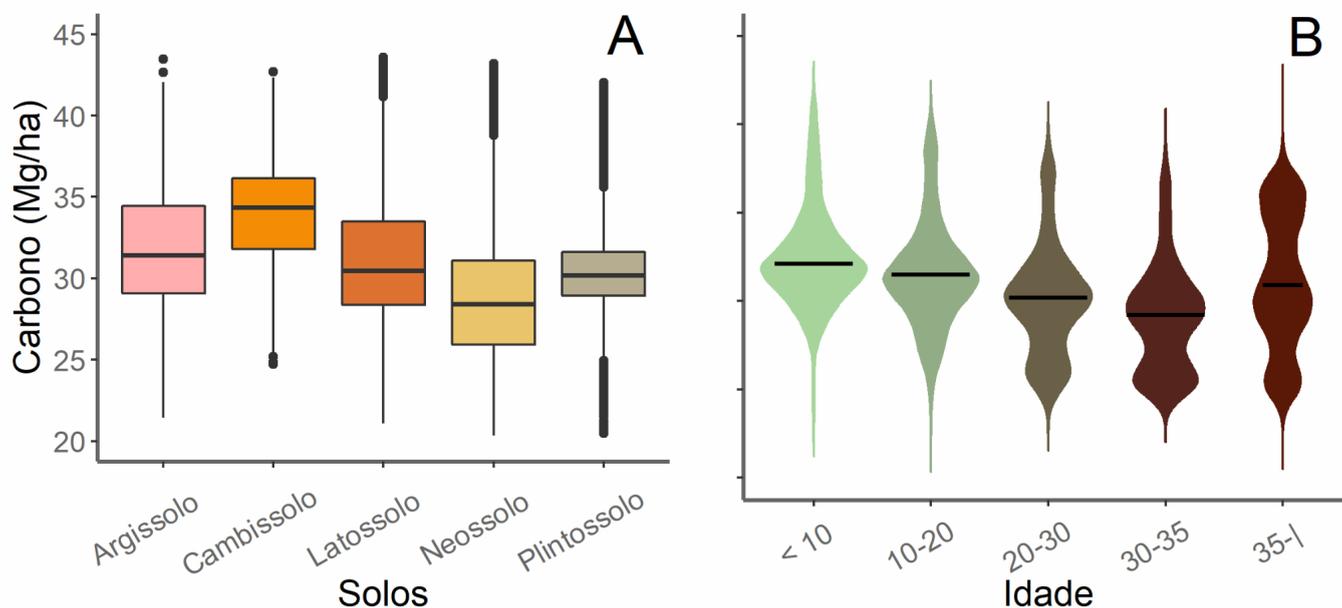


Figura 3.8. Estoque de carbono estimado para as áreas de pastagens do bioma Cerrado no ano de 2019. *A: Estoque de carbono por idade da pastagem; B: Estoque de carbono por ordem de solo; *3,0% da área ocupada por pastagens no bioma pertenceram a ordens de solos não analisadas.*

Por outro lado, as pastagens mais antigas (≥ 35 anos) apresentaram estoque médio de $\sim 31,0 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$, interrompendo a tendência de redução dos estoques de C no solo. Percebe-se também nesta classe maior variabilidade nos dados, o que pode ser uma resposta à maior abrangência desta classe de idade em termos de área ocupada por pastagem, a qual possui $\sim 64,8 \%$ da área total analisada (tabela 3.3). Portanto, esta variação certamente está associada à maior heterogeneidade nas condições edafoclimáticas das áreas simuladas, sendo a única classe de idade com maior densidade de valores de estoque em três níveis. Estoques em torno de $25 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ foram predominantes nas áreas de Neossolo e uma pequena proporção em Latossolos e Argissolos. Valores próximos à $30 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ foram mais frequentes em Latossolos e Plintossolos, com ocorrência de Argissolo em menor proporção. No terceiro nível ($\sim 35 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), houve predominância de Cambissolo e ocorrência de Argissolo e Latossolo também nessa classe. Esses padrões ao longo do tempo evidenciam que os efeitos do processo de conversão abrangem as duas primeiras décadas e a partir desse tempo os estoques se estabilizam, com menores estoques em pastagens com maior idade (Cerri et al., 2004; Lal, 2006; Oliveira et al., 2004).

Tabela 3.3. Percentual de área de pastagem por ordem de solo e período de conversão para este uso da terra. *3,0% da área ocupada por pastagens no bioma pertenceram a ordens de solos não analisadas.*

Solo (ordem)	Área (Mha)	Perc (%)	1985 (> 35)	1980-1990 (30-35)	1990-2000 (20-30)	2000-2010 (10-20)	2010-2017 (< 10)
-----------------	---------------	-------------	--------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-------------------------

<i>Argissolo</i>	6,5	10,2	9,7	0,6	1,2	1,0	0,6
<i>Cambissolo</i>	5,3	10,8	8,0	0,6	1,2	0,7	0,4
<i>Latossolo</i>	23,6	48,0	33,7	4,1	5,7	2,7	1,8
<i>Neossolo</i>	8,8	17,8	9,0	2,6	3,7	1,7	0,8
<i>Plintossolo</i>	5,0	10,2	4,4	0,8	2,3	1,6	1,1
<i>Total</i>	49,2	97,0	64,8	8,7	14,1	7,7	4,7

3.5. Conclusões

Neste estudo avaliamos a performance do modelo Century, previamente ajustado para simular o cenário de manejo convencional das pastagens para modelagem da dinâmica e estimativas dos estoques de carbono nas áreas de pastagens do bioma Cerrado. Considerando os resultados alcançados, e sabendo que as pastagens no bioma Cerrado são diversas e apresentam alta heterogeneidade, o Century se provou versátil e robusto sendo eficaz em estimar os estoques de carbono nas áreas analisadas, tendo por referência o manejo convencional das pastagens, reproduzindo adequadamente os padrões espaciais característicos da influência sazonal no bioma Cerrado.

Os maiores estoques estimados para os grupos de solos mais férteis como Argissolos, menores estoques nos grupos de solos mais arenosos como os Neossolos e valores intermediários nas áreas de Latossolo, indicam que o modelo foi sensível aos padrões edáficos. Nesse sentido, calibrações mais abrangentes podem ser utilizadas para análises dos estoques de carbono em amplas áreas, desde que o modelo seja alimentado com informações locais de clima e solo, como no presente estudo, em que os parâmetros de entrada do modelo foram específicos *per-pixel*.

A idade das pastagens influenciou os estoques de carbono, com maiores estimativas sendo observadas em pastagens mais novas, e tendência de redução no estoque com o aumento da idade. Correspondendo aos padrões característicos do manejo convencional das pastagens no Cerrado, no qual fatores como a baixa fertilização e pressão do pastejo contínuo levam a redução na produtividade e a diminuição nos estoques de carbono ao longo do tempo.

A acurácia das bases de dados de clima, solo e uso da terra, utilizadas para alimentar o modelo, influenciam a eficácia do modelo em simular adequadamente a dinâmica do carbono nas áreas de pastagens. Ou seja, determinar a contribuição de cada variável para os resultados do modelo pode contribuir no processo de escolha e melhoria dessas bases de dados. Assim, recomenda-se que estudos futuros incluam análises de sensibilidades das variáveis de entradas do modelo.

3.6. Referências

1. Abatzoglou, J., Dobrowski, S., Parks, S., Hegewisch, K. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Sci. Data*, 2018, 5, 1-12.

2. Albuquerque, I., Alencar, A., Angelo, C., Barcellos, T.A.F., Coluna, I., Junior, C.C., Cremer, M., Piatto, M., Potenza, R., Quintana, G., Shimbo, J., Tsai, D., Zimbres, B., 2020. Análise Das Emissões Brasileiras De Gases De Efeito Estufa E Suas Implicações Para As Metas De Clima Do Brasil 1970-2019 41.
3. Althoff, T., Menezes, R., Pinto, A., Pareyn, F., Carvalho, A. de, Martins, J., de Carvalho, E., Silva, A. da, Dutra, E., Sampaio, E. Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2018, 254, 26–34.
4. Batjes, N.H., Ribeiro, E., van Oostrum, A., 2020. Standardised soil profile data to support global mapping and modelling (WoSIS snapshot 2019). *Earth Syst. Sci. Data* 12, 299–320. <https://doi.org/10.5194/essd-12-299-2020>
5. Bortolon, E.S.O., Mielniczuk, J., Tornquist, C.G., Lopes, F., Bergamaschi, H., 2011. Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. *Geoderma* 167–168, 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.08.008>
6. Brandani, C.B., Abbruzzini, T.F., Williams, S., Easter, M., Pellegrino Cerri, C.E., Paustian, K., 2015. Simulation of management and soil interactions impacting SOC dynamics in sugarcane using the CENTURY Model. *GCB Bioenergy* 7, 646–657. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12175>
7. Bustamante, M.; Nobre, C.; Smeraldi, R.; Aguiar, A.; Barioni, L.; Ferreira, L.; Longo, K.; May, P.; Pinto, A.; Ometto, J. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Clim. Chang.* 2012, 115, 559–577
8. Carvalho, A.L. de, Menezes, Rô.S.C., Nóbrega, R.S., Pinto, A. de S., Ometto, J.P.H.B., von Randow, C., Giarolla, A., 2015. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renew. Energy* 78, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.023>
9. Cerri, C.E.P., Paustian, K., Bernoux, M., Victoria, R.L., Melillo, J.M., Cerri, C.C., 2004. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. *Glob. Chang. Biol.* 10, 815–832. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00759.x>
10. Englund, O., Sparovek, G., Berndes, G., Freitas, F., Ometto, J.P., Oliveira, P.V.D.C.E., Costa, C., Lapola, D. A new high-resolution nationwide aboveground carbon map for Brazil. *Geo Geogr. Environ.* 2017, 4, 1–12.
11. Fidalgo, E., Benites, V., Machado, P., Madari, B., Coelho, M., Moura, I., Lima, C. Estoque de Carbono nos Solos do Brasil, Boletim de pesquisa e desenvolvimento. 2007, Rio de Janeiro.
12. Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Alin, S., Aragão, L.E.O.C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N.R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H.C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P.M., Gasser, T., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R.A., Ilyina, T., Jain, A.K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Marland, G., Metzl, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y.,

- O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P.I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A.J.P., Sutton, A.J., Tanhua, T., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A.P., Wanninkhof, R., Watson, A.J., Willis, D., Wiltshire, A.J., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., 2020. Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
13. Henderson, B.B., Gerber, P.J., Hilinski, T.E., Falcucci, A., Ojima, D.S., Salvatore, M., Conant, R.T., 2015. Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agric. Ecosyst. Environ.* 207, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.029>
 14. Hengl, T., De Jesus, J.M., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B.M., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J.G.B., Walsh, M.G., Gonzalez, M.R., 2014. SoilGrids1km - Global soil information based on automated mapping. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992>
 15. Houghton, R.A., 2007. Balancing the Global Carbon Budget. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 35, 313–347. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140057>
 16. LAL, R., Soil carbon sequestration in Latin America, In: n: Lal, R.; Cerri, C. C.; Bernoux, M.; Etchevers, J.; Cerri, C. E. P. (Eds.), *Carbon Sequestration in soils of Latin America*, 2006, 285–304 p.;
 17. Lapig, *Atlas Digital das Pastagens Brasileiras*, pastagem.org/atlas, Acesso em dez-2020, **2020**.
 18. Leite, L.; Mendonça, E. Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo: equações e pressupostos. *Revista Ciência Rural*, 2003, v. 33(4), 6;
 19. Nicoloso, R.S., Amado, T.J.C., Rice, C.W., 2020. Assessing strategies to enhance soil carbon sequestration with the DSSAT-CENTURY model. *Eur. J. Soil Sci.* 71, 1034–1049. <https://doi.org/10.1111/ejss.12938>
 20. Oliveira, O., Oliveira, I., Alves, B., Urquiaga, S., Boddey, R. Chemical and biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2004, 103, 289–300.
 21. Ouyang, W., Shan, Y., Hao, F., Lin, C., 2014. Differences in soil organic carbon dynamics in paddy fields and drylands in northeast China using the CENTURY model. *Agric. Ecosyst. Environ.* 194, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.003>
 22. Parente, L.; Mesquita, V.; Miziara, F.; Baumann, L.; Ferreira, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sens. Environ.* **2019**, 232, 111301.
 23. Parton, W., Schimel, D., Cole, C., Ojima, M. Division S-3 soil microbiology and biochemistry, *Soil Scientific Society*, vol. 51, 1987;

24. Peters, G.P., Minx, J.C., Weber, C.L., Edenhofer, O., 2011. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 108, 8903–8908. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006388108>
25. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Diemen, R. van, Haughey, E., Malley, J., M. Pathak, Pereira, J.P., 2019. Foreword Technical and Preface. *Clim. Chang. L. an IPCC Spec. Rep. Clim. Chang. Desertif. L. Degrad. Sustain. L. Manag. food Secur. Greenh. gas fluxes Terr. Ecosyst.* 35–74.
26. Silva, J.R., 2019. Dinâmica do carbono em solos sob áreas de pastagens no bioma Cerrado. Universidade Federal de Goiás. <https://doi.org/CDU 911.2>
27. Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franko, U., Frolking, S., Jenkinson, D.S., Jensen, L.S., Kelly, R.H., Klein-Gunnewiek, H., Komarov, A.S., Li, C., Molina, J.A.E., Mueller, T., Parton, W.J., Thornley, J.H.M., Whitmore, A.P., 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, 153–225. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00087-6)
28. Souza, C.M., Shimbo, J.Z., Rosa, M.R., Parente, L.L., Alencar, A.A., Rudorff, B.F.T., Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L.G., Souza-Filho, P.W.M., de Oliveira, S.W., Rocha, W.F., Fonseca, A. V., Marques, C.B., Diniz, C.G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E.R., Vélez-Martin, E., Weber, E.J., Lenti, F.E.B., Paternost, F.F., Pareyn, F.G.C., Siqueira, J. V., Viera, J.L., Neto, L.C.F., Saraiva, M.M., Sales, M.H., Salgado, M.P.G., Vasconcelos, R., Galano, S., Mesquita, V. V., Azevedo, T., 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/RS12172735>
29. Tornquist, C.G., Gassman, P.W., Mielniczuk, J., Giasson, E., Campbell, T., 2009. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil: Integrating century and GIS with i_Century. *Geoderma* 150, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.001>
30. Vezzani, F.M., Mielniczuk, J., 2011. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 213–223. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100020>

Considerações finais

Buscando contribuir na compreensão e caracterização das pastagens brasileiras, na presente tese foram analisados três aspectos importantes nesta classe de uso da terra: A influência da sazonalidade hídrica na biomassa e na resposta espectral das pastagens em diferentes escalas espaciais; O potencial do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), obtido por sensoriamento remoto para o mapeamento da qualidade das pastagens, e análise dos padrões espaciais em escala nacional; E estimativas do estoque de carbono no solo e na biomassa aérea das pastagens do bioma cerrado, por meio de modelos baseados em processos ecossistêmicos.

A variação na biomassa média anual na escala regional foi maior que na escala local, indicando que há um aumento de amplitude com ao aumentar a complexidade das pastagens. Por outro lado, não houve diferença na biomassa média por estação climática (seca e chuva) tanto na escala local quanto na escala regional, diferindo o padrão esperado. Essa resposta pode estar relacionada à predominância da prática de manejo por pastejo contínuo nas áreas estudadas, na qual o consumo pelos animais limitariam o aumento da biomassa na estação chuvosa. Padrão diferente foi observado para a biomassa viva e morta, sendo que esta última apresentou volume três vezes maior na estação seca e houve semelhança na estação chuvosa, indicando influência da sazonalidade hídrica.

Em ambas as escalas o volume de biomassa variou com a condição da pastagem, com menores valores sendo registrados para as classes mais degradadas. Entretanto, ao analisar a relação entre o NDVI e a biomassa nas diferentes classes de condição da pastagem, observou-se que a relação foi fraca ou ausente, indicando baixo potencial deste índice para estimar o estoque de biomassa em pastagens. No entanto, houve alta relação entre o índice e a razão biomassa viva/morta, e diferenças nos padrões sazonais em função da qualidade das pastagens, indica seu potencial como *proxy* do vigor da pastagem, o que foi confirmado com o mapeamento da qualidade das pastagens brasileiras.

Por meio do NDVI foi possível identificar e mapear a qualidade das pastagens em três níveis de degradação. A análise de acurácia do mapeamento foi possível apenas para o bioma Cerrado, uma vez que os dados obtidos em campo nos níveis de degradação mapeados estavam limitados a este bioma. A acurácia do mapeamento variou em função da qualidade da pastagem, com menor valor observado na classe intermediária, indicando que a abordagem utilizada foi menos eficiente em mapear esta classe. A partir do mapeamento da qualidade das pastagens, foi possível analisar sua dinâmica espaço-temporal. Com essa análise, identificamos que houve ganhos de qualidade nas pastagens brasileiras, com a área que deixou de apresentar indícios de degradação sendo 2,7 vezes maior que a área que perdeu qualidade. Os resultados correspondem aos padrões observados na literatura e aos incentivos à recuperação das pastagens por meio de programas como o Plano ABC.

A modelagem da dinâmica e estimativas dos estoques de carbono nas áreas de pastagens do bioma Cerrado por meio do modelo Century, com os parâmetros ajustados para simular o cenário de manejo convencional das pastagens no bioma, confirmou a versatilidade e robustez do modelo, sendo eficaz em estimar os estoques de carbono nas áreas analisadas, reproduzindo adequadamente os padrões espaciais característicos da influência sazonal no bioma Cerrado. Com isso, observa-se que o modelo Century integrado a sistemas de informações geográficas e rotinas de processamento de alto desempenho, apresenta potencial como ferramenta para o mapeamento e monitoramento dos estoques de carbono em larga escala, como as pastagens do bioma Cerrado e em escala nacional. A alta versatilidade do modelo possibilita ajustes dos parâmetros para manejos e condições ambientais específicas, o que é necessário viabilizar o uso do Century em escala nacional. Nesse contexto, sugerimos que uma configuração por bioma, contemplando a vegetação nativa pretérita, forrageira e manejo predominante tornarão os resultados mais abrangentes. Um refinamento desejável é a configuração considerando uma máscara de qualidade das pastagens, com parâmetros para pastagens com produtividade alta, média e degradada. Alcançando esses resultados, as estimativas de aumento, redução e mitigação de emissões de GHG pela atividade pecuária no Brasil certamente ganharia em precisão e utilidade a outros estudos e iniciativas relacionados ao tema.

Apêndices

1. Método para o mapeamento e monitoramento do estado de degradação das pastagens brasileiras

Neste apêndice são apresentadas ilustrações do processo de pré-processamento dos dados para obtenção de imagens medianas de NDVI equivalentes entre os anos de 2010 e 2018 (figura A1.1), do processo de correção espectral dos dados do satélite Landsat 5 para Landsat 8 equivalente (figura A1.2), estratificação do NDVI_{norm} em classes de degradação das pastagens (figura A1.3), e cálculo do IDP a partir das classes de degradação da pastagem (figura A1.4)

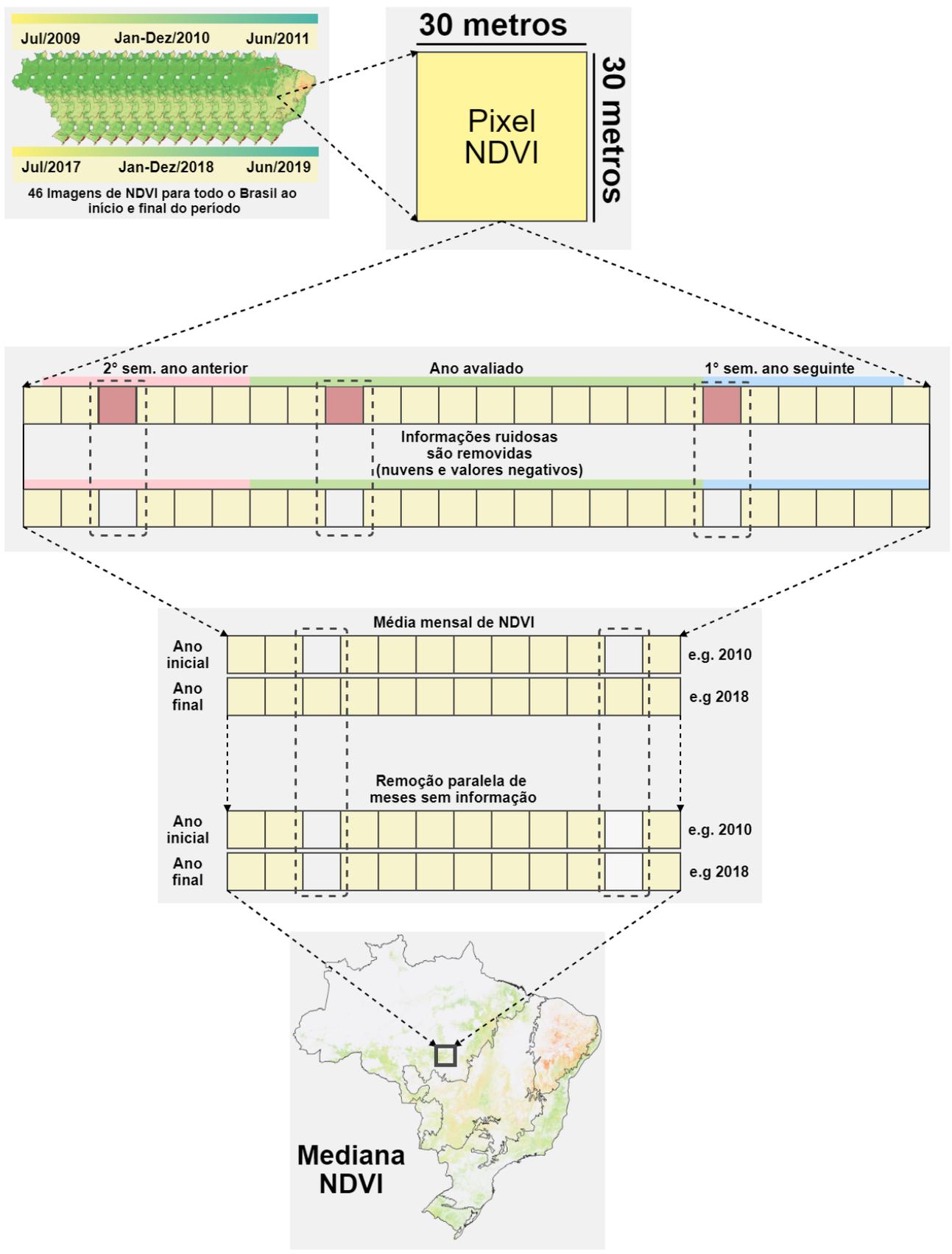


Figura A1.1. Critérios utilizados para calcular imagens mediana de NDVI dos satélites Landsat 5 e 8 (i.e 2010 e 2018), compatíveis e comparáveis entre si.

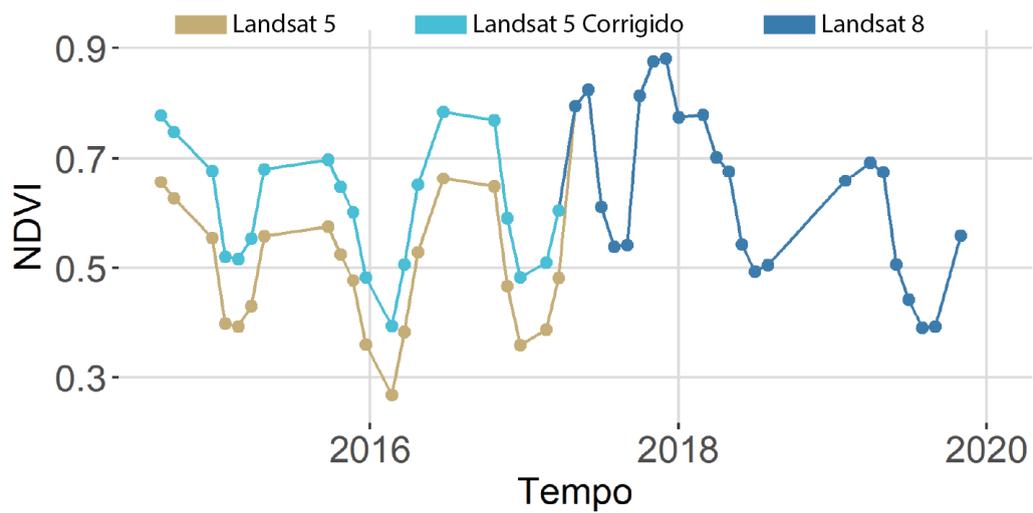


Figura A1.2 Ilustração de uma série temporal de NDVI, com destaque para a diferença de valores entre o Landsat 5 e 8 e o efeito da correção espectral nos dados do Landsat 5.

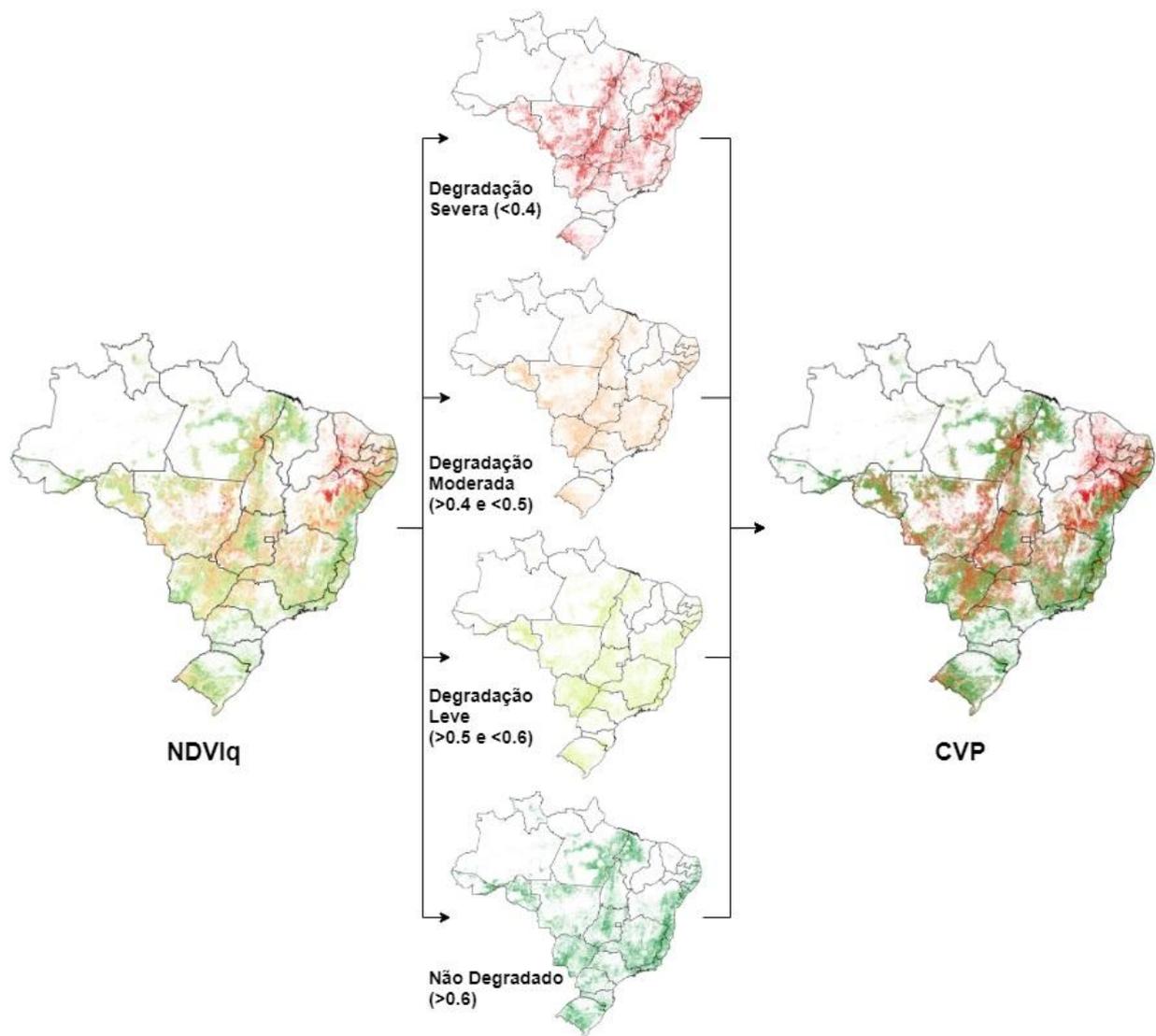


Figura A1.3 Estratificação do NDVI_{norm} em classes de em três classes de degradação.

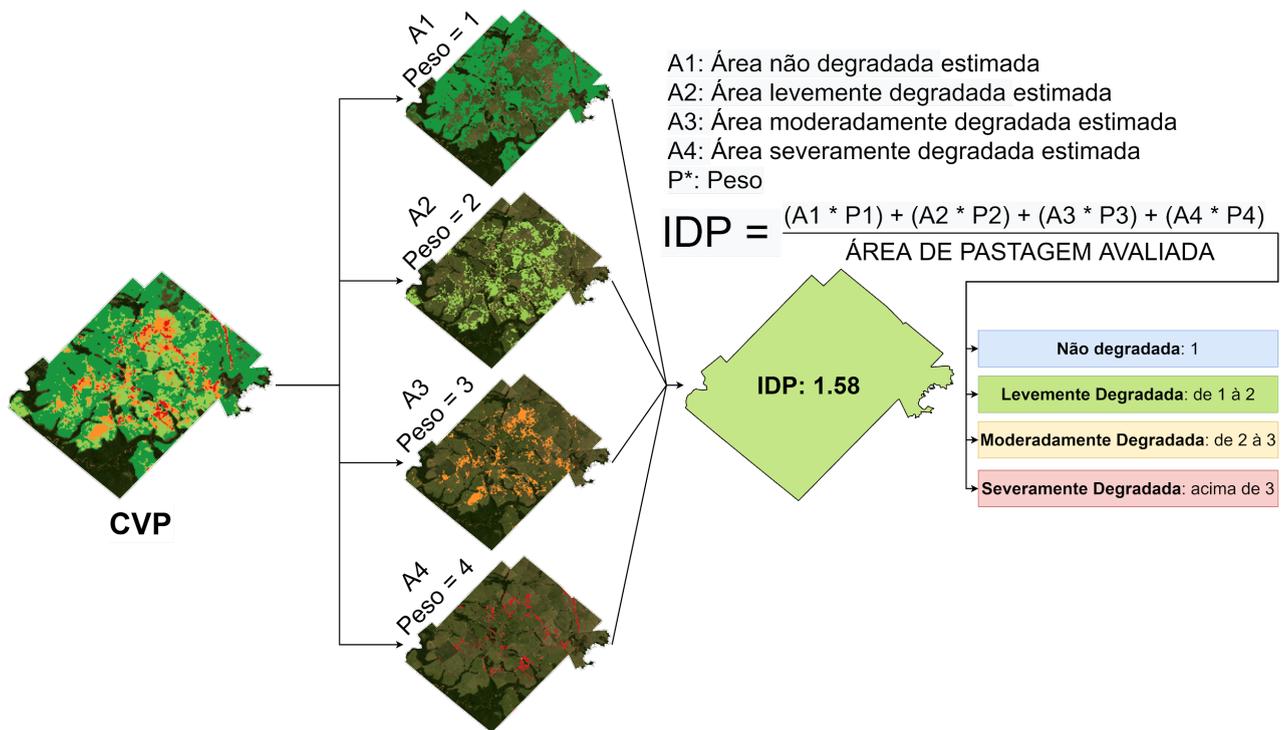


Figura A1.4 Abordagem de análise para o cálculo do IDP - Índice de Degradação das Pastagens, para regiões de interesse - e.g. propriedades rurais, municípios e estados. No exemplo, uma propriedade rural no município de Pedra Preta - MT.