

**ESTOQUES DE CARBONO NAS ÁREAS DE
VEGETAÇÃO CAMPESTRE DA ÁREA DE PROTEÇÃO
AMBIENTAL (APA) DO IBIRAPUITÃ**

Carline Biasoli Trentin

Orientadora: prof^a. Dr^a. Dejanira Luderitz Saldanha

Porto Alegre / RS, março de 2015

CARLINE BIASOLI TRENTIN

**ESTOQUES DE CARBONO NAS ÁREAS DE VEGETAÇÃO
CAMPESTRE DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (APA) DO
IBIRAPUITÃ**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, RS), como requisito para obtenção do grau de Doutora em Sensoriamento Remoto.

Orientadora: prof^ª. Dr^ª. Dejanira Luderitz Saldanha

**Porto Alegre
2015**

CIP - Catalogação na Publicação

Biasoli Trentin, Carline

ESTOQUES DE CARBONO NAS ÁREAS DE VEGETAÇÃO
CAMPESTRE DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (APA) DO
IBIRAPUITÃ / Carline Biasoli Trentin. -- 2015.
98 f.

Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-
Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-
RS, 2015.

1. Estoques de Carbono. 2. Sazonalidade. 3.
Sensoriamento Remoto. I. Luderitz Saldanha, Dejanira
, orient. II. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ESTOQUES DE CARBONO NAS ÁREAS DE VEGETAÇÃO
CAMPESTRE DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (APA) DO
IBIRAPUITÃ**

elaborada por
Carline Biasoli Trentin

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutora em Sensoriamento Remoto

Comissão Examinadora:

Dejanira Luderitz Saldanha, Dra. (UFRGS)
(Presidente/Orientadora)

Damáris Gonçalves Padilha, Dra. (UFSM)

Carlos Gustavo Tornquist, Dr. (UFRGS)

Jorge Ricardo Ducati, Dr. (UFRGS)

Porto Alegre, Março de 2015.

Dedico aos meus pais Dimas e Neiva Trentin...

por tudo!

Agradecimentos

A Deus, pela vida, força e perseverança.

Aos meus pais e aos meus irmãos, pelo amor, carinho, ajuda e apoio incondicional, sem vocês não teria conseguido.

À Dejanira Saldanha, minha orientadora, pela tranquilidade, força e apoio, pelos ensinamentos, sugestões e amizade. Também a Eliana Fonseca, pela ajuda e orientação na fase inicial do doutorado.

Aos professores da comissão orientadora, Denise e Ricardo, pela ajuda, amizade e orientação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto, pela possibilidade de cursar um ensino superior gratuito e de qualidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de bolsa de pós-graduação.

Aos professores e colegas do curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto, e também de outros cursos que participaram e auxiliaram para a execução deste trabalho.

Aos produtores rurais da APA do Ibirapuitã e a todas as pessoas que auxiliaram durante os trabalhos de campo.

Aos *verdadeiros amigos* que sempre estiveram presentes, compartilhando e apoiando nos momentos difíceis. Cada um de vocês me ajudou muito a superar todos os desafios.

Enfim, à todos que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Estoques de carbono nas áreas de vegetação campestre da Área de Proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã

Autora: Carline Biasoli Trentin
Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha

Porto Alegre, Março de 2015

Em função das mudanças climáticas, estudos relacionados à vegetação campestre são importantes para avaliar o potencial da vegetação em reter carbono. Os modelos de estimativas de biomassa e carbono baseados na produtividade da vegetação e dados de sensoriamento remotos podem ser utilizados para estimar os estoques de carbono, caracterizando os padrões de variabilidade interanual. O objetivo deste estudo foi quantificar o estoque atual de carbono da APA do Ibirapuitã em áreas de vegetação campestre e avaliar a sua dependência com a variabilidade sazonal. Foram coletadas em campo amostras de parte aérea, serrapilheira, raízes e solo, em dois períodos do ano: verão e inverno, e realizada em laboratório a análise do teor de carbono orgânico pelo método de combustão úmida *Walkley Black*. As variações sazonais de carbono para cada variável foram verificadas através do teste de comparação de médias. A estimativa de biomassa e carbono da vegetação a partir de dados espectrais foi feita por meio de um modelo estatístico, com base na relação entre os valores de biomassa e carbono da parte aérea medidos em campo e a resposta espectral das bandas do sensor MODIS. As maiores concentrações no teor e estoques de carbono no interior da APA do Ibirapuitã foram verificadas para o solo e menores quantidades para a parte aérea, serrapilheira e raízes, no período do inverno. A vegetação campestre do bioma Pampa possui comportamento sazonal bem definido, com período de crescimento das espécies nos meses quentes do ano. A sazonalidade interferiu nos teores de carbono da parte aérea da vegetação, carbono da serrapilheira e carbono das raízes. O solo não apresentou diferenças nos estoques de C entre o verão e inverno. Para os estoques de carbono da parte aérea da vegetação, não se obteve diferenças entre as duas estações do ano. Com relação a estimativa de biomassa a partir de dados espectrais, o EVI apresentou melhores resultados para a estimativa de biomassa. Para a estimativa de estoque de carbono, o NDVI obteve melhores resultados para a predição de C. Conclui-se que a utilização conjunta de dados de campo e orbital, possibilita análises de diferentes dados e contribui com novas informações, alternativas e sugestões para o estudo de carbono na região.

Palavras-chave: Carbono, sazonalidade, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Program of Post Graduation on Remote Sensing
Federal University of Rio Grande do Sul – Brazil

Carbon stocks in the areas of grassland in the Ibirapuitã Environmental Protected Area (EPA)

Authora: Carline Biasoli Trentin
Advisora: Dejanira Luderitz Saldanha

Porto Alegre, March, 2015

Due to the climate change, grassland vegetation studies are important to assess the potential of vegetation in retain carbon. The models of biomass and carbon estimates based on vegetation productivity and remote sensing data can be used to estimate carbon stocks, characterizing the interannual variability patterns. The objective of this study was quantify the current stock of carbon from the EPA of Ibirapuitã in grassland vegetation and assesses their dependency with the seasonal variability. Were collected in field samples of the aboveground, leaf litter, roots and soil, in two periods of the year: summer and winter, and held in the laboratory analysis of the levels of organic carbon by Walkley Black method. Seasonal variations of carbon for each variable were verified through comparison test of averages. The estimation of biomass and carbon from vegetation spectral data was made by using a statistical model, based on the relationship between the values of aboveground biomass and carbon measured in field and the spectral response of the sensor MODIS bands. The largest concentrations in content carbon stocks within the EPA of Ibirapuitã was checked for the soil and smaller amounts to the aboveground, leaf litter and roots, in the winter period. The grassland of the Pampa biome has seasonal behavior well defined, with growing period of the species in the warm months of the year. The seasonality interfered in carbon content of aboveground vegetation, leaf litter carbon and carbon roots. For soil the were not differences in C stocks between summer and winter. For the carbon stocks of the above ground, not was obtained differences between the two seasons. About the biomass estimation from spectral data, the EVI presented better results for the estimation of biomass. For the estimation of carbon stocks, the NDVI has obtained better results for the prediction of C. It is concluded that the joint use of field and orbital data, enables analysis of different data and contributes new information, alternatives and suggestions for carbon study in the region.

Keywords: Carbon, seasonality, remote sensing.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2. Área de Estudo	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Ecossistemas terrestres, biomassa e o estoque de carbono.....	18
2.1.1 Ecossistemas terrestres: fotossíntese e produtividade primária	18
2.1.2 O ciclo do carbono e as mudanças climáticas	19
2.1.3 Biomassa vegetal.....	21
2.1.4 Estoques de Carbono.....	23
2.2.1 Dados de campo	31
2.2.2 Análise espacial.....	32
2.2.3 Sensoriamento Remoto	33
2.2.3.1 Modelos de inferência de biomassa e estoque de carbono na vegetação utilizando dados de sensoriamento remoto	37
2.2.3.2 O sensor MODIS	39
2.3. Bioma Pampa.....	40
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	45
3.1. Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra e Solos na APA do Ibirapuitã.....	45
3. 2 Coleta de dados em campo e medições em laboratório	48
3.2.1 Delineamento experimental.....	48
3.2.2 Amostragem em campo e laboratório	50
3.3 Quantificação dos estoques de carbono utilizando dados coletados em campo	53
3.4 Estimativa de biomassa e carbono a partir dos dados espectrais.....	55
4 RESULTADOS	57
4.1 Quantificação dos estoques de carbono utilizando dados coletados em campo	57
4.2 Quantificação do teor de carbono utilizando dados coletados em campo.....	65
4.3 Relação entre a precipitação e a quantidade de biomassa aérea e carbono	68
4.4 Quantificação da biomassa da parte aérea da vegetação campestre e seu estoque de carbono a partir de dados de sensoriamento remoto orbital.....	71

4.4.1 Relação entre a biomassa aérea e dados de sensoriamento remoto orbital	71
4.4.2 Relação entre o estoque de carbono e dados de sensoriamento remoto orbital	76
5 Conclusões.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo	16
Figura 2 - Ciclo global do carbono.....	20
Figura 3 - Curva espectral média típica de uma folha verde	34
Figura 4 - Distribuição espacial do bioma Pampa no estado do Rio Grande do Sul.....	41
Figura 5 - Curva média da produção de forragem total no bioma Pampa nos diferentes períodos do ano.....	43
Figura 6 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra na Área de Proteção Ambiental do Ibirapuitã .	46
Figura 7 - Mapa de solos da APA do Ibirapuitã	47
Figura 8 - Localização das amostras em campo	49
Figura 9 - Coleta da parte aérea de gramíneas antes do corte e depois do corte.	51
Figura 10 - Coleta de amostras de solo em campo.	51
Figura 11 - Localização das estações meteorológicas distribuídas no entorno da APA do Ibirapuitã.....	53
Figura 12 - <i>Boxplot</i> para a biomassa total da parte aérea da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã nos períodos do verão e inverno	58
Figura 13 - <i>Boxplot</i> para a serrapilheira da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã no verão entre os anos de 2012 a 2014	60
Figura 14 - <i>Boxplot</i> para a variável raiz da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã no verão entre os anos de 2012 a 2014.....	61
Figura 15 - <i>Boxplot</i> para o C do solo sob vegetação campestre na APA do Ibirapuitã no verão entre os anos de 2012 a 2014.....	63
Figura 16 - Relação entre o conteúdo de carbono e a biomassa da parte aérea da vegetação coletada em campo no verão e inverno (2012 - 2014).	64
Figura 17 - Precipitação acumulada mensal e temperatura média do ar entre o período do verão do ano de 2012 e verão de 2014 no entorno da APA do Ibirapuitã	68
Figura 18 - Perfil temporal da biomassa aérea da vegetação e dados espectrais.....	72
Figura 19 - Gráfico de dispersão e análise de regressão demonstrando a relação entre a disponibilidade de biomassa aérea da vegetação campestre medida em campo e a resposta espectral do sensor MODIS no bioma Pampa.	74
Figura 20 - Perfil temporal do carbono da biomassa aérea da vegetação e dados espectrais...	76
Figura 21 - Gráfico de dispersão e análise de regressão demonstrando a relação entre a disponibilidade de carbono da biomassa aérea da vegetação campestre medida em campo e a resposta espectral do sensor MODIS no bioma Pampa.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos índices de vegetação EVI e NDVI utilizados neste trabalho ...	40
Tabela 2 - Classes para o mapa de uso e cobertura da terra.	46
Tabela 3: Características físicas de cada unidade amostral.....	49
Tabela 4 - Variações do estoque de carbono no período de verão e inverno (em Mg.ha ⁻¹) e teste de significância de comparação de médias da parte aérea da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã.....	58
Tabela 5 - Variações do estoque de carbono (em Mg.ha ⁻¹) da serrapilheira no período de verão na vegetação campestre da APA do Ibirapuitã.....	59
Tabela 6 - Variações do estoque de carbono (em Mg.ha ⁻¹) das raízes no período de verão na vegetação campestre da APA do Ibirapuitã.....	60
Tabela 7 - Variações do estoque de carbono do solo no período de verão (em Mg.ha ⁻¹) sob vegetação campestre na APA do Ibirapuitã.....	61
Tabela 8 - Modelos de Regressão linear utilizados para estimativa de C através da biomassa medida em campo e seu respectivo R ²	63
Tabela 9 - Variações do teor de carbono no período do verão e inverno, e teste de significância de comparação de médias das variáveis: parte aérea, serrapilheira, raízes e solo na vegetação campestre da APA do Ibirapuitã.....	65
Tabela 10 - Valores médios de biomassa aérea da vegetação campestre nos diferentes períodos do ano.....	73
Tabela 11 - Modelos de Regressão linear utilizados para estimativa de biomassa através de dados espectrais e seu respectivo R ²	75
Tabela 12 - Modelos de Regressão linear utilizados para estimativa de C através de dados espectrais e seu respectivo R ²	77

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de temas relacionados às mudanças climáticas tem colocado em foco o papel dos ecossistemas terrestres com relação às questões do aumento da quantidade de carbono lançado na atmosfera. Estima-se que a absorção líquida de carbono pelos ecossistemas terrestres atinja o ápice antes de meados deste século e então diminua ou até mesmo reverta, ampliando a mudança do clima (IPCC, 2007).

O aquecimento recente da atmosfera está afetando os sistemas biológicos terrestres, ocasionando mudanças na estrutura e função dos ecossistemas em decorrência da elevação da temperatura (IPCC, 2007), como a antecipação na emissão de folhas na primavera, conforme medições feitas com imagens de satélite a partir da década de 1980. No entanto, a ausência de informações detalhadas impede uma atribuição mais completa destes fenômenos aos reais causadores.

O sequestro de carbono nos ambientes terrestres vem sendo apontado como uma alternativa mitigadora das mudanças climáticas (ROSCOE, 2003). Mudanças nos estoques de carbono da vegetação e do solo podem causar impactos significativos na concentração de dióxido de carbono (BERNOUX et al., 2002) e de outros gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera (SCHUMAN et al., 2002). Entretanto, a fim de que se possa avaliar o potencial da vegetação para a geração de créditos de carbono é fundamental que sejam obtidas estimativas confiáveis do estoque de carbono presente na biomassa da vegetação, possibilitando estimar a quantidade de carbono, emitida ou sequestrada, no tempo e no espaço (HIGUCHI et al., 2004).

O estoque de carbono pode ser quantificado por meio da estimativa da biomassa da planta acima e abaixo da superfície do solo e dos teores de carbono de cada componente da vegetação e no solo. A quantificação da biomassa é um parâmetro ecológico importante para se estimar e avaliar o potencial das mudanças climáticas e o balanço global de carbono (BOMBELLI et al., 2009). Uma vez que as plantas estocam carbono tanto na biomassa acima como abaixo da superfície do solo, é necessário quantificar a biomassa de cada componente da vegetação (SILVEIRA et al., 2008).

A quantificação de carbono e biomassa em ecossistemas naturais pode ser estimada a partir de dados espectrais, dados de campo ou por modelos estatísticos (CRUICKSHANK; TOMLINSON; TREW, 2000; PARUELO et al., 2000; FONSECA et al., 2006; WOLF et al., 2011). A combinação de imagens de satélite, dados climáticos e modelos do ciclo de carbono

permitem a estimativa indireta de fluxo de carbono terrestre em grandes áreas (RUNNING et al, 1999; TURNER et al, 2004). A possibilidade de medir o volume de biomassa a partir de dados de sensoriamento remoto tem atraído pesquisas, especialmente pela redução de tempo e custo na obtenção dos resultados (ALMEIDA et al., 2009).

Em função da mitigação das mudanças climáticas, trabalhos apontam alguns fatores sobre os estoques de carbono e as emissões de gases de efeito estufa para o bioma Pampa (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012), analisando os fluxos e depósitos de C ao longo dos gradientes ambientais, com a finalidade de compreender o impacto das mudanças de uso e cobertura do solo e avaliar o potencial da vegetação campestre em reter C (PARUELO et al., 2010). Os dados disponíveis indicam que os ecossistemas campestres naturais manejados adequadamente contêm estoques importantes de carbono orgânico no solo e, portanto, sua conservação é relevante para a mitigação das mudanças climáticas (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012). No entanto, esses estudos se limitam a monitorar mudanças estacionais de C e entender a dinâmica do C, uma vez que, o conhecimento da dinâmica e dos depósitos de C na região são ainda parciais e incompletos (PARUELO et al., 2010).

Estudos que promovem maior conhecimento acerca da quantidade de biomassa e carbono estocado em diferentes estágios sucessionais são de grande importância, pois contribuem para o desenvolvimento sustentável e a mitigação global da intensificação do efeito-estufa (RIBEIRO et al., 2010). Dessa forma, as estimativas de biomassa e estoque de carbono são necessárias para um melhor entendimento sobre as mudanças ambientais globais (SILVEIRA et al., 2008).

Pesquisas referentes ao crescimento e ao desenvolvimento da vegetação campestre têm relevante importância com relação ao entendimento, formas de manejo e preservação da vegetação e sua relação com outros fenômenos naturais como solo e clima, uma vez que o manejo da vegetação pode influenciar no estoque de carbono (SILVEIRA et al., 2008). Além disso, os campos têm importante contribuição na preservação da biodiversidade, principalmente por atenuar o efeito estufa.

Estudos sobre a biomassa aérea e subterrânea dos campos do bioma Pampa apresentam-se escassos na literatura, tornando difícil quaisquer comparações entre áreas e regiões. Além disso, a biomassa subterrânea, que também é importante na dinâmica da vegetação campestre, geralmente é ignorada pelos estudos ecológicos nos campos do Rio Grande do Sul (FIDELIS et al., 2006). Com isso, é necessário o desenvolvimento de pesquisas que envolvam análises de produtividade tanto da biomassa aérea, como subterrânea,

assim como os efeitos dos diferentes manejos na sua produção. Os resultados podem servir como um importante referencial para manutenção/conservação e o entendimento da dinâmica das áreas de vegetação campestre do bioma Pampa (OLIVEIRA, FIDELIS, MULLER, 2009).

Dessa forma, a atualização dos estudos para a verificação da vegetação, a quantificação do teor e estoque atual de carbono e a introdução de novas tecnologias principalmente o sensoriamento remoto, visa contribuir e aprimorar os estudos sobre a quantificação do teor e estoques de carbono em áreas do bioma Pampa.

Com a finalidade de quantificar o teor e os estoques de carbono da vegetação campestre utilizando dados de sensoriamento remoto, esta tese tem como local de estudo a Área de Proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã. As observações fornecerão dados para inicializarem e validarem modelos numéricos de estimativa de biomassa e estoque de carbono para o bioma Pampa com o auxílio de sensoriamento remoto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Quantificar o teor e o estoque atual de carbono da APA do Ibirapuitã em áreas de vegetação campestre e avaliar a sua dependência com a variação sazonal.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Quantificar o teor e o estoque atual de carbono orgânico nos diferentes compartimentos (parte aérea, serrapilheira, raízes e solo) nas áreas de vegetação campestre da APA do Ibirapuitã, a partir de dados coletados em campo;
- Avaliar a interferência da sazonalidade do clima no conteúdo de carbono para cada local de armazenagem, com os dados coletados nas estações quente e fria do ano;
- Quantificar a biomassa da parte aérea da vegetação campestre e seu estoque de carbono, a partir de dados de sensoriamento remoto orbital.

1.2. Área de Estudo

A Área de Proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã está localizada nos municípios de Alegrete (15,22%), Quaraí (12,22%), Rosário do Sul (15,75%) e Santana do Livramento (56,81%) no estado do Rio Grande do Sul, com uma área de 318.767 hectares (Figura 1). É uma unidade de conservação de uso sustentável, criada pelo Decreto de Lei Federal nº. 529, de 20 de maio de 1992 e gerenciada pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), sendo a única unidade de conservação federal representante do Bioma Pampa no Brasil (MMA, 2007).

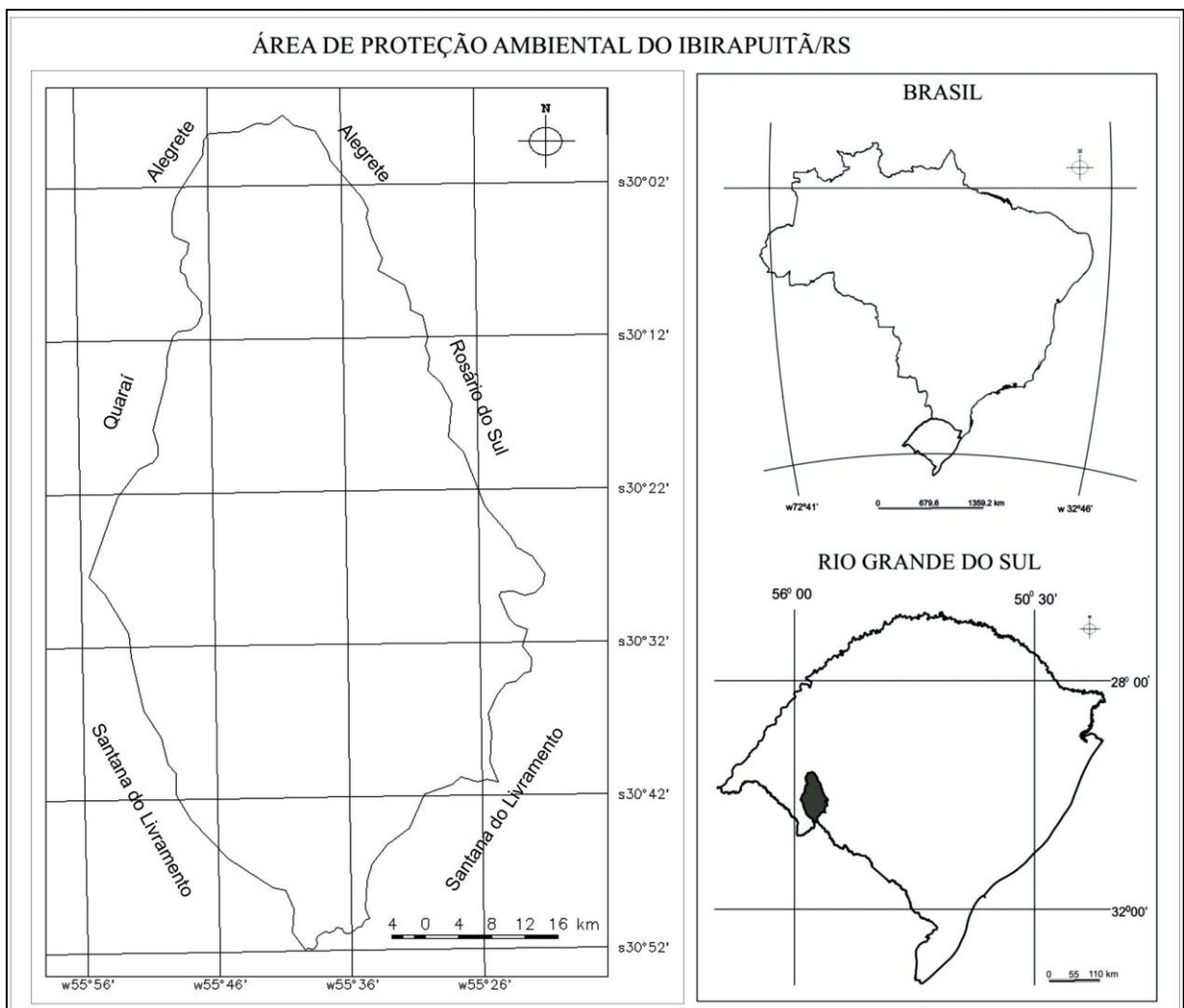


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

O relevo é plano, suavemente ondulado a ondulado. A vegetação caracteriza-se como estepe gramíneo lenhosa (campo nativo) e floresta estacional decidual aluvial (mata ciliar), sendo a fisionomia caracterizada por extensas planícies de campo limpo (IBAMA, 2011). Em

campos de solos rasos, pedregosos, com baixa retenção de umidade e associados ao déficit hídrico no verão, a vegetação é muito peculiar predominando gramíneas prostradas de porte baixo. Nos campos de solos profundos a vegetação é predominante de gramíneas, principalmente as de hábito cespitoso, onde o capim-caninha (*Andropogon lateralis*), a cola-de-lagarto (*Coelorachis selloana*) e o capim-melador (*Paspalum dilatatum*) são as mais representativas (BOLDRINI, 2009).

O clima é subtropical e de acordo com a classificação de Köppen é considerado como Cfa (clima temperado úmido com verão quente). A temperatura média do ar anual é de 17,9 °C e apresenta grande variação sazonal, com verão quente e seco e inverno frio e úmido (NIMER, 1989). A precipitação pluvial média anual é de 1.460 mm, com frequente déficit hídrico climatológico no período do verão (BERLATO; FONTANA, 2003).

A utilização da terra é predominante de pastagens naturais e/ou manejadas, devido à diversidade de plantas com alto valor forrageiro. As principais atividades econômicas desenvolvidas no interior da APA são a bovinocultura de corte e a ovinocultura, em regime de pastoreio contínuo pela pecuária extensiva. Além da pecuária, também são desenvolvidas outras atividades agrícolas, destacando-se o cultivo de arroz irrigado (MMA, 2007).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ecossistemas terrestres, biomassa e o estoque de carbono

2.1.1 Ecossistemas terrestres: fotossíntese e produtividade primária

Os ecossistemas são sistemas que englobam as complexas, dinâmicas e contínuas interações entre seres vivos e não vivos em seus ambientes físicos e biológicos (ANDRADE, ROMEIRO, 2011). Os ecossistemas ganham importância devido à crescente preocupação sobre o bem-estar das populações humanas e os impactos negativos que as mudanças nos ecossistemas resultam para a sociedade.

Uma função comum a todos os ecossistemas é a capacidade de emitir ou sequestrar o carbono atmosférico, e é determinada por grande variedade de processos físico-químicos e bióticos que atuam em direções e intensidades diferentes. Para entender o papel atual e futuro de um ecossistema no balanço de carbono atmosférico é necessário conhecer e quantificar esses processos (ADUAN, VILELA, KLINK; 2003).

As emissões de carbono são influenciadas principalmente por mudanças de uso da terra e a substituição da vegetação natural por outros usos. As amplas variações de concentração de gases causadores do efeito estufa na atmosfera proporcionam alterações na sensibilidade dos ecossistemas, alterando possivelmente a variabilidade natural do funcionamento dos ecossistemas (WALTER, 1986; COUTO, 2009).

A assimilação de carbono pelos vegetais depende da disponibilidade de todos os elementos envolvidos no processo de fluxo de carbono entre a planta, o ar e o solo que respondem pela fixação, reservatório e liberação de CO₂ (gás carbônico) pela matéria orgânica morta, respectivamente. A quantidade de carbono a ser fixada pela vegetação depende da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), da composição florística e da estrutura do dossel que compõe a vegetação. Este processo é influenciado diretamente pela fotossíntese e importante em relação à produtividade dos ecossistemas terrestres (VEGA, 2003; ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2004).

O processo de fotossíntese compreende uma fase de respiração e depende da presença de plantas, animais e bactérias. As plantas absorvem o gás carbônico e o convertem, utilizando água e luz solar, em biomassa, liberando oxigênio para a atmosfera (VEGA, 2003).

Assim, a fotossíntese reflete diretamente na quantidade de carbono estocado na biomassa vegetal (SILVEIRA et al., 2008; RIBEIRO et al., 2010).

Os principais fatores ambientais que afetam a fotossíntese são: luz, CO₂ e temperatura. A disponibilidade de água e de nutrientes também são fatores importantes, porém, com efeitos mais indiretos sobre o processo. Os parâmetros meteorológicos expressos pela radiação solar, insolação, precipitação, temperatura e umidade do ar, interagem com a planta estimulando a transpiração vegetal e evaporação do solo (OMETTO, 1981).

A fotossíntese é fundamental para a produtividade das plantas. O incremento de CO₂ na atmosfera pode estimular o processo de fotossíntese e o aumento da biomassa. Assim, a fotossíntese atua como um retroalimentador negativo sobre o aumento na emissão de CO₂ na atmosfera (ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004).

A quantidade de carbono convertido em carboidratos durante a fotossíntese e fixada à vegetação é chamada de Produção Primária Bruta (PPB). Esta produção é necessária para o crescimento das plantas, onde parte é incorporada aos tecidos vegetais, como folhas e raízes, e outra parte é convertida novamente em CO₂. A diferença entre a fotossíntese e a respiração vegetal refere-se à Produção Primária Líquida (PPL) (WALTER, 1986; ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004).

A produção primária não depende em tão alto grau da intensidade da fotossíntese, como depende do metabolismo de assimilação dos organismos produtores. Dessa forma, a produção primária é dependente da maneira como são aproveitados os produtos de assimilação provenientes da fotossíntese no decorrer do período de crescimento da vegetação (WALTER, 1986).

2.1.2 O ciclo do carbono e as mudanças climáticas

A intensificação das mudanças climáticas e a concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, principalmente gás carbônico (CO₂), nas diferentes regiões do planeta tem afetado a qualidade de vida da população e os ecossistemas terrestres. O quarto relatório do IPCC (2007) aponta, como um dos principais fatores, que o aquecimento recente da atmosfera está afetando os sistemas biológicos terrestres, uma vez que as plantas são as principais responsáveis pela absorção de carbono da atmosfera através do processo de fotossíntese (ANDERSON et al., 2005).

A concentração de CO_2 na atmosfera é a resultante do balanço entre fontes e sumidouros nos ecossistemas terrestres, nos oceanos e na litosfera (ROSCOE, 2003). Apesar de alguns sistemas naturais constituírem grandes reservatórios de carbono (C), a dinâmica do seu ciclo é controlada pelos sistemas que têm capacidade de trocá-lo ativamente com a atmosfera, como é o caso da vegetação e do solo (TOWNSEND; BEGON; HARPER, 2010).

O ciclo do carbono (Figura 2) consiste na transferência de C para a atmosfera por meio de queima, respiração ou reações químicas e a reintegração na matéria orgânica. O CO_2 entra na atmosfera a partir da respiração dos animais e vegetais, da decomposição e queima das substâncias orgânicas e da atividade dos oceanos. A seguir, o CO_2 volta a vegetação e ao solo através da fotossíntese das plantas, que fixam o C (ROHDE, 2005).

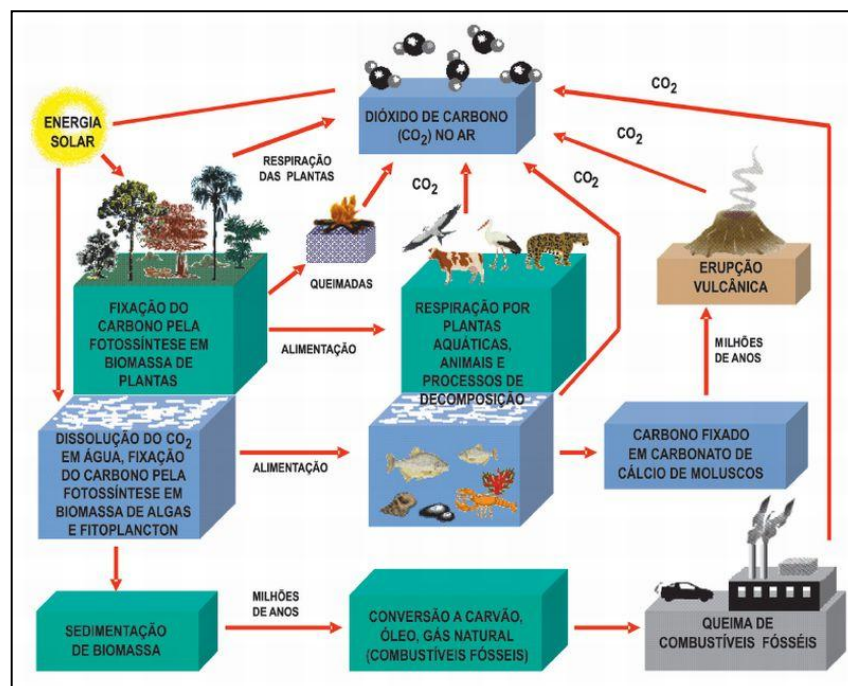


Figura 2 - Ciclo global do carbono.

Fonte: Martins et al. (2003).

Nos últimos anos é crescente o interesse em estudos sobre o ciclo do carbono e o impacto de CO_2 e de outros gases no regime climático, especialmente na temperatura. Desde a revolução industrial, o aumento do dióxido de carbono na atmosfera (CO_2) é considerado o responsável pelo aumento da temperatura média global (IPCC, 2007; WOHLFAHRT et al., 2010).

As discussões sobre mudanças climáticas e redução de GEE aumentaram com a assinatura do Protocolo de Kyoto, resultado da 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, realizada no Japão em 1997, que entrou em vigor

em fevereiro de 2005. O Protocolo de Kyoto definiu metas de redução nas emissões de gases de efeito estufa para atmosfera (ONU, 1998).

O aumento da emissão de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera, resultantes de ações antrópicas, incentivou o desenvolvimento de cenários para previsão de mudanças futuras no clima. Estes cenários são representados através de modelos climáticos computacionais globais que sugerem uma possível ocorrência do aquecimento da atmosfera. Porém, ainda existem incertezas em relação às possíveis mudanças na precipitação pluviométrica e à modificações na frequência de extremos climáticos (NOBRE, 2001, IPCC, 2007).

De modo geral, os aumentos previstos de temperatura causariam aumento de evaporação de superfície, provocando alterações nos balanços hídricos da vegetação natural e de culturas agrícolas. No entanto, há uma enorme carência de estudos sobre a vulnerabilidade da sociedade, da economia e do ambiente (incluindo os ecossistemas) às mudanças climáticas globais (NOBRE, 2001, IPCC, 2007).

2.1.3 Biomassa vegetal

Com o aumento das concentrações do CO₂ na atmosfera e o seu efeito potencial sobre o clima e os ecossistemas terrestres, pesquisas têm sido realizadas visando obter estimativas sobre a contribuição de cada ecossistema na absorção do carbono atmosférico. Sabe-se que as formações vegetais desempenham um importante papel no ciclo global do carbono, mas poucos estudos têm quantificado o estoque de carbono e as taxas de sequestro de carbono nos diferentes biomas brasileiros (REZENDE et al., 2006).

Estudos desenvolvidos na região amazônica ocupados por floresta secundária mostram que o acúmulo de carbono pela vegetação é proporcional a quantidade de biomassa, a qual possui uma relação diretamente proporcional à idade da vegetação secundária (FEARNSIDE, GUIMARÃES, 1996).

A composição florística da vegetação define a alocação de biomassa (e consequentemente a produtividade) e está relacionada com o tipo de solo e com a disponibilidade de nutrientes e água, sendo diferenciada de acordo com as épocas do ano (GIRARDI-DEIRO et al., 1992; BOLDRINI, 1997; SILVEIRA et al. 2005; FONSECA et al.

2006). Essa vinculação se deve principalmente à retenção e à disponibilidade de água, profundidade do solo e presença de nutrientes no solo.

A análise das variações fenológicas em nível regional e sua interligação com os diferentes componentes do meio geográfico torna-se necessária para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas em escala global. Mudanças interanuais na temperatura e precipitação podem influenciar diretamente o status da fenologia, como o período de crescimento e a taxa de acumulação de biomassa (LEE et al., 2002; ANDERSON et al., 2005). A maioria das espécies vegetais possui ciclos fenológicos relativamente específicos. Por isso o monitoramento da biomassa ao longo do tempo pode fornecer importantes informações sobre a estabilidade do ecossistema natural (JENSEN, 2009).

Estudos demonstram que a fenologia da vegetação campestre apresenta uma variação sazonal em função da temperatura. O período de crescimento da vegetação corresponde às estações mais quentes do ano, iniciando na primavera, quando foi observada temperatura média superior a 20°C, com um máximo no verão (com temperatura superior a 25°C) começando a decair no outono com o início da estação fria e atingindo valores mínimos no inverno. A precipitação não define o início da estação de crescimento da vegetação campestre, porém, influencia o comportamento ao longo do crescimento/desenvolvimento da vegetação (TRENTIN, 2011).

Verificando a dinâmica sazonal de pastagem nativa em uma área do bioma Pampa e a sua relação com temperatura do ar e precipitação pluvial, Moreira et al. (2013) observaram que há maior correlação com a temperatura do ar (com maior intensidade após 30 dias de defasagem) e correlação fraca com dados de precipitação pluvial. Os autores destacam ainda que o NDVI permitiu a identificação da dinâmica fenológica e sazonal da vegetação campestre, com aumento nos valores durante as estações quentes do ano (primavera e verão) e diminuição nas estações mais frias (outono e inverno).

De maneira geral, durante a estação quente do ano o desenvolvimento da vegetação é determinado pelas precipitações, sendo que a falta de água limita o crescimento das pastagens. Na estação fria são as baixas temperaturas, com a ocorrência de geadas, que mais reduzem seu crescimento, aliadas ao excesso de umidade e a pouca luminosidade. Na primavera a pastagem nativa pode apresentar um teor de umidade superior a 70%, já no outono ou durante uma seca esse teor pode cair para 50% (MACHADO, 1999). Da mesma forma, Di, Rundquist, Han (1994) afirmam que a umidade do solo é o maior contribuidor para o crescimento vegetativo, e a maior fonte desta umidade é a precipitação.

Bettolli et al. (2010) avaliaram a relação entre a produtividade da pastagem e a variabilidade climática e as possíveis implicações das mudanças climáticas futuras no Uruguai, confirmando quantitativamente a sensibilidade da vegetação à variabilidade do clima, sendo que a maior associação foi encontrada no outono (principalmente com as variáveis relacionadas à precipitação) e no verão. Para os cenários futuros estudados, os mesmos autores observaram que o aumento na temperatura mínima e máxima aumentaria a probabilidade de estresse da vegetação durante o verão, e no inverno poderiam existir efeitos negativos devido ao excesso hídrico.

Em geral, a biomassa da vegetação é estimada através de uma relação direta entre a resposta espectral e dados coletados em campo, utilizando métodos como a análise de regressão, redes neurais, ou por meio de relações indiretas, como índice de área foliar (LAI), fração sombra, entre outras (BOMBELLI et al 2009).

Yang et al. (2008) demonstraram que o conjunto de dados de satélite, que tem sido amplamente usado para estimar a biomassa da vegetação, poderiam ser integrados com observações terrestres para estimar estoque de carbono e compreender como os processos do ecossistema respondem a dinâmica climática. Os mesmos autores verificaram que nos últimos 20 anos os estoques de carbono em gramíneas não se alteraram significativamente, enfatizando que ecossistemas terrestres podem responder diferentemente ao clima, ao tipo de ecossistema e a intensidade de uso (YANG et al., 2009).

2.1.4 Estoques de Carbono

A distribuição espaço-temporal de carbono na superfície da terra é altamente variável e quantificá-lo representa um grande desafio científico. Uma estratégia consiste em inferir os fluxos de carbono das concentrações atmosféricas na superfície (CHEVALLIER et al., 2009).

Os estoques de carbono no solo são vulneráveis às atividades humanas e diminuem de forma significativa em resposta às mudanças no uso e cobertura do solo. Sua reposição e manutenção, entretanto, são muito lentas e dependentes de um conjunto de fatores climáticos e de manejo de cultivo. A dinâmica de acúmulo do carbono permite planejar sistemas produtivos e ainda recuperar áreas degradadas (AMADO et. al., 2001; BAYER; MIELNICZUK, 2008). Dessa forma, três fatores podem influenciar nos estoques de carbono: clima, fatores bióticos e atividades humanas (MARKS et al., 2009).

O carbono absorvido no processo de fotossíntese pela vegetação é estocado na biomassa e em materiais que se acumulam no solo. Quando a vegetação é submetida ao processo de queima ou desmatada, o carbono acumulado é convertido em CO₂ e atua como fonte de emissão para a atmosfera (ANDERSON, SHIMABUKURO, 2007; KORN et al., 2007; RAMANKUTTY et al., 2007; BOMBELLI et al., 2009). Por outro lado, quando a vegetação não é alterada, a biomassa aérea pode funcionar como um reservatório de C ao longo do tempo (PIAO et al., 2007).

O fogo altera os estoques e fluxos de carbono e nutrientes. Temperaturas mais elevadas, diminuição da precipitação e o aumento da duração da estação seca, podem deslocar as trocas líquidas do ecossistema de dreno para a fonte de C e intensificar as queimadas, reduzindo os estoques de nutrientes. (BUSTAMANTE, et al., 2012).

Estudos desenvolvidos para o estrato herbáceo do bioma Cerrado mostram que o estoque da biomassa da vegetação pode ser reduzido significativamente com aumento da frequência de queimadas (KAUFFMANN et al., 1994; GRACE et al., 2006). Além disso, Grace et al. (2006) sugerem que o fogo é o principal fator de emissão de carbono para a atmosfera em savanas tropicais, estimada em 4,5Gt C.ano⁻¹.

Os estoques de carbono no solo não são fortemente afetados pelas queimadas. Em áreas de Cerrado, os estoques de carbono na matéria orgânica do solo em locais frequentemente queimados mantêm-se inalterados em relação as áreas não queimadas, indicando que os solos contém estoques mais conservativos que a biomassa vegetal em resposta as queimadas, representando um componente importante para a conservação do carbono no bioma (ROSCOE et al., 2000).

Da mesma forma, a retirada da vegetação está associada a redução da biomassa vegetal e conseqüentemente do estoque de carbono. O desmatamento dos ecossistemas naturais de Cerrado em Gana, por exemplo, resultou em uma redução substancial nos estoque de carbono. O desenvolvimento de cenários climáticos demonstrou que se não houver mudança no uso da terra, as perdas de estoques de C orgânico serão de 16% para os cenários climáticos de aumento da temperatura e 20% de diminuição da precipitação ao longo do tempo (TAN et al., 2009).

Alterações na biomassa e nos estoques de carbono com a conversão da vegetação nativa podem ter reflexos sobre a produtividade da vegetação e os fluxos de carbono anuais e sazonais. No entanto, são necessários estudos mais detalhados desses aspectos para se obter resultados mais conclusivos do efeito da conversão sobre os estoques e fluxos de C e

consequentemente sobre as mudanças das concentrações atmosféricas de CO₂ (BUSTAMANTE, OLIVEIRA, 2008).

Com a queima de combustíveis fósseis e, mais recentemente, as mudanças no uso da terra, o IPCC (2007) destaca que o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera é preocupante, já que o CO₂ apresenta uma correlação positiva com a temperatura média global da superfície terrestre (WOODWELL et al., 1998; ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004). Devido ao gradiente climático regional, informações sobre o sequestro de carbono para diferentes ecossistemas são importantes e tendo em vista a diversidade do ambiente, políticas globais e estratégias para melhorar o armazenamento de carbono nos ecossistemas devem ser consideradas (MARKS, et al., 2009).

A taxa de assimilação de carbono é influenciada dentre outros fatores, pela temperatura, precipitação, NPP (Produção Primária Líquida) e as características físicas do solo (CONANT, PAUSTIAN, 2002) e pode ser correlacionada com dados de satélite (MERBOLD et al., 2009). Em regiões de vegetação herbácea, Weber et al. (2009) indicaram uma grande variabilidade interanual de fluxos de carbono, influenciada pela produção primária bruta e umidade.

As mudanças climáticas podem alterar a estrutura e o funcionamento das espécies vegetais. A vegetação detém elevados estoques de carbono acima e abaixo da superfície do solo, sendo que um aumento na temperatura do ar pode proporcionar emissões de carbono para a atmosfera por meio de um aumento nos processos de decomposição da vegetação (VILLELA, et al. 2012).

O acréscimo do CO₂ na atmosfera e o conseqüente aumento da temperatura da superfície terrestre levam a respostas diferenciadas dos processos no sistema solo-planta. A elevação da temperatura pode aumentar o metabolismo dos organismos decompositores, levando a uma perda maior de carbono do solo (ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004).

A variação na distribuição do C no solo também pode ser explicada por uma combinação de insolação potencial e cobertura vegetal, entre outras variáveis, e podem ser calculados a partir de dados geoespaciais. O uso destes preditores para avaliar a distribuição do C no solo pode facilitar as práticas de gestão do ecossistema e diminuir a emissão de C do solo em função das mudanças climáticas (KUNKEL et al., 2011).

Os mesmos autores consideram que o conteúdo de C do solo é fortemente dependente da taxa de entrada de C na superfície e da densidade de vegetação. A umidade do solo influencia no crescimento da vegetação e, na entrada de C para o solo. Além disso,

temperaturas mais baixas podem diminuir a produtividade da vegetação, resultando em declínios no reservatório de C no solo (KUNKEL et al., 2011).

Em ecossistemas com grande biomassa e solo pouco perturbado, ocorre um maior acúmulo de matéria orgânica que pode contribuir para o aumento dos teores de carbono no solo (LOSS et al., 2010), além de reter o carbono numa escala temporal muito maior. As alterações de carbono no solo em pastagem são provocadas por mudanças no manejo e pode ser quantificada utilizando a tecnologia do sensoriamento remoto em escalas variáveis (CONANT, PAUSTIAN, 2002).

Em termos de ciclagem de C, o sistema radicular e a matéria orgânica do solo são estoques importantes. A camada mais superficial do solo armazena aproximadamente 2,2 trilhões de toneladas de carbono, três vezes mais que o nível atualmente contido na atmosfera (BUSTAMANTE, et al. 2012). Esse carbono do solo é facilmente perdido como dióxido de carbono, um dos principais responsáveis pelo aquecimento global.

O armazenamento de carbono exerce um papel importante no ciclo do carbono dos ecossistemas. As mudanças na alocação de carbono afetam tanto o crescimento de plantas individuais como a biogeoquímica terrestre, devido a qualidade do material depositado como serrapilheira e taxas de decomposição, sequestro de carbono e as trocas de gases entre planta-atmosfera (FRIEDLINGSTEIN et al., 2010; FEREZ, 2010).

A dinâmica sazonal e espacial de fixação do carbono, no entanto, não está suficientemente conhecida, tornando importante a informação acerca dos atributos funcionais (produtividade primária, evapotranspiração, etc) e estruturais (composição florística, fisionomia, etc.) da vegetação campestre. O conhecimento da dinâmica da fixação de carbono permitirá a caracterização e o monitoramento dessas formações vegetais, tanto em ecossistemas naturais, como nos que sofreram ação antrópica (BAEZA et al., 2006).

2.1.4.1 Locais de armazenamento de carbono no sistema solo - planta

A alocação do carbono é um componente importante do ciclo de C da biosfera (MALHI et al., 2009). Em escala global, os principais reservatórios de carbono são os oceanos, depósitos de combustíveis fósseis, solo, atmosfera e a vegetação (ODUM, 1983; IPCC, 2007).

Nos ecossistemas terrestres o carbono pode ser retido na biomassa viva, no material biogênico em decomposição e nos solos. Esses estoques variam de acordo com a tipologia dos ecossistemas, que estão distribuídos globalmente de acordo com os regimes climáticos de cada região (ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004), tornando-se necessárias as mensurações dos estoques de carbono em todos os compartimentos para compreender o balanço global de carbono do ecossistema (SILVEIRA et al., 2008).

O carbono acumulado em ecossistemas terrestres tem sido analisado como uma das possibilidades para contabilizar a fração do C ainda não identificada no balanço com a atmosfera (GIFFORD, 1994). A concentração de carbono nos tecidos vegetais varia com a espécie, com a fase de desenvolvimento, estado nutricional e com as características edafoclimáticas da região (LARCHER, 2000; MALCON, PITELKA, 2000). Dessa forma, a biomassa tem um papel importante no ciclo global do carbono, tanto como reservatório dinâmico ou como fonte de emissão para a atmosfera (MALHI et al., 2006).

As plantas são constituídas em grande parte por carboidratos produzidos pela assimilação de CO₂. A absorção de minerais coordena o crescimento em termos de acumulação de biomassa vegetal, e a assimilação de carbono torna disponível o material aos quais os minerais serão incorporados (LARCHER, 2000). Os estoques de carbono na vegetação estão diretamente relacionados com a biomassa vegetal (FEARNSIDE et al., 1999; ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004). De modo geral, as estimativas para estoque de carbono baseadas nos estudos do IPCC (2007) informam que aproximadamente 50% da biomassa é igual a massa de carbono.

As pastagens têm sido citadas como drenos líquidos de carbono atmosférico e importantes para o controle do efeito estufa (FISHER et al., 1994). O aumento da biomassa da parte aérea da vegetação e conseqüente maior armazenamento de C é atribuída a produtividade primária da pastagem, que implica em maior entrada de C da atmosfera (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012).

O ecossistema campestre natural, sob manejo adequado, contém importantes estoques de carbono orgânico (TRUMBORE et al., 1995; BATJES, SOMBROEK, 1997) e, portanto, sua conservação é relevante para a mitigação das alterações climáticas (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012). Porém, em pastagens manejadas inadequadamente o estoque de carbono no solo é menor que a vegetação nativa (SILVA et al., 1997), uma vez que o solo pode atuar tanto como dreno quanto como fonte de carbono para a atmosfera (ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004), dependendo do manejo aplicado a ele (CORRAZA et al., 1999).

As gramíneas em condições adequadas de produção de massa vegetal são capazes de sequestrar significativas quantidades de carbono fixando-o no solo na forma orgânica (SALTON et al., 2008). A capacidade de acúmulo de C em sistemas de gramíneas é limitada pela deficiência de nutrientes no solo e, especialmente, pela baixa disponibilidade de nitrogênio em função da baixa taxa de mineralização. Além disso, as gramíneas com elevada capacidade de enraizamento em profundidade constitui-se em uma alternativa viável para armazenar carbono e contribuir para redução do efeito estufa (FISHER et al., 1994)

As raízes constituem grandes estoques de carbono nas gramíneas. O acúmulo de C orgânico proveniente de raízes representa a principal forma de adição de C em subsuperfície (TORMENA et al., 2004). Estudos realizados em áreas de pastagens constataram um teor médio de carbono para as raízes variando entre 29,6 e 42,3%, verificando diferenças nos valores nos estoques de C conforme o diâmetro das raízes, sendo que as raízes mais finas apresentam menores teores de carbono e estão concentradas em uma profundidade média de 0-5 cm no solo (LUIZÃO et al., 1999).

A contribuição das raízes ao aporte orgânico no solo é de 23 a 45% da matéria seca da parte aérea, conforme a cultura e o manejo utilizados. A avaliação da contribuição das raízes sobre o aporte de C é importante, pois o C radicular apresenta menor taxa de decomposição quando comparado ao da parte aérea, além da capacidade das raízes de penetrar nos microagregados do solo (CALEGARI, 2006).

Porém, alguns fatores podem influenciar nos resultados sobre biomassa e estoque de carbono de raízes, como por exemplo, a heterogeneidade espacial da biomassa subterrânea, a profundidade e as classes de diâmetro estabelecidas para a coleta de raízes, a dificuldade na separação das raízes do solo, as diferenças na composição florística e na densidade da cobertura vegetal, e a época do ano em que é realizada a coleta dos dados (PAIVA, REZENDE, PEREIRA, 2011).

Por outro lado, a serrapilheira (material vegetal morto) atua na superfície do solo como um sistema de entrada e saída de carbono e nutrientes ao ecossistema, através dos processos de produção e decomposição (MARTINS, RODRIGUES, 1999; FERREZ, 2010). Este processo é causado pela senescência de partes da planta devido a mudanças metabólicas associadas à fisiologia de cada espécie e também a estímulos externos. Assim, a serrapilheira constitui-se num importante mecanismo de transferência de nutrientes da fitomassa vegetal para o solo (ANDRADE et al., 2003; GRISE, 2005).

A produção anual de serrapilheira é variável entre os ecossistemas e possui relação com a razão entre temperatura e precipitação, sugerindo que a disponibilidade de água no solo, determinada pelos fatores bióticos do clima, influenciam diretamente nos processos de ciclagem de nutrientes (BROWN, LUGO, 1982; FERREZ, 2010). Este processo causa estresse hídrico e a senescência do vegetal, aumentando a quantidade de material aportado. Além disso, o impacto mecânico provocado pelas chuvas e os ventos provoca um aumento na taxa de deposição da serrapilheira (CALVI, PEREIRA, ESPINDULA Jr., 2009; LOPES et al 2009).

Além dos fatores climáticos, a taxa de decomposição da serrapilheira depende do ciclo biológico da vegetação, tipo de material depositado e de sua composição química (AERTS, 1997). Estes processos são particularmente importantes na restauração da fertilidade do solo em áreas em início de sucessão ecológica (CALVI, PEREIRA, ESPINDULA Jr., 2009; FERREZ, 2010).

Dessa forma, a serrapilheira exerce um papel fundamental no ciclo do carbono. Sua importância reside na capacidade de acumulação de altos teores de carbono e no papel regulador do fluxo dos elementos químicos entre a vegetação, o solo e a atmosfera (LEMONS, VITAL, PINTO, 2010).

A serrapilheira é considerada como a principal via de transferência de carbono orgânico para o solo, uma vez que quantidades significativas de nutrientes e carbono orgânico podem retornar ao solo através da queda de componentes senescentes da parte aérea das plantas e sua posterior decomposição (CALDEIRA et al, 2008), tornando importante a sua quantificação.

Considerando que grandes quantidades de matéria orgânica retornam ao solo anualmente por meio de resíduos vegetais, ainda existem poucas informações sobre a produção, composição química e estoques de carbono da serrapilheira em áreas de pastagens (GRISE, 2005). Além da reduzida quantidade de trabalhos acerca da ciclagem da serrapilheira, existe uma diversidade de ambientes, de componentes amostrados, dos métodos de coleta e análise química dos componentes.

O C fotossintetizado adicionado ao solo pelos resíduos vegetais, as emissões de carbono na forma de CO₂ e o estoque de C orgânico do solo são componentes do ciclo deste elemento no sistema solo-planta-atmosfera. O balanço de C no solo é dependente da relação entre as adições de C fotossintetizado pelas plantas (parte aérea e raízes) e as perdas de C para a atmosfera (COSTA et al., 2008).

O estoque de C no solo é determinado em grande parte pela entrada de carbono a partir dos resíduos vegetais (material senescente) ou pela incorporação proveniente da decomposição do sistema radicular da pastagem (FARIA et al., 2010). O estoque de C de um solo sob vegetação natural representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização (PAULA, VALLE, 2007).

Dados médios globais indicam que os ecossistemas de campos naturais subtropicais possuem maior quantidade de carbono armazenado no solo do que na parte aérea da vegetação, sendo essa relação próxima de 2:1 (TRUMPER et al., 2009). Em solos sob vegetação natural, o balanço entre as adições e perdas de carbono orgânico leva a um estado de equilíbrio dinâmico, no qual praticamente não existe variação no teor de carbono orgânico com o tempo, caracterizando o solo como local de depósito de carbono da atmosfera (BAYER et al., 2000).

Os estoques e as respectivas frações de carbono orgânico no solo sob diferentes manejos de pastagem, não apresentam alterações pelos tratamentos de oferta de forragem (CONTE et al., 2011). Em solos de pastagens introduzidas em savanas colombianas, Fisher et al. (1994) observaram um acúmulo maior de C no solo comparativamente à vegetação nativa, caracterizando o solo como local de depósito de carbono da atmosfera. Por outro lado, em pastagens manejadas inadequadamente, o solo apresenta menor estoque de C em relação à vegetação nativa (CORAZZA et al., 1999; XIE et al., 2007).

O armazenamento de C em áreas de pastagem é atribuído à maior produção primária líquida (NPP) (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012). Em ambientes onde o manejo dos solos promove a entrada de biomassa no sistema e não são submetidos a elevadas pressões, é observada uma elevação no teor de C do solo. O mesmo ocorre na presença de um sistema radicular abundante, principalmente de gramíneas, ligadas ao crescimento das raízes e à dinâmica da matéria orgânica do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997; SALTON, MIELNICZUK, BAYER, 2005). O efeito do sistema radicular das gramíneas é mais expressivo com o aumento da massa de raízes e conforme se eleva a intensidade de pastejo, aumentando a presença de agregados de maior diâmetro na camada superficial do solo, aumentando assim o teor de C orgânico (SALTON et al., 2008), e fazendo com que as taxas de sequestro de carbono sejam maiores nos primeiros 10 cm de solo (CONANT, PAUSTIAN, ELLIOTT, 2001).

Conforme Chaves e Farias (2008) os maiores valores de estoques de carbono se encontram na camada superficial do solo, diminuindo com a profundidade e não sendo

encontrado um comportamento homogêneo na sua distribuição, o que sugere a existência de diferentes zonas de manejo.

O carbono no solo possui elevada variabilidade espacial, da mesma forma que é lentamente variável no tempo (SMITH, 2004; FERREZ, 2010). Em escala global, dependendo do tipo de solo os teores de carbono orgânico podem variar de 1,3 a 20,4% (MARKZ et al., 2009). Geralmente os solos sob pastagens nativas apresentam menores teores de carbono em relação aos solos sob vegetação arbórea, sendo influenciado principalmente pela desfragmentação das raízes e decomposição da matéria morta.

Atualmente, é crescente o interesse pelo potencial que o solo apresenta em sequestrar carbono e contribuir para mitigação do efeito estufa (AMADO et al. 2001). Ainda são poucos os resultados de pesquisa que procuram quantificar este potencial, já que é dependente do tipo de solo (textura e mineralogia), do relevo e das condições climáticas de temperatura e umidade (GRISE, 2005).

A avaliação das mudanças nos estoques de C em diferentes compartimentos da interface solo - vegetação permite quantificar as emissões ou sequestro de carbono, gerando inventários de armazenamento de carbono e mede o impacto na remoção do CO₂ presente na atmosfera, por meio da sua fixação na biomassa e no solo em sistemas de pastagem (SILVA NETO et al., 2012).

2.2 Metodologias para quantificação de carbono na vegetação

A quantificação de carbono e de biomassa em ecossistemas naturais pode ser estimada a partir de dados de campo, de dados espectrais ou por modelos estatísticos (CRUICKSHANK, TOMLINSONF; TREW, 2000; PARUELO et al., 2000; FONSECA et al., 2006; WOLF et al., 2011). A combinação de imagens de satélite, dados climáticos e diagnósticos baseados em modelos de processo de ciclo de carbono, oferece a oportunidade para a estimativa indireta de fluxo de carbono terrestre em grandes áreas (RUNNING et al, 1999; TURNER et al, 2004).

2.2.1 Dados de campo

Em relação ao método de coleta dos dados em campo, para as estimativas de volume e biomassa, utilizam-se métodos diretos ou indiretos (SILVEIRA et al., 2008). Métodos diretos implicam determinações, pelo corte da vegetação e seus componentes separados e pesados. Nos métodos indiretos, são feitas estimativas baseadas principalmente em dados advindos dessas determinações, assim como de dados originados de inventários (SILVEIRA et al., 2008).

A estimativa de biomassa e de carbono acima do solo através de métodos indiretos é realizada principalmente em áreas de florestas por meio de equações alométricas, que utilizam parâmetros como diâmetro a altura do peito, altura da árvore, altura da base da copa, entre outros como variáveis do modelo. Porém, os métodos de estimativa de biomassa não destrutiva ou de inventários florestais, no caso de florestas, além de serem trabalhosos podem ser tendenciosos (SILVEIRA et al., 2008).

A estimativa de biomassa e carbono por meio de dados coletados em campo corresponde a dados e informações pontuais em uma determinada área, podendo caracterizar o comportamento espacial dos fenômenos. No entanto, a distribuição espacial limita a visualização completa das variações dos atributos quando a informação que se deseja representar é delimitada a apenas um ponto da superfície. Dessa forma, a representação das informações a partir da análise espacial deve ser considerada.

2.2.2 Análise espacial

Estudos que consideram a dependência espacial das variáveis em um ecossistema, ou a sua representação no espaço são essenciais em diversas áreas das ciências naturais. Para compreender a distribuição dos dados espaciais, os sistemas de informação geográfica (SIG) oferecem mecanismos variados e essenciais para combinar e analisar informações em sua perspectiva espacial. Os SIGs possibilitam a geração de mapas por interpolação a partir da medida da posição (coordenadas) e os valores de um determinado dado “z” que se deseja espacializar (CÂMARA, MEDEIROS, 1998).

A análise de dados espaciais demanda valores distribuídos de forma contínua. Assim, para modelar a variabilidade espacial do fenômeno utilizam-se procedimentos de interpolação baseados em técnicas geoestatísticas, que incluem análises, inferências e simulações dos dados (CAMARGO, FUCKS, CÂMARA, 2004). Entretanto, nem todos os modelos

inferenciais respondem às questões básicas relacionadas à forma, ao tamanho e à orientação do domínio e informações a respeito da incerteza associada aos valores estimados (BURROUGH, McDONNELL, 1998).

Os procedimentos geoestatísticos fornecem metodologias de espacialização para atributos de dados espaciais representados por amostras pontuais. Além de possibilitar a definição da forma e orientação do domínio a ser considerado na interpolação e de atribuir pesos às amostras levando em conta a variabilidade do atributo na área. Os interpoladores geoestatísticos permitem ainda modelar as incertezas associadas às inferências (CAMARGO, FUCKS, CÂMARA, 2004).

2.2.3 Sensoriamento Remoto

A radiação incidente nos alvos pode interagir de diferentes formas e é seletiva em relação ao comprimento de onda e específica para cada tipo de material, em função de sua estrutura atômica e molecular (SLATER, 1980). O fluxo radiante ao incidir sobre uma planta pode apresentar três formas de interação: absorvância, reflectância e transmitância (NOVO, 2008). Na vegetação, a radiação absorvida pelos pigmentos contidos na folha corresponde a aproximadamente 50% do total que chega até a planta, auxiliando na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese). A reflectância é dada pela quantidade de energia refletida em razão da energia que incide na superfície das folhas ou do dossel e a transmitância é a razão entre o fluxo transmitido através do dossel e das camadas que constituem a folha pelo fluxo incidente (PONZONI; SIMABUKURO, 2009; JENSEN, 2009).

A interação que acontece entre os dosséis vegetais e a energia eletromagnética no processo da fotossíntese está relacionada diretamente com a forma de registro dessas fisionomias pelos instrumentos de sensoriamento remoto (JENSEN, 2009). Cada fisionomia vegetal tem sua característica e estrutura e respondem de forma diferente à disponibilização dos componentes envolvidos no processo de fotossíntese.

A integração entre a vegetação e a presença de luz, proveniente principalmente do sol, desencadeia a resposta espectral da vegetação (Figura 3). No espectro visível, a reflectância da vegetação fotossinteticamente ativa está associada à absorção da radiação pelos pigmentos da planta (principalmente pela clorofila). Nesta região espectral, a radiação é utilizada pelas plantas nos processos fisiológicos de acúmulo de biomassa, justificando a grande absorção

apresentada pelas folhas nesta faixa de comprimento de onda (HALL, RAO, 1994; MOREIRA, 2005; NOVO, 2008).

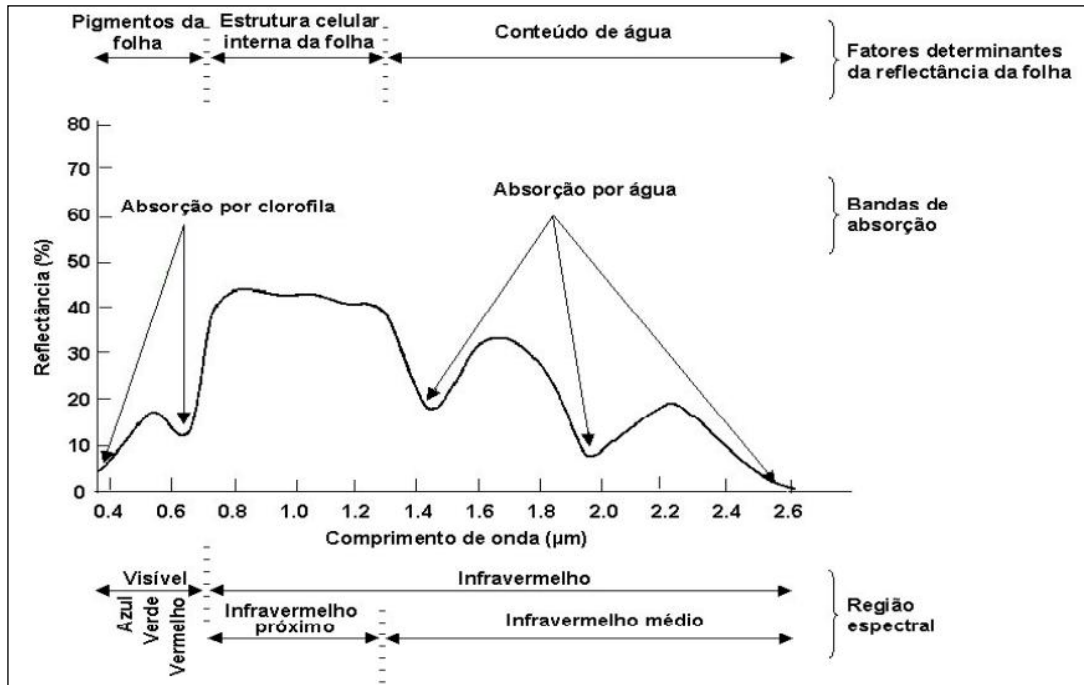


Figura 3 - Curva espectral média típica de uma folha verde
Fonte: Modificada de Swain e Davis (1978)

No infravermelho próximo, a vegetação apresenta alta reflectância em função das estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente, devido a não utilização desta radiação nos processos de crescimento das plantas (LILLESAND, KIEFER, 1994). O espalhamento da radiação nesta porção do espectro eletromagnético é utilizado como um processo de resfriamento da folha, evitando o acúmulo de energia no interior da mesma (NOBEL, 1999). Na região do infravermelho médio, a reflectância da vegetação é influenciada pelo conteúdo de água presente nas folhas (GATES, 1965; MOREIRA, 2005; NOVO, 2008).

Estudos da vegetação terrestre em grandes escalas e as estimativas temporais de estoque de carbono nos ecossistemas terrestres requerem o conhecimento da distribuição global dos tipos de vegetação bem como suas propriedades biofísicas, estruturais e variações espacial/temporal (HUETE et al., 2002), além de informações sobre a cobertura vegetal, a densidade de carbono na vegetação e no solo, e o destino do carbono (IPCC, 2001). O sensoriamento remoto fornece medidas de produtividade total, biomassa e a extensão da estação de crescimento (PETTORELLI et al., 2005), além de dados valiosos para a

identificação e descrição da heterogeneidade funcional de ecossistemas em escalas regionais e globais (PARUELO et al., 2001; SUN et al., 2008). Imagens coletadas remotamente e seus produtos derivados podem auxiliar na compreensão da dinâmica sazonal da vegetação (LIANG, SCHWARTZ, 2009), para a estimativa da biomassa e as mudanças em diferentes escalas espaciais (IPCC, 2001).

A produtividade do ecossistema de pastagem desempenha um papel importante no balanço de carbono e mudança global e fornece bases para o mecanismo do ciclo de carbono terrestre e a investigação do equilíbrio global de carbono. Os dados de sensoriamento remoto permitem o monitoramento dos tipos de vegetação e a estimativa do estoque de carbono por meio da produtividade da pastagem (GANG et al., 2011).

A relação entre a produtividade da vegetação e as imagens de satélite tem sido bem documentada no que se refere à variação temporal e espacial da vegetação, produtividade e degradação dos ecossistemas. Por possuir ampla cobertura global os produtos do sensoriamento remoto podem ser usados para prever os efeitos da mudança ambiental em ecossistemas, assim como a distribuição e armazenamento de carbono, possibilitando o entendimento dos impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente (PETTORELLI et al. 2005). Neste sentido, a utilização de imagens de satélite auxilia no desenvolvimento de novas pesquisas em relação aos estoques de carbono, permitindo monitorar as mudanças na cobertura vegetal e quantificar os estoques de carbono nos ecossistemas naturais.

As mudanças na cobertura da terra podem ser medidas por meio de dados de sensoriamento remoto, como os índices de vegetação (JACQUIN, SHEEREN, LACOMBE, 2010). Os índices espectrais podem ser correlacionados com as taxas de fotossíntese e o sequestro de carbono (GAMON et al., 1995). Quanto maior for a atividade fotossintética, maior serão as feições de absorção nas faixas do azul e vermelho e mais expressivos serão os valores de resposta espectral, uma vez que a maior densidade da vegetação representa valores elevados de eficiência de sequestro de carbono atmosférico (BAPTISTA, 2003).

Diferentes tipos e estrutura de dosséis exibem grande variação nas propriedades de reflectância, podendo produzir diferentes valores de índices de vegetação (HUETE et al., 2002). Os índices de vegetação são sensíveis as variações multitemporais da vegetação, da cobertura da terra e dos parâmetros biofísicos, além de indicadores da estrutura do dossel, conteúdo de clorofila e atividade fotossintética potencial em muitos tipos de vegetação, permitem o monitoramento e avaliação das variações espaciais e temporais em condição e quantidade de vegetação (GAMON et al., 1995; HUETE et al., 2002).

Os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) do sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) são bastante utilizados para detecção de mudanças da cobertura da terra e monitoramento sazonal e interanual da vegetação terrestre (FERREIRA et al., 2003). O NDVI, por exemplo, é suficientemente estável para permitir comparações significativas de variações sazonais, interanuais e a longo prazo da estrutura da vegetação, fenologia, e parâmetros biofísicos (RATANA, HUETE, FERREIRA, 2005).

O EVI produz informação complementar sobre a variação espacial e temporal da vegetação, quando minimiza muitos problemas de contaminação presentes no NDVI, como o fundo do dossel e a influencia de aerossóis. Enquanto o NDVI é sensível a clorofila e responde na maior parte a variação no vermelho, o EVI é mais sensível ao infravermelho próximo e responde as variações estruturais do dossel, incluindo IAF (Índice de Área Foliar), tipo e arquitetura de dossel (PETTORELLI et al., 2005).

A interação da radiação eletromagnética com os alvos da superfície terrestre constitui uma valiosa fonte de informações a respeito das propriedades físico-químicas dos alvos irradiados (OMETTO, 1981, JENSEN, 2009; PONZONI, SHIMABUKURO, 2009). Dessa forma, dados e técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizados para a quantificação de biomassa e carbono, possibilitando estimar a quantidade de carbono fixado pela vegetação (BOMBELLI et al 2009). No entanto, os dados de sensoriamento remoto possuem algumas limitações no monitoramento das mudanças nos estoques de carbono, sendo necessária a análise, interpretação e validação dos dados (AZOFEIFA et al., 2009).

As alterações morfológicas promovem uma maior absorção da radiação fotossinteticamente ativa e um aumento do espalhamento da radiação no interior das folhas, promovendo alterações na quantidade da radiação eletromagnética refletida principalmente nas bandas do visível e do infravermelho próximo, o que permite monitorar a quantidade de biomassa através da análise conjunta dessas duas bandas (NOBEL, 1999).

As variações da resposta espectral da vegetação estão diretamente relacionadas com a quantidade de biomassa aérea da vegetação. A quantidade de biomassa da vegetação está correlacionada com os pigmentos fotossintetizantes e espaços intercelulares das folhas que interagem com a radiação eletromagnética, provocando alterações na resposta espectral da vegetação nas bandas do visível e infravermelho próximo (JENSEN, 2009).

Estudos demonstram que existe uma relação direta entre resposta no infravermelho próximo e variáveis relacionadas com biomassa, e uma relação inversa entre a resposta no

visível, particularmente no vermelho, e variáveis relacionadas com a biomassa das plantas, ou seja, à medida que um dossel vegetal se desenvolve, a sua reflectância aumenta no infravermelho próximo e absorve cada vez mais no vermelho em função do aumento da fotossíntese (JENSEN, 2009).

O uso de sensoriamento remoto para o monitoramento da biomassa aérea da vegetação campestre é feito através de modelos estatísticos que relacionam a resposta espectral da vegetação com a biomassa aérea disponível no momento da passagem do satélite (BORK et al., 1999; TUELLER, 2001).

2.2.3.1 Modelos de inferência de biomassa e estoque de carbono na vegetação utilizando dados de sensoriamento remoto

A estimativa do estoque de carbono em diferentes níveis de paisagem, com base na correlação estatística entre o estoque carbono medido em parcelas de campo e as características espectrais pode ser feito através de modelos estatísticos. Os modelos de estimativas do balanço de carbono terrestre baseados na produtividade da vegetação e dados de sensoriamento remotos estão sendo bastante utilizados para estimar os estoques de C, pois são capazes de caracterizar os padrões de variabilidade interanual de fluxos de carbono e analisar os fatores e processos responsáveis.

A modelagem é expressa por uma equação ou um conjunto de equações contendo variáveis relacionadas por expressões matemáticas e permite análises quantitativas de um determinado fenômeno (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2004). Os modelos matemáticos são frequentemente desenvolvidos com o objetivo de prever mudanças dinâmicas no tempo (WALTERS, 1983).

Para estimar as alterações no estoque de carbono, Sulistyaiwati et al. (2006), construíram um modelo utilizando correlação estatística entre os valores do estoque de carbono medido em campo e as características espectrais obtidas através das bandas do Landsat/ETM. O modelo estatístico foi obtido para estimar o estoque de carbono em cada pixel de uma imagem.

Lehsten et al. (2009) desenvolveram uma técnica de modelagem para estudar a variação interanual e sazonal de emissões de carbono na África a partir de dados de sensoriamento remoto, e observaram que na relação entre a biomassa queimada e as emissões

de carbono, a precipitação atua como principal determinante para a variação das emissões de carbono.

Alguns estudos estimaram o carbono da biomassa por modelos de regressão, verificando as relações entre o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o conteúdo de carbono na biomassa medido em campo. Estes estudos avaliam a capacidade dos modelos de regressão em representar a relação entre a biomassa e o NDVI utilizando escalas espacial, temporal e ecológica (DONG et al., 2003).

Trabalhos realizados testando 24 índices de vegetação gerados a partir de imagens do sensor TM/Landsat, indicaram uma correlação entre o estoque de carbono de sistemas agroflorestais e as variáveis espectrais, variando de acordo com as diferenças na biomassa da vegetação (BOLFE, BATISTELLA, FERREIRA, 2012).

Para estimar o fluxo de CO₂, a produtividade primária bruta e respiração do ecossistema usando medidas de reflectância e índices de vegetação em duas pastagens de clima temperado de montanha na Áustria, Wohlfahrt et al. (2010) verificaram que as relações entre as variáveis de fluxo de CO₂ e índices de vegetação foram específicas para cada uma das áreas, tornando a aplicação dessas relações a outros ecossistemas de pastagens não satisfatórias, muito provável pelas diferenças entre a composição de espécies, propriedades ópticas de folha ou ângulo da folha.

A fim de identificar alterações na distribuição dos estoques de carbono (C) da biomassa acima do solo para a vegetação de gramíneas na China, Piao et al. (2007) utilizaram dados de inventário de campo de gramíneas, conjunto de dados da série temporal do NDVI e um modelo estatístico baseado em dados de satélite, verificando um aumento do estoque de C ao longo dos anos. No entanto, a precisão dessas estimativas tem limitações devido às incertezas nas estimativas dos estoques de C na biomassa subterrânea e da série temporal dos dados de satélite.

A modelagem da produtividade dos ecossistemas depende de parâmetros físicos, biofísicos e bioquímicos (ARAGÃO, SHIMABUKURO, 2004). Dessa forma, o sensoriamento remoto é uma fonte valiosa de informações espaciais com repetitividade temporal, que podem oferecer boas estimativas da reflectância da superfície, da fração da radiação fotossinteticamente ativa (f_{PAR}) e do índice de área foliar (IAF). No entanto, estudos para a quantificação de carbono utilizando sensoriamento remoto não vem sendo realizados, principalmente para ecossistemas de vegetação campestre, enfatizando a importância desta pesquisa para o monitoramento desse ecossistema.

2.2.3.2 O sensor MODIS

Imagens de satélite de baixa e média resolução, como o MODIS, fornecem medidas consistentes e oferecem uma valiosa quantidade de informação para monitorar a complexidade e diversidade dos ecossistemas (RATANA, HUETE, FERREIRA, 2005) além de detectar os efeitos de processos que causam a degradação da cobertura vegetal.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um dos cinco sensores a bordo dos satélites Terra e Aqua do Sistema de Observação da Terra EOS (*Earth Observing System*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Esse sensor possui uma resolução espacial moderada e alta resolução temporal. É constituído de um instrumento eletro-óptico de varredura mecânica (“*Whiskbroom*”) que utiliza o movimento do satélite para fornecer um imageamento na direção de vôo (*along track*) (NASA, 2012).

Este sensor possui alta sensibilidade radiométrica (12 bits) e trabalha com 36 bandas espectrais cobrindo desde a região do visível até o infravermelho termal (0,62 a 14,38 μm), e gera imagens com resolução espacial de 250 metros para as bandas 1 e 2; 500 metros para as bandas 3 a 7 e 1000 metros para as outras 29 bandas. Cada cena deste sensor cobre uma faixa de 2330 km de largura (NASA, 2012). Essas regiões espectrais foram definidas para minimizar o impacto da absorção de gases atmosféricos.

O sensor MODIS apresenta entre suas características: a) ampla cobertura espacial e espectral; b) continuidade nas tomadas de medidas nas regiões espectrais; e c) é a primeira ferramenta dos satélites EOS na condução das pesquisas de mudanças globais. Suas imagens, segundo a NASA, têm sido utilizadas para a detecção de mudanças antropogênicas e naturais na cobertura vegetal, detecção e monitoramento da superfície terrestre, além de outros usos relevantes para a análise ambiental.

Para a vegetação, produtos como índices de vegetação estão disponíveis a cada 16 dias (produto MOD13), sendo calculados a partir dos dados de reflectância diários disponibilizados no produto MOD09 (Tabela 1). O Produto MOD13 inclui o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação realçado (EVI), mais sensível às variações na atividade fotossintética e estrutura do dossel vegetal, ao mesmo tempo em que é mais resistente à contaminação atmosférica e menos suscetível à saturação (HUETE, 2006).

O produto MOD15 representa o índice de área foliar (IAF ou LAI – *leaf area index*) e a fração da radiação fotossinteticamente ativa (f_{PAR}) absorvida pela vegetação da região

coberta pela imagem a cada 8 dias. LAI e f_{PAR} estão relacionados com a estrutura do dossel vegetal, sendo importantes indicadores de processos ecológicos, entre os quais a fotossíntese, evapotranspiração e produtividade primária líquida (JUSTICE et al., 1998).

Para tratar os dados MODIS, existe a necessidade de se utilizar os programas desenvolvidos pela NASA, como o MRT (*MODIS Reprojection Tool*), que tem o objetivo de converter a projeção e o formato do produto, podendo também ser utilizado para realizar a mosaicagem das imagens (NASA, 2012).

Tabela 1 - Características dos índices de vegetação EVI e NDVI utilizados neste trabalho

Índice (IV)	Descrição	Fórmula	Autor
EVI	Índice de Realce da Vegetação (<i>Enhanced Vegetation Index</i>)	$EVI = G \left(\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + C1 * \rho_V - C2 * \rho_A + L} \right)$	Huete et al. (1997)
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$NDVI = \left(\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \right)$	Rouse et al., (1973)

Onde: ρ_{IVP} = reflectância no Infravermelho Próximo; ρ_V = reflectância no Vermelho; ρ_A = reflectância no Azul; C1 = Coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6); C2 = Coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5); L = Fator de correção para a interferência do solo (1); G = Fator de ganho (2,5)

2.3. Bioma Pampa

O bioma Pampa ocupa uma área de 176.496 Km² correspondente a 2,07% do território nacional (IBGE, 2004). Este bioma no Brasil se restringe ao Rio Grande do Sul ocupando originalmente 63% do território do estado (Figura 4), estendendo-se ainda pelo Uruguai e Argentina (ICMBIO, 2012). Apresenta relevo de planícies, onde se destacam tabuleiros e coxilhas compondo suaves ondulações. A vegetação característica é predominantemente herbácea (BOLDRINI, 2009), observando-se também a presença de matas ciliares, de composição arbórea - arbustiva que acompanham o curso dos rios, em mosaicos com os campos (OVERBECK et al., 2007).



Figura 4 - Distribuição espacial do bioma Pampa no estado do Rio Grande do Sul
 Fonte: Adaptado de Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2012)

O bioma Pampa é composto por diversas litologias constituindo os domínios morfológicos do Escudo Sul-Rio-Grandense e da Depressão Periférica. No Escudo Sul-Rio-Grandense predominam rochas ígneas plutônicas e vulcânicas, além de rochas metamórficas e sedimentares. O relevo apresenta altitudes entre 200 e 400 metros, sendo os topos aplainados e as vertentes dissecadas, com formas dominantes de colinas côncavo-convexas. A depressão periférica compreende terrenos sedimentares, formado por rochas sedimentares mesozóicas, que afloram nas bordas do escudo sul-rio-grandense, sobre as quais atuam processos morfogenéticos como a erosão fluvial (MÜLLER FILHO, 1970).

O clima predominante é subtropical e de acordo com a classificação de Köppen é considerado como Cfa (clima temperado úmido com verão quente) e Cfb (clima temperado úmido com verão ameno). Devido à posição geográfica, é influenciado pela movimentação e os encontro das massas de ar oriundas da região polar e da área tropical continental e Atlântica (NIMER, 1989).

A temperatura média anual do ar é de 17,9 °C e apresenta grande variação sazonal, com verão quente e seco e inverno frio e úmido. No verão, principalmente em janeiro, a temperatura média é de 24 °C, devido a pequena inclinação dos raios solares. No inverno, principalmente de maio a agosto, a temperatura média se mantém relativamente baixa,

oscilando entre 10° e 15 °C, em função das sucessivas invasões de frentes polares que trazem, geralmente, abundantes chuvas sucedidas por massa polar, acompanhada de queda de temperatura com a ocorrência de geadas (NIMER, 1989).

A precipitação pluvial média anual é de 1.460 mm, com frequente déficit hídrico climatológico no período do verão (BERLATO; FONTANA, 2003). O Estado do Rio Grande do Sul é afetado por diversos sistemas de tempo que são essenciais na determinação da precipitação, como a passagem de sistemas frontais, responsáveis por grande parte da precipitação pluviométrica durante o ano e com maior intensidade no inverno. No verão, a intensidade das chuvas depende da quantidade de umidade acumulada, associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (NIMER, 1989; SARTORI, 2003).

Os campos do bioma Pampa, na metade sul do Rio Grande do Sul estão incluídos na região fitoecológica Estepe, conforme o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004). As diferentes formações vegetais existentes no interior do bioma foram definidas de forma natural pelo tipo de solo, relevo e de forma antrópica devido ao manejo da atividade pastoril. A vegetação campestre é utilizada como suporte forrageiro para a pecuária, sendo a principal fonte de alimento para os animais (RAMBO, 2005).

Os campos do bioma Pampa são fisionomicamente caracterizados pelas gramíneas que constituem o grupo dominante. Podem ser subdivididos em: (a) campos de barba de bode com vegetação relictual e gramíneas predominantemente estival, de metabolismo fotossintético C₄ e poucos representantes do ciclo hibernar com metabolismo fotossintético C₃, (b) campos de solos rasos, onde vegetam gramíneas cespitosas de porte baixo como *Aristida murina*, *A. uruguayensis*, *Bouteloua megapotamica*, *Eustachys brevipila*, *Microchloa indica*, *Tridens hackelii* e *Tripogon spicatus*, (c) campos de solos profundos, destacando-se as gramíneas estivais como o capim-forquilha (*Paspalum notatum*), capim-caninha (*Andropogon lateralis*), cola-de-lagarto (*Coelorachis selloana*), e capim-melador (*Paspalum dilatatum*), e as hibernais como a flechilha (*Stipa setigera*) e o cabelo-de-porco (*Piptochaetium stipoides*), (d) campos dos areais, destacando-se *Axonopus argentinus*, *Elyonurus* sp. (o capim-limão) e *Paspalum nicorae*, além dessas, também se desenvolvem espécies endêmicas e relictual, (e) vegetação savanóide, que apresenta um maior equilíbrio entre gramíneas e compostas sendo comuns espécies de gramíneas cespitosas eretas, como as barbas-de-bode (*Aristida jubata*, *A. filifolia*, *A. spegazzini*, *A. circinalis* e *A. venustula*), *Andropogon ternatus*, *A. selloanus* e *Stipa filifolia*, (f) campos do centro do estado, com representantes de vegetação tropical e subtropical, e (g) campos litorâneos, destacando-se as leguminosas *Stylosanthes leiocarpa*, *Indigofera*

sabulicola, *Desmodium adscendens*, *D. barbatum*, *D. incanum*, *Adesmia latifolia*, *Vigna longifolia* e *V. luteola* comuns nesta região (BOLDRINI, 2009).

Para o bioma Pampa, aproximadamente 17% das espécies de gramíneas são C₃ em relação ao total de espécies que compõem a pastagem (GOMES, 1996). As espécies C₃ apresentam período de crescimento na estação fria, do outono até a primavera. Em comparação, as espécies de gramíneas C₄ apresentam como estação de crescimento o período que começa na primavera e vai até o outono, período com maior disponibilidade de radiação, já que a sua temperatura base é relativamente alta, o que limita o seu desenvolvimento no inverno. Desta maneira, o predomínio de espécies de gramíneas C₄ explica a maior produção de biomassa nas estações quentes do ano (Figura 5), visto que, essas espécies exigem temperaturas mais altas para o seu desenvolvimento (GOMES, 1996; OLIVEIRA, FIDELIS, MULLER, 2009).

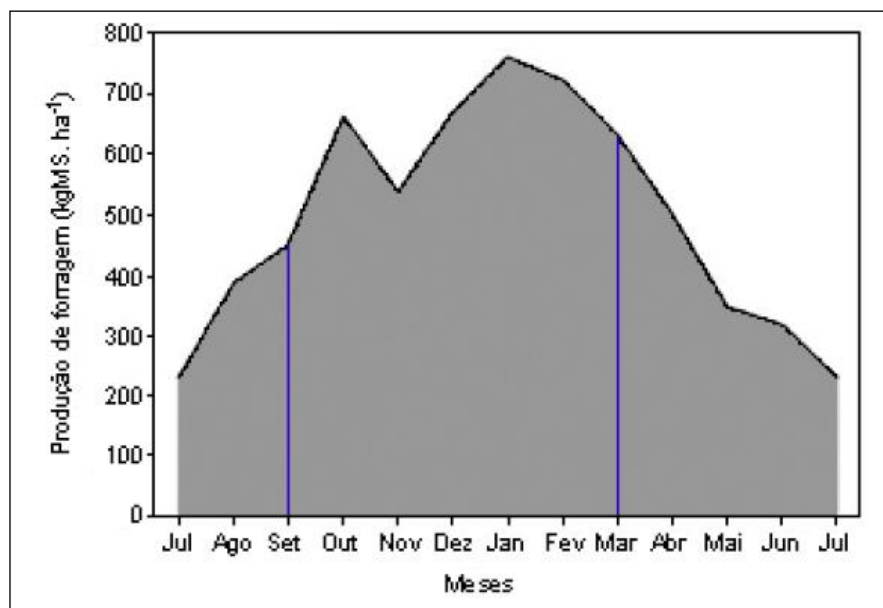


Figura 5 - Curva média da produção de forragem total no bioma Pampa nos diferentes períodos do ano

Fonte: Adaptado de Machado (1999)

Estudos referentes ao crescimento e desenvolvimento da vegetação campestre remetem a importância do entendimento das formas de manejo e preservação da vegetação do bioma Pampa e a sua relação com outros fenômenos naturais como solo e clima, visto que, as formas de manejo da vegetação podem influenciar no estoque de biomassa e carbono. Pesquisas sobre a manipulação de ofertas de forragem em pastagem natural do bioma Pampa e seus reflexos sobre a produtividade e os levantamentos florísticos e de estrutura da vegetação vêm sendo desenvolvidos por pesquisadores da Universidade Federal do Rio

Grande do Sul (BOLDRINI, 1997 e 2009; CARVALHO, 2006; ESCOSTEGUY, 1990; PILLAR, 2012).

Para o bioma Pampa a maior parte dos estudos se refere à oferta de forragem visando à produção animal (CONTE et al., 2011). O conhecimento da resposta da pastagem em diferentes pressões de pastejo, a relação entre oferta, crescimento e desaparecimento e as consequências sobre a carga animal influenciam os níveis de oferta de forragem. O manejo da oferta de forragem em pastagem natural modifica a estrutura da vegetação e provoca modificações espaçotemporais na estrutura do campo, em particular sobre a dinâmica da ocupação espacial entre sítios alimentares na área efetivamente pastejada (NEVES et al., 2009), considerando que as pastagens naturais apresentam taxa de degradação semelhante durante a primavera e o verão e durante outono e inverno (SILVEIRA et al., 2006).

Estudos indicam que o pastejo provoca em curto prazo, alterações no índice de área foliar e na quantidade de carbono fixado e em longo prazo, modificações na composição botânica, estabelecendo um novo equilíbrio com espécies adaptadas às condições de manejo a que se encontra submetida a vegetação (LEMAIRE, CHAPMAN, 1996). Dessa forma, a importância da produtividade da vegetação, principalmente para a produção animal, confere a necessidade sobre a preservação do bioma (CARVALHO, et al., 2006).

Nos campos do sul do Brasil, os ciclos biogeoquímicos ainda são pouco estudados (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012). Alguns dados sobre os estoques de carbono disponíveis estão relacionados principalmente ao solo em áreas de pastagem, sendo que uma estimativa de estoques de C no solo do bioma Pampa foi derivado de inventário realizado em todo o estado do Rio Grande do Sul (TORNQUIST et al., 2009).

Recentemente, trabalhos referentes aos estoques de carbono e as emissões de gases de efeito estufa no bioma Pampa, tem analisado os fluxos e depósitos de C, com a finalidade de compreender o impacto das mudanças de uso e cobertura do solo e avaliar o potencial da vegetação campestre em reter C (PARUELO et al., 2010). Estes estudos indicam que os ecossistemas campestres naturais manejados adequadamente contêm estoques importantes de carbono orgânico no solo e, portanto, sua conservação é relevante para a mitigação das mudanças climáticas (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012). No entanto, se limitam a monitorar mudanças estacionais de C e entender a dinâmica do C, uma vez que, o conhecimento da dinâmica e dos depósitos de C na região são ainda parciais e incompletos (PARUELO et al., 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra e Solos na APA do Ibirapuitã

3.1.1 Uso e Cobertura da Terra

O mapa de uso e cobertura da terra foi obtido para a identificação das áreas com predomínio de vegetação campestre, com a finalidade de definir os pontos de coleta em campo e nas imagens de satélite.

A identificação das classes de uso e cobertura da terra na APA do Ibirapuitã/RS foi realizada a partir de uma imagem do sensor TM/Landsat 5. A imagem possui resolução espacial de 30 metros e foi disponibilizada pelo portal da Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DPI/INPE).

A imagem selecionada corresponde ao mês de maio de 2011, escolhida em função da melhor identificação dos alvos na superfície neste período. A imagem foi georreferenciada ao sistema de coordenadas UTM zona 21S, e importada para um banco de dados no *software* SPRING (Sistema de Processamento de informações Georreferenciadas), versão 5.1.8 disponibilizado pela DPI/INPE.

A resposta espectral foi utilizada como elemento de interpretação para definir as diferentes classes de uso e cobertura da terra. Para facilitar a identificação destas classes, foi realizada uma combinação de bandas ou composição colorida de falsa cor (bandas TM3(B), TM4(G), TM5(R)).

A classificação supervisionada foi utilizada para o reconhecimento das áreas florestais utilizando o método de classificação por máxima verossimilhança (MAXVER). Para as demais áreas foi utilizada a interpretação visual, em função da confusão espectral gerada pelo classificador entre as respostas espectrais, principalmente entre a vegetação campestre e a agricultura.

As classes de uso e cobertura da terra foram definidas por meio da interpretação visual de: tonalidade/cor, tamanho, forma, textura, padrão, localização e comportamento espectral das diferentes feições que compõem a área de estudo, do conhecimento prévio da área e da bibliografia consultada. A escolha das classes de uso e cobertura da terra foi realizada considerando as características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes para o mapa de uso e cobertura da terra.

Classes de uso e cobertura da terra	Descrição
Vegetação campestre	Áreas vegetais nativas que compreendem cobertura de gramíneas com a presença ou não de arbustos
Corpos d'água	Corpos d'água (rios, lagos, represas)
Área construída	Áreas urbanas ou propriedades rurais
Áreas florestais	Áreas de vegetação no entorno de cursos d'água e esparsas, com textura rugosa e forma irregular
Agricultura	Áreas plantadas com cultivos temporários.

No mapa resultante (Figura 6), a classe de vegetação campestre, com mais de 83% da área, está igualmente distribuída em toda a APA de acordo com a principal formação vegetal do bioma Pampa, que de acordo com Overbeck et al. (2007) é de plantas herbáceas do tipo C₃ e C₄, seguida pela área florestal. As classes de menor área foram agricultura, corpos d'água e área construída.

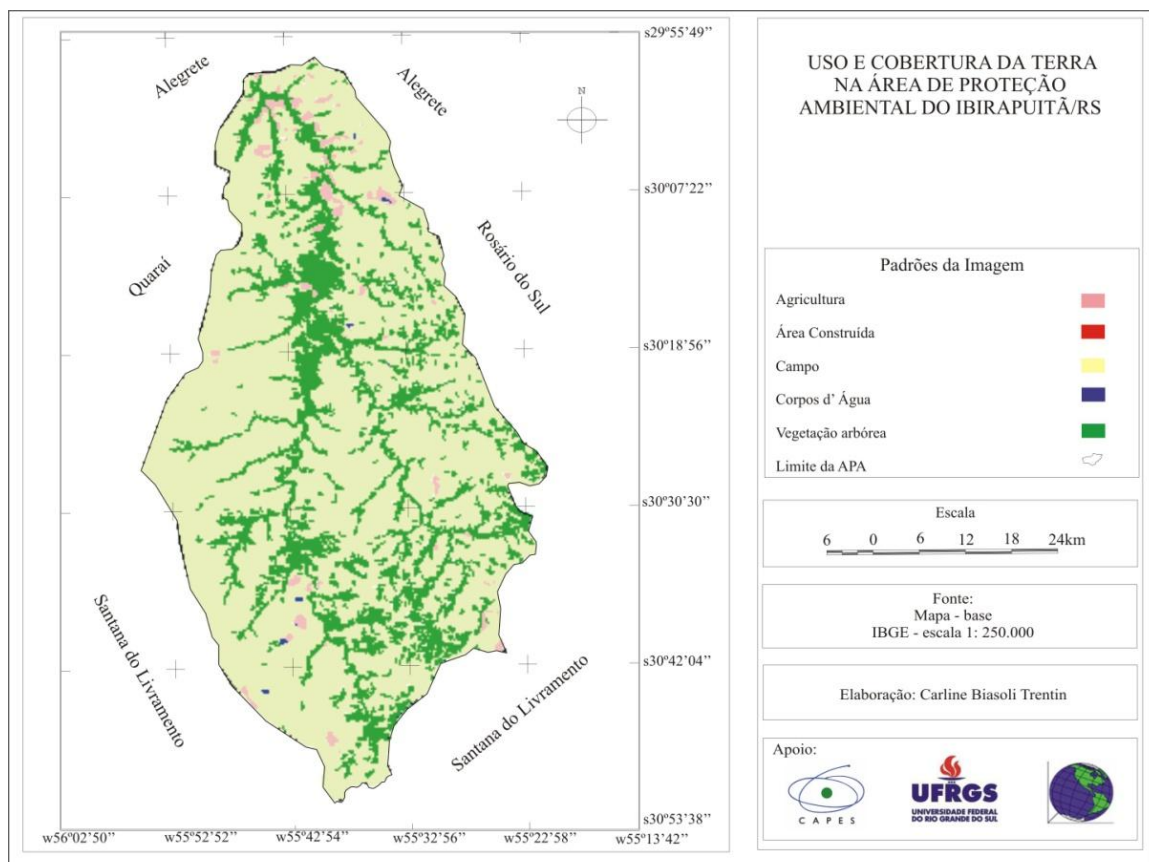
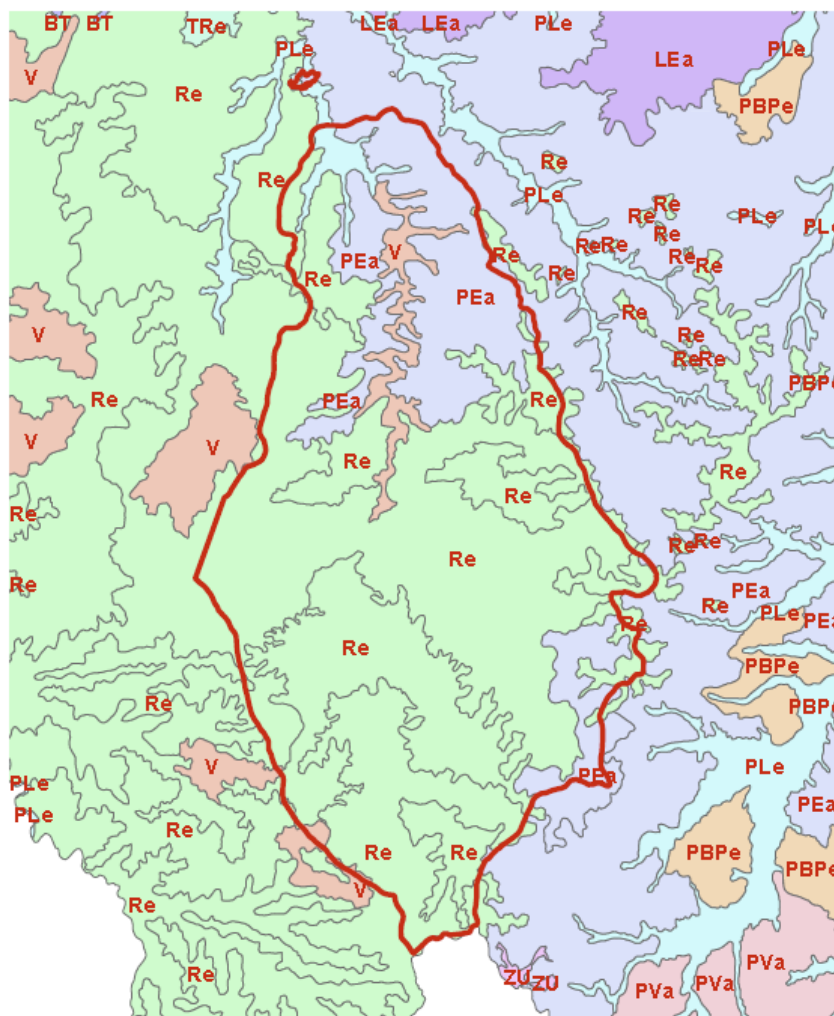


Figura 6 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra na Área de Proteção Ambiental do Ibirapuitã

3.1.2 Solos

A variação florística da vegetação campestre está relacionada com as características de solo e topografia, conforme já observado em estudos desenvolvidos por Boldrini (1997); Clark et al. (1999); Velázquez-Rosas et al. (2002); Silveira et al. (2005); Girardi-Deiro et al. (1992; 2003; 2006) e Fonseca et al. (2006).

Assim, foi consultado o mapa do Levantamento de Exploratório de Solos do RS, da área da APA do Ibirapuitã para selecionar as unidades amostrais em diferentes tipos de solo no interior da APA (Figura 7).



Legenda conforme vol 33 - Projeto RADAMBRASIL



Figura 7 - Mapa de solos da RADAMBRASIL (1986)

As classes de solos predominantes na APA do Ibirapuitã são de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo: Neossolo, Argissolo e Vertissolo. Os Neossolos podem ser solos rasos ou profundos, os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos e bem drenados, e os Vertissolos são pouco permeáveis e de textura muito argilosa, ocorrem em áreas planas, suavemente onduladas, depressões e locais de antigas lagoas. (STRECK et al., 2008).

3. 2 Coleta de dados em campo e análises laboratoriais

As amostras de parte aérea, serrapilheira, raízes e solo, foram coletados em campo em duas diferentes épocas dos anos de 2012, 2013 (verão e inverno) e 2014 (verão): período de maior e menor acúmulo de biomassa da vegetação do bioma Pampa, respectivamente. As épocas foram escolhidas visando um entendimento da dinâmica sazonal dos estoques e teor de carbono associada às variações climáticas intranuais existentes na região, nos diferentes locais de armazenamento (carbono da parte aérea, carbono das raízes, carbono da serrapilheira e carbono do solo). Neste mesmo período (2012, 2013 e 2014) foram realizadas as análises em laboratório de teor de carbono orgânico da parte aérea, serrapilheira, raízes e solo.

3.2.1 Delineamento experimental

Para a estimativa da biomassa da vegetação campestre e quantificação de carbono, foram definidas nove unidades amostrais no interior da APA (Figura 8), realizando-se coletas aleatórias em cinco pontos em cada unidade amostral, totalizando 45 amostras por data para cada uma das quatro variáveis (parte aérea, raízes, serrapilheira e solo), possibilitando análises estatísticas do conjunto completo dos dados (Tabela 3). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com nove repetições, uma vez que a vegetação no interior da APA não é homogênea.

Do ponto de vista estatístico, é desejável que os experimentos tenham grande número de repetições, resultando em uma maior confiança no resultado. Na prática, o tamanho da amostra é determinado mais por considerações a respeito dos custos do que por técnicas estatísticas. Porém deve-se levar em conta o que é usual na área (VIEIRA, 1999).

Considerando a área total da APA entende-se que essa é uma grade amostral suficiente para a análise e espacialização dos dados coletados, considerando o tempo disponível e os recursos financeiros necessários para as coletas e as análises.

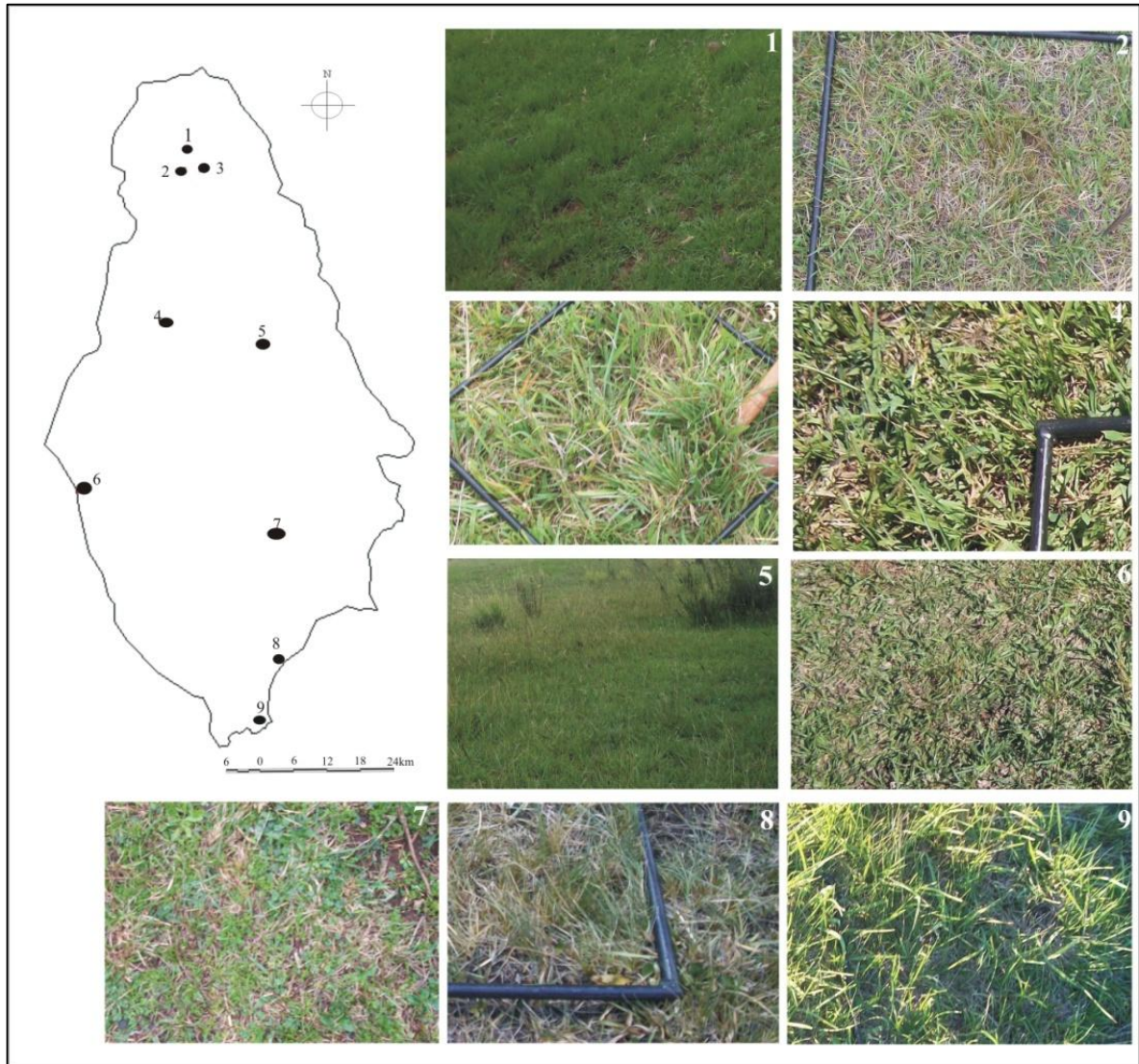


Figura 8 - Localização das amostras em campo

Tabela 3: Características físicas de cada unidade amostral

Unidade Amostral	Coordenadas (Lat / Long)	Vegetação	Solo	Formas de Uso
1	s 30 04 43,44 w 55 41 41,5	Gramíneas de porte rasteiro com altura inferior a 5 cm.	Solo predominante de rochas areníticas.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos e ovinos.
2	s 30 05 34,6 w 55 41 22,3	Gramíneas de porte rasteiro e altura inferior a 5 cm.	Solo raso, predomínio de Neossolos.	Pastoreio contínuo de bovinos e ovinos.

Continua...

3	s 30 05 41,9 w 55 41 14,2	Gramíneas de porte rasteiro, bem desenvolvida com altura média do pasto de 10 cm.	Solos profundos, predomínio de Argissolos.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos.
4	s 30 18 56,5 w 55 43 57,8	Gramíneas de porte rasteiro e altura inferior a 5 cm.	Solos rasos, predomínio de Neossolos.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos e ovinos.
5	s 30 19 38,3 w 55 34 46,8	Gramíneas de porte rasteiro e altura entre 5 e 10 cm.	Solo bem desenvolvido, com predomínio de Argissolos.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos e ovinos.
6	s 30 31 22,8 w 55 52 23,6	Gramíneas de porte rasteiro e altura inferior a 5 cm.	Solos rasos, predomínio de Neossolos.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos e ovinos.
7	s 30 34 54,4 w 55 33 17,4	Gramíneas de porte rasteiro e altura inferior a 5 cm.	Solos rasos, predomínio de Neossolos.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos e ovinos.
8	s 30 44 31,5 w 55 34 05,0	Gramíneas de porte rasteiro, bem desenvolvida com altura média do pasto de 10 cm.	Solo bem desenvolvido, com predomínio de Argissolos.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos.
9	s 30 50 48,7 w 55 36 05,7	Gramíneas de porte rasteiro, bem desenvolvida com altura média do pasto de 10 cm.	Solo bem desenvolvido.	Pastoreio de uso contínuo de bovinos.

3.2.2 Amostragem em campo e laboratório

Para quantificar o carbono acima do solo foram coletadas amostras da parte aérea da vegetação e da serrapilheira. A área da amostra foi delimitada através do “método do quadrado” utilizando um quadrado de ferro conhecido de 50 x 50 cm. A parte aérea da vegetação foi coletada utilizando uma tesoura, cortando toda a vegetação rente ao solo no interior desse quadrado (Figura 9). Também foi coletada toda a serrapilheira existente dentro

desta mesma área após a retirada da parte aérea da vegetação, seguindo metodologia definida por Salman, Soares, Canesin (2006).

O material vegetal coletado foi pesado com uma balança de precisão no momento do corte, com a finalidade de se obter a biomassa verde ou peso fresco. Posteriormente a parte aérea foi recolhida em sacos de papel, seca em estufa com circulação forçada a 70°C durante 72 horas, e novamente pesada em balança de precisão para obtenção do peso seco. O secamento das amostras não prejudica a análise de carbono, pois após a retirada da água dos tecidos vegetais a matéria seca é formada basicamente por carbono.



Figura 9 - Coleta da parte aérea de gramíneas antes do corte e depois do corte.

Para quantificar o carbono do solo e raízes foram coletadas amostras de solo com pá, seguindo a metodologia indicada para amostragem de solos para fins agrícolas (SBCS, 2004), retirando um monólito de solo com 10 x 10 cm (Figura 10).



Figura 10 - Coleta de amostras de solo em campo.

As amostras de solo foram coletadas no interior da área definida pelo quadrado de 50 x 50 cm, utilizado para a coleta de amostras de material vegetal, em uma profundidade aproximada de 0-10 cm, variável de acordo com a profundidade do solo e o comprimento das raízes. Nessas amostras, as raízes foram separadas manualmente do solo para quantificação de biomassa radicular e concentração de C.

O sistema radicular dos ecossistemas campestres tem uma distribuição superficial, com maior quantidade de raízes em uma profundidade de 0 a 10 cm, tendo sido reportado que 82% das raízes podem localizadas nesta camada (ABICHEQUER et al., 2009). Além disso, em algumas áreas se destacam campos de solos rasos, conferindo apenas uma camada superficial de solo (BOLDRINI, 2009). Dessa forma, a profundidade de 0-10 cm foi utilizada com a finalidade de se obter amostras homogêneas de solo em todas as unidades amostrais.

3.2.3. Dados Meteorológicos

Os dados médios diários de precipitação pluvial foram coletados para o período de estudo (entre o verão de 2012 e verão de 2014), provenientes de três (3) estações meteorológicas do 8º DISME/INMET (Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia), distribuídas no entorno da APA do Ibirapuitã (Figura 11) nos municípios de Bagé (-31.330°; -54.100°), Santana do Livramento (-30.830°; -55.600°) e Uruguaiiana (-29.750°; -57.080°). Os dados meteorológicos foram utilizados para a observação do seu comportamento no período do estudo e correlacionar com os dados de biomassa e estoque de C.

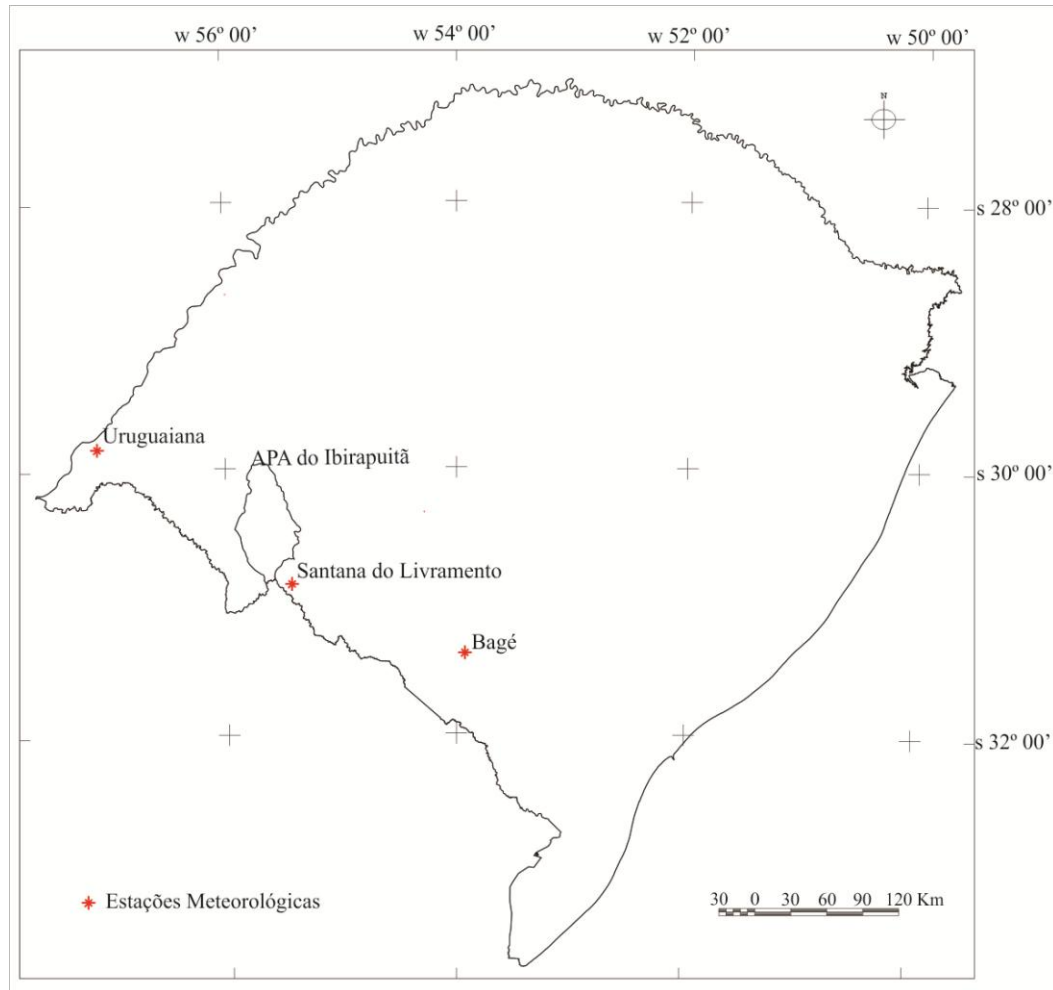


Figura 11 - Localização das estações meteorológicas distribuídas no entorno da APA do Ibirapuitã

3.3 Quantificação dos estoques de carbono nas amostras de campo

As amostras de parte aérea, serrapilheira, raízes e solos coletados em campo em duas diferentes épocas do ano, foram enviadas para o Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia (UFRGS) para análise de carbono orgânico. A concentração de carbono orgânico foi obtida pelo método da combustão úmida (*Walkley Black*), que se baseia na oxidação das amostras com dicromato de potássio em meio ácido, com aquecimento externo a 150°C (TEDESCO et al., 1995).

A partir dos resultados de teor de C foi obtido o estoque de C da biomassa aérea no período do verão e inverno e serrapilheira, raízes e solo apenas no período do verão.

A transformação dos valores de concentração de carbono na parte aérea, raízes e serrapilheira (%) para estoques de C (Mg/ha ou t/ha) foi calculada conforme a Eq.1 ,

considerando a concentração de C e a massa (g) da amostra (em 0,25 m² para parte aérea e serrapilheira e 0,010 m² para a raíz):

$$C \text{ na biomassa (Mg C ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{concentração de C (\%)} \times \text{massa (g)} \times 10}{\text{área amostrada (m}^2\text{)}} \quad (\text{Eq. 1})$$

O C orgânico na camada de solo considerada neste estudo (cm) utilizou a equação proposta por ELLERT & BETTANY (1995):

$$C \text{ org (Mg C ha}^{-1}\text{)} = \text{conc C} \times \rho \times \text{prof} \times 10 \quad (\text{Eq. 2})$$

onde

conc C = concentração de C na amostra coletada (%),

ρ = densidade do solo (Mg m³)

prof = espessura da camada (cm)

Foram utilizados dados de densidade do solo de outros trabalhos realizados no bioma Pampa, conforme a classe de solo: Planossolos - 1,32 g.cm⁻³ (GIAROLA et al., 2002), Argissolos - 1,52 g.cm⁻³ e Neossolos - 1,56 g.cm⁻³ (CARLESSO et al., 2007).

Para cada uma das quatro variáveis analisadas (carbono da parte aérea, carbono das raízes, carbono da serrapilheira e carbono do solo), foram calculadas as estatísticas descritivas (amplitude, média e desvio padrão), analisada a distribuição dos dados e a existência de valores “outliers”, utilizando o *software* estatístico *Statistical Package in Social Science* (SPSS).

Foram verificadas as relações entre o conteúdo de carbono quantificado em laboratório e a biomassa da parte aérea da vegetação coletada em campo. A estimativa dessa relação nas duas estações climáticas definidas (verão e inverno) foi realizada através de um modelo de regressão linear, possibilitando assim, estimar o carbono da vegetação a partir de dados de campo.

As variações sazonais de carbono e os desvios em relação à média anual para cada uma das quatro variáveis (parte aérea, serrapilheira, raízes e solo) foram verificadas através do teste para comparação de médias, utilizando o *software* estatístico SPSS.

3.4 Estimativa de biomassa e carbono a partir dos dados espectrais

Para estimar a biomassa a partir de dados espectrais, foi estabelecida uma relação entre a resposta espectral e a biomassa da parte aérea medida em campo. Foram analisados os dados de quantidade de biomassa aérea instantânea coletada em campo em diferentes períodos do ano *versus* os dados da resposta espectral da vegetação (medidos pelo sensor MODIS no mesmo período). Os dados da biomassa da parte aérea da vegetação foram coletados em nove unidades amostrais distribuídas no interior da APA. As imagens do sensor MODIS/Terra (produto MOD13), são disponibilizadas a cada 16 dias e foram coletadas durante o período de 2012 a 2014 (mesmo período dos dados de campo).

Os produtos MODIS são disponibilizados pelo LP DAAC / NASA (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) em arquivos no formato HDF (*Hierarchical Data Format*), e cobrem uma área de 10 x 10 graus de latitude e longitude (*tiles*), sendo identificados em uma grade horizontal e vertical.

Os valores da resposta espectral de cada uma das bandas do sensor MODIS foram obtidos através da média dos *pixels* correspondentes as amostras obtidas em cada uma das nove unidades amostrais. Para a extração automática dos valores da resposta espectral das bandas do sensor MODIS de cada uma das amostras, utilizou-se o módulo “extração de estatística de imagem por polígono” disponível no *software* SPRING.

A estimativa de biomassa foi realizada conforme metodologia definida por Fonseca et al. (2006), onde inicialmente foram executadas análises de correlação entre os dados de biomassa e a resposta espectral de cada uma das bandas do sensor MODIS (produto MOD13). Posteriormente fez-se uma análise de regressão linear gerando um modelo estatístico empírico de regressão simples ($y = \alpha X + \beta$), tendo como variável dependente a biomassa da vegetação medida pelo sensor. O modelo de regressão gerado possibilitou estimar a quantidade de biomassa aérea da vegetação campestre existente no momento da passagem do satélite.

A estimativa de carbono a partir de dados espectrais também foi realizada por meio de um modelo estatístico, com base na relação entre os valores de estoque de carbono obtidos das amostras coletadas em campo e analisadas em laboratório e a resposta espectral das bandas do sensor MODIS (produto MOD13). O modelo foi gerado a partir uma análise de regressão simples, $y = \alpha X + \beta$ (com apenas uma variável espectral), utilizando como variável dependente a resposta espectral medida pelo sensor, seguindo abordagem semelhante realizada por Sulistyawati et al. (2006).

A partir dos métodos citados, foi possível quantificar o carbono atual da vegetação e identificar a influência da sazonalidade do clima nos teores e estoques de C. Além disso, identificaram-se as relações entre os estoques de C e biomassa com os dados espectrais.

4 RESULTADOS

4.1 Quantificação dos estoques de carbono utilizando dados coletados em campo

As maiores concentrações nos estoques de carbono no interior da APA do Ibirapuitã foram verificadas para o solo, e menores quantidades para a parte aérea, serrapilheira e raízes. A capacidade de estoque de carbono no solo é fortemente dependente da taxa de entrada de C na superfície vegetação, da densidade de vegetação, entre outros fatores (KUNKEL et al., 2011).

Os estoques de carbono encontrados para a parte aérea da vegetação campestre para o período do verão (entre 0,10 e 1,81 t ha⁻¹) foram inferiores aos valores descritos pelo *The Intergovernmental Panel on Climate Change* em 2006, entre 2,3 e 6,2 t ha⁻¹ para vegetação de gramíneas (Tabela 4). Paruelo et al. (2010) utilizando o modelo Century estimou o estoque de C em áreas de vegetação natural do bioma Pampa, com valores entre 138 a 406 g m⁻² para estimativas com ANPP (*Aboveground Net Primary Production*), entre 95 a 439 g m⁻² utilizando dados de campo e 234 a 353 g m⁻² utilizando dados do MODIS.

A quantidade de biomassa da parte aérea da vegetação e consequente armazenamento de C, é atribuída em grande parte à produtividade primária das pastagens, que implica em maior entrada de C da atmosfera para as plantas (PILLAR, TORNQUIST, BAYER, 2012).

O carbono estocado na parte aérea da vegetação no período do inverno apresentou valores (média de 0,69 t.ha⁻¹) abaixo dos verificado na literatura e citados acima. Em algumas áreas de pastagens, baixos valores de C estocado na parte aérea também podem evidenciar um manejo inadequado de pastagens, gerando sua degradação e ocasionando baixos valores de biomassa e, consequentemente de carbono. Dessa forma, pastagens bem manejadas têm potencial de sequestrar maior quantidade de carbono (SILVA NETO et al., 2012).

Não foram encontradas diferenças (significativas para $\alpha = 5\%$) existentes entre as duas estações do ano nos estoques de carbono da parte aérea da vegetação. Apenas o ano de 2013 apresentou diferença significativa para $\alpha = 5\%$, verificadas através do teste de comparação de médias, a qual é esperada para a vegetação campestre, uma vez que temperaturas mais baixas podem diminuir a produtividade da vegetação, resultando em declínios no reservatório de C (KUNKEL et al., 2011).

Tabela 4 - Variações do estoque de carbono no período de verão e inverno (em Mg ha⁻¹) e teste de significância de comparação de médias da parte aérea da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã

Biomassa aérea	Estação	Mínimo	Máximo	Média	Des. Padrão	F	Referência
2012	Verão	0,10	1,81	0,48	0,40	0,30 ^{ns}	2,3 e 6,2 Mg ha ⁻¹
	Inverno	0,19	1,98	0,60	0,34		
2013	Verão	0,31	1,48	0,72	0,29	7,38 *	
	Inverno	0,47	1,34	0,79	0,18		
2014	Verão	0,32	1,37	0,76	0,24		
	Inverno	-	-	-	-		
Total	Verão	0,10	1,81	0,64	0,34	3,01 ^{ns}	
	Inverno	0,18	1,98	0,69	0,29		

^{ns} não significativo; * significativo para 5% de probabilidade

Observou-se que para a biomassa da parte aérea da vegetação as médias entre verão e inverno foram próximas, porém o período do verão apresentou maiores desvios em relação a média e no inverno, maior quantidade de valores extremos (Figura 12).

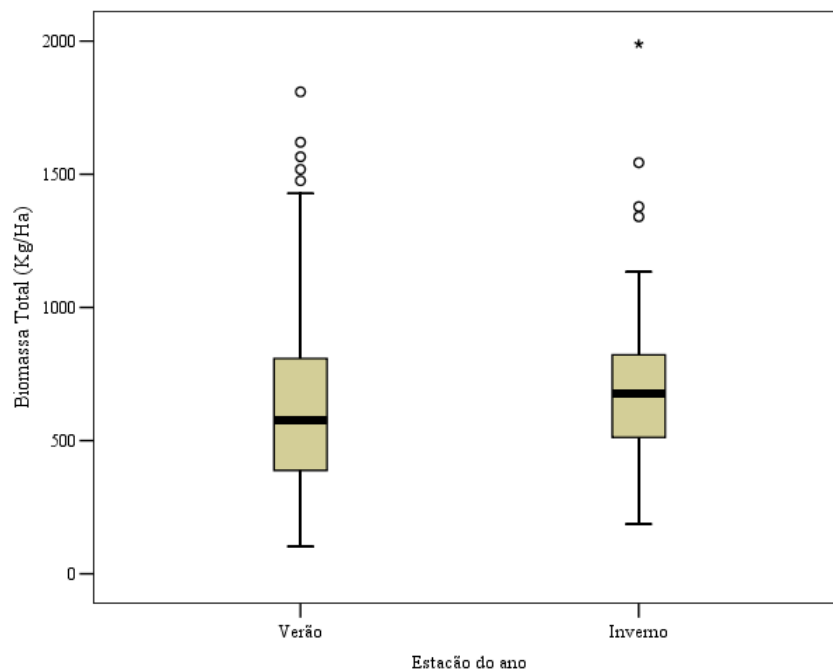


Figura 12 - *Boxplot* para a biomassa total da parte aérea da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã nos períodos do verão e inverno

Os valores nos estoques de carbono encontrados para a serrapilheira (média de 0,202 t ha⁻¹) foram considerados abaixo dos valores citados em outros estudos, os quais correspondem em média 1,10 t ha⁻¹ do estoque de carbono em serrapilheira em áreas de

pastagens (PULROLNIK et al, 2009). Paiva, Rezende, Pereira (2011), obtiveram valores de estoque de carbono na serrapilheira em áreas de cerrado entre 2,32 t ha⁻¹ e 4,83 t ha⁻¹, com valor médio de 3,62 t ha⁻¹.

As variações no estoque de C para a serrapilheira podem ser explicadas pelo fato de que o material acumulado na superfície do solo é dinâmico e pode ser influenciado por fatores do ambiente, como temperatura e umidade, sugerindo que a disponibilidade de água influencia diretamente nos processos de ciclagem de nutrientes, aumentando a taxa de deposição e de carbono acumulado (LOPES et al 2009). Além disso, a taxa de decomposição da serrapilheira é dependente do ciclo biológico da vegetação, tipo de material depositado e de sua composição química (CALVI, PEREIRA, ESPINDULA Jr., 2009), fatores que também podem influenciar no estoque de carbono da serrapilheira (Tabela 5).

Estudos indicam que a produção de serrapilheira não apresenta um padrão definido de comportamento. Uma vez que o volume de matéria seca em uma pastagem é afetado pela produção de matéria seca de serrapilheira e pela taxa de degradação desta (GRISE, 2005).

Outros autores sugerem que a produção de serrapilheira apresenta uma estreita relação com o regime pluviométrico. A maior deposição de serrapilheira ocorre na transição entre o fim da estação chuvosa e início da estação seca, resultado de uma diminuição do conteúdo de água do solo (LOPES et al., 2009).

Tabela 5 - Variações do estoque de carbono (em Mg ha⁻¹) da serrapilheira no período de verão na vegetação campestre da APA do Ibirapuitã

	Ano	Minímo	Máximo	Média	Des. Padrão	Referência
Serrapilheira	2012	0,147	0,351	0,247	0,043	1,10 a 3,62 t ha ⁻¹
	2013	0,074	0,243	0,165	0,042	
	2014	0,058	0,719	0,195	0,142	
	Total	0,058	0,719	0,202	0,059	

Para os anos de 2012 e 2013 as médias para o estoque de C da serrapilheira da vegetação campestre permaneceram com valores aproximados, no entanto, o verão de 2014 apresentou maiores desvios em relação a média com um maior número de valores extremos (Figura 13).

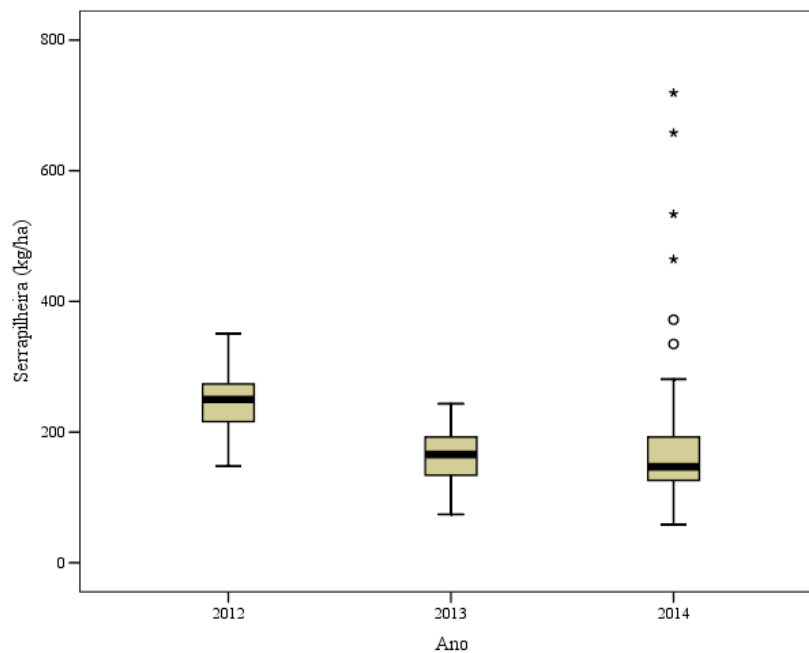


Figura 13 - *Boxplot* para a serrapilheira da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã no verão entre os anos de 2012 a 2014

Em áreas de vegetação natural do bioma Pampa, o C acumulado nas raízes estimado pelo modelo Century em uma profundidade de 30 cm variou entre 248 g m⁻² a 894 g m⁻² (entre 2,48 e 8,94 t ha⁻¹) (PARUELO et al., 2010). Estudos realizados em áreas de pastagens no cerrado constataram que o estoque de carbono total de raízes foi de 22,38 t ha⁻¹ (PAIVA, REZENDE, PEREIRA, 2011). Assim, os valores mínimos encontrados para esta variável no verão (entre 1,80 e 25,93 t ha⁻¹) estão próximos dos valores descritos na literatura (Tabela 6). No entanto, deve-se considerar que o método de amostragem pode ter influenciado, subestimando os valores de C encontrados.

Tabela 6 - Variações do estoque de carbono (em Mg ha⁻¹) das raízes no período de verão na vegetação campestre da APA do Ibirapuitã

	Ano	Minímo	Máximo	Média	Des. Padrão	Referência
Raiz	2012	2,21	25,93	10,98	4,43	22,38 t ha ⁻¹
	2013	1,80	25,74	7,80	5,14	
	2014	2,00	8,36	2,90	2,11	
	Total	1,80	25,93	9,39	5,03	

As diferenças nos valores dos estoques de C podem estar relacionadas ao diâmetro das raízes, sendo que as raízes mais finas apresentam menores teores de carbono e estão concentradas em uma profundidade média de 0-5 cm no solo (LUIZÃO et al., 1999). Assim, a

profundidade do solo (0-10 cm) onde as amostras foram retiradas pode ter contribuído com menores valores de estoque de carbono.

As médias para a variável raiz foram maiores para os anos de 2012 e 2013 e menor em 2014, assim como os desvios em relação às médias. Para os três anos os valores extremos não foram significativos (Figura 14).

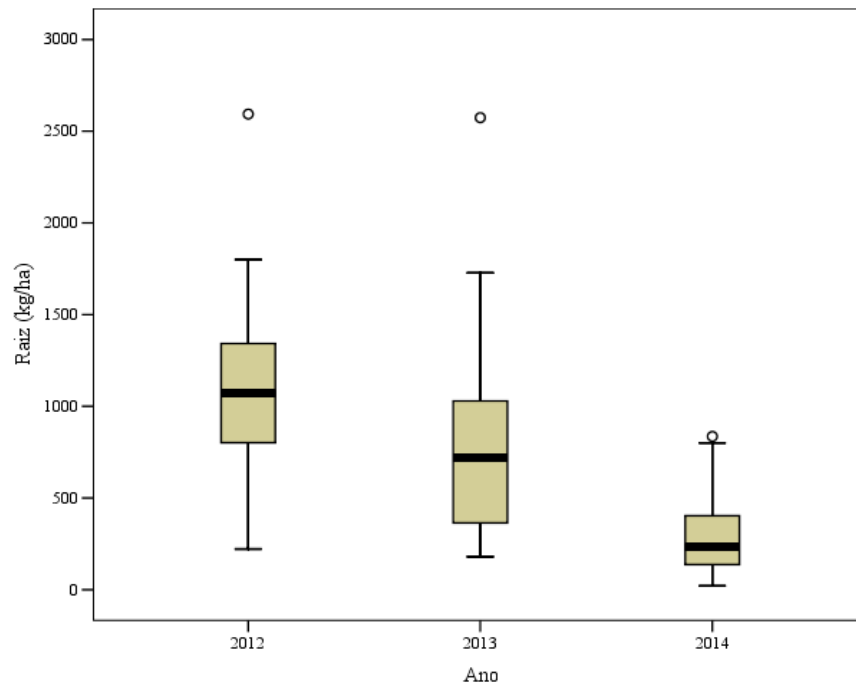


Figura 14 - *Boxplot* para a variável raiz da vegetação campestre da APA do Ibirapuitã no verão entre os anos de 2012 a 2014

O solo sob campo natural apresentou um estoque médio de C orgânico de 49,63 Mg ha⁻¹, variando entre 2,97 e 129,10 Mg ha⁻¹ (Tabela 7). No bioma Pampa, a média de C estocado no solo sob vegetação natural estimado pelo modelo Century variou entre 1893 e 17577 g C.m⁻² (correspondente a 1,89 e 17,57 Mg ha⁻¹). (PARUELO et al., 2010).

Tabela 7 - Variações do estoque de carbono do solo no período de verão (em Mg.ha⁻¹) sob vegetação campestre na APA do Ibirapuitã

	Ano	Minímo	Máximo	Média	Des. Padrão	Referência
Solo (Mg/ha)	2012	5,30	129,10	54,34	28,07	8,8 a 110 Mg C ha ⁻¹
	2013	2,97	99,62	44,93	24,07	
	2014	6,34	104,40	48,33	24,59	
	Total	2,97	129,10	49,63	26,42	

Amado et al. (2001), na camada de 0-10 cm encontrou um estoque médio de C orgânico sob campo natural de 12,28 Mg ha⁻¹. Em uma área de plantas C3 e C4 na Costa Rica, Veldkamp (1994), obteve valores de C orgânico entre 8,8 e 18,8 Mg ha⁻¹, com variações em relação ao tipo de solo. Os estoques sob vegetação nativa (campo / mata) no Rio Grande do Sul calculados por Tornquist (2007) variaram entre 90 e 110 Mg C ha⁻¹ para a camada de 0 a 30 cm de solo.

O estoque de C no solo sob vegetação natural é determinado em grande parte pela entrada de carbono a partir dos resíduos vegetais (material senescente) ou pela incorporação proveniente da decomposição do sistema radicular da pastagem e representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização (FARIA et al., 2010).

Além disso, as amostras de solo foram coletadas em uma profundidade de 0-10 cm, e conforme Chaves e Farias (2008) os maiores valores de estoques de carbono se encontram na camada superficial do solo, diminuindo com a profundidade. Considerando ainda a existência de diferentes tipos de solo, os mesmos podem determinar a composição florística da vegetação (BOLDRINI, 2009) e influenciar nos estoques de carbono do solo, em função da maior ou menor produção de biomassa e deposição.

Os valores de carbono estocado no solo no interior da APA podem estar associados também ao solo pouco perturbado. Em ecossistemas com grande biomassa e solo pouco perturbado, ocorre um maior acúmulo de matéria orgânica, que pode contribuir para o aumento dos teores de carbono no solo (LOSS et al., 2010), além de reter o carbono numa escala temporal muito maior (CONANT, PAUSTIAN, 2002). Confirmando esta informação, Bayer et al. (2000) destaca que em solos sob vegetação natural praticamente não existe variação no teor de carbono orgânico com o tempo.

Na Área de Proteção Ambiental do Ibirapuitã, a variação nos estoques de carbono no solo foi observada conforme o tipo de solo existente no interior da APA e definidos por Silveira et al. (2005): Solos profundos, superficiais e de textura arenítica (Figura 15).

Os maiores valores médios de estoques de carbono no solo foram observados em áreas que predominam solos profundos a muito profundos, os quais apresentam maior teor de matéria orgânica e geralmente bem drenados (STRECK et al., 2008), proporcionando uma maior produção de biomassa e deposição de material senescente, aumentando o teor de matéria orgânica e conseqüentemente de C no solo (FARIA et al., 2010; SILVA NETO et al., 2012). Em áreas com predomínio de solo formado por rochas areníticas, os solos

apresentaram menores teores de C, de acordo com Bochner et al. (2008), solos de textura mais arenosa não permitem acumulação significativa de carbono, sendo esses teores menores quando comparados a outros solos.

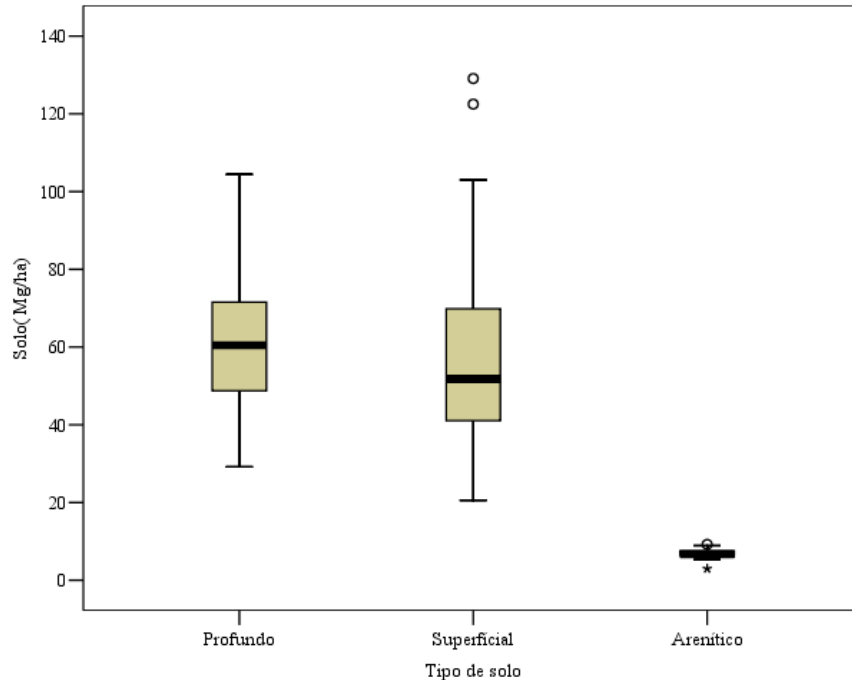


Figura 15 - *Boxplot* para o C do solo sob vegetação campestre na APA do Ibirapuitã no verão entre os anos de 2012 a 2014

Estudos demonstram que existe uma relação direta entre a biomassa e o conteúdo de carbono e que esta relação é próxima a 2:1 (ALEGRE, 2000; IPCC, 2007). Foram estabelecidas relações entre a biomassa da parte aérea da vegetação coletada em campo e o conteúdo de carbono quantificado em laboratório, e avaliando os resultados obtidos nas correlações, considera-se que a biomassa aérea da vegetação pode ser utilizada para a predição de C. A tabela 8 apresenta os modelos de regressão utilizados para predição de C através da biomassa aérea medida em campo.

Tabela 8 - Modelos de Regressão linear utilizados para estimativa de C através da biomassa medida em campo e seu respectivo R^2

Estação do ano	Modelo de Regressão	R^2
Verão	$y = 2,2581x + 237,39$	0,81
Inverno	$y = 2,8718x + 133,05$	0,82

A correlação resultante foi significativa com 99% de confiança ($\alpha = 0,01$), para o verão ($r = 0,90$) e inverno ($r = 0,91$). As correlações mostraram tendência linear entre as variáveis, com uma relação de dependência entre x e y (Figura 16).

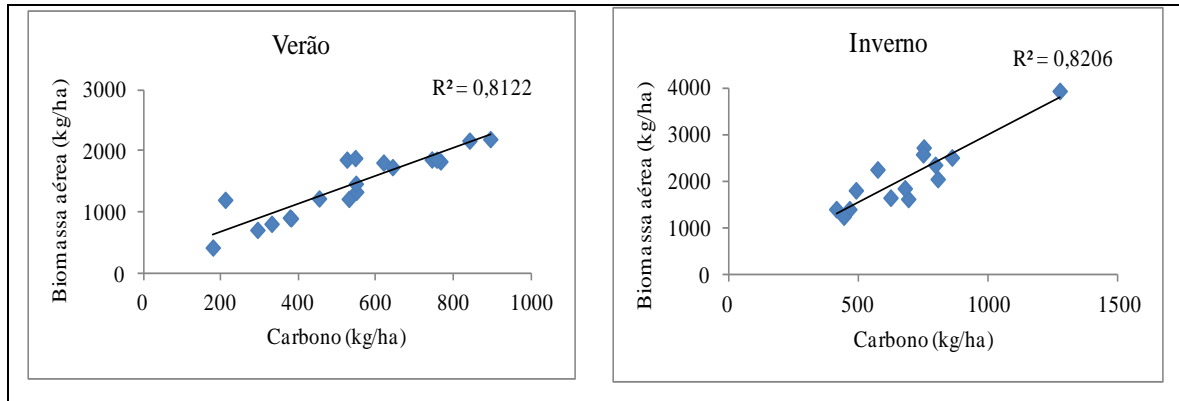


Figura 16 - Relação entre o conteúdo de carbono e a biomassa da parte aérea da vegetação coletada em campo no verão e inverno (2012 - 2014).

4.2 Quantificação do teor de carbono utilizando dados coletados em campo

Da mesma forma que os resultados encontrados para os estoques de C, na área de vegetação campestre da APA do Ibirapuitã foram encontradas maiores quantidades médias de teor de carbono na biomassa vegetal (parte aérea, serrapilheira e raízes) no período do verão, conforme esperado para este tipo de vegetação, e menores quantidades de carbono no solo no período do inverno (Tabela 9).

Tabela 9 - Variações do teor de carbono no período do verão e inverno, e teste de significância de comparação de médias das variáveis: parte aérea, serrapilheira, raízes e solo na vegetação campestre da APA do Ibirapuitã

		Média (%)	Des. Padrão (%)	Valor Mínimo (%)	Valor Máximo (%)	Teste <i>t</i>	Referência
Parte aérea	Verão	41,49	1,67	37,00	45,00	35,222**	42,50 e 47%
	Inverno	30,91	5,50	14,00	38,00		
Serrapilheira	Verão	40,31	1,99	36,00	43,00	15,565**	33%
	Inverno	34,56	3,88	27,00	40,00		
Raízes	Verão	25,42	8,55	7,00	57,00	1,358*	29,6 e 42,3%
	Inverno	15,20	6,72	2,50	29,00		
Solo	Verão	4,46	1,93	0,40	8,20	1,774 ^{ns}	1,3 a 20,4%
	Inverno	4,04	1,50	0,23	6,60		

^{ns} não significativo; * e ** significativo para 5% e 1% de probabilidade, respectivamente

O resultado do teste *t* de comparação de médias demonstrou que existem diferenças significativas (para $\alpha = 5\%$) entre as duas estações do ano nos teores de carbono da parte aérea da vegetação, carbono da serrapilheira e carbono das raízes. Conforme esperado, o solo do bioma Pampa apresentou baixo teor de carbono em relação à biomassa vegetal, no entanto, não apresentou diferenças (para $\alpha = 5\%$) entre verão e inverno.

As diferenças (significativas para $\alpha = 5\%$) existentes entre as duas estações do ano são esperadas para a vegetação campestre, devido à diminuição da produtividade da vegetação em função das baixas temperaturas (KUNKEL et al., 2011). Considerando que em solos sob vegetação natural praticamente não existe variação no teor de carbono orgânico com o tempo (BAYER et al., 2000), esse fato pode explicar a inexistência de diferenças significativas (para $\alpha = 5\%$) entre as estações do ano nos estoques de carbono do solo na área de estudo.

Os teores de carbono da parte aérea da vegetação campestre para o período do verão (entre 37 e 45%) foram próximos aos valores tomados como *default* pelo IPCC (2003), de

47% para vegetação de gramíneas. Outros autores obtiveram teores médios de carbono de 42,50% (MIRANDA, 2012) e 45% para a biomassa da parte aérea (ALEGRE et al., 2000).

Associado ao menor acúmulo de biomassa da vegetação campestre no período do inverno (NABINGER et al., 2000) e consequente diminuição do teor de C, considerando que aproximadamente 45% da biomassa da planta é C (ALEGRE et al., 2000), o carbono estocado na parte aérea da vegetação apresentou valores (entre 14 e 38%) abaixo dos verificados na literatura.

Para a serrapilheira, foram encontrados teores médios de C de 40,31% para o verão e 34,56% para o inverno, resultando em diferenças significativas (para $\alpha = 1\%$) entre as estações do ano. Como evidenciado anteriormente, o material acumulado na superfície do solo é dinâmico e pode ser influenciado por fatores do ambiente, explicando as diferenças encontradas entre as estações do ano para a serrapilheira (LOPES et al 2009).

Para uma determinada região do bioma Pampa, Paruelo et al. (2010) verificaram que a contribuição da biomassa vegetal variou entre 9,5 e 27%, sendo o depósito de carbono vegetal mais importante, o subterrâneo. Estudos realizados em áreas de pastagens constataram um teor médio de carbono para as raízes variando entre 29,6 e 42,3% (LUIZÃO et al., 1999). No entanto, os valores mínimos encontrados para esta variável (entre 7 e 57% no verão e 2,5 a 29% no inverno) estão abaixo dos valores descritos na literatura, principalmente para o período do inverno, considerando ainda que as amostras foram retiradas em uma profundidade média de 0-10 cm no solo, o que pode ter contribuído para a redução nos valores de carbono.

Em escala global, dependendo do tipo de solo os teores de carbono orgânico podem variar de 1,3 a 20,4% (MARKZ et al., 2009). Considerando esta variação, os valores encontrados neste estudo para os estoques de carbono (entre 0,4% e 8,2% no verão e 0,23 e 6,60% no inverno) são considerados baixos.

Grandes variações nos teores de carbono no interior da APA do Ibirapuitã foram verificadas para a parte aérea, serrapilheira e raízes, e menores variações para os teores de C orgânico do solo. As menores variações de carbono no solo no interior da APA podem estar associadas ao solo pouco perturbado. Em ecossistemas com grande biomassa e solos pouco perturbados ou manejados, ocorre um maior acúmulo de C orgânico do solo (LOSS et al., 2010), além de reter o carbono numa escala temporal muito maior (CONANT, PAUSTIAN, 2002).

De modo geral, o teor de C da parte aérea e do solo seguiu um mesmo padrão de distribuição espacial no período do verão, o que pode ser explicado pela maior produção de

biomassa no verão em solos mais profundos e bem drenados, resultando em uma maior quantidade de matéria orgânica acumulada no solo e conseqüente maior quantidade de carbono (FARIA et al., 2010). A

4.3 Relação entre a precipitação e a quantidade de biomassa aérea e carbono

O estado do Rio Grande do Sul apresenta altas temperaturas no verão e baixas no inverno, com chuvas distribuídas durante todo o ano, conforme observado por Nimer (1989). Destacam-se menores volumes de chuva no período do verão e inverno, e os maiores valores nos períodos correspondentes ao outono e primavera.

Os valores médios de temperatura do ar e precipitação pluvial no período entre o verão de 2012 e verão de 2014 no entorno da APA do Ibirapuitã demonstra as características do clima subtropical predominante no estado do Rio Grande do Sul, com altas temperaturas (aproximadamente 25°C) no verão e baixas (aproximadamente 12°C) no inverno, com chuvas distribuídas durante todo o ano (Figura 17).

Conforme descrito por Sartori (2003), na primavera e no outono ocorre a reconfiguração dos sistemas atmosféricos atuantes sobre o sul do Brasil, elevando consideravelmente os índices pluviométricos. Durante o verão, o aumento do gradiente térmico latitudinal aliado ao gradiente horizontal de pressão, acelera o deslocamento das massas de ar polares em direção às latitudes tropicais causando uma diminuição na precipitação da região. No inverno, a diminuição da precipitação pluvial pode estar relacionada com o fortalecimento dos centros de ação das massas de ar, tanto polares quanto tropicais, que podem interferir no deslocamento das massas de ar e das frentes polares.

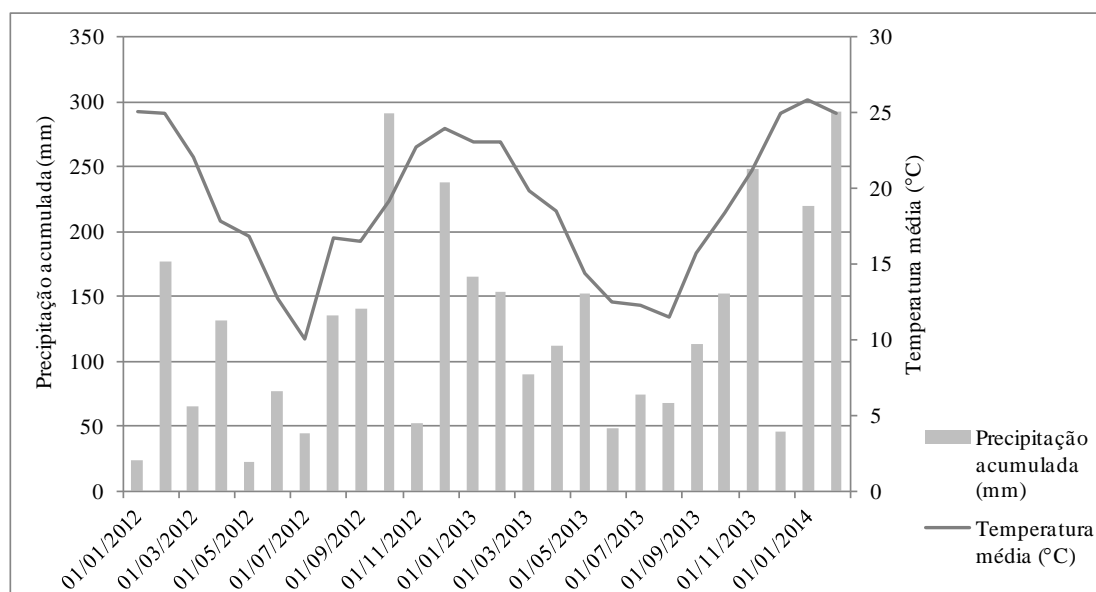


Figura 17 - Precipitação acumulada mensal e temperatura média do ar entre o período do verão do ano de 2012 e verão de 2014 no entorno da APA do Ibirapuitã.

A análise de correlação entre a precipitação pluvial e a biomassa aérea e estoque de C não retornou coeficientes significativos. Para o estoque de C relacionado à precipitação acumulada de sete dias anteriores a data do campo foi encontrado um $r = 0,09$ e $r = 0,18$ quando correlacionado a precipitação acumulada de 30 dias anteriores ao campo. Em relação à biomassa aérea foram encontrados coeficientes de $r = -0,15$ para a precipitação acumulada de sete dias e $r = -0,06$ para 30 dias anteriores ao campo.

Trabalhos realizados relacionando dados espectrais, principalmente o NDVI com a precipitação pluvial demonstram que a vegetação relaciona-se positivamente com a precipitação, indicando que um possível aumento na quantidade de chuva pode evidenciar um aumento da atividade fotossintética e da reflectância da vegetação, ou diminuição da reflectância quando a precipitação é baixa (VERONA; SHIMABUKURO; SANTOS, 2005).

Estudos em áreas com períodos sazonais de precipitação bem definidos, destacam que o NDVI permite comparações significativas entre as variações sazonais e a vegetação. Os perfis de NDVI e EVI apresentam altos valores na estação chuvosa e menores valores na estação seca, seguindo os padrões da precipitação, com um atraso na resposta da vegetação de cerca de um mês (RATANA, HUETE, FERREIRA, 2005). Porém, pesquisas desenvolvidas especificamente para o bioma Pampa mostram que pode não haver correlação entre o desenvolvimento da vegetação e a precipitação (BISSO et al., 2010).

Xia et al. (2014), correlacionando o estoque de carbono de pastagens naturais com a temperatura média do ar e a precipitação pluvial, obtiveram resultados positivos para a temperatura em relação a precipitação, para a maior parte das regiões analisadas em nível global. Especificamente para o bioma Pampa, os autores não encontraram correlação entre os estoques de C e as variáveis analisadas.

Estudos sobre estoques de C da biomassa de pastagens na China demonstram que o C está diretamente relacionado com a distribuição dos fatores climáticos, tipos de vegetação e solo. O carbono estocado na biomassa da vegetação é positivamente correlacionado com a precipitação. O estoque de C é maior em áreas com maiores quantidades de precipitação, temperatura moderada e solos férteis (HASITUYA et al., 2013).

Conforme destacado por Wang et al. (2004), considerando as condições climáticas, o estoque de carbono em campo ou pastagem nativa decresce com o aumento da temperatura média anual e aumenta com o aumento da precipitação. Assim,

pode-se considerar o fato de que a área de estudo apresenta uma condição sazonal bem definida em relação a temperatura, a qual define o padrão de crescimento/desenvolvimento da vegetação e conseqüentemente seu estoque de carbono.

4.4 Quantificação da biomassa da parte aérea da vegetação campestre e seu estoque de carbono a partir de dados de sensoriamento remoto orbital

4.4.1 Relação entre a biomassa aérea e dados de sensoriamento remoto orbital

Diversos autores consideram que o NDVI é sensível as mudanças na cobertura do dossel. Bajracharya (2008) observa que a biomassa pode ser estimada por meio de uma relação direta entre os dados de campo e a reflectância dos dados de sensoriamento remoto, principalmente nas bandas do vermelho e infravermelho próximo. Da mesma forma, Gamon, et al. (1995) utilizaram o NDVI como indicador da estrutura do dossel, absorção da luz e atividade fotossintética, as quais foram positivamente correlacionadas com o NDVI em área de gramíneas.

Observando o perfil temporal das bandas espectrais e índices de vegetação (IVs) EVI e NDVI com relação à biomassa aérea da vegetação campestre, verificou-se uma relação entre a biomassa aérea e os índices EVI e NDVI e a banda espectral do NIR. Ou seja, os mesmos apresentaram um comportamento esperado, com maiores valores no verão e menores no inverno, com exceção do ano de 2012 em que a biomassa aérea da vegetação apresentou comportamento oposto (Figura 18). O comportamento observado para a biomassa aérea no ano de 2012 pode ser atribuído à variabilidade climática intra-anual, relacionada principalmente a precipitação pluvial.

Conforme esperado, na época de maior crescimento/desenvolvimento da vegetação, que para a APA do Ibirapuitã inicia na primavera (NABINGER et al., 2000), e conseqüente aumento da atividade fotossintética e aumento das folhas verdes, ocorre uma diminuição da reflectância na região do visível e aumento no infravermelho próximo. Para o bioma Pampa, Bisso et al. (2010) observaram que os valores mais altos de NDVI ocorrem no período do verão e decaem no outono, atingindo os valores mais baixos no período do inverno.

Os índices de vegetação EVI e NDVI do sensor MODIS foram mais sensíveis às variações sazonais da vegetação. Da mesma forma, Huete et. al. (2002) observaram que os mesmos índices demonstraram uma sensibilidade para o monitoramento e avaliação das variações espaciais e temporais da vegetação, na cobertura da terra e nos parâmetros biofísicos.

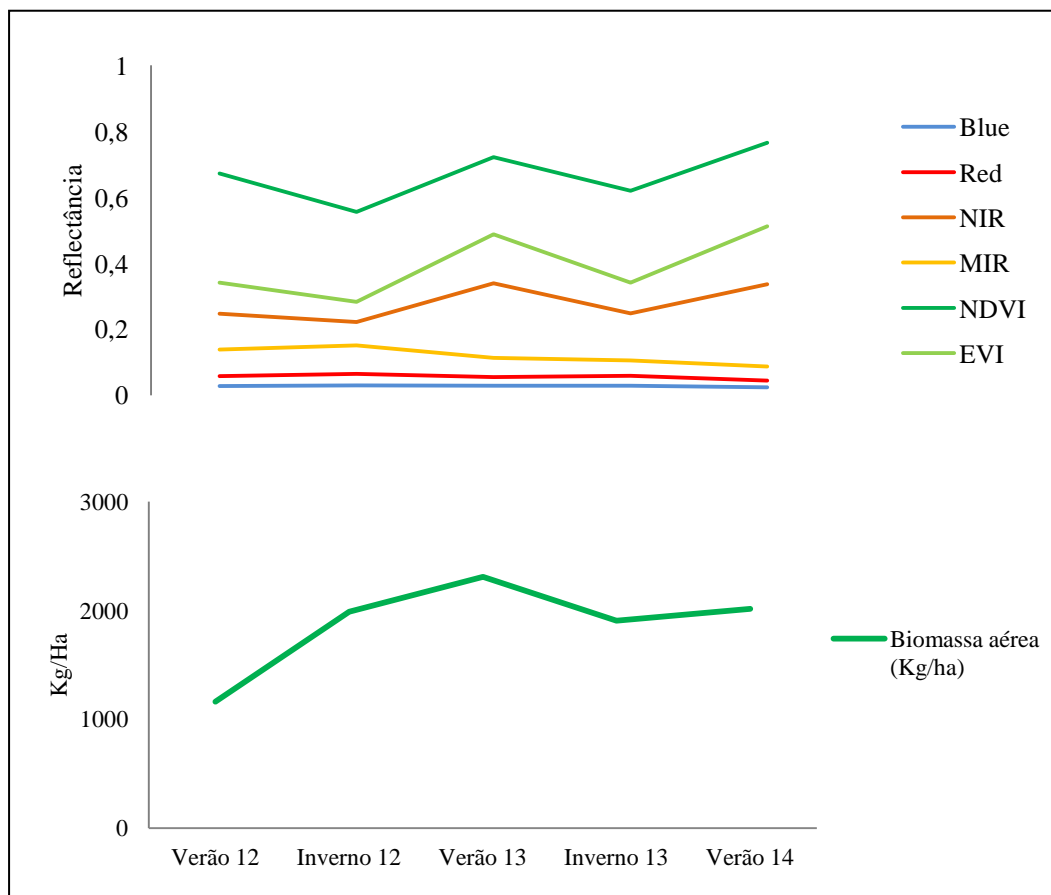


Figura 18 - Perfil temporal da biomassa aérea da vegetação e dados espectrais

Os dados de série temporal de Índices de Vegetação são úteis para estudar a dinâmica sazonal da vegetação. Os IVs permitem a identificação das variações sazonais e interanuais da vegetação, fenologia, parâmetros biofísicos e o pico da estação de crescimento (RATANA; HUETE; FERREIRA, 2005). Os mesmos autores identificaram ainda que os perfis de IV seguem padrões de precipitação, com um atraso na resposta da vegetação de cerca de um mês.

Bettolli et al. (2010) avaliaram a relação entre a produtividade da pastagem e a variabilidade climática no Uruguai, confirmando quantitativamente a sensibilidade da vegetação à variabilidade do clima, sendo que a maior associação foi encontrada no outono (principalmente com as variáveis relacionadas à precipitação) e no verão.

Para a biomassa aérea da vegetação, foram encontrados valores médios de 1829,36 kg/ha para o verão e 1948,09 kg/ha para o inverno (Tabela 10). Barbieri (2013) em uma área de vegetação do bioma Pampa encontrou uma MF (massa de forragem) média de 3057 kg de MS/ha. Da mesma forma, Garagorry (2012) obteve uma MF de 3896 kg de MS/ha, considerados altos valores pelos mesmos autores.

A faixa de valores considerada ótima por Gonçalves e Carvalho (2006) e Neves et al., (2009) varia entre 2000 a 2500 kg de MS/ha, para um mesmo protocolo experimental.

Tabela 10 - Valores médios de biomassa aérea da vegetação campestre nos diferentes períodos do ano

Ano	Estação	Média de Biomassa aérea (Kg de MS/ha)	Referência
2012	Verão	1163,289	2000 a 2500 kg de MS/ha
	Inverno	1988,889	
2013	Verão	2309,867	
	Inverno	1907,289	
2014	Verão	2014,933	

O coeficiente de correlação encontrado a partir da relação entre a disponibilidade de biomassa aérea da vegetação campestre com a resposta espectral detectada pelo sensor MODIS, foi significativo para as bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo (NIR), NDVI e EVI.

Para a banda do azul essa relação resultou em um $r = 0,79$ (significativo para $\alpha = 1\%$), assim como a banda do vermelho ($r = 0,77$), NIR ($r = 0,70$), NDVI ($r = 0,76$) e EVI ($r = 0,91$), significativo para $\alpha = 1\%$.

Relacionando a biomassa aérea da vegetação e o NDVI resultante do sensor *Vegetation/SPOT* para o bioma Pampa, Fonseca et al. (2011) encontraram um coeficiente de correlação de $r = 0,517$. Zhao et al. (2014) obtiveram um $R^2 = 0,62$ relacionando a biomassa coletada em campo e o NDVI em pastagens na China.

A distribuição dos pontos nos gráficos (Figura 19) apresentou uma tendência linear e decrescente para as bandas do azul e vermelho do sensor MODIS. A banda do MIR também apresentou tendência negativa. Na região do espectro visível, a radiação é utilizada pelas plantas nos processos fisiológicos de acúmulo de biomassa, justificando a grande absorção de energia apresentada pelas folhas nesta faixa de comprimento de onda (HALL e RAO, 1994).

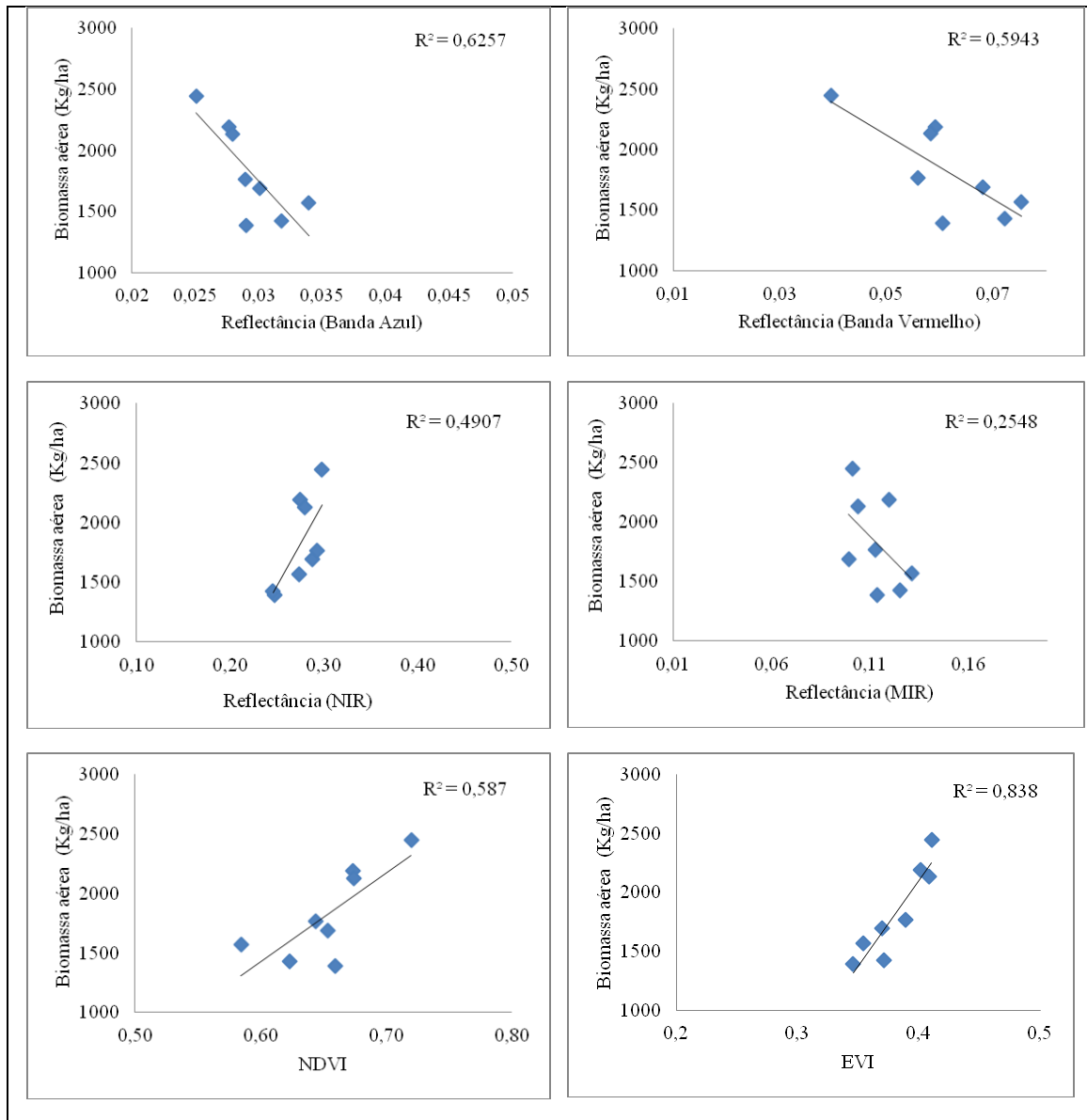


Figura 19 - Gráfico de dispersão e análise de regressão demonstrando a relação entre a disponibilidade de biomassa aérea da vegetação campestre medida em campo e a resposta espectral do sensor MODIS no bioma Pampa.

A banda espectral do infravermelho próximo (NIR) e os Índices de Vegetação EVI e NDVI apresentaram uma tendência linear e crescente entre os dados. Estudos demonstram que existe uma relação direta entre resposta no infravermelho próximo e variáveis relacionadas com biomassa. Além disso, há uma relação inversa entre a resposta no visível, particularmente no vermelho, e variáveis relacionadas com a biomassa das plantas. Assim, a medida que um dossel vegetal se desenvolve, a sua reflectância aumenta no infravermelho próximo e absorve cada vez mais no vermelho em função do aumento da fotossíntese (JENSEN, 2009).

No modelo apresentado para o coeficiente de determinação (significativo para $\alpha = 1\%$), 63% da variação observada na banda do azul, 59% na banda do vermelho, 58% para o NDVI e 84% para o EVI é explicada pelo fato de que a quantidade de biomassa aérea da vegetação também varia em diferentes períodos do ano, sendo observada uma relação de dependência entre essas duas variáveis (Tabela 11). O coeficiente de determinação informa a proporção da variabilidade dos dados espectrais que são explicados estatisticamente pela biomassa aérea da vegetação medida em campo (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Tabela 11 - Modelos de Regressão linear utilizados para estimativa de biomassa através de dados espectrais e seu respectivo R^2

Bandas Espectrais	Modelo de Regressão	R^2
Azul	$y = -113238x + 5143,8$	0,63
Vermelho	$y = -26682x + 3457,7$	0,59
NDVI	$y = 7458,1x - 3051,3$	0,58
EVI	$y = 14391x - 3655,5$	0,84

4.4.2 Relação entre o estoque de carbono e dados de sensoriamento remoto orbital

Observando o gráfico de perfil temporal do carbono da biomassa aérea da vegetação campestre (Figura 20), verificou-se um aumento no estoque de C da vegetação campestre entre o verão de 2012 até o verão de 2013, diminuindo no inverno de 2013 e estabilizando até verão de 2014. O comportamento observado pode estar relacionado a quantidade de precipitação na área.

De modo geral, o estoque de C da vegetação campestre do bioma Pampa foi em média $0,67 \text{ Mg ha}^{-1}$ ($669,63 \text{ kg ha}^{-1}$) no período do verão e $0,66 \text{ Mg ha}^{-1}$ ($665,83 \text{ kg ha}^{-1}$) no inverno, variando entre $0,48$ e $0,86 \text{ Mg ha}^{-1}$ (485 e 858 kg ha^{-1}). Oliveiras et al. (2013) obtiveram um total de $3,35 (\pm 0.1) \text{ Mg C ha}^{-1}$ em um Parque Nacional no Sudoeste do Peru sob vegetação natural de gramíneas.

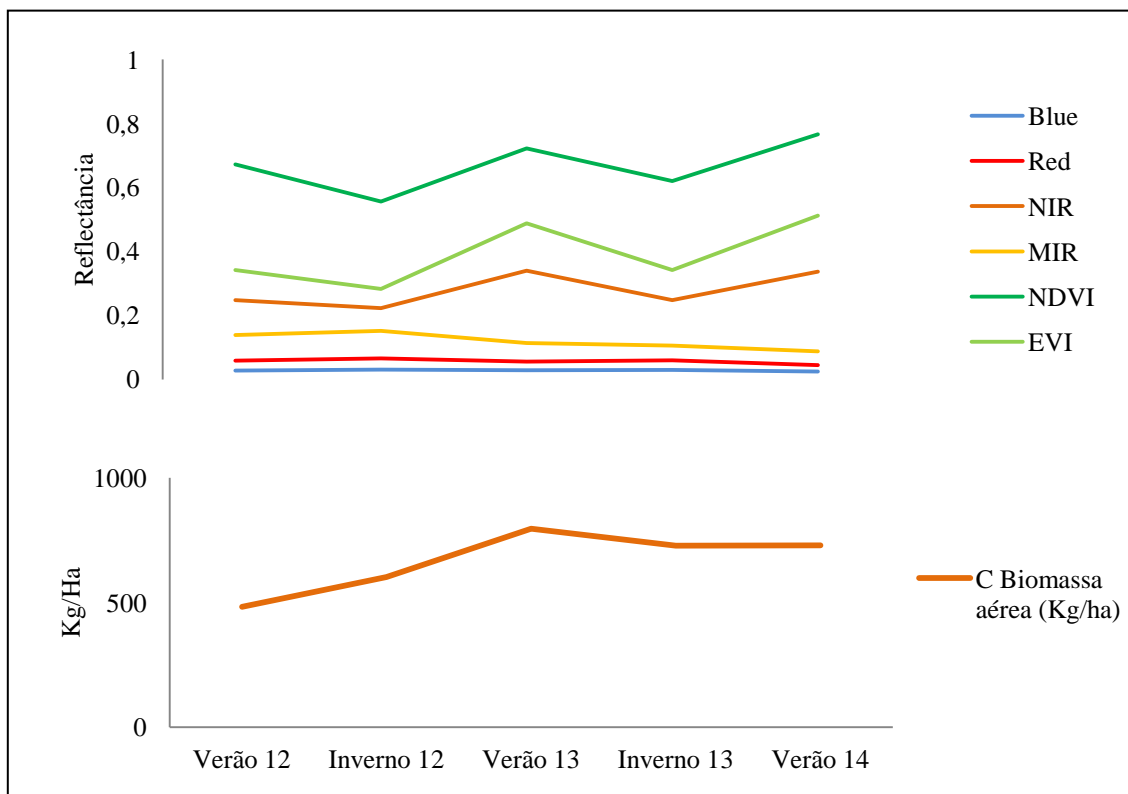


Figura 20 - Perfil temporal do carbono da biomassa aérea da vegetação e dados espectrais

Com relação às bandas espectrais, estas apresentaram comportamento semelhante ao estoque de C da biomassa aérea, com maiores valores no verão e menores no inverno. Este comportamento é esperado uma vez que, a quantidade de biomassa representa em média $\sim 50\%$ da quantidade de C.

A banda espectral do NIR e os índices de vegetação NDVI e EVI foram os mais expressivos entre as estações do ano. A banda do infravermelho próximo (NIR) corresponde a um intervalo muito sensível à quantidade de biomassa da vegetação e/ou área foliar presente (JENSEN, 2009).

As bandas do azul, vermelho e MIR não apresentaram grandes diferenças entre as estações ao longo dos anos. Segundo Jensen (2009) a faixa espectral que cobre a região entre as bandas do azul e vermelho apresenta baixa reflectância da vegetação fotossinteticamente ativa, não ultrapassando 0,20. Isto decorre devido à absorção da radiação pelos pigmentos da planta, principalmente da clorofila pela vegetação verde saudável, sendo úteis para discriminação da vegetação.

Foi encontrado um R^2 significativo (para $\alpha=1\%$) entre o carbono da biomassa aérea e as bandas espectrais do azul, vermelho e o NDVI. As bandas espectrais do azul e vermelho são inversamente proporcionais a quantidade de carbono da biomassa, ou seja, à medida que a quantidade de C aumenta, ocorre uma diminuição na resposta espectral medida pelo satélite.

Utilizando modelos estatísticos baseados em dados do satélite Landsat/ETM Sulistyawati et al. (2006) demonstraram que os dados de satélite permitem o monitoramento dos estoques de C, podendo identificar mudanças ao longo do tempo. A tabela 12 apresenta as equações de regressão linear entre o C e as bandas do azul, vermelho e o NDVI, os quais apresentaram maiores relações entre os dados.

Tabela 12 - Modelos de Regressão linear utilizados para estimativa de C através de dados espectrais e seu respectivo R^2

Bandas Espectrais	Modelo de Regressão	R^2
Azul	$y = -35045x + 1681,1$	0,51
Vermelho	$y = -9976,1x + 1269,9$	0,68
NDVI	$y = 2260,3x - 829,09$	0,46

O gráfico de dispersão do NDVI demonstrou uma relação positiva e linear com o C da biomassa aérea da vegetação, à medida que a quantidade de C aumenta o NDVI também aumenta (Figura 21). Estudos mostram que o NDVI pode ser correlacionado com o carbono. Quanto maior for a atividade fotossintética, maior serão as feições de absorção nas faixas do azul e vermelho e mais expressivos serão os valores (BAPTISTA, 2003). Grilo et al. (2011) indicam que por meio dos índices calculados,

como o NDVI, é possível inferir os locais que apresentaram maior fluxo de CO_2 na vegetação.

A banda espectral do MIR e o EVI apresentaram um coeficiente de correlação significativo para $\alpha = 5\%$ ($R = 0,44$ e $0,48$, respectivamente). O gráfico de dispersão demonstra que essas variáveis apresentaram um aumento na resposta espectral com um aumento do carbono estocado pela vegetação.

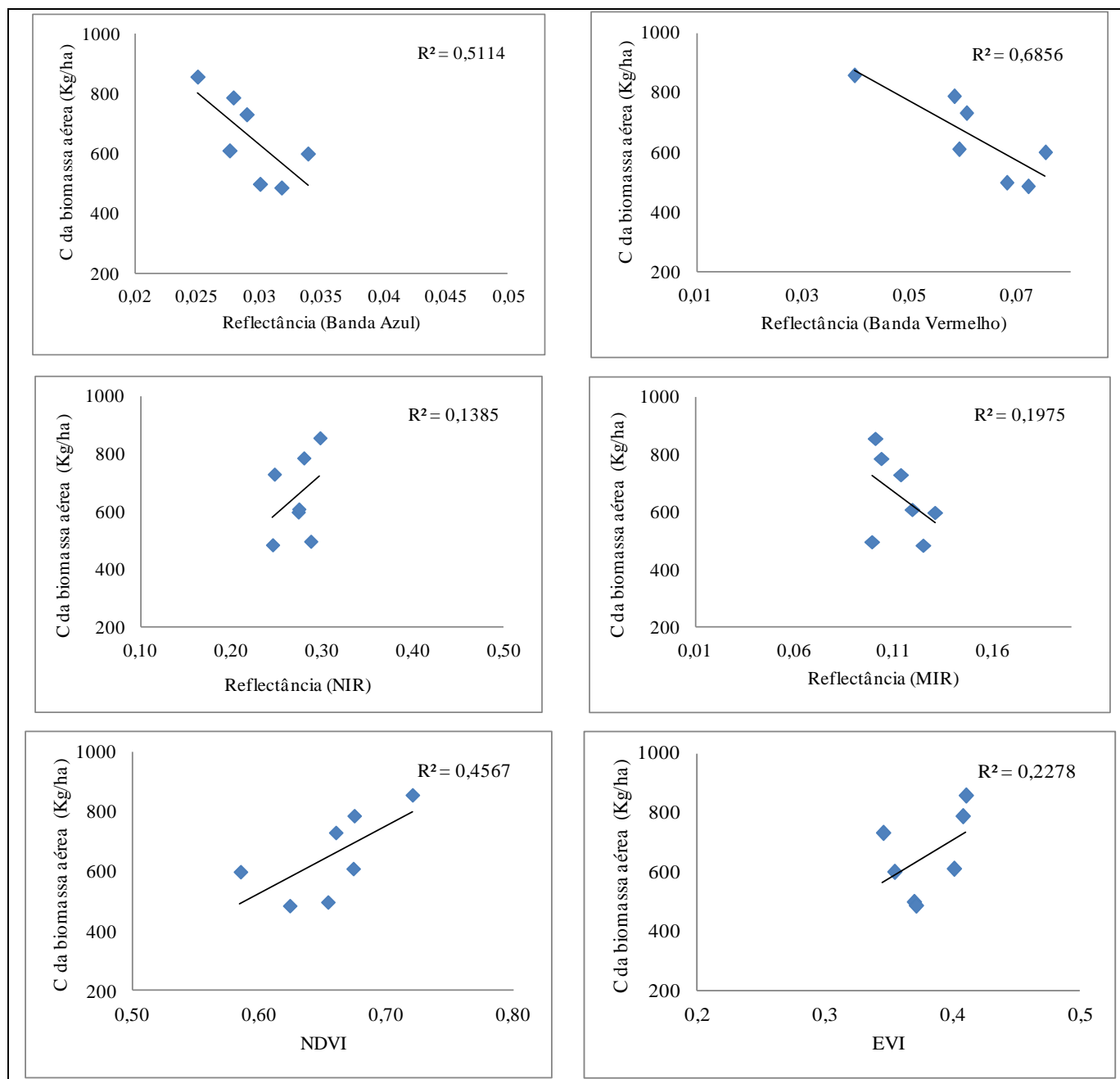


Figura 21 - Gráfico de dispersão e análise de regressão demonstrando a relação entre a disponibilidade de carbono da biomassa aérea da vegetação campestre medida em campo e a resposta espectral do sensor MODIS no bioma Pampa

Xia et al. (2014) estimaram os padrões espaciais e temporais da biomassa global utilizando medições de campo e dados de satélite e demonstraram que o modelo desenvolvido utilizando o NDVI explicou 60% da variação dos estoques de carbono e biomassa a nível global.

Por fim, os resultados demonstram que o carbono estocado pela vegetação possui uma maior relação com o índice de vegetação NDVI, considerando que este índice se destaca por ser mais sensível as variações na vegetação.

5 CONCLUSÕES

Primeiramente, em relação aos estoques e teor de carbono, se destaca que as maiores concentrações nos estoques de carbono no interior da APA do Ibirapuitã foram verificadas para o solo e menores quantidades para a parte aérea, serrapilheira e raízes. Da mesma forma, na área de vegetação campestre da APA do Ibirapuitã foram encontradas maiores quantidades médias de teor de carbono na biomassa vegetal (parte aérea, serrapilheira e raízes) no período do verão.

Em relação à interferência da sazonalidade do clima no conteúdo de carbono, o teste de comparação de médias demonstrou que existem diferenças significativas entre verão e inverno nos teores de carbono da parte aérea da vegetação, carbono da serrapilheira e carbono das raízes. O solo não apresentou diferenças entre verão e inverno. Quando avaliado os estoques de carbono da parte aérea da vegetação, não se obteve diferenças entre as duas estações do ano. Porém, este resultado não limita a contribuição da sazonalidade do clima em relação aos estoques de C, uma vez que a série de dados é restrita, considerando apenas o cumprimento dos objetivos propostos no intervalo de tempo disponível para realização desta tese. Nesse sentido, sugere-se para trabalhos futuros a avaliação de uma série maior de dados.

A vegetação campestre do bioma Pampa possui comportamento sazonal bem definido, com período de crescimento das espécies nos meses quentes do ano (primavera e verão).

Para a relação entre a precipitação e a quantidade de biomassa aérea e carbono, a variabilidade intra-anual da precipitação pluvial não influenciou no comportamento padrão da biomassa aérea da vegetação e seu estoque de carbono. Assim, pode-se considerar que a condição sazonal relacionada a temperatura, define o padrão de crescimento/desenvolvimento da vegetação e conseqüentemente seu estoque de carbono.

Os teores de carbono no solo variaram conforme a classe de solo existente na APA. Os maiores estoques estão associados aos solos profundos a muito profundos e bem drenados. Em áreas com predomínio de solos formados por rochas areníticas, apresentaram menores teores de C.

No modelo apresentado para a estimativa de biomassa por meio de dados espectrais, foi identificada uma relação entre a disponibilidade de biomassa aérea da vegetação e as bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo, EVI e NDVI. Os

índices de vegetação EVI e NDVI do sensor MODIS foram mais sensíveis às variações sazonais da vegetação, demonstrando que o aumento no valor destes índices é proporcional à quantidade de biomassa medida em campo. Nesse sentido, é destacada a aplicabilidade desta metodologia para estimar biomassa a partir de dados espectrais, como o EVI.

Os modelos de regressão para a estimativa de estoque de carbono a partir de dados de sensoriamento remoto orbital mostraram que o NDVI pode ser considerado um dado importante para a predição de C da biomassa. Em relação as bandas espectrais, não houve grande influência sobre o C estimado, considerando que outros fatores podem ter contribuído para estes resultados, como características do solo, variações climáticas e fatores humanos.

Neste contexto, considera-se que a utilização conjunta de diferentes dados, tanto coletados em campo como dados remotos, podem contribuir significativamente para estudos de predição de biomassa e carbono da vegetação. No entanto, alguns questionamentos ainda estão sem respostas, principalmente em relação às especificidades da vegetação campestre e dos locais estudados (espécie, histórico de uso, formas de manejo) entre outras, que podem alterar a resposta da vegetação. Contudo, considera-se que o objetivo geral desta tese foi cumprido, alcançando resultados que serão benéficos e importantes para a gestão, gerenciamento, planejamento e conservação da Área de Proteção Ambiental do Ibirapuitã.

Ainda assim, é importante ressaltar as dificuldades encontradas para o desenvolvimento desta tese, desde a coleta de dados em campo, processamento e análise dos resultados, encontrando-se dificuldades tanto financeiras e de acesso a coleta de dados, quanto a disponibilidade e conhecimento de softwares e ao tema estudado.

Assim, sugere-se para estudos futuros, a avaliação e aplicação de outras metodologias, como utilização de sensores com melhor resolução espacial e espectral, coleta de dados de campo e de satélite com uma amostragem maior para a validação dos dados, a espacialização dos dados e a aplicação de outras técnicas estatísticas que podem gerar melhores resultados. Ainda, estudos sobre a estimativa de fluxos de CO₂ com a atmosfera e a utilização de modelos, para estimativas atuais e futuras dos estoques de carbono no sistema solo-planta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A. D. et al. Crescimento e distribuição de raízes de capim-annoni-2 e do campo nativo: vantagem competitiva do capim-annoni-2? **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.15, n.1, 2009. p.7-12.

ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres – o caso do cerrado brasileiro**. Documentos. Embrapa Cerrados. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 30p.

AERTS, R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. **Oikos**, v. 79, n. 3, 1997. p. 439-449.

ALEGRE, J. C.; RICSE, A.; AREVALO, L.; BARBARAN, J.; PALM, C. Reservas de carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra en la Amazonia peruana. Consorcio para el desarrollo sostenible de Ucayali. **Boletín Informativo**, n. 12, 2000. p. 8-9.

ALMEIDA, A.C. et al. Estimation of Above-ground Forest Biomass in Amazonia with Neural Networks and Remote Sensing. **IEEE Latin America Transactions**, v. 7, n. 1, 2009. p. 27-32.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de plantas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, 2001, p.189-197.

ANDERSON, L. O.; et al. Monitoramento da resposta fenológica através da utilização de imagens fração derivadas do sensor MODIS. **Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, INPE. Goiânia, 2005. p. 2811-2818.

ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da cobertura terrestre: fenologia e alterações antrópicas. *In*: B. F. T. Rudorff; Y. E. Shimabukuro; J. C. Ceballos. (Org.). **Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. p. 185-206.

ANDRADE, A. G. de.; TAVARES, S. R. de L.; COUTINHO, H. L. da C. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. **Informe agropecuário**, v.24, n.220, 2003. p. 55-63.

ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R. Degradação Ambiental e Teoria Econômica: Algumas Reflexões sobre uma “Economia dos Ecossistemas”. **EconomiA**, v.12, n.1, 2011. p.3–26.

ARAGÃO, L. E. O. e C. de; SHIMABUKURO, Y. E. **Perspectivas para o estudo da biogeoquímica do carbono em macro-escala integrando diferentes técnicas: modelagem ecológica, sensoriamento remoto e SIG**. Relatório Técnico, INPE: São José dos Campos, 2004.

ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL. 2012. Características do território. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas>>. Acesso em: 19 jul. 2012.

AZOFEIFA, G. A. S. et al. Monitoring carbon stocks in the tropics and the remote sensing operational limitations: from local to regional projects. **Ecological Applications**, v. 19, n. 2, 2009. pp. 480–494.

BAEZA, S.; PARUELO, J. M.; ALTESOR, A. Caracterización funcional de la vegetación del Uruguay mediante el uso de sensores remotos. **Interciencia**, v.31, 2006. p. 382-388.

BAJRACHARYA, S. **Community Carbon Forestry: Remote Sensing of Forest Carbon and Forest Degradation in Nepal**. Thesis (Master of Science) International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Netherlands, 2008. 92 p.

BAPTISTA, G. M. de M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e Hyperion. **Anais... XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, Belo Horizonte, 2003. p. 1037-1044.

BARBIERI, C. W. **Utilização de dois intervalos de descanso entre pastoreios em pastagem natural com novilhas de corte na estação quente**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013, 97f.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**. v. 47, 1996. p. 151-163.

BATJES, N.H.; SOMBROEK, W.G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. **Global Change Biology**, v. 3, n.2, 1997. p. 161–173.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIM NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.53, 2000. p.101-109.

BAYER, C.; MIELNICZUCK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F.A. de O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. cap.2, p.9-26.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003. 110 p.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**. v. 72, 2002. p. 693 – 701.

BETTOLLI, M. L.; et al. Pastura natural de salto (Uruguay): relación con la variabilidad climática y análisis de contextos futuros de cambio climático. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, 2010. p.248 - 259.

BISSO, A. B. A. et al. Análise da variação da resposta espectral da vegetação do bioma pampa, frente às variações da fenologia. In: XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia (CBA), 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2009. Artigos. CD-ROM.

BOCHNER, J. K. et al. Matéria Orgânica e agregação de um planossolo sob diferentes coberturas florestais. **Cerne**, v. 14, n. 1, 2008. p. 46-53.

BOLDRINI, I.I. **Boletim do Instituto de Biociências: campos do Rio Grande do Sul, caracterização fisionômica e problemática ocupacional**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 39 p.

BOLDRINI, I.I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V.P.; MÜLLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M.S.; JACQUES, A.V.A. (ed). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. 403p.

BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M.; FERREIRA, M. C. Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas agroflorestais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.47, n.9, 2012. p.1261-1269.

BOMBELLI, A. et al. An outlook on the Sub-Saharan Africa carbon balance. **Biogeosciences**, 6, p. 2193–2205, 2009.

BORK, E.W. et al. Rangeland cover component quantification using broad (TM) and narrow-band (1.4 nm) spectrometry. **Journal of Range Management**, v.52, n.3, 1999. p.249-257.

BROWN, S.; LUGO, A.E. The Storage and Production of Organic Matter in Tropical Forests and Their Role in the Global Carbon Cycle. **Biotropica**, v. 14, n. 3, 1982. p. 161-187.

BURROUGH, P. A., R. McDONNELL. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, 1998. 333 p.

BUSTAMANTE, M.M.C. et al. Os impactos potenciais das mudanças climáticas no funcionamento biogeoquímico dos ecossistemas de cerrado. **Brazilian Journal Biology**, v.72, n.3, 2012. p. 655-671.

BUSTAMANTE, M. M. C.; OLIVEIRA, E. L. Impacto das atividades agrícolas, florestais e pecuárias nos recursos naturais. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. (ed). **Savanas: Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Quantificação de serrapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. **Ciências Agrárias**, v. 29, n. 1, 2008. p. 53-68.

CALEGARI, A. **Seqüestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo argiloso do Sul do Brasil**. 2006. 191p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 264p.

CALVI, G. P.; PEREIRA, M. G.; ESPÍNDULA JÚNIOR, A. Produção de serrapilheira e aporte de nutrientes em áreas de floresta Atlântica em Santa Maria de Jetibá, ES. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, 2009. p. 131-138.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Princípios Básicos em Geoprocessamento. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. **Sistema de Informação Geográfica**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA – SPI/EMBRAPA – CPAC, 1998.

CAMARGO, C.G.E.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise Espacial de Superfícies. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (Ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CARLESSO, R.; SPOHR, R. B. ; ELTZ, F. L. F. ; KNIES, A. E. ; FIORIN, T. T. . Estimativa do escoamento superficial no sul do Brasil: modelo modificado de Smith e número da curva (USDA-SCS). In: Seminário Técnicas de Riego e Fertirriego, 2007, Cuenca, Equador. **Anais...** v. 1, 2007. p. 1-15.

CARVALHO, P. C. de F.; FISCHER, V.; SANTOS, D. T. dos; RIBEIRO, A. M. L.; Produção animal no bioma Campos Sulinos. **Revista Brasileira de Zootecnia / Brazilian Journal of Animal Science**, Viçosa, v. 35, n. Sup. Esp.,p. 156-202, 2006.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. de A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.3, n.1,2008. p.20-25.

CHEVALLIER, F. et al. African CO emissions between years 2000 and 2006 as estimated from MOPITT observations. **Biogeosciences**, v. 6, 2009. p. 103–111.

COELHO, F. F.; GIASSON E. Comparação de métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, vol.40, n.10, 2010. p. 2099-2106.

CONANT, R.T., PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. **Ecological Applications**, v. 11, 2001. p. 343-355.

CONTE, O. et al. Densidade, agregação e frações de carbono de um argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, 2011. p. 579-587.

CORRAZA, E.J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, 1999. p. 425-432.

COSTA, F. de S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, 2008. p. 323-332.

COUTO, D. L. N. **Albedo em cerrado sensu stricto como resposta à variação climática e biológica – conexões com índice de vegetação, estoques de carbono e fluxos de CO₂**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo / USP, São Paulo, 2009.

CRUICKSHANK, M. M.; TOMLINSON, R. W.; TREW, S. Application of CORINE land-cover mapping to estimate carbon stored in the vegetation of Ireland. **Journal of Environmental Management**, v. 58, n. 4, 2000. p. 269-287.

DONG, J. et al. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, 2003. p. 393–410.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, 1995. p.529-538.

ESCOSTEGUY, C. M. D. **Avaliação agronômica de uma pastagem natural sob níveis de pressão de pastejo**. 1990. 231 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

FARIA, A. F. G. et al. Influência do manejo do solo nas propriedades químicas e físicas em topossequência na bacia do rio Araguaia, estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, 2010. p.517-524.

FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M.; FILHO, N. L.; RODRIGUES, F. J.; ROBINSON, J. M. Tropical forest burning in Brazilian Amazonia: measurement of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Altamira, Pará. **Forest Ecology and Management**. v. 123, n.1, 1999. p. 65-79.

FEARNSIDE, P. M.; GUIMARÃES, W. M. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazônia. **Forest Ecology and Management**, 80, 1996. p. 35-46.

FEREZ, A. P. C. **Efeito de práticas silviculturais sobre as taxas iniciais de seqüestro de carbono em plantios de restauração da Mata Atlântica**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo / USP, Piracicaba, 2010. 108p.

FERREIRA, L. G., et. al. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, v. 87, 2003. p. 534–550.

FIDELIS, A.; MÜLLER, S. C.; PILLAR, V. D.; PFADENHAUER, J. Influência do fogo na biomassa aérea e subterrânea dos Campos Sulinos. In: Anais da XXI Reunião do Grupo Técnico em Forrageiras do Cone Sul-Grupo Campos. Desafios e oportunidades do Bioma Campos frente a expansão e intensificação agrícola. Documentos 166, Pelotas, EMBRAPA. 2006.

FISHER, M.J. et al. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. **Nature**, v. 371, 1994. p. 236-238.

FONSECA et al. Quantificação de biomassa acima do solo para Pradarias naturais no bioma dos Pampas. In: Maathuis, B. H. P.; Mannaerts, C. M. (Org.). GEONETCast – DevCoCast: Manual de Aplicações. Enschede: Faculty ITC, 2011. cap. 2, p. 35-46.

FONSECA, E. L.; SILVEIRA, V. C. P.; SALOMONI, E. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa incidente em biomassa aérea da vegetação campestre natural no bioma Campos Sulinos do Brasil. **Ciência Rural**, v.36, n. 2, 2006. p.656-659.

FRIEDLINGSTEIN, P.; CADULE, P.; PIAO, S. L.; CIAIS, P.; SITCH, S. The African contribution to the global climate-carbon cycle feedback of the 21st century. **Biogeosciences**, v. 7, 2010. p. 513-519.

GAMON, J. A. et al. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in there Californian vegetation types. **Ecological Applications**, v. 5, n. 1, 1995. p. 28-41.

GANG, C. et al. The Comparisons of Carbon Sink/Source of Chinese Grassland Ecosystem Using Different Approaches. **IEEE**, 2011.

GARAGORRY, F. C. **Alternativas de manejo de pastagem natural submetida a pastoreio rotativo**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, 2012, 210f.

GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Vol. 4, No. 1, 1965.

GIAROLA, N. F. B. et al. Relações entre propriedades físicas e características de solos na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, 2002. p. 885 - 893.

GIFFORD, R.M. The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink. **Journal Plant Physiology**, v.21, 1994. p. 1-15.

GIRARDI-DEIRO, A.M.; GONÇALVEZ, J.O.N; GONZAGA, S.S. Campos naturais ocorrentes nos diferentes tipos de solo no Município de Bagé, RS. 2: Fisionomia e composição florística. **Iheringia**, série botânica, v.42, n.1, 1992. p.55-79.

GOMES, K.E. **Dinâmica e produtividade de uma pastagem natural do Rio Grande do Sul após seis anos de aplicação de adubos, diferimentos e níveis de oferta de forragem**. Tese de doutorado. UFRGS: Porto Alegre, 1996. 225p.

GONÇALVES, E. N.; CARVALHO, P. C. F. Como a estrutura do pasto afeta a ingestão de forragem numa pastagem natural? In: REUNIÃO DO GRUPO TÉCNICO EM FORRAGEIRAS DO CONE SUL GRUPO CAMPOS, 21., 2006, Pelotas. **Anais...** Pelotas: GTFCSGC, 2006. (CD-ROM).

GOULART, A. C. de O.; MONTEIRO, J. M. G. Estoque carbono na biomassa acima do solo de pastagens e serrapilheira em São José de Ubá, estado do Rio de Janeiro. IV Congresso Florestal Paranaense. 2012. Disponível em: <http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Arquivos_HTML/4-Trabalhos-01.htm>. Acesso em: nov. 2012.

GRACE, J. et al. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography**, v. 33, 2006, p. 387–400.

GRILO, D.C. et al. Mapeamento do fluxo de CO₂ em ambientes de caatinga e de sistemas agropecuário por meio de imagens orbitais. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE. **Anais...** Curitiba, 2011. p.1682 - 1689.

GRISE, M. M. **Partição da biomassa e de nutrientes na pastagem de Bahiagrass cv. Pensacola em diferentes sistemas de manejo com novilhos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

HALL, D.O., RAO, K.K. **Photosynthesis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 211p.

HASITUYA et al. Spatial and temporal variation of biomass carbon stocks in Xilingol grassland. International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), China, 2013.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J. dos; RIBEIRO, R.J.; PINTO, A.C.M.; SILVA; R.P. da; ROCHA, R.M.; TRIBUZY, E.S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, v. 34, n. 3, 2004, p. 295-304.

HOUGHTON, R.A. Why are estimates of the terrestrial C balance so different? **Global Change Biology**. v. 9, 2003, p. 500 – 509.

HUETE, A., et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, 2002. p. 195-213.

INSTITUTO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA (Brasil). **Ecossistemas Brasileiros – Campos Sulinos**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/ecossistemas/campos_sulinos.htm>. Acesso em: 08 dez. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapa da Vegetação do Brasil. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_impresao.php?id_noticia=169>. Acesso em: 19 out. 2012.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). 2012. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/biomas-brasileiros/pampa>>. Acesso em: 05 out. 2012.

IPCC – Painel Intergovernamental Sobre Mudanças do Clima. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report**, 2001. Disponível em <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/>.

IPCC – Painel Intergovernamental Sobre Mudanças do Clima. **Mudança do Clima 2007: A Base das Ciências Físicas – Sumário Para os Formuladores de Políticas**. 2007.

JACQUIN, A., SHEEREN, D., LACOMBE, J.P. Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, n. 1, 2010, p. S3–S10.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: Epiphany, J. C. N. et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JUSTICE, C. O.; et al. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, vol. 36, n. 4, 1998.

KAUFFMANN, J. B.; CUMMINGS, D.L.; WARD, D.E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. **Journal of Ecology**, v. 82, 1994, p. 519 – 531.

KORN, H. et. al. Opções de mitigação e de adaptação a mudança climática: conexões com a biodiversidade e impactos sobre a biodiversidade. *In: Inter-relações entre biodiversidade e mudanças climáticas*. Tradução: Ana Lúcia Lemos de Sá. Brasília: MMA, 2007. cap. 4, p. 79-137.

KUNKEL, M. L. et al. A simplified approach for estimating soil carbon and nitrogen stocks in semi-arid complex terrain. **Geoderma**, v. 165, 2011, p. 1–11.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**. v. 123, n. 1-2, 2004, p. 1- 22.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima artes e textos, 2000. 531p.

LEE, R.; et al. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 12, p. 2505-2512, 2002.

LEHSTEN, V. et al. Estimating carbon emissions from African wildfires. **Biogeosciences**, v. 6, 2009, p. 349–360.

LEMAIRE, G., CHAPMAN, D. Tissue flows in grazed plant communities. *In: The ecology and management of grazing systems*. Walingford: UX CAB International, 1996, p.3-36.

LEMOS, A. L. F.; VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU. **BNDES Setorial**, v. 32, 2010, p. 153-192.

- LIANG L.; SCHWARTZ M.D. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. **Landscape Ecology**, v. 24, 2009. p. 465-472.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Photo Interpretation**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.
- LOPES, J. F. B. et al. Deposição e decomposição de serrapilheira em área da Caatinga. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 3, n. 2, p. 72-79, 2009.
- LOSS, A. et al. Quantificação do carbono das substâncias húmicas em diferentes sistemas de uso do solo e épocas de avaliação. **Bragantia**, v. 69, n. 4, 2010, p. 913-922.
- LUIZÃO, R.C.C.; COSTA, E.S.; LUIZÃO, F.J. Mudanças na biomassa microbiana e nas transformações de nitrogênio do solo em uma sequência de idades de pastagens após derruba e queima da floresta na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 29, n. 1, p. 43-56, 1999.
- MACHADO, L.A.Z. **Manejo da pastagem nativa**. Guaíba: Agropecuária, 1999. 158 p.
- MACHADO, P.L.O.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, 329-334, 2005.
- MALCON, J.R.; PITELKA, L.F. **Ecosystems & Global Climate Change: A Review of Potential Impacts on U.S. Terrestrial Ecosystems and Biodiversity**. Pew Center on Global Climate Change. 2000.
- MALHI, Y. et al. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 15, 2009. p. 1255–1274.
- MALHI, Y. et al. Regional variation of above-ground live biomass in old-growth Amazonian forests. **Global Change Biology**, v.12, 2006. p. 1–32.
- MARENCO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade - caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. v.1, p.214.
- MARKZ, E. et al. Conservation of soil organic carbon, biodiversity and the provision of other ecosystem services along climatic gradients in West Africa. **Biogeosciences**, 6, p.1825–1838, 2009.
- MARTINS, C. R., PEREIRA, P. A. de P., LOPES, W. A., ANDRADE, J. B. de . Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a Importância na Química da Atmosfera. **Química Nova**, v.5, n.3, 2003.

MARTINS, S.V.; RODRIGUES, R.R. Produção de serrapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, v.22, n.3, p. 405-412, 1999.

MERBOLD, L., et al. Precipitation as driver of carbon fluxes in 11 African ecosystems. **Biogeosciences**, 6, 1027-1041, 2009.

MIRANDA, D.L.C. et al. Biomassa e Carbono em *Euterpe oleracea* Mart., na Ilha do Marajó – PA. **Floresta e Ambiente**, v.19, n.3, 2012. p. 336-343.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Áreas Prioritárias para Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira: Atualização** - Portaria MMA nº9, de 23 de janeiro de 2007. / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Brasília: MMA, 2007. (Série Biodiversidade, 31).

MOREIRA, A. et al. Análise Combinada de Séries Temporais de NDVI, Temperatura do Ar e Precipitação Pluvial sobre Pastagem Nativa em Santa Maria, RS. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, Edição Esp., 2013. p. 051 – 053.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2005.

MÜLLER FILHO, I. L. **Notas para o Estudo da Geomorfologia do Rio Grande do Sul, Brasil**. Publicação Especial nº1. Santa Maria, Imprensa Universitária, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970, 34p.

NABINGER, C. MORAES, A. MARASCHIN, G.E. **Campos in southern Brazil**. In: LEMAIRE, G. et al. (eds) *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. Cambridge: CABI Publishing, 2000. p.355-376.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Disponível em <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 10 nov.2012.

NEVES, F. P. et al. Caracterização da estrutura da vegetação numa pastagem natural do Bioma Pampa submetida a diferentes estratégias de manejo da oferta de forragem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.9, 2009, p.1685-1694.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989. 422p.

NOBEL, P.S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. London: Academic Press, 1999. 474p.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, n. 12, 2001, p. 239-258.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3 ed. Edgard Blücher, 2008.

ODUM, E. P. **Basic Ecology**. Saunders college publishing. 1983. 613p.

OLIVEIRA, M.S.; FIDELIS, A.; MÜLLER, S.C. Avaliação da biomassa aérea e subterrânea dos campos sulinos. **Anais ... IX Congresso de Ecologia do Brasil**, 2009, São Lourenço – MG.

OLIVEIRAS, I. et al. Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. **Austral Ecology**, 2013. p. 1-7.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Protocolo de Quioto: Convenção sobre a mudança do clima**. Tradução: Ministério da Ciência e Tecnologia, 1998, p. 29.

OVERBECK, G. E. et al. Brazil's neglected biome: The South Brazilian Campos. Perspectives in Plant Ecology, **Evolution and Systematics**, v.9, n. 1, 2007, p. 101-116.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em cerrado sensu stricto do Distrito Federal. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, 2011, p. 527-538.

PARTON, J. M. O. et al. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. **Global Change Biology**, v. 1, 1995, p. 13 – 22.

PARUELO, J.M. et al. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. **Applied Vegetation Science**, v.3, 2000. p. 189-195.

PARUELO, J.M., JOBBÁGY, E.G.; SALA, O.E. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. **Ecosystems**, v.4, 2001. p. 683-698.

PARUELO, J.M. et al. Carbon stocks and fluxes in rangelands of the Río de la Plata Basin. **Rangeland Ecology & Management**. v. 63, n. 1, p. 94-108, 2010.

PETTORELLI, N., et. al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **TRENDS in Ecology and Evolution**, v.20, n.9, 2005. p. 1-8.

PIAO, S. et al. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 21, p.1-10, 2007.

PILLAR, V.D; TORNQUIST, C.G; BAYER, C. Campos do sul do Brasil: estoques de carbono no solo, fluxos de gases de efeito estufa e algumas opções para mitigação. **Brazilian Journal Biology**. v. 72, n.3, p. 673-681, 2012.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

PULROLNIK, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, 2009. p. 1125-1136.

RAMANKUTTY, N. et. al. Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. **Global Change Biology**, v. 13, 2007. p. 51–66.

RAMBO, B. **A Fisionomia do Rio Grande do Sul: ensaio de monografia natural**. 3.ed. São Leopoldo: Ed UNISSINOS, 2005.

RATANA, P.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. Analysis of Cerrado Physiognomies and Conversion in the MODIS Seasonal-Temporal Domain. **Earth Interactions**, v. 9, n. 3, 2005. p. 1-22.

REZENDE, A. V. et al. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado sensu stricto em Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, n. 71, 2006, p. 65-76.

RIBEIRO, S. C. et al. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da zona da mata mineira. **Revista Árvore**, v.34, n.3, 2010, p.495-504.

ROHDE, G. M. **Epistemologia ambiental: uma abordagem filosófico-científica sobre a efetuação humana alopoiética da Terra e seus arredores planetários**. 2.ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2005. 407p.

ROSCOE, R. Rediscutindo o papel dos ecossistemas terrestres no seqüestro de carbono. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 20, n. 2, 2003. p. 209-223.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J.; PEREIRA, J.A.A. Effects of fire on soil organic matter in a “cerrado sensu stricto” from Southeast Brazil as revealed by changes in d13C. **Geoderma**, v. 95, 2000, p. 141-160.

RUNNING, S. W. et al. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. **Remote Sensing Environment**, v. 70, 1999. p. 108-127.

SALMAN, A. K. D.; SOARES, J. P. G.; CANESIN, R. C. **Métodos de amostragem para avaliação quantitativa de pastagens**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, Circular Técnica 84, 2006. 6 p.

SALTON, J.C. et al. Atributos físicos de um Argissolo sob pastagem natural após 18 anos sob diferentes níveis de ofertas de forragem. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 7, 2008. p. 107-118.

SALTON, J; MIELNICZUK, J; BAYER, C; et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, 2008. p. 11-21.

SANTOS, R.D. dos, LEMOS, R.C. de, SANTOS, H. G. dos, KER, J. C., ANJOS, L. H. C. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SARTORI, M.da G. B. A dinâmica do Clima do Rio Grande do Sul: Indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, v.1 n. 20, 2003. pg. 27-49.

SHUMAN, G.E.; REEDER, J.D.; MANLEY, J.T.; HART, R.H.; MALLEY, W.A. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. **Ecological Applications**. v. 9, n. 1, 1999, p. 65 – 71.

SILVA, S. A. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idesia**, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008.

SILVA, J. E.; RESDECK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VILELEA, L.; BARCELLOS, A. Carbon storage under introduced pastures in a clayey oxisol in the cerrado region. In: **Annual Meeting of American Society of Agronomy**. Agronomy Abstracts. Madison, ASA/CRSSA/SSSA, 1997. 303p.

SILVA NETO, S.P. et al. Dependência espacial em levantamentos do estoque de carbono em áreas de pastagens de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Acta Amazonica**. v. 42, n.4, 2012, p.547 – 556.

SILVA, I.F. ; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de planta na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, 1997. p. 113-117.

SILVEIRA, V.C.P. et al. Qualidade da pastagem nativa obtida por diferentes métodos de amostragem e em diferentes solos na APA do Ibirapuitã, Brasil. **Ciência Rural**, v.35, n.3, 2005. p.582-588.

SILVEIRA, V.C.P. et. al. Parâmetros Nutricionais da Pastagem Natural em diferentes tipos de solos na APA do Ibirapuitã, Rio Grande do Sul - Brasil. **Ciência Rural**. , v.36, 2006. p.1896 - 1901.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, 2008, p. 185-206.

SLATER, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980. 575p.

SMITH, P. How long before a change in soil organic carbon can be detected? **Global Change Biology**, v. 10, 2004, p. 1878–1883.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.

SULISTYAWATI, E. et al. Estimation of Carbon Stock at Landscape Level using Remote Sensing: a Case Study in Mount Papandayan. **Environmental Technology and Management Conference. Bandung**, West Java, Indonesia, 2006.

SUN, W. et al. Mapping plant functional types from MODIS data using multisource evidential reasoning. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, 2008. p. 1010-1024.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS, UFRGS, 2008. 222p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Redwood: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1991. 565p.

TAN, Z. et al. Historical and simulated ecosystem carbon dynamics in Ghana: land use, management, and climate. **Biogeosciences**, v. 6, 2009, p. 45–58.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise do solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.A.; COSTA, C.S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1023-1031, 2004.

TORNQUIST, C. G. **Simulação da dinâmica do carbono orgânico do solo em escala regional: aplicação do modelo Century e sistemas de informações geográficas**. Tese (doutorado) em Ciência do Solo - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2007.

TORNQUIST, C.G., GIASSON, E., MIELNICZUK, J., CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M. Soil organic carbon stocks of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, 2009, p. 975-982.

TOWNSEND, C. R.; BEGON, M.; HARPER, J. L. **Fundamentos em Ecologia**. 3.ed. (Trad.) Porto Alegre: Artmed, 2010. 557p.

TRENTIN, C. B. **Análise da resposta espectral da vegetação da Área de Proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã em imagens do sensor EOS/MODIS associadas ao solo e aos elementos do clima**. Dissertação (mestrado) em Sensoriamento Remoto - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2011.

TRUMBORE, S. E.; DAVIDSON, E. A.; CAMARGO, P. B.; NEPSTAD, D. C.; MARTINELLI, L. A. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. **Global Biogeochemical Cycle**, v. 9, n. 4, p. 515-528, 1995.

TRUMPER, K. et al. **The Natural Fix? The role of ecosystems in climate mitigation**. Cambridge: UNEP-WCMC, 2009. 68p.

TUELLER, P.T. Remote sensing of range production and utilization. **Journal of Range Management**, v.54, n.2, 2001. p.A77-A89.

TURNER, D. P.; OLLINGER, S. V.; KIMBALL, J.S. Integrating Remote Sensing and Ecosystem Process Models for Landscape- to Regional-Scale Analysis of the Carbon Cycle. **BioScience**, v. 54, n. 6, 2004. p. 573-584.

VEGA, M. L. B. P. de la. **Fitomonitoração e modelagem de fotossíntese em jatobá (*Hymenaea courbaril L.*) com redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 188p.

VERONA, J. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R. Potencialidade das imagens-fração multitemporais TM/Landsat na caracterização de variações fenológicas em área de floresta tropical na Amazônia. **Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE. Goiânia, 2005. p. 713-720.

VIEIRA, S. **Estatística Experimental**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1999, 185p.

VILLELA, D. M. et al. Estoques e fluxos de carbono e nitrogênio nas zonas costeiras da Mata Atlântica do sudeste do Brasil: potenciais impactos das mudanças climáticas sobre o funcionamento biogeoquímico. **Brazilian Journal Biology**, v.72, n.3, 2012, p. 633-642.

WALTER, H. **Vegetação e zonas climáticas: tratado de ecologia global**. São Paulo: EPU, 1986, 325 p.

WALTERS, C. J.. Ecologia de sistemas: O método dos sistemas e os modelos matemáticos em ecologia. In: ODUM, E. P. (ed). **Ecologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1983, p.323-347.

WANG, J.; PRICE, K. P.; RICH, P. M. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the Central Great Plains. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.11, 2004. p.2345-2364.

WEBER, U. et al. The interannual variability of Africa's ecosystem productivity: a multi-model analysis. **Biogeosciences**, v. 6, 2009, p. 285–295.

WOHLFAHRT, G. et al. Estimating carbon dioxide fluxes from temperate mountain grasslands using broad-band vegetation indices. **Biogeosciences**, v. 7, 2010, p. 683–694.

WOLF, S. et al. Strong seasonal variations in net ecosystem CO₂ exchange of a tropical pasture and afforestation in Panama. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, 2011. p. 1139–1151.

WOODWELL, G. M.; MACKENZIE, F. T.; HOUGHTON, R. A.; APPS, M.; GORHAM, E.; DAVIDSON, E. Biotic feedbacks in the warming of the earth. **Climatic Change**, v. 40, 1998, p. 495-518.

XIA, J., et al. Spatio-Temporal Patterns and Climate Variables Controlling of Biomass Carbon Stock of Global Grassland Ecosystems from 1982 to 2006. **Remote Sensing**, n.6, 2014. p. 1783-1802.

XIE, Z. et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. **Global Change Biology**, v. 13, n. 9, 2007. p. 1987-2007.

YANG, Y. et al. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. **Global Change Biology** v. 15, 2009, p. 2723–2729.

YANG, Y.H.; FANG, J.Y.; TANG, Y.H.; HE, J.S.; JI, C.J.; ZHENG, C.Y; ZHU, B. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. **Global Change Biology**, v. 14, 2008, p. 1592–1599.

ZHAO, F., et al. Remote Sensing Estimates of Grassland Aboveground Biomass Based on MODIS Net Primary Productivity (NPP): A Case Study in the Xilingol Grassland of Northern China. **Remote Sensing**, n.6, 2014. p.5368-5386.